

动车组用扩口式导管高频振动与冲击工况下的密封性能实验分析

王建峰¹ 李国超¹ 崔友江¹ 姜常尊¹ 金超¹ 杨杰^{2*}

1 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 2 西南交通大学

DOI:10.32629/etd.v6i5.16902

[摘要] 在高速动车领域中,导管的密封性能对整个动力系统、空气循环系统等起着至关重要的作用。但在运行过程中,不可避免的受到高频振动与冲击的影响,管接头锥形部分与导管扩口面之间也会产生微动疲劳现象,导致密封性能大幅下降。本研究针对 $\phi 15$ 、 $\phi 18$ 与 $\phi 28$ 三种尺寸的导管(直通管、弯管)分别进行振动与冲击试验,同时在传统的扩口式导管上进行改进研发新一代结构,针对振动试验。结果显示,对于错位安装的铝管,渗漏量出现一定程度的增加,而对于其他安装方式,渗漏量趋于平稳;针对冲击试验,分析不同安装方式下的密封性能,发现所有方式的渗漏量均出现一定程度的下降。

[关键词] 高频振动; 冲击; 渗漏; 扩口式导管

中图分类号: TV697.3+2 **文献标识码:** A

Experimental Analysis on Sealing Performance of Flared Tube Conduits for EMU under High-Frequency Vibration and Impact Conditions

Jianfeng Wang¹ Guochao Li¹ Youjiang Cui¹ Changzun Jiang¹ Chao Jin¹ JieYang^{2*}

1 CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Co., Ltd.

2 Southwest Jiaotong University

[Abstract] In high-speed rail systems, the sealing performance of conduits is critical for maintaining the integrity of power and air circulation systems. However, during operation, these components inevitably endure high-frequency vibrations and impacts, which induce microfatigue between the conical sections of pipe joints and conduit flared surfaces, resulting in significant deterioration of sealing effectiveness. This study conducted vibration and impact tests on three conduit sizes ($\phi 15$, $\phi 18$, and $\phi 28$) including straight-through and bent configurations. At the same time, improvements were made to the traditional flared tube design to develop a new generation of structure. The vibration test results indicated that misaligned aluminum conduits exhibited increased leakage rates, while other installation methods maintained stable leakage levels. Impact tests revealed that all installation configurations demonstrated reduced leakage quantities.

[Kew words] High-frequency vibration; Impact; Seal; Flared Tube Conduits

引言

动车组导管在运行过程中,机身与发动机振动严重^[1-3]。

Gao等人^[4]总结了管道接头在振动疲劳载荷下的不同失效模式^[5-10]。Lei等人^[11]建立双层欧拉梁模型;Paimushin等人^[12]揭示了由于固定截面的横向收缩而研究的杆悬臂部分末端的横向振动幅度显著增加的影响;Cao等人^[13]研究了开槽钢板多螺栓胶合木连接(MGCSSP)的失效模式和力学特性。

目前对于导管振动与冲击失效的研究大都只针对常规管路进行分析,而对于高强度的冲击振动试验的研究非常少,因此迫切需要展开这方面的研究工作。本研究不同于航空扩口式导管1mm的厚度,对 $\phi 15$ 、 $\phi 18$ 的扩口式导管向内加厚至1.5mm, $\phi 28$ 的加厚至2mm,将常规使用的卡扣式钢管替换为铝制扩口管,同

时对不同振动冲击参数下的渗漏量进行对比分析。

1 材料和试验

试验台:具备模拟冲击工况和长寿命工况能力的振动试验台,型号:ES-50W-445。传感器:包括加速度传感器等,用于实时监测试验过程中的各项振动参数。数据采集系统:能够对传感器采集的数据进行准确、快速的记录和分析。连接管路及配件:满足试验压力和流量要求的液压管路、接头、密封件等。

(1)冲击工况,GJB150.18A,每轴正反向各3次;将试验台参数设置为符合GJB150.16A要求的模拟长寿命工况参数,三方向功率谱密度设置为 $1.6-4.8(m/s^2)^2/Hz$,频率范围为15-2000 Hz。启动试验台,使样品分别在X、Y、Z三方向上进行模拟长寿命运行试验,持续时间为10小时。在试验过程中,每隔1小时,通

