

doi: 10.7690/bgzd.2026.03.006

NiCr₃O₅ 涂层对风洞引射器薄壁结构的振动特性影响

余 鑫, 毛代勇, 魏 志, 杨可朋

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决引射器管道因振动剧烈易产生疲劳裂纹的问题, 研究 NiCr₃O₅ 阻尼涂层对引射器管道薄壁构件振动特性的影响。采用自主研发的便携式超音速火焰喷涂装置, 在风洞引射器管道焊缝处喷涂 NiCr₃O₅ 阻尼涂层, 对涂层前后引射器管道的固有特性、振动响应及阻尼进行试验研究和数值模拟, 并与试验结果进行对比分析。结果表明: NiCr₃O₅ 涂层能提高风洞引射器薄壁结构的阻尼性能, 减缓因气流振动造成的疲劳破坏。

关键词: 引射器管道; 薄壁结构; 减振涂层; 频响函数; 阻尼比

中图分类号: TH142.2 **文献标志码:** A

Effect of NiCr₃O₅ Coating on Vibration Characteristics of Thin-walled Structure of Wind Tunnel Ejector

Yu Xin, Mao Daiyong, Wei Zhi, Yang Kepeng

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The influence of NiCr₃O₅ damping coating on the vibration characteristics of thin-walled components of ejector pipes was studied in order to solve the problem that the ejector pipes are prone to fatigue cracks due to severe vibration. NiCr₃O₅ damping coating was sprayed on the weld seam of the wind tunnel ejector pipe by using a self-developed portable high velocity oxygen fuel (HVOF) spraying device. The natural characteristics, vibration response and damping of the ejector pipe before and after coating were experimentally studied and numerically simulated, and the results were compared with the experimental results. The results show that the NiCr₃O₅ coating can improve the damping performance of the thin-walled structure of the wind tunnel ejector and reduce the fatigue damage caused by the airflow vibration.

Keywords: ejector pipe; thin-walled structure; damping coating; frequency response function; damping ratio

0 引言

某暂冲型引射式跨声速风洞中, 引射器主要是提供气流驱动风洞以及通过引射器喷嘴的高速气流产生低压区, 将试验后的废气吸入重新利用, 从而达到节能增效的目的。引射器为悬臂支撑的薄壁结构, 在风洞试验过程中, 引射器部段的气流扰动严重, 振动剧烈, 定期检修发现引射器连通管的法兰根部、大小头等部位焊缝处陆续出现裂纹。针对引射器管道因振动导致的疲劳裂纹, 传统的处理方式是补焊, 但是根据压力容器补焊原则, 同一部位补焊 3 次以上, 补焊部位的力学性能会显著下降, 且补焊的方法不能起到减振效果, 焊接处会反复出现裂纹。

阻尼涂层减振技术是抑制薄壁构件结构振动的一种有效方式^[1], 其原理是利用涂层颗粒之间的内摩擦, 当硬涂层随主结构一起运动时由于涂层颗粒之间的内摩擦而耗能。众多学者对薄壁结构涂层的模态阻尼及疲劳寿命进行了研究。韩清鹏等^[2]采用

振动梁法对硬涂层材料 TiZrN 的机械特性参数进行辨识测试, 获得硬涂层材料的机械特性参数。Catania 等^[3]研究了涂层材料、厚度和层序对薄壁结构阻尼性能的影响, 发现涂层材料、厚度和层序对阻尼性能分别有何种影响。Cizek 等^[4]研究了冷喷涂、热喷涂及等离子喷涂 3 种层状沉积方式对低碳钢试样疲劳性能的影响, 3 种沉积方式均使试样疲劳相对寿命提高 200% 以上。Cavaliere 等^[5]使用 Ansys 分析 纯镍喷雾颗粒与涂层薄壁疲劳关系, 发现冷喷涂修复有助于增加裂缝结构的整体疲劳寿命, 镍粒子在适宜温度和速度下的冲击可以改善涂层的性能。Petráková 等^[6]研究喷涂 A357 铝合金的机械性能, A357 涂层的整体性能支持了涂层喷涂的可行性, 适用于结构维修。杜广煜等^[7]研究电弧离子镀沉积 NiCrAlY 涂层的阻尼性能, 发现 NiCrAlY 涂层能明显提高样品的阻尼性能。管宇等^[8]在国内首次实现了冷喷涂增材技术在飞机关键主承力结构原位修复的工业级应用, 解决了关键部位裂纹常规

