

未焊透对接焊接缺陷对接头疲劳强度的影响

郭廷银, 杨坤, 谭鑫, 张祥

(中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 【目的】为了量化焊接工艺导致的未焊透缺陷对 16MnDR 板材对接接头疲劳强度的影响, 分别研究了含未焊透缺陷和无缺陷焊接接头的疲劳性能差异。【方法】使用电磁共振式高频疲劳试验机进行了应力比($R=0.5$)条件下两种对接接头的疲劳试验, 比较了未焊透对接接头与无缺陷对接接头在 10^7 周次下的概率疲劳强度。同时, 结合 SEM 的断口失效分析结果, 确定焊接接头的疲劳裂纹起源和疲劳强度下降的原因。【结果】疲劳试验结果表明, 未焊透对接接头的疲劳强度仅为无缺陷接头的 17%。失效分析结果显示, 未焊透对接接头的疲劳裂纹均起源于焊根部位的未熔合区, 焊根部位未熔合区缺口导致的几何应力集中和焊接形成的初始缺陷是导致疲劳强度下降的主要原因。【结论】基于有限元分析结果和疲劳试验数据, 推定了含有焊接残余应力影响的未焊透对接接头试样在应力比($R=0.5$)下的裂纹扩展门槛值, 并建立了疲劳极限强度与未焊透初始缺陷尺寸的关系。该研究为优化焊接工艺提供了重要的参考, 帮助提升焊接接头的疲劳强度。

关键词: 对接接头; 未焊透; 疲劳强度; 缺陷深度; 裂纹扩展门槛值

中图分类号: TG407 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20240205001

Influence of incomplete penetration of butt welding defects on fatigue strength of welded joints

Guo Tingyin, Yang Kun, Tan Xin, Zhang Xiang

(Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China)

Abstract: [Objective] This study aims to quantify impact of incomplete penetration defects caused by welding processes on fatigue strength of 16MnDR butt welded joints. Fatigue performance differences between welded joints with incomplete penetration defects and no defects were investigated. [Methods] Fatigue tests were conducted on both types of butt welded joints with an electromagnetic resonance high-frequency fatigue testing machine under a stress ratio ($R=0.5$). The probabilistic fatigue strength at 10^7 cycles for welded joints with incomplete penetration and no defects was compared. Additionally, failure analysis of fracture under SEM was performed to identify fatigue crack initiation points and causes of fatigue strength reduction. [Results] Fatigue test results revealed that fatigue strength of butt welded joints with incomplete penetration defects was only 17% that of butt welded joints with no defects. Failure analysis showed that fatigue cracks in butt welded joints with incomplete penetration originated from incomplete penetration fusion zone of root, where geometric stress concentration and initial defects formed during welding were the main reasons for fatigue strength reduction. [Conclusion] Based on finite element analysis results and fatigue test data, crack propagation threshold for butt welded joints with incomplete penetration under a stress ratio ($R=0.5$), considering residual welding stress effects, was estimated. A relationship between fatigue limit strength and size of initial incomplete penetration defects was established. The study provides important insights for optimizing welding processes and improving fatigue strength of welded joints.

Key words: butt welded joints, incomplete penetration, fatigue strength, defect depth, threshold value for crack propagation

0 前言

在转向架结构中,构架是安装转向架上零部件的基础,由箱型梁通过多种形式焊接组成^[1]。构架焊接材料多使用碳钢焊接,经济和工艺性好^[2]。箱型梁焊接结构的上盖板的连接为单边坡口对接焊连接,这种对接焊往往存在焊缝根部未焊透现象,即焊缝根部位置容易出现沟槽。由于焊缝根部残余应力的影响,这种焊接缺陷所引起焊缝根部的应力集中更严重,从而降低焊缝区域的抗疲劳能力。

转向架构架承受着除车体的静载荷外,还承受着振动载荷,包括来自轨道不平顺的振动载荷及吊挂电机和齿轮箱的振动载荷^[3]。复杂载荷的作用,使得含有焊接缺陷的对接接头疲劳强度大大降低。基于此,为了进一步掌握未焊透缺陷尺寸对于对接接头焊缝疲劳强度的影响,该文以地铁转向架构架横梁与侧梁连接处的 12 mm 厚 16MnDR 对接焊缝为研究对象,研究了不同未焊透深度对 16MnDR 对接焊缝的疲劳强度影响。

1 试验材料

该文所研究的接头焊接形式为电弧焊,是构架焊接最常用的焊接形式^[4]。对接接头母材为 16MnDR,板厚 12 mm。其化学成分见表 1,力学性能见表 2。

焊接使用的材料为 ISO 14341-A-G 38 4 M21 2Si,

保护气体为富氩混合气(Ar=80%, CO₂=20%),焊丝化学成分见表 3。对接接头坡口尺寸及间距如图 1(a)所示。接头焊道布置如图 1(b)所示,每层焊道采用的焊接工艺参数见表 4。

表2 16MnDR 力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of 16MnDR

屈服 强度	抗拉 强度	断后 伸长率	断面 收缩率	冲击吸收 能量
$R_{\text{eff}}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A(\%)$	$Z(\%)$	A_{KV}/J
389	550	24.5	55.4	171

表3 焊丝化学成分(质量分数, %)
Tab. 3 Composition of welding wire (wt.%)

