

轨道车辆不锈钢点焊结构疲劳性能研究

梁炬星 孙 佳

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘 要 [目的] 为了提升不锈钢车体的抗疲劳性能, 获取点焊接头的疲劳特性曲线, 进而对不锈钢点焊车辆疲劳分析及结构设计进行指导, 需对轨道车辆不锈钢点焊结构疲劳性能进行研究。[方法] 归纳总结了某现有车型点焊接头的类型, 并根据点焊接头的特点, 制作了不锈钢电阻点焊对接接头试样和电弧击穿焊对接接头试样; 根据点焊及金属材料疲劳失效原理, 利用有限元分析和试验手段, 对不锈钢点焊接头疲劳性能进行了试验验证及对比分析。[结果及结论] 得到了 12 种不同类型点焊接头的载荷幅值-循环次数曲线; 通过失效分析可判断出试样开裂是由焊缝热影响区表面起始, 且疲劳开裂的起始与钢板表面存在沿晶的裂纹状缺陷相关; 总结了焊接类型和板厚参数对于接头疲劳寿命的影响, 即板厚组合相同, 选择电弧击穿焊的焊接方式会使接头获得更高的疲劳寿命; 焊接类型相同, 板厚较大的接头, 疲劳性能较优; 若两板厚度相较另一类接头一大一小, 则两板厚度差值较大的一方, 在低载荷幅值下疲劳寿命更长, 但若超出某一限值, 两板厚度差值较小的一方疲劳寿命会更长。

关键词 轨道车辆; 电阻点焊; 电弧击穿焊; 疲劳试验; 失效分析

中图分类号 U270.1⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.025

Study on Fatigue Performance of Stainless Steel Spot Welded Structures for Rail Vehicles

LIANG Juxing, SUN Jia

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] To enhance the fatigue resistance of stainless steel vehicle car bodies and obtain fatigue characteristic curves of spot welded joints, thereby guiding fatigue analysis and structural design of stainless steel spot welded rail vehicles, it is necessary to study the fatigue performance of stainless steel spot welded structures for rail vehicles. [Method] Summarizing the types of spot welded joints in an existing vehicle model, stainless steel resistance spot welding butt joint specimens and arc breakdown welding butt joint specimens are fabricated based on the characteristics of spot welded joints. According to the fatigue failure principles of spot welding and metal materials, finite element analysis and experimental methods are used

to experimentally verify and compare the fatigue performance of stainless steel spot welded joints. [Result & Conclusion] $\Delta F-N$ curves for 12 different types of spot welded joints are obtained, through failure analysis, the cracking of the specimens originated from the surface of the heat-affected zone of the weld seam is detected, and the initiation of fatigue cracking is related to transgranular crack-like defects on the steel plate surface. The influence of welding type and plate thickness parameters on the fatigue life of joints is summarized; for the same plate thickness combination, selecting the arc breakdown welding method would result in a higher fatigue life of the joint; for joints with the same welding type, those with larger plate thickness demonstrate better fatigue performance. If the thickness of one plate is larger than the other in comparison to another type of joint, the one with a larger difference in plate thickness will have a longer fatigue life under low load amplitude. However, if a certain limit is exceeded, the one with a smaller difference in plate thickness will have a longer fatigue life.

Key words rail vehicle resistance spot welding; arc breakdown welding; fatigue test; failure analysis

点焊作为一种经济、快速的连接方式, 其具有高效率、低能耗和高产出等优点, 已成为地铁车辆、城市轻轨车辆, 乃至高速动车组不锈钢车体结构金属板件之间的主要连接形式^[1]。以不锈钢城市轨道交通客车为例, 每辆车的电阻点焊焊点多达 3 万个^[2]。

焊点是车体零件间传递载荷的重要途径。而焊点疲劳失效是车体焊点的主要失效形式之一。焊点疲劳失效会降低整个车体的刚度, 并引发车体振动、噪声等问题, 严重时甚至危及列车运行安全^[3-4]。因此, 充分考虑车身不同材料与板厚组合的点焊接头的力学性能对轻量化不锈钢轨道客车制造有重要意义。