收稿日期: 2024-11-09; 修回日期: 2024-12-09

第一作者: 余 鑫(1994—), 男, 四川人, 硕士。

方法无法修理的核心技术难题。

笔者针对引射器管道因振动剧烈易产生疲劳裂纹的问题,研究 NiCr₃O₅ 阻尼涂层对引射器管道薄壁构件振动特性的影响。采用自主研发的便携式超音速火焰喷涂装置,在风洞引射器管道焊缝处喷涂 NiCr₃O₅ 阻尼涂层,并对涂覆涂层前后引射器管道的固有特性、振动响应及阻尼进行了试验研究和数值模拟。

1 涂层的制备

1.1 试验喷涂装置

为便于在风洞内实施喷涂,笔者设计了便携式超音速火焰喷涂装置,装置内设计有控制系统和适用于现场施工的两轴直角坐标机械手,如图 1 所示。

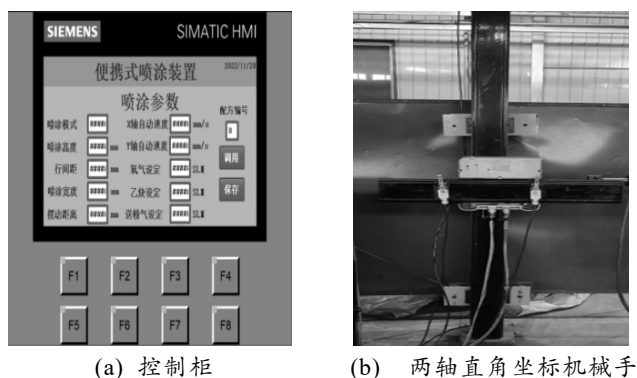


图 1 便携式喷涂装置

控制系统采用西门子 PLC,能够全自动完成喷涂过程。工艺参数采用闭环控制方法,保证工艺的稳定性 and 可重复性。该装置可以对系统的运行状况进行实时监控,并可存储多个设定好的喷涂工艺。

喷枪带有两轴变位机构,具备自动化操作功能。两轴滑架小车通过磁力座固定在平台上,带有喷枪和送粉装置的机械车可以在 Y 向导轨上自动移动, X 向摆动,能够在风洞内高效完成作业,实现喷涂操作。

1.2 涂层制备工艺

涂层的制备工艺步骤: 1) 选用 24 目棕刚玉,在气压为 0.4 MPa 时,对 16 Mn 钢基材进行喷砂处理。表面喷砂的目的是去除影响涂层结合性能的不利因素,如水分、油污和使用介质等。2) 去除基体表面的氧化膜,使表面活化,有利于涂覆材料与基体之间的紧密结合。3) 粗化表面,增加基体结合面积及保证涂层的收缩应力被限制在局部地区。

为了消除工件的水分,提高喷涂时涂层与基体界面的温度,减少基材与涂层材料的热膨胀差异造

成的残余应力,避免由此导致的涂层开裂和改善涂层与基体结合强度,需要对基材预热。预热温度取决于工件的大小和材质以及基材和涂层材料的热膨胀系数等因素,一般控制在 100~150 ℃。

对基材进行喷涂。为保证涂层的质量,须严格控制氧-乙炔比例、喷涂距离、送粉量等喷涂工艺参数,如表 1 所示。

表 1 喷涂工艺参数

工艺	参数	工艺	参数
喷涂距离/mm	100~150	喷涂角度/(°)	90
送粉速度/(g/min)	30~42	氧-乙炔比例	2~2.5

喷涂粉末采用 NiCr₃O₅ 合金,主要由 Ni 和 Cr 组成。该合金在金属材料中具有很高的弹性模量,在振动过程中可以有效减小弹性变形,起到很好的阻尼减振作用。NiCr₃O₅ 阻尼涂层宏观照片如图 2 所示。



