

中图分类号 V255+.5
学科分类号 082304

论文编号: 102870722-S069

硕士学位论文

飞机管道水性阻尼减振涂层材料制备 及减振机理研究

研究生姓名 赵紫豪
学科、专业 载运工具运用工程
研究方向 航空器监测、诊断与健康
管理
指导教师 陈果 教授

南京航空航天大学

研究生院 民航学院

二〇二二年三月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Civil Aviation

**Study on preparation and mechanism of
water-based damping coating for vibration
reduction of aircraft pipeline**

A Thesis in

Vehicle Operation Engineering

By

ZhaoZihao

Advised by

Prof.ChenGuo

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

March, 2022

承诺书

本人声明所呈交的硕士学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名：

日 期：

摘 要

随着飞机性能的逐步提升，飞机管道的振动环境日益恶劣，由管道振动导致的管道泄漏和断裂问题日趋严重，甚至造成灾难性的飞行事故，因此，管道系统的减振问题极其重要，而传统的施加卡箍的减振手段存在如下弊端，1) 受管道实际布局情况的限制；2) 无可避免造成管道系统重量的增加，进而造成飞机运行经济性降低。有鉴于此，本文设计了一种应用于飞机管道的水性阻尼减振涂层材料，其不仅重量远低于金属材料，而且为薄阻尼层，具有适用于飞机内部错综复杂且间隙很小的管道系统减振等优点。本文的主要内容及创新性工作如下：

(1) 利用云母粉作为涂层填料，将具有核壳型互穿网络结构的水性聚氨脂丙烯酸复合乳液作为溶液，辅以数种功能助剂，采用杭州齐威仪器有限公司的 FS-1100DTS 型电动升降立式高速分散机进行高速混合，按照一定工艺流程制备涂层材料；

(2) 利用制备所得的飞机管道水性阻尼减振涂层材料进行无约束层结构和附约束层结构的减振性能试验研究。分别针对喷涂涂层无约束层试验件及喷涂涂层附约束层试验件进行减振试验，以填料目数、填料固体含量、涂层厚度为主要变量，研究试验件共振下的振动加速度，验证所制备的飞机管道水性阻尼减振涂层的有效性和实用性；

(3) 基于 ANSYS 和复合材料层合板理论对飞机管道水性阻尼减振涂层材料减振性能试验和飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层减振性能试验的结论进行了仿真，通过仿真结果与试验数据的对比，验证了仿真模型的准确性和有效性，为后续附阻尼涂层材料的管道动力学分析及疲劳寿命预测提供了基础。

关键词：飞机管道；振动控制；水性阻尼涂层；约束层结构；有限元仿真

ABSTRACT

With the gradual improvement of aircraft performance, the vibration environment of aircraft pipes has become increasingly harsh. The pipeline leakage and fracture problems caused by pipeline vibration are becoming more and more serious, and even cause catastrophic flight accidents. Therefore, the damping problem of the piping system is extremely important. However, the traditional damping method of applying clamps has the following disadvantages: 1) It is limited by the actual layout of the pipeline; 2) It is inevitable that the weight of the pipeline system will increase, and the economic efficiency of the aircraft will be reduced. So this paper designs a water-based damping and vibration-absorbing coating material for aircraft pipelines. It is not only much lower than metal materials, but also has a thin damping layer, which is suitable for damping of the intricate and small gaps of the pipeline system inside the aircraft. The main content and innovative work of this article are as follows:

(1) Mica powder was used as a coating filler, and a water-based polyurethane acrylic composite emulsion with a core-shell interpenetrating network structure was used as a solution, supplemented by several functional additives. The FS-1100DTS electric lifting vertical high-speed disperser from Hangzhou Qiwei Instrument Co., Ltd. was used for high-speed mixing, and the coating material was prepared according to a certain technological process.

(2) The prepared water-based damping and vibration damping coating material for aircraft pipes was used to conduct experimental research on the vibration damping performance of the unconstrained layer structure and the constrained layer structure. Vibration damping tests were carried out on the test specimens with spray coating without constrained layer and the test specimens with spray coating with constrained layer. With filler mesh, filler solid content, and coating thickness as the main variables, the vibration acceleration of the test piece under resonance was studied to verify the effectiveness and practicability of the prepared water-based damping coating for aircraft pipelines.

(3) Based on ANSYS and composite material laminated board theory, the conclusions of the damping performance test of the waterborne damping damping coating material for aircraft pipes and the damping performance test of the waterborne damping damping coating of aircraft pipes with constraining layer were simulated. The comparison between the simulation results and the test data verifies the accuracy and validity of the simulation model, which provides a basis for the subsequent dynamic analysis and fatigue life prediction of pipelines with damping coating materials.

Key Words: Aviation pipeline; Vibration control; Water-based damping coating; Constrained layer structure; Finite element simulation

目 录

摘 要	i
ABSTRACT	ii
图表清单	IV
注释表	VIII
第一章 绪论	1
1.1 研究的背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 管道振动抑制技术研究现状.....	2
1.2.2 阻尼涂层技术研究现状.....	4
1.3 本文的主要研究工作	5
1.4 本文的内容安排	5
第二章 飞机管道水性阻尼减振涂层材料制备	7
2.1 飞机管道水性阻尼减振涂层材料选择依据.....	7
2.2 水性阻尼减振涂层材料的制备.....	8
2.2.1 试验设备.....	8
2.2.2 原材料配比参数.....	9
2.2.3 材料成型工艺.....	10
2.2.4 水性阻尼减振涂层材料制备样品.....	10
2.3 小结	11
第三章 飞机管道水性阻尼减振涂层材料减振性能试验研究.....	12
3.1 单自由度系统共振区减振特性分析.....	12
3.2 试验方案	14
3.2.1 试验目的.....	14
3.2.2 振动试验系统.....	14
3.2.3 试验步骤.....	15
3.3 无水性阻尼减振涂层材料的试验件振动试验研究.....	15
3.4 填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	16
3.5 填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	19
3.5.1 填料固体含量为 20%的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	19
3.5.2 填料固体含量为 40%的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	21
3.5.3 填料固体含量为 60%的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	23

3.5.4 试验小结.....	24
3.6 填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	25
3.6.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	25
3.6.2 填料固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	27
3.6.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	28
3.6.4 试验小结.....	30
3.7 填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	30
3.7.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	31
3.7.2 填料固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	32
3.7.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究.....	34
3.7.4 试验小结.....	35
3.8 小结	36
第四章 飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层减振性能试验研究.....	38
4.1 附约束层减振的基本原理.....	38
4.2 填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究.....	38
4.2.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究.....	39
4.2.2 填料固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究.....	40
4.2.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究.....	41
4.2.4 试验小结.....	43
4.3 填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究.....	44
4.3.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究.....	44
4.3.2 填料固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究.....	45
4.3.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究.....	47
4.3.4 试验小结.....	48
4.4 小结	49
第五章 飞机管道水性阻尼减振涂层仿真研究.....	51
5.1 基于 ANSYS 软件的多材料振动有限元仿真方法.....	51
5.1.1 复合材料层合板理论.....	51
5.1.2 模型建立.....	52
5.1.3 仿真参数设置.....	53
5.2 飞机管道水性阻尼减振涂层仿真研究.....	53
5.2.1 同固体含量同目数的云母粉填料不同涂层厚度仿真	54
5.2.2 同固体含量不同目数的云母粉填料同涂层厚度仿真	55

5.2.3 不同固体含量同目数的云母粉填料同涂层厚度仿真.....	56
5.2.4 仿真小结.....	58
5.3 飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层仿真研究.....	58
5.3.1 填料固体含量为 20%的水性阻尼减振涂层附约束层仿真.....	59
5.3.2 填料固体含量为 40%的水性阻尼减振涂层附约束层仿真.....	60
5.3.3 填料固体含量为 60%的水性阻尼减振涂层附约束层仿真.....	62
5.3.4 仿真小结.....	64
5.4 小结.....	64
第六章 总结与展望.....	66
6.1 全文工作总结.....	66
6.2 论文工作展望.....	67
参考文献.....	68
致 谢.....	74
在学期间的研究成果及发表的学术论文.....	75

图表清单

图 1.1 飞机管道系统失效部位.....	1
图 1.2 总体研究流程图.....	5
图 2.1 电动升降立式分散机.....	8
图 2.2 电热鼓风干燥机.....	9
图 2.3 飞机管道水性阻尼减振涂层材料制备流程图.....	10
图 2.4 喷涂飞机管道水性阻尼减振涂层的试验件.....	11
图 3.1 水性阻尼减振涂层结构.....	12
图 3.2 试验现场图.....	15
图 3.3 振动试验原理框图.....	15
图 3.4 试验件夹具.....	15
图 3.5 无水性阻尼减振涂层试验件试验图.....	16
图 3.6 水性阻尼减振涂层厚度为 0.3MM 的试验件.....	17
图 3.7 水性阻尼减振涂层厚度为 0.8MM 的试验件.....	17
图 3.8 水性阻尼减振涂层厚度为 1.3MM 的试验件.....	18
图 3.9 水性阻尼减振涂层厚度为 1.8MM 的试验件.....	19
图 3.10 填料为 10 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	20
图 3.11 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	21
图 3.12 填料为 10 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	22
图 3.13 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	22
图 3.14 填料为 10 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	23
图 3.15 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	24
图 3.16 填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	24
图 3.17 填料为 40 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	26
图 3.18 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	26
图 3.19 填料为 40 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	27
图 3.20 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	28
图 3.21 填料为 40 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	29
图 3.22 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	29
图 3.23 填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	30
图 3.24 填料为 400 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	31

图 3.25 喷涂填料为 400 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	32
图 3.26 填料为 400 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	33
图 3.27 喷涂填料为 400 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	33
图 3.28 填料为 400 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	34
图 3.29 喷涂填料为 400 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	35
图 3.30 填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验件.....	36
图 4.1 水性阻尼减振涂层附约束层结构.....	38
图 4.2 填料为 10 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	39
图 4.3 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	40
图 4.4 填料为 10 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	40
图 4.5 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	41
图 4.6 填料为 10 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	42
图 4.7 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	42
图 4.8 填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	43
图 4.9 填料为 40 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	44
图 4.10 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	45
图 4.11 填料为 40 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	46
图 4.12 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	46
图 4.13 填料为 40 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	47
图 4.14 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	48
图 4.15 填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件.....	48
图 5.1 有限元分析流程图.....	51
图 5.2 试验件有限元模型.....	52
图 5.3 试验件实际模型.....	52
图 5.4 填料为 400 目固体含量为 20%的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层仿真试验对比.....	55
图 5.5 填料固体含量为 40%的云母粉制得的 0.6MM 厚飞机管道水性阻尼减振涂层仿真试验对比.....	56
图 5.6 填料为 40 目云母粉制得的 0.6MM 厚飞机管道水性阻尼减振涂层仿真试验对比.....	57
图 5.7 填料为 10 目固体含量为 20%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比.....	59
图 5.8 填料为 10 目固体含量为 40%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比.....	60

图 5.9 填料为 40 目固体含量为 40%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比	61
图 5.10 填料为 10 目固体含量为 60%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比	63
图 5.11 填料为 40 目固体含量为 60%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比	64
表 2.1 飞机管道水性阻尼减振涂层材料制备原材料.....	9
表 2.2 飞机管道水性阻尼减振涂层材料制备基础配方.....	9
表 3.1 填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	19
表 3.2 填料为 10 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	20
表 3.3 填料为 10 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	22
表 3.4 填料为 10 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	24
表 3.5 填料为 40 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	26
表 3.6 填料为 40 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	27
表 3.7 填料为 40 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	29
表 3.8 填料为 400 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	31
表 3.9 填料为 400 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	33
表 3.10 填料为 400 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据.....	35
表 4.1 填料为 10 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据..	39
表 4.2 填料为 10 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据..	41
表 4.3 填料为 10 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据..	42
表 4.4 填料为 40 目云母粉固体含量为 20%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据..	44
表 4.5 填料为 40 目云母粉固体含量为 40%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据..	46
表 4.6 填料为 40 目云母粉固体含量为 60%制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据..	48
表 5.1 模型材料参数.....	53
表 5.2 填料为 400 目固体含量为 20%的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层仿真参数设置	54
表 5.3 填料固体含量为 40%的云母粉制得的 0.6MM 厚飞机管道水性阻尼减振涂层仿真参数设置	55
表 5.4 填料为 40 目云母粉制得的 0.6MM 厚飞机管道水性阻尼减振涂层仿真参数设置.....	57
表 5.5 填料为 10 目固体含量为 20%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置	59
表 5.6 填料为 10 目固体含量为 40%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置	

.....	60
表 5.7 填料为 40 目固体含量为 40% 的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置	
.....	61
表 5.8 填料为 10 目固体含量为 60% 的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置	
.....	62
表 5.9 填料为 40 目固体含量为 60% 的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置	
.....	63

注释表

t	时间变量	P_0	激振力幅
m	等效质量	ω	激振频率
ζ	相对阻尼系数	ω_n	固有频率
\bar{x}	稳态响应的复振幅	λ	频率比
x_0	最大位移	c	阻尼系数
β	振幅放大因子	Q^{def}	品质因子
β_v	速度振幅放大系数	$\Delta\lambda^{def}$	半功率带宽
f_1	半功率频率 A	f_2	半功率频率 B
a_{cA}	涂层面加速度最大幅值	a_{cE}	涂层面加速度最大有效值
λ_c	涂层面减振效果	a_{mA}	金属面加速度最大幅值
a_{mE}	金属面加速度最大有效值	λ_m	金属面减振效果

第一章 绪论

1.1 研究的背景及意义

飞机管道系统的作用是维持飞机的运行，飞机在运行过程中，外部激励不可避免地会刺激管道系统的振动，从而导致管道破裂和疲劳失效^[1,2]。飞机管道的过度振动不仅会影响飞行安全，而且由于近年飞机性能的逐步提升^[3,4]，将会使其发展成为更加严重的问题。而由于泵源供油的不连续性，飞机管道内的油液压力波动较大，当管道内流体波动频率与充液管道的固有频率达到一样时，管道系统的振动将会急剧升高，这极易造成飞行事故。

飞机管道系统广泛存在于飞机内部，由于空间限制，管道存在大量相互交叉的情况，且管道与相邻附件的间隙一般很小。而与一般管道系统相比，飞机管道系统有较为特殊的情况^[5]：

(1) 飞机管道系统分布范围极广，其长度可达到数百米以上；

(2) 飞机管道系统布置十分复杂，而空间则因为飞机结构极为狭窄；

(3) 高压变量轴向柱塞泵在当前飞机管道系统中较为常见，且其流体压力值已达到 35Mpa，而脉动流量输出引起管道系统内流体压力的剧烈波动，从而引起剧烈的管道振动；

(4) 飞机发动机和飞机机体本身的振动剧烈，飞机管道受工作环境影响严重。

据美国统计，燃油、空气和液压等飞机管道系统的故障占飞机部件故障总数的 50%~60%。而俄罗斯飞机的统计数据同样显示，燃油、滑油和液压等飞机管道系统的故障也占飞机故障总数的 50% 以上^[6-8]。飞机管道系统的发生故障的主要形式是过量振动及振动疲劳^[9]。过量振动主要是因为管道由于流体或是基础激励而导致共振，直接引起管道固定件与固定部位接合面产生较大位移，从而造成表面摩擦或者损坏。而管道系统的振动疲劳一般指的是管体、管接头以及卡箍等部件在工作环境下长时间工作而形成累积损伤，再经过一定次数的循环而引起裂纹扩展和断裂。飞机管道系统常见的失效部位如图 1.1 所示，主要为管体本身、管道与管接头接合面以及卡箍。

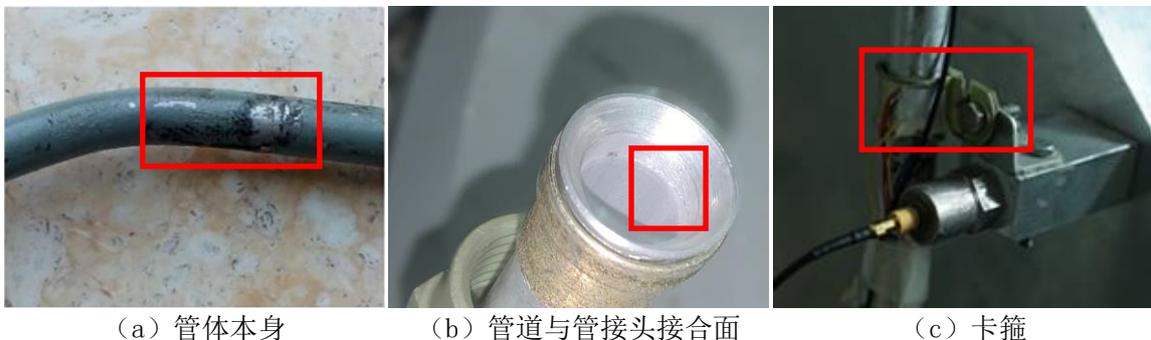


图 1.1 飞机管道系统失效部位

由此可见，飞机管道系统的振动问题一直困扰着飞机设计人员，也严重影响了飞行安全，

而在设计制造过程中，由于飞机管道的设计标准以及安装空间的限制，飞机管道系统的振动问题仍存在很多问题。因此，有必要研究一种飞机管道水性阻尼减振涂层材料，从而有效降低管道系统的振动，这对于有效控制飞机管道系统故障、提高其安全性和可靠性，具有极其重要的理论意义和工程实用价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 管道振动抑制技术研究现状

普通输流管道的振动抑制技术国内外研究成果较多，且对其振动机理的研究已相对成熟。普通输流管道的振动主要归结为四种原因：系统流固耦合问题、受外部激励、由于设计原因而导致的系统结构共振以及由于装配异常而导致的振动。其中系统流固耦合问题又可细分为：管道内流体发生湍流而导致自激振动，此在大管径如海洋弹性管等比较常见^[10,11]；管道内流体流速增加导致管道系统的固有频率降低，达不到原有设计要求，进而与振动源产生共振引起振动增大，此在小管径如压缩机管道、输油泵进出口管道等比较常见^[12-15]。相关的研究成果如下：

近年来对普通输流管道的振动研究仍主要为系统流固耦合问题，对其分析集中于振动特性分析与优化，其中李欢^[16]采用流固耦合理论和方法对输流直管和不同弯度输流弯管的振动特性进行对比研究，并分别对直管和弯管管道进行了约束振动控制研究。肖斌^[17]针对管内流体激励引起的结构振动问题，考虑单向流固耦合作用，通过引入附加质量分析内流速对结构振动特性的影响。张春晋^[18]对管道流场和管道双车结构响应进行联合求解，并分析了管道双车在平直管道振动位移的水性特性。Yao^[19]针对于两相流等效密度法忽略了管道内颗粒碰撞和堆积对流体流动和管道振动的影响，而首次提出了流体-粒子-管道多场耦合分析方法来分析两相流引起的管道振动。Wu^[20]采用具有流体与结构间数据交换的瞬态流固耦合方法研究了管道结构与内部气流相互作用下的管道自激振动。Kiryukhin^[21]首次通过液体对管道补偿器的振动传递进行了计算和试验研究，证明随着频率的增加，结构共振的影响以及工作介质脉动与结构的相互作用使通过补偿器的振动传输增加了两到三个数量级或更多。Heshmati^[22]研究了由具有功能梯度孔隙率的多孔材料制成的弹性管道在流体流动影响下的动态响应，并研究了流体流速对多孔弹性管道动态响应的影响。Maxit^[23]针对由内部湍流引起的管道振动的空间相干性，建立了一个半解析模型，该模型适用于充满重流体并由内部 TBL 激发的无限圆柱壳。Cheng^[24]则对航空直管道和 L 形管道的振动特性进行了试验和仿真研究，并研究了流体类型、压力和温度对管道特性的影响。

而对于普通输流管道受外部激励的研究国内研究较多，其中胡效东^[25]研究了管外流体对管道振动特性的影响，张海涛^[26]发现往复式压缩机管道频繁出现故障的原因主要是气流压力脉动在管道处的冲击振动，龙海涛^[27]模拟了水利工程中压力管道在持续性简谐外激励下的自振特性

和动力响应,刘玉柱^[28]确定了航空液压管道振动异常与外部激励有关,Yamashit^[29]研究了悬臂管输送流体在不稳定振动模式下的相互作用。而针对由于设计原因而导致的系统结构共振,方军^[30]提出管路的压力脉动频率、管路内气柱的固有频率、管道的固有频率重合时,易产生振动,建设新天然气线路时,需仔细校核新管道输送线路对已有管道输送线路的影响,避免出现振动现象。而由于装配异常而导致的振动主要出现在高压管道,刘鑫^[31]提出压力管道应避免因安装等导致的振动,且防止管道焊缝失效,输送介质泄露。崔向敏^[32]针对航空发动机外部管路支架在整机试车中发生的断裂故障,发现裂纹萌生的原因主要是支架结构尺寸设计不合理,加上振动应力、装配应力及加工质量不符合要求综合所致。而南京航空航天大学陈果团队^[33-37]则发现飞机管道连接件的装配偏差对其的振动特性以及密封性能会造成极大的影响。

针对上述输流管道的振动问题,目前管道系统的振动抑制技术主要分为被动抑制技术和主动抑制技术两类:

(1) 被动抑制技术在当前管道系统的振动抑制技术中仍为主流,且其又可分为两类:

a) 修改设计方案如增大联通管线的管径、增加管道支撑、修改管型等等来抑制振动。刘恩斌^[38]为解决某压气站管道异常振动问题,增加联通管线的管径以减小流体激振力,从而使得减振效率最大达到了95%。张子祥^[39]通过振动模态试验与模型修正研究了充液管道弹性约束的优化,王野平^[40]以贴面压机加压管道为例,对其管夹约束进行了优化。而蔡锐^[41]利用有限元分析软件 CAESAR 对管道进行静力学及动力学模态分析,并结合核电厂机组主蒸汽平衡管线振动状态监测,确定采取增加管系系统刚度的方法来控制主蒸汽平衡管线的低频振动,防止管线断裂。Li^[42]针对某燃气压缩机站,通过缩短管道长度以避免声共振,增加集流管的体力以缓解压力脉冲,并增加支撑以增加刚度。Wu^[43]针对压缩机运行中连接管道经常发生振动的情况,通过对管道结构的改造,减小了振动,从而保证设备和管道的安全。

b) 在管道本体上布置阻尼较大的部件以实现减振。当前应用较广的是增加粘滞阻尼器,王元兴^[44]通过安装粘滞阻尼器的方式解决了高压配气间管道系统工作时发生的剧烈振动问题,张俎琛^[45]通过实际考察,分析了管线系统的振动原因,并经过研究发现在管道系统上施加粘滞阻尼器可有效控制设备管线振动,范文强^[46]针对某化工厂分馏装置换热器至初馏塔管道的振动超标问题,采用了粘滞阻尼器,其可以在设备不停机的情况下有效吸收振动能量,控制管道的振动,同时不会改变管道的原有支撑结构,也不会引起临近管线的振动。余栋栋^[47]针对沧州某石化企业管线的振动问题,应用新型粘滞阻尼器,将管线振动最大处的振幅减小了80%。Xue^[48]研究了阻尼器对管道支架系统的非线性动力学特性,为配备阻尼结构的管道振动系统的动力学计算提供了一种替代方法。除粘滞阻尼器外,仍有一些新式阻尼器得到了应用,丁继超^[49,50]设计了一种整体式挤压油膜阻尼器并分析其刚度影响规律,

并针对山东某石化企业从热交换器到二套加氢分馏塔的进料管道振动剧烈问题, 搭建了新的框架安装蜂窝型阻尼器之后, 进料管道振幅平均降幅超过 90%, 王硕^[51]同样采用蜂窝型阻尼器将石家庄炼化酸循环管线的振动降幅达到 89%。Kavianipour^[52]研究了被动电磁阻尼器对管道输流的影响, 其功能主要是降低因流体流速引起的管道振动幅值, 并将耗散的能量转换为电能。此外当前在管道外粘贴高阻尼材料同样是一种新方向, 但相关研究却较少, 林磊^[53]通过试验研究锰铜阻尼合金板对管道壳壁宽频振动的缓解作用。

(2) 主动控制技术是指利用传感元件获取管路的振动信息, 然后利用作动元件对管路进行振动控制, 在国内外研究应用较少, 是管道抑制技术的一种新思路。陈钊^[54]采用主动阻尼装置, 通过惯性作动器向振动管道系统施加作动力, 实现了对管道振动的主动控制。Ji^[55]通过磁流变减振技术, 通过主动测控平台实现了对管道振动的主动控制。

而飞机管道系统由于其特殊性, 目前采用的振动抑制技术仍是优化管型和施加卡箍。优化管型主要应用在最初的设计阶段, 大多数情况只能凭借经验设计管道而没有一套成熟的设计规范, 这使得如果在实际飞行中发现振动过大, 需要消耗极大的人力物力来重新设计生产。而施加卡箍是当前管道系统振动抑制技术中运用最广泛的方式, 但是这无可避免的造成管道系统重量的增加, 从而造成导致经济性的降低, 更重要的是, 在某些狭窄空间中都难以找到卡箍适合的位置, 且由于安装因素或外界环境振动的影响, 管道系统中卡箍松动的可能性较大^[56]。因此亟需寻求另外的减振方法。

1.2.2 阻尼涂层技术研究现状

材料阻尼技术是近几十年来发展的新技术, 不仅是控制结构共振最有效的方法, 同时也是解决减振问题的重要手段。对于解决工程中的振动问题的十分有效。随着阻尼技术的日渐发展与阻尼材料的大量应用, 阻尼材料与人们的日常生活早已息息相关。而由于粘弹性阻尼材料即高分子阻尼材料, 具有显著的粘弹性, 内耗大, 能够实现较高阻尼, 并且高分子材料具有良好的加工性, 因此是目前应用较为广泛的一类阻尼材料。通过在固有阻尼值较小的金属材料表面加上一层粘弹性阻尼材料, 可将金属材料的阻尼性能提升至原有的 200 至 1000 倍, 极大的提高了金属材料的阻尼特性。其中水性阻尼材料是一种以聚合物为基质具有抑制振动能力的功能材料, 并已经在汽车、机车车辆等交通工具及工程机械、精密仪器设备上的使用已经相当广泛^[57-61]。

高云卿^[62]等使用了多种无机材料作为填料, 通过研究发现具有层状结构的材料作为填料时, 对水性阻尼涂料的阻尼性能和隔声性能有较大改善。胡钊^[63]等通过对比在涂料中添加重质碳酸钙、云母粉、玻璃微珠、白炭黑等填料, 进一步发现以云母粉作为填料的水性阻尼涂料具有较好的阻尼性能, 而以白炭黑作为填料的水性阻尼涂料则具备较优的隔声性能。而张冬菊^[64]将鳞片石墨、玻璃纤维及氢氧化铝三种填料进行复配, 采用自由振动衰减法与半功率带宽法评价材料阻尼性能, 发现复配涂料较单一填料能明显提高材料的性能。贺才春^[65]将普通阻尼涂料和高

