



博士研究生学位论文答辩

航空液压管道绿色减振涂层制备技术及减振降噪机理研究



 答 辩 人：金根
 指导教师：陈果教授
专 业：电子与信息



目录

01 绪论

02 航空液压管道绿色减振涂层制备技术及性能表征

03 阻尼减振涂层减振性能研究

04 阻尼减振涂层降噪性能研究

05 阻尼减振涂层理化性能研究

06 阻尼减振涂层减振机理研究

07 阻尼减振涂层应用研究

08 总结与展望

目录

01 绪论

02 航空液压管道绿色减振涂层制备技术及性能表征

03 阻尼减振涂层减振性能研究

04 阻尼减振涂层降噪性能研究

05 阻尼减振涂层理化性能研究

06 阻尼减振涂层减振机理研究

07 阻尼减振涂层应用研究

08 总结与展望

第一章 研究目的及意义



● 飞机管道系统：

飞机**血液脉络**，为飞机完成各种动作提供**原动力**；

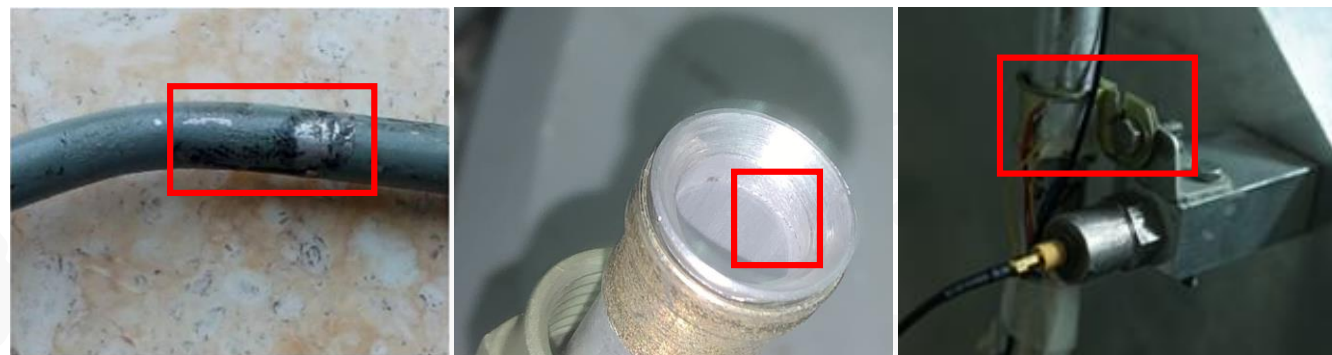
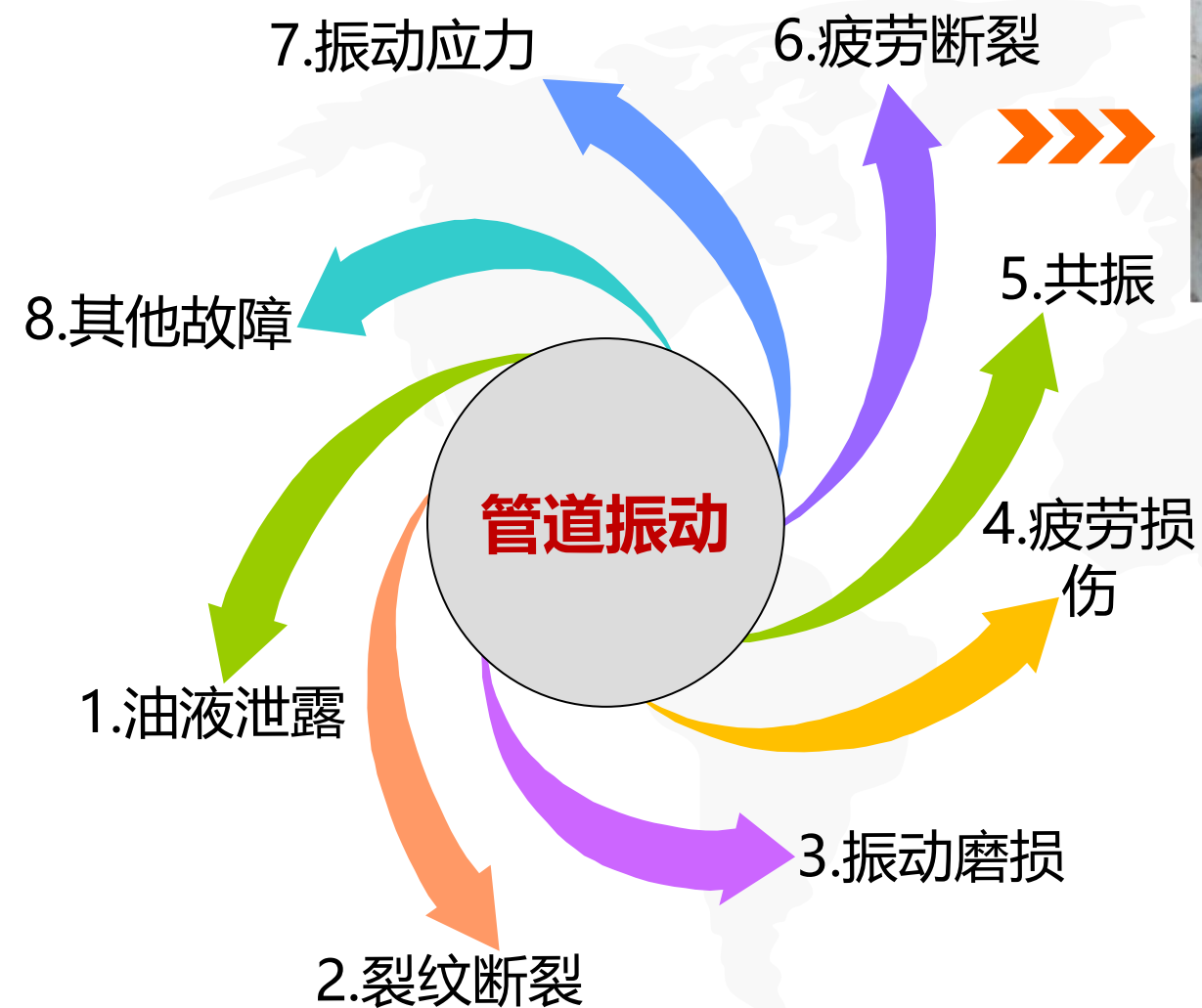
由于**外部激励**而导致**管道破裂**和**疲劳失效**，极易造成**飞行事故**。



● 特点：

- ✓ **空间限制**较大，管道存在大量**相互交叉**的情况，且管道与相邻附件的**间隙很小**；
- ✓ **分布范围**广，其长度可达到**数百米**以上；
- ✓ **发动机**和**机体**本身的振动剧烈，飞机管路受**工作环境**影响**严重**；
- ✓ **高压**、**大流量**是当前的设计趋势；
- ✓ **振动**属于**附属噪声源**，会直接引起飞行员以及机务人员的听觉损伤

第一章 研究目的及意义



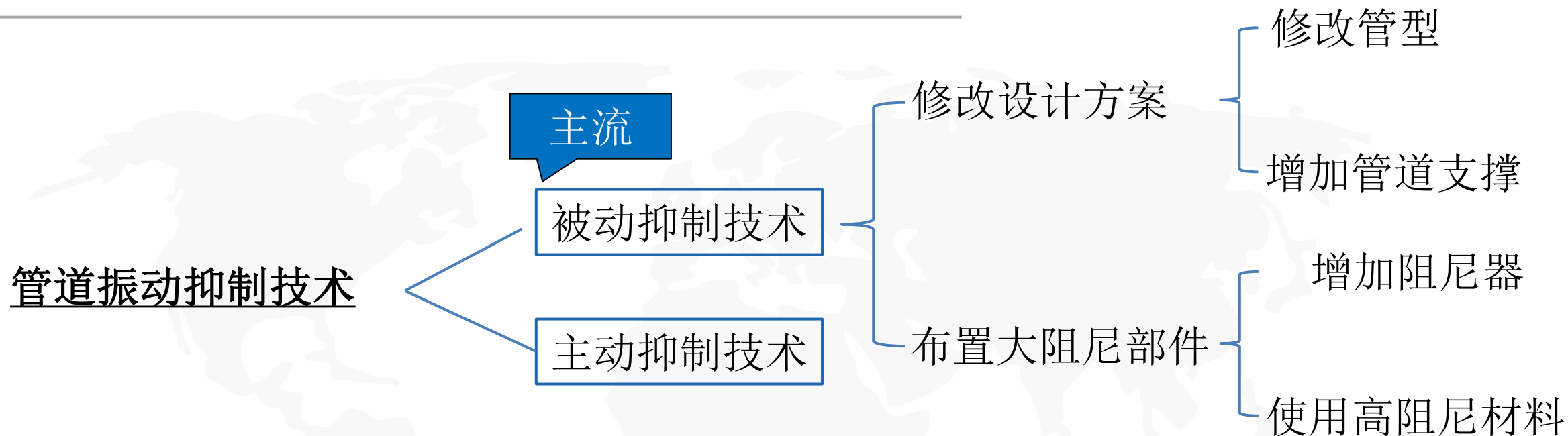
管体本身

管道与管接头接合面

卡箍

飞机管道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仍存在很多问题。

第一章 管道振动抑制技术研究现状



[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] 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, 1565:012088 (6pp).

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

第一章 管道振动抑制技术研究现状

1

机理：

改变固有频率避免共振

局限： 应用在设计阶段，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

修改管型

2

机理：

改变固有频率避免共振

降低共振峰大小

局限： 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

增加支撑

3

机理：

降低共振峰大小

局限： 无可避免的造成管道系统重量的增加，从而导致经济性的降低

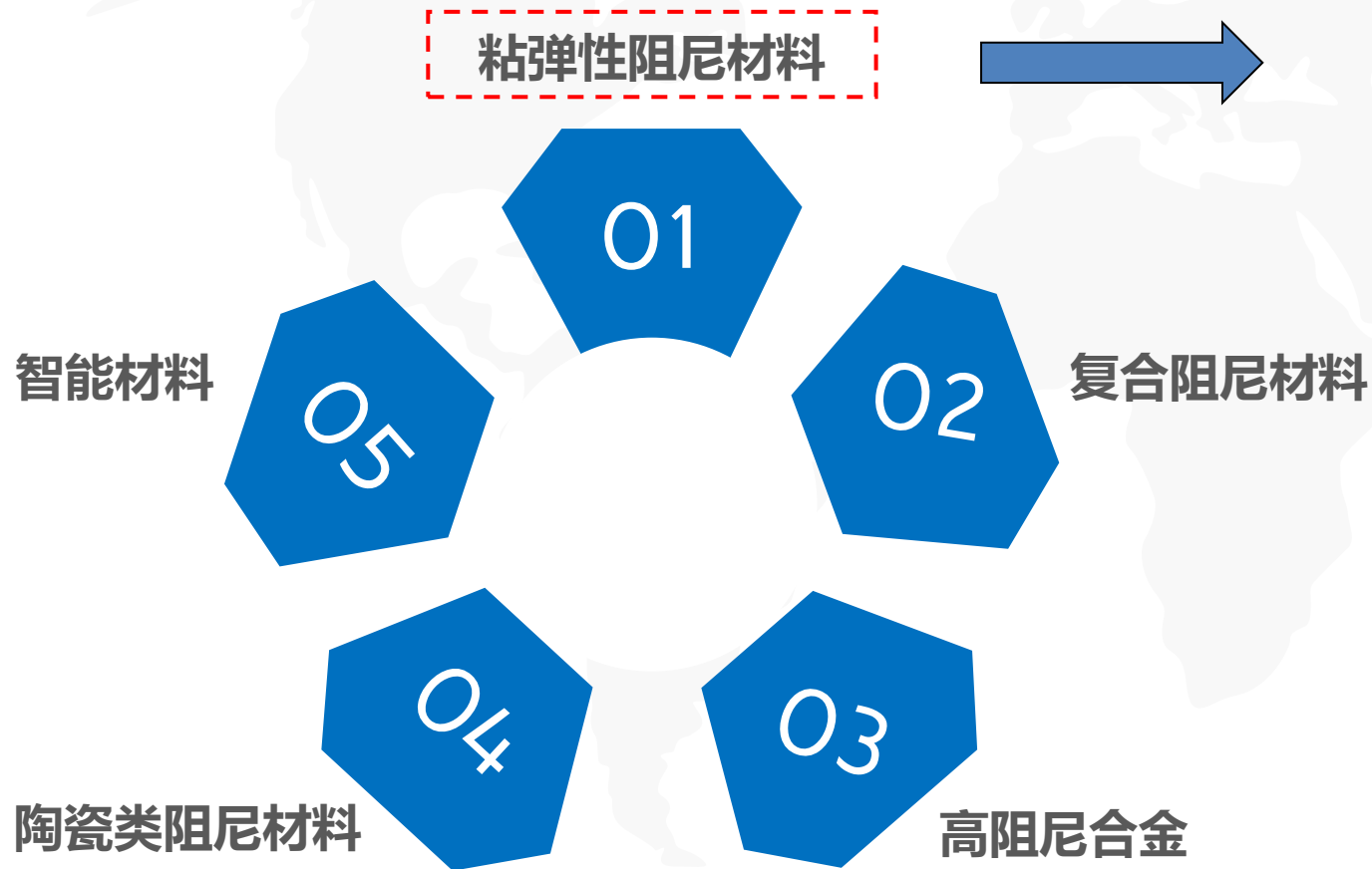
施加阻尼器



因此亟需寻求另外的减振方法。

第一章 阻尼减振涂层研究现状

阻尼材料，即振动衰减材料，被定义为一种能够吸收机械能，并将其转化为热能而耗散掉的功能性材料。因其优越的减振降噪以及抗冲击等性能而受到广泛的关注。



材料	损耗因子
钢、铁	$1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$
铝	$2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3}$
有色金属	$1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$
铅	10^{-4}
铜	2×10^{-3}
有机玻璃	$2 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-2}$
木	$0.8 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-2}$
胶合板	$1 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-2}$
混凝土	$1.5 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-2}$
粘弹性材料	0.2~1

第一章 阻尼减振涂层研究现状

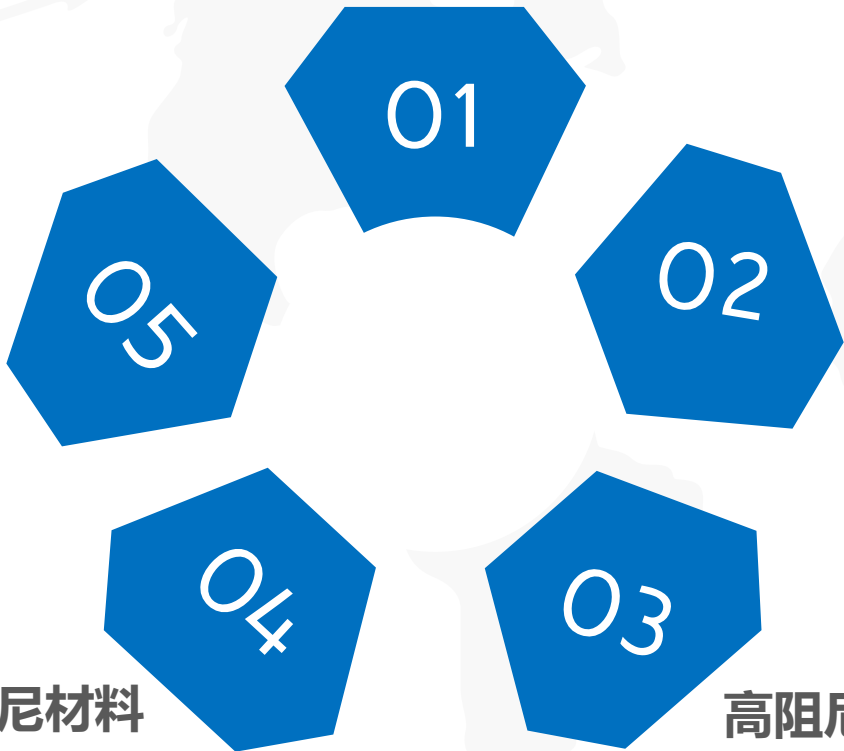
粘弹性阻尼材料
(水性阻尼减振降噪材料)



●优点:

- ✓重量低, 生产成本低廉
- ✓为薄阻尼层, 适用于飞机管道系统
- ✓对其他成品安装影响较小
- ✓对施工面条件要求不高, 材料自身不含VOC
- ✓损耗因子高、阻尼效果好、有效减振

智能材料



复合阻尼材料

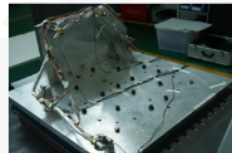
陶瓷类阻尼材料

高阻尼合金

第一章 本文的主要研究工作

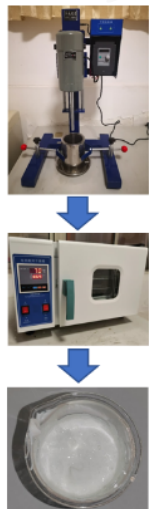
航空液压管道绿色减振涂层制备技术及机理研究

BK
加速度
传感器



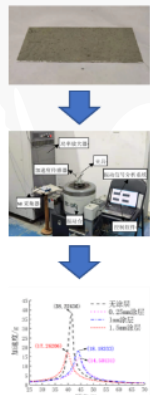
AI002
加速度
传感器

航空液压管道绿色减振涂层制备技术



第二章

减振涂层减振性能研究



第三章

减振涂层降噪性能研究



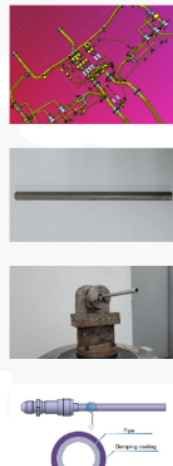
第四章

减振涂层理化性能研究



第五章

航空液压真实管道涂层应用



第七章

第六章
机理研究



涂层面积
涂层位置
涂层形状

减振性能

涂层厚度
填料目数
填料含量

迟滞特性

● 具体工作及创新点:

- (1) 创新地研制一种适用于飞机液压管道的绿色减振涂料，并开发相应的制备工艺。
- (2) 优化填料配比，研究不同尺寸、含量以及厚度对涂层减振降噪性能的影响，得到具有最佳减振降噪性能材料配方。完成涂层附着力、耐盐水以及耐油等理化性能试验研究。
- (3) 基于有限元仿真分析方法，建立迟滞回线模型，分析减振机理，验证仿真模型和仿真方法的正确有效性。
- (4) 将制备的涂层应用于真实航空液压管道，进行性能研究，进一步证明所研制的减振涂层材料具有较大的工程实用价值和应用潜力。

目录

01 绪论

02 航空液压管道绿色减振涂层制备技术及性能表征

03 阻尼减振涂层减振性能研究

04 阻尼减振涂层降噪性能研究

05 阻尼减振涂层理化性能研究

06 阻尼减振涂层减振机理研究

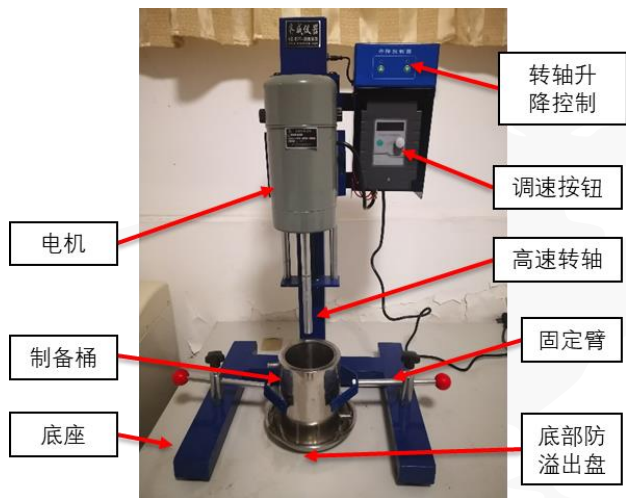
07 阻尼减振涂层应用研究

08 总结与展望

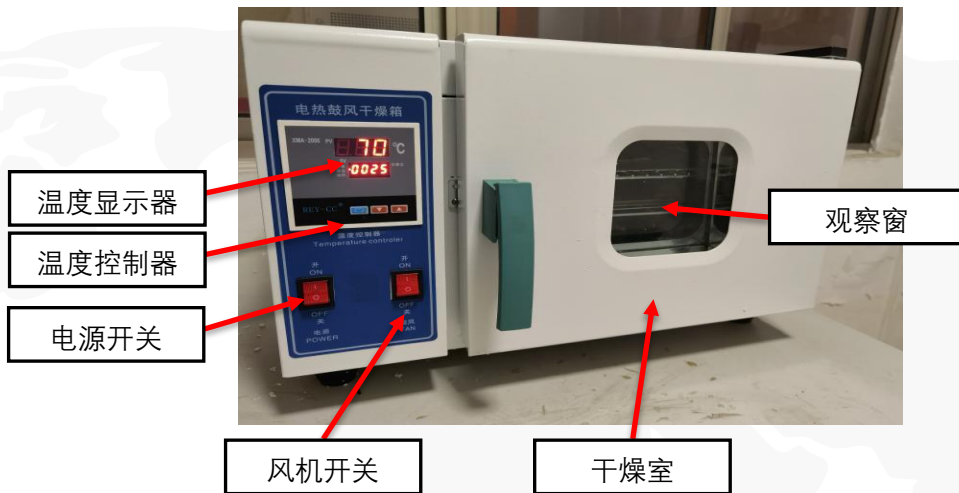
第二章 试验材料

类别	材料	生产厂家	外观	性质
乳液	聚氨脂丙烯酸	山东淄博君武化工有限公司	乳白色液体	水性; pH 7.0-8.5; 成膜温度为10°C
溶液	去离子水	/	无色透明液体	纯水
填料	云母粉	南京江宁石粉厂	白色片状固体	尺寸分别为10目、40目、400目
水性消泡剂	硅聚醚	广州润宏化工有限公司	乳白色粘稠液体	固体含量为(24.0±1.0)%; pH6.5-8.5
多功能助剂	聚氨脂流变改性剂	罗门哈斯	浑浊液体	固体含量为 (19.0-21.0)%; 良好的流平性
分散剂	聚羧酸钠盐	罗门哈斯	淡黄色透明液体	固体含量:(24.0~26.0)%; pH:10.0-10.5
成膜助剂	醇酯十二	伊士曼	无色透明液体	沸点:255°C; 冰点:-50°C

第二章 试验仪器



电动升降立式分散机



电热鼓风干燥箱



电子天平



玻璃棒

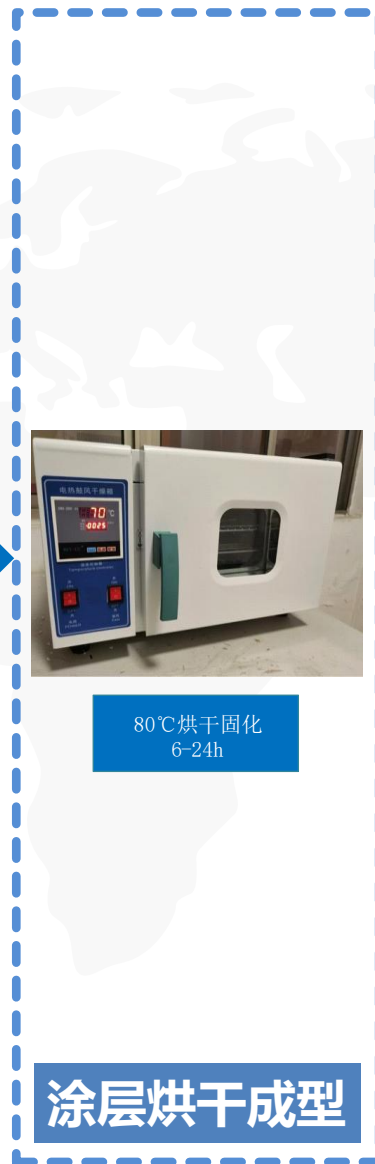


胶头滴管



烧杯

第二章 涂层制备工艺



- (1) 片状样片, 铝片, 尺寸为 150×60×1mm, 质量为25.2克;
- (2) 圆形样片, 铝片, 尺寸三种规格, 直径为 32mm、厚度为 1mm用于高频隔声性能研究; 直径为 105mm、厚度为 1mm用于低频隔声性能研究;
- (3) 航空液压导管, 长度为200mm, 外径为 10mm, 壁厚为 0.75mm, 分别选用铝合金及不锈钢。