图 2 涂层宏观照片

1.3 涂层质量

采用扫描电子显微镜,按照 GB/21649.1-2008 粒度分析,应用图像分析法检测粉末粒径,粉末粒径微观图像及分布范围如图 3 和 4 所示。

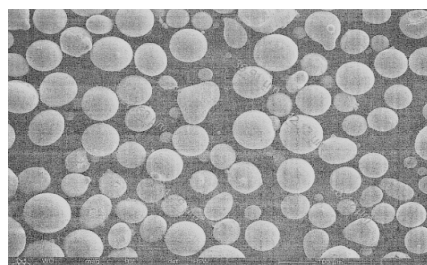


图 3 粉末微观图像

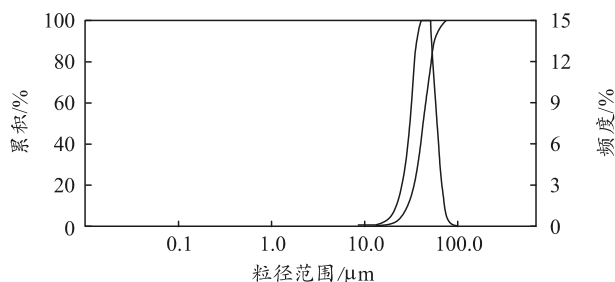


图 4 粉末粒径分布范围

从图 3 和 4 可以看出：原始粉末粒径范围为 11.07~66.51 μm ，平均粒径为 33.92 μm ，外观呈类球形，大小均匀，粒径分布范围窄，便于熔融，使得涂层粘结性好。采用金相显微镜，按照 GB/6462-2005 金属和氧化物覆盖层，厚度测量显微镜法检测涂层厚度，共检测 5 个点位，如图 5 所示。涂层厚度值分别为 138、128、158、116、150 μm ，平均值为 138 μm 。

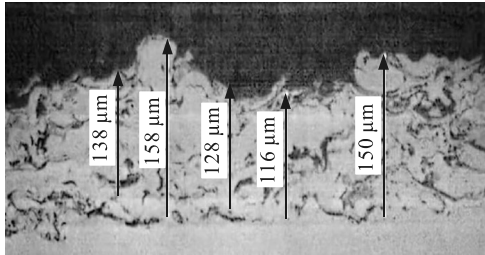


图 5 涂层厚度分布

按照 ASTM E2109-2001 Standard Test，利用金相显微镜检测涂层孔隙率，共检测 3 个位置的图像，孔隙率分别为 1.85%、1.15%、1.04%，平均值为 1.35%。

按照 GB/T8642-2002 热喷涂，采用 TSE504D 万能试验机检测结合强度，横梁位移速率为 0.5 mm/min，对 3 个样品进行室温拉伸，结果如表 2 所示。

表 2 结合强度

样品编号	$R_H/(N/mm^2)$	F_m/N
1	56	2 747
2	38	1 815
3	63	3 075

2 模态测试

2.1 试验数据采集设备

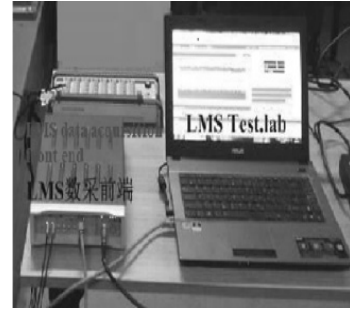
对引射器管道焊缝及附近表面进行喷砂处理，喷涂长度为 280 mm 的 NiCr_3O_5 涂层，分别对涂层涂覆前后引射器管道薄壁构件进行模态测试。