性能水性阻尼涂料喷涂于铁路客舱车体金属壳体整个内表面,发现在未改变车体结构的情况下,采用水性阻尼涂料的降噪效果最为明显。Alex T. Koshy^[66]和 Abhinav Alv^[67]等均对水性阻尼材料的功能性填料对阻尼性能的影响进行了研究。

近年来,水性阻尼材料逐渐应用到航空领域,但对其的研究仍处于基础阶段而真实应用较少。高培鑫^[68,69]等主要对复杂管道系统进行了较为深入的研究,旨在对复杂管道系统设计及振动控制提供理论支持和技术指导,并指出国内外关于管道的被动减振技术仍有待进一步研究,其中涂层减振是管道被动减振的重要方法。而国外许多学者^[70-73]发现在管体外部粘贴粘性阻尼可有效地抑制管道的振动。

1.3 本文的主要研究工作

综上所述,目前基于阻尼涂层的减振技术在飞机管道研究方面应用较少,本文针对工程实际情况设计并制备飞机管道水性阻尼减振涂层材料,并进行了相关减振性能试验和仿真分析。本文总体研究流程图如图 1.2 所示。

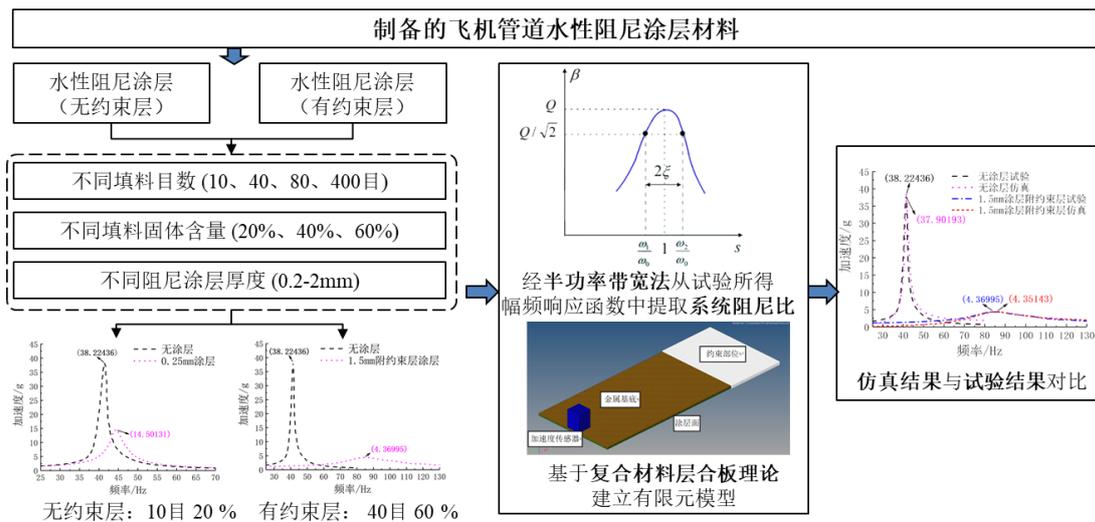


图 1.2 总体研究流程图

1.4 本文的内容安排

本文具体内容包括:

第一章,绪论,介绍了研究背景及意义,分析了管道振动抑制技术研究现状及阻尼涂层技术研究现状,说明了目前研究中存在的问题;

第二章,分析了飞机管道水性阻尼减振涂层材料的选择依据,并对制备过程中所需要的试验设备、原材料、成型工艺等进行了介绍;

第三章,分析了单自由度系统共振区减振特性,为振动试验研究提供了理论基础,从而通

过控制变量,比较分析的方法,研究了飞机管道水性阻尼减振涂层的涂层面测点、金属面测点、填料目数、填料固体含量、涂层厚度等影响因素,对所研制的飞机管道水性阻尼减振涂层减振性能的影响;

第四章,介绍了附约束层结构的基本原理,并研究了飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层的填料目数、填料固体含量、涂层厚度等影响因素,对所研制的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层后减振性能的影响;

第五章,基于 ANSYS 和复合材料层合板理论对第三章飞机管道水性阻尼减振涂层材料减振性能试验和第四章飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层减振性能试验的结论进行了仿真,通过仿真结果与试验数据的对比,验证了仿真模型的准确性和有效性,为后续附阻尼涂层材料的管道动力学分析及疲劳寿命预测提供了基础;

第六章,总结本文工作,对后续工作进行了展望。

第二章 飞机管道水性阻尼减振涂层材料制备

飞机管道水性阻尼减振涂层主要应用于装配阶段及使用阶段，若飞机管道出现振动过大的情况，直接将飞机管道水性阻尼减振涂层材料喷涂至管道即可。其属于被动减振装置，主要是利用飞机管道的共振特性，通过附加阻尼的方式转移或消耗系统的振动能力，从而达到减振降噪的目的^[74-76]。

2.1 飞机管道水性阻尼减振涂层材料选择依据

现有的飞机管道减振技术主要为优化管型以及施加卡箍。优化管型主要应用在最初的设计阶段，大多数情况只能凭借经验设计管道而没有一套成熟的设计规范，这使得如果在实际飞行中发现振动过大，需要消耗极大的人力物力来重新设计生产。而施加卡箍是当前管道系统振动抑制技术中运用最广泛的方式，其主要应用于装配阶段。但是在某型战机的使用中，甚至多次发现了燃油系统管道使用的卡箍出现疲劳裂纹、甚至箍带断裂的现象，造成管道系统出现漏油故障^[77,78]。目前只能选择使用更多卡箍固定的方式，但是这无可避免的造成管道系统重量的增加，从而造成导致经济性的降低，更重要的是，在某些狭窄空间中都难以找到卡箍适合的位置。

基于此种情况，本文提出了一种飞机管道水性阻尼减振涂层材料，此材料相较于原有飞机管道减振技术优点如下：

(1) 此材料属于新型高分子粘弹性材料，重量远低于金属材料，具有较好的经济性，且容易采购，生产成本低廉；

(2) 若制得的飞机管道水性阻尼减振涂层由于外因破坏，可视情况重新喷涂阻尼层、防水层或者重新缠绕隔离层，具有战场抢修的功能；

(3) 制得的飞机管道水性阻尼减振涂层为薄阻尼层，适用于飞机内部错综复杂且间隙很小的管道系统；

(4) 此方法不需要重新设计管道系统，对其他成品影响较小，且可以与现有减振技术搭配使用；

(5) 此方法对施工面条件要求不高，且所用原料均无有机溶剂添加，材料自身 VOC 含量较低，符合当前环保安全的发展要求；

(6) 制得的飞机管道水性阻尼减振涂层具有阻尼温域宽、与基底管材复合后的损耗因子高、阻尼效果好、有效减振等优点。

2.2 水性阻尼减振涂层材料的制备

本文制得的飞机管道水性阻尼减振涂层材料为聚合物粘合剂，填料以及功能助剂组成，填料作为水性阻尼减振涂层材料的重要组成部分，不仅可以提升力学性能，对制得的涂层的阻尼性能也有重要的影响。其成分、固体含量以及颗粒的粒径大小均是影响水性阻尼减振涂层材料性能的重要参数^[79,80]。

2.2.1 试验设备

为制得飞机管道水性阻尼减振涂层材料，试验设备主要包括：1) 电动升降立式分散机；2) 电热鼓风干燥机；3) 电子天平；4) 烧杯、玻璃棒、胶头滴管若干。主要设备介绍：

(1) 电动升降立式分散机

实验室高速分散机是根据国际先进分散设备的发展趋势新开发的高性能产品。如图 2.1 所示，该设备集分散功能和搅拌功能为一体，将分散、均质两种工序由一个机器、一个容器完成。本机的分散头在电机的高速驱动下，产生旋转切向高线速度，物料在巨大的离心力作用下，产生强大的液体剪切和高频机械效应，使流体物料每分承受上千次的剪切和高频机械效应，从而达到效率混合、分散、均质的效果。

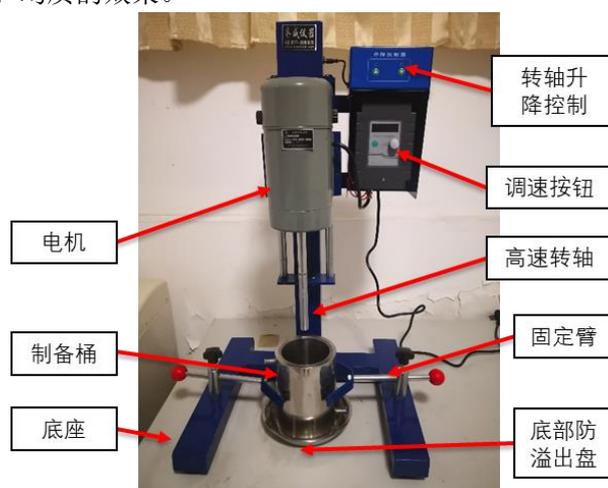


图 2.1 电动升降立式分散机

(2) 电热鼓风干燥机

DHG-202 鼓风干燥机（以下简称干燥箱）。如图 2.2 所示，干燥箱由箱体、电加热鼓风系统、控温系统三部分组成。箱体由工作室内腔和外箱壳组成，其箱体外壳均采用优质钢板表面喷塑处理；室内采用不锈钢钢丝制成的搁板高度可调。箱门上有大面积的双层钢化玻璃视察窗，能清晰观察到箱内加热干燥物品。工作室与箱门的接合部位装有耐热硅橡胶密封圈，以保证工作室的密封性。电源开关、温度显示器、温度控制器、风机开关等均安装在箱体左侧便于操作维修。



图 2.2 电热鼓风干燥机

2.2.2 原材料配比参数

本文所用到的试验原材料如表 2.1 所示，基础配方如表 2.2 所示。

表 2.1 飞机管道水性阻尼减振涂层材料制备原材料

项目	原材料名称	主要技术参数	生产厂家
乳液	具有核壳型互穿网络结构的水性聚氨酯丙烯酸复合乳液	外观：乳白色液体；黏度：450~700mPa·s；pH 7.0~8.5；最低成膜温度：10℃	山东淄博君武化工有限公司
去离子水	工业蒸馏水	蒸馏方法制备的纯水，电阻率约 18 兆欧	浙江温州红荒化工有限公司
填料	云母粉	细度分为：10 目、40 目、80 目、400 目	南京江宁石粉厂
水性消泡剂	硅聚醚 GM-25	外观：乳白色粘稠液体；pH:6.5~8.5；固体含量：(24.0±1.0)%；黏度：800~2000mPa·s	广州润宏化工有限公司
多功能助剂	非离子聚氨酯流变改性剂 RM2020	外观：浑浊液体；固体含量：(19.0~21.0)%；具有优良的流平性、涂膜丰满和抗水性	罗门哈斯 OROTAN
分散剂	聚羧酸钠盐 731A	外观：淡黄色透明液体；固体量：(24.0~26.0)%；pH:10.0~10.5	罗门哈斯 OROTAN
成膜助剂	醇酯十二	外观：无色透明液体；最低初沸点：255℃；冰点：-50℃	TEXANOL

表 2.2 飞机管道水性阻尼减振涂层材料制备基础配方

原材料	质量 (m/g)
乳液	500
去离子水	100
填料	450
水性消泡剂	20
多功能助剂	40
分散剂	30
成膜助剂	40

2.2.3 材料成型工艺

如图 2.3 所示，为制得飞机管道水性阻尼减振涂层材料须进行四步：

(1) 配制水性混和乳液：

在常温下，将共混乳液与去离子水按表 2.2 称量好后进行混合并加入到分散桶中，开动分散机到 500-1000 r/min 进行分散 10-20min，将所得水性混合乳液分散均匀；

(2) 填料、助剂的加入：

将填料、水性消泡剂、水性分散剂按照表 2.2 称量加入所得水性混合乳液中，开启分散机，调速逐渐增高至 7000-8000r/min 进行分散 30-45min；

(3) 成膜及调漆：

根据涂料状态加入多功能助剂及成膜助剂，降低转速至 500-1000r/min，继续搅拌 10-15 min，最后出料，即制得飞机管道水性阻尼减振涂层材料。

(4) 喷涂及烘干：

将制得飞机管道水性阻尼减振涂层材料喷涂在基底金属片上后，放入鼓风干燥箱中进行烘干固化 6-12h，最后取出，即制得喷涂有飞机管道水性阻尼减振涂层的试验件。

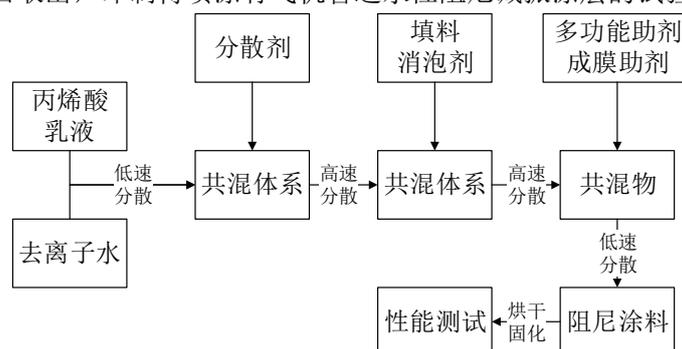


图 2.3 飞机管道水性阻尼减振涂层材料制备流程图

2.2.4 水性阻尼减振涂层材料制备样品

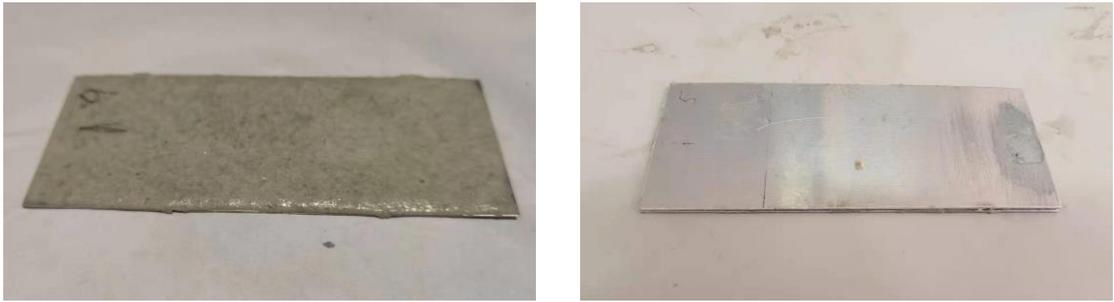
由上述设备及方法制得的喷涂飞机管道水性阻尼减振涂层的试验件如图 2.4 所示，具体可分为两类：

(1) 喷涂飞机管道水性阻尼减振涂层的试验件，如图 2.4 (a) 所示：

由于加入填料不同，该类试验件的水性阻尼减振涂层分别为填料为 10 目、40 目、80 目、400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层；

(2) 喷涂飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层的试验件，如图 2.4 (b) 所示：

由于加入填料不同，该类试验件的水性阻尼减振涂层分别为填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层。



(a) 飞机管道水性阻尼减振涂层（无约束层） (b) 飞机管道水性阻尼减振涂层（附约束层）

图 2.4 喷涂飞机管道水性阻尼减振涂层的试验件

2.3 小结

本章讨论了飞机管道水性高阻尼减振涂层材料的选择依据,从试验设备、原材料配比参数、材料成型工艺等三个方面阐述了水性阻尼减振涂层材料的制备,并展示了两类喷涂飞机管道水性阻尼减振涂层材料的试验件样品。

第三章 飞机管道水性阻尼减振涂层材料减振性能试验研究

阻尼层结构是将一层水性阻尼减振涂层粘贴于基层表面上如图 3.1 所示，其中图 3.1 (a) 为其未受力时的状态，图 3.1 (b) 为其受力时的状态。其耗能原理从宏观上看主要是利用阻尼层内部产生拉压变形，通过阻尼材料的弯曲、拉伸吸收能量。当阻尼材料内部产生突变应力时，阻尼材料将机械能转换为热能，从而起到耗能的作用^[81]。而从微观上看，高分子聚合物是由庞大的分子链组成，分子间通过物理键或者化学键进行连接，当对它施加外力时，分子链会发生位置的移动，出现转动的现象，外力做的功会变成热能释放出去^[82]。

本章采用本文第二章设计制造的飞机管道水性阻尼减振涂层，设计并实施了四组喷涂水性阻尼减振涂层试验件振动试验，以证明飞机管道水性阻尼减振涂层减振性能的有效性。通过控制变量，比较分析的方法，研究飞机管道水性阻尼减振涂层的涂层面以及金属面测点、填料目数、填料固体含量和水性阻尼减振涂层厚度的影响因素，探究优化的飞机管道水性阻尼减振涂层阻尼层设计方法。

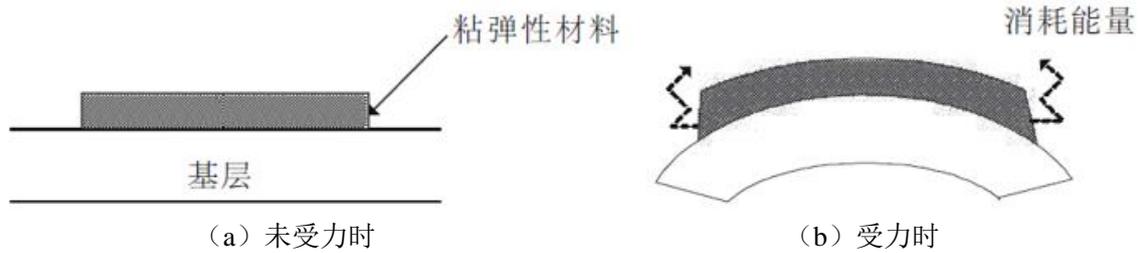


图 3.1 水性阻尼减振涂层结构

3.1 单自由度系统共振区减振特性分析

简谐激励是激励形式中最简单的一种^[83]，设质量块质量为 m ，质量块上作用有简谐激振力

$$P(t) = P_0 \sin \omega t \quad (3-1)$$

其中， P_0 为激振力幅， ω 为激振频率。

则可得到运动微分方程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_0 \sin \omega t \quad (3-2)$$

将式 (3-2) 两端同除以质量 m ，并令

$$\begin{cases} \frac{c}{m} = 2\zeta\omega_n \\ \frac{k}{m} = \omega_n^2 \end{cases} \quad (3-3)$$

其中 ζ 为相对阻尼系数， ω_n 为固有频率，则式 (3-2) 变为：

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{P_0}{m} \sin \omega t \quad (3-4)$$

将式 (3-4) 改写为复数形式:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{P_0}{m}e^{i\omega t} \quad (3-5)$$

设:

$$x = \bar{x}e^{i\omega t} \quad (3-6)$$

其中, \bar{x} 为稳态响应的复振幅。

将式 (3-6) 代入式 (3-5) 得:

$$\bar{x} = \frac{P_0}{m} \frac{1}{\omega_n^2 - \omega^2 + i2\xi\omega_n\omega} \quad (3-7)$$

记 λ 为频率比, 它为:

$$\lambda = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (3-8)$$

将式 (3-8) 代入式 (3-7) 可得:

$$\bar{x} = \frac{P_0}{k} \frac{1}{1 - \lambda^2 + i2\xi\lambda} = \frac{P_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} e^{-i\varphi} = xe^{-i\varphi} \quad (3-9)$$

式中:

$$\begin{cases} x = \frac{P_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \\ \varphi = \text{tg}^{-1} \frac{2\xi\lambda}{1 - \lambda^2} \end{cases} \quad (3-10)$$

记 x_0 为质量块在简谐激振力作用下的最大位移, 它为:

$$x_0 = \frac{P_0}{k} \quad (3-11)$$

再引入无量纲的振幅放大因子 β , 它定义为:

$$\beta = \frac{x}{x_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (3-12)$$

由此可得:

1) 当 $\lambda \ll 1$ 时, $\beta \approx 1$, 这说明激振频率相对于系统固有频率 ω_n 很低时, 响应的振幅 x 与静位移 x_0 大小相当; 而当 $\lambda \gg 1$ 时, $\beta \approx 0$, 说明激振频率相对于固有频率 ω_n 很高时, 响应的振幅很小。这说明在上述两种情况下, 阻尼的影响不显著。

2) 当 $\lambda \approx 1$ 时, 较小的 ξ 值会使振幅放大因子 β 迅速增大, 但这种增大对于来自阻尼的影响非常敏感, 在 $\lambda=1$ 附近的区域内, 增加阻尼使振幅明显下降。

这种响应的振幅急剧增大的现象称为共振, 共振时的振幅放大因子也称为品质因子, 记为 Q^{def} , 则其为:

$$Q^{def} = \frac{1}{2\xi} \quad (3-13)$$

设共振区有两个端点 A 和 B, 其加速度振幅放大系数为:

$$\beta = \frac{Q^{def}}{\sqrt{2}} \quad (3-14)$$

由于它们对应的系统功率恰好是共振频率对应功率的一半，故称点 A 和点 B 为半功率点。由半功率点处速度振幅放大系数的平方：

$$\beta_v^2 = \frac{\lambda^2}{(1-\lambda^2)+(2\zeta\lambda)^2} = \frac{Q^2}{2} = \frac{1}{8\zeta^2} \quad (3-15)$$

式中， β_v 为速度振幅放大系数。

可解得两个半功率点所对应的频率比：

$$\begin{cases} \lambda_A = \sqrt{1+\zeta^2} - \zeta \\ \lambda_B = \sqrt{1+\zeta^2} + \zeta \end{cases} \quad (3-16)$$

于是共振区的带宽又称为半功率带宽 $\Delta\lambda^{def}$ 为：

$$\Delta\lambda^{def} = \lambda_B - \lambda_A = 2\zeta = \frac{1}{Q^{def}} \quad (3-17)$$

由于共振时系统呈阻尼特性，因此可利用共振现象实测系统阻尼。通常可在幅频特性曲线上确定半功率带宽，由上式可得：

$$\zeta = \frac{\Delta\lambda^{def}}{2} \quad (3-18)$$

故在共振曲线上共振峰幅值的 0.707 处，作一平行于频率轴的直线与共振曲线交两点，这两点对应的横坐标即频率数值分别为 f_1 和 f_2 ，则可得相对阻尼比 ζ 为：

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f} \times 100\% = \frac{\Delta f}{2f} \times 100\% \quad (3-19)$$

3.2 试验方案

3.2.1 试验目的

试验目的是针对本文所设计制造的飞机管道水性阻尼减振涂层材料，通过试验测得试验件加速度的变化，验证飞机管道水性阻尼减振涂层材料的有效性和工程实用性，通过对比分析变量即填料云母粉的目数、固体含量和水性阻尼减振涂层的厚度，再与仿真结果相互印证，探究飞机管道水性阻尼减振涂层的优化设计方法。

3.2.2 振动试验系统

振动试验现场图片如图 3.2 所示，其试验原理框图如图 3.3 所示。本振动试验系统主要包括振动信号分析系统、RC-2000-2 控制软件、DC-300 型振动台、振动台功率放大器、B&K 压电式 ICP 加速度传感器、NI 采集器和夹具。其中夹具为试验件夹持装置，其主要分为 3 个部分，上端盖、夹具主体和底部连接圆盘。夹具主体顶部以及根部采用焊接方式，具有较强的结构刚度。上端盖与夹具主体采用螺栓连接，夹紧后可达到夹持试验件并施加基础激励的试验要求。

其外形如图 3.4 所示。

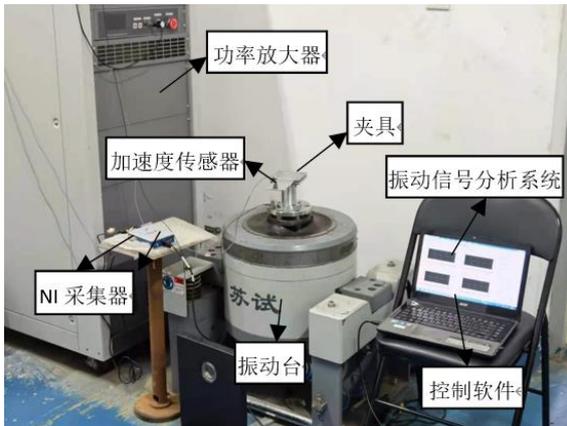


图 3.2 试验现场图

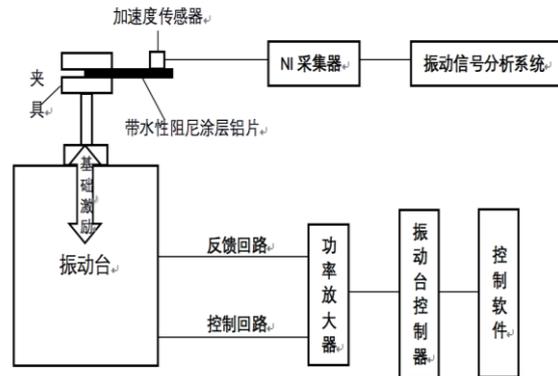


图 3.3 振动试验原理框图



图 3.4 试验件夹具

3.2.3 试验步骤

该试验采用正弦激励法进行扫频，扫频范围为 0~80Hz，频率间隔为 1Hz。由计算机中的数字式振动控制系统控制振动台施加基础激励，采用夹具夹持试验件，再通过加速度传感器监测试验件前端反馈加速度，达到主动控制振动幅值的目的。本试验激励力加速度统一设定为 1g，且试验件夹持长度为 44mm，通过控制填料云母粉的固体含量、目数以及水性阻尼减振涂层的厚度，测量出每一个试验件的最大加速度，从而得出飞机管道水性阻尼减振涂层的优化设计方案。

3.3 无水性阻尼减振涂层材料的试验件振动试验研究

本文试验件所用的铝片均采用统一规格，该铝片经委托加工，尺寸为 150mm×60mm×1mm，质量为 25.2 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统测得无水性阻尼减振涂层试验件振动加速度最大幅值为 38.22436g，振动加速度最大有效值为 24.66032g。测得试验件加速度幅频响应函数如图 3.5 所示，其中图 3.5 (a) 为幅值，图 3.5 (b) 为有效值。

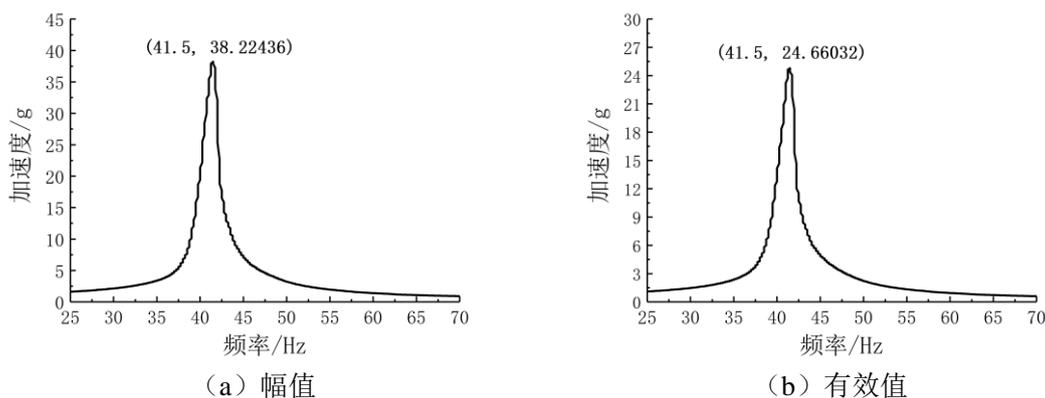


图 3.5 无水性阻尼减振涂层试验件试验图

3.4 填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 60 克 80 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 80 目且固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 4 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.3mm、0.8mm、1.3mm 和 1.8mm。

