

# 动车组用扩口式导管旋转弯曲疲劳及有限元模拟分析研究

李国超<sup>1</sup> 王建峰<sup>1</sup> 赵波<sup>1</sup> 王云<sup>1</sup> 赵青滨<sup>1</sup> 杨杰<sup>2\*</sup>

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.v6i5.16906

**[摘要]** 当前扩口式导管因其便捷性已广泛应用于各类飞机中低压管道中,但其在旋转弯曲疲劳下表面形貌的演化分析因其难以预测性尚未有解决方案,而最终导致导管渗漏的关键原因就是旋转弯曲疲劳导致的微动磨损行为。本研究首次将航空扩口式导管应用于高速动车组,主要通过分析扩口式导管不同旋转弯曲疲劳次数后对其表面进行原位检测,分析其表面形貌的演化规律,同时通过分析其微动磨损行为。结果表明,在管子接触面上出现了两种磨损形式:孔洞、划痕,对应了径向磨损和切向磨损两种微动磨损类型,在高接触压力区域和扩口面最外侧微动磨损最严重,同时通过有限元模拟分析旋弯过程中扩口面的受力情况。

**[关键词]** 扩口式导管; 旋转弯曲疲劳; 微动磨损; 有限元模拟

**中图分类号:** TN814 **文献标识码:** A

## Research on Rotational Bending Fatigue of Expanded Tube Connectors for EMU and Finite Element Simulation Analysis

Guochao Li<sup>1</sup> Jianfeng Wang<sup>1</sup> Bo Zhao<sup>1</sup> Yun Wang<sup>1</sup> Qingbin Zhao<sup>1</sup> JieYang<sup>2\*</sup>

1 CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Co.

2 Southwest Jiaotong University

**[Abstract]** Currently, flared ducts have been widely used in low- and medium-pressure aircraft pipelines due to their convenience. However, the evolution of surface morphology under rotational bending fatigue remains unaddressed due to its unpredictability, with micro-wear behavior caused by such fatigue being identified as a key factor leading to duct leakage. This study represents the first application of aviation flared ducts in high-speed trains. Through in-situ analysis of duct surfaces after multiple cycles of rotational bending fatigue, we investigated surface morphology evolution patterns and micro-wear behaviors. Results revealed two wear forms at contact surfaces: pores and scratches corresponding to radial and tangential micro-wear types. The most severe micro-wear occurred in high-pressure contact areas and the outermost flared surfaces. Finite element simulations further analyzed stress conditions during rotational bending processes.

**[Key words]** Flared ducts; Rotational bending fatigue; Fretting wear; Finite element simulation

### 引言

扩口式导管通常选用旋压工艺进行生产<sup>[1-3]</sup>,徐<sup>[4]</sup>等人研究确定了关键装配误差的安全范围,为实际装配提供了指导依据;王<sup>[5]</sup>等人通过对扩口接头锥面进行开槽,以提高扩口式导管与管接头锥面接触部分的密封性能。

张<sup>[6]</sup>等人针对航空TA18无扩口导管旋转弯曲疲劳试验中;张<sup>[7]</sup>等人解决航空液导导管旋转弯曲疲劳S/N曲线缺乏工程经验和试验数据,提出了一种试验应力分组方法;何<sup>[8]</sup>等人提高了航空导管组件旋转弯曲疲劳试验加载的准确性;张<sup>[9]</sup>等人通过对无扩口式导管进行高频旋转弯曲疲劳试验,发现疲劳裂纹起源于导管外壁与管套的连接区域。

目前也有一些研究人员针对微动磨损行为展开一系列研究,如刘顺等人<sup>[10]</sup>展示了7075铝合金在干摩擦以及三种法向载荷下的微动和滑动磨损性能对比研究,周<sup>[11]</sup>等人探究了不同温度(25、100、175和250℃)下2A70铝合金微动摩擦磨损特性,Zhang<sup>[12]</sup>等人通过沉积-氮化复合策略实现了Cr-N-Fe冶金界面和CrN涂层的同时形成。

本研究不同于传统的航空扩口式导管,为配合高速动车的气体运输,在原有的基础上对导管壁进行了加厚处理,以提高管壁本身的承载与密封能力,因此,本研究针对18mm管径的扩口式导管,分析其在0次、1w次、25w次、100w次、1000w次旋弯次数下密封面的形貌演化情况,并对旋弯过程展开有限元模拟分析