在模态测试中，选用力锤为激励设备，用轻质加速度传感器拾振，LMS 数据采集仪采集振动信号，具体实验设备的选用如表 3 所示。

表 3 系统的主要组成仪器设备

名称	型号	主要性能	参数值
加速度传感器	PCB-352C22	灵敏度/(mv/g) 频率响应/kHz	10 13
力锤传感器	PCB-086D05	灵敏度/(mv/N) 频率响应/kHz	0.23 22
数据采集仪	LMS SCADAS III	8 通道，采样率/kHz 支持多种输入模式	102.4
数采分析软件	LMS Test. lab	在线生成时域波形、频谱、 3 维瀑布图等	

在其喷涂位置布置加速度传感器监测振动信号，数据采集设备及传感器布置方式如图 6 所示。



(a) 数据采集设备



(b) 传感器布置方式

图 6 模态测试系统

2.2 试验步骤

1) 将结构表面均匀打磨，在薄壁焊缝圆周上标记 2 个对称的测点，将加速度传感器布置在测点上，依次使用力锤敲击测点，对同一测点进行 2 次试验，使用 LMS 采集系统对试验数据进行采集。

2) 使用便携式喷涂装置对试验结构进行喷涂，均匀涂覆 NiCr305 涂层，喷涂过程中保证涂层的厚度和均匀性，喷涂前后对比如图 7 所示。



(a) 喷涂前

(b) 喷涂后

图 7 结构喷涂

3) 将加速度传感器布置在与喷涂前相同的 2 个测点上，同样进行 2 次锤击试验以及数据采集。最后对喷涂前后的试验结构模态数据进行分析。

2.3 频响函数分析

频响函数是指系统输出信号与输入信号之比在

频域的表达式。它能够反映系统的频率特性, 即在不同的输入频率下, 系统对输入信号的响应情况。频响函数可以分析薄壁结构在不同频率下的响应特性, 第 1 组试验测点 1 和 2 涂层前后的薄壁结构频响函数如图 8 和 9 所示。

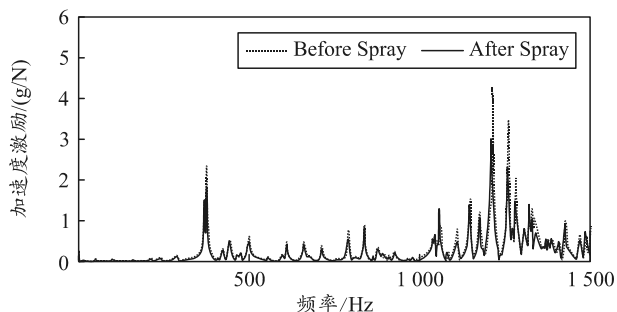


图 8 测点 1 的频响函数

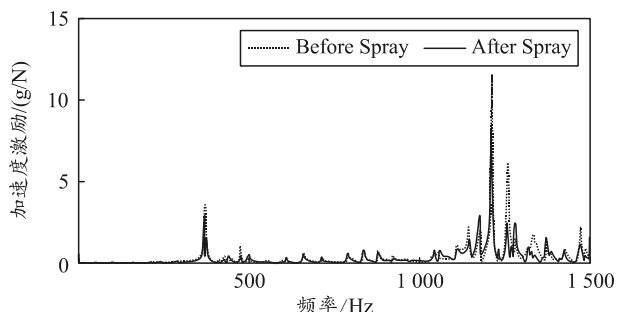


图 9 测点 2 的频响函数

通过频响函数图像可以看出: 薄壁结构在经过喷涂后, 其固有频率略微下降, 固有频率下的频响幅值下降明显。

在频响函数中选取 2 组振幅响应明显的固有频率, 2 组不同测点选取的涂层前后固有频率及幅值如表 4 和 5 所示。

表 4 涂层前薄壁结构在固有频率下的幅值

固有频率	1 阶		2 阶	
	频率/Hz	幅值/(g/N)	频率/Hz	幅值/(g/N)
第 1 组测点 1	375.00	2.35	1 212.50	4.27
第 1 组测点 2	371.88	3.61	1 212.50	11.56
第 2 组测点 1	374.63	3.26	1 208.53	3.98
第 2 组测点 2	372.34	3.43	1 208.53	9.67