第二章 涂层减振性能表征

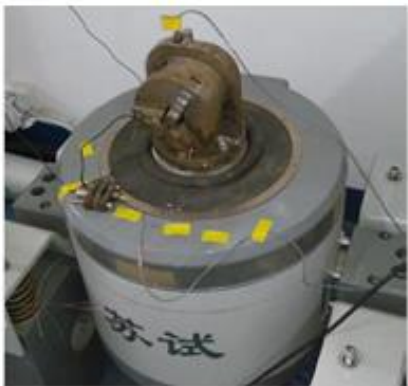
试验目的

针对制造的涂层材料，利用简谐激励下的稳态响应特性来进行减振性能的表征，通过试验测得试验件共振区加速度的变化，验证飞机管道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、固体含量和减振涂层的厚度，探究减振涂层的优化设计方法。

试验方案

- 采用夹具夹持试验件
- 固定试验件夹持长度44mm
- 激励力加速度统一设定为1g
- 采用正弦激励法进行扫频
- 扫频范围为0-80Hz，频率间隔为1Hz
- 控制变量，测量试验件的最大加速度

测试设备



DC-300型振动台



振动台功率放大器

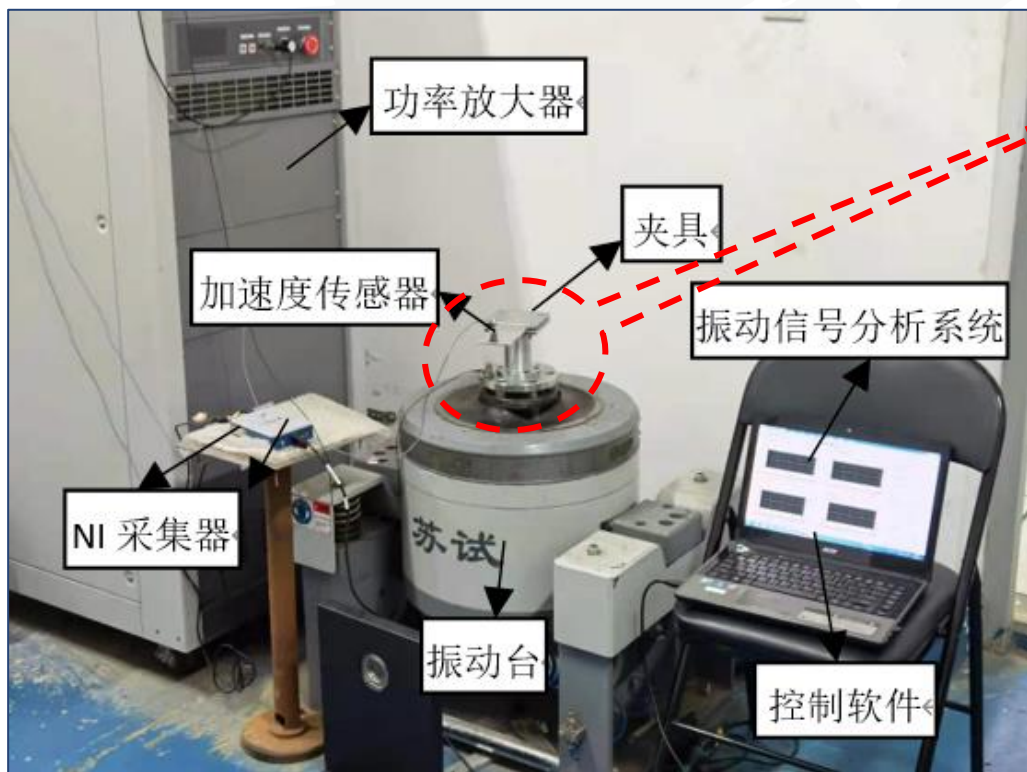


NI USB-9234采集卡



B&K加速度传感器

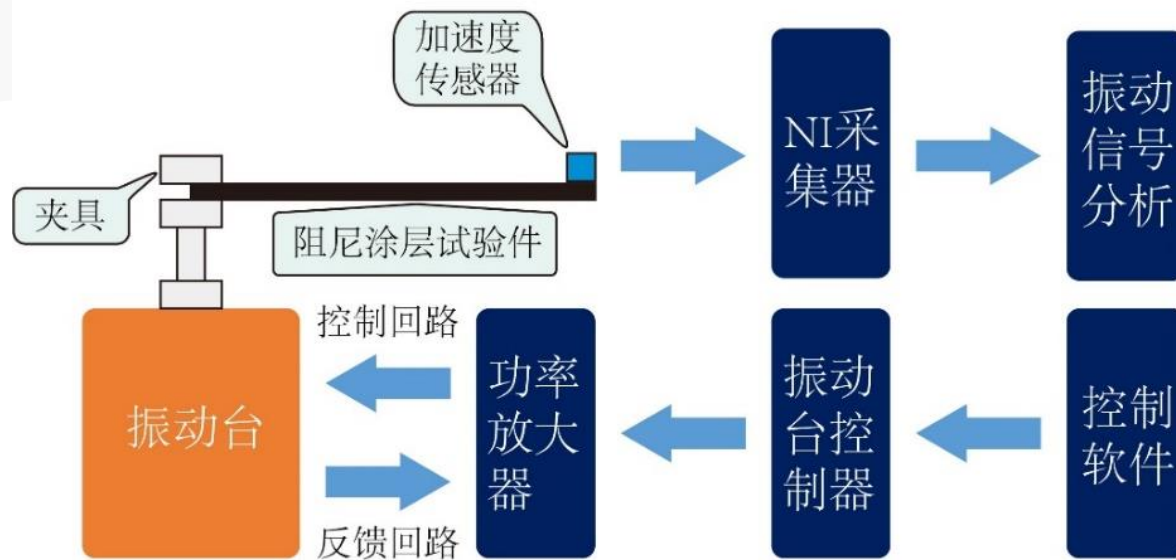
第二章 涂层减振性能表征



试验现场图



- 长 150mm
- 宽 60mm
- 厚 1mm
- 质量 25.2g



第二章 涂层降噪性能表征

试验目的

针对制造的涂层材料，利用反射系数和透射系数来进行降噪性能的表征，在良好减振性能的基础上，通过试验测得其传递损失，即入射声能比出射声能取对数乘以10，对比分析变量即填料云母粉的目数、固体含量，研究涂层材料降噪性能。

测试设备



试验方案

- 分别进行填料为10目、40目、400目云母粉 固体含量分别为20%、40%、60%的涂层材料 隔声性能测试共9组试验和一组吸声性能测试试验
- 隔声性能测试分为50Hz—1600Hz的低频测试及1600Hz—6400Hz的高频测试
- 每次试验重复做3次，结果取平均值



北京声望公司SW4000系列阻抗管

第二章 涂层理化性能研究

研究项目	相关标准	具体指标
涂层外观	GB/T 20777 《色漆和清漆 试样的检查和制备》	分析乳液的表面结皮现象、分层现象、可见杂质与沉淀物
涂层干燥时间	GB/T 1728 《漆膜、腻子膜干燥时间测定法》	采用指触法分析涂层表面干燥时间，采用刀片法分析涂层实际干燥时间
涂层附着力性能	GB/T 9286 《色漆和清漆划格试验》	采用多刃切割，分析减振涂层在基体上的附着力
涂层耐盐水性能	GB/T 1763 《漆膜耐化学试剂性测定法》	采用常温 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 耐盐水法对减振涂层进行研究
涂层耐油性能	HG/T 3343 《漆膜耐油性测定法》	采用常温 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 浸油液法对减振涂层进行研究

目录

01 绪论

02 航空液压管道绿色减振涂层制备技术及性能表征

03 阻尼减振涂层减振性能研究

04 阻尼减振涂层降噪性能研究

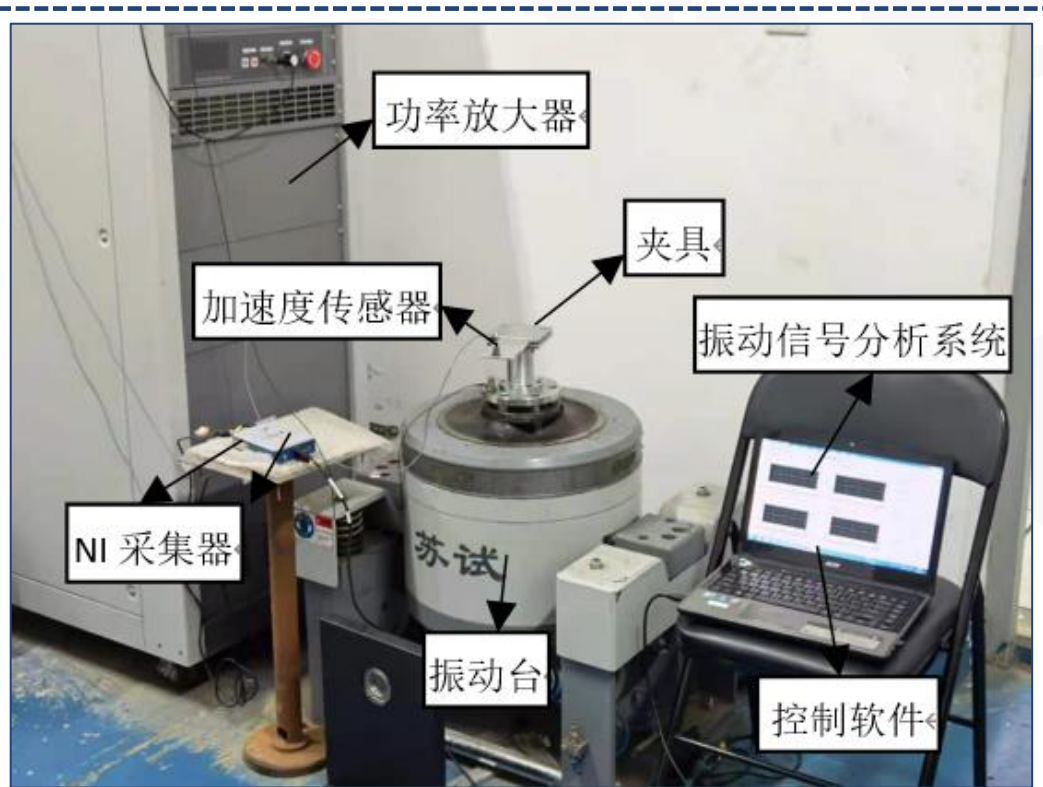
05 阻尼减振涂层理化性能研究

06 阻尼减振涂层减振机理研究

07 阻尼减振涂层应用研究

08 总结与展望

第三章 无涂层试验件振动性能

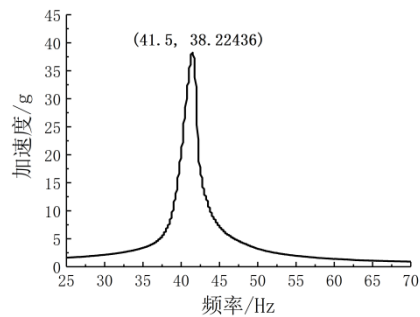


试验现场图



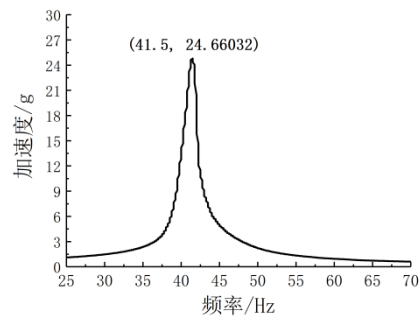
- 长 150mm
- 宽 60mm
- 厚 1mm
- 质量 25.2g

试验件



幅值

38.22436g



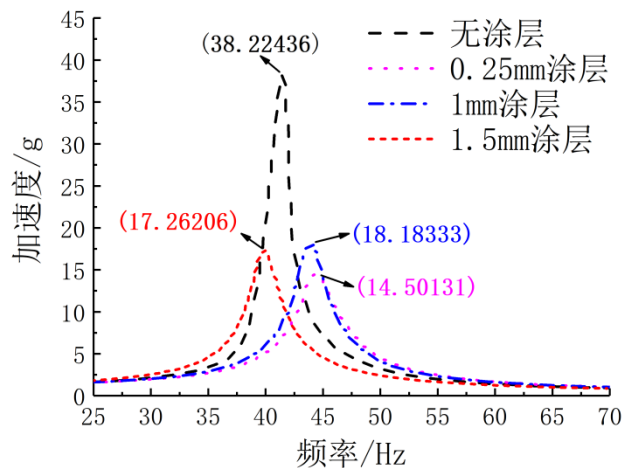
有效值

24.66032g

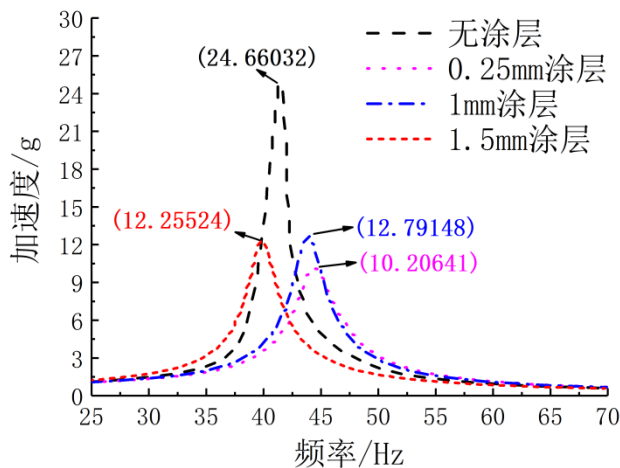
试验结果

第三章 大尺寸低含量 (20%) 填料对涂层减振性能的影响

- ◆ **原料**: 60克10目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方
- ◆ **试验件涂层厚度**: 0.25mm、1mm、1.5mm



幅值



有效值

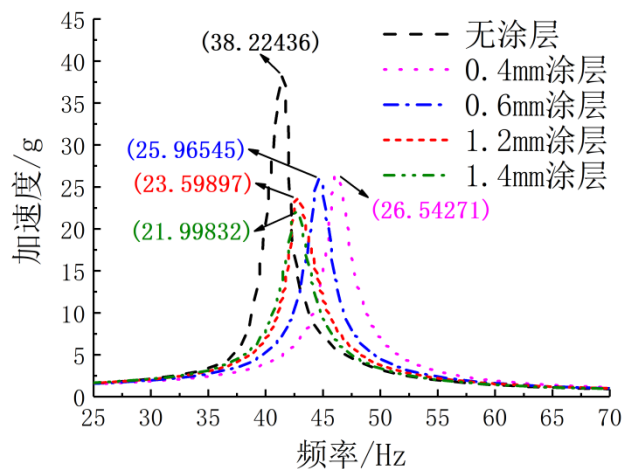
□当填料为大尺寸低含量 (20%) 时, 涂层的减振性能随涂层厚度的增加呈先降低后升高。当厚度为0.25mm 时, 减振性能最佳。

□涂层厚度较小时, 减振性能受填料影响, 随着厚度增加, 填料聚集在底部使滑移变困难, 导致性能下降, 而在涂层厚度较高时, 填料和树脂间的有效作用面积增加, 表现出减振性能的上升。

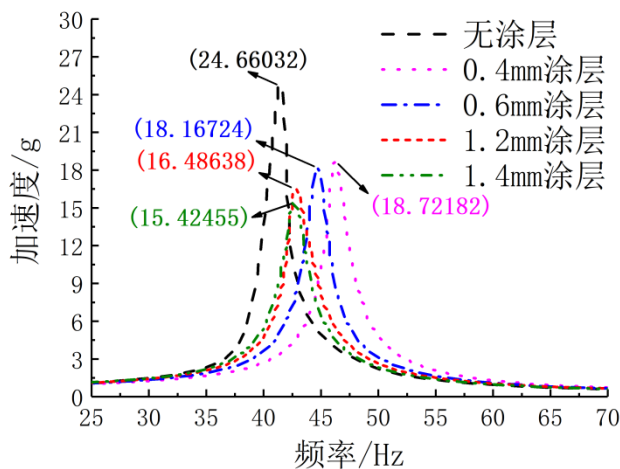
涂层厚度/mm	最大幅值/g	最大有效值/g	减振效果/%
0.25	14.50131	10.20641	60.92
1	18.18333	12.79148	50.28
1.5	17.26206	12.25524	52.27

第三章 大尺寸中含量 (40%) 填料对涂层减振性能的影响

- ◆ **原料:** 120克10目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方
- ◆ **试验件涂层厚度:** 0.4mm、0.6mm、1.2mm、1.4mm



幅值



有效值

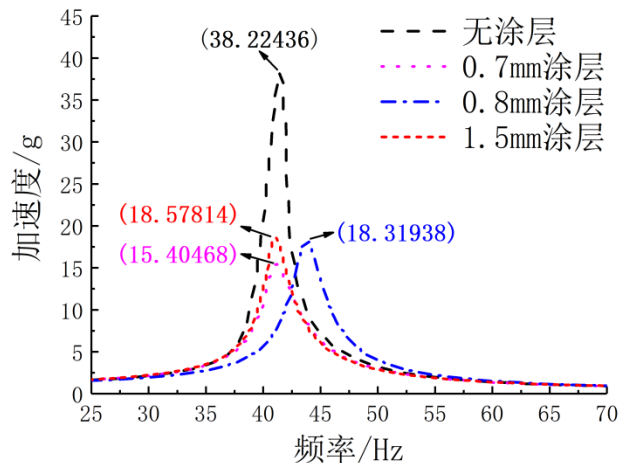
□当填料为大尺寸中含量 (40%) 时, 涂层的减振性能随着厚度增加呈现逐渐升高的趋势。当涂层厚度达到1.4mm时, 试样的减振性能为最佳。

□填料含量为40%时, 云母填料在涂层中较致密, 滑移较困难, 导致减振性能下降, 因此涂层的减振效果弱于低填料含量时。此外, 减振效果受厚度的影响较大。

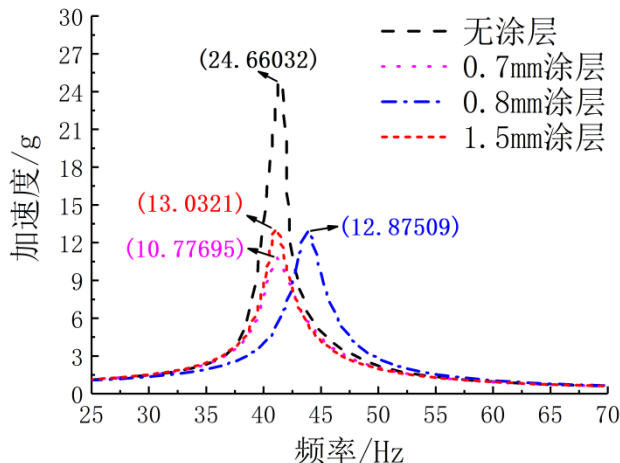
涂层厚度/mm	最大幅值/g	最大有效值/g	减振效果/%
0.4	26.54271	18.72182	27.32
0.6	25.96545	18.16724	29.2
1.2	23.59897	16.48638	35.71
1.4	21.99832	15.42455	39.95

第三章 大尺寸高含量 (60%) 填料对涂层减振性能的影响

- ◆ **原料:** 180克10目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方
- ◆ **试验件涂层厚度:** 0.7mm、0.8mm、1.5mm



幅值



有效值

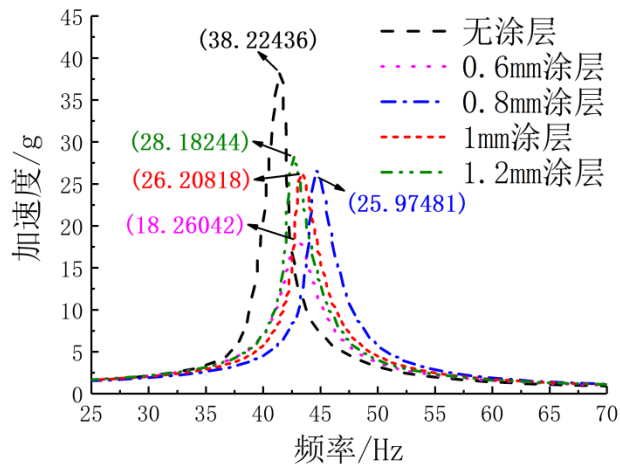
涂层厚度/mm	最大幅值/g	最大有效值/g	减振效果/%
0.7	15.40468	10.77695	58
0.8	18.31938	12.87509	49.93
1.5	18.57814	13.03210	49.28

□当填料为大尺寸高含量 (60%) 时, 减振性能随涂层厚度增加呈逐渐降低。当厚度达到0.7mm时, 试样的减振性能为最佳。

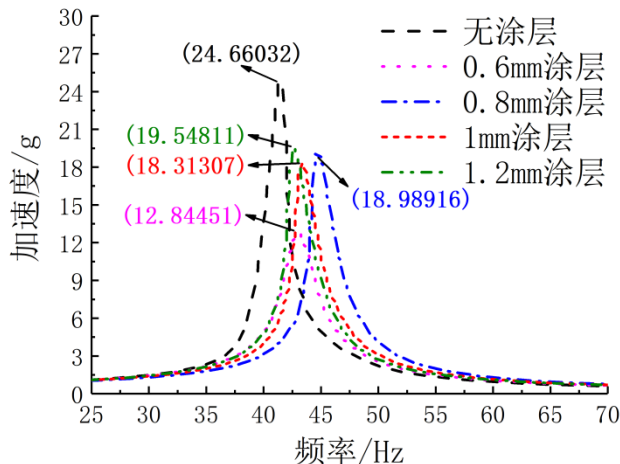
□在填料含量为60%时, 云母填料在涂层中的分散非常致密, 甚至出现填料搭接现象, 随着厚度的增加, 这种情况更多, 填料的滑移变得困难, 减小了填料与填料以及填料与树脂之间的摩擦, 导致减振性能的下降。

第三章 中尺寸低含量 (20%) 填料对涂层减振性能的影响

- ◆ **原料**: 60克40目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方
- ◆ **试验件涂层厚度**: 0.6mm、0.8mm、1mm、1.2mm



幅值



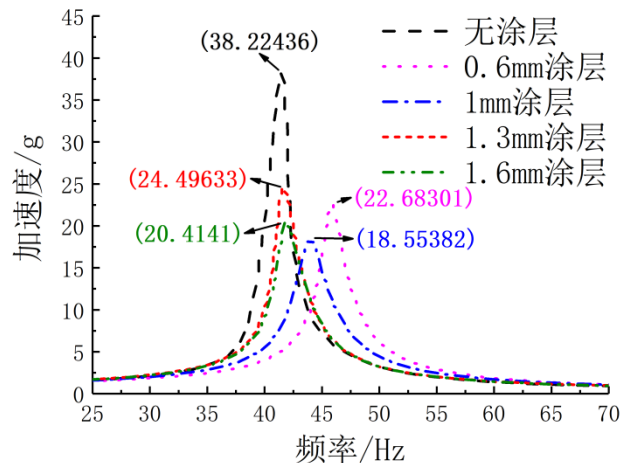
有效值

- 当填料为中尺寸低含量 (20%) 时, 涂层的减振性能随着涂层厚度的增加呈现逐渐降低的趋势。当涂层厚度达到0.6mm时, 试样的减振性能为最佳。
- 与同含量大尺寸云母填料制备的涂层减振效果相比, 中尺寸云母填料制备的涂层减振效果较差。

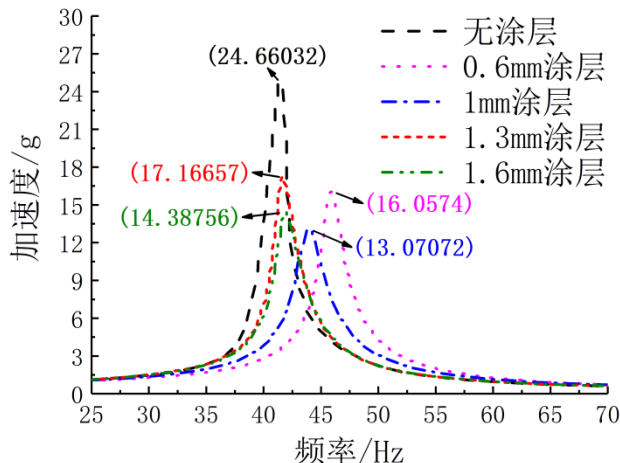
涂层厚度/mm	最大幅值/g	最大有效值/g	减振效果/%
0.6	18.26042	12.84451	50.07
0.8	25.97481	18.98916	27.53
1	26.20818	18.31307	28.59
1.2	28.18244	19.54811	23.5

