

编号 ××××××××



南京航空航天大学

本科毕业设计（论文）

题 目

飞机管道涂层材料降噪实用性测试
及有限元模型构建研究

学生姓名	张浩
学 号	071951423
学 院	通用航空与飞行学院
专 业	交通运输（民航维修工程）
班 级	0720903
指导教师	陈果教授

二〇二四年六月

南京航空航天大学

本科毕业设计（论文）诚信承诺书

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文）是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，本设计（论文）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

作者签名：_____

日 期： 20__年__月__日

南京航空航天大学

毕业设计（论文）使用授权书

本人完全了解南京航空航天大学有关收集、保留和使用本人所送交的毕业设计（论文）的规定，即：本科生在校攻读学位期间毕业设计（论文）工作的知识产权单位属南京航空航天大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交毕业设计（论文）的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅，可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编论文。保密的论文在解密后适用本声明。

论文涉密情况：

不保密

保密，保密期（起讫日期：_____）

作者签名：_____

导师签名：_____

日 期： 20__年__月__日

日 期： 20__年__月__日

摘 要

飞机液压系统的管路振动问题，多年来一直困扰着液压系统设计师和事故分析人员。随着飞机液压系统的高压化，这一问题变得更加突出。在此过程中，管路系统在液压脉动等下产生共振，在剧烈振动情况下可能发生疲劳破裂，导致油液泄漏等故障，将严重影响飞行安全。因此为降低管路振动、加强振动抑制，本文设计了一种应用于飞机液压管道的绿色减振降噪涂层，这对于有效地控制管路系统故障、提高管路系统的可靠性和安全性、保障整个飞机的运行安全性，具有极其重要的理论意义和工程实用价值。

本文的研究内容以及工作主要如下：

- (1) 研制了一种适用于飞机液压管道的绿色减振涂料、开发了相应的制备工艺流程、并制备了该新型涂层材料。
- (2) 针对制备的绿色减振涂层材料，研究了不同尺寸、含量填料以及涂层厚度对涂层减振降噪性能的影响规律，从而得到了具有最佳减振降噪性能的涂层材料配方。
- (3) 针对制备的绿色减振涂层材料，进行了减振涂层附着力性能、耐盐水性能以及耐油性能等理化性能指标的试验研究。
- (4) 基于有限元仿真分析方法，对含有不同尺寸、含量的填料以及不同厚度的减振涂层材料分别建立了模型，并通过仿真分析对绿色减振涂层材料在不同配方下的减振机理进行了研究。

研究表明，研制的飞机管道涂层新材料减振降噪效果优异，具有良好的工程应用价值，并为后续研究提供了保障及基础。

关键词： 航空飞机液压系统，航空管道，减振降噪涂层，减振降噪性能，有限元仿真

ABSTRACT

Piping vibration problems in aircraft hydraulics have plagued hydraulic system designers and accident analysts for years. This problem becomes even more pronounced with the increasing pressure of aircraft hydraulics. In this process, the pipeline system resonates under hydraulic pulsation, etc., and fatigue rupture may occur under severe vibration conditions, resulting in oil leakage and other failures, which will seriously affect flight safety. Therefore, in order to reduce the vibration of the pipeline and strengthen the vibration suppression, a green vibration and noise reduction coating applied to the hydraulic pipeline of the aircraft is designed in this paper, which has extremely important theoretical significance and engineering practical value for effectively controlling the fault of the pipeline system, improving the reliability and safety of the pipeline system, and ensuring the operational safety of the whole aircraft.

The research content and work of this paper are mainly as follows:

(1) A green vibration damping coating suitable for aircraft hydraulic pipelines was developed, the corresponding preparation process was developed, and the new coating material was prepared.

(2) For the prepared green vibration damping coating materials, the influence of different sizes, fillers and coating thickness on the vibration and noise reduction performance of the coating was studied, so as to obtain the coating material formula with the best vibration and noise reduction performance.

(3) For the prepared green anti-vibration coating materials, the physical and chemical performance indexes such as adhesion performance, salt water resistance and oil resistance of the anti-vibration coating were studied.

(4) Based on the finite element simulation analysis method, the models of the damping coating materials containing different sizes and contents and different thicknesses were established, and the damping mechanism of the green damping coating materials under different formulations was studied through simulation analysis.

The results show that the new aircraft pipe coating material has excellent vibration and noise reduction effect, has good engineering application value, and provides a guarantee and foundation for follow-up research.

KEY WORDS: Aviation Aircraft Hydraulic System, Aviation Pipeline, Vibration and Noise

Reduction Coating, Vibration and Noise Reduction Performance, Finite Element Simulation

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 减振涂层材料.....	1
1.2.2 有限元仿真.....	2
1.3 本文主要工作.....	3
第二章 减振降噪涂层材料制备技术.....	5
2.1 试验材料.....	5
2.2 试验仪器.....	5
2.3 阻尼减振涂层及试验样品的制备.....	6
2.3.1 阻尼减振降噪涂料制备工艺.....	6
2.3.2 试验样品制备工艺.....	7
2.4 本章小结.....	8
第三章 阻尼减振降噪涂层减振降噪性能研究.....	9
3.1 无涂层试验件的减振降噪性能研究.....	9
3.2 大尺寸填料对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	9
3.2.1 低含量（20%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	9
3.2.2 中含量（40%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	10
3.2.3 高含量（60%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	12
3.3 中尺寸填料对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	13
3.3.1 低含量（20%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	13
3.3.2 中含量（40%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	14
3.3.3 高含量（60%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	15
3.4 小尺寸填料对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	16
3.4.1 低含量（20%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	17
3.4.2 中含量（40%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	18
3.4.3 高含量（60%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究.....	19
3.5 本章小结.....	20
第四章 阻尼减振降噪涂层理化性能研究.....	23
4.1 阻尼减振降噪涂料外观与干燥时间分析.....	23
4.2 阻尼减振涂层附着力性能分析.....	25
4.3 阻尼减振降噪涂层耐盐水与耐油性能分析.....	27
4.3.1 阻尼减振降噪涂层耐盐水性能分析.....	27
4.3.2 阻尼减振涂层耐油性能分析.....	28
4.4 本章小结.....	29
第五章 减振降噪涂层材料仿真研究.....	30
5.1 带涂层材料的试验件有限元建模.....	30
5.2 阻尼减振降噪涂层材料仿真研究.....	31
5.2.1 同含量同尺寸填料在不同涂层厚度条件下的振动仿真模型.....	31
5.2.2 同含量不同尺寸填料在同涂层厚度条件下的振动仿真模型.....	32
5.2.3 不同含量同尺寸填料在同涂层厚度条件下的振动仿真模型.....	33
5.3 本章小结.....	34

第六章 总结与展望	35
6.1 研究总结	35
6.2 研究展望	35
参考文献	36
致谢	38

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

科学技术的进步发展，带动了社会的进步，加速了机械设备的高速、高效和自动化进程，同时，其带来的振动、噪声等问题亦越来越严重。振动、噪声降低机械设备性能，降低其稳定性，且污染环境，危害人的身心健康，减振、降噪是亟待解决的问题。

航空液压管道是维持飞机运行的重要一环，飞机在运行过程中，外部激励不可避免地会刺激液压管道的振动，从而导致管道破裂和疲劳失效^[1,2]。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，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。

研究航空液压系统管道的新型减振涂层技术，建立减振涂层的微观分子模型，基于分子动力学的理论，从微观角度进行减振机理的研究。进而在此基础上进行新型减振材料的设计优化，对控制管道振动，提升其安全性和可靠性提供支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 减振涂层材料

涂层减振技术是一种新兴技术，该技术指使用阻尼材料，即振动衰减材料，将吸收到的声能和机械能，并将其转化为热能而耗散掉的。涂层减振技术及其材料目前已经在汽车、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，但是在航空管道上的研究与应用还未见报道。涂层减振材料为了满足不同的使用需要，分为很多种类，它们大致可以分为粘弹性阻尼材料^[5-8]、复合阻尼材料^[9-11]、高阻尼合金^[12,13]、陶瓷类耐高温阻尼材料^[14-16]以及智能材料^[17]。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，且高分子材料具有良好的加工性，因此也是目前应用最为广泛的一类阻尼材料。高分子阻尼材料的阻尼性能主要源于聚合物的内耗，当它产生动态应力或应变时，一部分能量以势能的形式储存起来，而另一部分能量则会被转化为热能而耗散掉，高分子阻尼材料就是通过将振动机械能转变为其它形式的能量而达到减振的目的^[18,19]。高云卿^[20]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，对阻尼涂料的阻尼性能和隔声性能有较大改善。胡钊^[21]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。张冬菊^[22]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^[23]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。

1.2.2 有限元仿真

仿真是对现实系统的某一层抽象属性的模仿，它是利用模型进行的一种试验，可有效而经济地用于科研、设计、训练以及系统的试验。要进行仿真，应该包括三个基本要素：系统、系统模型、计算机。而联系这三项要素的基本活动是：系统建模、仿真建模和仿真实验。其中，系统是研究的对象，模型是系统的抽象，仿真是对模型的实验^[24]。系统仿真三要素及联系三要素的基本活动如图 1.1 所示。

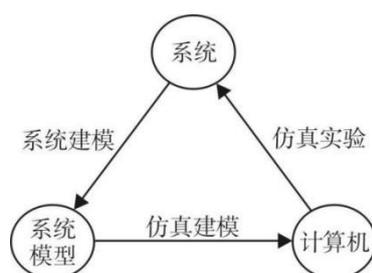


图 1.1 仿真三要素

有限元仿真是一种基于数值分析的方法，可用于模拟和分析物理系统的行为。随着有限元开发软件技术的进步和发展，将有限元仿真技术与多媒体技术结合已成为可能。

有限元仿真(Finite Element Analysis, FEA)的发展历程可以追溯到 19 世纪末，其成果和应用范围的不断扩展，其中中国学者冯康院士在 1965 年发表了基于变分原理的差分格式，这是中国独立发展有限元方法的重要成果之一。钱令希提出的力学分析余能原理、胡海昌提出的广义变分原理等^[25]，对有限元方法的发展做出了贡献。对于软件和应用的快速发展方面，在 1974 年，徐芝纶^[26]出版了中国第一部关于有限元法的专著《弹性力学问题的有限单元法》，对有限元方法的推广起到了重要作用。随后，朱伯芳^[27]的《有限单元法原理与应用》、王勖成^[28]的《有限单元法》等著作进一步促进了有限元方法的应用和普及。现代有限元软件如 ANSYS 软件^[29]是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有

有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发，它能与多数 CAD 软件接口实现数据的共享和交换，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