本文基于有限元分析及试验手段, 对 10 种常见板厚组合的不锈钢电阻点焊接头和 2 种不同板厚的

电弧击穿焊接头进行研究,对比分析板厚与焊接类型的差异对结构疲劳特性的影响,为不锈钢点焊车辆的设计制造及疲劳寿命评估提供理论依据。

1 概述

本文进行不锈钢点焊结构疲劳性能研究的技术路线,如图1所示。

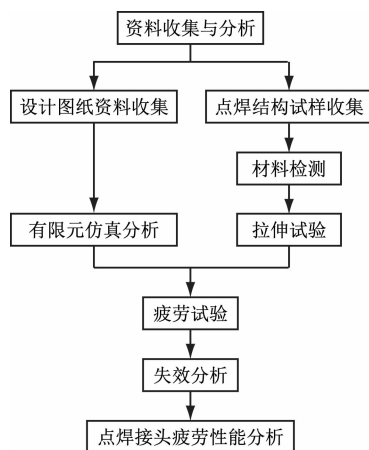


图1 不锈钢点焊结构疲劳性能研究技术路线

Fig. 1 Technical route of fatigue performance research of stainless steel spot welding structure

收集不锈钢点焊结构的设计图纸及材料试样,依照设计图纸对其进行有限元仿真,分析其结构的关键位置;同时,对试样进行材料检测及拉伸试验,以确定其抗拉强度。根据上述结果,制定方案进行疲劳试验和失效分析,对比研究不同点焊结构的疲劳性能,其结果可为不锈钢点焊车辆的设计和制造提供理论指导。

2 点焊结构试样疲劳试验

2.1 基本信息

本文所研究的不锈钢点焊接头试样规格参数如表1所示。

根据现有车辆点焊接头类型制作了12种接头,其中包含10种常见板厚组合的不锈钢电阻点焊接头和2种不同板厚的电弧击穿焊接头。

2.2 有限元仿真分析

根据设计图纸信息,对点焊试样进行三维建模。三维模型创建后,采用Hypermesh软件对其进行有限元网格划分,并依照实际试验情况定义约束和载荷^[5]。

计算得到的点焊试样应力云图如图2所示。由

图2中可以看出:远离点焊的位置应力较小,而在焊点周围具有应力集中分布,故裂纹容易在焊点位置萌生、发展,最后造成试样在焊点附近的母材位置发生开裂。

表1 接头种类及参数

Tab. 1 Joint types and parameters

| 试样名称 | 焊点直径/mm | 牌号/规格 |
|-----------|---------|-----------------------|
| 电阻电焊试样一 | 5.0 | SUS301L-MT/1.0+2.0 mm |
| 电阻电焊试样二 | 5.0 | SUS301L-MT/1.0+3.0 mm |
| 电阻电焊试样三 | 5.0 | SUS301L-MT/1.0+1.5 mm |
| 电阻电焊试样四 | 8.5 | SUS301L-MT/3.0+3.0 mm |
| 电阻电焊试样五 | 7.0 | SUS301L-MT/1.5+3.0 mm |
| 电阻电焊试样六 | 8.0 | SUS301L-MT/1.5+4.0 mm |
| 电阻电焊试样七 | 8.5 | SUS301L-MT/3.0+5.0 mm |
| 电阻电焊试样八 | 7.0 | SUS301L-MT/2.0+3.0 mm |
| 电阻电焊试样九 | 7.0 | SUS301L-MT/2.0+4.0 mm |
| 电阻电焊试样十 | 7.0 | SUS301L-MT/2.0+4.5 mm |
| 电弧击穿焊试样十一 | 5.0 | SUS301L-MT/1.0+3.0 mm |
| 电弧击穿焊试样十二 | 5.0 | SUS301L-MT/1.0+4.0 mm |