第三章 中尺寸中含量 (40%) 填料对涂层减振性能的影响

- ◆ **原料:** 120克40目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方
- ◆ **试验件涂层厚度:** 0.6mm、1mm、1.3mm、1.6mm



幅值



有效值

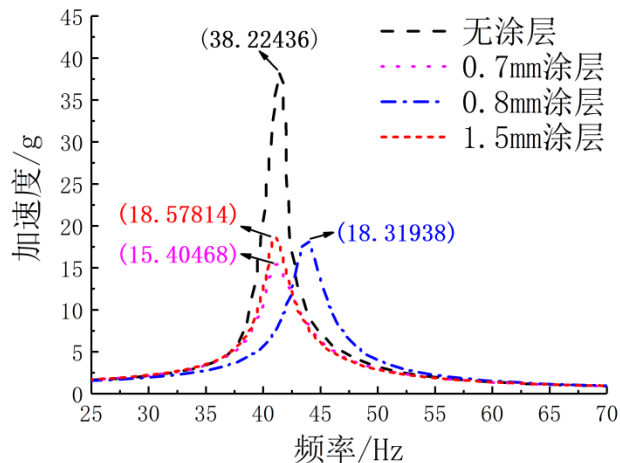
当填料为中尺寸中含量 (40%) 时, 减振性能随涂层厚度的增加先增强后降低继而再增强。当厚度为1.0mm时, 减振性能最佳。

随着涂层厚度增加, 更多的填料产生滑移, 减振效果增强。当厚度过大时, 由于涂层平铺烘干, 填料发生聚集与搭接现象, 减小摩擦, 导致性能下降。当厚度再增加时, 厚度因素会显著影响减振性能。

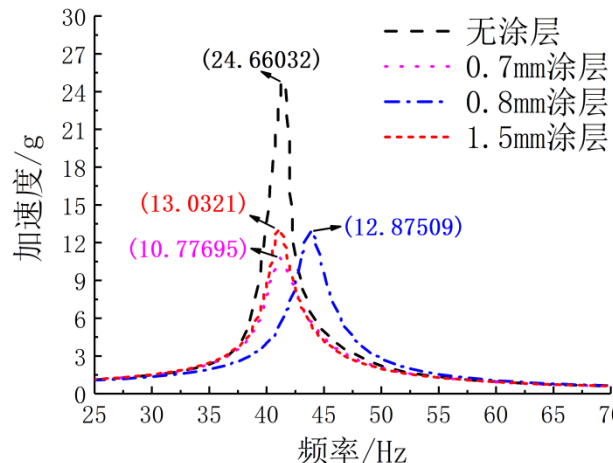
涂层厚度/mm	最大幅值/g	最大有效值/g	减振效果/%
0.6	22.68301	16.05740	37.78
1	18.55382	13.07072	49.23
1.3	24.49633	17.16657	33.15
1.6	20.41410	14.38756	44.13

第三章 中尺寸高含量 (60%) 填料对涂层减振性能的影响

- ◆ **原料:** 180克40目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方
- ◆ **试验件涂层厚度:** 0.6mm、1mm、1.2mm



幅值



有效值

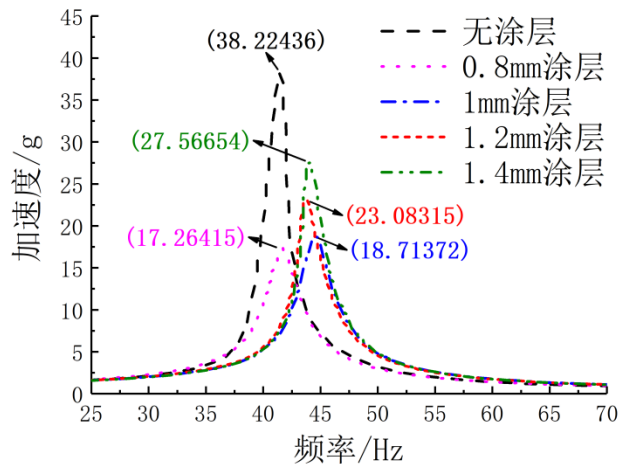
当填料为中尺寸高含量 (60%) 时, 涂层的减振性能随着涂层厚度的增加呈现增强的趋势。当涂层厚度达到1.2mm时, 试样的减振性能为最佳。

填料在涂层中的分散致密, 填料的滑移比较困难, 因此, 涂层的减振性能受到涂层厚度的影响较为显著, 表现出的现象即为涂层的减振性能随着涂层厚度的增加而增强。

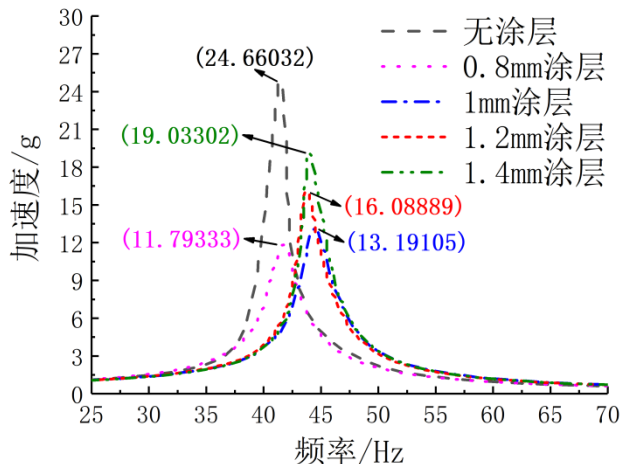
涂层厚度/mm	最大幅值/g	最大有效值/g	减振效果/%
0.6	24.18543	16.98493	33.93
1	22.26147	15.68737	39.08
1.2	19.49071	13.60938	46.91

第三章 小尺寸低含量 (20%) 填料对涂层减振性能的影响

- ◆ **原料**: 60克400目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方
- ◆ **试验件涂层厚度**: 0.8mm、1mm、1.2mm、1.4mm



幅值



有效值

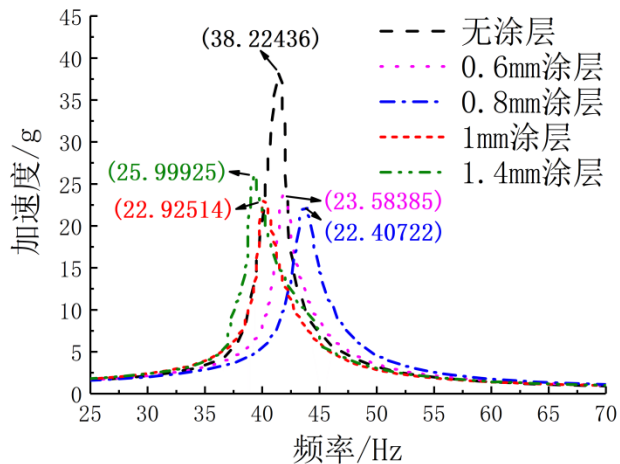
当填料为小尺寸低含量 (20%) 时, 减振性能随厚度的增加而减弱。当涂层厚度为0.8mm时, 试样的减振性能为最佳。

由于平铺烘干, 填料会发生一定的团聚现象, 随着厚度增加, 情况越明显, 导致阻尼减振性能下降。此外, 还可以发现, 在同等填料含量时, 由大尺寸云母粉制备的涂层其减振性能优于小尺寸云母粉制备的涂层。

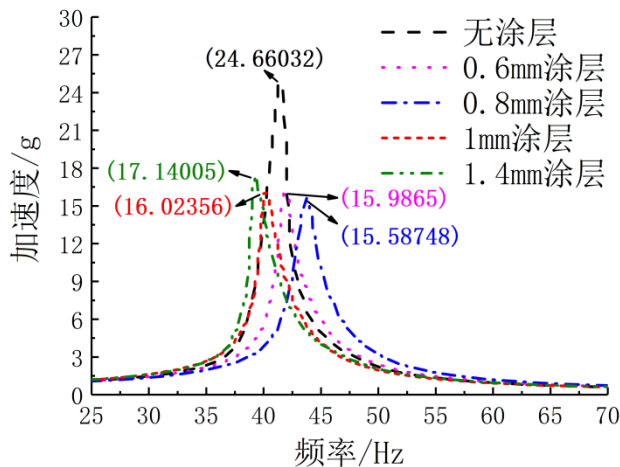
涂层厚度/mm	最大幅值/g	最大有效值/g	减振效果/%
0.8	17.26415	11.79333	53.51
1	18.71372	13.19105	48.78
1.2	23.08315	16.08889	37.19
1.4	27.56654	19.03302	25.35

第三章 小尺寸中含量 (40%) 填料对涂层减振性能的影响

- ◆ **原料:** 120克400目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方
- ◆ **试验件涂层厚度:** 0.6mm、0.8mm、1mm、1.4mm



幅值



有效值

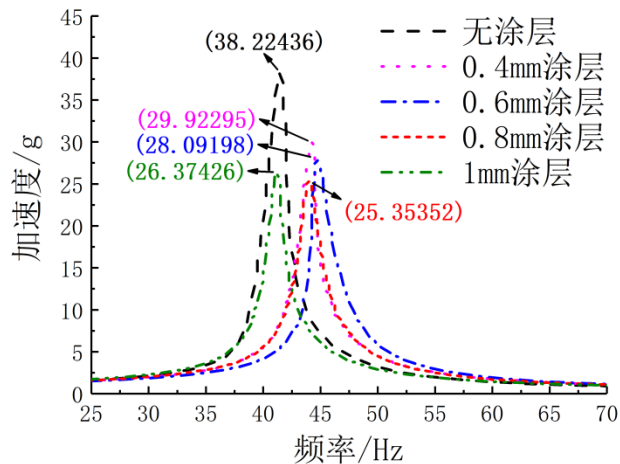
□当填料为小尺寸中含量 (40%) 时, 减振性能随涂层厚度的增加呈先增强后减弱。当涂层厚度达到0.8mm时, 试样的减振性能为最佳。

□随着涂层厚度的增加, 更多的填料产生滑移, 从而消耗更多的机械能, 造成减振效果增强的现象。而当涂层厚度过大时, 填料发生团聚现象, 随着涂层厚度的增加, 这种情况就会越明显, 导致了填料的滑移变得困难。

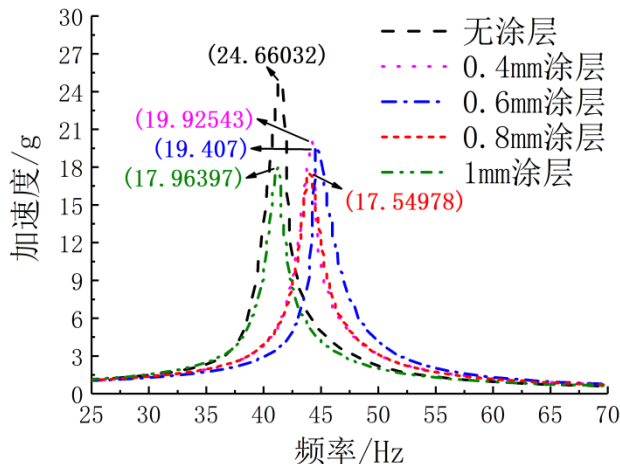
涂层厚度/mm	最大幅值/g	最大有效值/g	减振效果/%
0.6	23.58385	15.98650	36.74
0.8	22.40722	15.58748	39.09
1	22.92514	16.02356	37.52
1.4	25.99925	17.14005	31.24

第三章 小尺寸高含量 (60%) 填料对涂层减振性能的影响

- ◆ **原料:** 180克10目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方
- ◆ **试验件涂层厚度:** 0.4mm、0.6mm、0.8mm、1mm



幅值



有效值

□当填料为小尺寸高含量 (40%) 时, 减振性能随涂层厚度增加呈先增强后略微减弱。当涂层厚度达到0.8mm时, 减振性能为最佳。

□随着涂层厚度的增加, 更多的填料产生滑移, 从而消耗更多的机械能, 造成减振效果增强的现象。而当涂层厚度过大时, 由于涂层平铺烘干, 填料发生一定的团聚现象, 导致减振性能略微下降。

涂层厚度/mm	最大幅值/g	最大有效值/g	减振效果/%
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

第三章 本章小结

本章采取正弦激励法对喷涂有阻尼减振涂层的试样样片进行扫频，通过半功率带宽法研究试样样片的减振性能。根据上一章所述的制备工艺，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，分别研究了其低含量（20%）、中含量（40%）以及高含量（60%）时试样样片的减振效果，得到了以下结论：

- 当填料为大尺寸（10目）、涂层厚度为0.25mm时减振涂层的性能为最佳，减振效果为60.92%；
- 在同尺寸不同填料含量情况下，阻尼涂层的减振性能都表现出随着涂层厚度的增加逐渐增强，在减振性能达到最佳后，再随着涂层厚度的增加逐减弱的趋势，当涂层厚度相同时，低含量填料涂层的减振性能表现更为优异；
- 在同含量不同尺寸填料情况下，不同尺寸填料的表现有所不同，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增加而减弱的趋势；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，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；当填料为高含量（60%）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降低，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其减振性能逐步上升。

目录

01 绪论

02 航空液压管道绿色减振涂层制备技术及性能表征

03 阻尼减振涂层减振性能研究

04 阻尼减振涂层降噪性能研究

05 阻尼减振涂层理化性能研究

06 阻尼减振涂层减振机理研究

07 阻尼减振涂层应用研究

08 总结与展望

第四章 无涂层试验件降噪性能

隔声测试试验件



- 直径 105mm
- 厚度 1mm
- 作用 低频测试



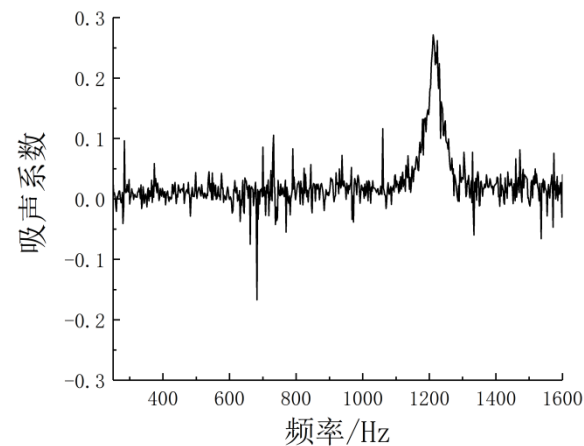
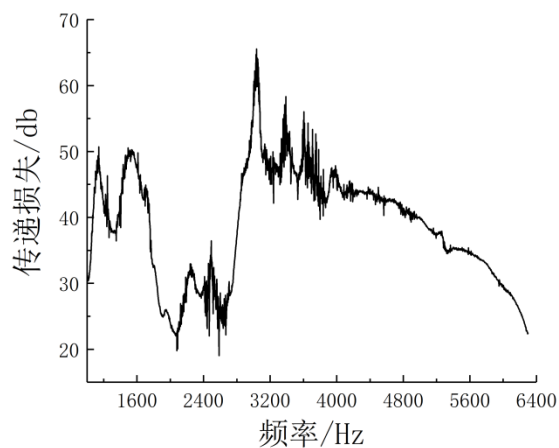
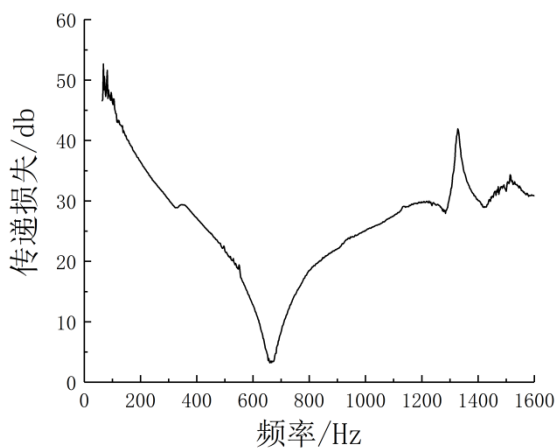
- 直径 32mm
- 厚度 1mm
- 作用 高频测试

吸声测试试验件



- 直径 99.5mm
- 厚度 1mm
- 作用 低频测试

测试结果



第四章 大尺寸低含量 (20%) 填料对涂层隔声降噪性能的影响

◆ 原料：60克10目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方

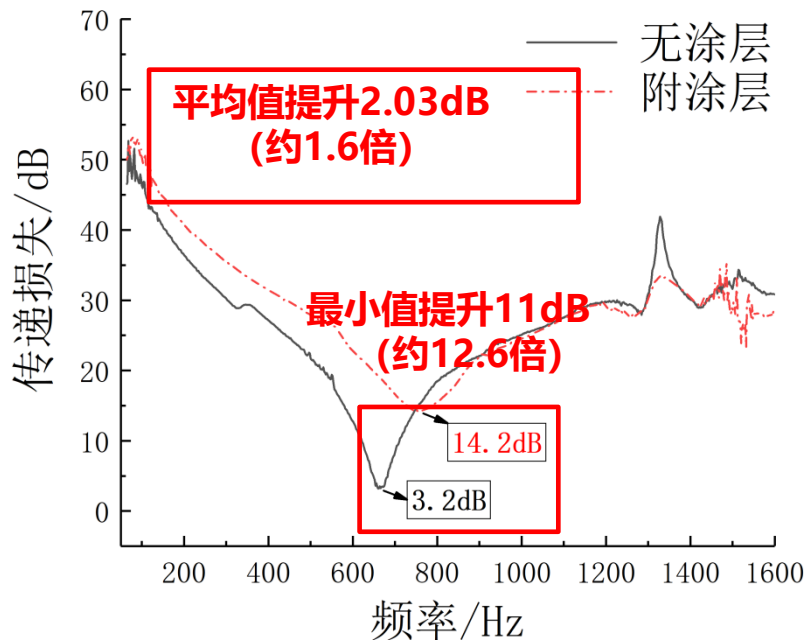
试验件



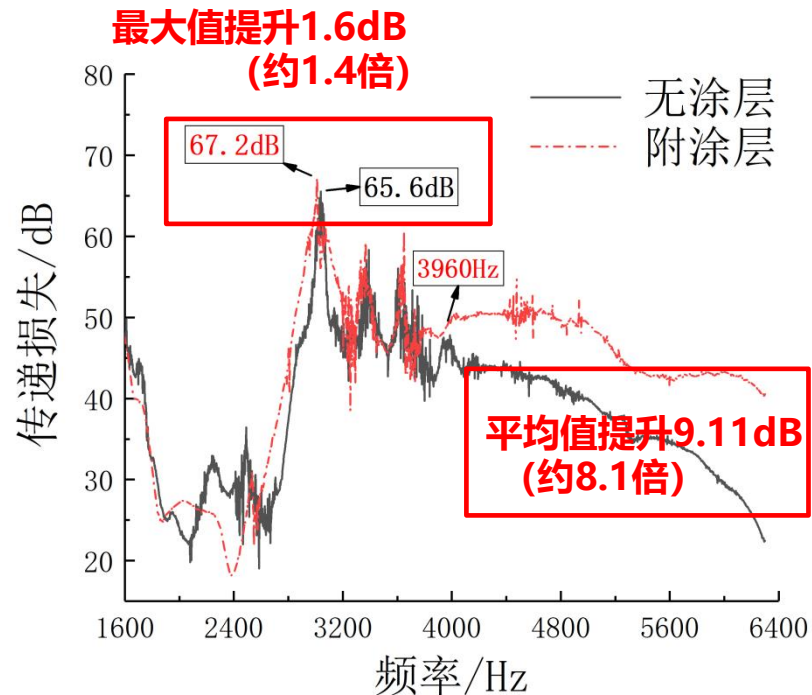
低频



高频



低频



高频

- 涂层样件低频平均传递损失为28.73dB，相较于无涂层样件26.70dB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。
- 涂层样件在高频段3960-6400Hz增强了传递损失，隔声性能较大提升，平均传递损失为46.50dB，相较于无涂层37.39dB提升9.11dB，约8.1倍，传递损失最大值增大了1.6 dB，约1.4倍。

第四章 大尺寸中含量 (40%) 填料对涂层隔声降噪性能的影响

◆ 原料：120克10目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方

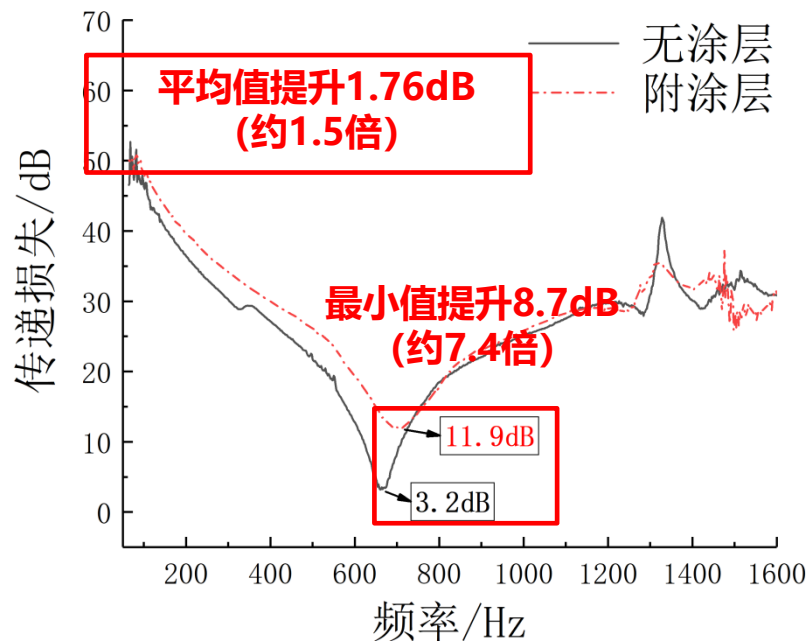
试验件



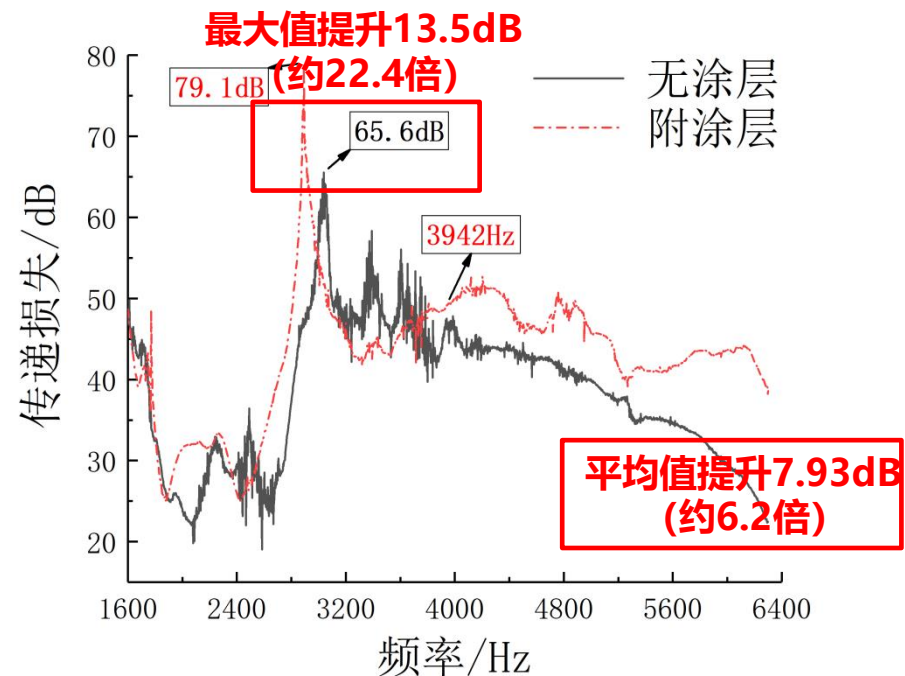
低频



高频



低频



高频

- 涂层样件在低频大部分频段增强了传递损失，隔声性能提升，平均传递损失为28.46dB，相较于无涂层26.70dB提升1.76dB，约1.5倍，最小值增大8.7dB，约7.4倍，有效抑制了弹性波。
- 涂层样件在高频段3942-6400Hz增强了传递损失，隔声性能较大提升，平均传递损失为45.39dB，相较于无涂层37.46dB提升7.93dB，约6.2倍，传递损失最大值增大了13.5 dB，约22.4倍。