(1) 水性阻尼减振涂层厚度为 0.3mm 的试验件振动试验

经电子天平称量得到水性阻尼减振涂层厚度为 0.3mm 的试验件质量为 27.8 克，传感器测试面分为涂层面和金属面如图 3.6 (a) 和图 3.6 (b) 所示，两个测试面采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得的结果如图 3.6 (c) 和图 3.6 (d) 所示。



(a) 涂层面测试



(b) 金属面测试

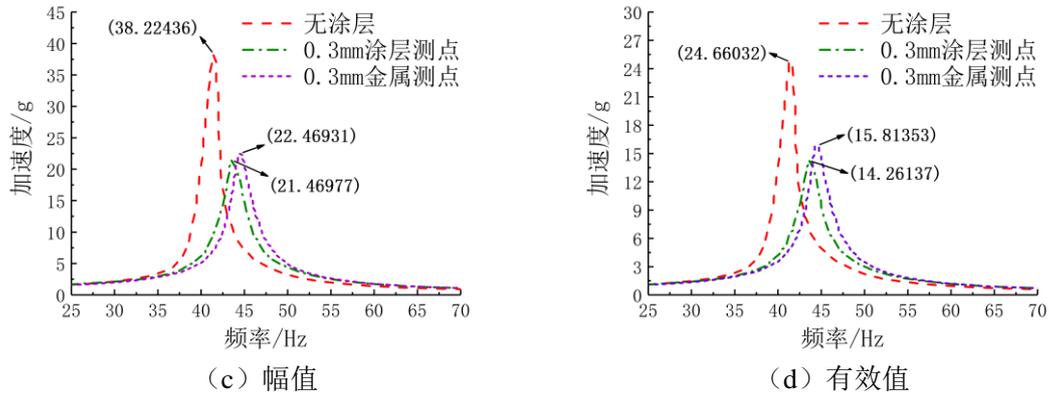


图 3.6 水性阻尼减振涂层厚度为 0.3mm 的试验件

(2) 水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件振动试验

经电子天平称量得到水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件质量为 30.7 克，传感器测试面分为涂层面和金属面如图 3.7 (a) 和图 3.7 (b) 所示，两个测试面采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得的结果如图 3.7 (c) 和图 3.7 (d) 所示。

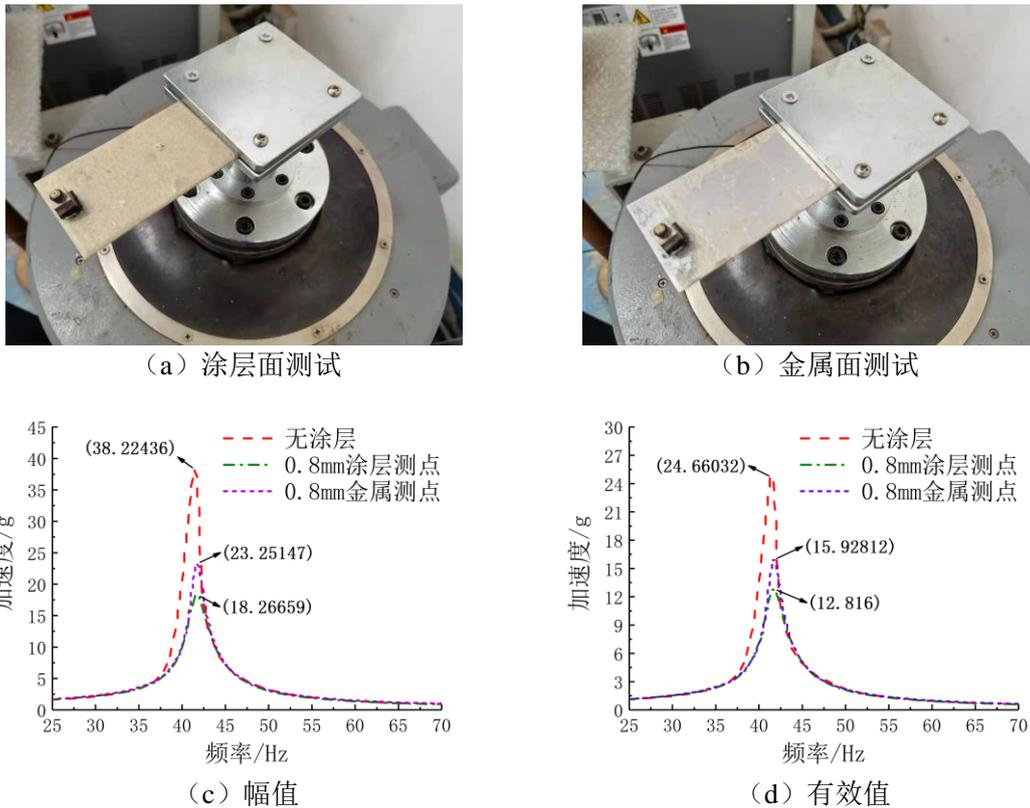


图 3.7 水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件

(3) 水性阻尼减振涂层厚度为 1.3mm 的试验件振动试验

经电子天平称量得到水性阻尼减振涂层厚度为 1.3mm 的试验件质量为 32.9 克，传感器测试面分为涂层面和金属面如图 3.8 (a) 和图 3.8 (b) 所示，两个测试面采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得的结果如图 3.8 (c) 和图 3.8 (d) 所示。

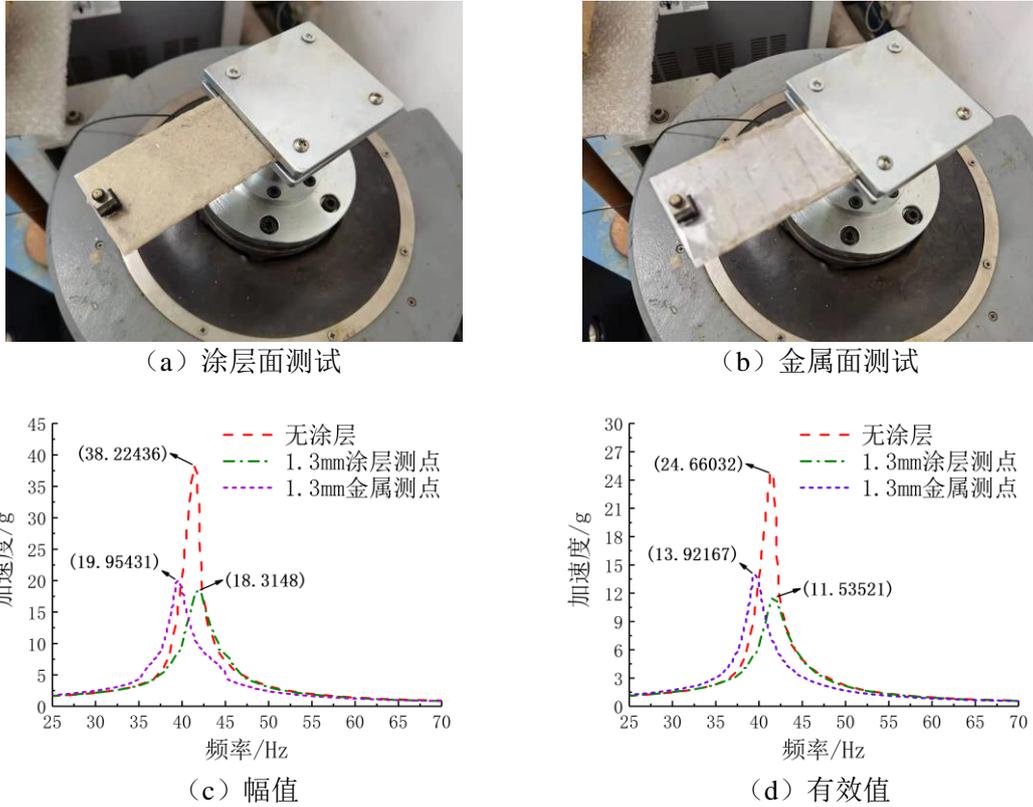


图 3.8 水性阻尼减振涂层厚度为 1.3mm 的试验件

(4) 水性阻尼减振涂层厚度为 1.8mm 的试验件振动试验

经电子天平称量得到水性阻尼减振涂层厚度为 1.8mm 的试验件质量为 38.9 克，传感器测试面分为涂层面和金属面如图 3.9 (a) 和图 3.9 (b) 所示，两个测试面采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得的结果如图 3.9 (c) 和图 3.9 (d) 所示。



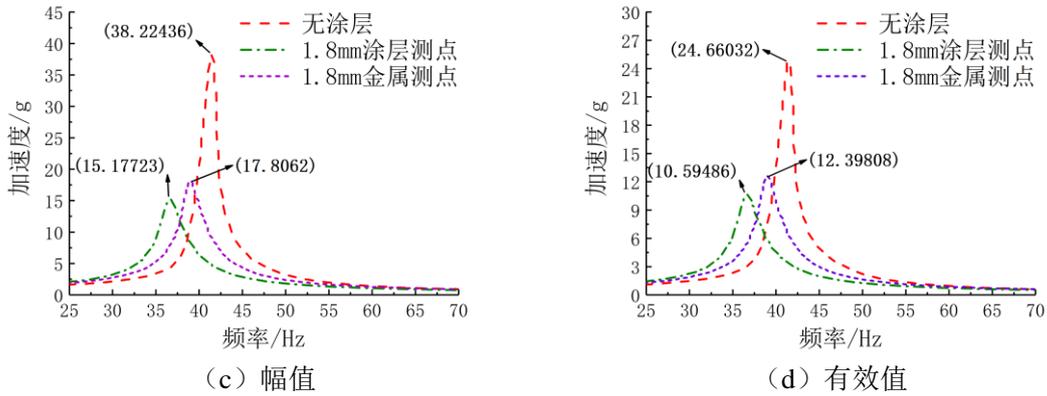


图 3.9 水性阻尼减振涂层厚度为 1.8mm 的试验件

(5) 试验小结

填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验数据如表 3.1 所示。从表中看出，传感器不管是测试涂层面还是金属面，随着涂层厚度的增加，该水性阻尼减振涂层的阻尼性能均得到增强。然而金属面测得的振动加速度最大幅值和最大有效值均大于涂层面测得的数值，且随着涂层厚度的增加，其差值不断增大。这可能由于该水性阻尼减振涂层材料粘弹性过大而导致测量误差，因此为降低误差，保证试验结果的准确性，之后的试验均采用金属测点进行测量。

表 3.1 填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	涂层面加速度最大幅值 (a_{cA}/g)	涂层面加速度最大有效值 (a_{cE}/g)	涂层面减振效果 ($\lambda_c/\%$)	金属面加速度最大幅值 (a_{mA}/g)	金属面加速度最大有效值 (a_{mE}/g)	金属面减振效果 ($\lambda_m/\%$)
0.3	21.46977	14.26137	43	22.46931	15.81353	38.545
0.8	18.26659	12.816	50.12	23.25147	15.92812	37.29
1.3	18.3148	11.53521	52.655	19.95431	13.92167	45.675
1.8	15.17723	10.59486	58.665	17.8062	12.39808	51.565

3.5 填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究

由 3.4 节对填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究可得，加速度传感器贴于涂层面时测量误差较大，因此本节只采用金属测点。本节研究了填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究，通过控制变量研究了填料的固体含量以及涂层厚度对水性阻尼减振涂层阻尼性能的影响。

3.5.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 60 克 10 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 10 目且固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 3 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.25mm、1mm 和 1.5mm。成品如

图 3.10 所示，其中图 3.10 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.25mm 的试验件，图 3.10 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件，图 3.10 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 的试验件。

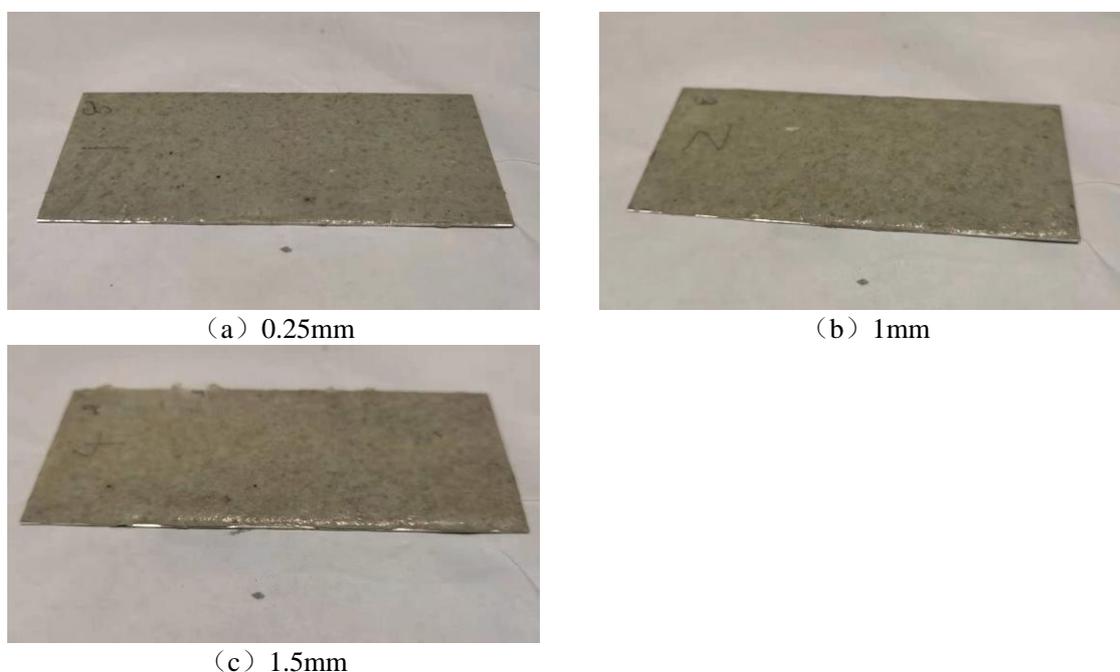


图 3.10 填料为 10 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.25mm 的试验件质量为 26.2 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件质量为 29.2 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 的试验件质量为 34.3 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 3.2 所示，测得加速度幅频响应函数如图 3.11 所示，其中图 3.11 (a) 为幅值，图 3.11 (b) 为有效值。

表 3.2 填料为 10 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
0.25	14.50131	10.20641	60.92
1	18.18333	12.79148	50.28
1.5	17.26206	12.25524	52.27

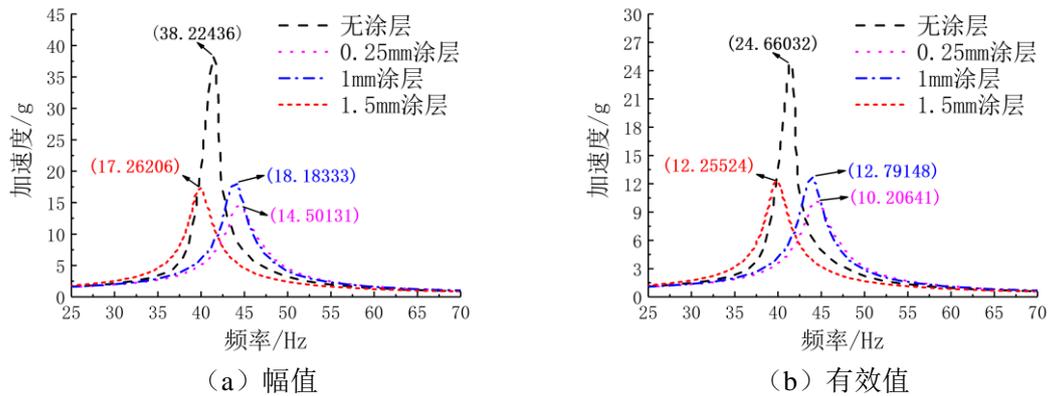


图 3.11 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.11 可得出结论：填料为 10 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会降低，而后其阻尼性能又会得到略微提升，当水性阻尼减振涂层厚度为 0.25mm 时阻尼性能最高。这主要是因为当水性阻尼减振涂层厚度较薄时，厚度的影响较低，主要为填料云母粉影响，随着涂层厚度的增加，片层滑移逐渐变得困难，从而导致阻尼性能下降。当水性阻尼减振涂层厚度达到 1mm 后，随着涂层厚度的影响增大，阻尼性能有了略微的提高。

3.5.2 填料固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 120 克 10 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 10 目且固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 4 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.4mm、0.6mm、1.2mm 和 1.4mm。成品如图 3.12 所示，其中图 3.12 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.4mm 的试验件，图 3.12 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件，图 3.12 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件，图 3.12 (d) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件。



(a) 0.4mm



(b) 0.6mm

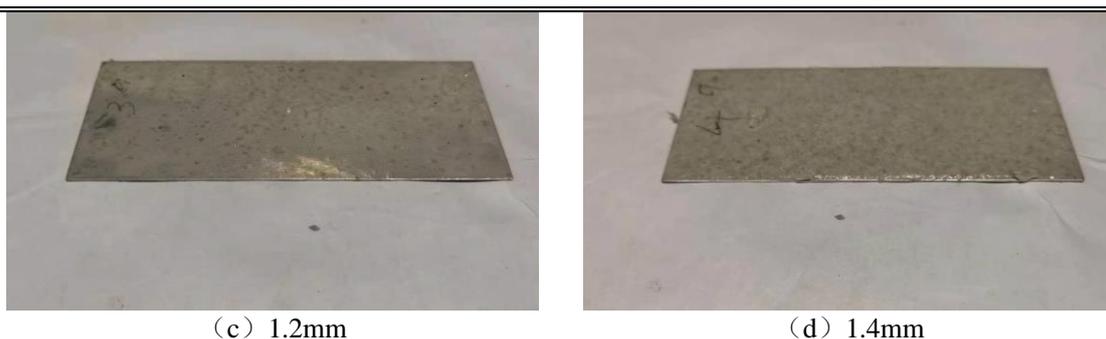


图 3.12 填料为 10 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.4mm 的试验件质量为 27.1 克，水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件质量为 28.6 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件质量为 31.5 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件质量为 33.1 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 3.3 所示，测得加速度幅频响应函数如图 3.13 所示，其中图 3.13 (a) 为幅值，图 3.13 (b) 为有效值。

表 3.3 填料为 10 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
0.4	26.54271	18.72182	27.32
0.6	25.96545	18.16724	29.2
1.2	23.59897	16.48638	35.71
1.4	21.99832	15.42455	39.95

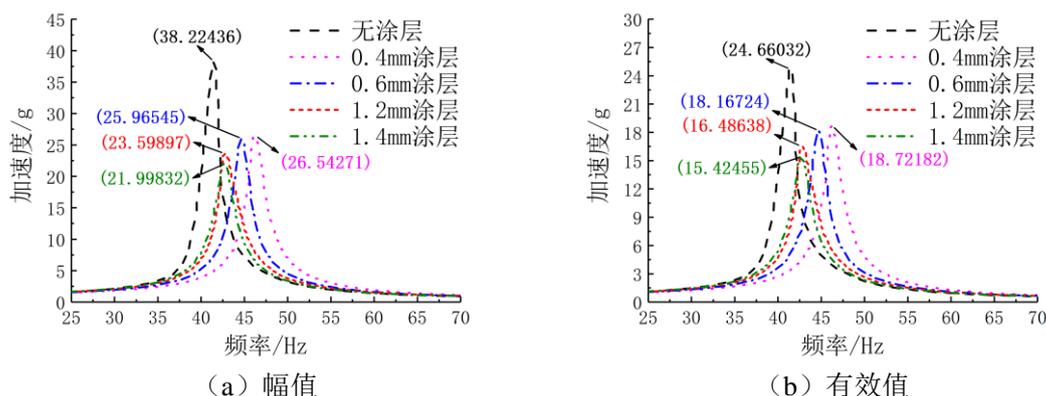


图 3.13 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.13 可得出结论：填料为 10 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，水性阻尼减振涂层阻尼性能会增强，当水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 时阻尼性能最高。这主要是由于 10 目云母粉的粒径较大，当固体含量为 40% 时，云母片层间空隙

较小，片层滑移十分困难，因此即使当水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 时减振效果也仅为 39.95%，甚至小于填料为 10 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层最小减振效果的 50.28%。故涂层厚度因素此时起主要作用，随着涂层厚度的增加，该水性阻尼减振涂层的阻尼性能得到增强。

3.5.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 180 克 10 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 10 目且固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 3 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.7mm、0.8mm 和 1.5mm。成品如图 3.14 所示，其中图 3.14 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.7mm 的试验件，图 3.14 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件，图 3.14 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 的试验件。

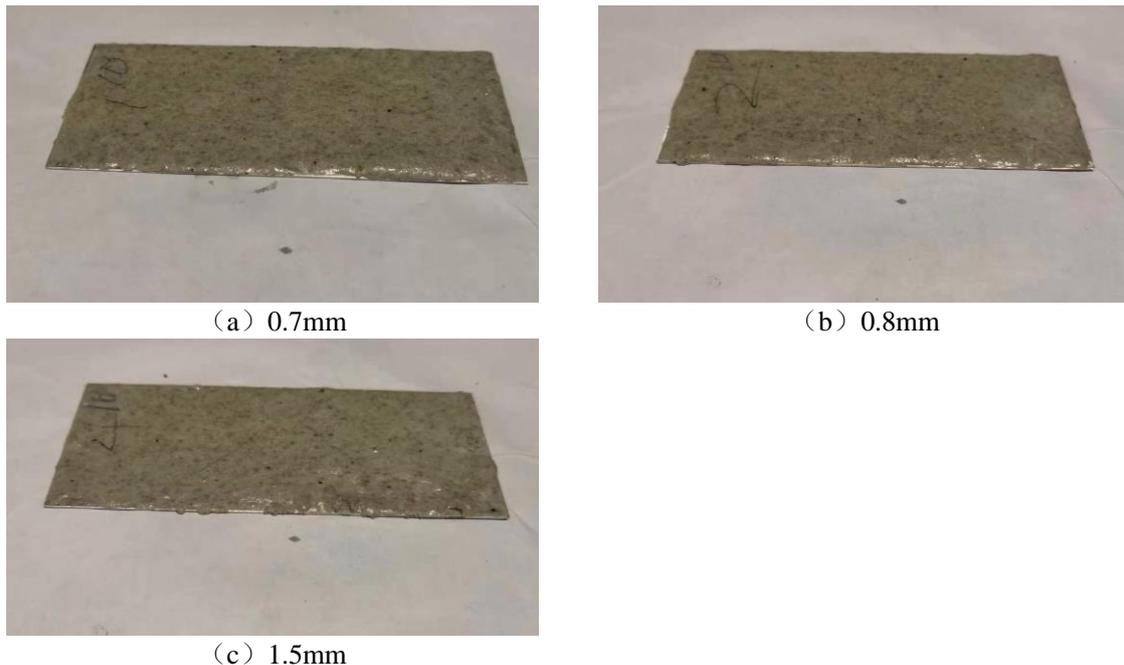


图 3.14 填料为 10 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.7mm 的试验件质量为 29.2 克，水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件质量为 29.3 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 的试验件质量为 34.1 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 3.4 所示，测得加速度幅频响应函数如图 3.15 所示，其中图 3.15 (a) 为幅值，图 3.15 (b) 为有效值。

表 3.4 填料为 10 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
0.7	15.40468	10.77695	58
0.8	18.31938	12.87509	49.93
1.5	18.57814	13.03210	49.28

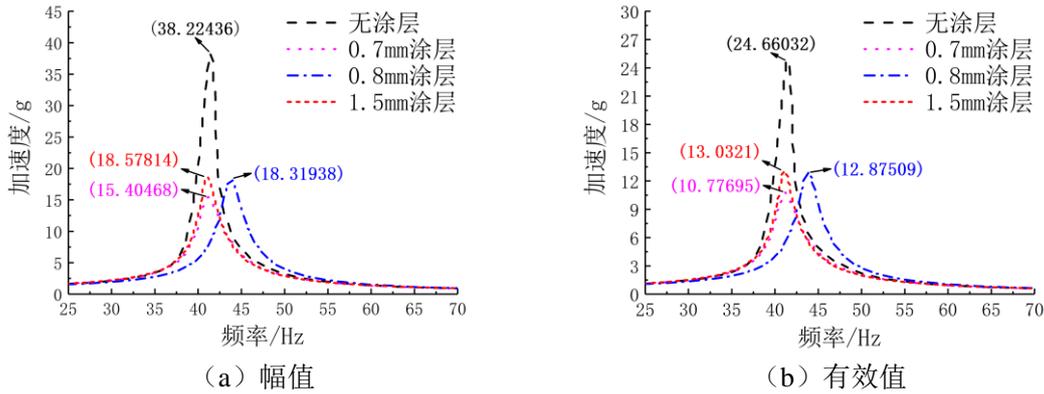


图 3.15 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.15 可得出结论：填料为 10 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会降低，当水性阻尼减振涂层厚度为 0.7mm 时阻尼性能最高。这主要是因为高固体含量的大粒径的云母粉虽然片层滑移极低，但是其高固体含量形成了聚合网状结构，极大的增强了水性阻尼减振涂层的阻尼性能。而随着涂层厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，从而导致了水性阻尼减振涂层的阻尼性能下降。

3.5.4 试验小结

因此对于填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验件，将涂层厚度与试验测得的最大加速度拟合，拟合曲线如图 3.16 所示。其中图 3.16 (a) 为加速度最大幅值拟合曲线，图 3.16 (b) 为加速度最大有效值拟合曲线。

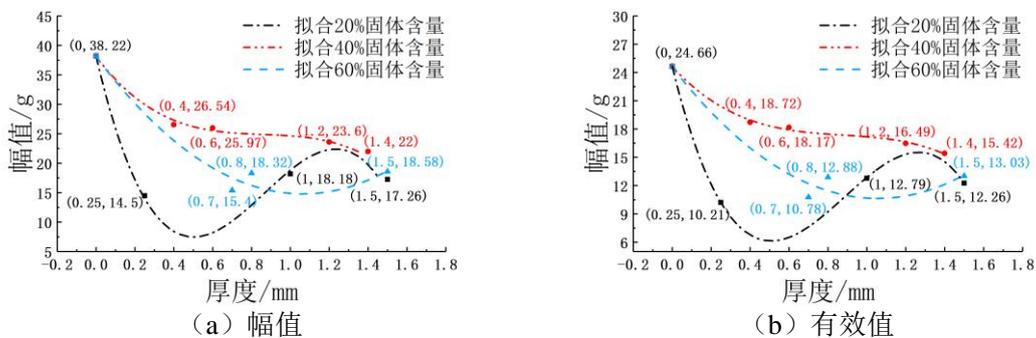


图 3.16 填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.16 可得出结论：对于填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层，由于其粒径较大，从而导致在低固体含量（20%）时，其减振机理主要是利用云母片层间的滑移，将机械能转换为热能消耗，因此当厚度过厚影响云母片层滑移会导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能降低；在高固体含量（60%）时，其减振机理主要是形成聚合网状结构，从而增强水性阻尼减振涂层的阻尼性能，而随着涂层厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能下降；在中固体含量（40%）时，由于固体含量的原因导致云母片层间的滑移较难，从而机械能较难转换为热能，但又未能形成聚合网状结构，因此此时水性阻尼减振涂层的阻尼性能最差，仅随着厚度的增加，阻尼性能得略微的增强。