其受力情况。

1 材料与试验方法

1.1 材料

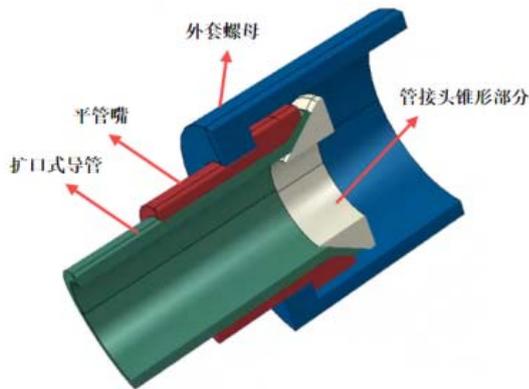
本研究针对扩口式导管选取5A02铝合金材料进行分析,5A02以Al-Mg-Mn为基体,以其良好的耐腐蚀性、中等强度、优异的成形性和焊接性能而著称<sup>[13-15]</sup>。表1为元素组成。

表1 5A02元素组成

Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Cu	Al
2.0~2.8	0.15~0.4	0.15~0.4	≤0.25	≤0.40	≤0.10	余量

1.2 扩口式导管结构

扩口式导管主要由扩口导管、管接头、平管嘴、外套螺母四部分组成。如图1所示,本研究主要针对扩口式导管与管接头锥形部分的接触面旋转弯曲疲劳演化情况进行分析,为避免实验的偶然性,每种工况均进行三组对照试验。



(a)



(b)

图1 扩口式导管结构(a)示意图(b)实物图

1.3 旋转弯曲疲劳参数

调试应力应变情况,将上述电桥连接电脑,利用静态测试软件,用手转动偏心盘(与轴承连接的部分),调节信号在-25到25(1/4σs)呈正弦波动。旋转弯曲疲劳载荷频率为35HZ,φ18扩口式导管选取75N\*m扭矩进行装配。

2 试验与分析

2.1 旋压成形(初始表面形貌分析)

旋压成形作为扩口式导管制造的关键步骤,直接影响其表面形貌及后续疲劳性能。实验中采用高精度旋压设备对管材进行加工,并利用三维表面形貌仪对成形后的表面进行扫描分析。以下为对旋压成形后的扩口管路表面粗糙度及表面形貌的分析。

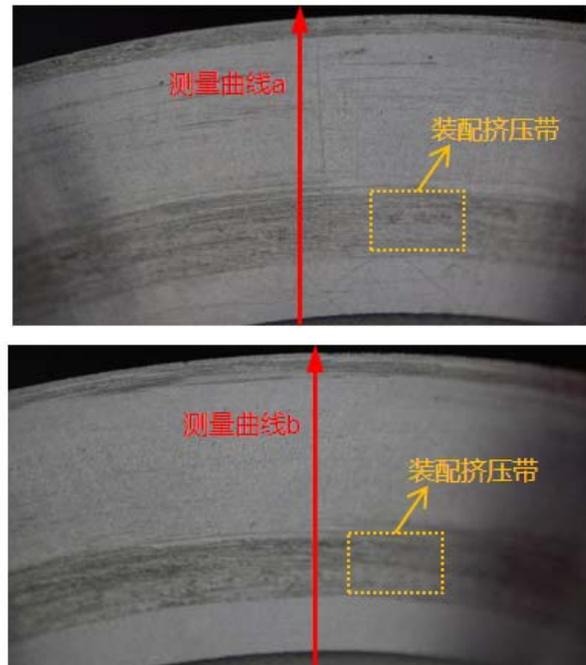


图2 旋压成形后表面形貌

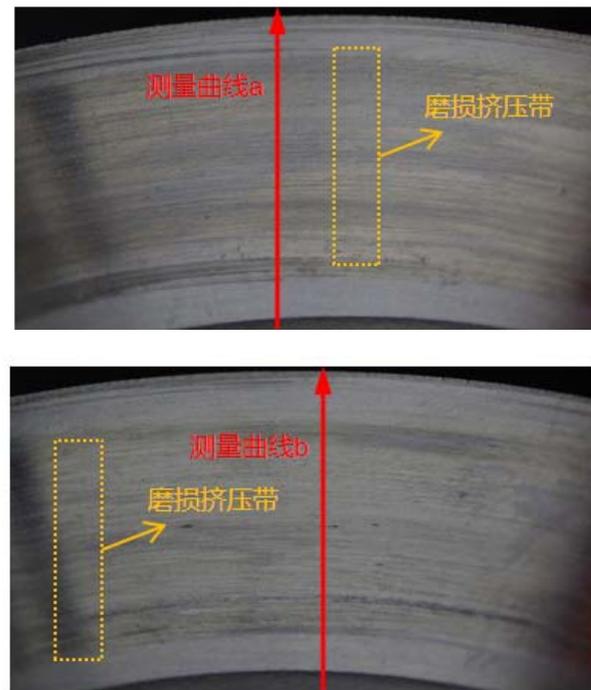


图3 旋弯1w次后表面形貌

2.2 旋转弯曲疲劳演化

(1) 初步阶段 (1w)