综上所述，有限元仿真的发展历程是一个从理论到实践、从简单到复杂的过程。它不仅在工作

领域发挥了重要作用，也在科学研究和技术中占据了不可替代的地位。

1.3 本文主要工作

本文的研究流程图如图 1.2 所示。

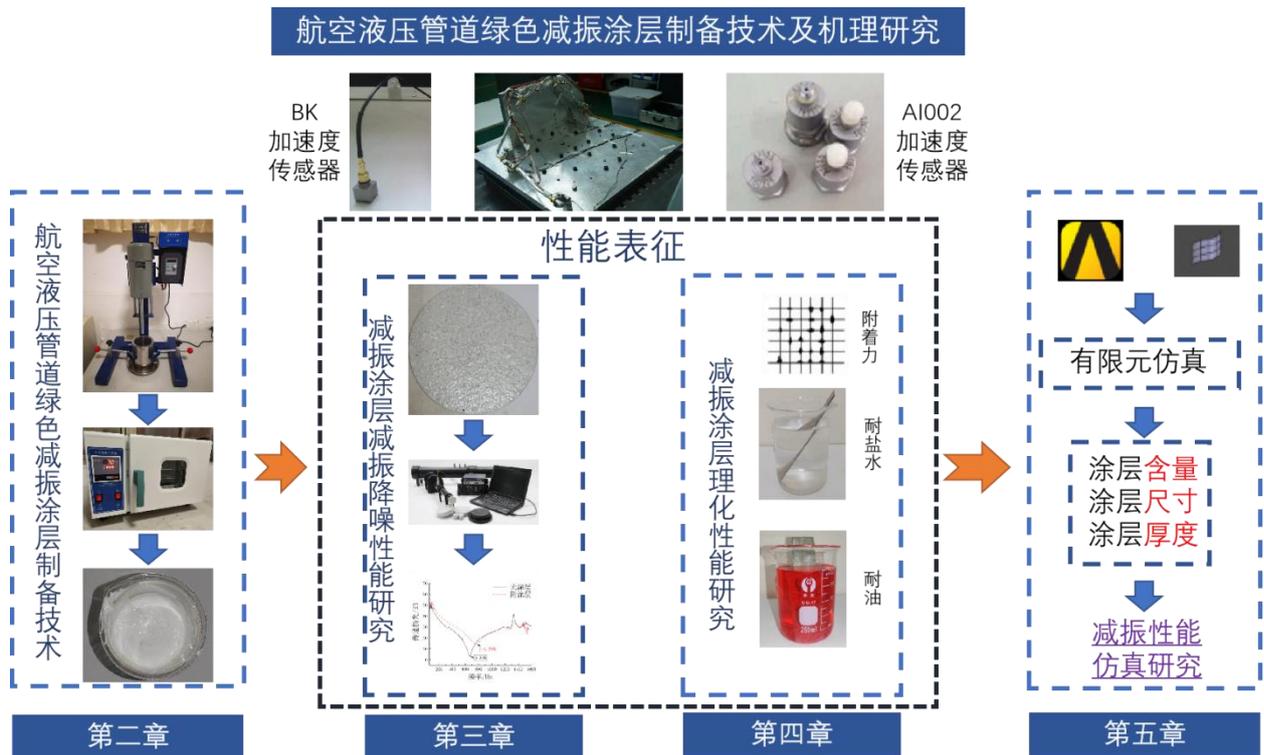


图 1.2 研究流程图

论文的组织结构如下：

第一章 主要概述此论文的研究背景及意义，并阐述了目前国内外减振涂层的发展过程，有限元仿真及微观减振机理研究的基本思路和发展历史。

第二章 减振涂层材料制备技术，该章节主要介绍了制备阻尼减振涂层所需的仪器及试验样品的制备方法。

第三章 该章节将研究阻尼涂层减振降噪性能，本试验涉及减振降噪性能研究具体为隔声性能研究。本章的试验分别研究填料在不同尺寸以及不同含量情况下对涂层减振降噪性能的影响，其尺寸包含小尺寸、中尺寸、大尺寸三种，含量包含低含量、中含量、高含量三种。

第四章 该章针对阻尼减振涂层理化性能，分别就阻尼减振涂层外观、涂层干燥时间、涂层耐盐水性能、涂层耐油性能以及涂层附着力性能等重点理化性能指标进行了分析研究。

第五章 通过 ANSYS 软件建立试验件的三维振动仿真模型，对建成的有限元模型进行仿真，将仿真结果与试验结果进行比较验证。

第六章为总结与展望，对此文研究得到的结果和结论进行了分析总结，并对以后的科研工作提出新的展望。

第二章 减振降噪涂层材料制备技术

2.1 试验材料

本研究使用到的试验原材料如表 2.1 所示，原材料的性质指标如表 2.2 所示。首先，采用水性丙烯酸聚氨脂作为乳液，作为高分子材料，丙烯酸聚氨脂作为高分子材料具有优良的耐化学性能以及高附着力等优点。同时在振动产生时，高分子链段和高分子链段间会产生相互摩擦，将吸收的部分机械能以热能的形式释放出去，起到一定减振作用。溶液采用去离子水，保证其中没有离子影响试验结果。填料采用云母粉用以大幅提高材料整体的阻尼性能。水性消泡剂采用硅聚醚，具有优良的消泡和抑泡作用。多功能助剂采用聚氨脂流变改性剂，赋予材料良好的流平、流动和增稠效果。分散剂采用聚羧酸钠盐，成膜助剂采用醇酯十二。材料自身 VOC 含量为 0，不含苯、二甲苯等挥发性有机物，符合当前环保安全绿色的需求。

表 2.1 绿色减振降噪涂层试验原材料

类别	材料	生产厂家
乳液	丙烯酸聚氨脂	山东淄博君武化工有限公司
溶液	去离子水	/
填料	云母粉	南京江宁石粉厂
水性消泡剂	硅聚醚	广州润宏化工有限公司
多功能助剂	聚氨脂流变改性剂	罗门哈斯
分散剂	聚羧酸钠盐	罗门哈斯
成膜助剂	醇酯十二	伊士曼

表 2.2 绿色减振降噪涂层试验原材料性质指标

材料	外观	性质
丙烯酸聚氨脂	乳白色液体	水性；pH 7.0-8.5；成膜温度为 10℃
去离子水	无色透明液体	纯水
云母粉	白色片状固体	尺寸分别为 10 目、40 目、400 目
硅聚醚	乳白色粘稠液体	固体含量为(24.0±1.0)%；pH6.5-8.5
聚氨脂流变改性剂	浑浊液体	固体含量为(19.0-21.0)%；良好的流平性
聚羧酸钠盐	淡黄色透明液体	固体含量:(24.0~26.0)%；pH:10.0-10.5
醇酯十二	无色透明液体	沸点:255℃；冰点:-50℃

2.2 试验仪器

根据上述文献调研，本研究将采用高速搅拌的方法制备绿色减振降噪涂层，该方法在本试验中的优点在于一是能够对样品进行快速且均匀地分散，有利于多种添加材料以及涂料的均匀混合；二是工艺流程较为简单、试验设备易获取。本研究采用的高速搅拌机，其转速可达 8000r/min，配备转轴升降控制器以及调速装置，可以根据实际需求通过电机调

节升降转轴以及转动速度，另外，还配备了专用的制备桶以及底部防溢出盘等。

此外，本试验还需要干燥箱、电子天平、烧杯、胶头滴管、玻璃棒等试验仪器，如图 2.1-2.6 所示。干燥箱用于绿色减振涂料的固化，其可以在一定范围内调节温度，减少涂层固化的时间。电子天平用于各种添加材料以及填料的称量，保证试验材料的配比。烧杯、胶头滴管以及玻璃棒等用于涂层材料过程制备。

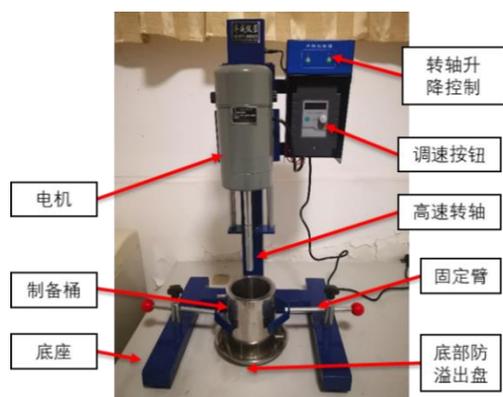


图 2.1 高速搅拌机



图 2.2 电子天平



图 2.3 干燥箱

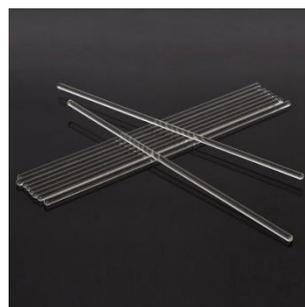


图 2.4 玻璃棒



图 2.5 胶头滴管



图 2.6 烧杯

2.3 阻尼减振涂层及试验样品的制备

2.3.1 阻尼减振降噪涂料制备工艺

绿色减振降噪涂层的制备工艺与传统涂料的制备工艺相近，主要分为原材料称量配比、水性乳液配制、填料分散混合以及多功能助剂与成膜四步。具体的制备步骤与流程如下：

（1）原材料称量配比

按照试验设计配比，利用烧杯、电子天平等仪器精准称量去离子水、丙烯酸聚氨脂、多功能助剂以及填料等。因为本文需要进行不同填料含量、不同尺寸的研究，因此各组分的含量一定要精准称量。此外，各种助剂的添加比例要准确，才能最大程度的优化减振涂料的各项基本性能。

（2）水性乳液配制

室温下，将称量好的去离子水以及丙烯酸聚氨脂乳液依次加入专用的制备桶中，开启高速搅拌机，将搅拌速度设置为 800r/min，搅拌时间设置为 15min，使得去离子水和丙烯酸聚氨脂乳液充分混合均匀。

（3）填料分散混合

待去离子水和丙烯酸聚氨脂乳液充分混合均匀后，依次将称量好的填料、消泡剂以及分散剂添加入制备桶，将搅拌速度加快至 8000r/min，搅拌时间设置为 40min。

（4）多功能助剂与成膜

在填料分散混合完成后，观察涂料状态，加入一定量的多功能助剂以及成膜助剂，降低搅拌速度为 800r/min，搅拌时间设置为 15min，即可得到绿色减振降噪涂料。

具体的试验制备流程如图 2.7 所示。

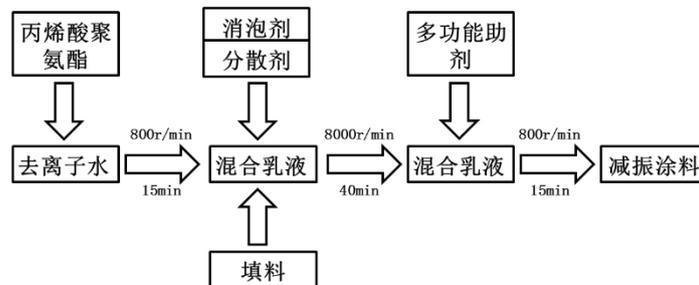


图 2.7 制备流程图

2.3.2 试验样品制备工艺

本研究所涉及到的测试样品共分三种，分别为片状样片、圆形样片以及航空液压导管，具体如下：

（1）针对片状样片，采用统一规格的铝片，该铝片经委托加工，尺寸为 150mm×60mm×1mm，质量为 25.2 克；

（2）针对圆形样片，经委托加工，材料为铝片，尺寸分为三种规格，其中，加工直径为 32mm、厚度为 1mm 的试验件用于高频隔声性能研究；加工直径为 105mm、厚度为 1mm 的试验件用于低频隔声性能研究；

选定好试验用基体材料后，将 2.3.1 中制备的阻尼减振降噪涂料通过喷枪喷涂于基体材料表面，之后放入干燥箱进行烘干固化，固化温度设置为 80℃，固化时间为 8h，之后通过测量保证涂层的厚度，如果涂层厚度不足，则再次重复喷涂与固化步骤。

2.4 本章小结

本章主要针对航空液压管道用绿色减振涂层制备技术及性能表征进行了讨论与分析，从试验材料、试验仪器、减振降噪涂层及测试样品的制备以及减振降噪涂层性能表征方法设计四个方面开展了详细的论述，为后续制备减振降噪涂层以及机理研究提供了理论基础以及具体操作方法。

第三章 阻尼减振降噪涂层减振降噪性能研究

3.1 无涂层试验件的减振降噪性能研究

根据减振噪声测试方法以及减振降噪试验系统，性能测试均进行 3 次测量后取平均值以降低试验的偶然性。测得无涂层铝制基底的隔声性能如图 3.1 所示，其中图 3.1（a）为试验件低频传递损失曲线，图 3.1（b）为试验件高频传递损失曲线。