表 5 涂层后薄壁结构在固有频率下的幅值

固有频率	1 阶		2 阶	
	频率/Hz	幅值/(g/N)	频率/Hz	幅值/(g/N)
第 1 组测点 1	375.00	1.86	1 209.38	3.02
第 1 组测点 2	368.75	2.97	1 209.38	8.17
第 2 组测点 1	373.00	2.54	1 206.14	3.77
第 2 组测点 2	369.82	3.16	1 206.14	8.18

经分析得到: 第 1 组固有频率平均下降 0.49%, 其幅值平均下降 16.76%; 第 2 组固有频率平均下降 0.23%, 其幅值平均下降 21.5%;

2.4 阻尼比分析

在振动工程中, 阻尼比是一个非常重要的参数, 它描述了结构在振动过程中的能量损失情况。通过计算薄壁结构的阻尼比, 可以评估结构的振动特性, 为涂层喷涂优化提供指导, 提高结构的振动稳定性和可靠性。

多模态拟合法是一种基于模态分析的方法, 可以用于计算结构的多个模态的阻尼比。该方法的基本思想: 将结构的多个模态的振动响应函数进行拟合, 通过拟合参数来计算阻尼比。假设试验件的振动响应函数可以表示为若干个模态的叠加, 其中第 i 个固有频率下的振动响应函数为:

$$H_i(f) = \frac{A_i}{(\omega_i^2 - f^2) + 2j\omega_i\zeta_i f} e^{i\phi_i} \quad (1)$$

式中: ω_i 为第 i 个模态的固有频率; ζ_i 为第 i 个模态的阻尼比; A_i 和 ϕ_i 分别为第 i 个模态下的振幅和相位。

对于试验数据中的每阶模态, 可以将上述多阶模态方程联立求解, 得出涂层前后薄壁结构阻尼比变化结果如表 6 所示, 涂层后的平均阻尼比提高了 19.3%。

表 6 涂层前后薄壁结构阻尼比的变化

固有频率	涂层前阻尼比	涂层后阻尼比	变化率/%
第 1 组测点 1	0.005 8	0.006 6	13.8
第 1 组测点 2	0.022 8	0.027 6	21.1
第 2 组测点 1	0.012 5	0.015 4	23.2
第 2 组测点 2	0.019 9	0.023 7	19.1

3 仿真分析

基于风洞薄壁结构和涂层的材料参数, 采用 ANSYS 软件来进行有限元分析, 首先建立风洞引射器管道的简化模型并进行网格划分, 如图 10 所示。

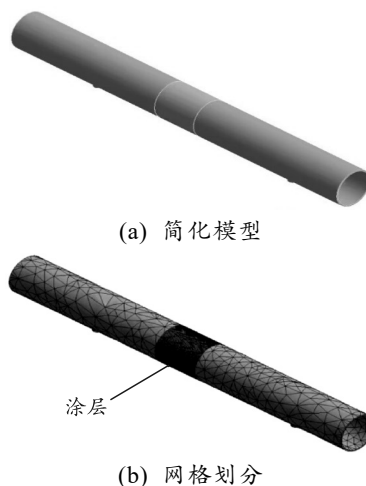


图 10 带有涂层薄壁结构的有限元模型

分别对涂层前后风洞引射器管道的固有频率和振型进行了仿真，固有频率的有限元结果与实验结果对比如表 7 所示，涂覆涂层前后薄壁结构的模态振型如图 11 和 12 所示。

表 7 涂层前后薄壁结构固有频率对比 Hz

固有频率	涂层前		涂层后	
	有限元	实验	有限元	实验
1 阶	326.66	374.63	342.97	373.00
2 阶	1 218.30	1 208.53	1 224.30	1 206.14

