

HXd1 机车受电弓弓角裂纹故障分析与解决方案

吕阶军, 赵颖, 董慧卿

(中车株洲电力机车有限公司 电气设备分公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 受电弓是安装在电力机车上从接触网上集取电流的电器部件, 其中弓角与碳滑板构成受电弓的弓头并直接与接触网接触, 稳定的弓头外形轮廓是与接触网良好接触受流的前提。实际使用中弓角长期受接触网系统频繁的冲击、振动而发生裂纹或断裂, 造成弓头外形轮廓变化或异常从而引发弓网故障。根据故障现象, 主要从弓角受力仿真和微观晶相来分析故障原因并提出解决方案, 提高了机车运行的安全性。

关键词: 受电弓; 弓角裂纹; 晶相检查; HXd1 机车

中图分类号: U269.6; U264.3⁺4 **文献标识码:** A
doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.03.025

HXd1 机车受电弓是一种铰接式的机械构件, 它通过绝缘子安装于电力机车车顶, 受电弓弓头升起后与接触网接触, 从接触网上集取电流并通过车顶母线传送到车内供机车使用。

弓头由弓角、碳滑板构成, 为框架结构, 其上表面外形轮廓与接触网截面轮廓匹配, 弓角处于弓头两端用于车辆经过接触线岔、锚段关节时将接触网平滑引入至碳滑板上表面。作为受电弓安全运行的关键零部件, 对弓角裂纹现象、规律、原因进行分析很有必要。本文主要从弓角受力仿真和微观晶相来分析故障原因并提出解决方案。

1 弓角裂纹故障统计

受电弓与接触网分属 2 个独立的振动系统, 车辆运行中受电弓的弓头与接触网保持连续接触受流, 其中弓角长期受接触网系统频繁的冲击、振动而发生裂纹或断裂。弓角裂纹或断裂后降低弓角强度且改变了外形轮廓, 造成弓网匹配异常从而引发弓网故障。

HXd1 机车受电弓自 2013 年上线运行以来, 弓角裂纹或断裂共计 25 起, 故障率为 8%, 裂纹或断裂部位均发生在弓角弯管工艺孔处。弓角裂纹故障覆盖不同运用公里数, 且故障率随运用公里数增加而增加。

2 弓角裂纹或断裂的影响

弓角位于弓头的两端, 其作用是保证受电弓的碳滑板在通过两条交叉接触网线时, 能够平滑地过渡到碳滑板上。接触网拉出值为 ± 300 mm, 碳滑板长度为 1 250 mm, 因此大部分情况下接触网在碳滑板上表面滑行而不会与弓角接触。弓角弯管工艺孔位于弯管底部, 工艺孔处弯管开裂或者断裂, 短时间内弓角轮廓外形并不会立即改变, 接触网仍然不受影响地从弓角上过渡, 能够保证受电弓的正常使用。若故障弓角未及时处理, 弓角则会因轮廓外形变形损伤接触网甚至引发弓网故障。

3 弓角裂纹分析

3.1 弓角制造与断裂失效

弓角为不规则的圆弧空间框架结构, 整体采用高塑性、优良焊接性的碳素钢部件组焊而成, 弓角表面镀锌镍的热处理用于防锈蚀。弓角的滑板托架、连接板、盖板采用 Q235B 钢板冲压而成, 弯管采用 $\varnothing 20 \times 1.5$ 规格的无缝钢管 St35 (20#) 弯制而成, 见图 1。