试验结果表明, 在旋弯次数为1w次时, 分析扩口面磨损情况, 表明出现大片的磨损挤压带。而bd曲线由于在旋弯疲劳过程中反复受到挤压, 使得表面被压平; 不同于ac曲线, 这是因为旋压成形过程引入了不均匀的残余应力(CRS), 随着旋弯疲劳过程产生的微小振动, CRS出现不同程度的释放, 最终形成不同程度的变形。

(2) 强化阶段 (25w)



图4 旋弯25w次后表面形貌

试验结果表明, 在旋弯次数为25万次的强化阶段, 表面形貌起伏明显增加, 整体轮廓趋于一致, 表面粗糙度明显增大。磨损带在该阶段明显加深, 表面相对更“凸起”、粗糙。同时, 通过观察扩口面形貌可以发现, 表面出现少量磨坑以及部分大片剥落情况, 这是由于磨损强化, 结合表面旋压成形的不均匀, 导致部分区域出现较为明显的应力集中, 最终产生破坏。

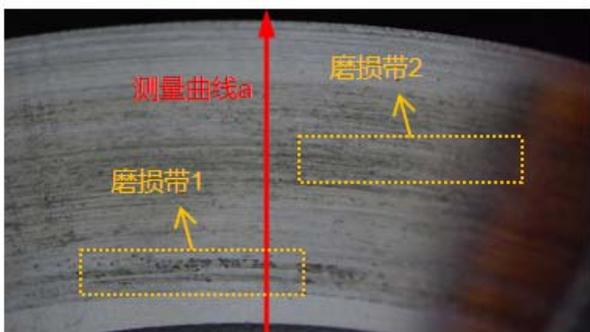


图5 旋弯100w次后表面形貌

(3) 稳定阶段 (100w)

试验结果表明, 在旋弯次数为100w次时, 此阶段四条曲线呈现出较好的一致性。根据曲线的高低差, 可以明显的区分两条磨损带, 分别位于靠近根部和距根部2/3位置处。根部位置是由于管接头的锥形部分挤压并在此处产生应力集中, 而距根部2/3处是由于平管嘴挤压导致, 这一位置也是扩口管密封的关键位置, 因而受微动行为影响更为严重。

(4) 二次强化阶段 (1000w)

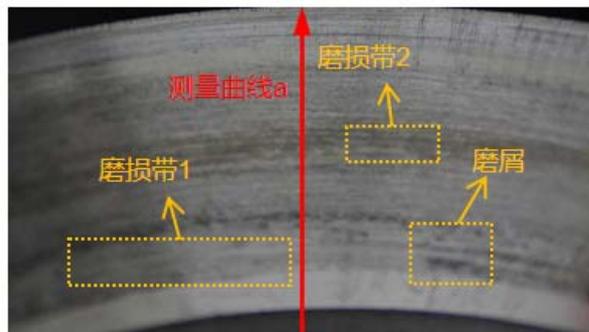
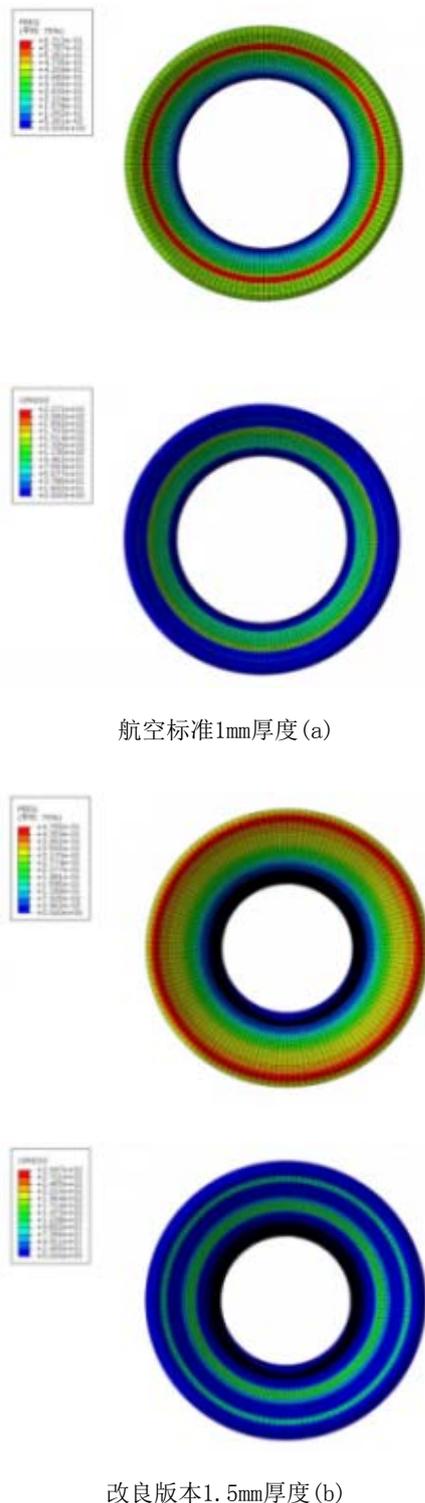