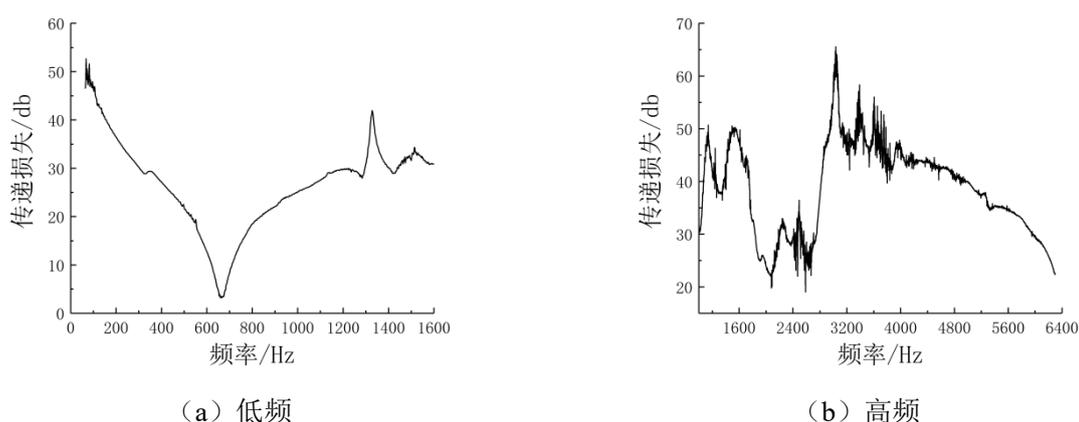


图 3.1 无涂层铝制基底的隔声性能

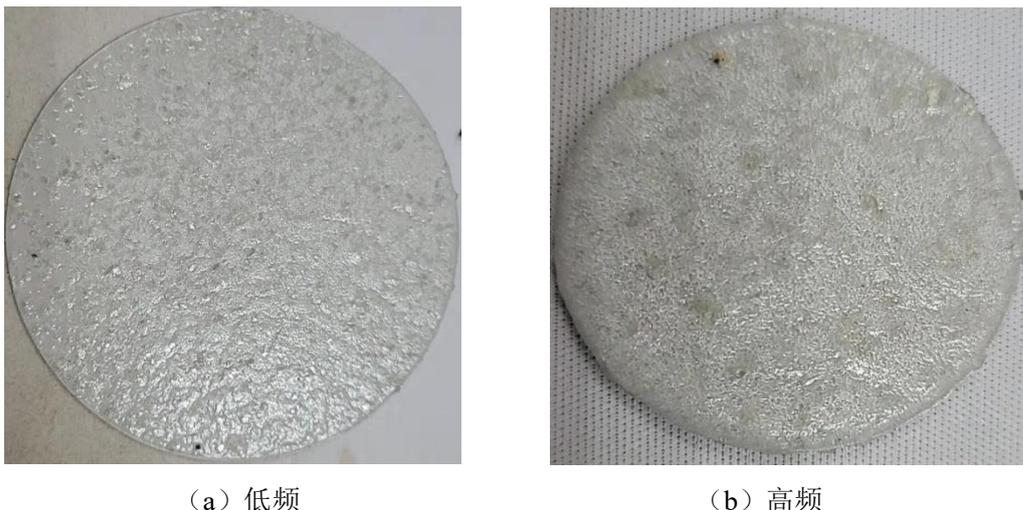
从图 3.1 中可看出，低频的 1000Hz—1600Hz 段与高频的 1000Hz—1600Hz 段并不重合，这主要是由于采用不同口径的阻抗管，从而引起的约束条件不同，因此拟合并没有实际意义。并由于高频的 1000Hz—1600Hz 段约束更强，因此在之后的试验中，主要分析高频 1600Hz—6400Hz 的隔声性能。

3.2 大尺寸填料对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

本试验选用尺寸为 10 目的云母粉作为大尺寸填料制备减振降噪涂层，通过控制变量法研究填料的固体含量对减振涂层隔声性能的影响。

3.2.1 低含量（20%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境，以 10 目云母粉为填料制备低填料含量（20%）的绿色减振降噪涂料，分别喷涂在 2 片试验件上，烘干后制得带有减振降噪涂层的试验件，如图 3.3 所示。其中图 3.2（a）为进行低频测试的试验件，图 3.2（b）为进行高频测试的试验件。

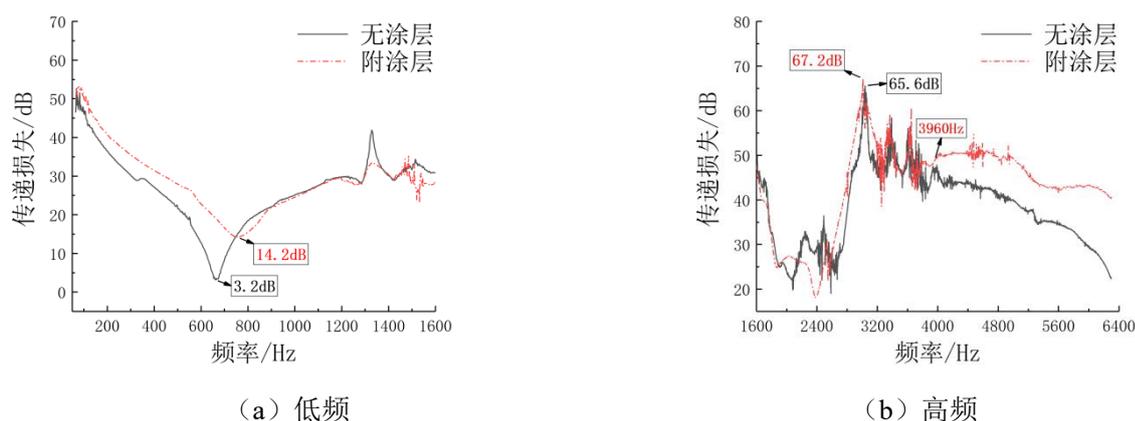


(a) 低频

(b) 高频

图 3.2 大尺寸低填料含量 (20%) 减振降噪涂层试验样片

采用减振降噪测试系统进行 3 次测量后取平均值测得试验件的隔声性能如图 3.4 所示, 其中图 3.3 (a) 为试验件低频传递损失曲线, 图 3.3 (b) 为试验件高频传递损失曲线。



(a) 低频

(b) 高频

图 3.3 大尺寸低填料含量 (20%) 减振降噪涂层隔声性能

从图 3.3 (a) 中可看出, 附加减振降噪涂层后, 在低频的大部分频段均增强了传递损失, 隔声性能有所提升, 经计算附涂层后低频平均传递损失为 28.73dB, 无涂层的金属基底低频平均传递损失为 26.70dB, 相较提升了 2.03dB, 约为 1.6 倍, 且传递损失的最小值增大了 11dB, 约为 12.6 倍, 在低频处有效地抑制了弹性波。

从图 3.3 (b) 中可看出, 附加减振降噪涂层后传递损失在高频的 3960Hz—6400Hz 频段较为明显地增强了传递损失, 隔声性能得到了较大的提升, 在该频率段附涂层后试样的平均传递损失为 46.50dB, 无涂层的金属基底在该频率段的平均传递损失的 37.39dB, 相较提升了 9.11dB, 约为 8.1 倍, 且传递损失的最大值增大了 1.6 dB, 约为 1.4 倍。

3.2.2 中含量 (40%) 对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境, 以 10 目云母粉为填料制备中填料含量 (40%) 的绿色

减振降噪涂料，将减振涂料分别喷涂在 2 片试验件上，烘干后制得带有减振降噪涂层的试验件，如图 3.4 所示。其中图 3.4 (a) 为进行低频测试的试验件，图 3.4 (b) 为进行高频测试的试验件。



图 3.4 大尺寸中填料含量（40%）减振降噪涂层试验样片

采用降噪测试系统进行 3 次测量后取平均值测得试验件的隔声性能如图 3.6 所示，其中图 3.5 (a) 为试验件低频传递损失曲线，图 3.5 (b) 为试验件高频传递损失曲线。

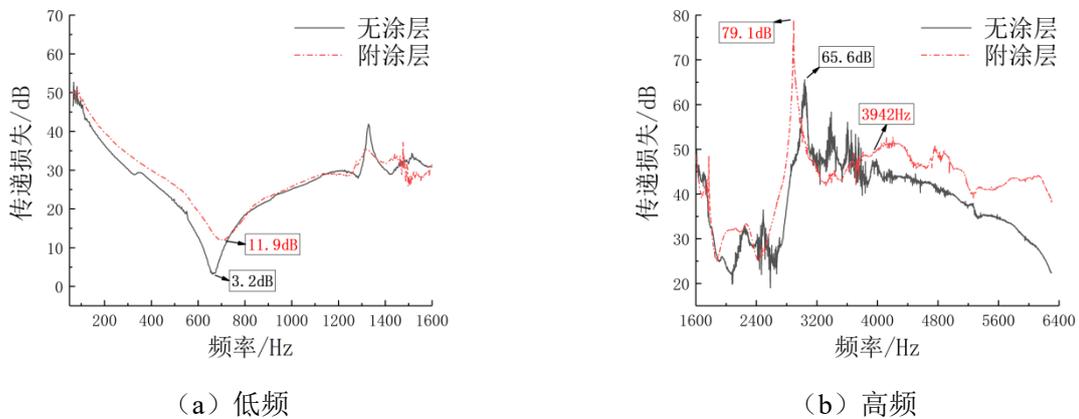


图 3.5 大尺寸中填料含量（40%）减振降噪涂层隔声性能

从图 3.5 (a) 可看出，附加减振降噪涂层后在低频的大部分频段均增强了传递损失，隔声性能有所提升，经计算附涂层后低频平均传递损失为 28.46dB，无涂层的金属基底的低频平均传递损失为 26.70dB，相较提升了 1.76dB，约为 1.5 倍，且传递损失的最小值增大了 8.7dB，约为 7.4 倍，在低频有效地抑制了弹性波。

从图 3.5 (b) 可看出，附加减振降噪涂层后传递损失在高频的 3942Hz—6400Hz 频段较为明显地增强了传递损失，隔声性能得到了较大的提升，在该频率段附涂层后平均传递损失为 45.39dB，无涂层的金属基底在该频率段的平均传递损失 37.46dB，相较提升了 7.93dB，约为 6.2 倍，且传递损失的最大值增大了 13.5 dB，约为 22.4 倍。

3.2.3 高含量（60%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境，以 10 目云母粉为填料制备高填料含量（60%）的绿色减振涂料，将减振降噪涂料分别喷涂在 2 片试验件上，烘干后制得带有减振降噪涂层的试验件，如图 3.6 所示。其中图 3.6（a）为进行低频测试的试验件，图 3.6（b）为进行高频测试的试验件。

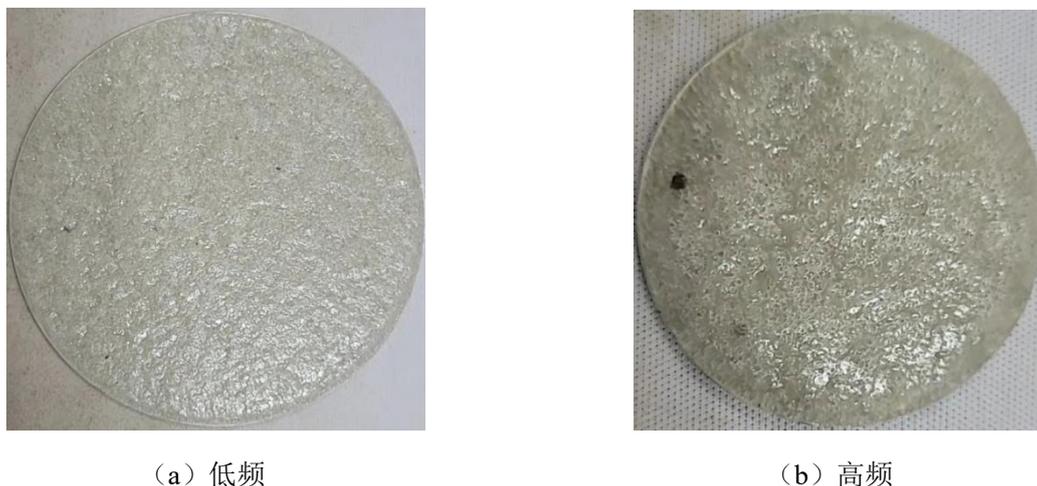


图 3.6 大尺寸高填料含量（60%）减振降噪涂层试验样片

采用降噪测试系统进行 3 次测量后取平均值测得试验件的隔声性能如图 3.7 所示，其中图 3.7（a）为试验件低频传递损失曲线，图 3.7（b）为试验件高频传递损失曲线。

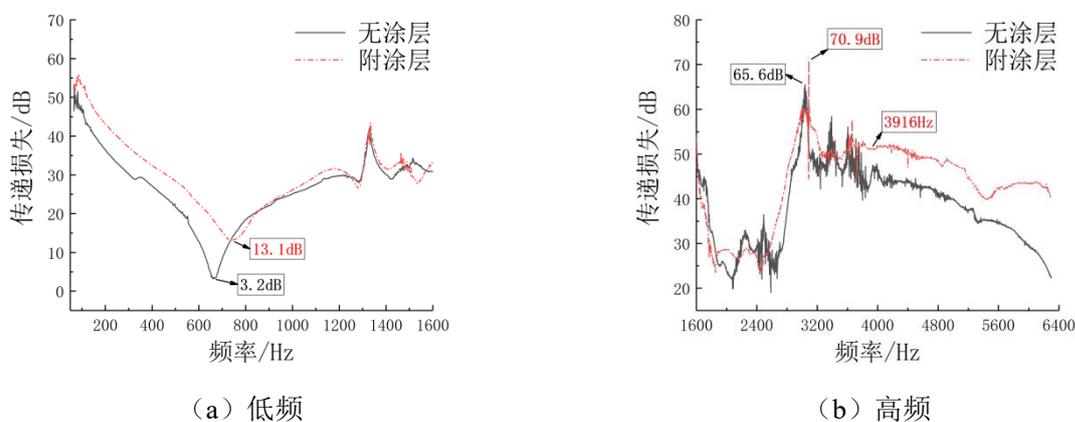


图 3.7 大尺寸高填料含量（60%）减振降噪涂层隔声性能

从图 3.7（a）可看出，附加减振涂层后在低频的大部分频段均增强了传递损失，隔声性能有所提升，经计算附涂层后低频平均传递损失为 30.11dB，相较于无涂层的金属基底的低频平均传递损失 26.70dB 提升了 3.41dB，约为 2.2 倍，且传递损失的最小值增大了 9.9dB，约为 9.8 倍，在低频有效地抑制了弹性波。