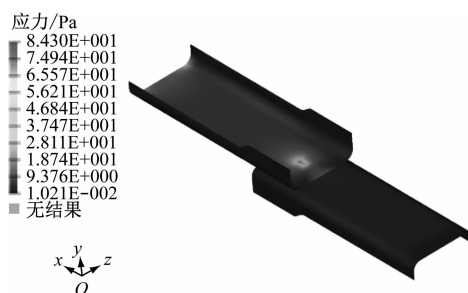


图2 点焊试样有限元分析应力云图截图

Fig. 2 Screenshot of finite element analysis stress nephogram of spot welding specimens

2.3 疲劳试验方案的制定

由于GB/T 15111—1994《点焊接头剪切拉伸疲劳试验方法》^[6]并没有对疲劳试验施加的载荷具体数值进行规定,而只规定了试样尺寸、载荷比等参数,故还需对点焊接头试样进行拉伸试验,以测量每种接头的抗拉强度,作为疲劳试验加载不同等级力的依据。

采用MTS 810型电液伺服材料试验机(见图3)对接头试样进行拉伸试验,确定疲劳载荷上限值。

根据GB/T 15111—1994标准,对试样两侧装夹位置添加补偿板,以保证试样受载时载荷轴线与

试样中心线一致,如图4所示。



图3 MTS 810 电液伺服材料试验机

Fig. 3 MTS 810 electro-hydraulic servo material testing machine

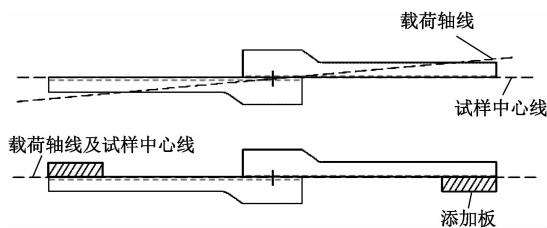


图4 补偿板添加示意图

Fig. 4 Diagram of adding compensation board

不同接头的试样拉伸试验结果如表2所示。

表2 不同接头的试样拉伸试验结果

Tab.2 Tensile testing results of specimens with different joints

| 试样编号 | 样本数量 | 牌号/规格 | 载荷幅值 $\Delta F/\text{kN}$ |
|------|------|-----------------------|------------------------------|
| 试样一 | 1 | SUS301L-MT/1.0+2.0 mm | 16.51 |
| 试样二 | 1 | SUS301L-MT/1.0+3.0 mm | 16.87 |
| 试样三 | 1 | SUS301L-MT/1.0+1.5 mm | 18.79 |
| 试样四 | 1 | SUS301L-MT/3.0+3.0 mm | 48.48 |
| 试样五 | 1 | SUS301L-MT/1.5+3.0 mm | 30.53 |
| 试样六 | 1 | SUS301L-MT/1.5+4.0 mm | 29.63 |
| 试样七 | 1 | SUS301L-MT/3.0+5.0 mm | 54.87 |
| 试样八 | 1 | SUS301L-MT/2.0+3.0 mm | 33.06 |
| 试样九 | 1 | SUS301L-MT/2.0+4.0 mm | 37.28 |
| 试样十 | 1 | SUS301L-MT/2.0+4.5 mm | 32.15 |
| 试样十一 | 1 | SUS301L-MT/1.0+3.0 mm | 32.50 |
| 试样十二 | 1 | SUS301L-MT/1.0+4.0 mm | 33.00 |

试验过程中,对试样依次加载不同的载荷,并记录试样断裂时的循环次数,通过预估计算载荷幅值,对下一级载荷值进行调整,尽量让试验寿命分布在 10^4 周次至 10^7 周次内。