3.6 填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究

由 3.4 节对填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究可得，加速度传感器贴于涂层面时测量误差较大，因此本节只采用金属测点。本节研究了填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究，通过控制变量研究了填料的固体含量以及涂层厚度对水性阻尼减振涂层阻尼性能的影响。

3.6.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 60 克 40 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 40 目且固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 4 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.6mm、0.8mm、1mm 和 1.2mm。成品如图 3.17 所示，其中图 3.17 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件，图 3.17 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件，图 3.17 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件，图 3.17 (d) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件。



(a) 0.6mm



(b) 0.8mm

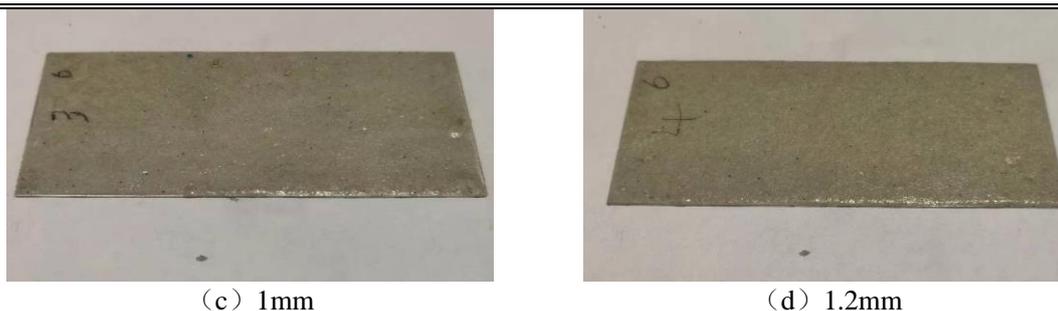


图 3.17 填料为 40 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件质量为 27.5 克，水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件质量为 29.2 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件质量为 30.5 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件质量为 33.0 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 3.5 所示，测得加速度幅频响应函数如图 3.18 所示，其中图 3.18 (a) 为幅值，图 3.18 (b) 为有效值。

表 3.5 填料为 40 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
0.6	18.26042	12.84451	50.07
0.8	25.97481	18.98916	27.53
1	26.20818	18.31307	28.59
1.2	28.18244	19.54811	23.5

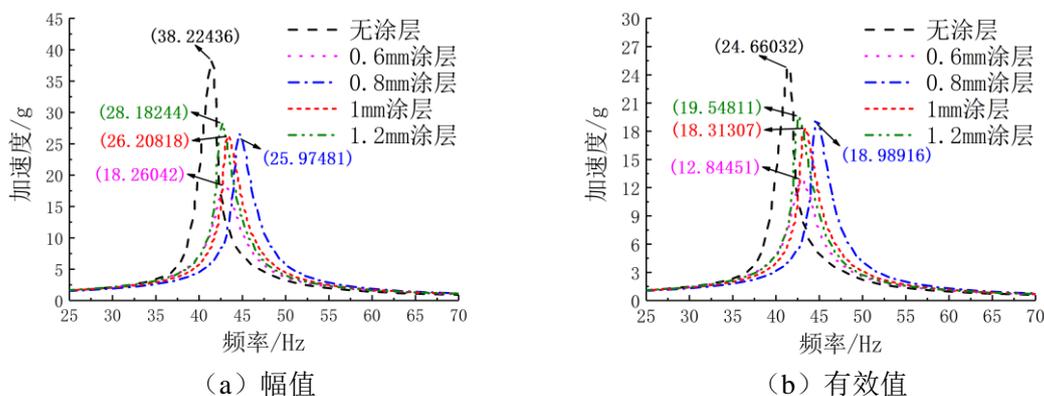


图 3.18 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.18 可得出结论：填料为 40 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会降低，当水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 时阻尼性能最高。这主要是因为随着涂层厚度的增加，片层滑移逐渐变得困难，从而导致阻尼性能下降。而由于 40 目云母粉的粒径小于 10 目云母粉的粒径，因此当其固体含量为 20% 时，填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层阻尼性能小于填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层阻尼性能。

3.6.2 填料固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 120 克 40 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 40 目且固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 4 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.6mm、1mm、1.3mm 和 1.6mm。成品如图 3.19 所示，其中图 3.19 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件，图 3.19 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件，图 3.19 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.3mm 的试验件，图 3.19 (d) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.6mm 的试验件。

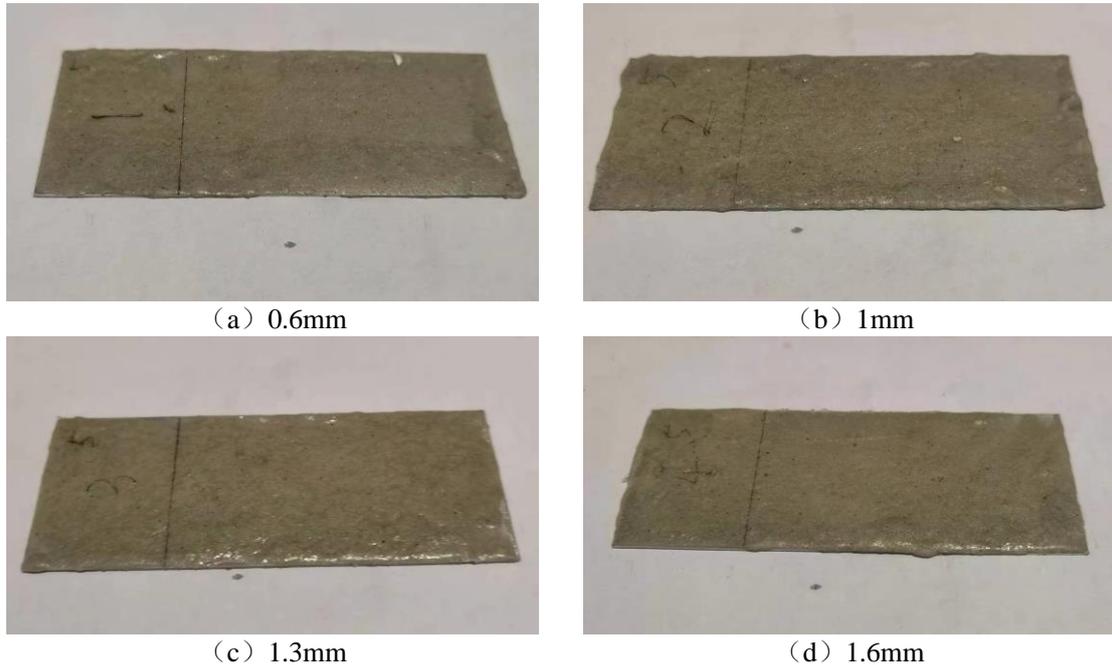


图 3.19 填料为 40 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件质量为 29.3 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件质量为 31.5 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.3mm 的试验件质量为 32.5 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.6mm 的试验件质量为 34.4 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 3.6 所示，测得加速度幅频响应函数如图 3.20 所示，其中图 3.20 (a) 为幅值，图 3.20 (b) 为有效值。

表 3.6 填料为 40 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
0.6	22.68301	16.05740	37.78
1	18.55382	13.07072	49.23
1.3	24.49633	17.16657	33.15
1.6	20.41410	14.38756	44.13

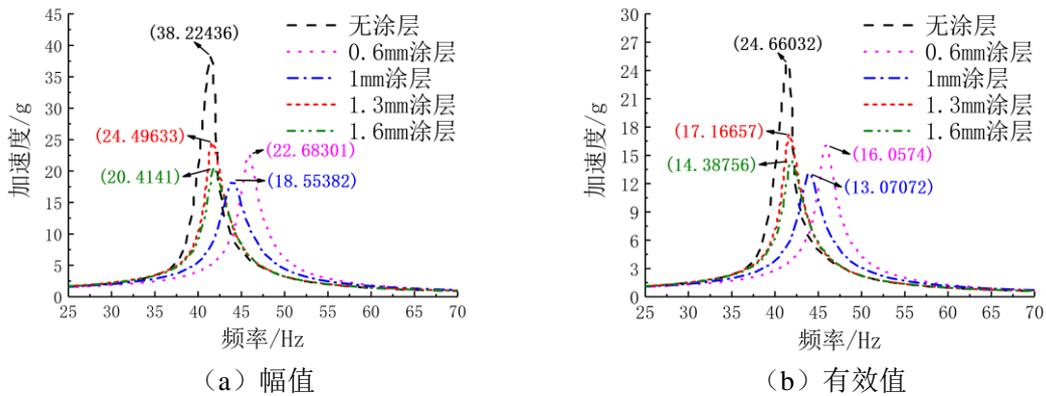


图 3.20 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.20 可得出结论：填料为 40 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，水性阻尼减振涂层阻尼性能先会增加，继而阻尼性能减弱，之后阻尼性能再次增加，当水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 时阻尼性能最高。这主要是由于 40 目云母粉的粒径小于 10 目云母粉的粒径，因此当固体含量为 40% 时，云母粉片层间空隙较大，当水性阻尼减振涂层厚度增加时，片层间空隙逐渐减小，片层滑移经历了一个滑移较小至滑移量较大的变化，此时水性阻尼减振涂层的阻尼性能会得到较大的提升。而之后由于云母片层间的空隙过小，导致片层滑移变得困难，从而导致阻尼性能的减弱，最后阻尼性能的再次增加则是厚度因素影响。

3.6.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 180 克 40 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 40 目且固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 3 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.6mm、1mm 和 1.2mm。成品如图 3.21 所示，其中图 3.21 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件，图 3.21 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件，图 3.21(c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件。



(a) 0.6mm



(b) 1mm



(c) 1.2mm

图 3.21 填料为 40 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件质量为 28.5 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件质量为 30.2 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件质量为 32.4 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 3.7 所示，测得加速度幅频响应函数如图 3.22 所示，其中图 3.22 (a) 为幅值，图 3.22 (b) 为有效值。

表 3.7 填料为 40 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
0.6	24.18543	16.98493	33.93
1	22.26147	15.68737	39.08
1.2	19.49071	13.60938	46.91

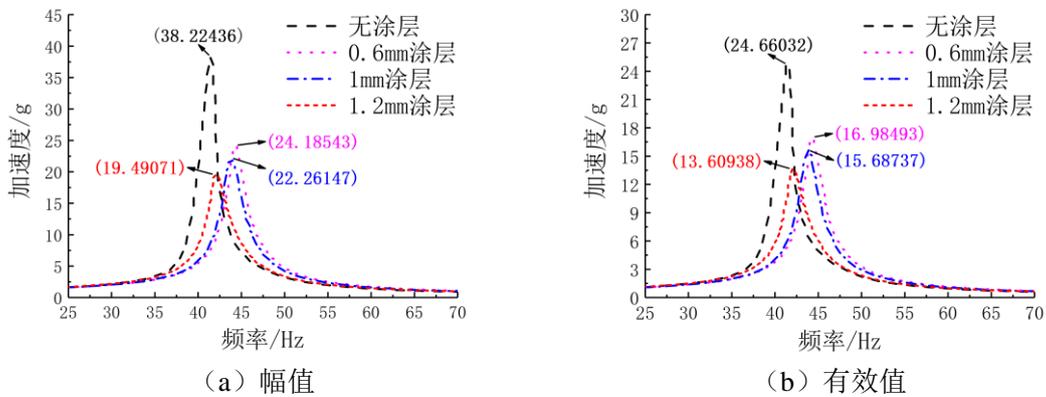


图 3.22 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.22 可得出结论：填料为 40 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会增高，当水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 时阻尼性能最高。这主要是因为高固体含量的较大粒径云母粉片层滑移较低，因此在厚度较低时阻尼性能较差。而 40 目云母粉的粒径小于 10 目云母粉的粒径，因此与 10 目云母粉在较低的厚度时就形成聚合网状结构不同，随着厚度的增加，逐渐形成聚合网状结构，因此阻尼性能持续增大。

3.6.4 试验小结

因此对于填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验件,将涂层厚度与试验测得的最大加速度拟合,拟合曲线如图 3.23 所示。其中图 3.23 (a) 为加速度最大幅值拟合曲线,图 3.23 (b) 为加速度最大有效值拟合曲线。

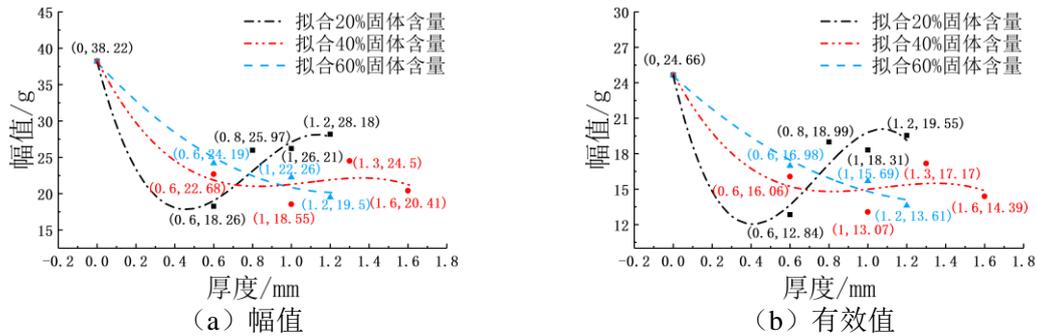


图 3.23 填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.23 可得出结论:对于填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层,由于其粒径较大,从而导致在低固体含量(20%)时,其减振机理与填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层减振机理相同,利用云母片层间的滑移,将机械能转换为热能消耗,因此当厚度过厚影响云母片层滑移,导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能降低;在高固体含量(60%)时,其减振机理同样与填料为 10 目云母粉制得水性阻尼减振涂层减振机理相同,但是由于 40 目云母粉粒径小于 10 目云母粉粒径,因此,与 10 目云母粉在较低的厚度就能形成聚合网状结构不同,填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层随着厚度的增加,逐渐形成聚合网状结构,阻尼性能持续增强;在中固体含量(40%)时,由于固体含量的原因导致云母片层间的滑移较难,从而机械能较难转换为热能,且未能形成聚合网状结构,因此从图 3.22 中可看出相较于低固体含量及高固体含量变化不是很明显,但由于 40 目云母粉的粒径小于 10 目粒径,因此制得的水性阻尼减振涂层的阻尼性能相较于 10 目云母粉中固体含量(40%)制得的水性阻尼减振涂层阻尼性能要好。

3.7 填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究

由 3.4 节对填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究可得,加速度传感器贴于涂层面时测量误差较大,因此本节只采用金属测点。本节研究了填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究,通过控制变量研究了填料的固体含量以及涂层厚度对水性阻尼减振涂层阻尼性能的影响。

3.7.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 60 克 400 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 400 目且固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 4 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.8mm、1mm、1.2mm 和 1.4mm。成品如图 3.24 所示，其中图 3.24 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件，图 3.24 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件，图 3.24 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件，图 3.24 (d) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件。

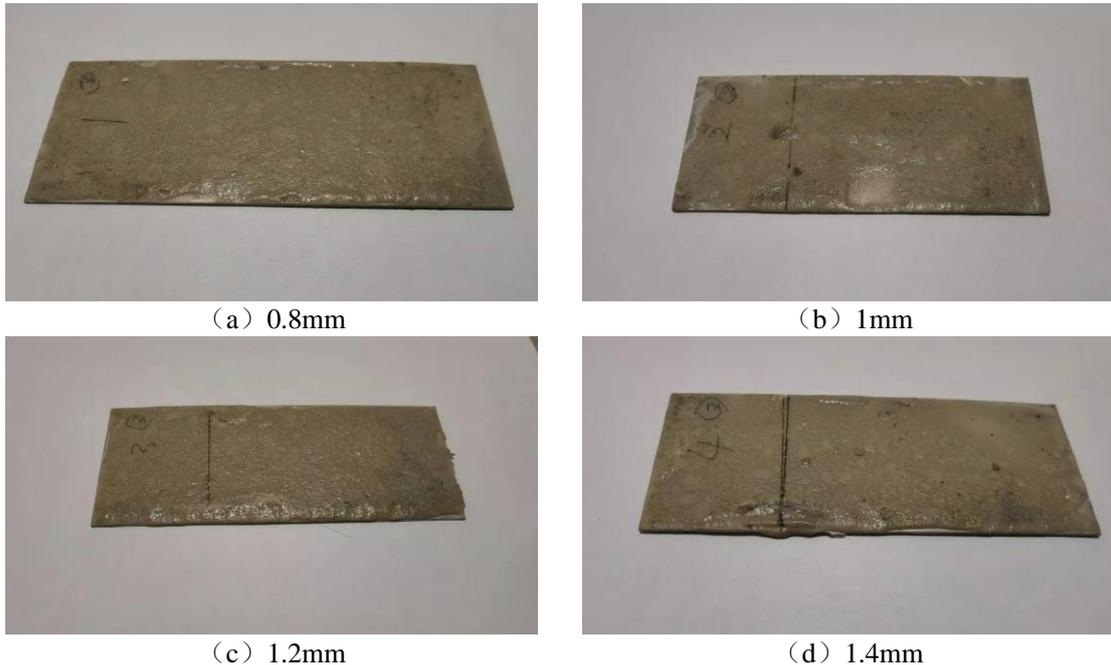


图 3.24 填料为 400 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件质量为 29.6 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件质量为 30.1 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件质量为 32.5 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件质量为 32.8 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 3.8 所示，测得加速度幅频响应函数如图 3.25 所示，其中图 3.25 (a) 为幅值，图 3.25 (b) 为有效值。

表 3.8 填料为 400 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a _A /g)	加速度最大有效值 (a _E /g)	减振效果 (λ _c /%)
0.8	17.26415	11.79333	53.51
1	18.71372	13.19105	48.78
1.2	23.08315	16.08889	37.19
1.4	27.56654	19.03302	25.35

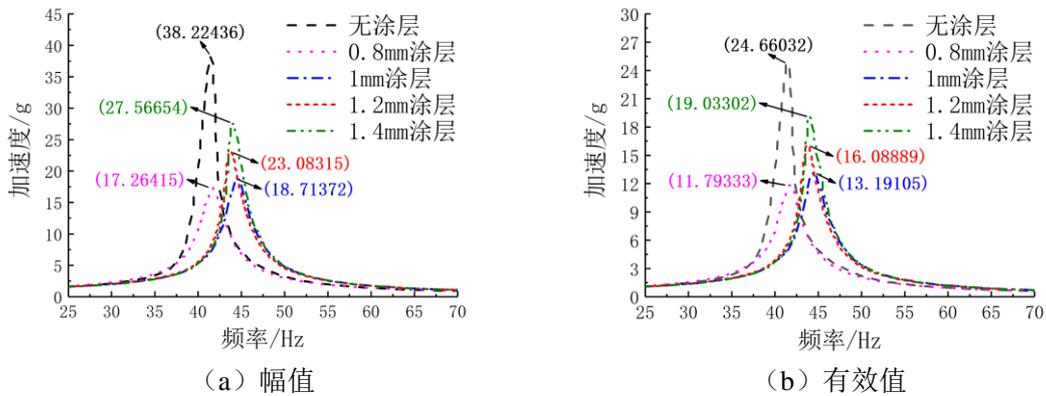


图 3.25 喷涂填料为 400 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.25 可得出结论：填料为 400 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会降低，当水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 时阻尼性能最高。这主要是因为随着涂层厚度的增加，片层滑移逐渐变得困难，从而导致阻尼性能下降。而由于 400 目云母粉的粒径小于 10 目云母粉的粒径，因此当其固体含量为 20% 时，填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层阻尼性能小于填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层阻尼性能。

3.7.2 填料固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 120 克 400 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 400 目且固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 4 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.6mm、0.8mm、1mm 和 1.4mm。成品如图 3.26 所示，其中图 3.26 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件，图 3.26 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件，图 3.26 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件，图 3.26 (d) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件。



(a) 0.6mm



(b) 0.8mm

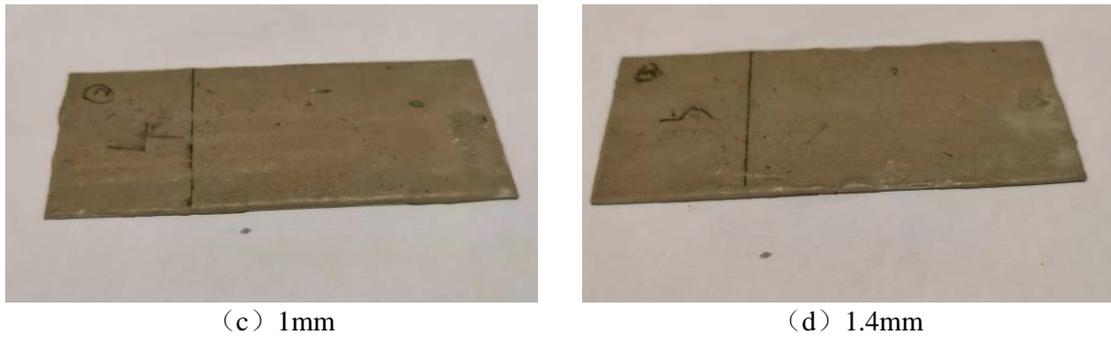


图 3.26 填料为 400 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件质量为 28.7 克，水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件质量为 30.6 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件质量为 32.1 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件质量为 37.2 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 3.9 所示，测得加速度幅频响应函数如图 3.27 所示，其中图 3.27 (a) 为幅值，图 3.27 (b) 为有效值。

表 3.9 填料为 400 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a _A /g)	加速度最大有效值 (a _E /g)	减振效果 (λ _c /%)
0.6	23.58385	15.98650	36.74
0.8	22.40722	15.58748	39.09
1	22.92514	16.02356	37.52
1.4	25.99925	17.14005	31.24

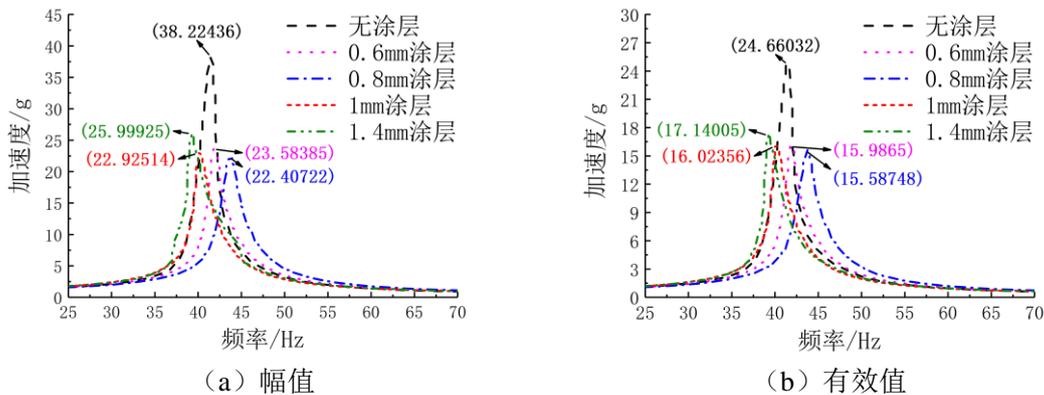


图 3.27 喷涂填料为 400 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.27 可得出结论：填料为 400 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，水性阻尼减振涂层阻尼性能先增加，之后阻尼性能减弱，当水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 时阻尼性能最高。这主要是由于 400 目云母粉的粒径较小，因此当固体含量为 40% 时，云母粉片层间空隙较大，当水性阻尼减振涂层厚度增加时，片层间空隙逐渐减小，片层滑移经历了一个滑移较小至滑移量较大的变化，此时水性阻尼减振涂层的阻尼性能会得到较

大的提升。而之后由于云母片层间的空隙过小，导致片层滑移变得困难，从而导致阻尼性能的减弱。

3.7.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 180 克 400 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 400 目且固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 4 片试验件上，再将其放置在干燥箱中持续烘干 6 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.4mm、0.6mm、0.8mm 和 1mm。成品如图 3.28 所示，其中图 3.28 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.4mm 的试验件，图 3.28 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件，图 3.28 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件，图 3.28 (d) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件。

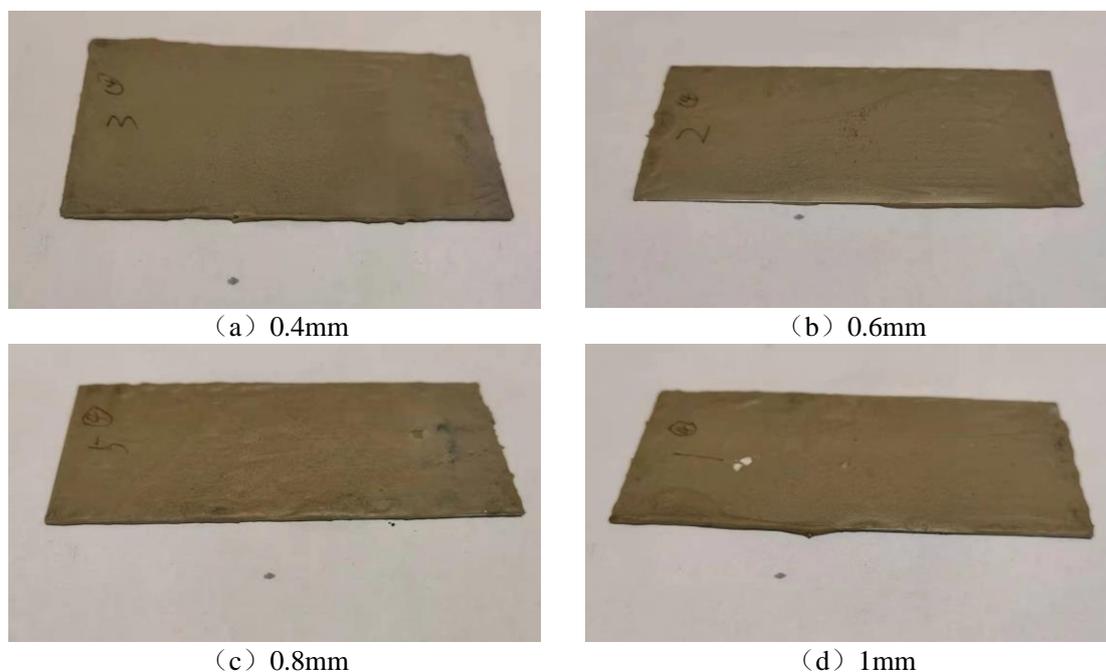


图 3.28 填料为 400 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.4mm 的试验件质量为 28.6 克，水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件质量为 28.9 克，水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 的试验件质量为 30.2 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件质量为 31.9 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 3.10 所示，测得加速度幅频响应函数如图 3.29 所示，其中图 3.29 (a) 为幅值，图 3.29 (b) 为有效值。