从图 3.7（b）可看出，附加减振降噪涂层后传递损失在高频的 3916Hz—6400Hz 频段较为明显地增强了传递损失，隔声性能得到了较大的提升，在该频率段附涂层后平均传递损失为 46.25dB，相较于无涂层的金属基底在该频率段的平均传递损失 37.56dB 提升了

8.69dB，约为 7.4 倍，且传递损失的最大值增大了 5.3dB，约为 3.4 倍。

3.3 中尺寸填料对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

本试验选用尺寸为 40 目的云母粉作为中尺寸填料制备减振涂层，通过控制变量法研究填料的固体含量对减振降噪涂层隔声性能的影响。

3.3.1 低含量（20%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境，以 40 目云母粉为填料制备低填料含量（20%）的绿色减振降噪涂料，将减振降噪涂料分别喷涂在 2 片试验件上，烘干后制得带有减振降噪涂层的试验件，如图 3.9 所示。其中图 3.9（a）为进行低频测试的试验件，图 3.9（b）为进行高频测试的试验件。



图 3.2 中尺寸低填料含量（20%）减振降噪涂层试验样片

采用降噪测试系统进行 3 次测量后取平均值测得试验件的隔声性能如图 3.10 所示，其中图 3.10（a）为试验件低频传递损失曲线，图 3.10（b）为试验件高频传递损失曲线。

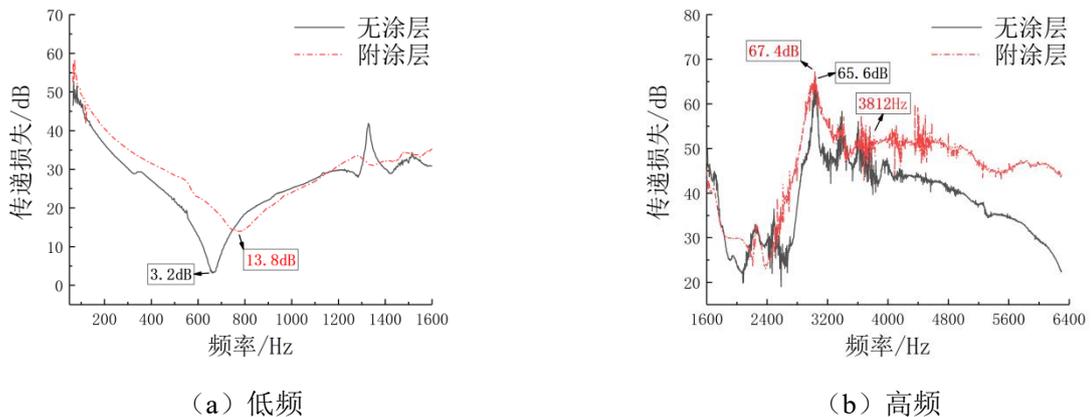


图 3.3 中尺寸低填料含量（20%）减振降噪涂层隔声性能

从图 3.10 (a) 可看出, 附加减振降噪涂层后在低频的大部分频段均增强了传递损失, 隔声性能有所提升, 经计算附涂层后低频平均传递损失为 29.40dB, 相较于无涂层的金属基底的低频平均传递损失 26.70dB, 提升了 2.7dB, 约为 1.9 倍, 且传递损失的最小值增大了 10.6dB, 约为 11.5 倍, 在低频有效地抑制了弹性波。

从图 3.10 (b) 可看出, 附加减振降噪涂层后传递损失在高频的 3812Hz—6400Hz 频段较为明显地增强了传递损失, 隔声性能得到了较大的提升, 在该频率段附涂层后平均传递损失为 48.57dB, 无涂层的金属基底在该频率段的平均传递损失 37.80dB, 相较提升了 10.77dB, 约为 11.9 倍, 且传递损失的最大值增大了 1.8 dB, 约为 1.5 倍。

3.3.2 中含量（40%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境, 以 40 目云母粉为填料制备中填料含量（40%）的绿色减振降噪涂料, 将减振降噪涂料分别喷涂在 2 片试验件上, 烘干后制得带有减振降噪涂层的试验件, 如图 3.11 所示。其中图 3.11 (a) 为进行低频测试的试验件, 图 3.11 (b) 为进行高频测试的试验件。



图 3.4 中尺寸中填料含量（40%）减振降噪涂层试验样片

采用降噪测试系统进行 3 次测量后取平均值测得试验件的隔声性能如图 3.12 所示, 其中图 3.12 (a) 为试验件低频传递损失曲线, 图 3.12 (b) 为试验件高频传递损失曲线。

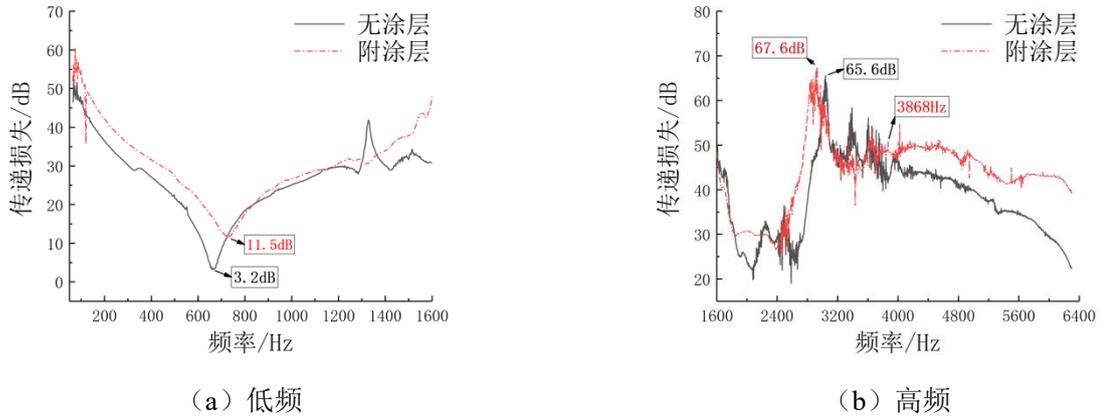


图 3.5 中尺寸中填料含量（40%）减振降噪涂层隔声性能

从图 3.12 (a) 可看出，附加减振降噪涂层后在低频的大部分频段均增强了传递损失，隔声性能有所提升，经计算附涂层后低频平均传递损失为 30.57dB，无涂层的金属基底的低频平均传递损失 26.70dB，相较提升了 3.87dB，约为 2.4 倍，且传递损失的最小值增大了 8.3dB，约为 6.8 倍，在低频有效地抑制了弹性波。

从图 3.12 (b) 可看出，附加减振降噪涂层后传递损失在高频的 3868Hz—6400Hz 频段较为明显地增强了传递损失，隔声性能得到了较大的提升，在该频率段附涂层后平均传递损失为 45.69dB，无涂层的金属基底在该频率段的平均传递损失 37.67dB，相较提升了 8.02dB，约为 6.3 倍，且传递损失的最大值增大了 2 dB，约为 1.6 倍。

3.3.3 高含量（60%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境，以 40 目云母粉为填料制备高填料含量（60%）的绿色减振降噪涂料，将减振涂料分别喷涂在 2 片试验件上，烘干后制得带有减振降噪涂层的试验件，如图 3.13 所示。其中图 3.13 (a) 为进行低频测试的试验件，图 3.13 (b) 为进行高频测试的试验件。



图 3.6 中尺寸高填料含量（60%）减振降噪涂层试验样片

采用降噪测试系统进行 3 次测量后取平均值测得试验件的隔声性能如图 3.14 所示，其中图 3.14（a）为试验件低频传递损失曲线，图 3.14（b）为试验件高频传递损失曲线。

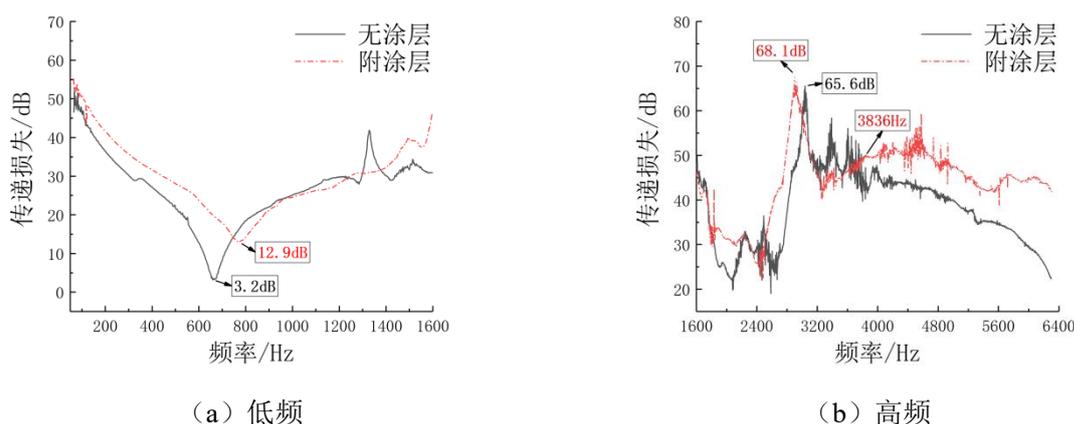


图 3.7 中尺寸高填料含量（60%）减振降噪涂层隔声性能

从图 3.14（a）可看出，附加减振降噪涂层后在低频的大部分频段均增强了传递损失，隔声性能有所提升，经计算附涂层后低频平均传递损失为 29.84dB，无涂层的金属基底的低频平均传递损失 26.70dB，相较提升了 3.14dB，约为 2.1 倍，且传递损失的最小值增大了 9.7dB，约为 9.3 倍，在低频有效地抑制了弹性波。

从图 3.14（b）可看出，附加减振降噪涂层后传递损失在高频的 3836Hz—6400Hz 频段较为明显地增强了传递损失，隔声性能得到了较大的提升，在该频率段附涂层后平均传递损失为 47.04dB，无涂层的金属基底在该频率段的平均传递损失 37.74dB，相较提升了 9.3dB，约为 8.5 倍，且传递损失的最大值增大了 2.5 dB，约为 1.8 倍。

3.4 小尺寸填料对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

本试验选用尺寸为 400 目的云母粉作为小尺寸填料制备减振降噪涂层，通过控制变量

法研究填料的固体含量对减振涂层隔声性能的影响。

3.4.1 低含量（20%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境，以 400 目云母粉为填料制备低填料含量（20%）的绿色减振降噪涂料，将减振降噪涂料分别喷涂在 2 片试验件上，烘干后制得带有减振降噪涂层的试验件，如图 3.15 所示。其中图 3.15（a）为进行低频测试的试验件，图 3.15（b）为进行高频测试的试验件。

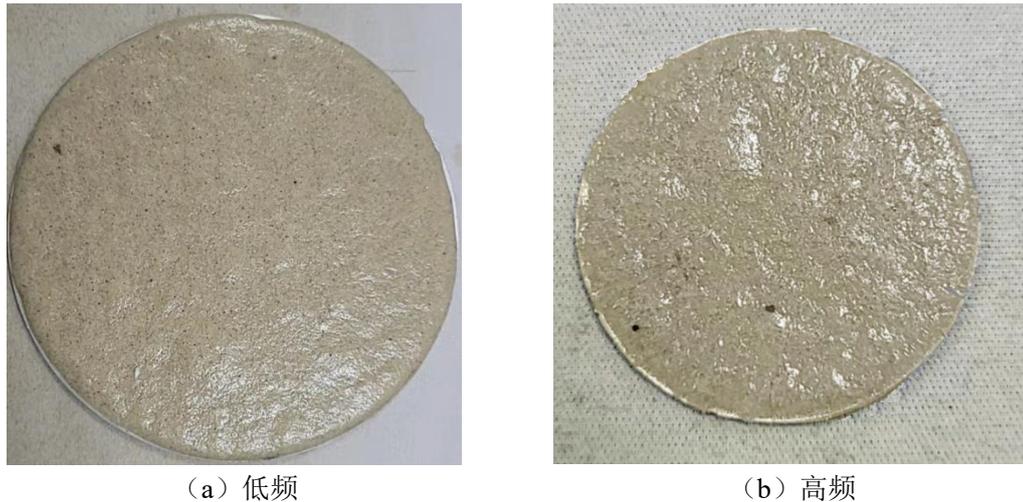


图 3.8 小尺寸低填料含量（20%）减振降噪涂层试验样片

采用减振降噪测试系统进行 3 次测量后取平均值测得试验件的隔声性能如图 3.16 所示，其中图 3.16（a）为试验件低频传递损失曲线，图 3.16（b）为试验件高频传递损失曲线。