2.4 疲劳试验结果

依照上述内容,制定点焊试样疲劳试验方案,

篇幅原因,仅以电阻电焊试样八 SUS301L-MT/2 + 3.0 mm 为例,其疲劳试验结果如表3所示。

表3 试样八的疲劳试验结果

Tab.3 Fatigue test results of specimen 8

| 试验序号 | 载荷最大值 F_{\max}/kN | 载荷最小值 F_{\min}/kN | 载荷幅值 $\Delta F/\text{kN}$ | 实际循环 次数/次 |
|------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------|
| 1 | 15.0 | 1.50 | 13.50 | 220 179 |
| 2 | 12.0 | 1.20 | 10.80 | 103 295 |
| 3 | 9.8 | 0.98 | 9.02 | 2 810 338 |
| 4 | 8.5 | 0.85 | 7.65 | 3 070 560 |
| 5 | 8.0 | 0.80 | 7.20 | 5 700 169 |
| 6 | 7.5 | 0.75 | 6.75 | 7 100 858 |
| 7 | 6.9 | 0.69 | 6.21 | 5 590 624 |
| 8 | 6.6 | 0.66 | 5.94 | 7 670 750 |
| 9 | 6.0 | 0.60 | 5.40 | 9 090 377 |
| 10 | 6.0 | 0.60 | 5.40 | 7 540 370 |
| 11 | 5.1 | 0.51 | 4.59 | 14 800 105 |
| 12 | 3.9 | 0.39 | 3.51 | 18 340 340 |
| 13 | 3.4 | 0.34 | 3.06 | 4 916 371 |

通常,载荷幅值与循环次数的表达式如下:

$$\Delta F^m N = C \quad (1)$$

式中:

ΔF ——载荷幅值;

N ——循环次数;

C 和 m ——常数。

根据 GB/T 24176—2009《金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法》^[7],对以上 $\Delta F-N$ 曲线关系进行线性回归分析,其数学模型如下:

$$x = b - ay \quad (2)$$

其中, $x = \log N$, $y = \log(\Delta F)$, a 和 b 是常数。

同时,还可根据 GB/T 24176—2009 中下极限曲线估计式(3)来计算 $\Delta F-N$ 曲线的下95%置信区间拟合曲线。

$$x_{(p, 1-\alpha, v)} = b - ay - k_{(p, 1-\alpha, v)} \delta_x \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中:

α ——置信度;

v ——自由度;

p ——失效概率;

n ——样本数量;

δ_x ——样本疲劳寿命标准;

$k_{(p,1-\alpha,v)}$ ——标准中表 B.1 对应的系数。

根据式(3)计算,得到试样八 $\Delta F-N$ 曲线如图 5 所示。

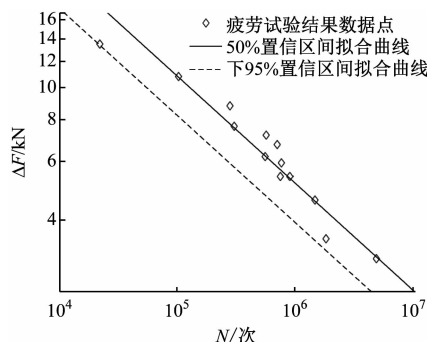


图5 试样八 $\Delta F-N$ 曲线

Fig. 5 Specimen 8 $\Delta F-N$ curve

图中,50% 置信区间拟合曲线公式如下:

$$\Delta F^{3.112} N = 1.663e + 8 \quad (4)$$

下 95% 置信区间拟合曲线公式如下:

$$\Delta F^{3.112} N = 7.125e + 7 \quad (5)$$

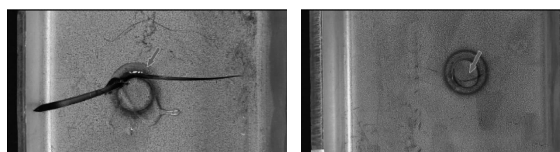
3 疲劳试样失效分析

通过确定点焊试样疲劳失效的模式、机理和原因,找到有效预防不锈钢车辆点焊结构失效的措施。

以试样八中编号为 8-8 的试样为例,焊件由厚度为 2 mm 和 3 mm 的 SUS301L 材质 U 型钢板搭接后经电阻焊成型,焊件宽度约为 60 mm,总长约为 360 mm。其疲劳试验循环最大力为 6.60 kN,最小力为 0.66 kN,测试频率为 20 Hz,经 767 750 次循环后发生开裂。