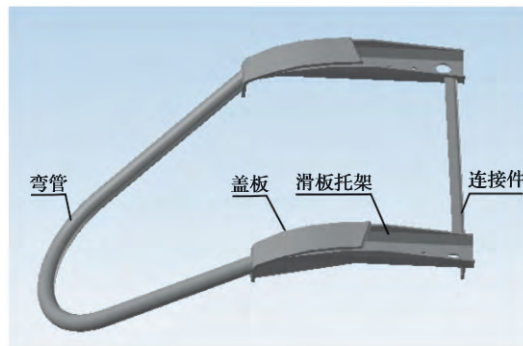


图 1 弓角示意图

考虑到焊接工艺性, 弯管两端采用非封闭方式焊接在盖板上, 保证焊后弯管内部烟尘扩散, 同时避免弯管封闭式气体焊后热胀冷缩造成焊缝气孔。弓角整体镀锌镍时, 开放式的弯管两端会流入电镀液、清洗液, 为此在弯管底部增加 $\varnothing 10$ mm 的电镀工艺孔, 以便电镀液、清洗液顺利排出。

受电弓运行中出现弓角弯管工艺孔处裂纹或断裂的失效现象, 失效的弓角使用周期均在寿命周期内, 见图 2。



图2 弓角弯管断裂

3.2 弓角受力仿真分析

一般正线运行中, 接触网在受电弓的碳滑板范围之内运动, 仅在机车过线岔时, 弓角会引导接触网平滑过渡到碳滑板上, 防止发生钻弓现象。因此, 正线运行中, 弓角弯管并不承受外力, 主要受自身重力和振动作用。机车经过线岔时, 弓角弯管将承受接触网的冲击和摩擦力作用。

受电弓线路测试数据表明, 接触网对弓角的冲击力远大于摩擦力作用。为此, 建立如下弓角模型, 并模拟过线岔时弓角的受力, 进行力学仿真计算。在弓角弯管上, 水平方向和垂向均加载 300 N 作用力 (受电弓线路试验中监测到的最大接触网冲击力), 同时弓角滑板托架分别加载滑板自重 15 N。弯管工艺孔位置应力为 20.8 MPa, 弓角最大应力 110.4 MPa, 小于弯管材料许用的屈服强度 215 MPa, 见图 3、图 4。理论计算表明, 受电弓弓角结构设计能够满足现场使用要求。

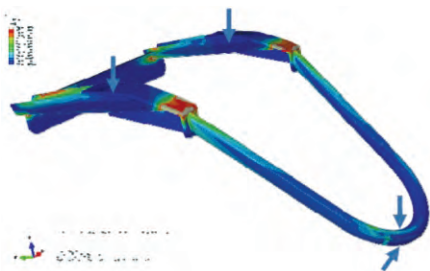


图3 加载力示意图

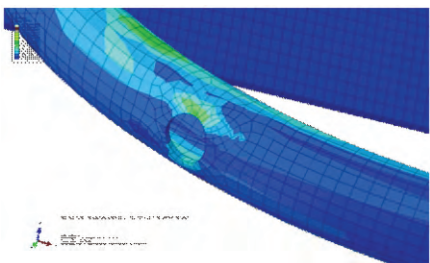


图4 弯管工艺孔位置应力图

3.3 断口失效分析

3.3.1 材质化验

从弓角弯管上截取 2 份样品进行材质化验, 化验表明材质合格, 排除材料本身因素导致的裂纹, 见表 1。

表1 材质元素含量化验结果

材质	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni
St35	≤ 0.17	≤ 0.35	≥ 0.40	≤ 0.04	≤ 0.04	—	—	—
1#	0.10	0.26	0.49	0.008	0.011	0.03	0.02	0.03
2#	0.09	0.31	0.48	0.003	0.010	0.05	0.02	0.04

3.3.2 断口外观检查

断口位置一致皆位于弯管工艺孔处, 整个断截面呈灰黑色和铁红色。孔边缘裂纹开口较孔对面的裂纹开口宽, 孔内存在未清除干净的加工毛刺, 孔表面及管内孔边缘的毛刺呈灰黑色, 无法观察孔表面的加工痕迹, 见图 5。

经清洗后观察发现, 孔表面与外表面的过渡较尖锐, 无明显的加工过渡区, 孔表面由于锈蚀严重, 清洗后无法观察到原始表面的加工痕迹。

从裂纹处打开后, 断口表面呈铁红色, 表面较平坦, 在裂纹断口尾端隐约可见疲劳弧线, 人工打断区断口表面呈新鲜的浅灰色。清洗断口后观察, 断口表面局部存在放射棱线及疲劳弧线, 由放射棱线的收敛方向可判断断裂起始于孔边缘的尖锐部位, 见图 6。