第四章 大尺寸高含量 (60%) 填料对涂层隔声降噪性能的影响

◆ **原料:** 180克10目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方

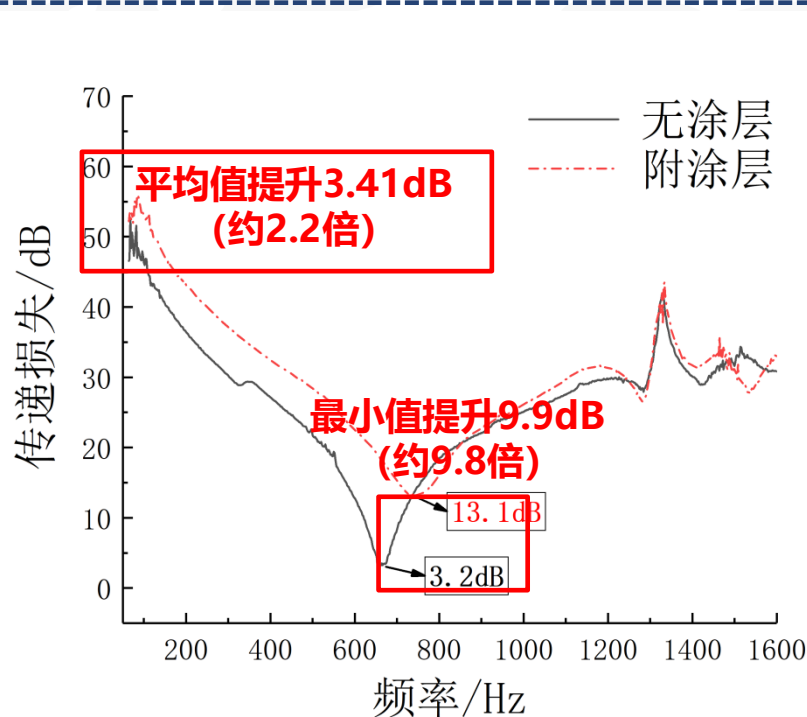
试验件



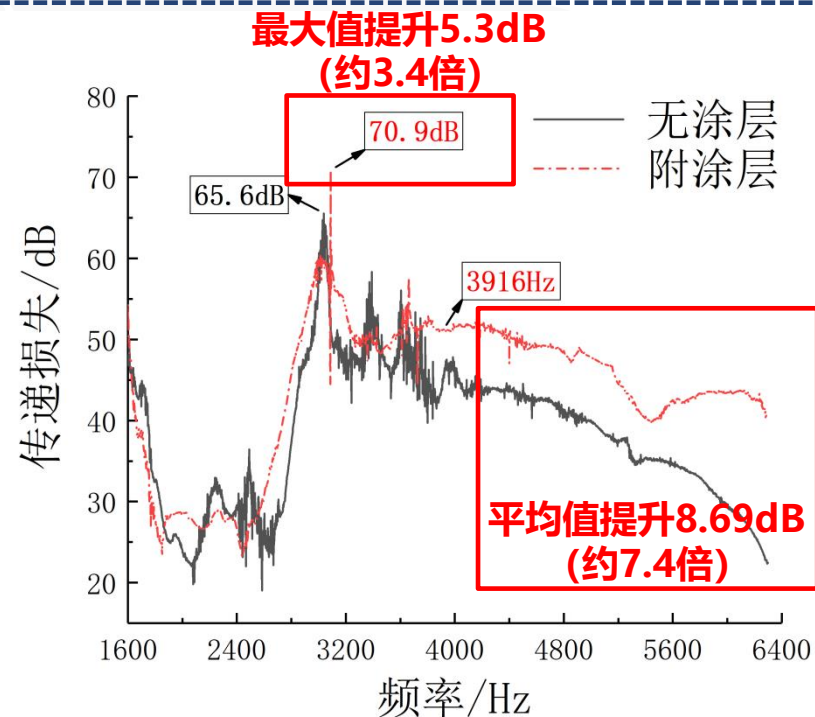
低频



高频



低频



高频

- 涂层样件在低频大部分频段增强了传递损失，隔声性能提升，平均传递损失为30.11dB，相较于无涂层26.70dB提升3.41dB，约2.2倍，最小值增大9.9dB，约9.8倍，有效抑制了弹性波。
- 涂层样件在高频段3916-6400Hz增强了传递损失，隔声性能较大提升，平均传递损失为46.25dB，相较于无涂层37.56dB提升8.69dB，约7.4倍，传递损失最大值增大了5.3dB，约3.4倍。

第四章 中尺寸低含量 (20%) 填料对涂层隔声降噪性能的影响

◆ **原料:** 60克40目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方

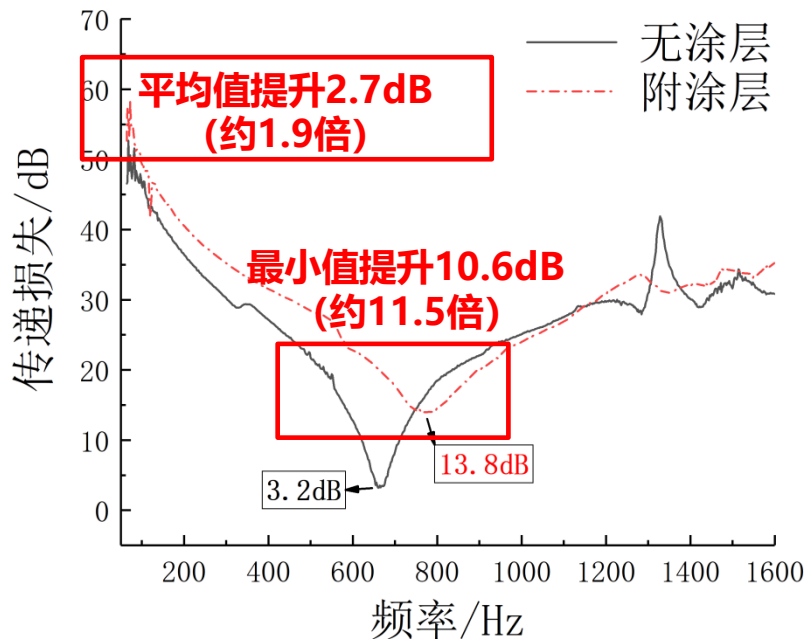
试验件



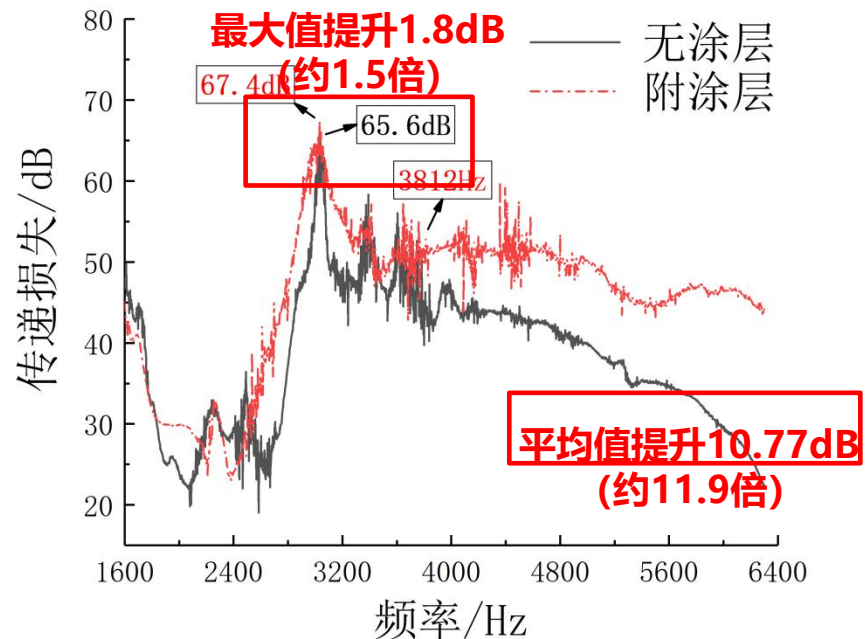
低频



高频



低频



高频

- 涂层样件在低频大部分频段增强了传递损失，隔声性能提升，平均传递损失为29.40dB，相较于无涂层26.70dB提升2.7dB，约1.9倍，最小值增大10.6dB，约11.5倍，有效抑制了弹性波。
- 涂层样件在高频段3812-6400Hz增强了传递损失，隔声性能较大提升，平均传递损失为48.57dB，相较于无涂层37.80dB提升10.77dB，约11.9倍，传递损失最大值增大了1.8dB，约1.5倍。

第四章 中尺寸中含量 (40%) 填料对涂层隔声降噪性能的影响

◆ 原料：120克40目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方

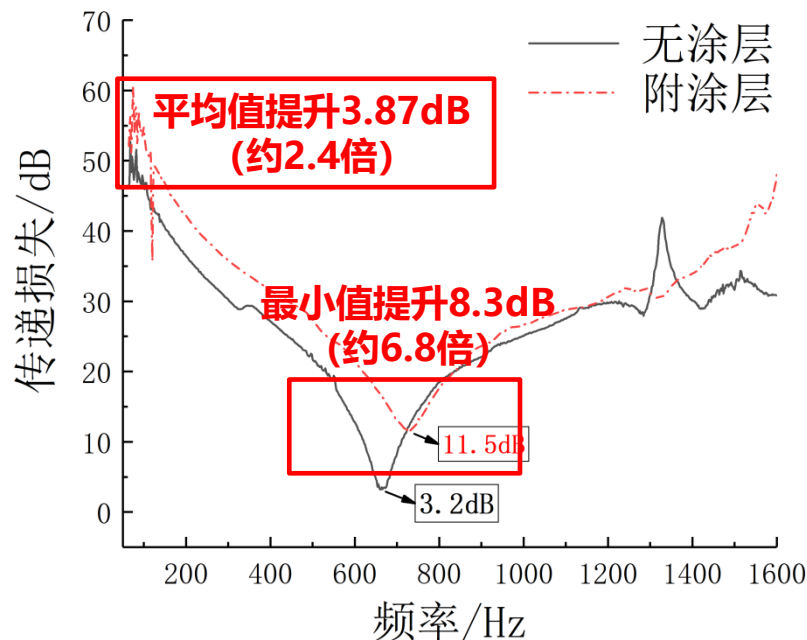
试验件



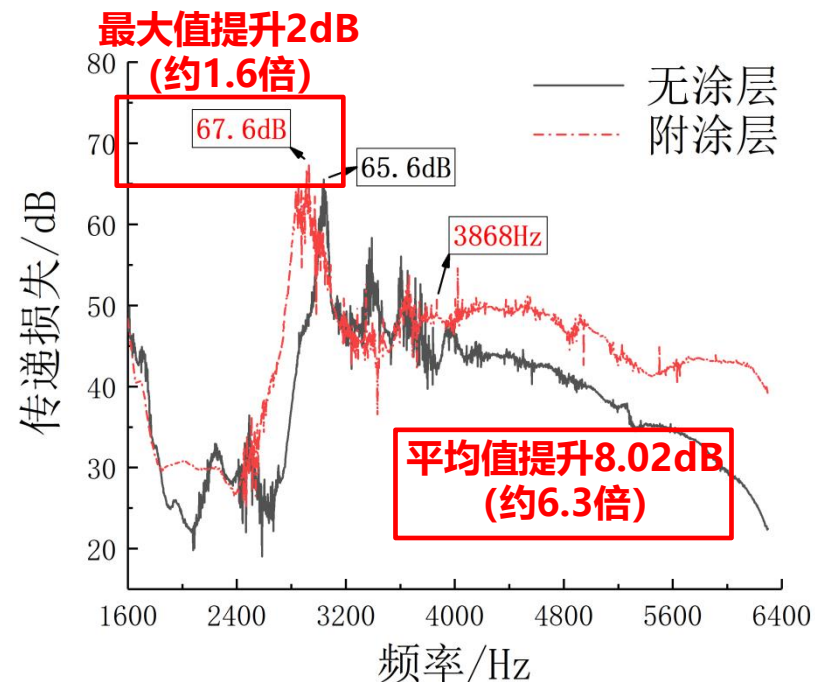
低频



高频



低频



高频

- 涂层样件在低频大部分频段增强了传递损失，隔声性能提升，平均传递损失为30.57dB，相较于无涂层26.70dB提升3.87dB，约2.4倍，最小值增大8.3dB，约6.8倍，有效抑制了弹性波。
- 涂层样件在高频段3868-6400Hz增强了传递损失，隔声性能较大提升，平均传递损失为45.69dB，相较于无涂层37.67dB提升8.02dB，约6.3倍，传递损失最大值增大了2dB，约1.6倍。

第四章 中尺寸高含量 (60%) 填料对涂层隔声降噪性能的影响

◆ 原料：180克40目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方

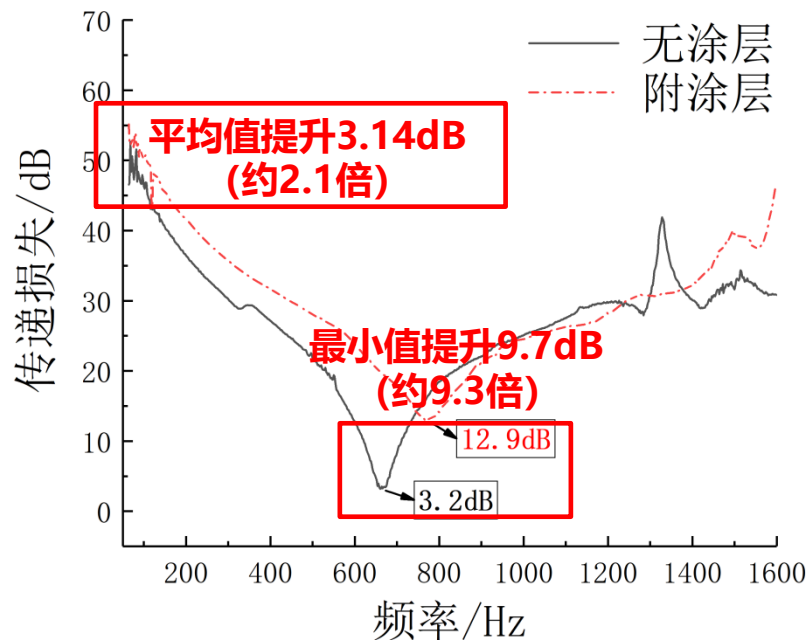
试验件



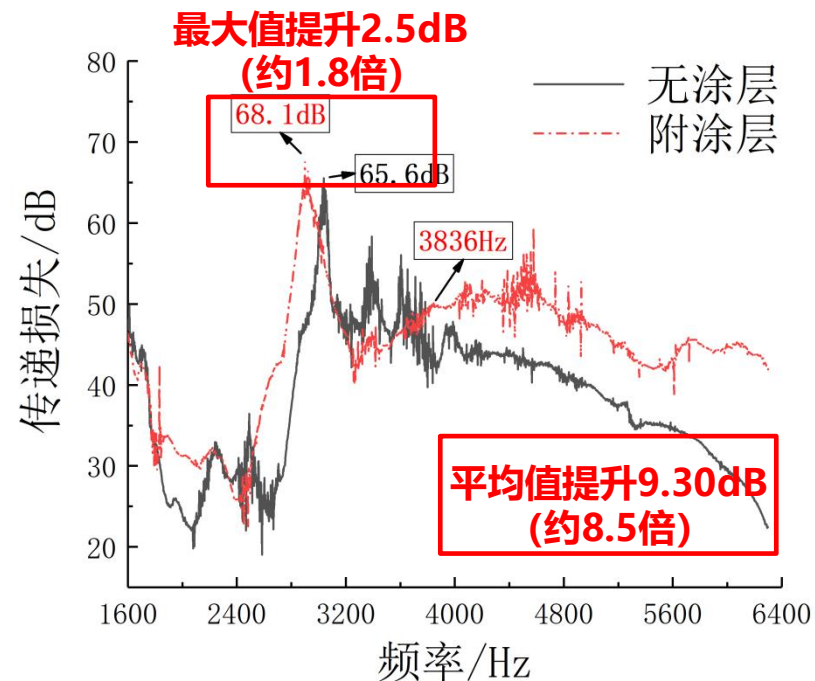
低频



高频



低频



高频

- 涂层样件在低频大部分频段增强了传递损失，隔声性能提升，平均传递损失为29.84dB，相较于无涂层26.70dB提升3.14dB，约2.1倍，最小值增大9.7dB，约9.3倍，有效抑制了弹性波。
- 涂层样件在高频段3836-6400Hz增强了传递损失，隔声性能较大提升，平均传递损失为47.04dB，相较于无涂层37.74dB提升9.3dB，约8.5倍，传递损失最大值增大了2.5dB，约1.8倍。

第四章 小尺寸低含量 (20%) 填料对涂层隔声降噪性能的影响

◆ 原料：60克400目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方

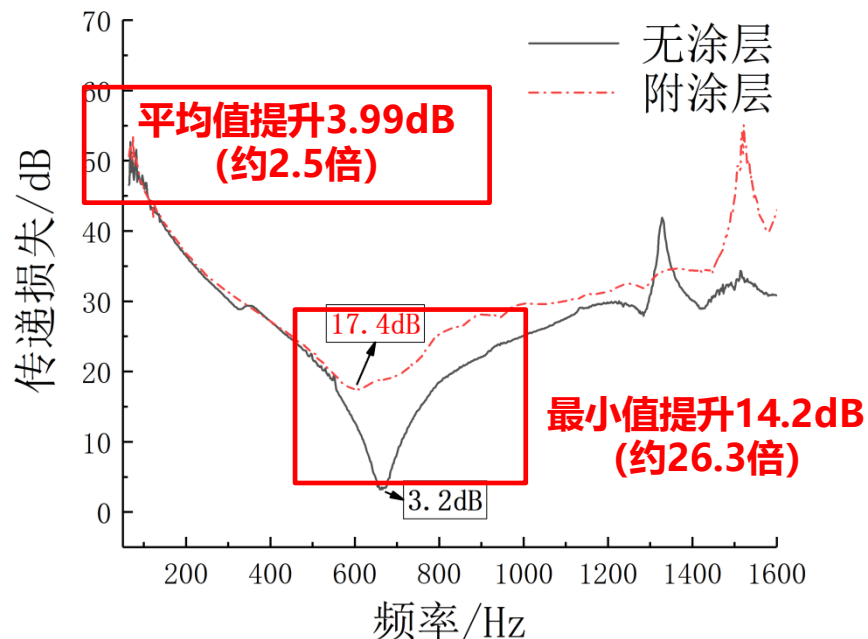
试验件



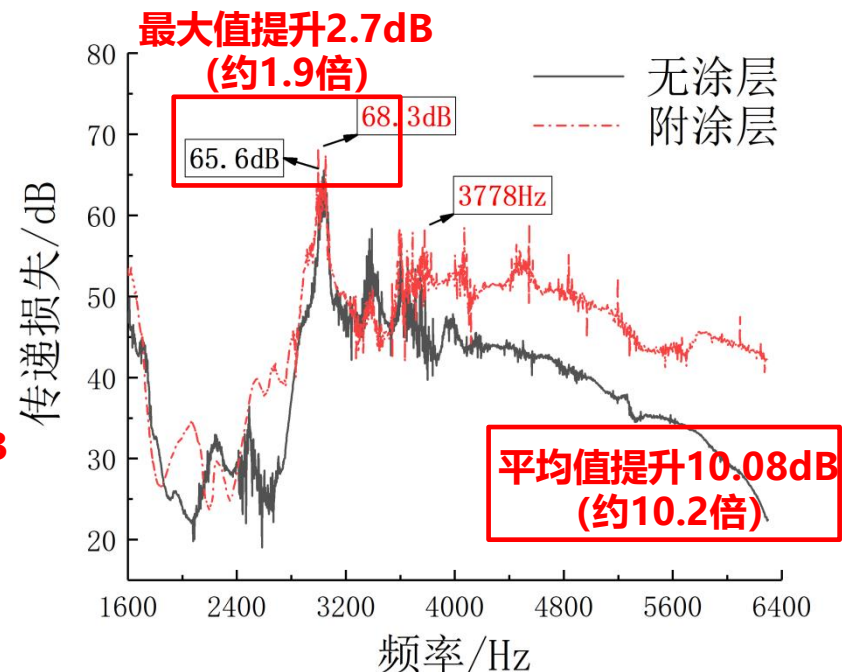
低频



高频



低频



高频

- 涂层样件在低频大部分频段增强了传递损失，隔声性能提升，平均传递损失为30.69dB，相较于无涂层26.70dB提升3.99dB，约2.5倍，最小值增大14.2dB，约26.3倍，有效抑制了弹性波。
- 涂层样件在高频段3778-6400Hz增强了传递损失，隔声性能较大提升，平均传递损失为47.96dB，相较于无涂层37.88dB提升10.08dB，约10.2倍，传递损失最大值增大了2.7dB，约1.9倍。

第四章 小尺寸中含量 (40%) 填料对涂层隔声降噪性能的影响

◆ 原料：120克400目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方

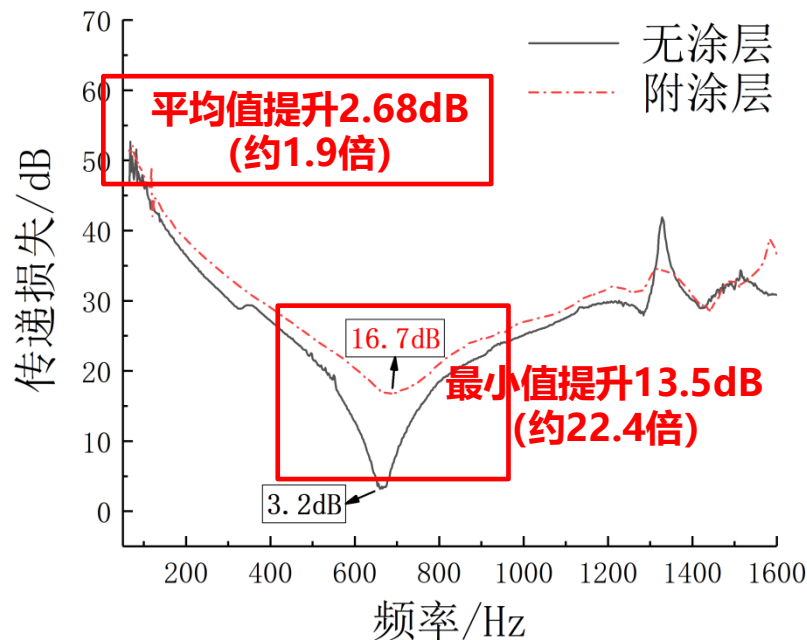
试验件



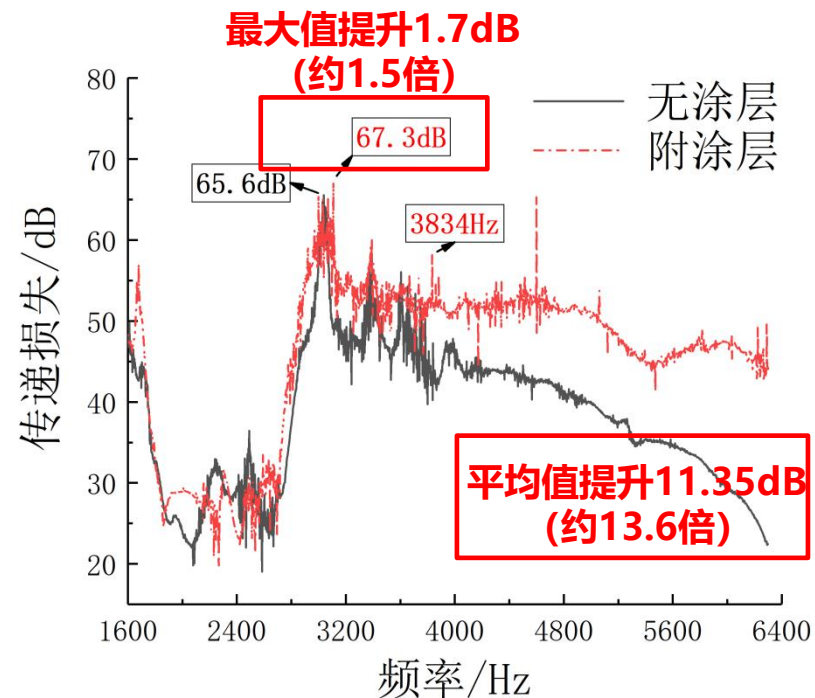
低频



高频



低频



高频

- 涂层样件在低频大部分频段增强了传递损失，隔声性能提升，平均传递损失为29.38dB，相较于无涂层26.70dB提升2.68dB，约1.9倍，最小值增大13.5dB，约22.4倍，有效抑制了弹性波。
- 涂层样件在高频段3834-6400Hz增强了传递损失，隔声性能较大提升，平均传递损失为49.10dB，相较于无涂层37.75dB提升11.35dB，约13.6倍，传递损失最大值增大了1.7dB，约1.5倍。