3.1 宏观检测

经过疲劳试验的试样均在焊点附近的母材处发生开裂,与有限元仿真结果相吻合。其中试样 8-8 开裂形貌如图 6 所示。由图 6 可知:从 2 mm 厚的钢板表面观察,可见裂纹沿热影响区向两侧宽度方向发展,长达 60 mm,从 3 mm 厚的钢板表面观察,可见裂纹贯穿焊缝向两侧发展,长约 15 mm。



a) 2mm 厚的钢板表面

b) 3mm 厚的钢板表面

图6 试样 8-8 开裂形貌实物图

Fig. 6 Photo of specimen 8-8 crack morphology

2 mm 厚的钢板裂纹被打开后,可见裂面在母材处平细,而在焊缝处相对粗糙,整体呈银灰色,两侧母材裂面均可见指向焊缝的扩展条纹。裂面在焊缝边缘处呈弧形,并分布着由下至上的扩展条纹,在钢板搭接面可见起始台阶,这表明开裂起始于搭接面的热影响区位置。

3.2 扫描电镜分析

2 mm 厚的钢板裂面起始区低倍下形貌如图 7 所示。由图 7 可知:下侧为焊缝搭接面,裂面相对粗糙起伏,可见由搭接面起始向上的扩展条纹。

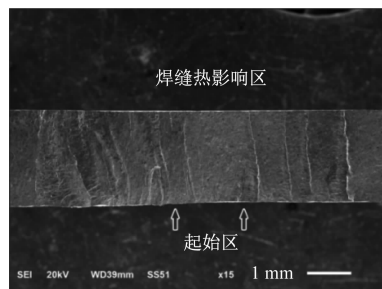


图7 2 mm 厚的钢板裂面起始区扫描电镜实景图

Fig. 7 Scanning electron microscope image of the crack initiation zone of 2 mm thickness steel plate

3.3 金相分析

试样八金相分析如图 8 所示。由图 8 可知:焊缝纵截面上侧为 2 mm 厚的钢板,下侧为 3 mm 厚的钢板,可见在 2 mm 厚的钢板处开裂发生在热影响区位置,裂纹呈垂直表面发展;在裂面右侧可见由裂纹相连接的部分母材;在 3 mm 厚的钢板处开裂发生在熔核位置,其裂纹由熔合线起始向斜下发展。

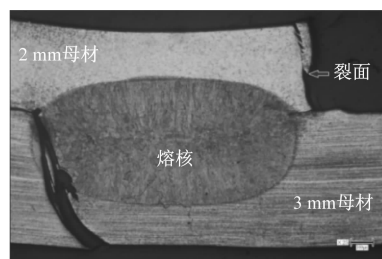


图8 试样八金相分析照片

Fig. 8 Photo of specimen 8 metallographic analysis

3.4 失效分析总结

综合宏观检测、扫描电镜分析和金相分析判断,该试样为由焊缝热影响区表面起始的疲劳开裂。疲劳开裂的起始与钢板表面存在沿晶的裂纹状缺陷相关,该缺陷在焊接应力及疲劳载荷下极易

因应力集中效应诱发开裂。

4 试样疲劳性能的对比分析

本文共研究了 12 种不同类型的点焊接头,依照上文所述的疲劳试验结果统计分析方法,对 12 种不同试样进行数据统计和对比。

图 9 为试样一至试样十的 $\Delta F-N$ 曲线对比。由图 9 可知:通过对比电阻点焊试样一至试样十的 $\Delta F-N$ 曲线,可以得到如下结论:①焊接类型相同,板厚较大的接头,疲劳性能较优;②若两板厚度相较另一类接头一大一小,则两板厚度差值较大的一方在低载荷幅值下疲劳寿命更长;但若超出某一限值,两板厚度差值较小的一方疲劳寿命会更长。