过空压机配合增压泵测试1Mpa条件下的管路气密性情况,并观察样品的运行状态,记录振动的振幅、频率、加速度等数据。

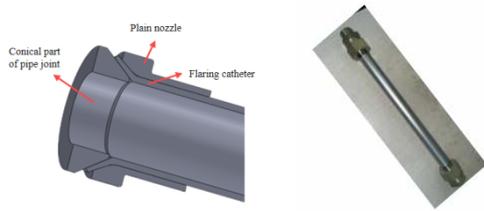


图1 (a) 导管剖面图 (b) 导管实物图

(2) 模拟长寿命, GJBI50. 16A, 三方向功率谱密度 $1.6\text{--}4.8\text{ (m/s}^2)^2/\text{Hz}$, 频率 $15\text{--}2000\text{Hz}$, 每方向10小时。启动试验台, 将试验参数设置为符合GJBI60. 18A要求的冲击工况参数。优先采用10g加速度进行试验, 若无渗漏, 则增加加速度至15g, 重复试验, 如还不出现渗漏, 继续增加至渗漏现象出现或加速度达到20g。

控制试验台使样品每轴正向进行冲击动作, 每次冲击完成后, 通过数据采集系统记录下气密性、冲击振幅、加速度等相关参数。

2 试验分析

2.1 试验准备

实验开始前针对每一根扩口式管子、管接头进行分类编号处理, 为后续管子出现渗漏的情况做准备, 以确定渗漏位置, 并为后续分析渗漏原因做准备。