第四章 小尺寸高含量 (60%) 填料对涂层隔声降噪性能的影响

◆ **原料:** 180克400目云母粉、300ml丙烯酸乳液、其余均按配方

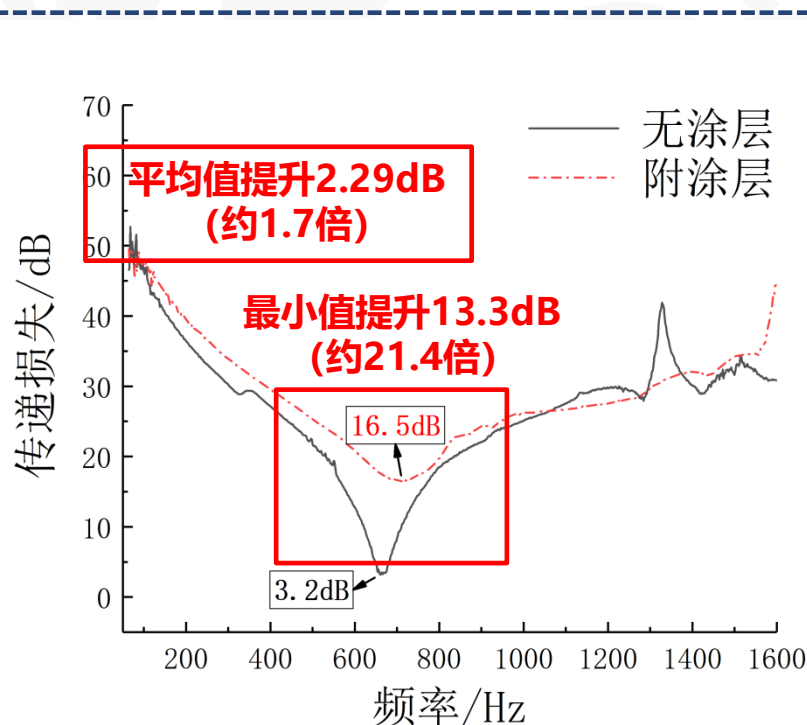
试验件



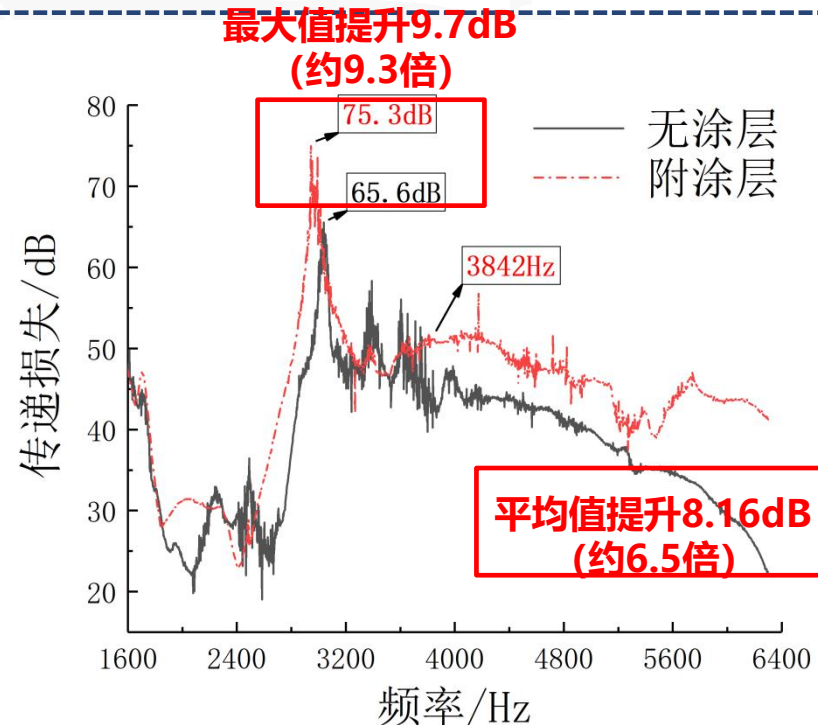
低频



高频



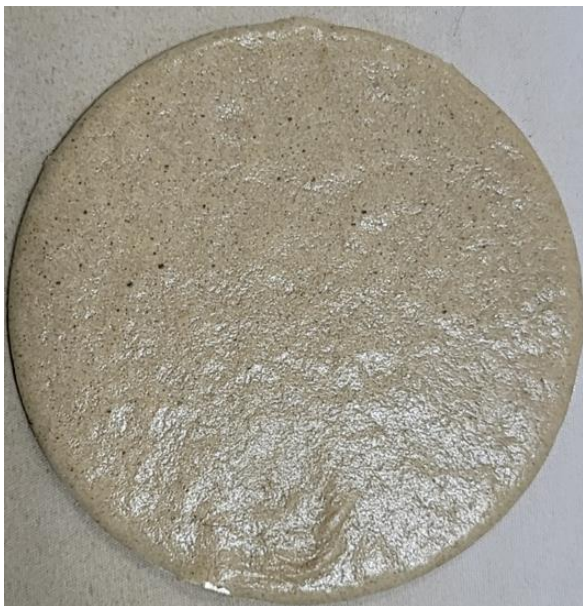
低频



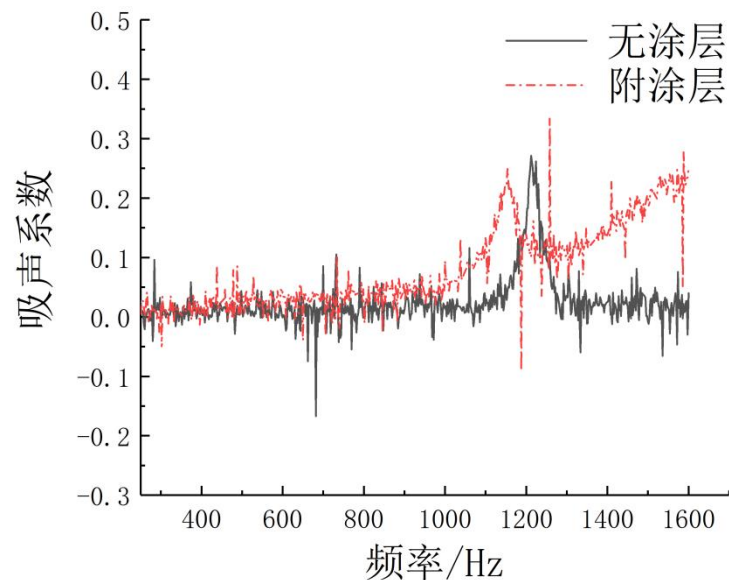
高频

- 涂层样件在低频大部分频段增强了传递损失，隔声性能提升，平均传递损失为28.99dB，相较于无涂层26.70dB提升2.29dB，约1.7倍，最小值增大13.3dB，约21.4倍，有效抑制了弹性波。
- 涂层样件在高频段3842-6400Hz增强了传递损失，隔声性能较大提升，平均传递损失为45.89dB，相较于无涂层37.73dB提升8.16dB，约6.5倍，传递损失最大值增大了9.7dB，约9.3倍。

第四章 涂层吸声降噪性能研究



试验件



低频吸声效果

- 附加涂层后吸声性能有了一定的提升，平均吸声系数由0.025提升到了0.08，约为喷涂前吸声系数的3.2倍。但系数仍然较小，远没有在隔声降噪方面的效果显著。

第四章 本章小结

本章采取阻抗管降噪试验系统，通过传递函数法研究试样样片的降噪性能。根据第二章所述的制备工艺，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，分别研究了其低含量（20%）、中含量（40%）以及高含量（60%）时试样样片的降噪效果，得到了以下结论：

- 制得的减振涂层在低频段的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目云母粉固体含量为20%时制得的减振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目云母粉固体含量为20%时制得的减振涂层对于提升平均隔声传递损失效果最佳；
- 制得的减振涂层在高频阶段降噪隔声性能表现良好的有填料为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；
- 附加减振涂层后试样的吸声性能只有略微的提升，但是吸声系数的波动仍然十分剧烈，且吸声系数的最大值还未到0.3，因此制得的减振涂层其吸声降噪性能一般，远不及隔声降噪性能。

目录

01 绪论

02 航空液压管道绿色减振涂层制备技术及性能表征

03 阻尼减振涂层减振性能研究

04 阻尼减振涂层降噪性能研究

05 阻尼减振涂层理化性能研究

06 阻尼减振涂层减振机理研究

07 阻尼减振涂层应用研究

08 总结与展望

第五章 减振涂料外观与干燥时间分析

涂料外观



□参考GB/T 20777《色漆和清漆 试样的检查和制备》分析，样品呈乳白色，十分均匀，多批次观察涂料表面未出现结皮现象，未发现有水或者树脂状物质析出；未出现分层现象；未见杂质以及可察觉的沉淀物出现。

干燥时间



表面干燥

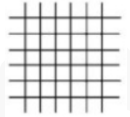
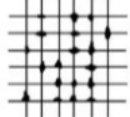
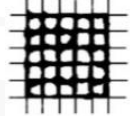
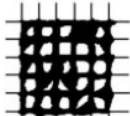
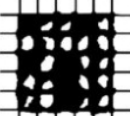


实际干燥

□参考GB/T 1728《漆膜、腻子膜干燥时间测定法》进行分析，根据指触法，实测当本研究中涂层厚度为0.25mm时，表面干燥时间为120min；根据刀片法，实测当本研究中涂层厚度为0.25mm时，涂层的实际干燥时间为48h。

第五章 涂层附着力性能分析

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	/

涂层划格试验结果



参考GB/T 9286《色漆和清漆划格试验》分析减振涂层在基体上的附着力，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，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为1级。

第五章 涂层耐盐水与耐油性能分析

耐盐水性能



试验前样片



试验过程中



试验后样片

□参考GB/T 1763《漆膜耐化学试剂性测定法》，采用3%氯化钠水溶液对减振涂层进行研究，试验结果证明，本研究中制备的减振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。

耐油性能



试验前样片



试验过程中



试验后样片

□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，试验结果证明，本研究中制备的减振涂层在耐油性能方面具备不剥落、不生锈、不变色以及不起泡的优良性能。可能是因为涂层可以防止油液从表面渗透到内部，油液无法在内部产生聚集现象，因此便不会起泡。

第五章 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。上述研究得到的主要结论有：

- 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；
- 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；
- 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；
- 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）。

目录

01 绪论

02 航空液压管道绿色减振涂层制备技术及性能表征

03 阻尼减振涂层减振性能研究

04 阻尼减振涂层降噪性能研究

05 阻尼减振涂层理化性能研究

06 阻尼减振涂层减振机理研究

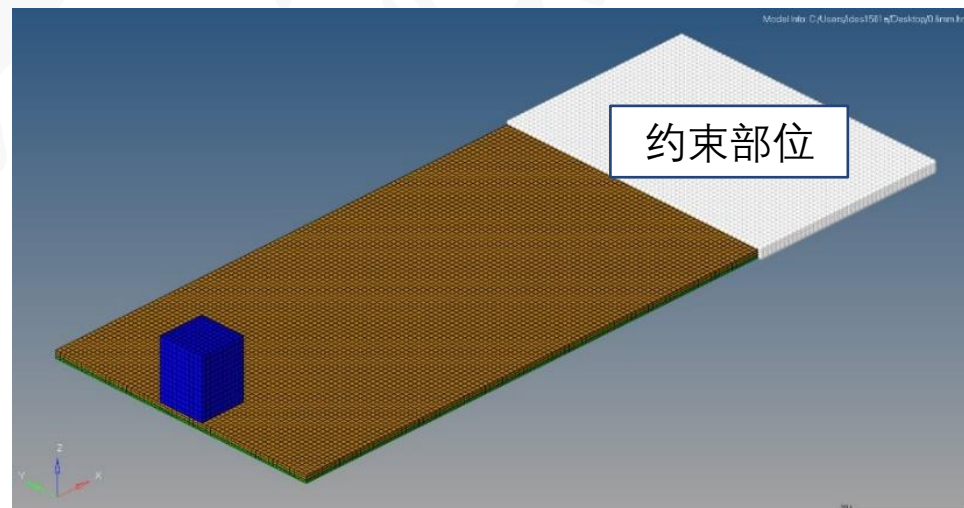
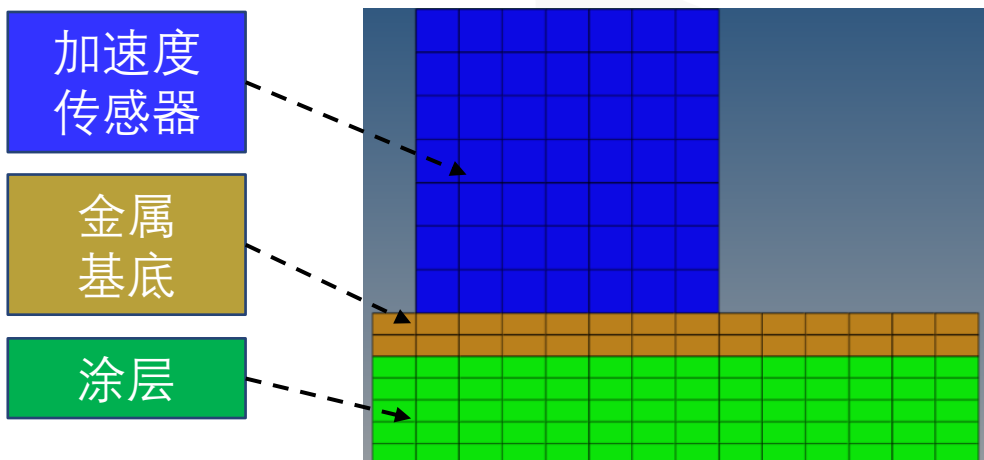
07 阻尼减振涂层应用研究

08 总结与展望

第六章 有限元建模

材料:

- ✓ 金属基底: 2A12
- ✓ 涂层: 减振涂层
- ✓ 加速度传感器: 1Cr18Ni9Ti
- ✓ 基于层合板理论通过hypermesh软件进行有限元模型的建模



第六章 有限元建模

部件	弹性模量/Pa	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	泊松比
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

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。

基于复合材料层合板理论

第六章 同含量同尺寸填料在不同涂层厚度下的仿真

仿真的目的

填料低固体含量（20%）时三种目数的规律相似，均为随着涂层厚度的增加，阻尼性能会降低，因此进行一组同固体含量同日数云母粉填料不同涂层厚度的仿真，以验证仿真模型的有效性和准确性。

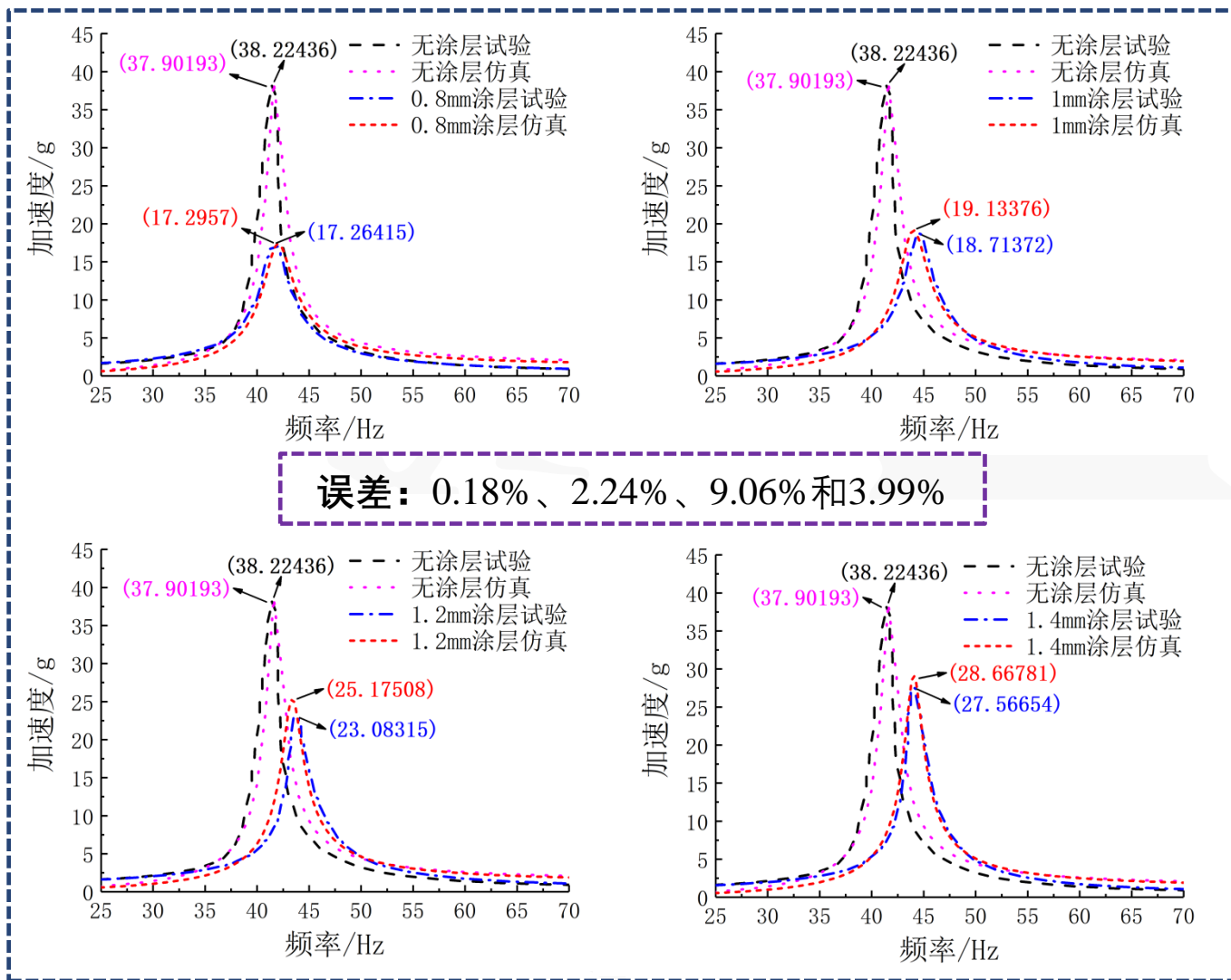
仿真方案

- **仿真对象：**400目云母粉固体含量为20%的涂层试验件
- **仿真方式：**谐响应仿真
- **仿真参数获取：**
 - ① **厚度：**游标卡尺
 - ② **质量：**电子天平
 - ③ **阻尼比：**试验数据计算
 - ④ **材料阻尼系数：**试验数据计算

仿真参数

涂层厚度/mm	涂层质量/g	涂层密度/g·mm ⁻³	阻尼比/%	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

第六章 同含量同尺寸填料在不同涂层厚度下的仿真



根据半功率带宽法计算出的阻尼系数代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合。

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。

第六章 同含量不同尺寸填料在同涂层厚度下的仿真

仿真的目的

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的云母粉填料同涂层厚度的仿真，以验证仿真模型的有效性和准确性。

仿真方案

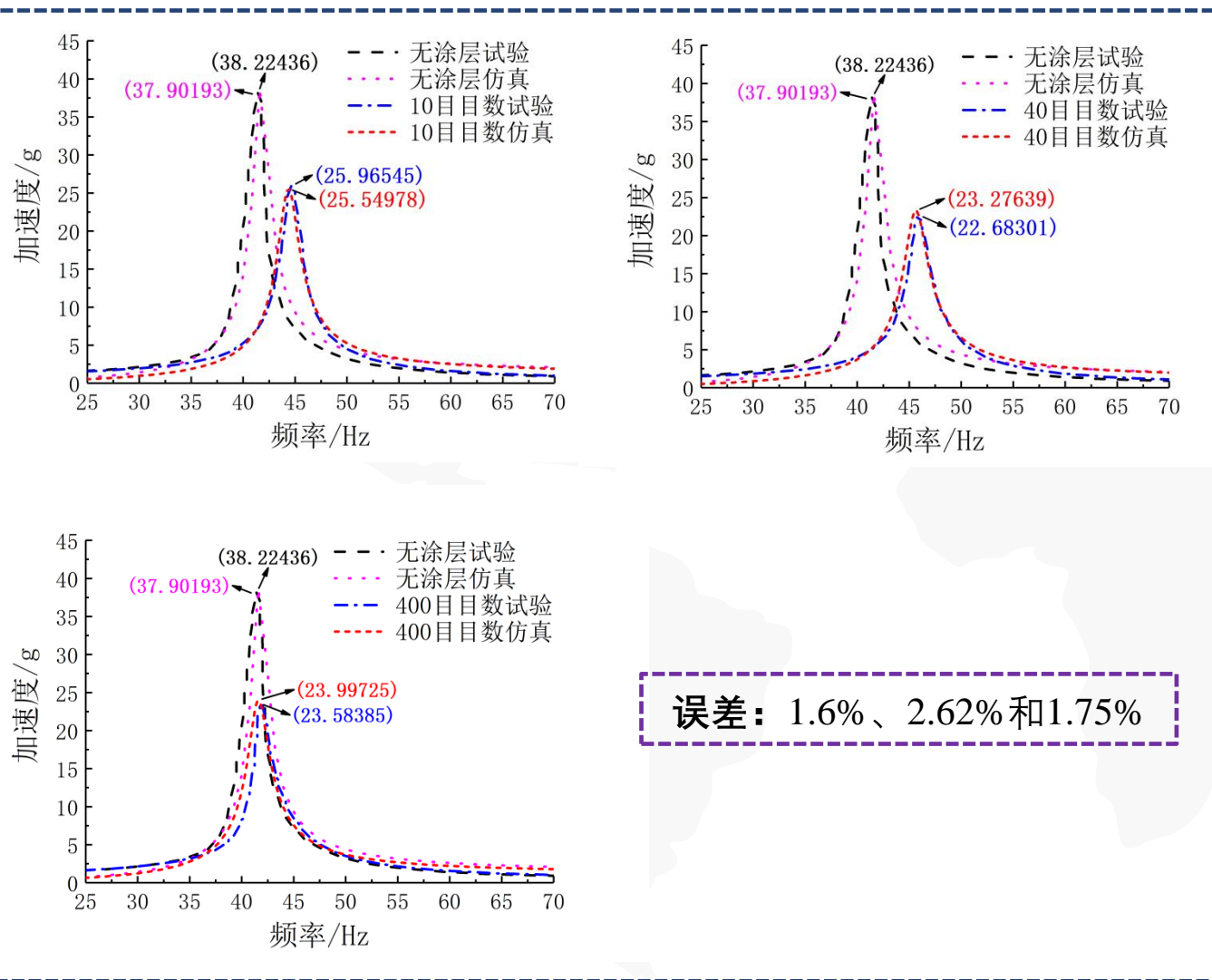
- ▶ 仿真对象：10目、40目、400目云母粉固体含量为40%的减振涂层厚度为0.6mm的试验件
- ▶ 仿真方式：谐响应仿真
- ▶ 仿真参数获取：
 - ① 厚度：游标卡尺
 - ② 质量：电子天平
 - ③ 阻尼比：试验数据计算
 - ④ 材料阻尼系数：试验数据计算



仿真参数

填料目数/目	涂层质量/g	涂层密度/g·mm ⁻³	阻尼比/%	材料阻尼系数/(N·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