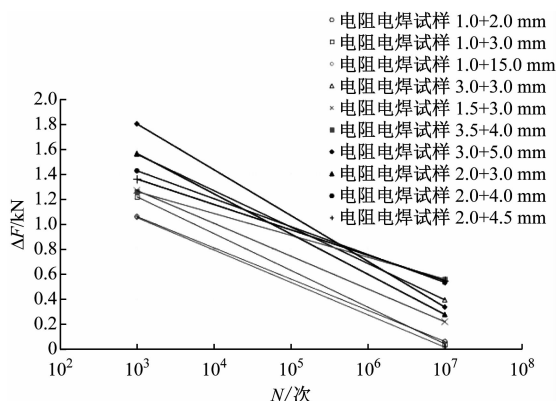


图 9 试样一至试样十的 $\Delta F-N$ 曲线对比

Fig. 9 Comparison of specimen 1 to specimen 10 $\Delta F-N$ curves

图 10 为试样十一与试样十二的 $\Delta F-N$ 曲线对比。由图 10 可知:通过对比分析电弧击穿焊试样十一与十二的统计结果,同样可以验证上述结论①。

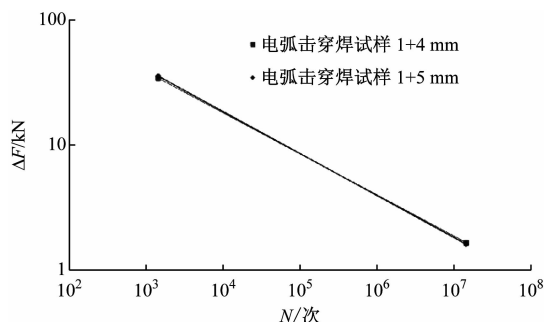


图 10 试样十一与试样十二的 $\Delta F-N$ 曲线对比

Fig. 10 Comparison of specimen 11 and specimen 12 $\Delta F-N$ curves

图 11 为试样二与试样十一的 $\Delta F-N$ 曲线对比图。由图 11 可知:对比电阻点焊试样二与电弧击穿焊试样十一,相同板厚组合,采用电弧击穿焊的接

头疲劳性能明显优于采用电阻点焊的接头。

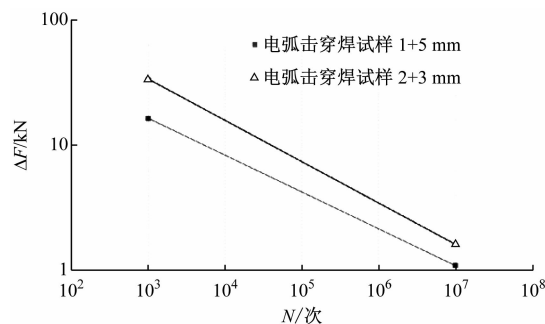


图 11 试样二与试样十一的 $\Delta F-N$ 曲线对比

Fig. 11 Sample 2 and sample 11 $\Delta F-N$ curve comparison

5 结语

综上所述,本文对 12 种不同类型的点焊接头疲劳性能进行研究,得到了如下结论:

1) 有限元仿真分析结果反映出不锈钢板件远离点焊的位置应力较小,而在焊点周围具有应力集中分布,故裂纹容易在焊点位置萌生、发展;最后造成板件在焊点附近母材位置发生开裂。

2) 制定方案,进行疲劳试验,统计结果并计算得到 12 种不同类型点焊接头 $\Delta F-N$ 曲线。

3) 进行疲劳试样失效分析,判断出试样开裂由焊缝热影响区表面起始,且疲劳开裂的起始与钢板表面存在沿晶的裂纹状缺陷相关;该缺陷在焊接应力及疲劳载荷下极易因应力集中效应诱发开裂。

4) 板厚组合相同,选择电弧击穿焊的焊接方式会使接头获得更高的疲劳寿命;焊接类型相同,板厚较大的接头,疲劳性能较优;若两板厚度相较另一类接头一大一小,则两板厚度差值较大的一方在低载荷幅值下疲劳寿命更长;但若超出某一限值,两板厚度差值较小的一方疲劳寿命会更长。

参考文献

- [1] 杨龙, 杨冰, 阳光武, 等. 不锈钢车体点焊接头疲劳特性分析[J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 18.
YANG Long, YANG Bing, YANG Guangwu, et al. Analysis on fatigue characteristics of spot welded joints of stainless steel car body[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(7): 18.
- [2] 王洪亮, 王亭, 徐国成. 不锈钢城轨客车车体电阻点焊质量监控[J]. 焊接技术, 2010, 39(10): 60.
WANG Hongliang, WANG Ting, XU Guocheng. Quality monitoring of resistance spot welding of stainless steel urban rail bus body[J]. Welding Technology, 2010, 39(10): 60.