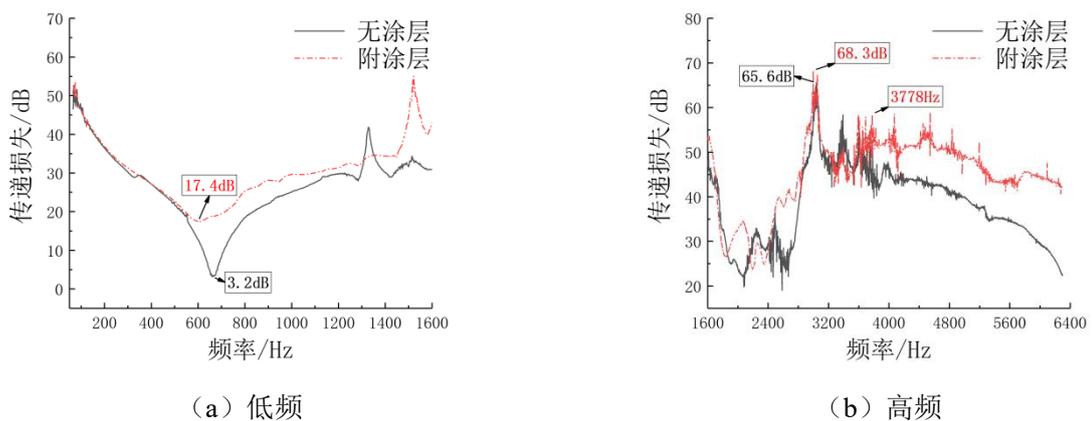


图 3.9 小尺寸低填料含量（20%）减振降噪涂层隔声性能

从图 3.16（a）可看出，附加减振降噪涂层后在低频的大部分频段均增强了传递损失，隔声性能有所提升，经计算附涂层后低频平均传递损失为 30.69dB，无涂层的金属基底的低频平均传递损失 26.70dB，相较提升了 3.99dB，约为 2.5 倍，且传递损失的最小值增大了 14.2dB，约为 26.3 倍，在低频有效地抑制了弹性波。

从图 3.16 (b) 可看出, 附加减振降噪涂层后传递损失在高频的 3778Hz—6400Hz 频段较为明显地增强了传递损失, 隔声性能得到了较大的提升, 在该频率段附涂层后平均传递损失为 47.96dB, 无涂层的金属基底在该频率段的平均传递损失 37.88dB, 相较提升了 10.08dB, 约为 10.2 倍, 且传递损失的最大值增大了 2.7 dB, 约为 1.9 倍。

3.4.2 中含量 (40%) 对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境, 以 400 目云母粉为填料制备中填料含量 (40%) 的绿色减振降噪涂料, 将减振降噪涂料分别喷涂在 2 片试验件上, 烘干后制得带有减振降噪涂层的试验件, 如图 3.17 所示。其中图 3.17 (a) 为进行低频测试的试验件, 图 3.17 (b) 为进行高频测试的试验件。



图 3.10 小尺寸中填料含量 (40%) 减振降噪涂层试验样片

采用减振降噪测试系统进行 3 次测量后取平均值测得试验件的隔声性能如图 3.18 所示, 其中图 3.18 (a) 为试验件低频传递损失曲线, 图 3.18 (b) 为试验件高频传递损失曲线。

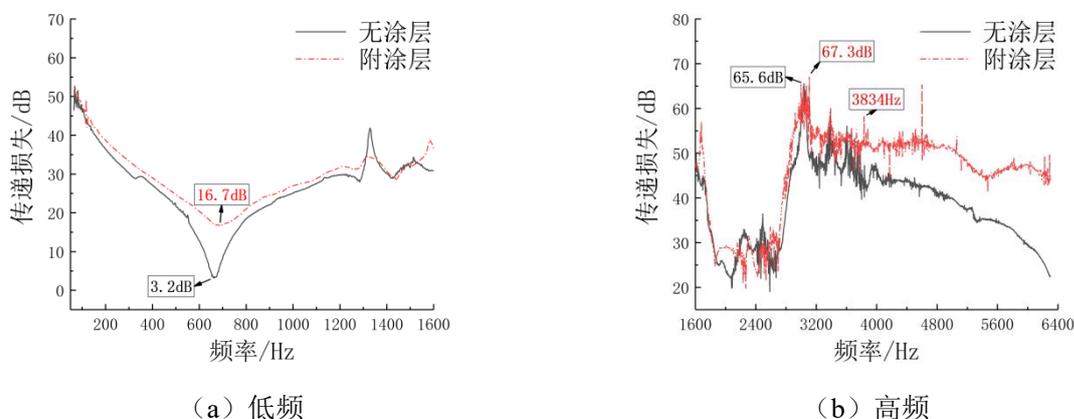


图 3.11 小尺寸中填料含量 (40%) 绿色减振降噪涂层隔声性能

从图 3.18 (a) 可看出, 附加减振降噪涂层后在低频的大部分频段均增强了传递损失,

隔声性能有所提升，经计算附涂层后低频平均传递损失为 29.38dB，无涂层的金属基底的低频平均传递损失 26.70dB，相较提升了 2.68dB，约为 1.9 倍，且传递损失的最小值增大了 13.5dB，约为 22.4 倍，在低频有效地抑制了弹性波。

从图 3.18 (b) 可看出，附加减振降噪涂层后传递损失在高频的 3834Hz—6400Hz 频段较为明显地增强了传递损失，隔声性能得到了较大的提升，在该频率段附涂层后平均传递损失为 49.10dB，无涂层的金属基底在该频率段的平均传递损失 37.75dB，相较提升了 11.35dB，约为 13.6 倍，且传递损失的最大值增大了 1.7 dB，约为 1.5 倍。

3.4.3 高含量（60%）对涂层隔声减振降噪性能的影响研究

以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境，以 400 目云母粉为填料制备高填料含量（60%）的绿色减振降噪涂料，将减振降噪涂料分别喷涂在 2 片试验件上，烘干后制得带有减振降噪涂层的试验件，如图 3.19 所示。其中图 3.19 (a) 为进行低频测试的试验件，图 3.19 (b) 为进行高频测试的试验件。

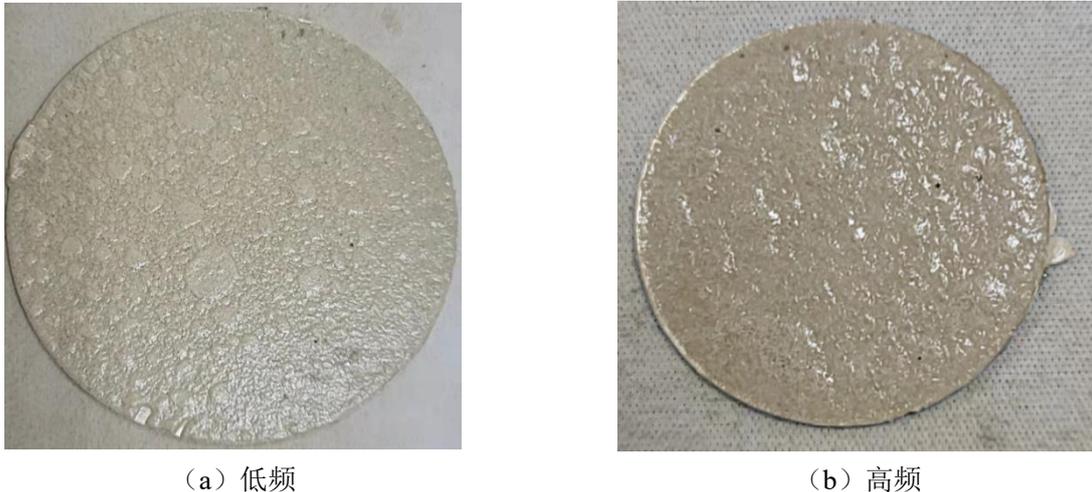


图 3.12 小尺寸高填料含量（60%）减振降噪涂层试验样片

采用减振降噪测试系统进行 3 次测量后取平均值测得试验件的隔声性能如图 3.20 所示，其中图 3.20 (a) 为试验件低频传递损失曲线，图 3.20 (b) 为试验件高频传递损失曲线。

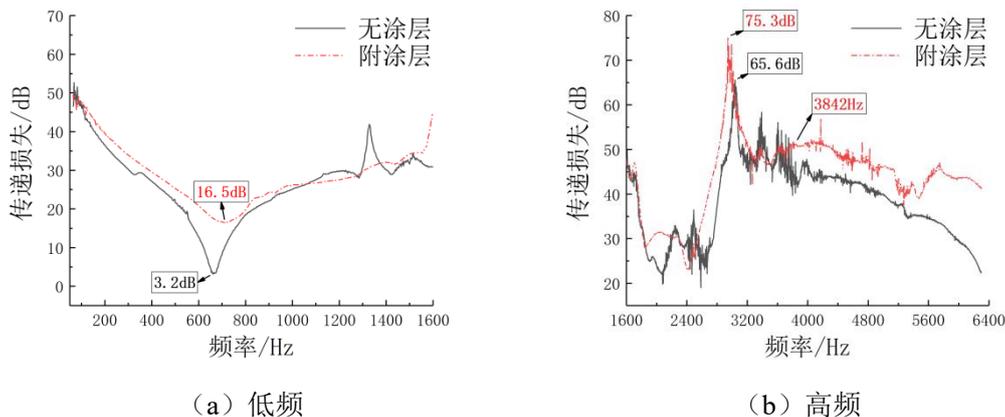


图 3.13 小尺寸高填料含量（60%）减振降噪涂层隔声性能

从图 3.20 (a) 可看出, 附加减振降噪涂层后在低频的大部分频段均增强了传递损失, 隔声性能有所提升, 经计算附涂层后低频平均传递损失为 28.99dB, 无涂层的金属基底的低频平均传递损失 26.70dB, 相较提升了 2.29dB, 约为 1.7 倍, 且传递损失的最小值增大了 13.3dB, 约为 21.4 倍, 在低频有效地抑制了弹性波。

从图 3.20 (b) 可看出, 附加减振降噪涂层后传递损失在高频的 3842Hz—6400Hz 频段较为明显地增强了传递损失, 隔声性能得到了较大的提升, 在该频率段附涂层后平均传递损失为 45.89dB, 无涂层的金属基底在该频率段的平均传递损失 37.73dB, 相较提升了 8.16dB, 约为 6.5 倍, 且传递损失的最大值增大了 9.7 dB, 约为 9.3 倍。

3.5 本章小结

对于所有喷涂有减振降噪涂层的试验件, 提取出其隔声性能测试所得到的低频平均传递损失增量、传递损失最小值的增量如表 3.1 所示, 高频段 (3800Hz 左右—6400Hz) 平均传递损失增量、传递损失最大值的增量如表 3.2 所示。

表 3.1 减振降噪涂层低频试验统计数据

目数	固体含量	低频平均传递损失增加/dB	传递损失最小值增大量/dB
10 目	20%	2.03	11
	40%	1.76	8.7
	60%	3.41	9.9
40 目	20%	2.7	10.6
	40%	3.87	8.3
	60%	3.14	9.7
400 目	20%	3.99	14.2
	40%	2.68	13.5
	60%	2.29	13.3

表 3.2 减振降噪涂层高频试验统计数据

目数	固体含量	高频平均传递损失增加/dB	传递损失最大值增大量/dB
10 目	20%	9.11	1.6
	40%	7.93	13.5
	60%	8.69	5.3
40 目	20%	10.77	1.8
	40%	8.02	2
	60%	9.3	2.5
400 目	20%	10.08	2.7

40%	11.35	1.7
60%	8.16	9.7

由 3.1 中所知，隔声量的标准为传递损失为入射声能及出射声能的比值取对数，因此当传递损失提升 10dB，表示隔声量提升了 10 倍，因此在传递损失提升了 10dB 后，可视其降噪性能良好。对表 3.1 数据进行绘图分析，如图 3.23 所示。