表 3.10 填料为 400 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
0.4	29.92295	19.92543	20.46
0.6	28.09198	19.40700	23.91
0.8	25.35352	17.54978	31.25
1	26.37426	17.96397	29.08

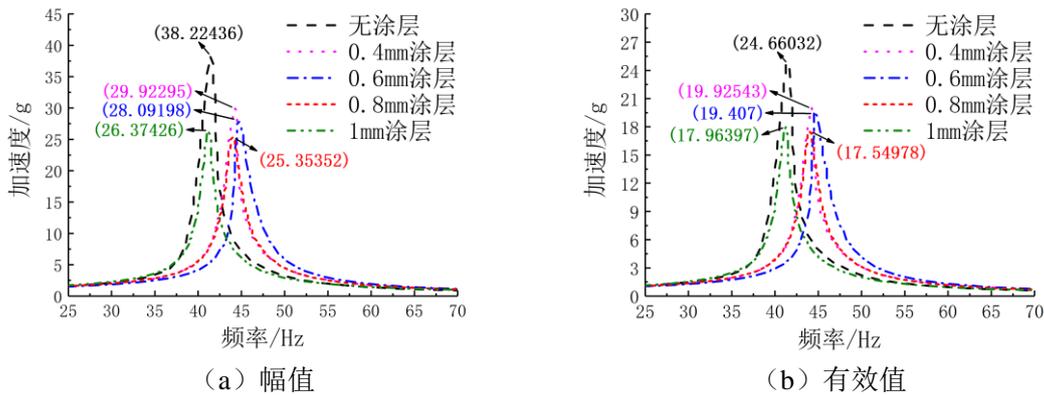


图 3.29 喷涂填料为 400 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.29 可得出结论：填料为 400 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会增高，在达到一定厚度后，阻尼性能会随着厚度的增加略微减弱，当水性阻尼减振涂层厚度为 0.8mm 时阻尼性能最高。这主要因为高固体含量的云母粉片层滑移率较低，且 400 目云母粉的粒径偏小，因此在厚度较低时阻尼性能极差。随着厚度的增加，逐渐形成聚合网状结构，阻尼性能逐渐增大，而由于 400 目云母粉较细密，因此相比于 40 目云母粉，形成的聚合网状结构的阻尼性能较差。在形成聚合网状结构后，随着厚度的增加，阻尼性能变化不是很明显，且由于内部结构原因存在略微下滑的迹象。

3.7.4 试验小结

因此对于填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验件，将涂层厚度与试验测得的最大加速度拟合，拟合曲线如图 3.30 所示。其中图 3.30 (a) 为加速度最大幅值拟合曲线，图 3.30 (b) 为加速度最大有效值拟合曲线。

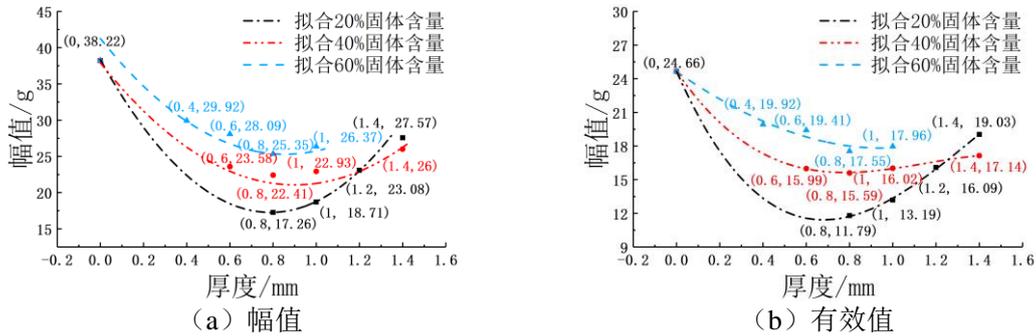


图 3.30 填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层试验件

由图 3.30 可得出结论：对于填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层，在低固体含量（20%）时，其减振机理与填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层减振机理相同，利用云母片层间的滑移，将机械能转换为热能消耗。因此当厚度过厚影响云母片层滑移，导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能降低；在高固体含量（60%）时，其减振机理同样与填料为 10 目、40 目云母粉制得水性阻尼减振涂层减振机理相同，但是由于 400 目云母粉粒径小于 10 目云母粉，因此，与 10 目云母粉在较低的厚度就能形成聚合网状结构不同，填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层随着厚度的增加，逐渐形成聚合网状结构，阻尼性能持续增强；在中固体含量（40%）时，由于 400 目云母粉的粒径较小，与 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层不同，400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层在厚度较低时，云母片间的空隙较大，滑移量较大，仍能将机械能转换为热能，随着水性阻尼减振涂层厚度的增加，片层间空隙逐渐减小，导致片层滑移变得困难，从而水性阻尼减振涂层阻尼性能减弱。

3.8 小结

本章首先分析了单自由度系统共振区减振特性，得出了共振时系统呈阻尼特性，从而可利用共振现象通过半功率带宽法实测系统阻尼。继而对第二章制备所得的飞机管道水性阻尼减振涂层材料进行减振性能试验的试验方案进行了介绍，描述了振动试验系统以及试验步骤。进行了无水性阻尼减振涂层材料的试验件、填料为 10 目、40 目、80 目、400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层的减振性能试验，得到规律如下：

1) 水性阻尼减振涂层材料具有较高的粘弹性，传感器贴于涂层面测得的振动加速度最大幅值和最大有效值均小于传感器贴于金属面测得的振动加速度最大幅值和有效值，因此为降低测量误差，保证试验结果的准确性，水性阻尼减振涂层减振性能试验均将传感器贴于金属面进行研究分析；

2) 填料在低固体含量（20%）时：填料为 10 目、40 目、400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层均表现为随着涂层厚度的增加，阻尼性能会降低，这主要是因为低固体含量时利用云母

片层间的滑移，将机械能转换为热能消耗从而减振，而过厚的涂层会影响云母片层滑移从而导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能降低，且由于 10 目云母粉的粒径最大，因此表现为填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层厚度为 0.25mm 时在低固体含量的情况下减振效果最好，达到了 60.92%；

3) 填料在中固体含量（40%）时：填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层由于固体含量原因导致云母片层间的滑移较为困难，机械能转换率低，且又未能形成聚合网状结构，因此阻尼性能变化不是很明显，随着涂层厚度的增加水性阻尼减振涂层阻尼性能有着略微提升。但由于 40 目云母粉粒径小于 10 目云母粉，因此 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层的阻尼性能比 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层的阻尼性能要好。而由于 400 目云母粉的粒径较小，400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层与 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层不同。400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层在厚度较低时，云母片间的空隙仍较大，未出现滑移困难的情况，此时水性阻尼减振涂层的阻尼性能表现良好，随着涂层厚度的增加，片层空隙逐渐减小，导致片层滑移变得困难，从而水性阻尼减振涂层阻尼性能减弱；

4) 填料在高固体含量（60%）时：填料为 10 目、40 目、400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层均表现为形成聚合网状结构，从而达到减振的效果。其中由于 10 目云母粉的粒径较大，因此能在较低厚度就形成聚合网状结构，随着涂层厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能下降。填料为 40 目、400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层随着涂层厚度的增加，逐渐形成聚合网状结构，阻尼性能持续增强。而由于 400 目云母粉较细密，因此相比于填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层，400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层阻尼性能较差，且由于 10 目云母粉的粒径最大，因此表现为填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层厚度为 0.7mm 时在高固体含量的情况下减振效果最好，达到了 58%。

第四章 飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层减振性能试验研究

附约束层是在水性阻尼减振涂层外侧表面再粘贴一层刚度较大的约束层，通常为金属板。通常地，水性阻尼减振涂层附约束层处理比水性阻尼减振涂层无约束层的减振效果要好，并且其优点是它对结构的高频振动减振效果较好，对结构本身的质量和刚度改变小，同时安全性和可靠性较高^[84-86]。

本章采用本文设计制造的飞机管道水性阻尼减振涂层，在其外侧表面粘贴了一层 1mm 厚度的铝板，其尺寸为 150mm×60mm×1mm，质量为 25.2 克。设计并实施了两组水性阻尼减振涂层附约束层试验件振动试验，证明飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层减振性能的有效性。通过控制变量，比较分析的方法，研究飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层的填料目数、填料固体含量和水性阻尼减振涂层厚度的影响因素，探究优化的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层设计方法。

4.1 附约束层减振的基本原理

与水性阻尼减振涂层无约束层的耗能机理不同，水性阻尼减振涂层的耗能机理是当基层产生弯曲振动时，阻尼减振涂层随基体一起振动，在阻尼减振涂层内部产生拉压变形而耗能的同时，基体与约束层产生相对滑移运动，阻尼减振涂层产生剪切应变使一部分机械能损耗掉^[87,88]。水性阻尼减振涂层附约束层结构如图 4.1 所示，图 4.1 (a) 为其未受力时的状态，图 4.1 (b) 为其受力时的状态。

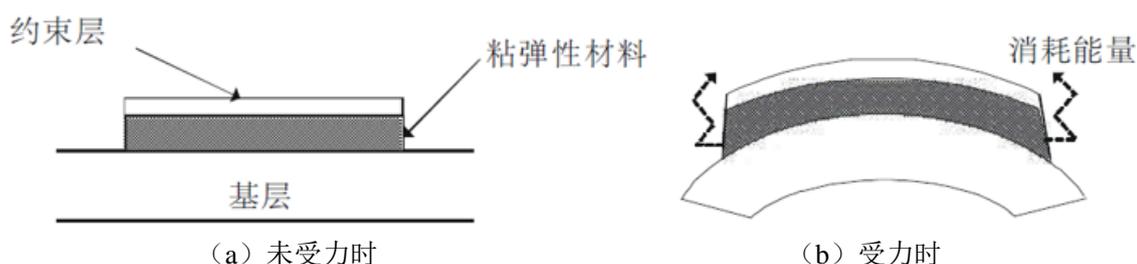


图 4.1 水性阻尼减振涂层附约束层结构

4.2 填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究

由 3.4 节对填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究可得，加速度传感器贴于涂层面时测量误差较大，因此本节只采用金属测点。本节研究了填料为 10 目云母粉制得的

水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究，通过控制变量研究了填料的固体含量以及涂层厚度对水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能影响。

4.2.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 60 克 10 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 10 目且固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 2 片试验件上，再在涂层外侧加一层 1mm 金属铝片作为约束层，将其放置在干燥箱中，由于水性阻尼减振涂层材料与空气接合面较小，因此持续烘干约 48 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层附约束层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：1.2mm、1.4mm。成品如图 4.2 所示，其中图 4.2 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件，图 4.2 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件。



图 4.2 填料为 10 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件质量为 53.5 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件质量为 54.7 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 4.1 所示，测得加速度幅频响应函数如图 4.3 所示，其中图 4.3 (a) 为幅值，图 4.3 (b) 为有效值。

表 4.1 填料为 10 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
1.2	8.55147	6.01664	76.62
1.4	9.27956	6.54524	74.59

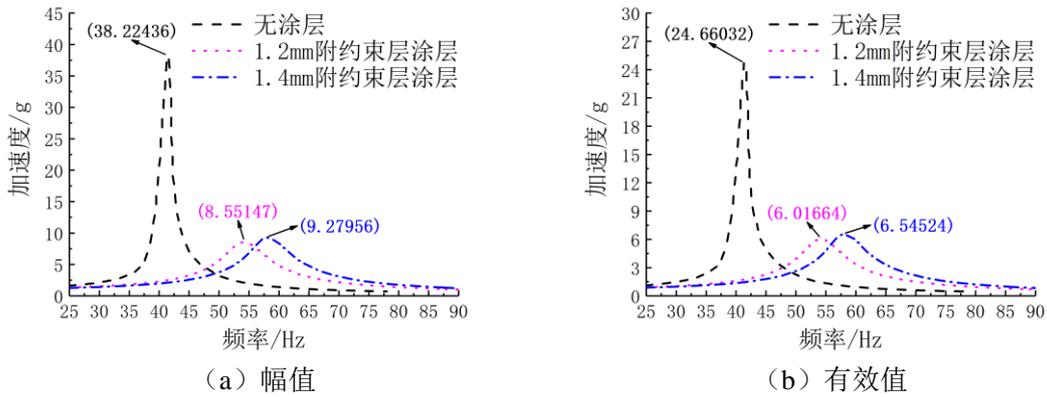


图 4.3 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

由图 4.3 可得出结论：填料为 10 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会略微降低，当水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 时阻尼性能最高。这主要是因为随着涂层厚度的增加，片层滑移逐渐变得困难，从而导致阻尼性能下降。但从图中可明显看出，附约束层极大的提升了水性阻尼减振涂层的阻尼性能。

4.2.2 填料固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 120 克 10 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 10 目且固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 2 片试验件上，再在涂层外侧加一层 1mm 金属铝片作为约束层，将其放置在干燥箱中，由于水性阻尼减振涂层材料与空气接合面较小，因此持续烘干约 48 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层附约束层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：1.4mm、1.7mm。成品如图 4.4 所示，其中图 4.4 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件，图 4.4 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.7mm 的试验件。

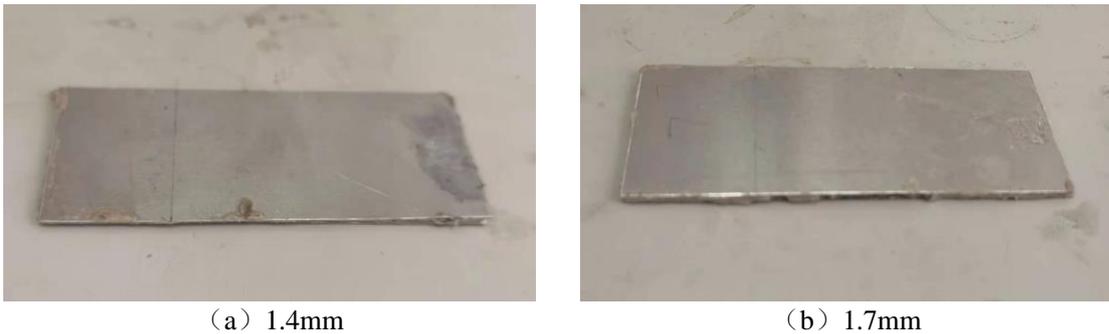


图 4.4 填料为 10 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件质量为 54.4 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.7mm 的试验件质量为 55.7 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 4.2 所示，测得加速度幅频响应函数如图 4.5 所示，其中图 4.5 (a) 为幅值，

图 4.5 (b) 为有效值。

表 4.2 填料为 10 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a _A /g)	加速度最大有效值 (a _E /g)	减振效果 (λ _c /%)
1.4	8.90867	6.24248	75.69
1.7	6.99628	4.8384	81.04

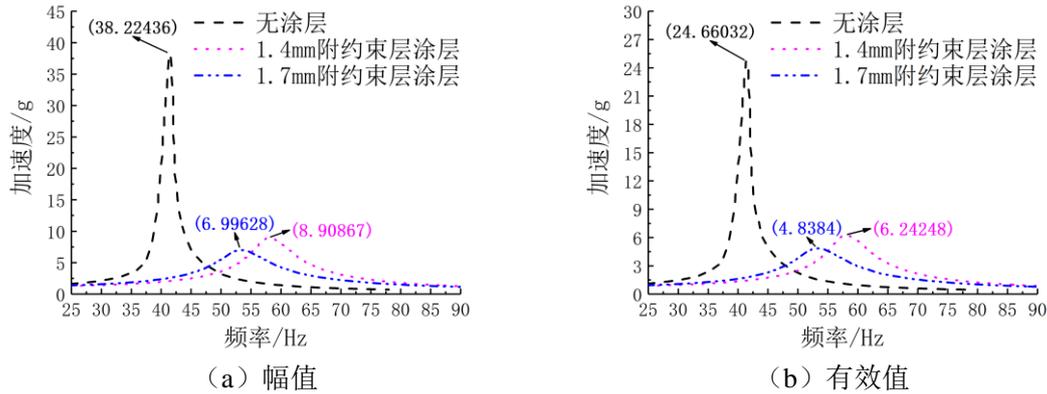


图 4.5 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

由图 4.5 可得出结论：填料为 10 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会略微提升，当水性阻尼减振涂层厚度为 1.7mm 时阻尼性能最高。这主要是因为虽然片层滑移变得困难，但有约束层的存在且随着涂层厚度的增加，制得的水性阻尼减振涂层逐渐形成聚合网状结构，从而阻尼性能得到了提升。从图中可明显看出，附约束层极大的提升了水性阻尼减振涂层的阻尼性能。

4.2.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 180 克 10 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 10 目且固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 3 片试验件上，再在涂层外侧加一层 1mm 金属铝片作为约束层，将其放置在干燥箱中，由于水性阻尼减振涂层材料与空气接合面较小，因此持续烘干约 48 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层附约束层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：0.9mm、1.5mm 和 1.7mm。成品如图 4.6 所示，其中图 4.6 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 0.9mm 的试验件，图 4.6 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 的试验件，图 4.6 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.7mm 的试验件。

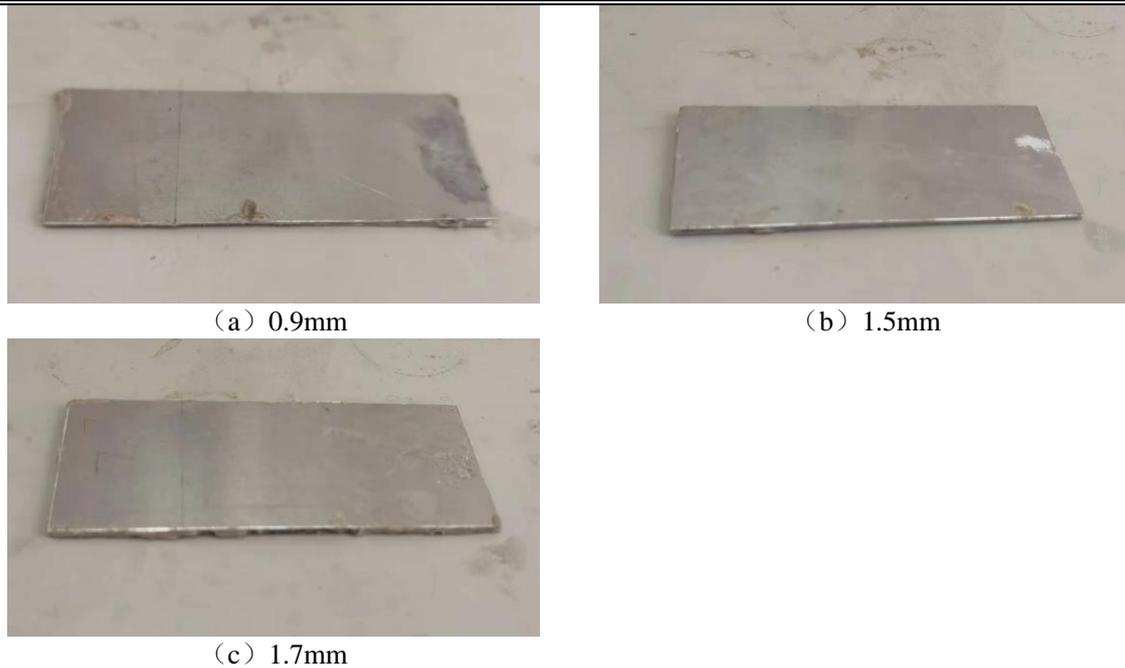


图 4.6 填料为 10 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件
经测量水性阻尼减振涂层厚度为 0.9mm 的试验件质量为 51.9 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 的试验件质量为 57.4 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.7mm 的试验件质量为 62.9 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 4.3 所示，测得加速度幅频响应函数如图 4.7 所示，其中图 4.7 (a) 为幅值，图 4.7 (b) 为有效值。

表 4.3 填料为 10 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
0.9	9.99178	6.97771	72.78
1.5	4.84409	3.35888	86.9
1.7	7.3513	5.1591	79.93

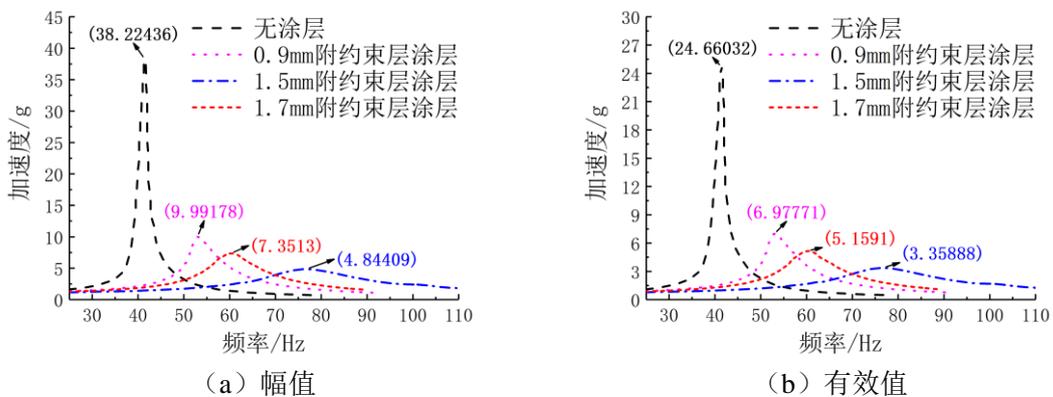


图 4.7 喷涂填料为 10 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

由图 4.7 可得出结论：填料为 10 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会得到显著提升，而后水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能会降低，当水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 时阻尼性能最高。主要是因为虽然片层滑移变得困难，但有约束层的存在且随着涂层厚度的增加，制得的水性阻尼减振涂层逐渐形成聚合网状结构，从而阻尼性能得到了提升。在阻尼性能达到最大值之后，与无附约束层的水性阻尼减振涂层规律相似，随着涂层厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，导致了水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能降低。且从图中可明显看出，附约束层极大的提升了水性阻尼减振涂层的阻尼性能。

4.2.4 试验小结

因此对于填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件，将涂层厚度与试验测得的最大加速度拟合，拟合曲线如图 4.8 所示。其中图 4.8 (a) 为加速度最大幅值拟合曲线，图 4.8 (b) 为加速度最大有效值拟合曲线。

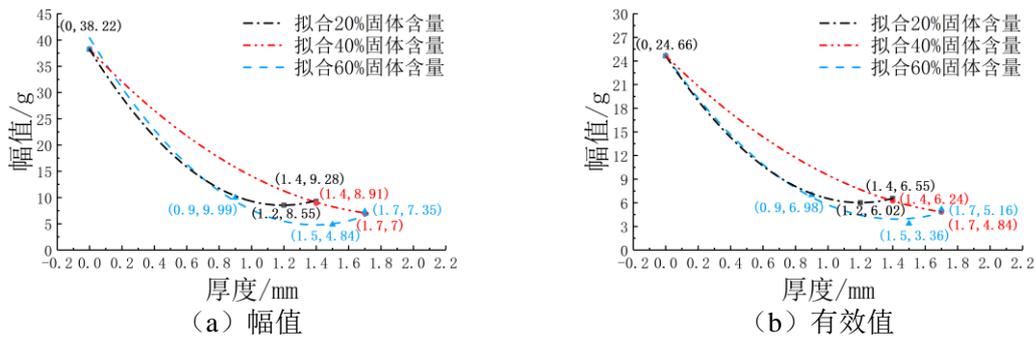


图 4.8 填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

由图 4.8 可得出结论：对于填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层，在低固体含量（20%）时，其减振机理主要是利用云母片层间的滑移，将机械能转换为热能消耗，因此当厚度增加影响云母片层滑移会导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能降低，从而导致水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能略微降低；在中固体含量（40%）时，与填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层无附约束层在此固体含量下无法形成聚合网状结构不同，有约束层的存在且随着涂层厚度的增加，制得的水性阻尼减振涂层逐渐形成聚合网状结构，阻尼性能得到了提升；在高固体含量（60%）时，其减振机理主要是形成聚合网状结构，从而增强水性阻尼减振涂层的阻尼性能，随着涂层厚度的增加，水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能得到显著提升，而后在阻尼性能达到最大值之后，与无附约束层的水性阻尼减振涂层规律相似，由于厚度的增加导致聚合网状结构逐渐变得宽松，导致了水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能降低。

4.3 填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究

由 3.4 节对填料为 80 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层振动试验研究可得，加速度传感器贴于涂层面时测量误差较大，因此本节只采用金属测点。本节研究了填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究，通过控制变量研究了填料的固体含量以及涂层厚度对水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能影响。

4.3.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 60 克 40 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 40 目且固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 2 片试验件上，再在涂层外侧加一层 1mm 金属铝片作为约束层，将其放置在干燥箱中，由于水性阻尼减振涂层材料与空气接合面较小，因此持续烘干约 48 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层附约束层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：1mm、1.2mm。成品如图 4.9 所示，其中图 4.9 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件，图 4.9 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件。



图 4.9 填料为 40 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件质量为 54.4 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.2mm 的试验件质量为 56.9 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 4.4 所示，测得加速度幅频响应函数如图 4.10 所示，其中图 4.10 (a) 为幅值，图 4.10 (b) 为有效值。

表 4.4 填料为 40 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
1	10.571	7.43884	71.09
1.2	11.69792	8.27109	67.93

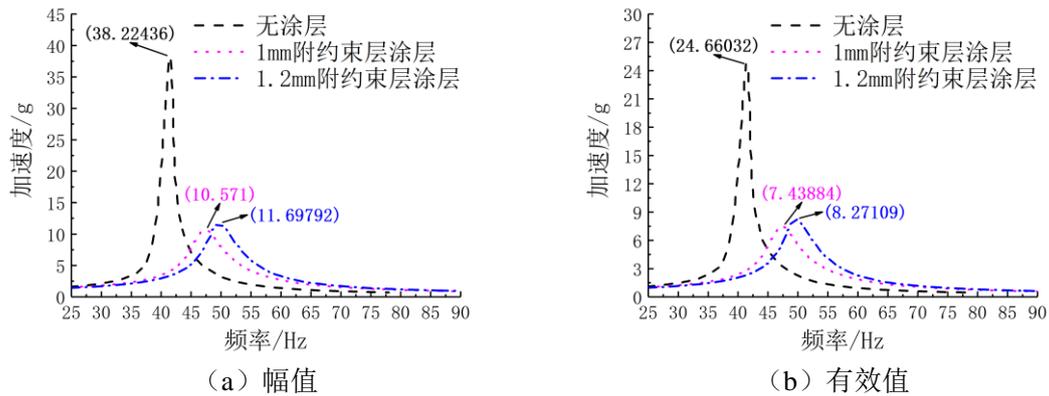


图 4.10 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

由图 4.10 可得出结论：填料为 40 目云母粉固体含量为 20% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会略微降低，当水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 时阻尼性能最高。这主要是因为随着涂层厚度的增加，片层滑移逐渐变得困难，从而导致阻尼性能下降。但从图中可明显看出，附约束层极大的提升了水性阻尼减振涂层的阻尼性能。

4.3.2 填料固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 120 克 40 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 40 目且固体含量为 40% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 3 片试验件上，再在涂层外侧加一层 1mm 金属铝片作为约束层，将其放置在干燥箱中，由于水性阻尼减振涂层材料与空气接合面较小，因此持续烘干约 48 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层附约束层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：1mm、1.4mm 和 1.6mm。成品如图 4.11 所示，其中图 4.11 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件，图 4.11 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件，图 4.11 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.6mm 的试验件。