(下转第 133 页)

- on wheel rims of trains on Shanghai Metro Line 4[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 95.
- [7] 刘通, 温世湖, 徐华伟, 等. 适用于轮缘增厚现象的机车车轮镟修模型研究与应用[J]. 机车电传动, 2022(5): 17.
LIU Tong, WEN Shihu, XU Huawei, et al. Research and application of locomotive wheel reprofiling model targeting flange thickening[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(5): 17.
- [8] 黎嘉欣, 陶功权, 刘希政, 等. 基于两种轨道线路建模方法的地铁车轮磨耗预测对比分析[J]. 工程力学, 2022, 39(6): 226.
LI Jiaxin, TAO Gongquan, LIU Xizheng, et al. Comparative analysis of metro wheel wear prediction based on two track modeling methods[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(6): 226.
- [9] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
The State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [10] German Standards Institute. Railway applications-testing and simulation of acceptance of railway vehicle operating characteristics-Operating performance and static testing: DIN EN 14363: 2019[S]. German: German Society for Standardization, 2019.
- [11] 周素霞, 薛蕊. 地铁线路超高对轮轨磨耗的影响[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(1): 101.
ZHOU Suxia, XUE Rui. Influence of superelevation of subway line act on wheel-rail wear[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(1): 101.
- [12] 孙小康. 地铁轮对踏面镟修经济性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5): 91.
SUN Xiaokang. Economic analysis of wheel lathing in metro vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(5): 91.
- [13] 国家铁路局. 机车车辆车轮轮缘踏面外形: TB/T 449—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
National Railway Administration. Profile of locomotive and vehicle wheel flange tread: TB/T 449—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [14] 曾全君. 地铁车辆车轮寿命分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2005(2): 47.
ZENG Quanjun. Analysis of the service life of subway vehicle wheels[J]. Electric Locomotives and Urban Rail Vehicles, 2005(2): 47.
- [15] 戴文华. 通过镟轮管理技术创新提高地铁列车轮对使用寿命[J]. 中国标准化, 2019(增刊2): 207.
DAI Wenhua. Improving the service life of subway train wheelsets through technical innovation of wheel management[J]. China Standardization, 2019(S2): 207.
- 收稿日期:2023-11-02 修回日期:2023-12-19 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-02 Revised:2023-12-19 Published:2024-05-10
• 通信作者: 贾小平, 正高级工程师, zka_2020@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第126页)

- [3] 石好文. Q235B/301L与09CuPCrNi/301L异质钢电阻点焊接头力学性能对比研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
SHI Haowen. Comparative study on mechanical properties of resistance spot welded joints of Q235B/301L and 09CuPCrNi/301L dissimilar steels[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [4] SHEPPARD S, STRANGE M. Fatigue life estimation in resistance spot welds: initiation and early growth phase[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1992, 15: 531.
- [5] 余海松, 余闪闪, 李婷, 等. 18Ni不锈钢电阻点焊接头力学性能有限元仿真[J]. 焊接, 2023(5): 24.
YU Haisong, YU Shanshan, LI Ting, et al. Finite element simulation of mechanical property of 18Ni stainless steel resistance spot-welded joint[J]. Welding & Joining, 2023(5): 24.
- [6] 国家质量技术监督局. 点焊接头剪切拉伸疲劳试验方法: GB/T 15111—1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Test method for shear tensile fatigue of spot welded joints: GB/T 15111—1994[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [7] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法: GB/T 24176—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 4.
Technical Committee on Steel of Standardization Committee of China. Metallic materials-fatigue testing-statistical planning and analysis of data: GB/T 24176—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 4.
- 收稿日期:2023-12-25 修回日期:2024-02-20 出版日期:2024-05-10
Received:2023-12-25 Revised:2024-02-20 Published:2024-05-10
• 通信作者: 梁炬星, 正高级工程师, juxxi741@126.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license