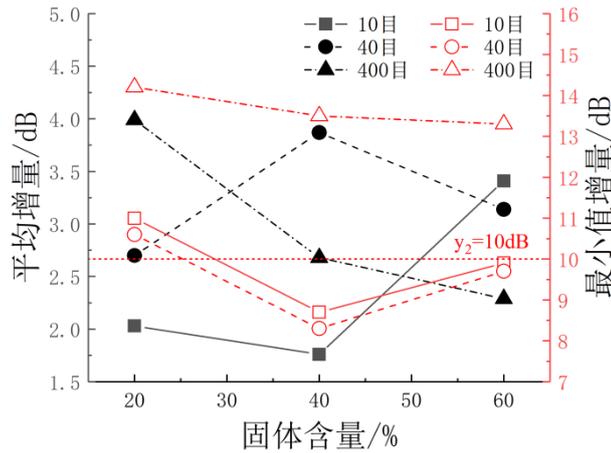


图 3.14 制得的高阻尼低成本绿色减振降噪涂层低频试验

由图 3.23 可得，制得的减振降噪涂层在低频段作用主要是抑制弹性波，可将最小隔声传递损失提升 7dB-14dB，约提升 5-25 倍，其中填料为 400 目云母粉含量为 20%时值得的减振降噪涂层对于提升最小隔声传递损失效果最佳。同样是填料为 400 目云母粉含量为 20%时值得的减振降噪涂层对于提升平均隔声传递损失效果最佳。

对表 3.2 数据进行绘图分析，如图 3.24 所示。

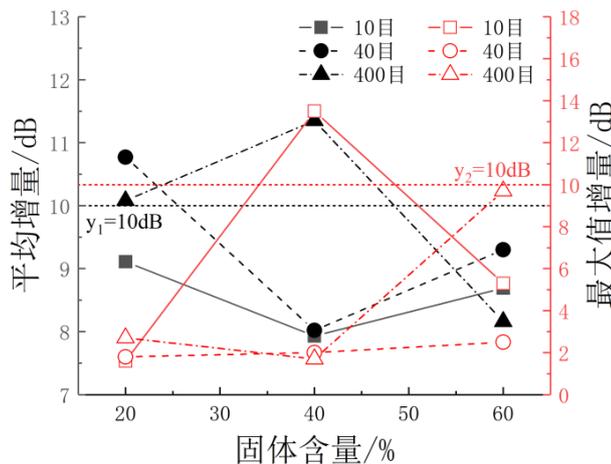


图 3.15 减振降噪涂层高频试验

由图 3.24 可得，制得减振降噪涂层在高频阶段降噪隔声性能表现良好的主要为填料为 40 目云母粉固体含量为 20%、400 目云母粉固体含量为 20%及 40%制得的涂层，其传递损失平均增量均超过了 10dB。

第四章 阻尼减振降噪涂层理化性能研究

4.1 阻尼减振降噪涂料外观与干燥时间分析

在涂料外观方面，参考 GB/T 20777《色漆和清漆 试样的检查和制备》进行分析，国标中对厚浆涂料类粘稠样品等进行了检验程序的说明，在目视检查中，主要是观察和记录样品的表面结皮现象及其程度、分层、沉淀以及外来异物的情况。在表面结皮及其程度方面，观察并记录样品任何的结皮现象以及结皮程度，分为是否出现结皮现象、结皮表现是否连续、结皮是硬质还是软质以及结皮厚度的判断；在分层方面，记录样品在制备以及存放过程中的分层现象；在沉淀方面，记录样品中是否出现沉淀，沉淀的类型是软质沉淀物还是硬质沉淀物等。

如图 4.1 所示，为本研究中按照 2.3 章节所述制备工艺，以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境制备的绿色减振降噪涂料，在表面结皮及其程度方面，可明显看出制备的混合乳液涂料样品呈乳白色，经过多次高速混合制备工艺后涂料十分均匀，多批次观察后减振涂料表面未出现结皮现象，且未发现有水或者树脂状物质析出；在分层方面，绿色减振涂料在整个制备以及存放过程中未出现分层现象；在沉淀方面，绿色减振降噪涂料经观察未见杂质以及可察觉的沉淀物出现。



图 4.1 减振降噪涂料外观

综上所述，本研究制备的绿色减振涂料符合 GB/T 20777 中厚浆涂料类粘稠样品检验程序的标准。

在涂层干燥时间方面，参考 GB/T 1728《漆膜、腻子膜干燥时间测定法》进行分析，国标中对涂层表面干燥时间以及实际干燥时间的测定进行了规定，在表面干燥时间的测定方面，主要有吹棉球法与指触法，吹棉球法指的是在涂层的外表面上轻轻放置一个棉球物，在距离棉球 15cm 左右的地方用嘴对着棉球吹气，如果能将棉球吹走则证明涂层达到表面

干燥；指触法指的是用手指轻轻接触待测涂层的表面，如果感觉到手指有微微发黏的感觉，但是没有涂料沾附在手上，即可认为涂层达到表面干燥。本研究中制备的绿色减振降噪涂层表面本身就具有微黏的触感以及一定的粘附力，这是由涂料中的主要成分丙烯酸聚氨脂的特性带来的，因此，本研究中将采取指触法分析判断涂层的表面干燥情况。在实际干燥时间的测定方面，主要有压滤纸法、压棉球法、刀片法等，压滤纸法指的是在涂层上放置定性滤纸，再在滤纸上摆放干燥时间试验器，经一定时间后移去重物并将样片翻转，若滤纸能自由落下则证明涂层达到实际干燥；压棉球法指的是在涂层表面放置棉球，再在棉球上摆放干燥时间试验器，经一定时间后移去以上的棉球和干燥时间试验器，如果涂层表面未发现棉球痕迹和失光现象则证明涂层达到实际干燥；刀片法指的是用刀片将涂层切透，切透后观察涂层底层以及涂层内部有无黏着现象出现，如果无上述黏着现象出现，则认为涂层达到实际干燥。经讨论，本研究中将采取刀片法分析判断涂层的实际干燥情况，该方法操作简单且易观察结果。

参考 GB/T 1728 方法，对本文制备的绿色减振降噪涂层进行涂层表面干燥时间与涂层实际干燥时间的分析，在涂层表面干燥时间方面，根据指触法要求，将手指轻触制备好的绿色减振降噪涂层表面，感到略发黏，但无涂料沾在手上时则证明涂层达到表面干燥状态，实测当本研究中制备的绿色减振降噪涂层厚度为 0.25mm 时，涂层的表面干燥时间为 120min，如图 4.2 所示；在涂层实际干燥时间方面，根据刀片法要求，用刀片将绿色减振降噪涂层切透，观察涂层底层以及涂层内部有无黏着现象出现，若无则证明涂层达到实际干燥，实测当本研究中制备的绿色减振降噪涂层厚度为 0.25mm 时，涂层的实际干燥时间为 48h，如图 4.3 所示。



图 4.2 涂层表面干燥



图 4.3 涂层实际干燥

综上，减振降噪涂料外观及干燥时间分析结果如表 4.1 所示。

表 4.1 减振降噪涂料外观及干燥时间

项目	指标性能
外观	涂料外观状态良好，整体呈乳白色
结皮	无结皮现象
分层	无分层现象
沉淀	无水或者树脂状物质析出，且未见杂质以及可察觉的沉淀物
表干时间	实测表干时间为 120min
实干时间	实测实干时间为 48h

4.2 阻尼减振涂层附着力性能分析

优良的附着力能够保证涂层在外力、振动等因素下不会剥落，从而达到良好的减振降噪效果。在涂层附着力方面，参考 GB/T 9286《色漆和清漆划格试验》分析减振降噪涂层在基体上的附着力，该标准明确规定了以直角网格的形式切透涂层至基底时评价涂层从基底脱落的抗性强度，选取该标准作为涂层附着力性能试验测试的原因还在于该方法不仅仅可以用于实验室，还同样可以用于现场，此外国家标准中多种涂层采用该方法用于涂层附着力的表征。根据标准要求，在切割工具的选择方面，选择单刃切割工具，该切割工具适用于厚涂层（ $>120\ \mu\text{m}$ ）且适合人工操作；在测定次数的选取上，至少在试样上选取三个不同的位置进行切割试验；在切割线的操作上，第一次切割时先做一定数量的平行线，第二次切割时选择与第一次切割时的平行线成 90° 角再做一组相同数量的平行切割线；在除去疏松涂层方面，使用软毛刷沿切割出的网格形的对角线依次向后与向前轻扫。最后，在结果的评定上，良好的光照环境下，目视法检查试验样品的切割区域并与标准图示作比较，依此进行样品涂层附着力的分级。标准图示如表 4.2 所示。

采用上述方法研究本文按照 2.3 章节所述制备工艺制备的绿色减振降噪涂层，涂层厚度为 $150\ \mu\text{m}$ 。采用单刃切割工具，在样片上选取三个不同的地方，握住工具使刀刃垂直于试样表面后匀速切割试样，保证每次切割均能够划透至基体表面，重复以上操作，与原切线成 90° 再次切割试样，最终形成网格图形。之后，使用软毛刷沿切割出的网格形的对角线进行疏松涂层的清理，试验结果如图 4.4 所示。

表 4.2 划格试验结果的分级

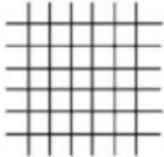
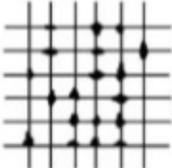
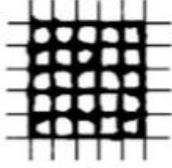
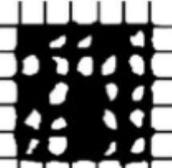
分级	说明	表面外观
0	切割边缘完全平滑，网格内无脱落	
1	在切口交叉处有少许涂层脱落，但受影响的交叉切割面积不大于 5%	
2	在切口交叉处和/或沿切口边缘有涂层脱落，受影响的交叉切割面积大于 5%，但不大于 15%	
3	涂层沿切割边缘部分或全部以大碎片脱落，和/或在格子不同部位上部分或全部脱落，受影响的交叉切割面积大于 15%，但不大于 35%	
4	涂层沿切割边缘大碎片脱落，和/或一些方格部分或全部脱落，受影响的交叉切割面积大于 35%，但不大于 65%	
5	脱落的程度超过 4 级的情况	/



图 4.4 涂层划格试验结果

经试验，在涂层附着力方面，即涂层从基底脱离的抗性评定，比对试验样片划格测试后的结果以及标准图谱，可明显看出本研究制备的涂层在切口交叉处有少许涂层脱落，但受影响的交叉切割面积未超过 5%，因此判断涂层的附着力性能等级按照 GB/T 9286《色漆和清漆划格试验》中的分级标准为 1 级。

4.3 阻尼减振降噪涂层耐盐水与耐油性能分析

4.3.1 阻尼减振降噪涂层耐盐水性能分析

涂层的耐盐水性能对于涂层在航空管道上的实际应用而言具备较大的意义，飞行器在日常的使用和维护过程中，特别是在海边环境下的使用过程中，盐水是造成管道腐蚀以及涂层脱落的重要因素之一，最终可能导致管路失效从而造成飞行事故。因此，探究涂层的耐盐水性能是必不可少的。

在涂层耐盐水性能方面，参考 GB/T 1763《漆膜耐化学试剂性测定法》，采用常温耐盐水法对减振涂层进行研究。使用分析纯氯化钠以及蒸馏水配置成 3%（重量）的氯化钠水溶液，在室温为 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 的环境下，将具有减振涂层的试验样片放入其中，水位保证浸没过样片的三分之二，保持 24 小时之后将试验样片从容器中取出，用蒸馏水将盐迹洗除，再使用滤纸吸干试验样片表面的水分，随后观察试验样片的表面是否出现剥落、起泡、生锈和变色等现象。具体试验过程及结果如下图 4.5-4.7 所示，图 4.5 为试验前样片表面，图 4.6 为样片耐盐水试验过程中，图 4.7 为试验后样片表面。



图 4.5 试验前样片



图 4.6 样片耐盐水试验过程中



图 4.7 试验后样片

对比图 4.7 中试验前后样片的表面可看出，经过 24 小时的浸泡后，减振降噪涂层没有出现剥落的情况，也没有出现任何生锈的部位，但是，可以发现试样经浸泡后的位置发生了明显的变色现象，由最开始接近无色的状态转变为了白色。此外，在涂层起泡方面，对比试验前后，浸泡后的位置有少数地方出现了鼓起起泡，产生起泡的原因可能是涂层在长

时间盐水浸泡状态下，水可以由涂层外部渗透到涂层内部，当聚集的水达到一定程度后便形成了水泡。

试验结果证明，本研究中制备的减振降噪涂层在耐盐水性能方面具备不剥落、不生锈的优良性能，但是会出现变色以及少量起泡的现象，后续在实际应用以及研究过程中，可考虑搭配耐盐水的面漆共同使用，防止水的渗透。