(a) 1mm



(b) 1.4mm



(c) 1.6mm

图 4.11 填料为 40 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 的试验件质量为 54.5 克，经测量水性阻尼减振涂层厚度为 1.4mm 的试验件质量为 60.6 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.6mm 的试验件质量为 65.1 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 4.5 所示，测得加速度幅频响应函数如图 4.12 所示，其中图 4.12 (a) 为幅值，图 4.12 (b) 为有效值。

表 4.5 填料为 40 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
1	5.29094	3.66609	85.65
1.4	6.80039	4.75095	81.74
1.6	7.8259	5.06998	79.49

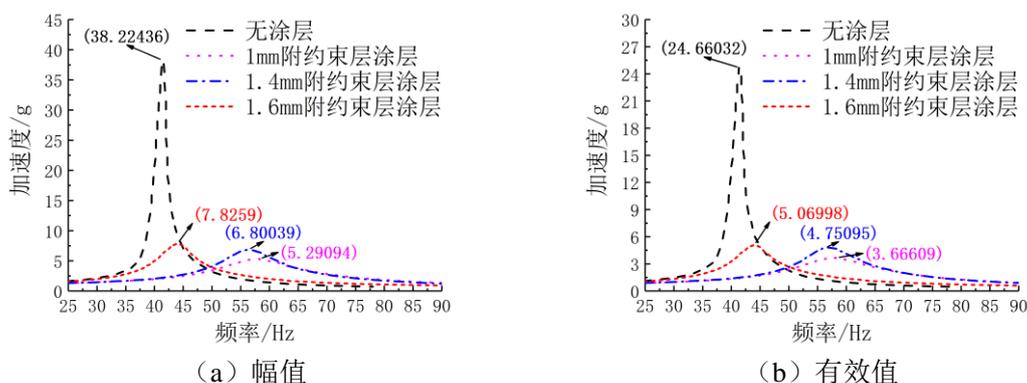


图 4.12 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

由图 4.12 可得出结论：填料为 40 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会略微降低，当水性阻尼减振涂层厚度为 1mm 时阻尼性能最高。这主要是因为随着涂层厚度的增加，片层滑移逐渐变得困难。而与填料为 10 目云母粉固体含量为 40% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层不同，40 目云母粉的粒径较 10 目云母粉的粒径小，因此无法逐渐形成聚合网状结构，因此阻尼性能下降。但从图中可明显看出，附约束

层极大的提升了水性阻尼减振涂层的阻尼性能。

4.3.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究

通过 2.2.3 节所述的工艺流程，将 180 克 40 目的云母粉与 300ml 丙烯酸乳液混合，其余原料均按照 2.2.2 节的参数配比，制备出填料为 40 目且固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂料。将水性阻尼减振涂料分别喷涂在 3 片试验件上，再在涂层外侧加一层 1mm 金属铝片作为约束层，将其放置在干燥箱中，由于水性阻尼减振涂层材料与空气接合面较小，因此持续烘干约 48 小时，制得涂有水性阻尼减振涂层附约束层的试验件。经测试其涂层厚度分别为：1.5mm、1.7mm 和 2.3mm。成品如图 4.13 所示，其中图 4.13 (a) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 的试验件，图 4.13 (b) 为水性阻尼减振涂层厚度为 1.7mm 的试验件，图 4.13 (c) 为水性阻尼减振涂层厚度为 2.3mm 的试验件。

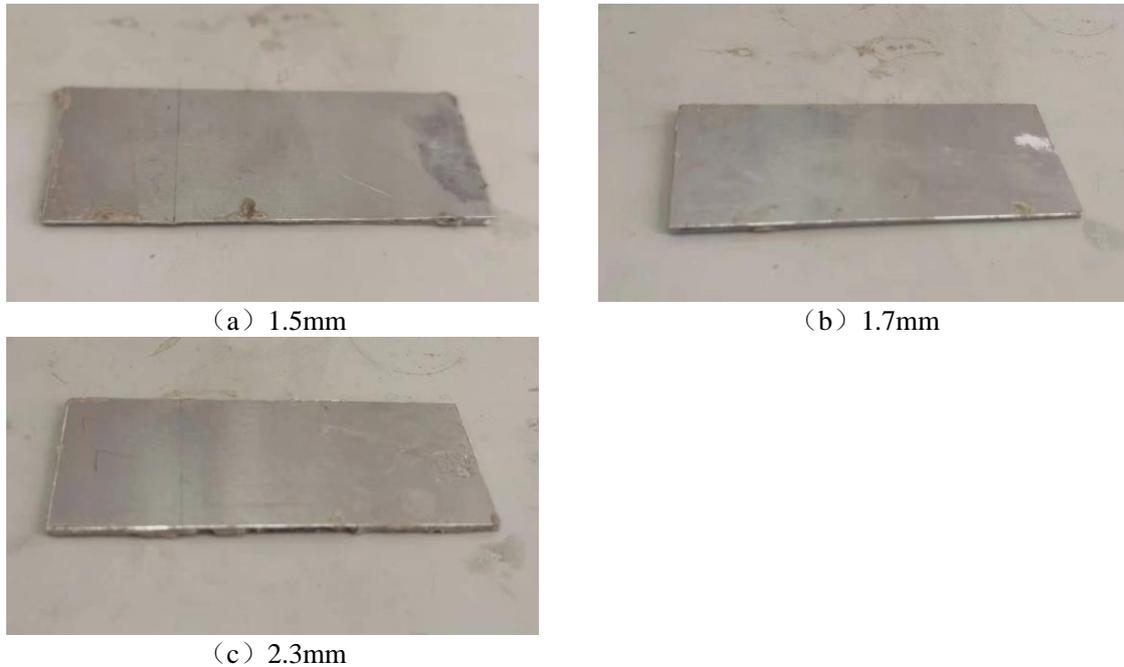


图 4.13 填料为 40 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

经测量水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 的试验件质量为 55.6 克，水性阻尼减振涂层厚度为 1.7mm 的试验件质量为 56.9 克，水性阻尼减振涂层厚度为 2.3mm 的试验件质量为 67.5 克。采用 3.2.2 节所述的振动试验系统，通过振动信号分析系统分析所得数据如表 4.6 所示，测得加速度幅频响应函数如图 4.14 所示，其中图 4.14 (a) 为幅值，图 4.14 (b) 为有效值。

表 4.6 填料为 40 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验统计数据

涂层厚度 (t/mm)	加速度最大幅值 (a_A/g)	加速度最大有效值 (a_E/g)	减振效果 ($\lambda_c/\%$)
1.5	4.36995	3.04306	88.12
1.7	5.06013	3.51497	86.26
2.3	5.82991	4.06505	84.14

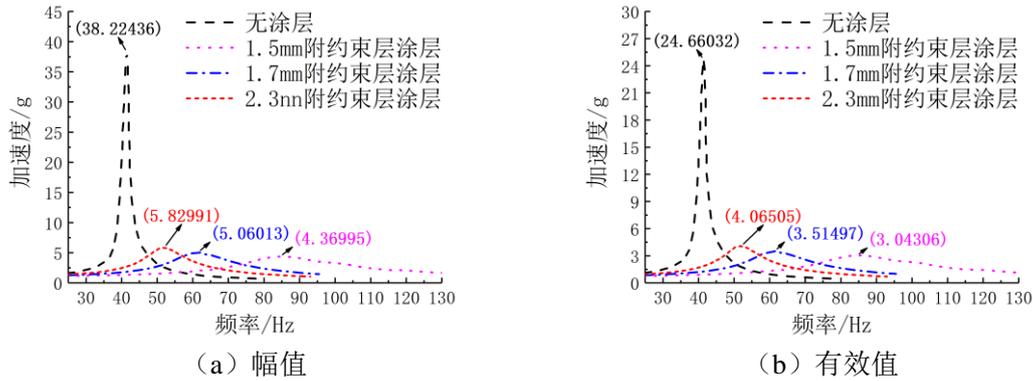


图 4.14 喷涂填料为 40 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

由图 4.14 可得出结论：填料为 40 目云母粉固体含量为 60% 制得的水性阻尼减振涂层附约束层随着涂层厚度的增加，阻尼性能会略微降低，当水性阻尼减振涂层厚度为 1.5mm 时阻尼性能最高。这主要是因为虽然片层滑移变得困难，但水性阻尼减振涂层已经形成了聚合网状结构，而随着涂层厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，导致了水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能降低。且从图中可明显看出，附约束层极大的提升了水性阻尼减振涂层的阻尼性能。

4.3.4 试验小结

因此对于填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件，将涂层厚度与试验测得的最大加速度拟合，拟合曲线如图 4.15 所示。其中图 4.15 (a) 为加速度最大幅值拟合曲线，图 4.15 (b) 为加速度最大有效值拟合曲线。

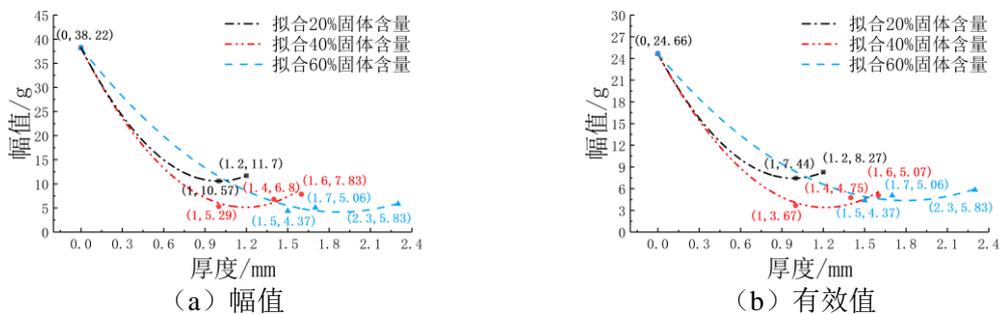


图 4.15 填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层试验件

由图 4.15 可得出结论：对于填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层，在低固体含量（20%）时，其减振机理主要是利用云母片层间的滑移，将机械能转换为热能消耗，

因此当厚度增加影响云母片层滑移会导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能降低，从而导致水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能略微降低；在中固体含量（40%）时，与填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层在此固体含量下逐渐形成聚合网状结构，阻尼性能得到提升不同，由于 40 目云母粉的粒径比 10 目云母粉的粒径小，填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仍无法形成聚合网状结构，故随着涂层厚度的增加，云母片层间的滑移逐渐变得困难，导致阻尼性能的下降；在高固体含量（60%）时，随着涂层厚度的增加，虽然片层滑移变得困难，但水性阻尼减振涂层已经形成了聚合网状结构，而随着涂层厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，导致了水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能降低。

4.4 小结

本章首先分析了附约束层减振的基本原理，其主要通过提升阻尼材料的剪切变形提升阻尼性能。继而进行了填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层振动试验研究，分别研究了其固体含量为 20%、40% 以及 60% 时的阻尼性能，得到规律如下：

1) 水性阻尼减振涂层附约束层后极大的提升了试验件的阻尼性能；

2) 填料在低固体含量（20%）时：填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层均表现为随着涂层厚度的增加，阻尼性能会有略微下降，这与无附约束层的水性阻尼减振涂层在填料为低固体含量时出现的情况相同，其原因仍是低固体含量主要利用云母片层间的滑移，将机械能转换为热能消耗从而减振，而过厚的涂层会影响云母片层滑移从而导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能降低；

3) 填料在中固体含量（40%）时：与无附加约束层的水性阻尼减振涂层无法形成聚合网状结构不同，由于附约束层的存在，填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层均形成了聚合网状结构。而 10 目云母粉由于其粒径较大，因此受约束层的影响较小，随着涂层厚度的增加，填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层逐渐形成聚合网状结构，阻尼性能从而逐渐增强；40 目云母粉由于粒径较小，因此在较薄厚度的水性阻尼减振涂层由于附约束层的影响就已经形成了聚合网状结构，从而随着涂层的厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，导致阻尼性能略微减弱；

4) 填料在高固体含量（60%）时：与填料在中固体含量（40%）时的情况相似，填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能先升高，这是由于随着涂层厚度的增加，水性阻尼减振涂层逐渐形成聚合网状结构，而后阻尼性能略微下降，这与填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层无附约束层在填料为高固体含量（60%）的情形相同，这主要是因为聚合网状结构结构逐渐变得宽松。而填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能则随着涂层厚度的增加而逐渐略微减弱，这说明填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂

层在较低厚度时就已经形成了聚合网状结构，随着涂层厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，导致阻尼性能略微降低，而填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层无附约束层的聚合网状结构却需要一定厚度才能完全形成，因此，可得出结论，在填料为高固体含量（60%）时，附约束层会降低粒径较大的填料如 10 目云母粉形成聚合网状结构的效率，而会加快粒径较小的填料如 40 目云母粉形成聚合网状结构的速度。

第五章 飞机管道水性阻尼减振涂层仿真研究

本章结合单自由度系统共振区的特性以及飞机管道水性阻尼减振涂层和飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层的减振试验结果,通过三维建模、ANSYS 谐响应分析等手段,仿真模拟喷涂飞机管道水性阻尼减振涂层及飞机管道水性阻尼涂层附约束层的试验件随着填料目数、固体含量及水性阻尼减振涂层厚度等因素影响的变化规律,验证仿真模型的准确性和有效性,为后续附阻尼涂层材料的管道动力学分析及疲劳寿命预测提供基础。

5.1 基于 ANSYS 软件的多材料振动有限元仿真方法

有限元法是目前处理工程计算最为常见的一种数值分析方法,可用以解决结构分析、流体力学、电磁场等及其耦合问题^[89]。这些问题需要建立并求解复杂的常微分方程或者偏微分方程进行求解,但实际问题中所研究的物体几何形状、力学特性以及载荷十分复杂,这便增加了数学解析的难度,这时候有限元此类的数值方法,通过联立代数方程组,可求解出连续体中离散点的近似值。有限元法适用于任何几何外形的物体,以及各类物理问题。结合现代计算机的高速运算能力,有限元已广泛应用于航空航天、机械、石化、土木等领域和学科,计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)已经成为工程应用与研究的重要组成部分。有限元的计算流程图如图 5.1 所示,首先分析有待解决的工程问题,并抽象出数学模型,主要包括变量、求解方程、边界条件等,然后迭代求解,最后得到满足要求的结果。

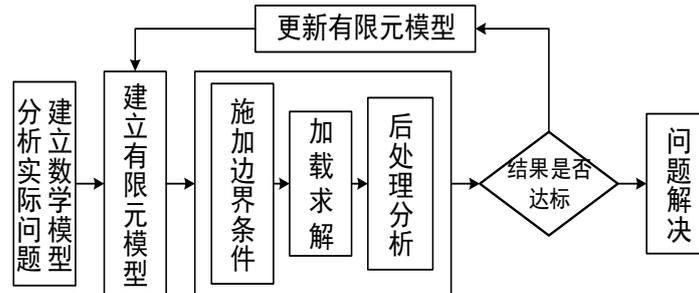


图 5.1 有限元分析流程图

5.1.1 复合材料层合板理论

复合材料层合板可根据其厚度尺寸与板的长宽之比分为薄板、中厚板和厚板。复合材料层合板壳理论一般主要分为三种:

- 1) 分析薄层合板壳的经典理论;
- 2) 分析中厚层合板壳的精化理论;

3) 分析厚度层合板壳的基于三维特性的经典特性理论。

目前几种理论的共同出发点是下列四条假设^[90]:

- 1) 板变形后的中面仍为变形前的几何中面;
- 2) 板的横向位移(挠度)沿厚度是一定的;
- 3) 水平位移偏离直法线部分沿各截面是几何相似的;
- 4) 影响弯曲应力的挤压变形沿各截面是几何相似的。

因此其仍是三维弹性力学理论的一种简化和近似。常见的有以下几种假设:

- 1) 假定原直法线变形后仍保持直线, 但不再垂直中面的 **Reissner-Mindlin** 理论;
- 2) 假定位移 u, v 是 z 的线性函数, 横向剪切力与 z 无关的 **Hencky** 的精化理论;
- 3) 假定 $\sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ 等是 z 的函数的 **Kromma** 的精化理论;
- 4) 假定变形前垂直于中面的直法线变形后会发生扭曲, 且剪切沿厚度方向, 按抛物线规律分布的 **BπacobBφ** 的精化理论。

其中, **Reissner-Mindlin** 理论目前广泛应用于复合材料板壳有限元分析中^[91]。其平板的位移场近似表示为:

$$\begin{cases} u(x, y, z, t) = u_0(x, y) - z\phi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) = v_0(x, y) - z\phi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) = w_0(x, y, t) \end{cases} \quad (5-1)$$

5.1.2 模型建立

使用 **Hypermesh** 软件进行有限元建模, 其为一个高质量的有限元前处理器, 它提供了交互的可视化环境, 从而帮助用户建立产品有限元模型。建立的试验件有限元模型如图 5.2 所示, 试验件实际模型如图 5.3 所示。

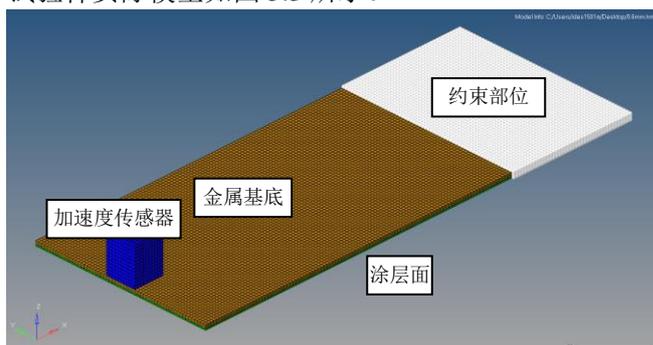


图 5.2 试验件有限元模型



图 5.3 试验件实际模型

该金属基底所用材料为 2A12, 金属基底所涂材料为制备的飞机管道水性阻尼减振涂层, 金属基底上的加速度传感器所用材料为 1Cr18Ni9Ti。建模时将金属基底以及制备阻尼涂层做整体刚性处理, 忽略之间的连接面; 金属基底以及加速度传感器也做整体刚性处理, 忽略其间的连接面。试验金属基底、涂层材料以及加速度传感器均采用 **SOLID185** 单元。

5.1.3 仿真参数设置

使用 ANSYS 仿真软件模拟喷涂飞机管道水性阻尼减振涂层试验件的减振性能，需要明确结构材料参数，本文中采用的材料参数如表 5.1 所示。

表 5.1 模型材料参数

	弹性模量 (E/Pa)	密度 ($\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 (μ)
金属基底	6.6×10^{10}	2800	0.33
涂层材料	$1.8 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^7$	431~1151	0.15~0.25
加速度传感器	2.1×10^{11}	7800	0.3

5.2 飞机管道水性阻尼减振涂层仿真研究

由 3.8 节可知：飞机管道水性阻尼减振涂层填料在低固体含量（20%）时，填料为 10 目、40 目、400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层均表现为随着涂层厚度的增加，阻尼性能会降低；填料在中固体含量（40%）时，填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层由于固体含量原因导致云母片层间的滑移较为困难，机械能转换率低，且又未能形成聚合网状结构，因此阻尼性能变化不是很明显，随着涂层厚度的增加水性阻尼减振涂层阻尼性能有着略微提升。但由于 40 目云母粉的粒径小于 10 目云母粉，因此 40 目云母粉制得阻尼减振涂层的阻尼性能比 10 目云母粉制得阻尼减振涂层的阻尼性能要好。而由于 400 目云母粉的粒径较小，400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层与 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层不同。400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层在厚度较低时，云母片间的空隙仍较大，未出现滑移困难的情况，此时水性阻尼减振涂层的阻尼性能表现良好，随着涂层厚度的增加，片层空隙逐渐减小，导致片层滑移变得困难，从而水性阻尼减振涂层阻尼性能减弱；填料在高固体含量（60%）时，填料为 10 目、40 目、400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层均表现为形成聚合网状结构，从而达到减振的效果。

因此为验证上述结论的正确性，须进行三组仿真试验：

1) 由于填料低固体含量（20%）时三种目数的规律相似，因此进行一组同固体含量同目数云母粉填料不同涂层厚度的仿真试验，以验证填料为低固体含量时规律的有效性和准确性；

2) 由于填料中固体含量（40%）时三种目数的规律相差较大，因此进行一组同固体含量不同目数云母粉填料相同涂层厚度的仿真试验，以验证填料为中固体含量时规律的有效性和准确性；

3) 由于填料高固体含量（60%）时均形成聚合网状结构而使得飞机管道水性阻尼减振涂层阻尼性能提升，因此进行一组不同固体含量同目数云母粉填料相同涂层厚度得仿真试验，以验

证聚合网状结构的形成。

通过本文 3.1 节推导出的式 (3-19)，可由本文第三章飞机管道水性阻尼减振涂层材料减振性能试验所得到的幅频响应函数计算得到相对阻尼比 ζ 。将相对阻尼比 ζ 代入有限元模型中，并对模型进行谐响应仿真，以证明仿真模型的准确性和有效性。

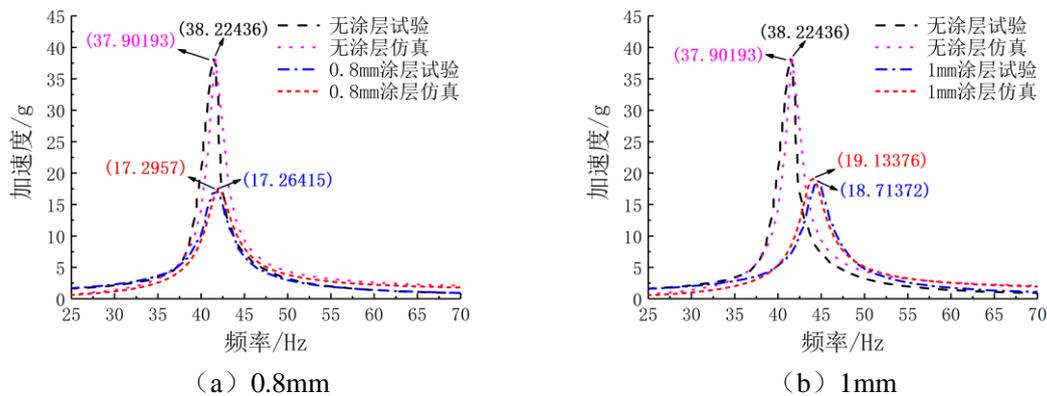
5.2.1 同固体含量同目数的云母粉填料不同涂层厚度仿真

因为填料在低固体含量 (20%) 时，填料为 10 目、40 目、400 目云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层的规律相似，均表现为随着涂层厚度的增加，阻尼性能会降低，本节采用填料为 400 目固体含量为 20% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层试验件作为仿真对象，其他参数均为 5.1.3 节所设，制得的飞机管道水性阻尼减振涂层参数如表 5.2 所示。

表 5.2 填料为 400 目固体含量为 20% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层仿真参数设置

涂层厚度 t/mm	涂层质量 m/g	涂层密度 $\rho/g \cdot mm^{-3}$	阻尼比 ζ	材料阻尼系数 $c/(N \cdot s/m)$
0.8	4.428	$6.15e^{-10}$	0.03313	0.08147
1	4.856	$5.4e^{-10}$	0.03089	0.08263
1.2	7.295	$6.75e^{-10}$	0.02286	0.06499
1.4	7.617	$6.05e^{-10}$	0.01989	0.05743

按照 5.1.2 节所述建立有限元模型，通过 ANSYS 谐响应分析，并后处理填料为 400 目固体含量为 20% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层试验件仿真试验对比如图 5.4 所示，其中图 5.4 (a) 为涂层厚度为 0.8mm 的试验件，图 5.4 (b) 为涂层厚度为 1mm 的试验件，图 5.4 (c) 为涂层厚度为 1.2mm 的试验件，图 5.4 (d) 为涂层厚度为 1.4mm 的试验件。



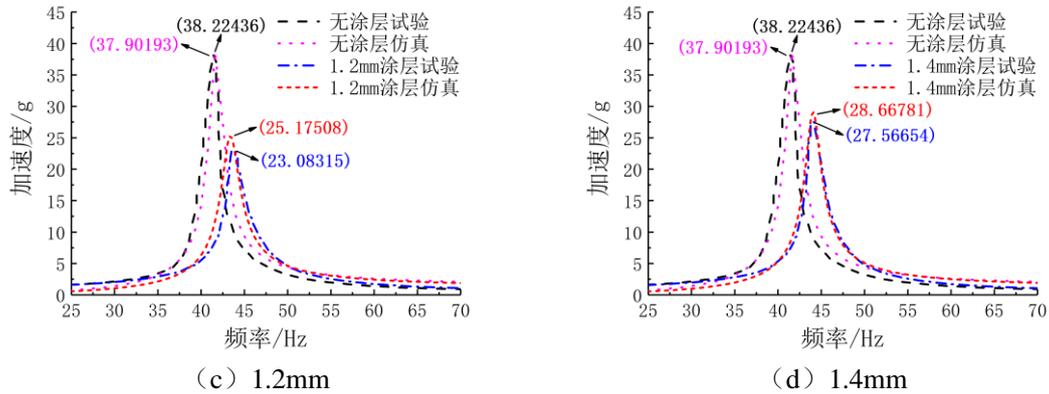


图 5.4 填料为 400 目固体含量为 20%的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层仿真试验对比

由图 5.4 可看出：根据半功率带宽法计算出的阻尼系数 ζ 代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合，误差分别为 0.18%、2.24%、9.06%和 3.99%。仿真所得结论与试验相同，随着涂层厚度的增加，阻尼性能会降低，证明了仿真模型的准确性和有效性。

5.2.2 同固体含量不同目数的云母粉填料同涂层厚度仿真

因为填料在中固体含量（40%）时，填料为 10 目、40 目、400 目云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层的规律相差较大，本节采用填料为 10 目、40 目、400 目云母粉固体含量为 40% 制得的飞机管道水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件作为仿真对象，其他参数均为 5.1.3 节所设，制得的飞机管道水性阻尼减振涂层参数如表 5.3 所示。

表 5.3 填料固体含量为 40%的云母粉制得的 0.6mm 厚飞机管道水性阻尼减振涂层仿真参数设置

填料目数 n/目	涂层质量 m/g	涂层密度 $\rho/g \cdot mm^{-3}$	阻尼比 ζ	材料阻尼系数 $c/(N \cdot s/m)$
10	3.375	$6.25e^{-10}$	0.02235	0.05715
40	4.058	$7.51e^{-10}$	0.02450	0.06595
400	3.545	$6.56e^{-10}$	0.02395	0.05749

按照 5.1.2 节所述建立有限元模型，通过 ANSYS 谐响应分析，并后处理填料固体含量为 40% 的云母粉制得的 0.6mm 厚飞机管道水性阻尼减振涂层试验件仿真试验对比如图 5.5 所示，其中图 5.5 (a) 为填料目数为 10 目的试验件，图 5.5 (b) 为填料目数为 40 目的试验件，图 5.5 (c) 为填料目数为 400 目的试验件。