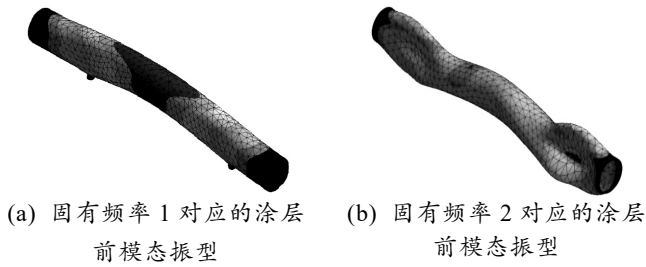


图 11 基于有限元法计算的涂层前薄壁结构模态振型

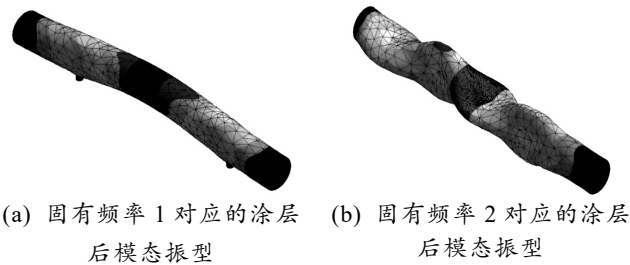


图 12 基于有限元法计算的涂层后薄壁结构模态振型

从有限元结果可以看出：薄壁结构在经过喷涂后，固有频率略微上升，固有频率下的频响幅值下降明显。

经分析得到：第 1 组固有频率的幅值平均下降 14.24%；第 2 组固有频率的幅值平均下降 17.6%。有限元结果与实验结果具有较好的一致性。

4 结论

1) 便携式超音速火焰喷涂装置应用于风洞薄壁结构，能保证涂层的厚度、结合强度以及均匀性。

2) 通过对比涂覆 NiCr3O5 涂层前后引射器薄壁结构的频响函数和阻尼比，可以看出涂覆 NiCr3O5 涂层后引射器薄壁结构振动响应的 2 组固有频率明显降低，幅值平均下降了 21.5%，有限元结果与实验结果具有较好的一致性。

3) 涂覆 NiCr3O5 涂层后引射器薄壁结构的阻尼比显著增加，阻尼比平均提高了 19.3%。NiCr3O5 涂层提高了风洞引射器薄壁结构的阻尼性能，可减缓因气流振动造成的疲劳破坏。

参考文献：

- [1] 张月, 杨建, 宋华. 薄壁构件硬涂层阻尼减振的数值与实验研究进展[J]. 辽宁科技大学学报, 2020, 43(6): 457-462.
- [2] 韩清鹏, 孙伟, 齐飞. 硬涂层材料特性参数辨识[J]. 噪声与振动控制, 2012(6): 150-153.
- [3] CATANIA G, STROZZI M. Damping Oriented Design of Thin-Walled Mechanical Components by Means of Multi-Layer Coating Technology[J]. Coatings, 2018, 8(2): 73.
- [4] CIZEK J, MATEJKOVA M, DLOUHY I, et al. Influence of Cold-Sprayed, Warm-Sprayed, and Plasma-Sprayed Layers Deposition on Fatigue Properties of Steel Specimens(Article)[J]. Thermal Spray Technology, 2015, 24(5): 758-768.
- [5] CAVALIERE P, SILVELLO A. Finite element analyses of pure Ni cold spray particles impact related to coating crack behaviour[J]. Surface Engineering, 2017: 1-8.
- [6] PETRÁKOVÁ K, KONDÁS J, GUAGLIANO M. Mechanical performance of cold-sprayed a357 aluminum alloy coatings for repair and additive manufacturing[J]. Thermal Spray Technology, 2017, 26(8): 1888-1897.
- [7] 杜广煜, 谭祯, 巴德纯, 等. 电弧离子镀制备 NiCrAlY 涂层及其阻尼性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(5): 727-730.
- [8] 管宇, 陈亮, 曹奇凯. 基于增量考核的飞机延寿方法与应用[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 226-241.