2.2 振动数据分析

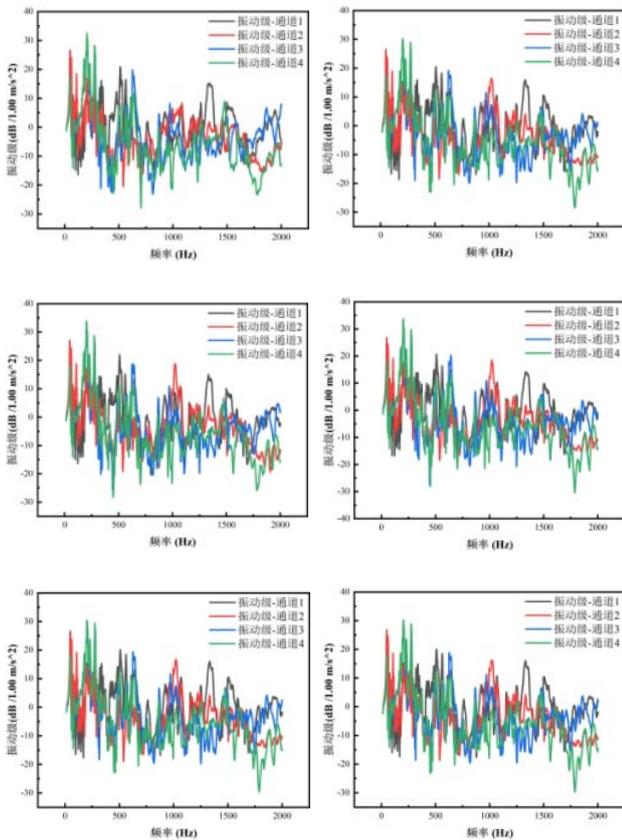


图2 随机振动数据分析-X方向

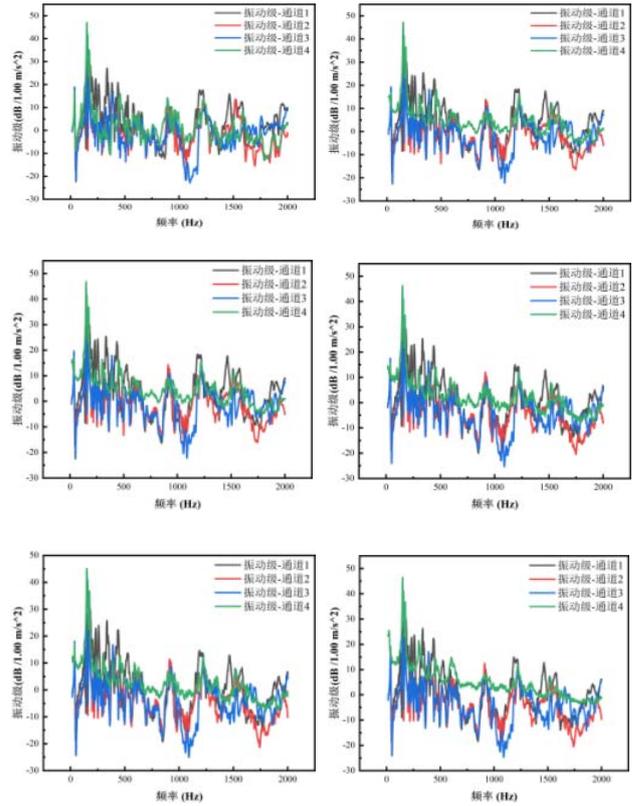


图3 随机振动数据分析-Y方向

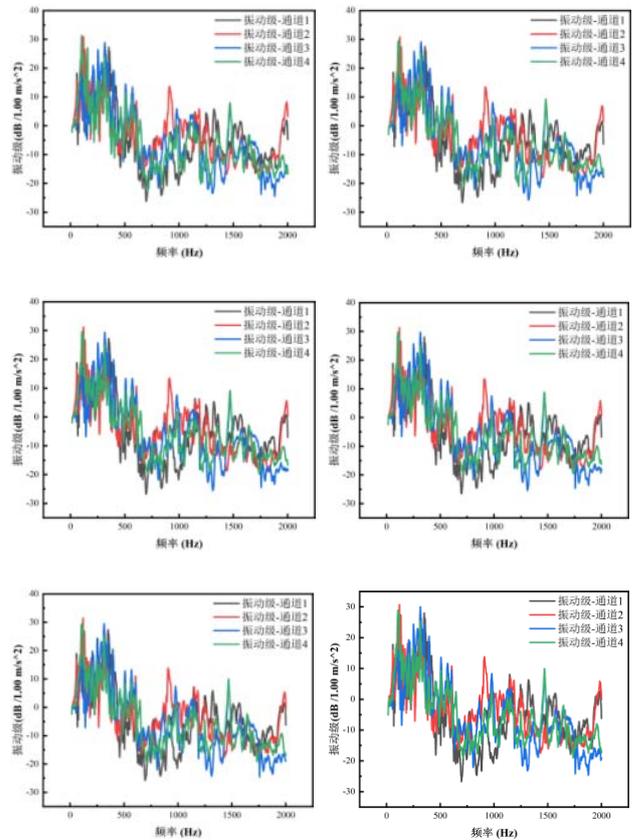


图4 随机振动数据分析-Z方向

几乎所有图中, 通道4在0-200Hz左右都有尖锐且高幅值的峰值(常超40dB), 远高于其他通道, 可能因共振放大了振动。通道3(蓝色): 波动最显著, 通道3的曲线在全频段(尤其500-1500 Hz)波动幅度大, 峰值和谷值差异明显。比如在部分图中, Y向的1000Hz附近通道3会出现-20dB的谷值, 而相邻频率又有明显峰值。通道1(灰色)与通道2(红色): 相对“温和”但有差异。通道1(灰色): 整体振动级略高于通道2, 在1500Hz后有时会出现小峰值(如部分图中2000Hz附近)。通道2(红色): 振动级相对最低且曲线更“平缓”。