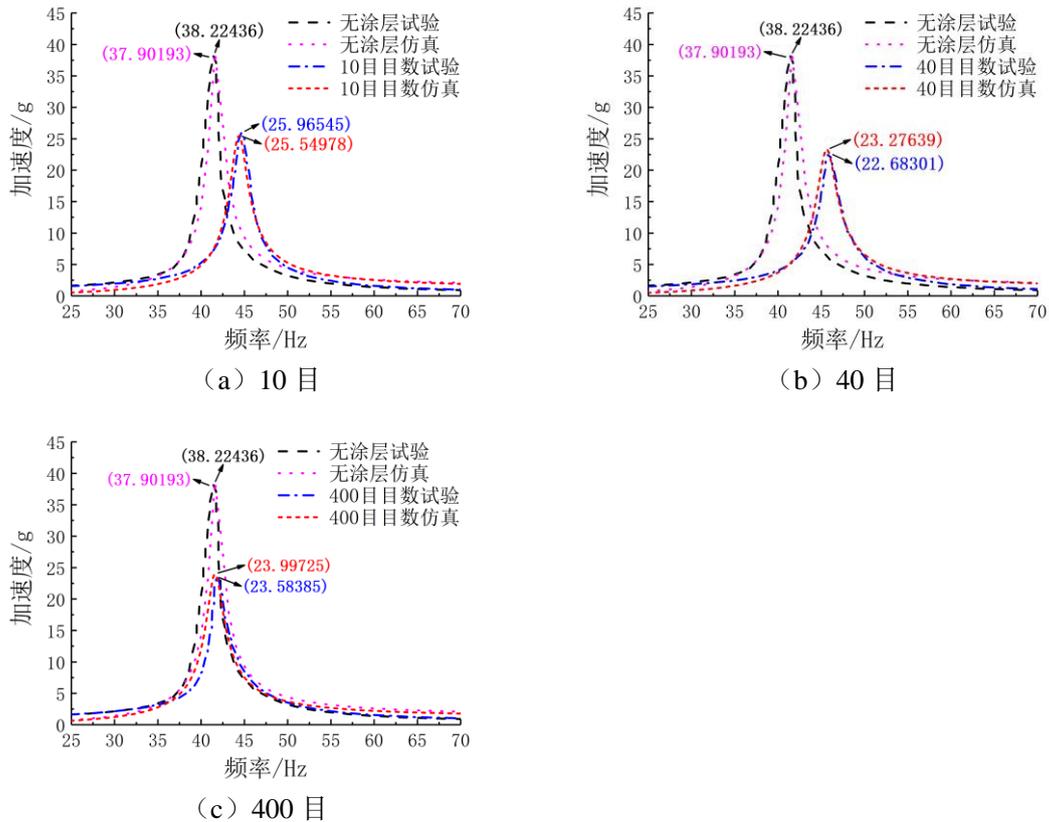


图 5.5 填料固体含量为 40% 的云母粉制得的 0.6mm 厚飞机管道水性阻尼减振涂层仿真试验对比

由图 5.5 可看出：根据半功率带宽法计算出的阻尼系数 ζ 代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合，误差分别为 1.6%、2.62% 和 1.75%。仿真所得结论与试验相同，由于 40 目云母粉的粒径小于 10 目云母粉，填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层的阻尼性能比填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层的阻尼性能要好。而由于 400 目云母粉的粒径较小，填料为 400 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层在厚度较低时，云母片间的空隙仍较大，未出现滑动困难的情况，此时水性阻尼减振涂层的阻尼性能表现良好，证明了仿真模型的准确性和有效性。

5.2.3 不同固体含量同目数的云母粉填料同涂层厚度仿真

因为填料在高固体含量（60%）时，填料为 10 目云母粉、填料为 40 目云母粉与填料为 400 目云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层均形成了聚合网状结构从而使得阻尼性能得到提升，本节采用填料为 40 目制得的飞机管道水性阻尼减振涂层厚度为 0.6mm 的试验件，分别仿真模拟其固体含量为 20%、40%、60% 的情况，其他参数均为 5.1.3 节所设，制得的飞机管道水性阻尼减振涂层参数如表 5.4 所示。

表 5.4 填料为 40 目云母粉制得的 0.6mm 厚飞机管道水性阻尼减振涂层仿真参数设置

填料固体含量 C/%	涂层质量 m/g	涂层密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$	阻尼比 ζ	材料阻尼系数 $c/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m})$
20	2.251	4.17e^{-10}	0.03198	0.07549
40	4.058	7.51e^{-10}	0.02450	0.06595
60	3.307	6.12e^{-10}	0.02542	0.06414

按照 5.1.2 节所述建立有限元模型，通过 ANSYS 谐响应分析，并后处理填料为 40 目的云母粉制得的 0.6mm 厚飞机管道水性阻尼减振涂层试验件仿真试验对比如图 5.6 所示，其中图 5.6 (a) 为填料固体含量为 20% 的试验件，图 5.6 (b) 为填料固体含量为 40% 的试验件，图 5.6 (c) 为填料固体含量为 60% 的试验件。

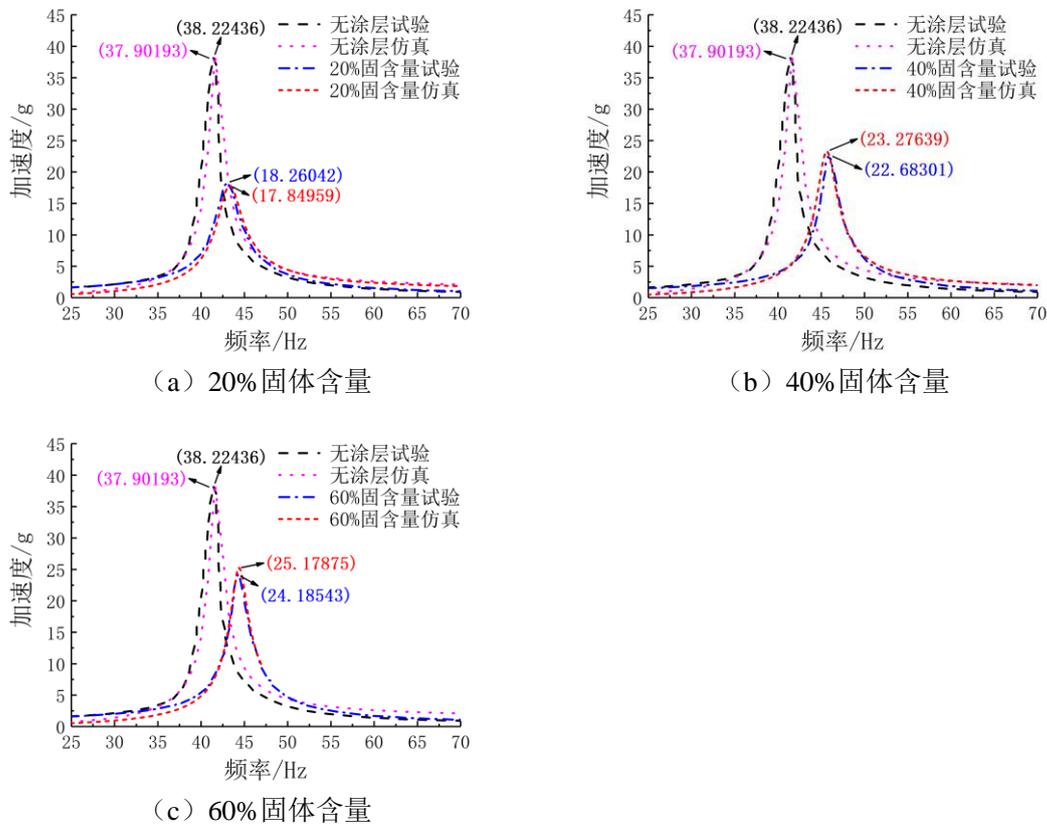


图 5.6 填料为 40 目云母粉制得的 0.6mm 厚飞机管道水性阻尼减振涂层仿真试验对比

由图 5.6 可看出：根据半功率带宽法计算出的阻尼系数 ζ 代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合，误差分别为 2.25%、2.62% 和 4.11%。仿真所得结论与试验相同，在低固体含量（20%）时，飞机管道水性阻尼减振涂层利用云母片层间的滑移，将机械能转换为热能消耗从而减振，0.6mm 为较低厚度而未影响云母片的滑移因此阻尼性能较好；在中固体含量（40%）时，飞机管道水性阻尼减振涂层由于固体含量原因导致云母片层间的滑移较为困难，机械能转换率低，且又未能形成聚合网状结构，因此阻尼性能较差；在高固体含量（60%）时，飞机管道水性阻尼减振涂层由于厚度原因还未能形成聚合网状结构，因此阻尼性能较差，

证明了仿真模型的准确性和有效性。

5.2.4 仿真小结

本节通过本文 3.1 节推导出的式 (3-19)，由本文第三章飞机管道水性阻尼减振涂层材料减振性能试验所得到的幅频响应函数计算得到相对阻尼比 ζ 。将相对阻尼比 ζ 代入有限元模型中，并对模型进行谐响应仿真，仿真结果与试验结果高度吻合，证明了仿真模型的准确性和有效性，并为后续附阻尼涂层材料的管道动力学分析及疲劳寿命预测提供基础。

5.3 飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层仿真研究

由 4.4 节可知：飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层填料在低固体含量（20%）时，填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层均表现为随着涂层厚度的增加，阻尼性能会有略微下降，这与无附约束层的水性阻尼减振涂层在填料为低固体含量时出现的情况相同；填料在中固体含量（40%）时，与无附加约束层的水性阻尼减振涂层无法形成聚合网状结构不同，由于附约束层的存在，填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层均形成了聚合网状结构。而 10 目云母粉由于其粒径较大，因此受约束层的影响较小，随着涂层厚度的增加，填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层逐渐形成聚合网状结构，阻尼性能从而逐渐增强；40 目云母粉由于粒径较小，因此在较薄厚度的水性阻尼减振涂层由于附约束层的影响就已经形成了聚合网状结构，从而随着涂层厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，导致阻尼性能略微减弱；填料在高固体含量（60%）时，附约束层会降低粒径较大的填料如 10 目云母粉形成聚合网状结构的效率，而会加快粒径较小如 40 目云母粉形成聚合网状结构的速率。

因此为验证上述结论的正确性，须进行三组仿真试验：

1) 由于填料低固体含量（20%）时两种目数的规律相似，因此进行一组低固体含量同目数云母粉填料不同涂层厚度的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验，以验证填料为低固体含量时规律的有效性和准确性；

2) 由于填料中固体含量（40%）时两种目数的规律相差较大，因此分别进行一组中固体含量填料为 10 目云母粉以及填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验，以验证填料为中固体含量时规律的有效性和准确性；

3) 由于填料高固体含量（60%）时均形成聚合网状结构而使得飞机管道水性阻尼减振涂层阻尼性能提升，但由于粒径原因，附约束层会降低粒径较大的填料如 10 目云母粉形成聚合网状结构的效率，而会加快粒径较小如 40 目云母粉形成聚合网状结构的速率。因此分别进行一组高固体含量填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验，以验证填料

为高固体含量时规律的有效性和准确性。

通过本文 3.1 节推导出的式 (3-19)，可由本文第四章飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层减振性能试验所得到的幅频响应函数计算得到相对阻尼比 ζ 。将相对阻尼比 ζ 代入有限元模型中，并对模型进行谐响应仿真，以证明仿真模型的准确性和有效性。

5.3.1 填料固体含量为 20% 的水性阻尼减振涂层附约束层仿真

因为填料在低固体含量 (20%) 时，填料为 10 目、40 目云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层的规律相似，均表现为随着涂层厚度的增加，阻尼性能会有略微下降，本节采用填料为 10 目固体含量为 20% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件作为仿真对象，其他参数均为 5.1.3 节所设，制得的飞机管道水性阻尼减振涂层参数如表 5.5 所示。

表 5.5 填料为 10 目固体含量为 20% 的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置

涂层厚度 t/mm	涂层质量 m/g	涂层密度 $\rho/g \cdot mm^{-3}$	阻尼比 ζ	材料阻尼系数 $c/(N \cdot s/m)$
1.2	3.051	$2.83e^{-10}$	0.07143	0.41425
1.4	4.276	$3.39e^{-10}$	0.06277	0.3964

按照 5.1.2 节所述建立有限元模型，通过 ANSYS 谐响应分析，并后处理填料为 10 目固体含量为 20% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件仿真试验对比如图 5.7 所示，其中图 5.7 (a) 为涂层厚度为 1.2mm 的试验件，图 5.7 (b) 为涂层厚度为 1.4mm 的试验件。

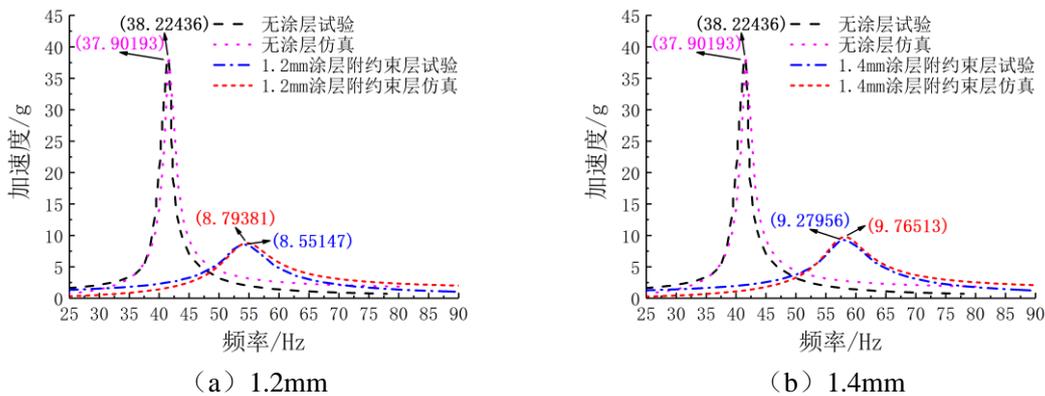


图 5.7 填料为 10 目固体含量为 20% 的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比

由图 5.7 可看出：根据半功率带宽法计算出的阻尼系数 ζ 代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合，误差分别为 2.83% 和 5.23%。仿真所得结论与试验相同，随着涂层厚度的增加，阻尼性能会有略微下降，证明了仿真模型的准确性和有效性。

5.3.2 填料固体含量为 40%的水性阻尼减振涂层附约束层仿真

因为填料在中固体含量（40%）时，填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层均形成了聚合网状结构。10 目云母粉由于其粒径较大，随着涂层厚度的增加，填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能逐渐增强，而 40 目云母粉由于粒径较小，随着涂层厚度的增加，填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能逐渐减弱。本节采用填料为 10 目、40 目固体含量 40%的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件作为仿真对象。

(1) 填料为 10 目固体含量 40%的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层仿真

其他参数均为 5.1.3 节所设，制得的飞机管道水性阻尼减振涂层参数如表 5.6 所示。

表 5.6 填料为 10 目固体含量为 40%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置

涂层厚度 t/mm	涂层质量 m/g	涂层密度 $\rho/g \cdot mm^{-3}$	阻尼比 ζ	材料阻尼系数 $c/(N \cdot s/m)$
1.4	3.957	$3.14e^{-10}$	0.06494	0.40768
1.7	5.27	$3.44e^{-10}$	0.08685	0.51495

按照 5.1.2 节所述建立有限元模型，通过 ANSYS 谐响应分析，并后处理填料为 10 目固体含量为 40%的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件仿真试验对比如图 5.8 所示，其中图 5.8 (a) 为涂层厚度为 1.4mm 的试验件，图 5.8 (b) 为涂层厚度为 1.7mm 的试验件。

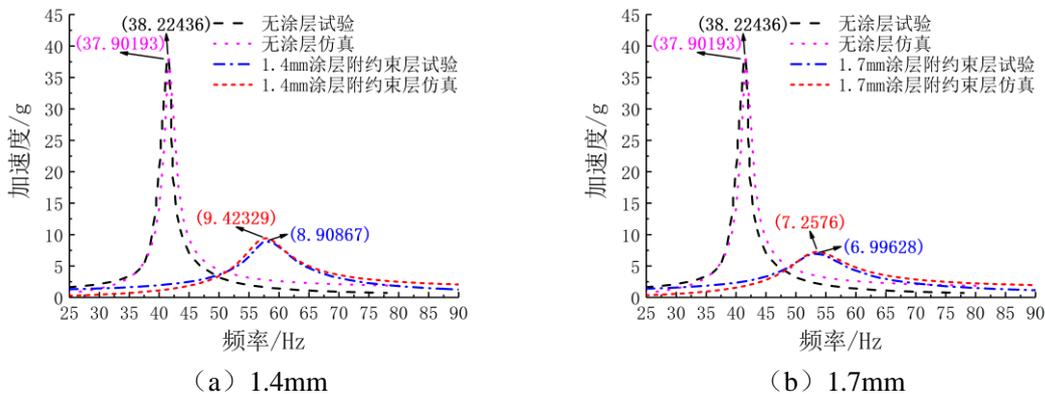


图 5.8 填料为 10 目固体含量为 40%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比

由图 5.8 可看出：根据半功率带宽法计算出的阻尼系数 ζ 代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合，误差分别为 5.78%和 3.74%。仿真所得结论与试验相同，随着涂层厚度的增加，填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能逐渐增强，证明了仿真模型的准确性和有效性。这是由于 10 目云母粉粒径较大，因此受约束层的影响较小，随着涂层厚度的增加，填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层逐渐形成聚合网状结构。

(2) 填料为 40 目固体含量 40% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层仿真
其他参数均为 5.1.3 节所设，制得的飞机管道水性阻尼减振涂层参数如表 5.7 所示。

表 5.7 填料为 40 目固体含量为 40% 的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置

涂层厚度 t/mm	涂层质量 m/g	涂层密度 $\rho/g \cdot mm^{-3}$	阻尼比 ζ	材料阻尼系数 $c/(N \cdot s/m)$
1	4.118	$4.58e^{-10}$	0.11803	0.74965
1.4	10.248	$8.13e^{-10}$	0.09111	0.62165
1.6	14.702	$1.02e^{-9}$	0.08523	0.4883

按照 5.1.2 节所述建立有限元模型，通过 ANSYS 谐响应分析，并后处理填料为 40 目固体含量为 40% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件仿真试验对比如图 5.9 所示，其中图 5.9 (a) 为涂层厚度为 1mm 的试验件，图 5.9 (b) 为涂层厚度为 1.4mm 的试验件，图 5.9 (c) 为涂层厚度为 1.6mm 的试验件。

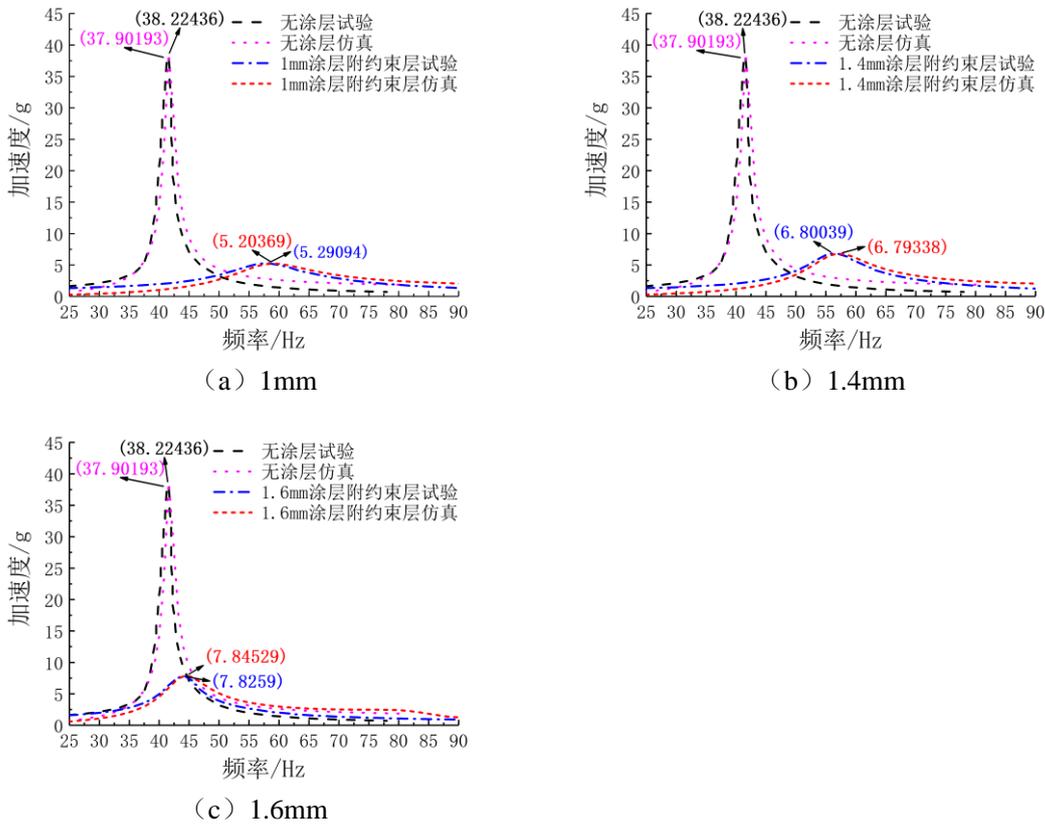


图 5.9 填料为 40 目固体含量为 40% 的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比

由图 5.9 可看出：根据半功率带宽法计算出的阻尼系数 ζ 代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合，误差分别为 1.68%、0.1% 和 0.25%。仿真所得结论与试验相同，证明了仿真模型的准确性和有效性。随着涂层厚度的增加，填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能略微减弱，这是由于 40 目云母粉粒径较小，因此在较薄厚度的水性阻尼减振涂层由于附约束层的影响就已经形成了聚合网状结构，从而随着涂层厚度的增加，

聚合网状结构逐渐变得宽松，导致阻尼性能略微减弱。

5.3.3 填料固体含量为 60% 的水性阻尼减振涂层附约束层仿真

因为填料在高固体含量（60%）时，填料为 10 目、40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层均形成了聚合网状结构。由于填料粒径原因以及约束层影响，填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能先升高，而后阻尼性能略微下降；而填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能则随着涂层厚度的增加而逐渐略微减弱。本节采用填料为 10 目、40 目固体含量 60% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件作为仿真对象。

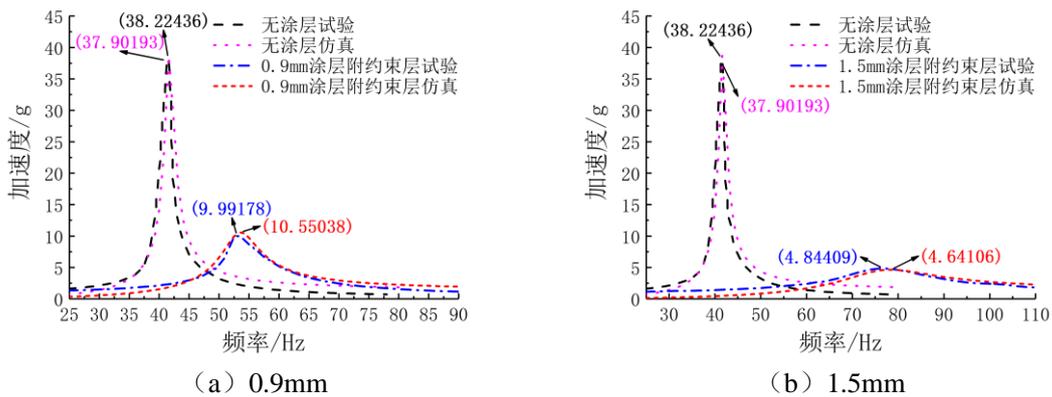
(1) 填料为 10 目固体含量 60% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层仿真

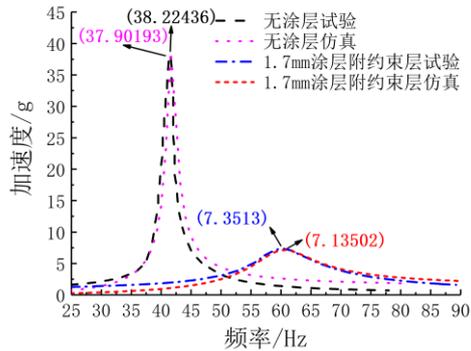
其他参数均为 5.1.3 节所设，制得的飞机管道水性阻尼减振涂层参数如表 5.8 所示。

表 5.8 填料为 10 目固体含量为 60% 的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置

涂层厚度 t/mm	涂层质量 m/g	涂层密度 $\rho/g \cdot mm^{-3}$	阻尼比 ζ	材料阻尼系数 $c/(N \cdot s/m)$
0.9	1.508	$1.86e^{-10}$	0.05896	0.32441
1.5	6.969	$5.16e^{-10}$	0.13355	1.17606
1.7	12.46	$8.14e^{-10}$	0.08714	0.66003

按照 5.1.2 节所述建立有限元模型，通过 ANSYS 谐响应分析，并后处理填料为 10 目固体含量为 60% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件仿真试验对比如图 5.10 所示，其中图 5.10 (a) 为涂层厚度为 0.9mm 的试验件，图 5.10 (b) 为涂层厚度为 1.5mm 的试验件，图 5.10 (c) 为涂层厚度为 1.7mm 的试验件。





(c) 1.7mm

图 5.10 填料为 10 目固体含量为 60%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比

由图 5.10 可看出：根据半功率带宽法计算出的阻尼系数 ζ 代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合，误差分别为 5.59%、4.19% 和 2.94%。仿真所得结论与试验相同，证明了仿真模型的准确性和有效性。随着涂层厚度的增加，填料为 10 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能先升高，而后阻尼性能略微下降，这主要由于随着涂层厚度的增加，水性阻尼减振涂层逐渐形成聚合网状结构，而后阻尼性能略微下降，主要是因为聚合网状结构逐渐变得宽松。

(2) 填料为 40 目固体含量 60% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层仿真其他参数均为 5.1.3 节所设，制得的飞机管道水性阻尼减振涂层参数如表 5.9 所示。

表 5.9 填料为 40 目固体含量为 60% 的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真参数设置

涂层厚度 t/mm	涂层质量 m/g	涂层密度 $\rho/g \cdot mm^{-3}$	阻尼比 ζ	材料阻尼系数 $c/(N \cdot s/m)$
1.5	5.161	$3.82e^{-10}$	0.14201	1.33346
1.7	6.532	$4.27e^{-10}$	0.11789	0.82551
2.3	17.114	$8.27e^{-10}$	0.11058	0.77641

按照 5.1.2 节所述建立有限元模型，通过 ANSYS 谐响应分析，并后处理填料为 40 目固体含量为 60% 的云母粉制得的飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件仿真试验对比如图 5.11 所示，其中图 5.11 (a) 为涂层厚度为 1.5mm 的试验件，图 5.11 (b) 为涂层厚度为 1.7mm 的试验件，图 5.11 (c) 为涂层厚度为 2.3mm 的试验件。