第六章 同含量不同尺寸填料在同涂层厚度下的仿真



根据半功率带宽法计算出的阻尼系数代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合。

仿真所得结论与试验相同：40目云母粉制得的阻尼涂层阻尼性能比10目的阻尼性能要好。且400目粒径较小，制得的阻尼涂层在厚度较低时，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。

第六章 不同含量同尺寸填料同涂层厚度下的仿真

仿真的目的

填料 高固体含量 (60%) 时三种目数的 规律相似，因此进行一组不同固体含量同目数的云母粉填料同涂层厚度的仿真，验证 仿真模型的 有效性和准确性。

仿真方案

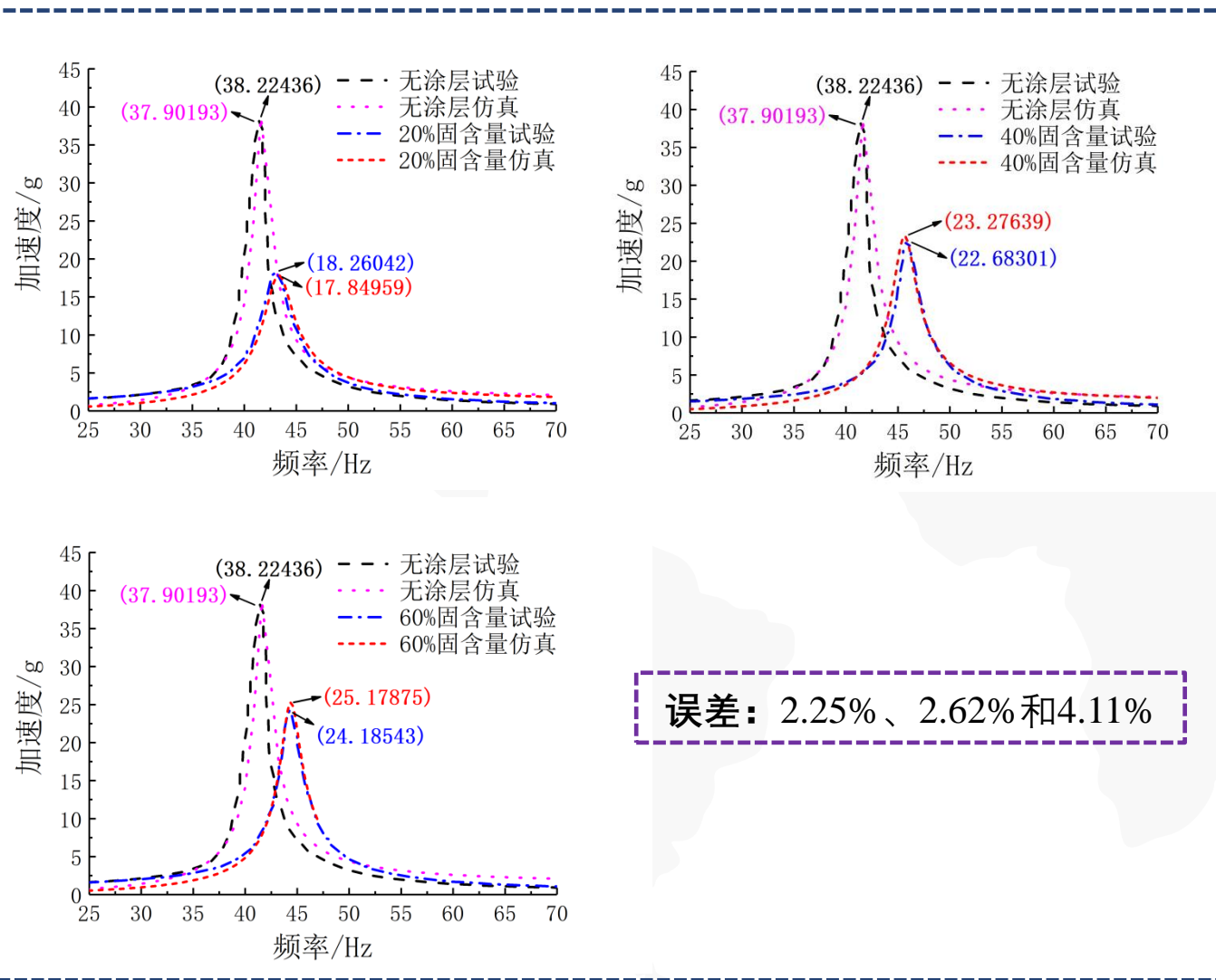
- 仿真对象: 40目云母粉固体含量为20%、40%和60%的涂层厚度为0.6mm的试验件
- 仿真方式: 谐响应仿真
- 仿真参数获取:
 - ① 厚度: 游标卡尺
 - ② 质量: 电子天平
 - ③ 阻尼比: 试验数据计算
 - ④ 材料阻尼系数: 试验数据计算



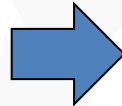
仿真参数

填料固体含量/%	涂层质量/g	涂层密度/g·mm ⁻³	阻尼比/%	材料阻尼系数/(N·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

第六章 不同含量同尺寸填料同涂层厚度下的仿真



误差：2.25%、2.62%和4.11%



根据半功率带宽法计算出的阻尼系数代入有限元模型后，仿真所得数据与试验测得数据较为吻合，证明了仿真模型的准确性和有效性。

第六章 涂层面积对减振性能的影响

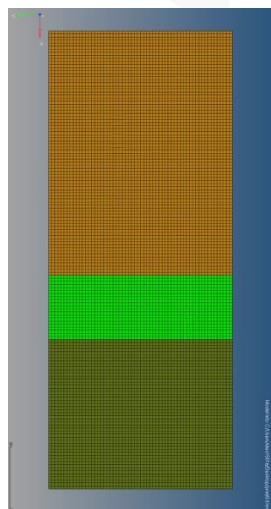
仿真目的

在上述研究中，都是全喷涂方式，性能虽优越，但增加了重量，且拉高了成本。喷涂面积的变化在工程应用中易于实现，因此研究涂层喷涂面积变化对试验件振动特性的影响非常重要。

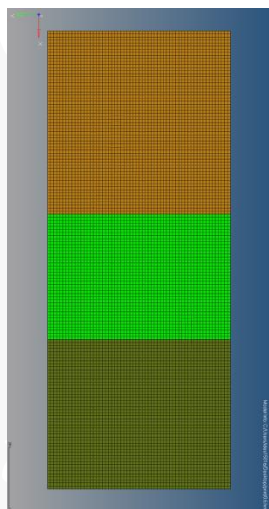
仿真方案

- ▶ 仿真对象：400目固体含量为20%的云母粉制得的涂层试验件
- ▶ 仿真面积：从约束端开始计算分别为20%、40%、60%、80%和100%
- ▶ 模型：土黄色部分为金属基底，墨绿色部分为约束端面，浅绿色部分为涂层

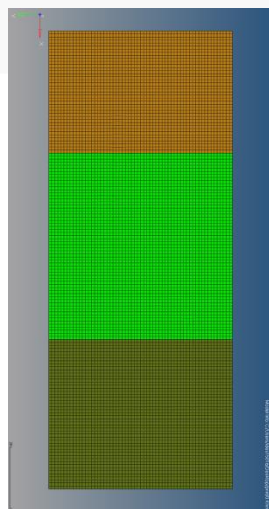
有限元模型



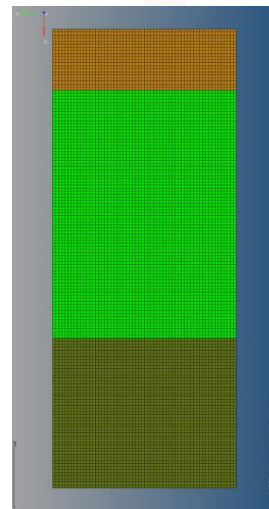
20%



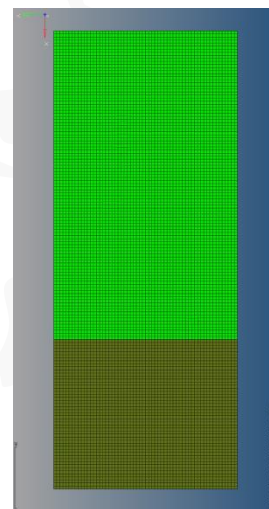
40%



60%



80%



100%

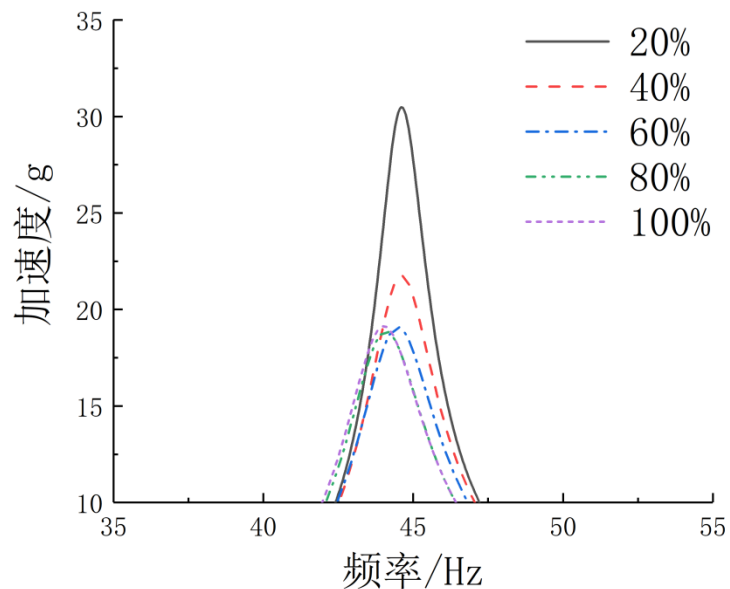
第六章 涂层面积对减振性能的影响

基于ANSYS的模态分析模块，进行模态分析，求解其前6阶固有频率

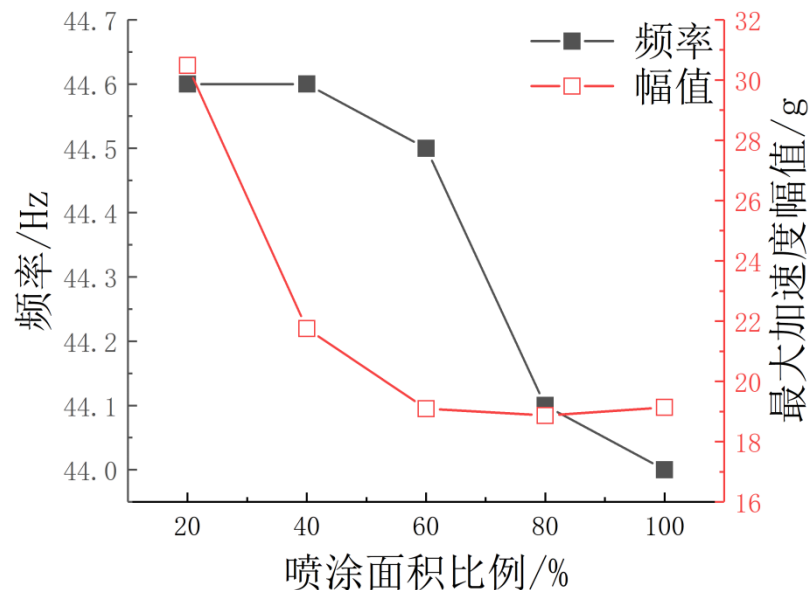
喷涂面积不同，各阶次的固有频率亦发生一定变化，随着涂层面积的增加，各阶次的固有频率逐渐下降。

阶次	涂层面积				
	20%	40%	60%	80%	100%
1	44.60Hz	44.58Hz	44.44Hz	44.05Hz	43.28Hz
2	238.58Hz	237.63Hz	234.77Hz	229.80Hz	223.46Hz
3	362.44Hz	356.14Hz	346.15Hz	341.09Hz	340.41Hz
4	826.60Hz	804.52Hz	786.00Hz	783.76Hz	775.97Hz
5	932.83Hz	910.50Hz	905.87Hz	897.96Hz	893.00Hz
6	1492.53Hz	1484.65Hz	1469.01Hz	1437.34Hz	1403.76Hz

第六章 涂层面积对减振性能的影响

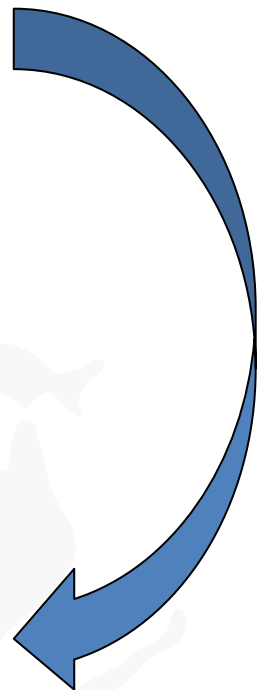


幅频响应曲线



最大幅值

- 增大喷涂面积可以提高试验件的阻尼性能
- 随着喷涂面积的增大，最大幅值的减小速度逐渐降低
- 100%喷涂面积试验件的最大幅值较80%喷涂面积试验件高，这说明在最远离约束端的阻尼涂层不仅对于减振效果提升较小，反而因为其重量增大了振动幅值
- 因此，在减振设计中，不能单纯依靠增加喷涂面积以实现阻尼性能的提升



第六章 涂层位置对减振性能的影响

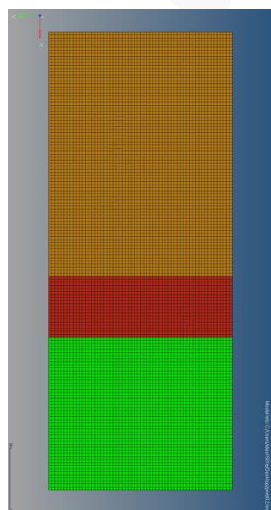
仿真目的

对涂层进行布局优化有效抑制结构振动的同时，更提高了涂层的使用率，因而必须明确喷涂位置对试验件振动特性的影响规律。

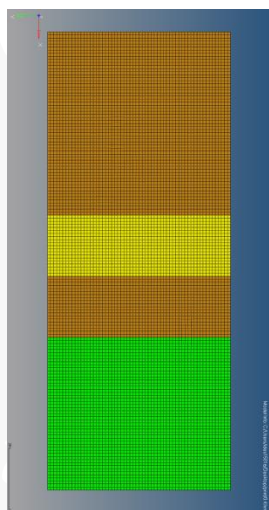
仿真方案

- 仿真对象：400目固体含量为20%的云母粉制得的涂层试验件
- 仿真位置：从约束端开始计算分别为为0mm、20mm、40mm、60mm、80mm
- 模型：土黄色部分为金属基底，浅绿色部分为约束端面，其他颜色部分为涂层

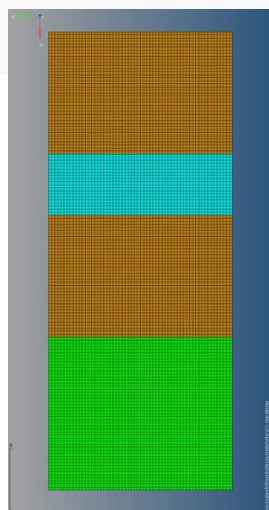
有限元模型



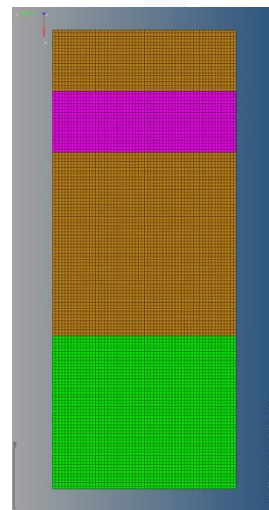
0mm



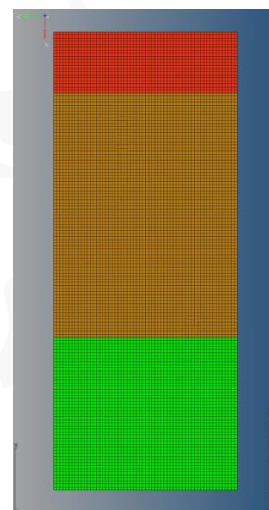
20mm



40mm



60mm



80mm

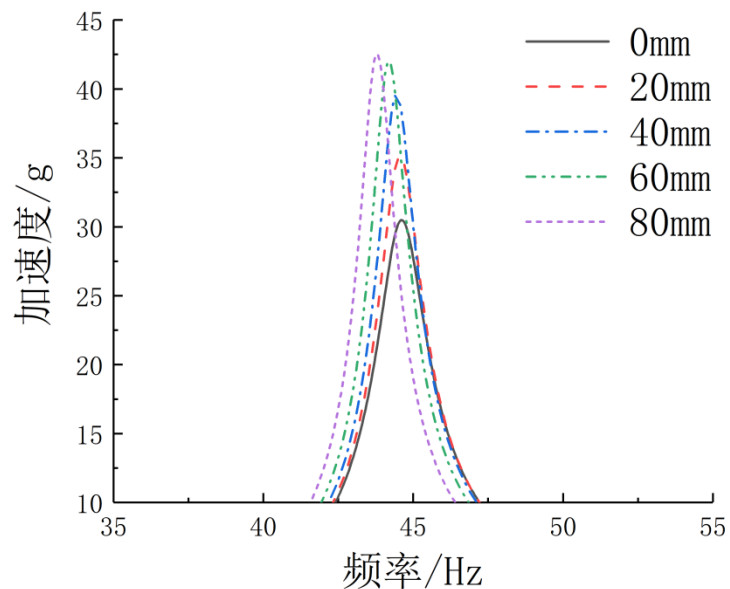
第六章 涂层位置对减振性能的影响

基于ANSYS的模态分析模块，进行模态分析，求解其前6阶固有频率

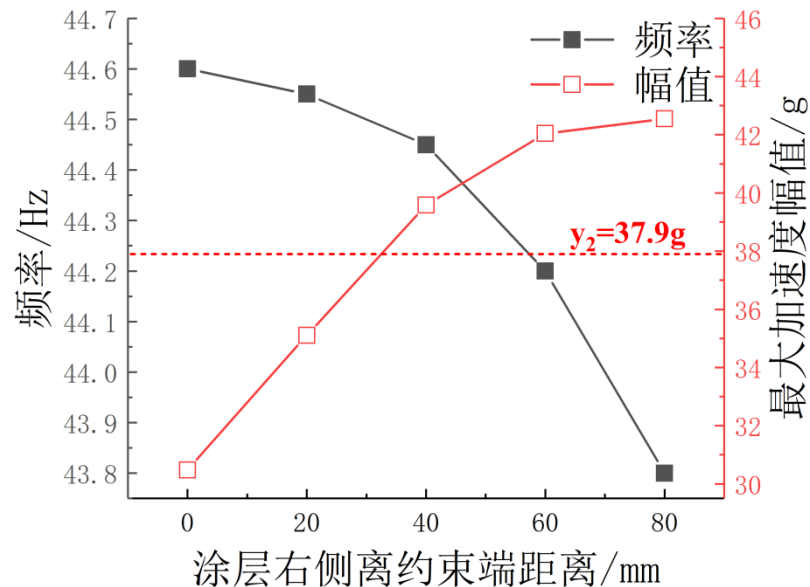
喷涂位置不同，各阶次的固有频率亦发生一定偏移。此外可看出应力较大处喷涂涂层可增大其固有频率。

阶次	涂层右侧离约束端的距离				
	0mm	20mm	40mm	60mm	80mm
1	44.60Hz	44.56Hz	44.43Hz	44.18Hz	43.78Hz
2	238.58Hz	237.67Hz	235.74Hz	233.41Hz	231.49Hz
3	362.44Hz	357.02Hz	352.71Hz	357.14Hz	362.54Hz
4	826.60Hz	809.17Hz	809.98Hz	827.89Hz	824.34Hz
5	932.83Hz	917.79Hz	934.29Hz	934.10Hz	935.31Hz
6	1492.53Hz	1489.15Hz	1482.75Hz	1462.74Hz	1451.91Hz

第六章 涂层位置对减振性能的影响

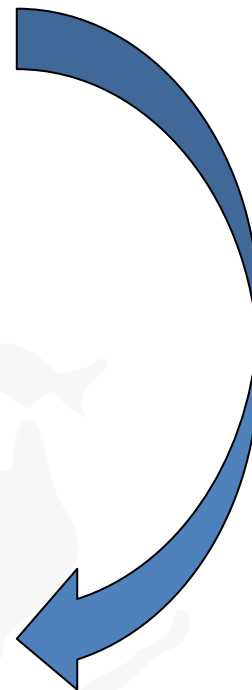


幅频响应曲线



最大幅值

- 喷涂位置越**接近自由端**，试验件的**频率**由于涂层较低的刚度而**下降**
- 喷涂位置越**接近自由端**，涂层试验件的**阻尼性能**会**下降**
- 当喷涂位置**离约束端距离较远**时，涂层的**阻尼性能**起到的作用会**极低**，且会由于其重量，导致试验件的**振幅相较于无喷涂涂层更大**。
- 因此，在减振设计中，喷涂涂层的位置**应靠近约束端**，即**应力较大**的位置



第六章 涂层形状对减振性能的影响

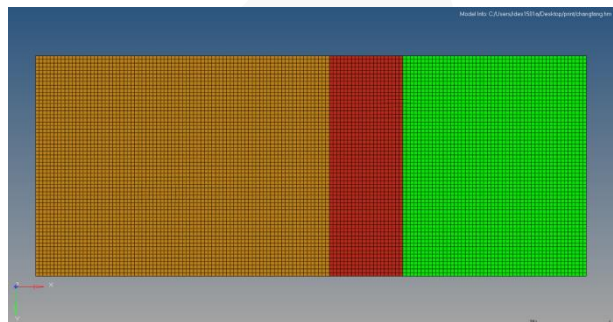
仿真目的

调整涂层形状可有效地改变涂层结构的阻尼性能，因而必须明确喷涂形状对试验件振动特性的影响规律。

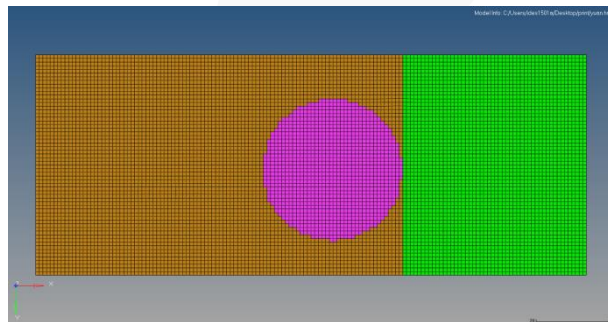
仿真方案

- 仿真对象：400目固体含量为20%的云母粉制得的涂层试验件
- 仿真形状：面积为1200mm²的长方形、圆形、三角形
- 模型：土黄色部分为金属基底，浅绿色部分为约束端面，其他颜色部分为涂层