4.3.2 阻尼减振涂层耐油性能分析

涂层的耐油性能对于涂层在航空管道上的实际应用而言也同样具备较大的意义，针对航空液压管道而言，此类管道时刻承载着航空液压油液，用于起落架、减速板以及各种动作器的收放，虽然涂层喷涂于管道的外侧面，但是在飞行器的生产制造以及实际使用中都无法避免的要与液压油液进行接触。因此，涂层耐液压油性能的好坏是必须要考虑的。

在涂层耐油性能方面，根据减振降噪涂层的实际使用需求，参考 HG/T 3343 《漆膜耐油性测定法》，采用浸油液试验的方法进行研究，油液选择 YH-15 号航空液压油，等待减振涂层实干后，将试验样片放入盛有航空液压油的烧杯中，油液保证浸没过样片的三分之二，在室温为 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 的环境下，保持 24 小时之后将试验样片从烧杯中取出，使用滤纸吸干试验样片表面的油液，随后检查试验样片的表面是否出现剥落、起泡、生锈和变色等现象。具体试验过程及结果如下图 4.8-4.10 所示，图 4.8 为试验前样片表面，图 4.9 为样片耐油试验过程中，图 4.10 为试验后样片表面。



图 4.8 试验前样片表面



图 4.9 样片耐液压油试验过程中



图 4.10 试验后样片表面

对比图中试验前后样片的表面可看出，经过 24 小时的浸泡后，减振涂层没有出现剥落的情况，也没有出现任何生锈的部位，此外，同样可以发现试样经浸泡后的位置没有出现变色现象，也没有出现任何的起泡现象。产生该现象的原因可能是因为涂层可以防止油液从涂层表面渗透到涂层内部，油液无法在涂层内部产生聚集现象，因此便不会在涂层中起泡。

试验结果证明，本研究中制备的减振降噪涂层在耐油性能（YH-15号航空液压油）方面具备不剥落、不生锈、不变色以及不起泡的优良性能。

综上，减振降噪涂层耐盐水性能及耐油性能如表 4.3 所示。

表 5.3 减振涂层耐盐水性能及耐油性能

项目	指标性能
耐盐水性能，24h	不剥落，不生锈，轻微变色，轻微起泡
耐油性能，24h	不剥落，不生锈，不变色，不起泡

4.4 本章小结

本章针对阻尼减振涂层理化性能，分别就阻尼减振涂层外观、涂层干燥时间、涂层耐盐水性能、涂层耐油性能、涂层附着力性能以及涂层喷涂性能等重点理化性能指标进行了分析研究。上述研究得到的主要结论有：

- （1）涂料外观状态良好，整体呈乳白色，表面未出现结皮、分层现象，无水或者树脂状物质析出，且未见杂质以及可察觉的沉淀物；减振涂层实测表干时间为 120min，实测实干时间为 48h；
- （2）采用单刃切割工具，在样片上选取不同的地方划透至基体表面形成网格图形测试涂层的附着力级别，即涂层从基底脱离的抗性评定，比对试验样片划格测试后的结果以及标准图谱，判断涂层的附着力性能等级按照 GB/T 9286《色漆和清漆划格试验》中的分级标准为 1 级；
- （3）将喷涂有减振涂层的试样浸于 3%NaCl 水溶液中 24 小时，试验样片表面不剥落、不生锈，但是会出现变色以及少量起泡的现象，可考虑后续搭配耐盐水的底漆共同使用以保证优良的耐盐水性能；
- （4）将喷涂有减振涂层的试样浸于 YH-15 号航空液压油中 24 小时，试验样片表面不剥落、不生锈、不变色以及不起泡，证明涂层具有优良的耐油性能（YH-15 号航空液压油）。

第五章 减振降噪涂层材料仿真研究

本章在前两章的基础上，对建成的有限元模型进行仿真，通过 ANSYS 软件建立试验件的三维振动仿真模型，对填料尺寸、填料含量以及涂层厚度等因素进行深入探究，最后将仿真结果与试验结果进行了比较验证，表明了仿真模型和方法的正确有效性。

5.1 带涂层材料的试验件有限元建模

(1) 复合材料层合板壳理论

复合材料层合板壳依据板的厚度与长宽的比例可以分为薄板、中厚板以及厚板三种，其代表性的理论原理有 a) 薄层合板壳理论；b) 中厚层合板壳理论；c) 厚度层合板壳理论。通过 *Reissner – Mindlin* 理论对复合材料进行分析，其位移场如下：

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

(2) 有限元建模

使用 *Hypermesh* 软件针对本研究的绿色减振降噪涂层进行有限元仿真建模，通过对金属基底、涂层面、约束部位以及加速度传感器的分析，建立试验样片的有限元仿真模型，如图 5.1 所示。

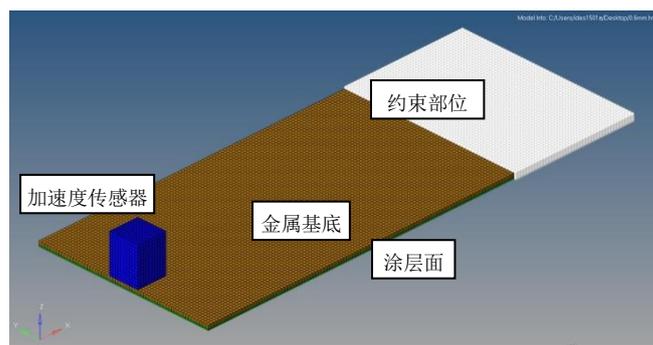


图 5.1 试验样片的有限元仿真模型

在该模型中，金属基底的材料选择 2A12，涂层面为制备的绿色减振降噪涂层，加速度传感器的材料选择 1Cr18Ni9Ti，约束部位为夹具夹持的位置。在建模过程中，采用整体刚性的方式，忽略金属基底与减振降噪涂层之间的连接面以及金属基底与加速度传感器之间的连接面，以上建模的单元选择 *Soild185*。

(3) 建模参数设置

在仿真过程中，需要对各种材料的参数进行设置，经查询资料，本研究中所使用的材料如表 5.1 所示参数。

表 5.1 材料参数表

	弹性模量 (Pa)	密度 (kg·m ⁻³)	泊松比 (μ)
金属基底	6.6×10 ¹⁰	2800	0.33
减振涂层	1.8×10 ⁶ -1.8×10 ⁷	431-1151	0.15-0.25
加速度传感器	2.1×10 ¹¹	7800	0.3

5.2 阻尼减振降噪涂层材料仿真研究

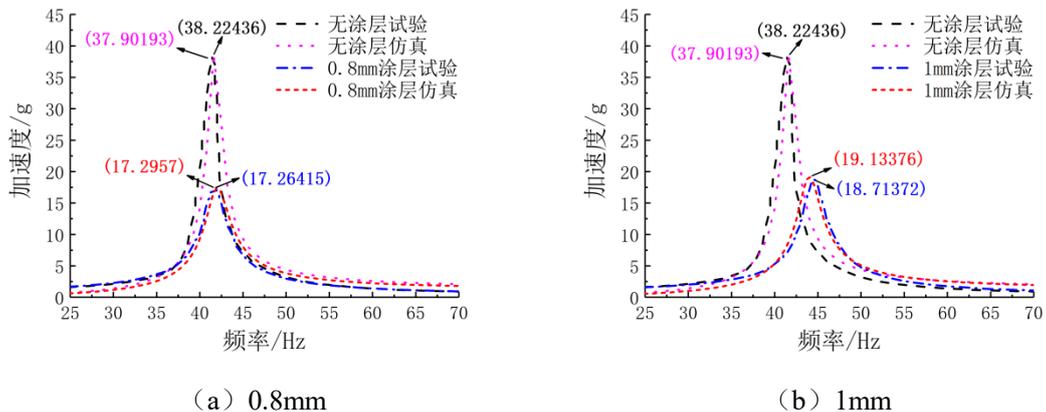
5.2.1 同含量同尺寸填料在不同涂层厚度条件下的振动仿真模型

当填料为低含量（20%）时，由大尺寸（10 目）、中尺寸（40 目）以及小尺寸（400 目）云母制备出的涂层均表现出其减振性能随着涂层厚度的上升而减弱的趋势。同含量同尺寸填料在不同涂层厚度条件下的振动仿真中，选择小尺寸（400 目）低填料含量（20%）作为仿真研究的对象，根据上文的建模参数，设置本试验参数如表 5.2 所示。

表 5.1 小尺寸低填料含量（20%）涂层仿真参数

涂层厚度 (mm)	涂层质量 (g)	涂层密度 (g·mm ⁻³)	阻尼比 (ζ)	材料阻尼系数 (N·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

根据上述有限元建模以及参数设置，建立同含量同尺寸填料在不同涂层厚度条件下的振动仿真模型，再通过谱响应，将小尺寸（400 目）低填料含量（20%）仿真模型结果，与试验结果对比，如图 5.2 所示。其中，图 5.2（a-d）分别为涂层厚度为 0.8mm、1.0mm、1.2mm 以及 1.4mm 时有涂层试验样片与无涂层试样样片的仿真与试验减振效果对比图。



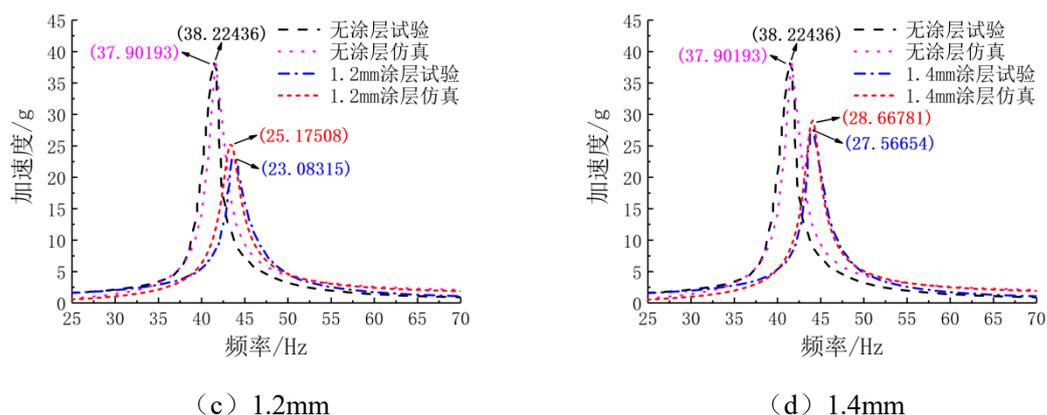


图 5.2 小尺寸（400 目）低填料含量（20%）减振降噪涂层仿真模型结果与试验结果对比

由图 5.2 可知道，通过半功率带宽法得到的阻尼系数 ζ 代入建立的仿真模型后，仿真数据与试验数据的误差经计算分别为 0.18%、2.24%、9.06%和 3.99%。误差较小，一方面是因为影响较大的因素均已测得并考虑进模型中，如涂层与试验件的各种参数（密度、体积、阻尼系数、弹性模量等），而结果又太涉及其他因素的影响（湿度、温度、流固耦合等）。此外，通过仿真模型，可以看出，涂层表现出其减振性能随着涂层厚度的增加而减弱的趋势，该结论与真实试验的结论一致。以上结果有效证明了仿真模型和方法的正确有效性。

5.2.2 同含量不同尺寸填料在同涂层厚度条件下的振动仿真模型

当填料为中含量（40%）时，由大尺寸（10 目）云母制备出的涂层普遍随着涂层厚度的增加其减振性能逐步上升，而由中尺寸（40 目）以及小尺寸（400 目）云母制备出的涂层减振性能随着涂层厚度的增加呈现先升高后降低的趋势。在同含量不同尺寸填料在同涂层厚度条件下的振动仿真中，分别选择大尺寸（10 目）、中尺寸（40 目）以及小尺寸（400 目），在填料含量（40%）时制得的涂层作为仿真研究的对象，涂层厚度选择 0.6mm，根据上文的建模参数，设置本试验参数如表 5.3 所示。

表 5.2 不同尺寸中填料含量（40%）0.6mm 厚度涂层仿真参数

填料尺寸 (目)	涂层质量 (g)	涂层密度 ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	阻尼比 (ζ)	材料阻尼系数 ($\text{N} \cdot \text{s/m}$)
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

根据上述有限元建模方式以及参数设置，建立同含量不同尺寸填料在同涂层厚度条件下的仿真模型，再通过谐响应，对比了涂层厚度为 0.6mm 时各尺寸填料在含量为 40%条件