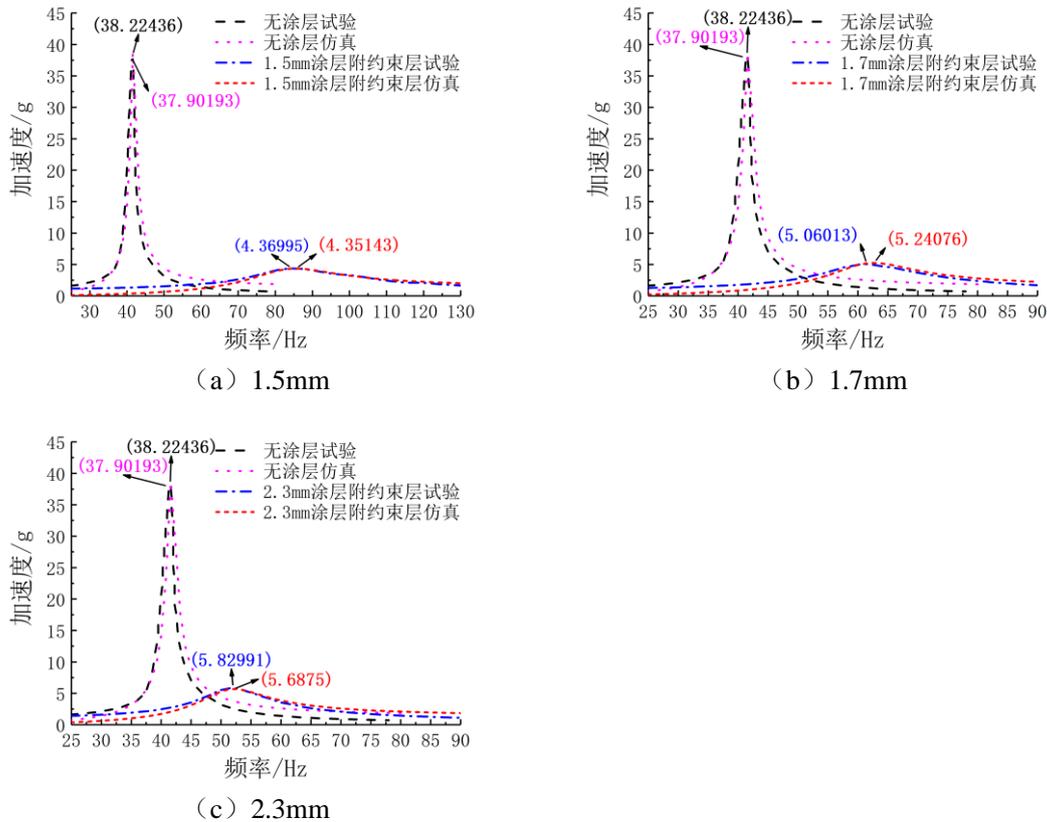


图 5.11 填料为 40 目固体含量为 60%的云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层仿真试验对比

由图 5.11 可看出：根据半功率带宽法计算出的阻尼系数 ζ 代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合，误差分别为 0.42%、3.57% 和 2.44%。仿真所得结论与试验相同，证明了仿真模型的准确性和有效性。随着涂层厚度的增加，填料为 40 目云母粉制得的水性阻尼减振涂层附约束层的阻尼性能略微减弱，这是由于 40 目云母粉粒径较小，因此在较低厚度的水性阻尼减振涂层由于附约束层的影响就已经形成了聚合网状结构，从而随着涂层厚度的增加，聚合网状结构逐渐变得宽松，导致阻尼性能略微减弱。

5.3.4 仿真小结

本节通过本文 3.1 节推导出的式 (3-19)，由本文第四章飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层减振性能试验所得到的幅频响应函数计算得到相对阻尼比 ζ 。将相对阻尼比 ζ 代入有限元模型中，并对模型进行谐响应仿真，仿真结果与试验结果高度吻合，证明了仿真模型的准确性和有效性，并为后续附约束层结构附阻尼涂层材料的管道动力学分析及疲劳寿命预测提供基础。

5.4 小结

本章首先从 ANSYS 软件、复合材料层合板理论、模型建立以及仿真参数设置四个方面，

详细的介绍了基于 ANSYS 软件的多材料振动有限元模型的建立。继而通过此方法建立了若干喷涂有飞机管道水性阻尼减振涂层的试验件及喷涂有飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层的试验件有限元模型，验证了仿真模型的准确性和有效性，为后续附阻尼涂层材料的管道动力学分析及疲劳寿命预测提供了基础。

第六章 总结与展望

6.1 全文工作总结

本文将阻尼涂层技术应用到飞机管道减振领域。研究过程中，阐述了飞机管道水性阻尼减振涂层材料的应用前景和选择依据，设计并制备了水性阻尼减振涂层材料。

利用制备所得的飞机管道水性阻尼减振涂层材料进行了无约束层结构和有约束层结构的减振性能试验研究。分别针对喷涂涂层无约束层试验件及喷涂涂层有约束层试验件进行减振试验，以填料目数、填料固体含量、涂层厚度为主要变量，研究了试验件共振下的振动加速度。基于 ANSYS 和复合材料层合板理论分别对飞机管道水性阻尼减振涂层材料减振性能试验和飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层减振性能试验的结论进行了仿真，通过仿真结果与试验数据的对比，验证了仿真模型的准确性和有效性，为后续附阻尼涂层材料的管道动力学分析及疲劳寿命预测提供了基础。最后利用制备所得且经减振性能试验设计优化后的飞机管道水性阻尼减振涂层，将其应用于真实飞机管道，验证了其工程实用性。研究工作取得以下结论：

(1) 经过试验与仿真，在填料为低固体含量（20%）时，喷涂有飞机管道水性阻尼减振涂层无约束层或有约束层试验件均表现为随着涂层厚度的增加，阻尼性能会下降，其原因是低固体含量主要利用云母片层间的滑移，将机械能转换为热能消耗从而减振，而过厚的涂层会影响云母片层滑移从而导致水性阻尼减振涂层的阻尼性能降低。

(2) 经过试验与仿真，在填料为中固体含量（40%）时，喷涂有飞机管道水性阻尼减振涂层无约束层试验件表现为大粒径填料由于固体含量原因导致云母片层间的滑移较为困难，机械能转换率低，且又未能形成聚合网状结构，阻尼性能变化不是很明显，而小粒径填料在涂层厚度较低时，空隙较大，未出现滑移困难的情况，此时水性阻尼减振涂层的阻尼性能表现良好，随着涂层厚度的增加，片层空隙逐渐减小，导致片层滑移变得困难，从而水性阻尼减振涂层阻尼性能减弱；而喷涂有飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件由于约束层结构的存在，均形成了聚合网状结构，从而阻尼性能较好。

(3) 经过试验与仿真，在填料为高固体含量（60%）时，喷涂有飞机管道水性阻尼减振涂层无约束层试验件表现为形成聚合网状结构，形成聚合网状结构的涂层厚度与填料粒径大小呈负相关，填料粒径越大，形成聚合网状结构的涂层厚度越小；而涂有飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层试验件表现为附约束层会降低大粒径填料形成聚合网状结构的效率，而会加快小粒径填料形成聚合网状结构的速度。

(4) 经过试验与仿真，飞机管道水性阻尼减振涂层附约束层结构会极大提升了试验件的阻尼性能。

(5) 利用半功率带宽法计算所得的阻尼比代入有限元模型, 经仿真后计算所得的幅频响应函数与试验所得达到很好的一致性, 结果验证了仿真模型的正确性与有效性, 为后续附阻尼涂层材料的管道动力学分析及疲劳寿命预测提供了基础。

6.2 论文工作展望

针对水性阻尼减振涂层的设计, 仍有许多值得深入研究的内容。就其本身配方而言, 可以添加更多的填料如玻璃纤维、玻璃微珠等, 而就其应用而言, 本文仅研究了铝制基底, 仍有钢制基底等可进行研究, 且针对实际工程应用, 还需要进行环境考核, 比如耐腐蚀性能以及温度的影响。而从对水性阻尼减振涂层的研究, 仍有相关领域值得探索, 如仿真制备所得涂层材料的迟滞回线, 从分子动力学角度分析涂层材料的减振机理等等。

参考文献

- [1] Liu Gongmin, Li Yanhua. Vibration analysis of liquid-filled pipelines with elastic constraints[J]. Journal of Sound & Vibration, 2011, 330(13):3166-3181.
- [2] Li Xin, Wang Shaoping. Flow field and pressure loss analysis of junction and its structure optimization of aircraft hydraulic pipe system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(4): 1080-1092.
- [3] 廖桔,赵紫豪,朱林峰,等.飞机燃油管道随机振动分析与设计优化[J].管道技术与设备,2021,9(05):1-6.
- [4] 张振.飞机管路系统连接卡箍可靠性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [5] Gao Peixin, Yu Tao, Zhang Yuanlin, et al. Vibration analysis and control technologies of hydraulic pipeline system in aircraft: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 83-114.
- [6] 於为刚,陈果,刘彬彬,等.飞机管道颗粒碰撞阻尼器设计与试验验证[J].航空学报,2018,39(12):401-413.
- [7] Li Zhezhu, Gao Peixin, Zhao Dazhe, et al. Fault diagnosis and location of the aero-engine hydraulic pipeline based on Kalman filter[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(12): 1-9.
- [8] Zhang Yuanlin, Gao Peixin, Liu Xuefeng, et al. Fluid-Induced Vibration of a Hydraulic Pipeline with Piezoelectric Active Constrained Layer-Damping Materials[J]. Coatings, 2021, 11(7): 757-768.
- [9] 党锡淇,黄幼玲.工程中的导管振动问题[J].力学与实践,1993,15(4):9-16.
- [10] Sang Yong, Liu Pengkun, Wang Xudong, et al. Fluid-structure interaction analysis of the return pipeline in the high-pressure and large-flow-rate hydraulic power system[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics. 2021, 21(1):38-51.
- [11] 柳博瀚,陈正寿,鲍健,等.管道内流对海洋弹性管振动影响的数值仿真研究[J].振动与冲击,2020,39(17):177-185+202.
- [12] Jia Mengda, Wei Yaodong, Yan Chaoyu, et al. Experimental study of gas-solid flow characteristics and flow-vibration coupling in a full loaded inclined pipe[J]. Powder Technology. 2021, 384(1):379-386.
- [13] Shah S, Mignolet MP.Effects of structural-fluid coupling uncertainty on the dynamic behavior of

- nominally straight and uniform pipes conveying fluid: Modeling and numerical study[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 85(1):55-76.
- [14] 李柏松,苏建峰,张兴,等.输油泵进出口管道振动诊断方法[J].*油气储运*,2021,40(01):21-25.
- [15] 李树勋,康云星,潘伟亮,等.往复式压缩机管道振动分析与优化[J].*流体机械*, 2019,47(02):58-64.
- [16] 李欢.输流管道流固耦合振动特性分析与控制[D].成都:西华大学,2020.
- [17] 肖斌,周玉龙,高超,等.考虑流体附加质量的输流管道振动特性分析[J].*振动与冲击*,2021,40(15):182-188.
- [18] 张春晋,孙西欢,李永业,等.基于流固耦合的管道双车振动运移水力特性研究[J].*振动与冲击*,2020,39(03):161-167+177.
- [19] L.M. Yao, Z.M. Xiao, J.B. Liu, et al. A new multi-field coupled dynamic analysis method for fracturing pipes[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 196(1):1-20.
- [20] Wu Jia, Zheng Shuiying, Wang Chao, et al. Study on pipeline self-excited vibration using transient fluid-structure coupling method[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(9):4055-4068.
- [21] Kiryukhin A V, Milman O O, Sereshkin L N, et al. Physical features of fluid and structure interaction inside power unit pipeline vibration-isolating expansion joints[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1565(1):1-6.
- [22] Heshmati M, Amini Y, Daneshmand F. Vibration and instability analysis of closed-cell poroelastic pipes conveying fluid[J]. *European Journal of Mechanics A-Solids*, 2019, 73(1):356-365.
- [23] Maxit L, Karimi M, Guasch O. Spatial coherence of pipe vibrations induced by an internal turbulent flow[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020,493(1):1-28.
- [24] Cheng Guanbing, Wang Xuan, Wang Guoda. Experimental and numerical analysis on vibration features of typical external pipe in aero-engine[J]. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 2019, 17(1):101-114.
- [25] 胡效东,梁泽华,宗丹丹,等.湿模态管道振动特性研究[J].*机械设计与制造*,2021,21(08):300-304.
- [26] 张海涛,郑坤,周毅,等.基于管道振动分析的往复式压缩机机构优化[J].*机械设计与制造工程*,2020,49(05):112-116.
- [27] 龙海涛. 压力管道持续性激励模型试验与数值仿真研究[D].昆明:昆明理工大学,2020.
- [28] 刘玉柱,刘学文,许绝舞,等.某航空液压管道振动异常故障研究[J].*航空维修与工程*,2021,

9(06):57-60.

- [29] Yamashita K, Yagy T, Yabuno H. Nonlinear interactions between unstable oscillatory modes in a cantilevered pipe conveying fluid[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 98(4): 2927-2938.
- [30] 方军.压缩机进口管路球阀旁通细管的振动分析[J].*管道技术与设备*,2021,9(04):20-22+57.
- [31] 刘鑫,张磊,刘子健,等.压力管道振动原因分析及减振措施[J].*中国石油和化工标准与质量*, 2020,40(07):32-33.
- [32] 崔向敏,潘冬,彭楠,等.航空发动机外部管路支架断裂分析及优化[J].*燃气涡轮试验与研究*, 2020,33(04):46-52.
- [33] 张旭,夏芝玮,樊新田,张杰毅,陈果.飞机管路连接件装配偏差对密封性影响的仿真分析与试验验证[J].*润滑与密封*,2021,46(08):99-107.
- [34] 於为刚,陈果,寸文渊,等.基于一类支持向量机的管道安装应力智能检测技术[J].*管道技术与设备*,2019,9(02):28-33.
- [35] 王晶,陈果,郑其辉,等.飞机液压管道初始装配应力仿真[J].*航空计算技术*, 2012,42(06):54-57.
- [36] 张旭.装配状态对管道密封特性影响分析与试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2020.
- [37] 於为刚.装配应力对飞机管路密封性能的影响分析及其检测方法研究[D].南京:南京航空航天大学, 2019.
- [38] 刘恩斌,廉殿鹏,苏中亚,等.天然气压气站管道异常振动及减振措施研究[J].*中国安全生产科学技术*,2021,17(09):39-44.
- [39] 张子祥,王检耀,王鸿东,等.弹性约束充液管道的振动模态试验与预报研究[J].*振动与冲击*, 2021, 40(15):1-10.
- [40] 王野平,吴乐文,朱凤.支撑参数对管道振动的影响分析与优化[J].*机械制造*,2021,59(03): 47-50+59.
- [41] 蔡锐,朱如东,詹淑文,等.某核电厂主蒸汽平衡管线振动分析与减振措施[J].*化工设备与管道*, 2020, 57(06):69-73.
- [42] Li SS, Zhang LW, Kong CY. Vibration Failure Analysis and Countermeasures of the Inlet Pipelines at a Gas Compressor Station[J]. *Shock and Vibration*, 2019, 2019(1):1-8.
- [43] Wu Jia, Zheng ShuiY. Field Measurement and Numerical Study of the Vibration in the Pipeline of Centrifugal Compressor[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*, 2019, 141(5): 1-10.
- [44] 王元兴,聂旭涛,麻越垠,等.高压气流管道瞬态冲击振动分析及抑振研究[J].*振动.测试与诊断*, 2021, 41(04):812-817+838.
- [45] 张俎琛,何立东.设备管线阻尼减振应用研究[J].*广东化工*,2021,48(10):188-189+160.

- [46] 范文强,何立东,陈钊,等.换热器至初馏塔管线的阻尼减振技术应用研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(02):100-106.
- [47] 余栋栋,何立东,冀沛尧.阻尼减振技术在管道上的应用研究[J].噪声与振动控制,2017,37(06):186-189.
- [48] Xue Xin, Ruan Shixin, Li Angxi, et al. Nonlinear Dynamic Modelling of Two-Point and Symmetrically Supported Pipeline Brackets with Elastic-Porous Metal Rubber Damper[J]. Symmetry-Basel, 2019, 11(12):1479-1499.
- [49] 丁继超,何立东,冀沛尧.整体式挤压油膜阻尼器对管道振动抑制试验[J].振动.测试与诊断, 2020, 40(03): 535-540+627.
- [50] 丁继超,何立东,万方腾,等.阻尼减振技术在加氢分馏塔进料管道上的应用[J].石油化工设备, 2019, 48(04):60-64.
- [51] 王硕,郝建峰,李志芳,等.蜂窝阻尼减振技术解决酸循环管线振动问题[J].化学工程与装备, 2019,9(05): 210-212.
- [52] Kaviani-pour O. Effects of the passive electromagnetic damper on the behavior of a fluid-conveying pipeline[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(7):2329-2339.
- [53] 林磊,徐德城,陈志林,薛飞.锰铜阻尼合金在管道壳壁振动缓解中的应用[J].噪声与振动控制, 2021,41(04):221-227.
- [54] 陈钊,何立东,邓哲.不同安装位置下主动阻尼装置对管道振动的控制效果研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(03):93-99.
- [55] Ji Hui, Huang Yeqing, Nie Songlin, et al. Research on Semi-Active Vibration Control of Pipeline Based on Magneto-Rheological Damper[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(7):2541-2563.
- [56] Lin Junzhe, Zhao Yulai, Zhu Qingyu, et al. Nonlinear Characteristic of Clamp Loosing in Aero-Engine Pipeline System[J]. IEEE Access, 2021, 9(1):64076-64084.
- [57] 李迎春,程蓓,邱明,等.不同石墨烯添加量下 MoS₂ 基复合涂层的摩擦磨损及耐腐蚀性能[J].中国机械工程,2020,31(20):2437-2444.
- [58] 范蓉平,孟光,贺才春,等.粘弹性阻尼材料降低列车车内噪声的试验研究[J].振动与冲击,2008,27(06):123-127+192.
- [59] 杨波,姚宇,黄海山,等.水性阻尼涂料在轿车上的应用[J].涂料工业, 2015,45(09):69-73.
- [60] Inozume S, Aihara T. Damping ratio maximization in thickness direction using viscoelastic and structural materials based on constrained layer damping[J]. Engineering Optimization, 2021, 54(3): 539-551.

- [61] Zhao Yating, Guo Yong. Preparation and Properties of EAA/C9 Resin/Natural Rubber Damping Materials[J]. China Plastics Industry, 2021,49(5): 116-119.
- [62] 高云卿,龙孝立.阻尼浆试制试验总结[J].铁道车辆, 1973(12):29-34.
- [63] 胡钊, 类成林, 杨涛. 填料对水性阻尼涂料性能的影响[J].涂料工业, 2012, 42(6):52-54.
- [64] 张冬菊. 填料对高分子材料阻尼性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2015.
- [65] 贺才春. 阻尼材料在铁路客车噪声控制中的试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2008,28(06):36-39.
- [66] Koshy AT, Kuriakose B, Thomas S, et al. Viscoelastic Properties of Silica-Filled Natural Rubber and Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Blend[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 1994, 33(2):149-159.
- [67] Alva A, Raja S . Dynamic characteristics of epoxy hybrid nanocomposites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011, 30(22):1857-1867.
- [68] 高培鑫.多源激励下航空液压管路系统振动分析及其约束层阻尼减振技术研究[D].大连: 大连理工大学,2017.
- [69] 汪博,高培鑫,马辉,等.航空发动机管路系统动力学特性研究综述[J].航空学报,2021, 9(21):1-25.
- [70] Fang J, Lyons GJ. Structural damping of tensioned pipes with reference to cables [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(4):891-907.
- [71] Johnson CD, Kienholz DA. Finite element prediction of damping in structures with constrained viscoelastic layers [J]. AIAA journal, 1982,20(9): 1284-1290
- [72] Lepoittevin G, Kress G.Optimization of segmented constrained layer damping with mathematical programming using strain energy analysis and modal data[J]. Materials & Design. 2010, 31(1): 14-24.
- [73] Chiba T, Kobayashi H. Response characteristics of piping system supported by viscoelastic and elasto-plastic dampers[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1990, 112(1):34-38.
- [74] 刘彬彬.基于颗粒碰撞阻尼的导管减振器研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- [75] Liu Enbin, Wang Xingjie, Zhao Wanwei, et al. Analysis and Research on Pipeline Vibration of a Natural Gas Compressor Station and Vibration Reduction Measures[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(1): 479-492.
- [76] Lazar IF, Neild SA, Wagg DJ. Using an inerter-based device for structural vibration suppression[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(8): 1129-1147.
- [77] 赵紫豪,陈果,朱林峰,等.飞机燃油管道卡箍有限元建模及疲劳寿命研究[J].航空计算技术,2021,51(04):81-85.

- [78] Zhang Xiantao, Liu Wei, Zhang Yamei, et al. Experimental Investigation and Optimization Design of Multi-Support Pipeline System[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1):10-21.
- [79] 李天夫.高性能阻尼浆的研制及成型工艺研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [80] Wang Fei, Guo Longhai, Qiu Teng, et al. A direct polymerization approach toward hindered phenol/polymer composite latex and its application for waterborne damping coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 130(1):1-7.
- [81] 孙世威.粘弹性自由层阻尼薄板减振有限元研究[J].科技资讯,2015,13(24):68-70+72.
- [82] Deng YJ, Zhou C, Zhang MY, et al. Effects of the reagent ratio on the properties of waterborne polyurethanes-acrylate for application in damping coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 122(9):239-247.
- [83] 倪振华.振动力学[M].西安:西安交通大学出版社, 1989:79-87.
- [84] 丁国雷.粘弹阻尼材料表征及约束阻尼结构的阻尼性能研究[D].青岛:青岛理工大学,2012.
- [85] 林茂山.短柱壳一约束层阻尼系统建模与减振机理研究[D].沈阳:东北大学,2011.
- [86] Chen Y L, Wang D W, Ma L. Vibration and damping performance of carbon fiber-reinforced polymer 3D double-arrow-head auxetic metamaterials[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(2): 1-18.
- [87] 王鹏,张振伟,骆海涛,等.空间桁架复合结构的阻尼减振分析与试验研究[J].机械设计与制造, 2020(06): 121-124.
- [88] Limarga AM, Duong TL, Gregori G, et al. High-temperature vibration damping of thermal barrier coating materials[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202(4):693-697.
- [89] Chen Guo, Qu Meijiao. Modeling and Analysis of Fit Clearance between Outer Ring and Bearing Housing of Rolling Bearings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 438(6):419-440.
- [90] 李星,丁树人,郭爱晔.关于中厚板弯曲变形理论[J].太原工业大学学报,1990,21(01):44-53.
- [91] 沈亚鹏,何福保.板壳理论当前的研究进展[J].应用力学学报,1988,5(02):1-16+127.

致 谢

时光匆匆，两年半前重新踏入校园与南航再续前缘仿佛昨日，感慨万千。再回首，奋斗有之，彷徨有之，感激亦有之。在南航的两年半中，经历了新冠疫情，完成了从 1501A 到 1110B 教研室的乔迁，更遇到了许多良师益友，给予我指引与帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢！

感谢我的恩师陈果教授，不仅传道授业解惑，亦在生活上关怀备至，亦师亦父。平时相处，温文尔雅，亦为良友。惜新冠影响及出差繁忙，未能在陈果老师身边多加学习，惜之憾之。但其渊博的专业知识，一丝不苟的研究态度，精益求精的工作风范，孜孜不倦的高尚师德，以及风流儒雅平易近人的人格魅力，对我往后余生影响深远。

感谢教研室可爱的小伙伴们，谢谢潘文平、王海飞、于平超、李爱、郝腾飞等老师平时对我的关怀指导，感谢初入实验室时就认识的屈美娇师姐和於为刚师兄，是你们将我逐渐引领到科研这条康庄大道上来的；感谢已经毕业的关晓颖、宋培培师姐和张全德、林桐、谢阶栋、刘彬彬、张旭、张向阳、杨默涵、张杰毅师兄对我的鼓励和帮助，愿未来再次重逢谈人生；感谢实验室在读的贺志远、刘西洋、康玉祥、沈响响博士和同窗李伦绪、何超同学以及赵旭升、王雨薇、马佳丽、钱进、盛嘉玖师弟师妹们在学习和生活上的支持，这其中每一个称呼都是一段情谊，每一个名字都是一段回忆，每每思之，皆心神往之。感谢前前后后的李文博、张维亮、孟庆财、上官云翔、顾伟立、许峻伦、王峻舟舍友们，我们虽相处不长，却仍有许多难忘的回忆。

父母之恩无以为报，感谢我的父母，你们是我十多年求学路上的坚强后盾。感谢我的姥爷姥姥，谢谢你们将我抚养成人，并教会了我为人的道理。感谢我的爷爷奶奶，谢谢你们一直对我的生活和学习上的关心。

感谢我的女友陈女士的陪伴，虽然异地，我们的心却一直在一起。科研之路并不平顺，但有你的陪伴，你的支持鼓励，总能让我有继续走下去的勇气与动力。海底月是天上月，眼前人便是心上人。

最后，再一次向所有曾经给予我关怀、支持和帮助的人们致以最诚挚的谢意，愿你们在此后的日子里平安健康，万事胜意。

赵紫豪

2021 年 12 月 24 日

于南京航空航天大学将军路校区

在学期间的研究成果及发表的学术论文

攻读硕士学位期间发表（录用）论文情况：

1. 赵紫豪,陈果,朱林峰,等.飞机燃油管道卡箍有限元建模及疲劳寿命研究[J].航空计算技术,2021,51(04):81-85.
2. Jin Gen, Zhao Zihao, Liu Binbin, Cun Wenyuan, Zhao Zhengda, Hou Minli, Chen Guo. Design of a particle damper and experimental study on vibration damping of the pipeline[J]. Advances in Mechanical Engineering. 2021, 13(09): 16878140211044923. (SCI:Q3)
3. 廖桔,赵紫豪,朱林峰,单单,苏一峰,陈果.飞机燃油管道随机振动分析与设计优化[J].管道技术与设备,2021(05):1-6.
4. 朱林峰,赵紫豪,单单,廖桔,苏一峰,陈果.基于时域仿真的飞机燃油管道卡箍振动疲劳分析[J].飞机设计(已录用)

攻读硕士学位期间参加科研项目情况：

1. 航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究项目（2017IV00080045）：典型故障动力学建模和诊断方法研究.2019-2020
2. 国家科技重大专项（J2019-IV-004-0071）：复杂服役环境下主轴承典型故障宏观动力学研究.2019-2020
3. 国家自然科学基金项目（51675263）：基于监测数据和损伤力学的复杂工况下滚动轴承故障预测研究.2019-2020
4. 成都飞机设计研究所项目：仿真优化设计系统开发.2019-2020
5. 中航飞机股份有限公司项目：扩口导管装配偏差对密封性能影响研究.2020-2021
6. 成都飞机工业（集团）有限责任公司项目：飞机管道安装应力影响机理及控制技术研究.2020-2021
7. 成都飞机工业（集团）有限责任公司项目：航空用高阻尼低成本绿色减振降噪涂层技术.2021-2022