图5 零件外观



图6 断口宏观形貌

3.3.3 断口微观观察

将断口置于扫描电镜下观察, 断口表面完全被氧化物所覆盖, 无法观察断口形貌。人工打开断口呈韧窝特征, 见图 7。

将断口清洗后观察, 疲劳源区在孔口表面尖锐部位, 孔口表面与管表面过渡部位较尖锐, 无明显圆角过渡, 未见其他缺陷。疲劳扩展区局部隐约可见疲劳弧线及疲劳条带, 见图 8。

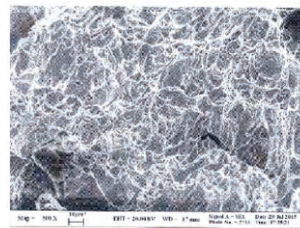


图7 人工断口微观形貌

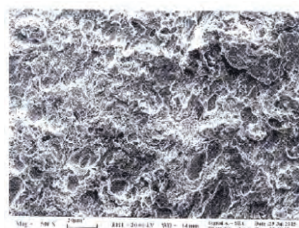


图8 清洗后扩展区微观形貌

3.3.4 晶相检查

在断口附近取样、制样观察:

①非金属夹杂。塑性非金属夹杂, 0.5 级, 脆性非金属夹杂, 0.5 级 (按 GB/T 10561—05 技术标准评定)。

②显微组织。弓角弯管外面表及内表面均存在严重的氧化腐蚀, 内表面局部存在腐蚀坑, 腐蚀坑填充了浅色的氧化物, 最大凹坑深度为 0.1 mm, 见图 9。经腐蚀后观察, 基体显微组织为铁素体 + 带状珠光体 + 极少量碳化物, 见图 10。



图9 管外表面显微组织

③带状组织。带状组织为 1.5 级(按 GB/T 13299—91 技术标准评定)。

④晶粒度。晶粒度为 7-8 级。

⑤硬度。硬度为 149HV0.5、151HV0.5、157HV0.5。

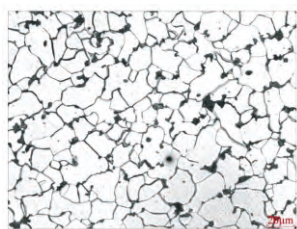


图 10 基体显微组织

3.3.5 讨论与分析

由弯管断口存在疲劳弧线及条带特征可知,该弓角裂纹为疲劳断裂;弯管的断裂起始于弓角弯管工艺孔表面,工艺孔表面与弯管表面存在较尖锐的过渡区,工艺孔内表面存在未清除干净的毛刺,毛刺容易导致弯管在使用过程中产生电化学腐蚀形成腐蚀缺陷,工艺孔表面与管外表面的尖锐部分容易形成应力集中及电化学腐蚀,从而导致裂纹容易在孔边缘表面形成、扩展,直至最后断裂。

4 解决方案

弓角弯管圆弧折弯后,外侧存在拉应力,工艺孔相对于弯管本身属于一缺口,同时降低了弯管整体强度,且工艺孔与弯管难以平滑过渡,势必造成应力集中。为此,提出以下 2 种解决方案:

方案一:弓角弯管工艺孔由直径 10 mm 改为直径 6 mm。

方案二:取消弓角弯管直径 10 mm 的工艺孔,弯管两端与盖板之间进行焊接密封。

改进方案的弓角各 120 件在同一线路上进行 60 km 装车运用对比试验,其中方案一弓角发生 9 起裂纹,故障率为 7.5%;方案二的弓角度未发生裂纹故障,见

图 11。

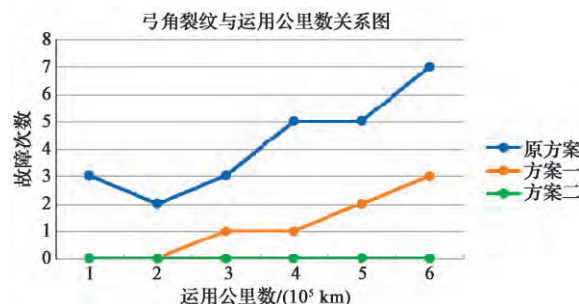


图 11 3 种方案弓角运用故障对比

5 结语

受电弓弓角作为受电弓平滑过渡接触网线岔、锚段关节的重要部件,弓角出现裂纹、断裂失效现象严重危及受电弓的安全运营。通过对受电弓弓角裂纹或断裂进行分析,改进弓角结构并相应优化弓角焊接工艺、表面处理工艺,有效解决了弓角运用故障,提高了受电弓安全运用的稳定性。

参考文献:

- [1] 于正平,刘贵,严云升,等.轨道交通 机车车辆受电弓特性和试验 第 1 部分:干线机车车辆受电弓:GB/T 21561.1—2008 [S].北京:中国标准出版社,2008.
- [2] 李继康,赵晓丽,栾燕,等.金属显微组织检验方法:GB/T 13298—2015 [S].北京:中国标准出版社,2015.
- [3] 程丽杰,栾燕,谷强,等.金属平均晶粒度测定方法:GB/T 6394—2017 [S].北京:中国标准出版社,2017.
- [4] 王勇康.材料力学 [M].北京:机械工业出版社,2008.
- [5] 吴积钦.受电弓与接触网 [M].成都:西南交通大学出版社,2010.

作者简介:吕阶军(1987—),男,工程师,长期从事电力机车、城轨车辆、动车组受流类电器产品的质量管理工作。

(上接第 99 页)

表 2 有限元模型修正后的 P10 点振动响应在频率 100 Hz 处加速度仿真与试验结果对比

方向	试验峰值/(m·s ⁻²)	修正后仿真峰值/(m·s ⁻²)	相对误差
x	0.083 80	0.090 74	8.28%
y	0.140 40	0.143 86	2.46%
z	0.030 14	0.026 75	-11.25%

4 结语

本文利用 HyperMesh 和 Virtual.Lab 软件建立了某地铁车辆变流器柜体及支架的有限元模型,通过模态分析与修正、传递函数计算和载荷谱识别,得到了变流器柜体吊耳在满载工况下的振动响应。通过与试验数据对比,并采用适当的方法对振动仿真有限元模型进行修正,修正后的振动响应加速度仿真结果与试验结果较为吻合。本文为地铁车辆变流器柜体的振动响应分析提供了一种精确化的操作流程,可为变流器柜

体的减振设计和优化提供技术参考。

参考文献:

- [1] 刘岩,孙丽萍,封全保,等.200 km/h 交流传动电力机车辅助变流柜结构仿真 [J].大连交通大学学报,2009,30(3): 21-24.
- [2] 芮强,王红岩,欧阳华江.机械结构动力学模型修正技术的现状与发展 [J].装甲兵工程学院学报,2012,26(2): 1-8.
- [3] LIN RM, ZHU J. Finite element model updating using vibration test data under base excitation [J]. Journal of Sound & Vibration, 2007, 303(3): 596-613.
- [4] 袁永新,戴华.阻尼矩阵与刚度矩阵的一种直接修正方法 [J].振动与冲击,2009,28(8): 117-121.
- [5] Larsson P O, Sas P. Model updating based on forced vibration testing using numerically stable formulations [C] //International Modal Analysis Conference. USA: San Diego, 1992: 968-974.
- [6] 王雪仁,缪旭弘,贾地,等.多源激励作用下结构振动响应的试验研究 [J].振动与冲击,2011,30(3): 246-251.

作者简介:夏亮(1987—),男,硕士,工程师,现从事轨道交通机械及电气系统振动噪声方面的相关工作。