下的仿真模型结果与试验结果，如图 5.3 所示。其中，图 5.3(a-c)分别为大尺寸（10 目）、中尺寸（40 目）以及小尺寸（400 目）时有涂层试验样片与无涂层试样样片的仿真与试验减振效果对比图。

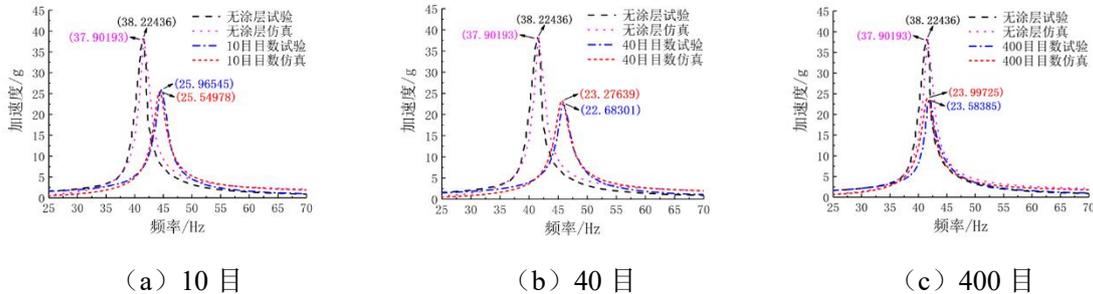


图 5.3 各尺寸中填料含量（40%）减振降噪涂层仿真模型结果与试验结果对比

由图 5.3 可知道，通过半功率带宽法得到的阻尼系数 ζ 代入建立的仿真模型后，仿真数据与试验数据的误差经计算分别为 1.6%、2.62%和 1.75%，误差较小。通过仿真模型与试验结果，可以看出，中尺寸（40 目）云母制备出涂层的减振性能优于大尺寸（10 目）云母制备出涂层的减振性能，小尺寸（400 目）云母制备出的涂层在厚度较低时表现出良好的减振性能。以上结论仿真结果与试验结果一致，有效证明了仿真模型和方法的正确有效性。

5.2.3 不同含量同尺寸填料在同涂层厚度条件下的振动仿真模型

当填料为不同含量时，大尺寸（10 目）、中尺寸（40 目）以及小尺寸（400 目）填料制备出的涂层均使得试样的减振性能有所提升。在不同含量同尺寸填料在同涂层厚度条件下的仿真研究中，选择涂层厚度为 0.6mm、填料尺寸为 40 目，含量分别为 20%、40%、60%的试样作为仿真研究的对象，根据上文的建模参数，设置本试验参数如下表 5.4 所示。

表 5.3 中尺寸（40 目）不同填料含量下 0.6mm 厚度涂层仿真参数

填料含量 (%)	涂层质量 (g)	涂层密度 ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	阻尼比 (ζ)	材料阻尼系数 ($\text{N} \cdot \text{s/m}$)
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

根据上述有限元建模方式以及参数设置，建立不同含量同尺寸填料在同涂层厚度条件下的仿真模型，再通过谐响应分析，对比了涂层厚度为 0.6mm 时中尺寸（40 目）填料在不同含量条件下的仿真模型结果与试验结果，如图 5.4 所示。其中，图 6.4 (a-c) 分别为低含量（20%）、中含量（40%）以及高含量（60%）时有涂层试验样片与无涂层试样样片的仿真与试验减振效果对比图。

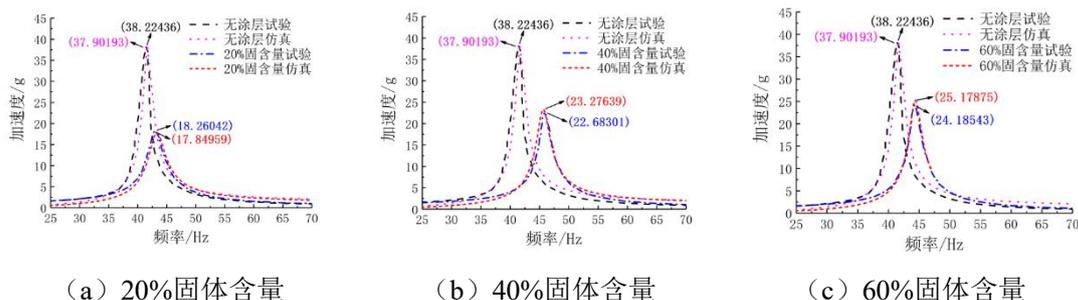


图 5.4 同厚度中尺寸（40 目）填料在不同含量条件下的仿真模型结果与试验结果对比

由图 5.4 可知道，通过半功率带宽法得到的阻尼系数 ζ 代入建立的仿真模型后，仿真数据与试验数据的误差经计算分别为 2.25%、2.62%和 4.11%，误差较小。通过仿真模型与试验结果，可以看出，在填料含量较低（20%）时，涂层的减振性能优越，填料间具有一定的间隙，导致片层之间容易产生滑移，从而表现出良好的减振性能。当填料含量上升时，填料的聚集与搭接现象出现，导致减振效果下降。以上结论仿真结果与试验结果一致，有效证明了仿真模型和方法的正确有效性。

5.3 本章小结

本章基于 ANSYS 软件，利用有限元仿真方法与复合材料层合板壳理论，建立了喷涂有减振涂层试验件的有限元仿真模型，对比了同含量同尺寸填料在不同涂层厚度条件下、同含量不同尺寸填料在同涂层厚度条件下、不同含量同尺寸填料在同涂层厚度条件下仿真数据和试验数据的结果，利用有限元仿真方法与复合材料层合板壳理论建立的仿真模型，计算得出的仿真结果与试验结果的误差小于 9.06%，证明了仿真模型的有效性和准确性。

第六章 总结与展望

6.1 研究总结

本文对减振降噪涂层材料进行了制备，并对涂层材料减振降噪性能、涂层材料理化性能及涂层材料仿真进行了研究。本文具体完成工作如下：

（1）对航空液压管道用绿色减振降噪涂层制备技术进行了讨论与分析，对试验材料、试验仪器、减振降噪涂层及测试样品的制备进行了论述。

（2）以聚氨酯丙烯酸乳液作为环境采用大尺寸（10目）、中尺寸（40目）以及小尺寸（400目）云母粉作为填料，分别得到不同尺寸减振降噪涂层材料在其低含量（20%）、中含量（40%）以及高含量（60%）时试样样片的减振降噪效果结果。

（3）对阻尼减振降噪涂层理化性能，分别就阻尼减振降噪涂层外观、涂层干燥时间、涂层耐盐水性能、涂层耐油性能、涂层附着力性能以及涂层喷涂性能等重点理化性能指标进行了分析研究。得出的结果可以为该种涂料的技术指标及质量提供有效参考。

（4）基于 ANSYS 软件，利用有限元仿真方法，建立了喷涂有减振降噪涂层试验件的有限元仿真模型，对比了同含量同尺寸填料在不同涂层厚度条件下、同含量不同尺寸填料在同涂层厚度条件下、不同含量同尺寸填料在同涂层厚度条件下仿真数据和试验数据的结果，并将仿真结果与试验结果进行了比较验证，表明了仿真模型和方法的正确有效性。

6.2 研究展望

本文的研究工作还存在未完善的部分，包括但不限于以下内容：

（1）如何在现有的阻尼涂层配方下继续优化，以提升其阻尼、防水等性能；如何测试优化后的涂层性能，并且能与仿真分析结果吻合。

（2）针对制备的减振降噪涂层材料分子结构，利用分子动力学软件，研究材料的减振、降噪机理，并进行相应的试验验证。在此基础上，再进行涂层材料的应用研究。

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(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] 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.
- [6] Lin Junzhe, Zhao Yulai, Zhu Qingyu, et al. Nonlinear Characteristic of Clamp Loosing in Aero-Engine Pipeline System[J]. *IEEE Access*, 2021, 9:64076-64084.
- [7] Yeap H. Energy-damping behaviors of poly(methyl acrylate-co-divinylbenzene) microspheres coated with a porous nickel-phosphorus layer[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2004, 42(14): 2710-2722.
- [8] Tai-Hong Cheng, Zhen-Zhe Li, Yun-De Shen, et al. Vibration Analysis of Cylindrical Sandwich Aluminum Shell with Viscoelastic Damping Treatment[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013, 2013: 7.
- [9] Radebaugh G W, Simonelli A P. Relationship between powder surface characteristics and viscoelastic properties of powder-filled semisolids[J].*Journal of Pharmaceutical Sciences*. 1985, 74(1):3-10.
- [10] Jose Javier BAYOD. Application of Elastic Wedge for Vibration Damping of Turbine Blade[J]. *Journal of System Design and Dynamics*. 2011, 5(5): 1167-1175.
- [11] 张友南, 杨军, 贺才春等. 阻尼材料的研究与应用[J]. *噪声与振动控制*. 2006, 2: 38-41.
- [12] 刘维镐, 朱劲松. 高阻尼铝基复合材料的研究[J]. *功能材料*. 2001, 32(4): 440-442.
- [13] Hoa S V. Ouellette P. Damping of composite materials[J]. *Polymer Composite*. 1984, 5(4):334-338.
- [14] 李思远, 杨伟, 杨鸣波. 降噪高分子材料及其应用[J]. *工程塑料应用*. 2004, 32(15): 70-73.
- [15] Hagen R, Salmen L, Ruvo A D. Dynamic mechanical studies of a highly filled composite structure A light weight coated paper[J]. *Journal of Applied Polymer Science*. 1993, 48(4): 603-610.
- [16] Cong Zhou, Hao Min, Le Yang, et al. Dimethylaminoborane-modified copolysilazane as a novel precursor for high-temperature resistant Si BCN ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*. 2014, 34(15): 3579-3589.
- [17] E. N. Zhurba, I. A. Lavrinovich, A. N. Trofimov, et al. High Temperature Resistant Environment-Friendly Silica Fibers and Materials[J]. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2005, 46(2): 113-115.
- [18] A. Wolfenden, C. B. Proffitt, M. Singh. Dynamic elastic modulus and vibration damping behavior of porous silicon carbide ceramics at elevated temperatures[J]. *Journal of Materials Engineering*

- and Performance. 1999, 8(5): 598-600.
- [19] S. R. Kumbhar, Subhasis Maji, Bimlesh Kumar. Automotive vibration and noise control using smart materials: a state of art and challenges[J].World Journal of Engineering.2014, 11(4):413-420.
- [20] 高云卿,龙孝立.阻尼浆试制试验总结[J].铁道车辆, 1973(12):29-34.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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(06):36-39.
- [24] 芦娜, 有限元仿真及在电连接技术中的应用, 北京:机械工业出版社, 2020.
- [25] 胡海昌.广义变分原理在近似解中的合理应用[J].力学学报,1982,(01):1-17.
- [26] 徐芝纶.弹性力学问题的有限单元法简介[J].力学学报,1974(03):148-153.
- [27] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].中国水利水电出版社:201806.748.
- [28] 王勖成. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 清华大学出版社, 1997.
- [29] 李黎明. ANSYS 有限元分析实用教程 [M] . 北京: 清华大学出版社 2005

致 谢

行文至此，落笔为终。这一年，我 23 岁，即将和我最后的学生时代进行告别。

桃李不言，下自成蹊。感谢我的导师陈果老师，从论文的选题、收集资料、开题、初稿、中稿、到最后的定稿，每个环节都给予了我最悉心的指导和宝贵的意见。愚钝有时，老师从不曾责备总是回以关心。严谨治学的态度，令我动容。人生之幸，得遇良师。

恰同学少年，风华正茂。首先感谢赵紫豪师兄对本论文内容数据的大力支持，师兄在设备教学和思路建议上深入浅出、有求必应，屡次为我排忧解难。最后感谢求学路上遇见的所有朋友和同窗，每个人的出现都有意义。幸遇良友三生有幸。

感谢我的家人，养育之恩无以为报。年少时你们为我遮风挡雨，如今换我为你们乘风破浪。感谢陪我走完学生时代的女友张雯熙，是你的陪伴将我平淡的生活点缀成了有颜色的希望，你的鼓励与劝导也总是我迷茫途中的一剂良药，纸短情长，衷心地祝福这段缘分一切都好。

最后感谢求学路上每个阶段的自己，我时常后悔自己做的很多个决定，脑子里总是会盘旋一句话:如果当初不这样就好了，但回头看会发现，我也没办法用现在的高度去批判当时的自己，如果再来一次，以当时的眼界和阅历，我还是会做出同样的选择。永远都有更好眼下便是最好。以后的路即使坎坷不平，我也万分期待！感谢一路走来的自己。

所念诸多，言有不尽，然生而有憾，何能无缺。