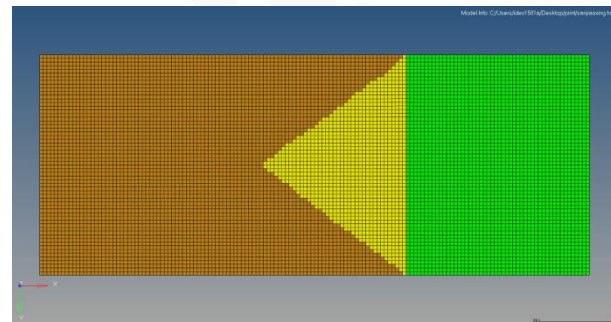
有限元模型



长方形



圆形



三角形

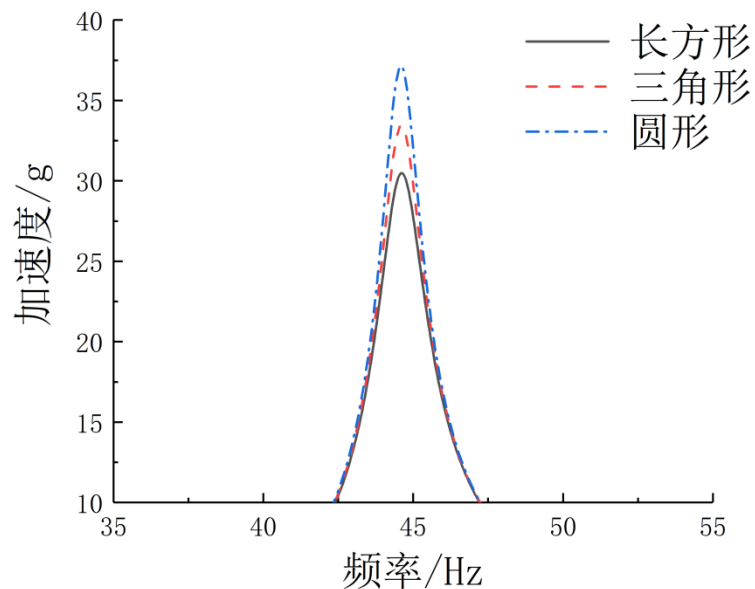
第六章 涂层形状对减振性能的影响

基于ANSYS的模态分析模块，进行模态分析，求解其前6阶固有频率

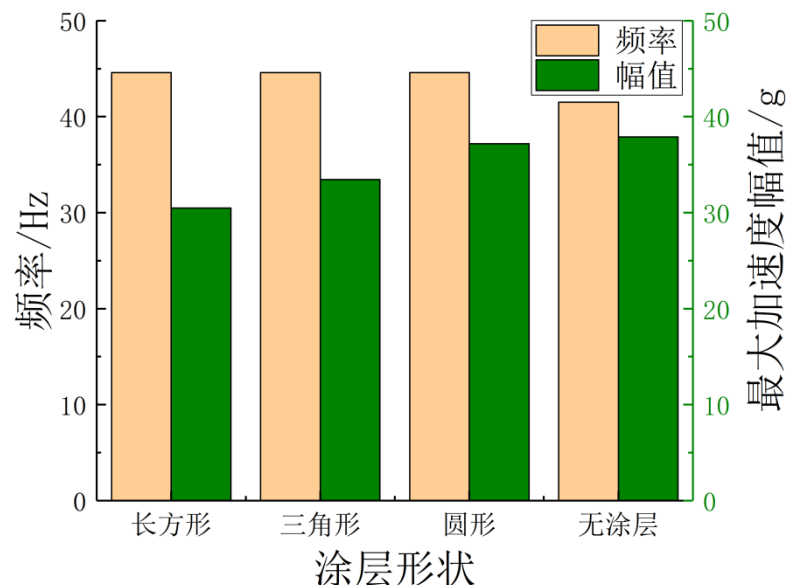
喷涂的形状不同，频率改变幅度不大。涂层的喷涂形状对试验件的振动特性有一定影响，但没有一致性规律。

阶次	长方形	三角形	圆形
1	44.60Hz	44.60Hz	44.58Hz
2	238.58Hz	238.66Hz	238.58Hz
3	362.44Hz	361.58Hz	360.32Hz
4	826.60Hz	829.67Hz	827.53Hz
5	932.83Hz	930.35Hz	925.77Hz
6	1492.53Hz	1489Hz	1487.11Hz

第六章 涂层形状对减振性能的影响

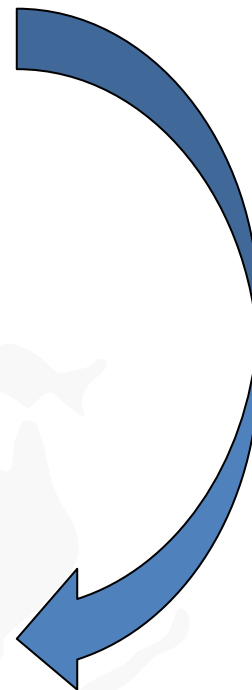


幅频响应曲线



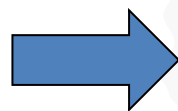
最大幅值

- 不同形状试验件的**共振频率基本无变化**
- 最大**加速度幅值从小到大**一次为**长方形、三角形、圆形**
- 喷涂形状为**圆形**时，起到的**减振作用已经较差**，接近于**无喷涂涂层**的试验件
- 在减振设计中，**喷涂涂层的形状**应尽可能**集中于应力较大的位置**。



第六章 减振涂层迟滞回线研究分析

基于本研究的有限元建模仿真方法，建立有限元仿真模型。通过分析测试已得到阻尼结构的损耗因子、试件的共振频率、阻尼涂料的密度、试验件尺寸及厚度等数据。基于模态应变能法，可计算得出阻尼涂料的损耗因子。



不同涂层厚度试验件阻尼材料的弹性模量及损耗因子

涂层厚度 (mm)	E (Pa)	E_1 (Pa)	η_{si}	η_1
0.6	6.6×10^{10}	1.0017×10^8	0.02895	15.1813
0.8	6.6×10^{10}	3.7274×10^8	0.03313	5.7215
1	6.6×10^{10}	1.93732×10^9	0.03089	0.9222
1.2	6.6×10^{10}	4.5667×10^9	0.02286	0.2746
1.4	6.6×10^{10}	8.7525×10^9	0.01989	0.1261

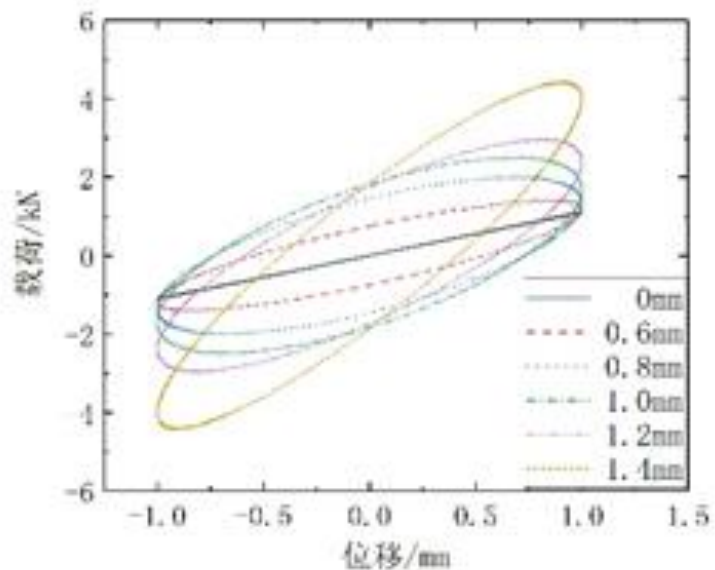
不同目数的云母粉填料试验件阻尼材料的弹性模量及损耗因子

填料目数 (n)	E (Pa)	E_1 (Pa)	η_{si}	η_1
10	6.6×10^{10}	2.1128×10^8	0.02235	8.0651
40	6.6×10^{10}	2.8663×10^8	0.02450	6.5219
400	6.6×10^{10}	1.0037×10^8	0.02395	18.1713

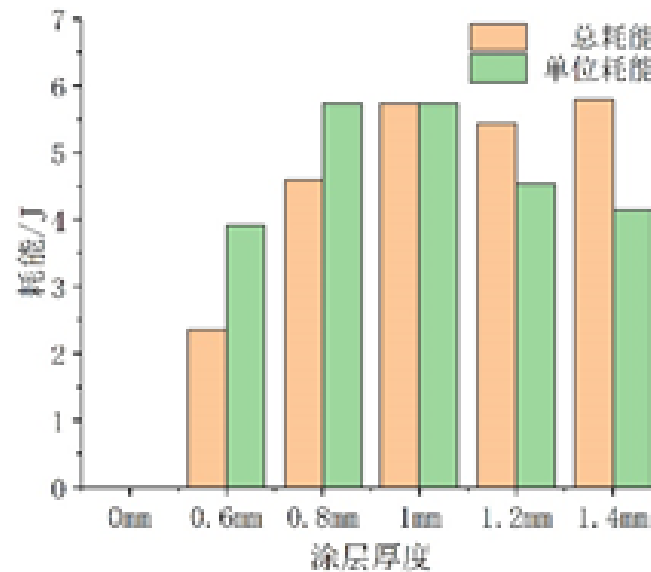
不同固体含量试验件复合阻尼材料的弹性模量及损耗因子

填料含量 (%)	E (Pa)	E_1 (Pa)	η_{si}	η_1
20	6.6×10^{10}	1.1044×10^8	0.03198	22.0538
40	6.6×10^{10}	2.8663×10^8	0.02450	6.5219
60	6.6×10^{10}	1.8899×10^8	0.02542	10.2525

第六章 涂层厚度对迟滞特性的影响



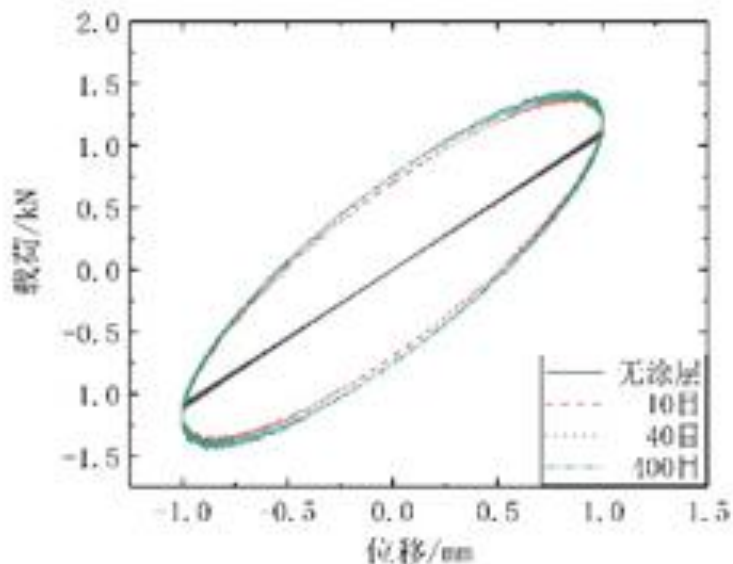
不同厚度的迟滞环仿真



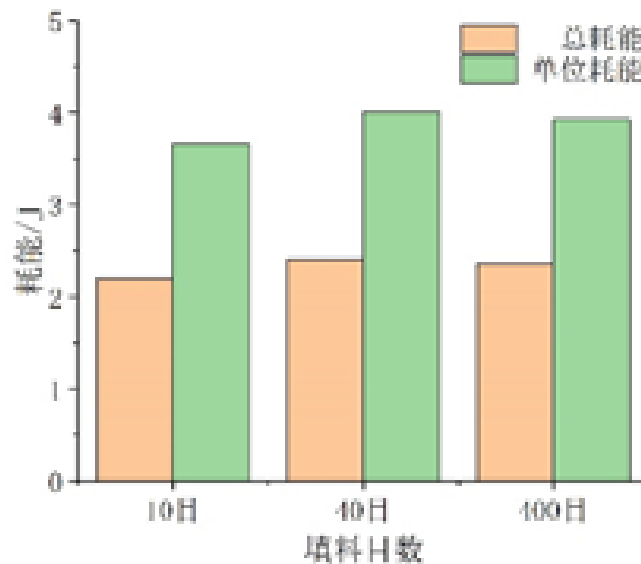
不同厚度涂层单位耗能对比

- 在保持加载、约束边界、填料目数和固体含量等条件不变的情况下，研究涂层厚度对迟滞特性的影响，厚度分别取0、0.6、0.8、1、1.2、1.4mm。瞬态分析结果如左图所示。可看出涂层厚度对阻尼涂层模型的迟滞特性有着较为明显的影响：随着厚度的增加，迟滞环的面积向外扩展，且加载和卸载段的外包络线的斜率随着其改变而改变。但考虑到经济性，厚度无法一直增加，因此其整体耗能和单位厚度耗能如右图所示，可以看出0.8mm时单位耗能效率最高，表明厚度在0.8mm时，涂层材料的减振效果最优。

第六章 填料目数对迟滞特性的影响



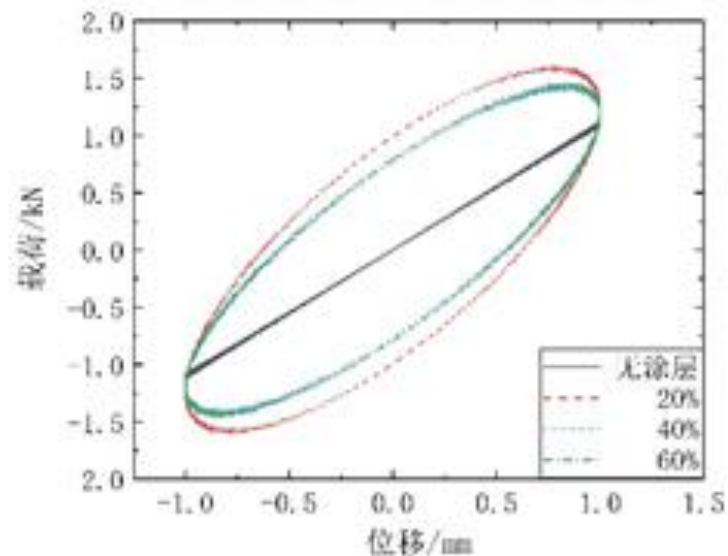
不同填料目数的迟滞环仿真



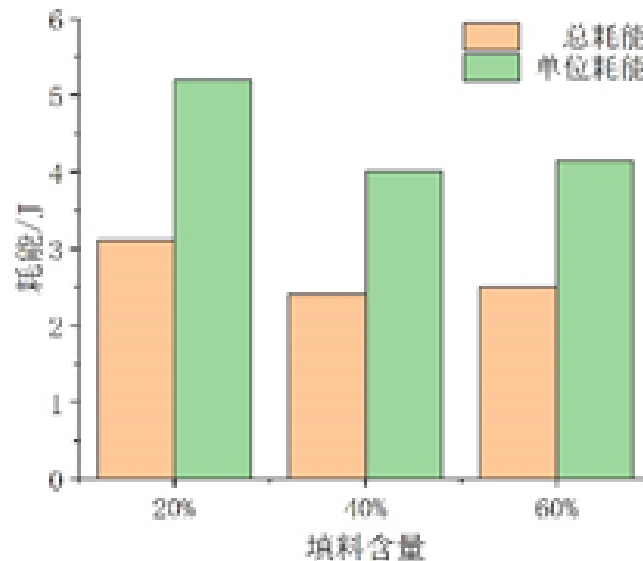
不同填料目数涂层单位耗能

- 在保持加载、约束边界、填料固体含量和涂层厚度等条件不变的情况下，建立了不同填料目数的模型，以研究填料目数对迟滞特性的影响，其中填料目数分别取10目、40目、400目。瞬态分析结果如左图所示，计算面积所得单位耗能如右图所示。从左图可看出填料目数对阻尼涂层模型的迟滞特性影响较小，迟滞环的面积只是略微改变，且加载和卸载段的外包络线的斜率基本不变。

第六章 填料含量对迟滞特性的影响



不同填料含量的迟滞环仿真



不同填料含量涂层单位耗能

- 在保持加载、约束边界、填料目数和涂层厚度等条件不变的情况下，建立不同填料含量的模型，以研究填料含量对迟滞特性的影响，其中填料含量分别取0%、20%、40%、60%。瞬态分析结果如左图所示，从图中看出填料含量对阻尼涂层模型的迟滞特性影响较为明显，迟滞环的面积随着填料含量的增加先增大而后又降低；计算面积所得单位耗能如右图所示，可以看出20%的填料下的涂层材料单位耗能最大。

第六章 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，此外，还通过拓扑分析研究了涂层面积、位置、形状对试验件振动特性的影响规律，探讨了阻尼涂层在试验件表面布局的优化形式。最终，通过阻尼减振涂层迟滞回线研究分析，揭示了涂层厚度、填料目数以及填料含量对迟滞特性的影响。上述研究得到的主要结论有：

- 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。
- 随着涂层面积由20%、40%增加至100%时，试验件的减振性能由20.3%、43.1%、50%、50.6%、50.1%逐渐增强，但随着喷涂面积的增大，减振性能增加速率由1.12、0.16、0.012、-0.01逐渐降低，且在远离约束端的阻尼涂层反而因其重量增大了振动幅值。因此，在减振设计中，不能单纯依靠增加喷涂面积以实现性能的提升。
- 随着喷涂位置越接近自由端，试验件的频率由44.6Hz、44.55Hz、44.45Hz、44.2Hz、43.8Hz逐渐下降，最大幅值由30.5g、35.1g、39.6g、42.1g、42.5g趋于上升，说明喷涂的位置越接近自由端，减振涂层试验件的阻尼性能越下降。
- 随着喷涂形状的不同，试验件各阶固有频率变化很小，但最大加速度幅值从小到大依次为长方形、三角形、圆形分别为30.5g、33.5g、37.2g，说明涂层若集中于应力较大的位置，则试验件的损耗因子更大。因此，在减振设计中，喷涂涂层的位置应尽可能喷涂于应力较大的位置。
- 基于迟滞回线研究分析，涂层厚度对阻尼涂层模型的迟滞特性影响较为明显，厚度为0.8mm时，涂层材料的单位耗能最多达到5.74J；填料目数对阻尼涂层模型的迟滞特性影响较小，填料目数为40目时的涂层单位耗能稍优达到了4.01J；填料含量对阻尼涂层模型的迟滞特性影响较为明显，20%的填料下的涂层材料单位耗能5.2J最大，与试验结果吻合。

目录

01 绪论

02 航空液压管道绿色减振涂层制备技术及性能表征

03 阻尼减振涂层减振性能研究

04 阻尼减振涂层降噪性能研究

05 阻尼减振涂层理化性能研究

06 阻尼减振涂层减振机理研究

07 阻尼减振涂层应用研究

08 总结与展望

第七章 阻尼减振涂层应用研究

- ◆ 由本研究第三章以及第五章的结果可知，填料为10目云母粉制得的阻尼减振涂层减振效果最佳，因此本节采用填料为10目云母粉制得的阻尼减振涂层喷涂于5A02铝制和1Cr18Ni9Ti钢制航空管道表面进行减振性能应用研究，其中所用管道外径统一为10MM。



不带减振涂层的真实管道

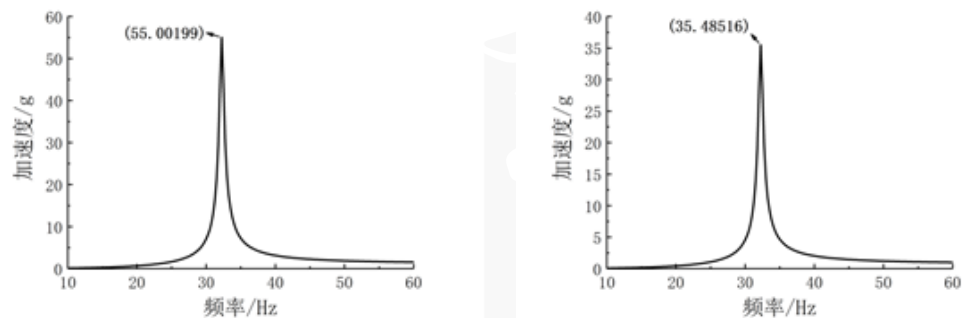


带减振涂层的真实管道



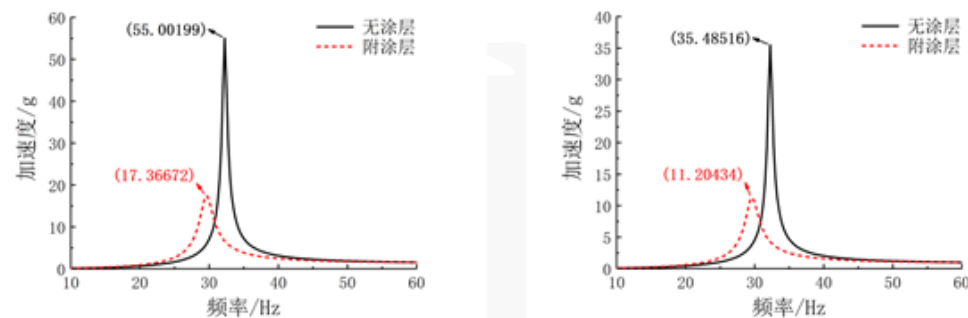
试验现场

第七章 铝制航空管道减振性能应用研究



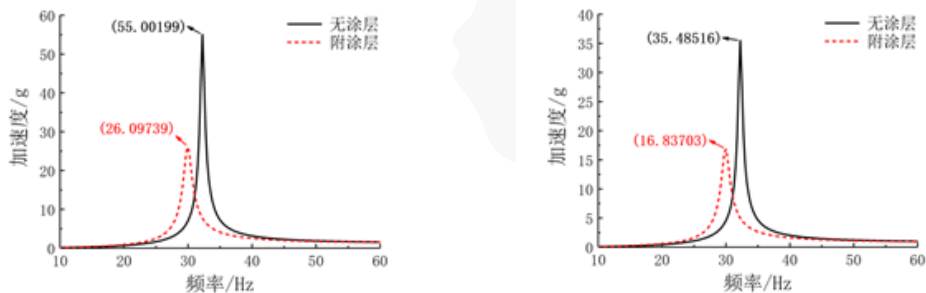
无涂层铝制管道试验件

通过振动信号分析系统测得无涂层铝制管道试验件的振动加速度最大幅值为55.00199g，振动加速度最大有效值为35.48516g。



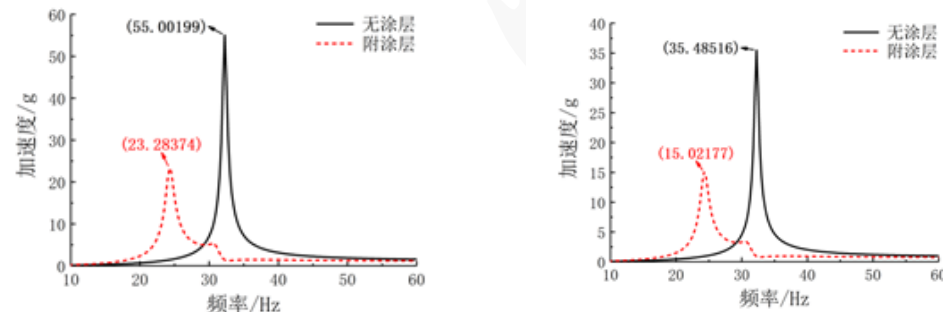
10目含量20%填料的涂层试验件

通过振动信号分析系统测得振动加速度最大幅值为17.36672g，振动加速度最大有效值为11.20434g。涂层的减振效果为68.4%。



10目含量40%填料的涂层试验件

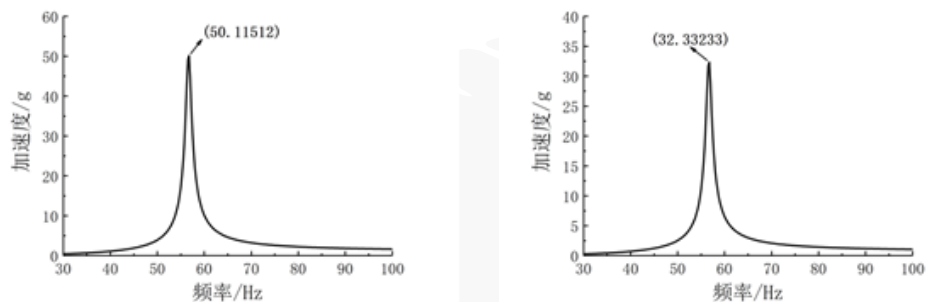
通过振动信号分析系统测得振动加速度最大幅值为26.09739g，振动加速度最大有效值为16.83703g。涂层的减振效果为52.6%。



10目含量60%填料的涂层试验件

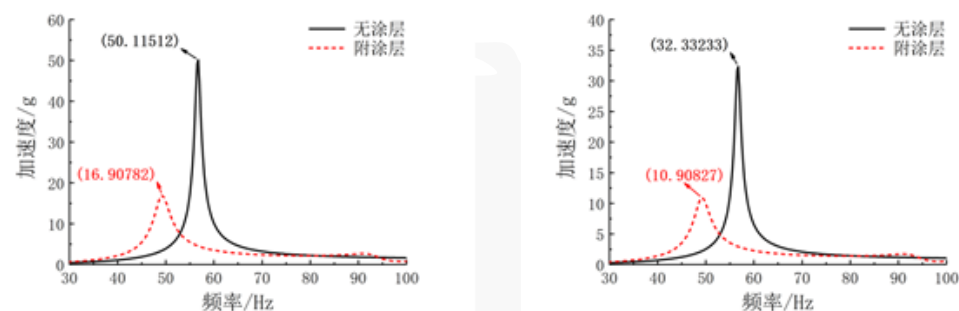
通过振动信号分析系统测得振动加速度最大幅值为23.28374g，振动加速度最大有效值为15.02177g。涂层的减振效果为57.7%。