2.3冲击数据分析

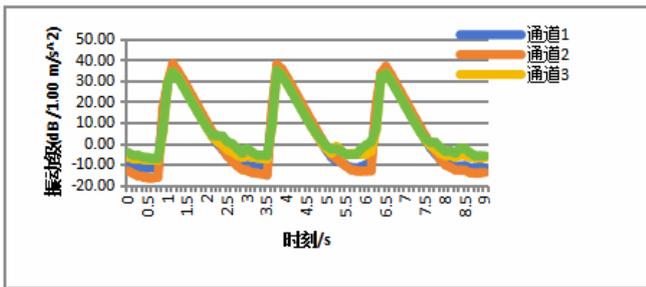


图5 冲击数据分析-X方向

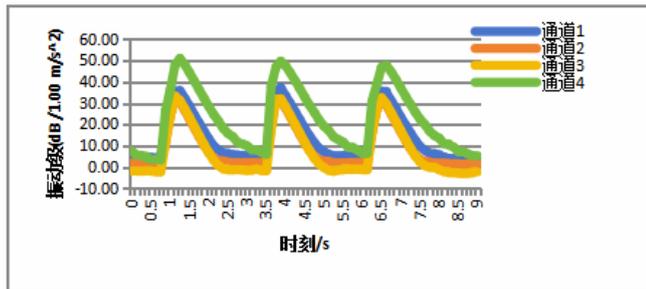


图6 冲击数据分析-Y方向

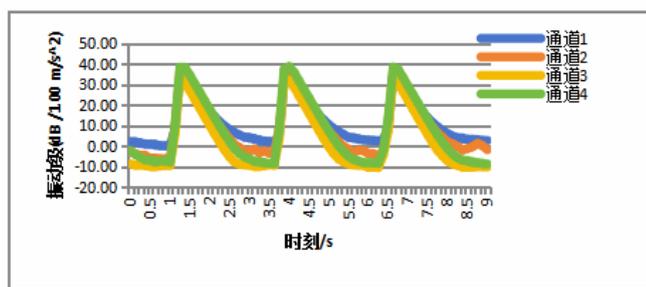


图7 冲击数据分析-Z方向

上述各图均呈现周期性冲击响应: 每个周期(约3-4s)内, 先出现一个负向冲击谷值(振动级为负, 对应加速度反向冲击), 接着快速攀升至正向冲击峰值(约35-40dB), 随后衰减回落。这种规律说明: 试验采用周期性正反冲击激励(如冲击台按固定周期施加X方向拉压/碰撞载荷), 设备/结构在每个周期重复“受拉-受压”或“碰撞-回弹”的力学响应。

2.4气体渗漏数据统计

每组试验结束后, 对管路进行15min保压检测, 数据显示, 降压最大值为0.9kPa/15min, 满足要求。

表1 气体渗漏统计

		初始数据(kPa)	结束数据(kPa)	压降(kPa/15min)	
1	试验前数据	错位安装铝管	1005.6	1005.4	0.2
		正常安装铝管	1044.3	1043.7	0.7
		钢管	1087.7	1086.8	0.9
2	Z向随机振动后	错位安装铝管	1006.7	1006.3	0.4
		正常安装铝管	981.2	980.8	0.3
		钢管	1006.8	1006.5	0.3
3	X向随机振动后	错位安装铝管	1030.6	1030.2	0.4
		正常安装铝管	1020.4	1020.0	0.4
		钢管	988.8	988.4	0.4
4	Y向随机振动后	错位安装铝管	998.2	997.8	0.4
		正常安装铝管	1004.5	1004.2	0.3
		钢管	978.1	977.9	0.2
5	Z向冲击振动后	错位安装铝管	967.8	967.7	0.1
		正常安装铝管	974.3	974.1	0.2
		钢管	959.2	958.8	0.4
6	X向冲击振动后	错位安装铝管	967.7	967.6	0.1
		正常安装铝管	984.4	984.7	0
		钢管	971.3	971.4	0
7	Y向冲击振动后	错位安装铝管	981.4	981.4	0
		正常安装铝管	984.5	984.4	0.1
		钢管	977.9	977.9	0

从压降数据(单位: kPa/15min)可看出不同安装方式、不同振动条件下的渗漏差异显著。试验前, 钢管压降0.9最高, 正常安装铝管0.7次之, 错位安装铝管0.2最低, 此时钢管渗漏最明显; Z向随机振动后, 三者压降缩小至0.3-0.4, 差异减小; X向随机振动后, 三者压降均为0.4, 渗漏一致性显著提升; Y向随机振动后, 钢管压降0.2最低, 正常安装铝管0.3, 错位安装铝管0.4。冲击振动后, 渗漏整体减弱, 多数压降≤0.2。冲击中X、Y向常出现无渗漏情况, 且试验前钢管渗漏最突出, 振动后渗漏差异缩小。