图6 旋弯1000w次后表面形貌

试验结果表明, 在旋弯次数为1000w次时, 相较于之前的阶段, 粗糙度呈现出二次上升现象。造成这一现象的原因是残余应力释放的不均匀性, 同时在这一阶段可以观察到明显的两条磨损带, 磨屑的堆积也更加明显。

2.3 有限元模拟

25%  $\sigma_s$  旋转弯曲强度



航空标准1mm厚度 (a)

改良版本1.5mm厚度 (b)

图7 有限元模拟分析 (a) 航空标准1mm厚度扩口面分析及管接头面应力及塑性应变分析; (b) 改良版本1.5mm厚度扩口面分析及管接头面应力及塑性应变分析)

航空标准中 $25\sigma_s$ 旋转弯曲强度用于检测管路是否满足应用标准, 改良后的管路可以更好地提高密封性能, 接触压力提升29.52%, 塑性变形减少24.68%。

### 3 结论

(1) 旋压成形会导致成形表面存在均匀性问题。

(2) 旋转弯曲疲劳演化中粗糙度曲线可分为四个阶段: 初步阶段-强化阶段-稳定阶段-二次强化阶段, 每个阶段均具备不同的特性。

(3) 微动磨损导致扩口接触面出现不同深度的划痕, 同时在扩口面上呈现出两条不同程度的磨损带, 并生成点坑。

(4) 有限元模拟结果显示改良版的铝制扩口管密封带宽度和密封强度性能均出现一定程度的上升。

(5) 为高速动车采用扩口式导管提供了一定的理论依据, 推动了动车轻量化发展。

### 【参考文献】

[1]Quigley E, Monaghan J. Metal forming: an analysis of spinning processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 103(1): 114-119.

[2]Kalpakjian S, Rajagopal S. Spinning of tubes: a review [J]. Journal of applied metalworking, 1982, 2(3): 211-223.

[3]Music O, Allwood J M, Kawai K. A review of the mechanics of metal spinning[J]. Journal of materials processing technology, 2010, 210(1): 3-23.

[4]徐锐. 装配误差对航空扩口导管连接密封性能及疲劳的影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.

[5]王勇超, 陈迪, 彭景, 等. 航空扩口式管接头结构优化研究试验[J]. 机械研究与应用, 2023, 36(2): 29-32.

[6]张凌云, 傅焱, 何建冬, 等. 应变片位置的应变水平对旋转弯曲疲劳试验的影响[J]. 机床与液压, 2023, 51(17): 135-140.

[7]张存娣, 付凤仪. 航空液压导管旋转弯曲疲劳S/N曲线测试及拟合方法[J]. 中国航空, 2022, (24): 26-29.

[8]何建冬, 王永健, 包惠莉, 等. 旋转弯曲疲劳试验中调心轴承对导管附加载荷的影响[J]. 品牌与标准化, 2022, (4): 81-83.

[9]张凌云, 周帅, 赵天章, 等. 钛合金无扩口导管接头旋转弯曲疲劳试验与断口分析[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(3): 258-262+268.

[10]刘顺, 张坡, 逢显娟, 等. 面接触扭转摩擦试验机研制及微动滑动磨损对比研究[J/OL]. 润滑与密封, (2025-06-30). [2025-10-16].

[11]周俊豪, 褚兆龙, 李波, 等. 2A70铝合金高温切向微动摩擦磨损特性研究[J/OL]. 摩擦学学报, (2025-3-17). [2025-10-16].

[12]Zhang H, Liang Y, Wang P, et al. One-step construction of CrN coating and Cr-N-Fe metallurgical interface via deposition-nitriding strategy for enhanced fretting wear resistance of 40CrNiMo[J]. Wear, 2025, 580-581: 206247.

[13]Wu S, Liu C, Zhou K, et al. Corrosion behavior of 2A12 and 5A02 aluminum alloy in typical marine atmosphere environment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 9403-9412.

[14]Liu J,Xu X,Peng M,et al.Numerical simulation and experimental study on push-pull-rotate-integrated bending forming of 5A02 aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2025,137(11):6091-6106.

[15]Li X,Xu X,Fan Y,et al.Local electrically assisted necking and thickening technology for 5A02 aluminum alloy tube[J].

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2022,119(9):6017-6028.

### 作者简介:

李国超(1991--),男,汉族,山东青岛人,本科,中车青岛四方机车车辆股份有限公司,副高级工程师,研究方向:动车组制动系统。