第七章 钢制航空管道减振性能应用研究



无涂层钢制管道试验件

通过振动信号分析系统测得振动加速度最大幅值为50.11512g，振动加速度最大有效值为32.33233g。



10目含量20%填料的涂层试验件

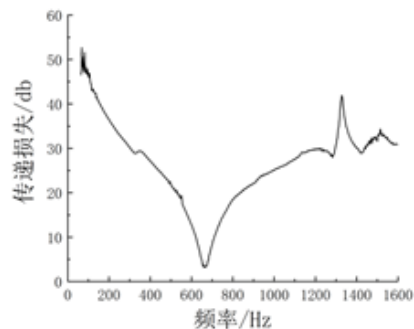
通过振动信号分析系统测得振动加速度最大幅值为16.90782g，振动加速度最大有效值为10.90827g。涂层的减振效果为66.3%。

试验总结：阻尼减振涂层应用于5A02铝制航空管道上时，随着填料含量的增加，涂层的减振性能呈现先降低后增强的趋势。这可能是因为，当填料含量增加时，一方面云母粉在基体树脂中的分散难度增大，且容易出现相互搭接的现象，另一方面填料含量增大导致树脂中的高分子聚合物在整个涂料中占比减少，因此导致涂层的减振性能降低。当填料含量增加至60%时，相比填料含量为40%时涂层的减振性能又有所提升，这可能是因为随着填料含量的增加，涂层耗能的主要因素由树脂中高分子聚合物与聚合物间的摩擦逐步转变为聚合物与填料间的摩擦以及填料与填料间的摩擦。

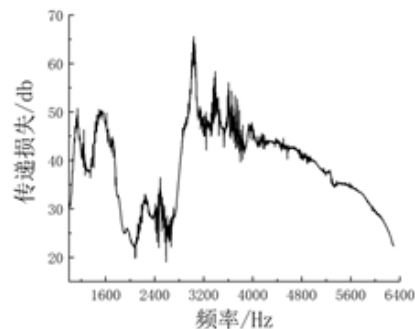
该结果进一步表明，阻尼减振涂层减振性能主要是由树脂中高分子聚合物之间的摩擦耗能、高分子聚合物与填料之间的摩擦耗能以及填料与填料之间的摩擦耗能组成。填料含量的增加无可避免地会降低高分子聚合物在体系中的占比，减少高分子聚合物之间的摩擦耗能，但是会增加高分子聚合物与填料之间的摩擦耗能以及填料与填料之间的摩擦耗能，涂层最终表现出的阻尼减振性能由高分子聚合物之间摩擦耗能的减少与高分子聚合物与填料之间摩擦耗能以及填料与填料之间摩擦耗能的增加共同决定。

本研究中的阻尼减振涂层应用于1Cr18Ni9Ti钢制航空管道上相较于5A02铝制航空管道上，其减振效果略微降低了2.1%，但其振动幅值较铝管降低了0.4589g，振动有效值较铝管降低了0.29607g。

第七章 铝制航空管道降噪性能应用研究



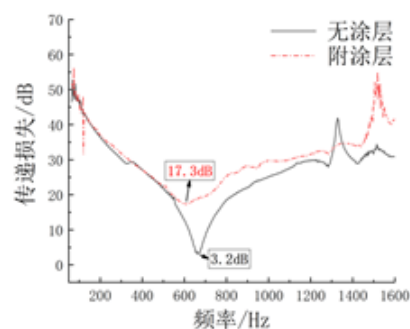
低频



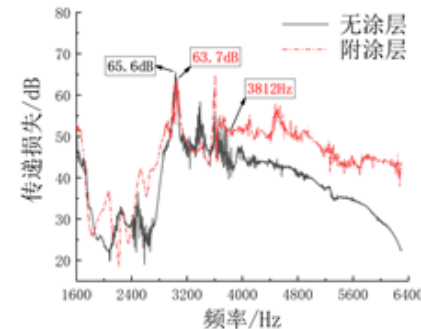
高频

无涂层铝制管道试验件

由本研究第四章的结果可知，填料为400目云母粉制得的减振涂层降噪性能最佳，因此采用填料为400目云母粉制得的阻尼减振涂层喷涂于5A02铝制和1Cr18Ni9Ti钢制航空管道表面进行降噪性能应用研究，其中所用管道外径统一为10MM。



低频



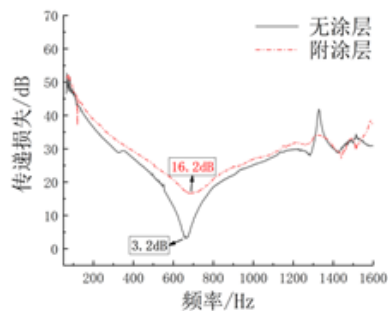
高频

400目含量20%填料的涂层试验件

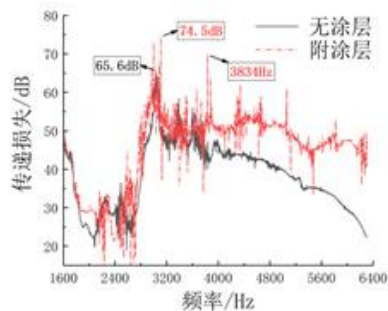
经计算在低频平均传递损失为30.7dB，相较无涂层26.70dB提升了4dB，约为2.5倍，且传递损失的最小值增大了14.1dB，约为25.7倍，有效地抑制了弹性波。

在高频的3812Hz—6400Hz频段较为明显地增强了传递损失，平均传递损失为47.83dB，相较于无涂层37.80dB提升了10.03dB，约为10.1倍，但传递损失的最大值下降了1.9dB，约为1.5倍。

第七章 铝制航空管道降噪性能应用研究



低频

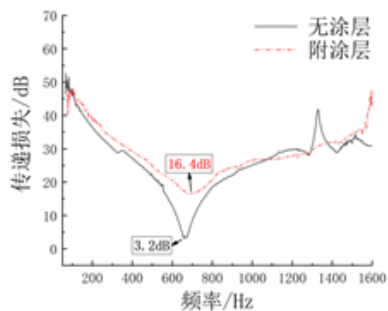


高频

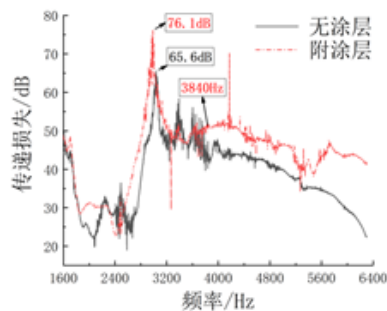
400目含量40%填料的涂层试验件

经计算在低频平均传递损失为29.3dB，相较于无涂层26.70dB提升了2.6dB，约为1.8倍，且传递损失的最小值增大了13dB，约为20倍，有效地抑制了弹性波。

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，平均传递损失为49.10dB，相较于无涂层37.75dB提升了11.35dB，约为13.6倍，且传递损失的最大值增加了8.9dB，约为7.8倍。



低频



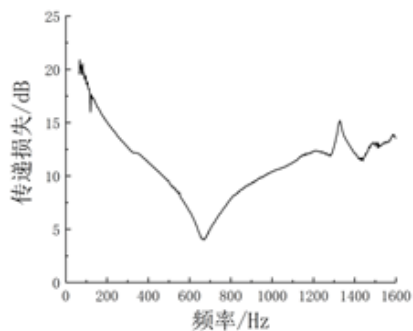
高频

400目含量60%填料的涂层试验件

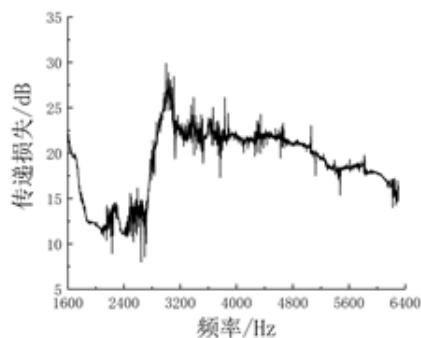
经计算在低频平均传递损失为29dB，相较于无涂层26.70dB提升了2.3dB，约为1.7倍，且传递损失的最小值增大了13.2dB，约为20.9倍，有效地抑制了弹性波。

在高频的3840Hz—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，平均传递损失为45.98dB，相较于无涂层37.72dB提升了8.26dB，约为6.7倍，且传递损失的最大值增加了10.5dB，约为11.2倍。

第七章 钢制航空管道降噪性能应用研究



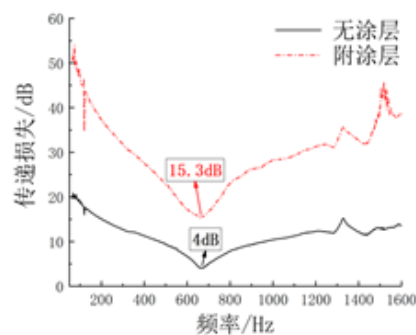
低频



高频

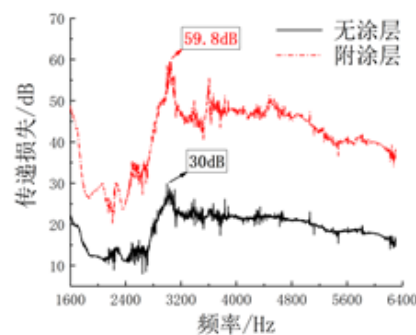
无涂层钢制管道试验件

填料为400目固体含量为20%云母粉制得的阻尼减振涂层在5A02铝制航空管道上降噪效果最好，因此为保证其在1Cr18Ni9Ti钢制航空管道上同样实用，因此进行无涂层和填料为400目固体含量20%的云母粉制得的阻尼减振涂层喷涂于1Cr18Ni9Ti钢制航空管道降噪性能测试。



低频

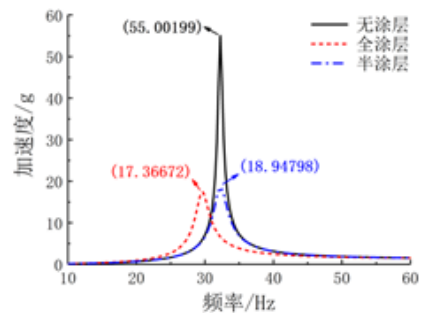
400目含量20%填料的涂层试验件



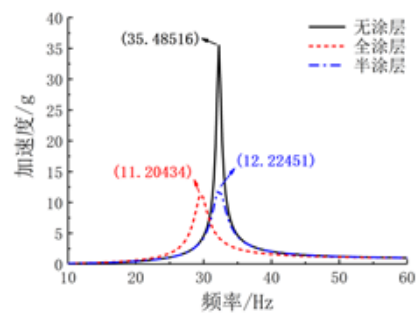
高频

在低频的大部分频段均增强了传递损失，隔声性能有了较大的提升，经计算低频平均传递损失为29.6dB，相较于无涂层11.2dB提升了18.4dB，约为69.2倍，最小值增大了11.3dB，约为13.5倍，有效地抑制了弹性波。在高频全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，在该频率段平均传递损失为41.47dB，相较于无涂层18.95dB提升了22.52dB，约为178.6倍，且传递损失的最大值增加了29.8dB，约为955倍。

第七章 铝制航空管道拓扑优化验证



幅值

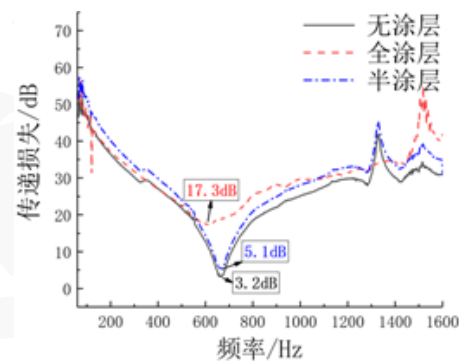


有效值

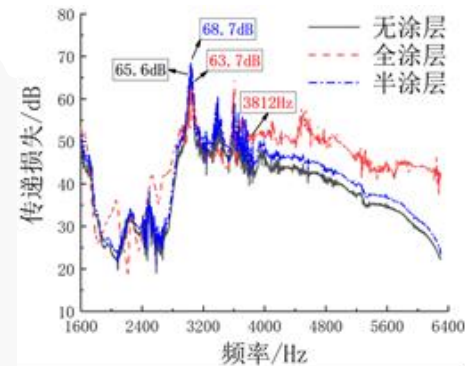
拓扑优化减振性能测试

将60克10目的云母粉与300ml丙烯酸乳液混合，其余原料均按照参数配比，制备出填料为10目且固体含量为20%的阻尼减振涂料。将阻尼减振涂料半喷涂（从约束端开始喷涂管道的一半长度部分）。通过振动信号分析系统测得喷涂阻尼减振涂层试验件的振动加速度最大幅值为18.94798g，振动加速度最大有效值为12.22451g。

在半喷涂减振涂层后试验件振动加速度相较于全喷涂有略微的提升，经计算半喷涂的减振效果为65.6%，相较于全喷涂的68.4%减振效果下降了2.8%，与本研究的仿真结果基本吻合。



低频



高频

拓扑优化降噪性能测试

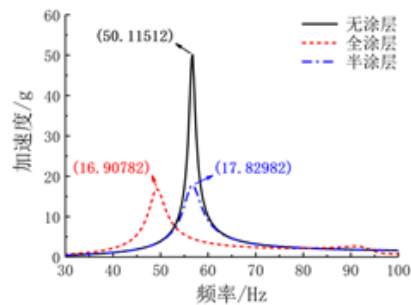
将60克400目的云母粉与300ml丙烯酸乳液混合，其余原料均按照参数配比，制备出填料为400目且固体含量为20%的阻尼减振涂料。将阻尼减振涂料半喷涂（从约束端开始喷涂管道的一半长度部分）。

半喷涂在低频部分相较于全喷涂降噪性能降低较多，经计算半喷涂涂层后低频平均传递损失为29.76dB，相较于无涂层26.70dB提升了3.06dB，约为2.0倍，相较于全涂层30.7dB降低了0.94dB，约为1.2倍。传递损失的最小值相对于无涂层提升了1.9dB，约为1.5倍，相对于全涂层降低了12.2dB，约为16.6倍，低频阶段的降噪性能大打折扣。

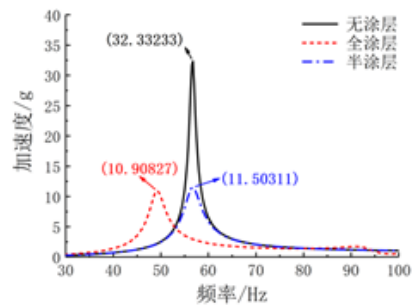
半喷涂在高频部分3812Hz—6400Hz平均传递损失为40.19dB，相较于无涂层37.80dB提升了2.39dB，约为1.7倍，相较于全喷涂47.83dB降低了7.64dB，约为5.8倍。

因此，拓扑优化后涂层的降噪性能相较于全涂层时出现较大下降。

第七章 钢制航空管道拓扑优化验证



幅值

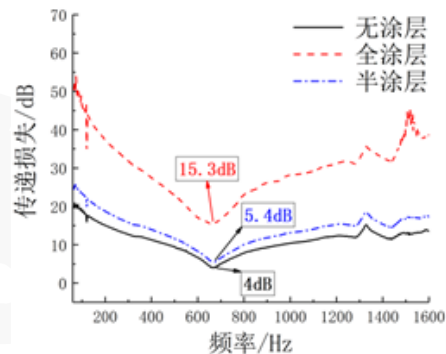


有效值

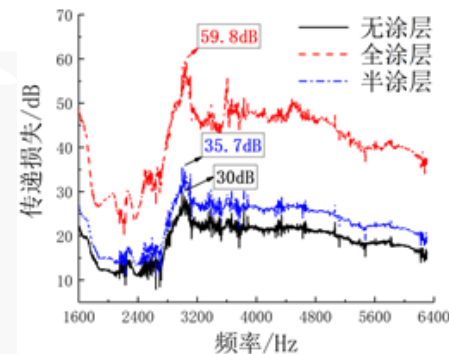
拓扑优化减振性能测试

将60克10目的云母粉与300ml丙烯酸乳液混合，其余原料均按照参数配比，制备出填料为10目且固体含量为20%的阻尼减振涂料。将阻尼减振涂料半喷涂（从约束端开始喷涂管道的一半长度部分）。通过振动信号分析系统测得喷涂阻尼减振涂层试验件的振动加速度最大幅值为17.82982g，振动加速度最大有效值为11.50311g。

在半喷涂减振涂层后试验件振动加速度相较于全喷涂有略微的提升，经计算半喷涂的减振效果为64.4%，相较于全喷涂的66.3%减振效果下降了1.9%，与本研究的仿真结果基本吻合。



低频



高频

拓扑优化降噪性能测试

将60克400目的云母粉与300ml丙烯酸乳液混合，其余原料均按照参数配比，制备出填料为400目且固体含量为20%的阻尼减振涂料。将阻尼减振涂料半喷涂（从约束端开始喷涂管道的一半长度部分）。

半喷涂在低频部分相较于全喷涂降噪性能降低较多，经计算半喷涂涂层后低频平均传递损失为14.07dB，相较于无涂层11.20dB提升了2.87dB，约为1.9倍，相较于全涂层29.6dB降低了15.53dB，约为35.7倍。传递损失的最小值相对于无涂层提升了1.4dB，约为1.4倍，相对于全涂层降低了9.9dB，约为9.8倍，低频阶段的降噪性能大打折扣。

半喷涂在高频全段平均传递损失为22.96dB，相较于无涂层18.95dB提升了4.01dB，约为2.5倍，相较于全喷涂41.47dB降低了18.51dB，约为71倍。

因此，拓扑优化后涂层的降噪性能相较于全涂层时出现较大下降。原因为采用拓扑优化的方式破坏了涂层的整体性，有效作用面积降低。

第七章 本章小结

本章基于本研究前面章节的内容，进一步研究了减振涂层在5A02和1Cr18Ni9Ti两种航空管道上的应用，得出的主要结论如下

- 在减振方面，可发现阻尼减振涂层应用于航空管道上时，随着填料含量的增加，涂层的减振性能呈现先降低后增强的趋势。该结果表明，涂层减振性能主要是由树脂中高分子聚合物之间的摩擦耗能、高分子聚合物与填料之间的摩擦耗能以及填料与填料之间的摩擦耗能组成。涂层最终表现出的减振性能由高分子聚合物之间摩擦耗能的减少与高分子聚合物与填料之间摩擦耗能以及填料与填料之间摩擦耗能的增加共同决定。此外，涂层应用于1Cr18Ni9Ti钢制航空管道上时减振效果为66.3%，应用于5A02铝制航空管道上时减振效果为68.4%；
- 在降噪方面，阻尼减振涂层在低频时，由于5A02铝本身良好的隔声性能，因此对铝制航空管道的隔声性能提升较小，而对于1Cr18Ni9Ti钢制航空管道的隔声性能提升较大，平均传递损失能提高约20dB，传递损失最小值均得到了较大的提升，在低频时有效地抑制了弹性波；此外，涂层对于提升高频平均传递损失明显，尤其在1Cr18Ni9Ti材质航空管道上的提升显著，提升了22.52dB，约为178.6倍。传递损失的最大值的提升效果同样良好，能提升10dB以上；
- 采用拓扑优化，半喷涂减振涂层后试验件振动加速度相较于全喷涂有略微的提升，阻尼性能略微下降，5A02铝制航空管道减振效果下降2.8%，1Cr18Ni9Ti钢制航空管道减振效果下降1.9%；
- 采用拓扑优化，半喷涂减振涂层后涂层的降噪性能下降剧烈，其低频和高频的平均传递损失下降至全喷涂的20%—50%，主要原因是破坏了涂层的完整性。因此若对降噪性能有较高要求，仍需全喷涂阻尼减振涂层以保证性能。

目录

01 绪论

02 航空液压管道绿色减振涂层制备技术及性能表征

03 阻尼减振涂层减振性能研究

04 阻尼减振涂层降噪性能研究

05 阻尼减振涂层理化性能研究

06 阻尼减振涂层减振机理研究

07 阻尼减振涂层应用研究

08 总结与展望

第八章 总结

1 提出了一种阻尼减振涂层材料的制备方法

通过调研国内外管道振动控制技术，以水性丙烯酸聚氨酯为溶液，云母粉作为填料，配以流平剂、消泡剂、成膜助剂等多功能试剂，通过原料配比、水性乳液配制、填料分散混合以及多功能助剂与成膜四步创新设计研制了一种绿色减振涂料以及开发了相应的制备工艺流程。

2 分析了制备所得涂层材料的减振性能

通过振动信号分析系统以及半功率带宽法等研究试样样片的减振性能，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增加而减弱的趋势；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，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；当填料为高含量（60%）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降低，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其减振性能逐步上升；在本研究中，当填料为大尺寸（10目）、涂层厚度为0.25mm时减振涂层的性能为最佳，减振效果为60.92%。

3 分析了制备所得涂层材料的降噪性能

通过阻抗管降噪试验系统以及传递函数法研究试样样片的降噪性能，隔声性能方面，在低频段，减振涂层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目云母粉固体含量为20%时值得的减振涂层对于提升最小隔声传递损失效果最佳；在高频段，隔声性能表现良好的有填料为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；吸声性能方面，喷涂减振涂层后，试样的吸声性能只有略微的提升，但也未能达到0.3的吸声系数，因此制得的减振涂层在吸声性能方面表现不够。

提出了一种针对所研制涂层材料的仿真方法

通过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，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；通过拓扑分析研究了涂层面积、位置、形状对试验件振动特性的影响规律，探讨了阻尼涂层在试验件表面布局的优化形式，在涂层面积方面，随着面积的增加，减振性能逐渐增强，但最大幅值的减小速度逐渐降低；在喷涂位置方面，喷涂的位置越接近自由端，减振涂层的阻尼性能越差；在涂层形状方面，最大加速度幅值从小到大依次为长方形、三角形、圆形，说明涂层应集中于应力较大的位置；涂层厚度、填料含量对阻尼涂层模型的迟滞特性影响较为明显，填料目数对阻尼涂层模型的迟滞特性影响较小。

分析了制备所得涂层材料的理化性能


通过外观、干燥时间、耐盐水性能、耐油性能以及附着力性能等重点理化性能指标对涂层进行了分析研究，涂料外观状态良好，整体呈乳白色，实测表干时间为120min，实测实干时间为48h，减振涂层的附着力性能等级为1级，涂层符合耐盐水性能（3%NaCl水溶液）要求以及耐液压油性能要求。

6 进一步研究了涂层材料的实际应用

进一步研究了减振涂层在5A02和1Cr18Ni9Ti两种航空管道上的应用，在减振方面，减振涂层在5A02铝制航空管道和1Cr18Ni9Ti钢制航空管道上时减振效果依然优秀，为68.4%与66.3%，涂层最终表现出的减振性能由高分子聚合物之间摩擦耗能的减少与高分子聚合物与填料之间摩擦耗能以及填料与填料之间摩擦耗能的增加共同决定；在降噪方面，低频时对1Cr18Ni9Ti材质航空管道的隔声性能提升较大，平均传递损失能提高约20dB，高频时对1Cr18Ni9Ti材质航空管道上的提升显著，提升22.52dB，约为178.6倍；采用拓扑优化，半喷涂减振涂层后管道阻尼性能略微下降，5A02铝制航空管道减振效果下降2.8%，1Cr18Ni9Ti钢制航空管道减振效果下降1.9%；采用拓扑优化，半喷涂减振涂层后涂层的降噪性能下降剧烈，其低频和高频的平均传递损失下降至全喷涂的20%—50%。

减振涂层的设计以及机理还需要开展进一步的研究工作

在减振涂层的设计方面，本研究只选取了云母粉作为填料进行研究，而石墨、炭黑以及玻璃纤维等因为自身特殊的性能都可以作为填料，而且填料间还可以进行复配；在减振涂层的机理方面，分子动力学可以从微观的角度对减振机理进行较好的描述，阐释如何从分子角度将振动机械能转化为热能或其他能量耗散掉，从而达到减振的目的。



**谢谢，请各位
老师批评指正**