3 结论

(1) 振动与冲击对密封性能影响存在差异: 随机振动可缩小不同安装方式导管的渗漏差异, 如X向随机振动后错位铝管、正常铝管、钢管压降均为0.4kPa/15min; 冲击振动对渗漏抑制更显著, 多数压降≤0.2kPa/15min, X、Y向冲击后部分组合(如X向正常铝管、钢管)甚至出现0压降无渗漏, 表明冲击工况更有利于维持密封稳定性。

(2) 安装方式对初始渗漏影响显著, 振动后差异弱化: 试验前钢管渗漏最突出(压降0.9kPa/15min), 正常铝管次之(0.7kPa/15min), 错位铝管最优(0.2kPa/15min); 经随机振动与冲击后, 三者渗漏差异大幅缩小, 冲击后部分安装方式(如Y向错位铝管、钢管)无渗漏, 说明振动工况可改善不同安装结构的密封一致性。

(3) 通道振动特性呈现明显方向差异与周期性规律: X向冲击时各通道振动同步性差, Y向部分通道(1-3)协同、通道4独立, Z向各通道同步性最优; 所有方向冲击均呈周期性响应(周期

3-4s), 振动级峰值稳定在35-40dB, 反映冲击激励强度稳定, 且导管振动传播与同步性受方向影响显著。

(4) 导管加厚改进与实验条件具备有效性: 实验中将 $\phi 15$ 、 $\phi 18$ 导管加厚至1.5mm、 $\phi 28$ 加厚至2mm, 结合符合GJB标准的实验参数(如15-2000Hz频率、 $1.6-4.8(m/s^2)^2/Hz$ 功率谱密度), 所有组次15min保压压降最大值仅0.9kPa, 满足密封要求, 证明导管结构改进与实验方法可靠, 可用于导管密封性能研究。

[参考文献]

[1] Yan T, Li P, Niu W. Research on modeling technology of aircraft hydraulic system based on AMESim[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2183(1): 012007.

[2] Wang, Shaoping, Mileta Tomovic, and Hong Liu. Commercial Aircraft Hydraulic Systems: Shanghai Jiao Tong University Press Aerospace Series[M]. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2015.

[3] Yueming, Zhao, et al. Design and analysis of variable pressure control of aircraft hydraulic system[C]. Proceedings of the 2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). Harbin, China: IEEE, 2020.

[4] Peixin G A O, Tao Y U, Jiao W, 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.

[5] Li X, Wang S. 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.

[6] Shang Y, Liu X, Jiao Z, et al. An integrated load sensing valve-controlled actuator based on power-by-wire for aircraft structural test[J]. Aerospace Science and Technology, 2018,

77: 117-128.

[7] Li Z, Gao P, Zhao D, et al. Fault diagnosis and location of the aero-engine hydraulic pipeline based on Kalman filter[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(12): 1687814017742811.

[8] Gomes J P, Rodrigues L R, Leao B P, et al. Using degradation messages to predict hydraulic system failures in a commercial aircraft[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 15(1): 214-224.

[9] Green, William L. Aircraft hydraulic systems: An introduction to the analysis of systems and components[M]. United States: John Wiley & Sons Inc, 1986.

[10] Lu C, Wang S, Wang X. A multi-source information fusion fault diagnosis for aviation hydraulic pump based on the new evidence similarity distance[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 71: 392-401.

[11] Lei K, Miao L, Zheng H, et al. Metro monolithic track bed vibration characterization[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2024, 24(21): 2450244.

[12] Paimushin V N, Shishkin V M, Chumakova S F. Forced Bending Vibrations of a Plane Rod Fixed on a Rigid Support Element of Finite Length Under the Action of an External Transverse Force Applied to Its Free End[J]. Mechanics of Composite Materials, 2024, 60(3): 501-522.

[13] Cao J, Du J, Zhang H, et al. Mechanical properties of multi-bolted Glulam connection with slotted-in steel plates[J]. Construction and Building Materials, 2024, 433: 136608.

作者简介:

王建峰(1979--), 汉族, 江苏徐州人, 本科, 高级工程师, 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 从事动车组制动系统研发工作二十余年。