C	Si	Mn	S	P
0.06 ~ 0.14	0.50 ~ 0.80	0.90 ~ 1.30	≤0.025	≤0.025

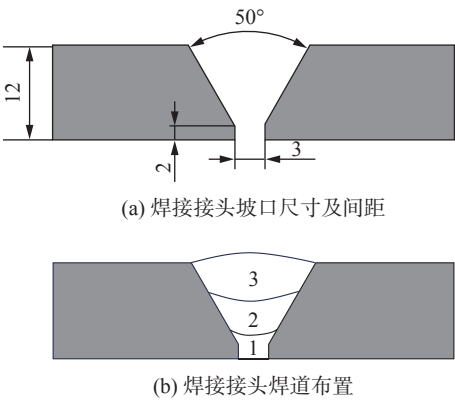


图1 试样焊接参数图

Fig. 1 Welding parameters of specimen. (a) groove dimensions and spacing of welded joint; (b) pass arrangement of welded joint

表1 16MnDR 化学成分(质量分数, %)
Tab. 1 Composition of 16MnDR (wt.%)

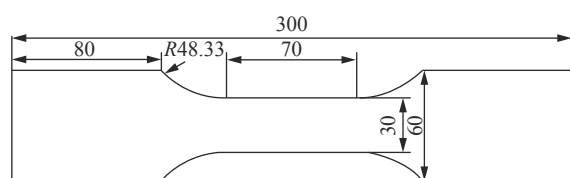
C	Si	Mn	S	P
≤0.20	0.15 ~ 0.50	1.20 ~ 1.60	≤0.012	≤0.025

表4 焊接工艺参数
Tab. 4 Welding parameters

焊层	焊接方法	焊丝直径 d/mm	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	热输入 $E/(\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1})$
1	MAG	1.2	160 ~ 170	17 ~ 18	4.5 ~ 5.0	0.54 ~ 0.68
2	MAG	1.2	240 ~ 250	26 ~ 27	3.5 ~ 4.0	1.56 ~ 1.93
3	MAG	1.2	250 ~ 260	27 ~ 28	3.5 ~ 4.0	1.69 ~ 2.08

用于疲劳试验的试样共 2 种,一种为图 2(a)所示的无缺陷对接接头,图 3(a)为其焊缝区剖面熔深放大图,图中可以看到焊趾和焊根处均无宏观焊接缺

陷。另一种为图 2(b)所示的未焊透对接接头,图 3(b)为其焊缝区剖面熔深放大图,图中可以看到焊趾处无宏观缺陷,焊根处存在未焊透沟槽。



(a) 试样尺寸图



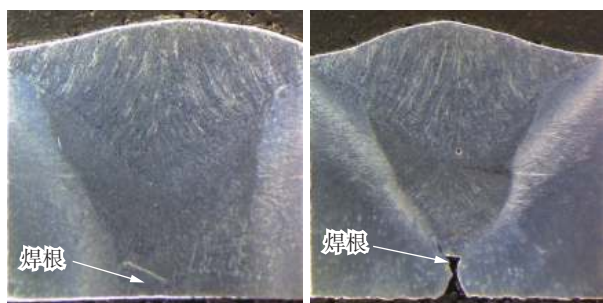
(b) 无缺陷试样



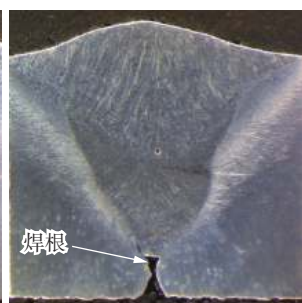
(c) 未焊透试样

图2 疲劳试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fatigue specimen. (a) specimen dimensions diagram; (b) specimen with no defect; (c) specimen with incomplete penetration



(a) 无缺陷试样



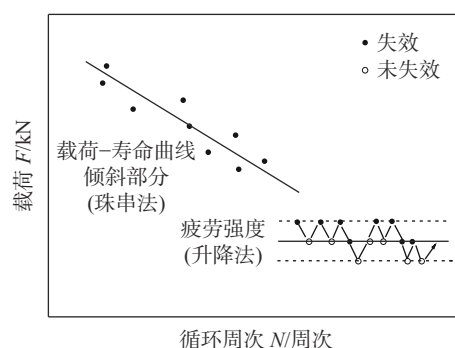
(b) 未焊透试样

图3 焊缝处熔深示意图

Fig. 3 Schematic diagram of weld penetration depth. (a) no defect specimen; (b) incomplete penetration specimen

2 疲劳试验

使用瑞士 RUMUL 250HFP 电磁共振式高频试验机, 将试样安装到试验机的液压夹具上进行疲劳试验, 正弦波加载, 加载频率约为 90 Hz, 应力比 $R=0.5$, 最高加载循环周次设置为 10^7 周次, 当对接接头出现裂纹后, 试验机频率会下降, 试验机被设置自动停机。首先进行 $S-N$ 曲线的倾斜部分的测试, 当试样第一次出现 10^7 周次不开裂后, 疲劳试验转到升降法测试 10^7 周次疲劳强度的分散度。 $S-N$ 曲线测试过程如图 4 所示。

图4 $S-N$ 曲线示意图Fig. 4 $S-N$ curve schematic diagram

3 试验结果

3.1 $\Delta\sigma-N_f(S-N)$ 曲线

图 5 为无缺陷对接接头的升降法的试验结果。升降法共进行了 11 个试样的试验, 应力变程 $\Delta\sigma$ ($\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$) 在 180 ~ 195 MPa 范围变化, 升降法的升降步长为 7.5 MPa; 图 6 为未焊透对接接头的升降法的试验结果。升降法共进行了 8 个试样的试验, 应力变程 $\Delta\sigma$ 在 30 ~ 35 MPa 范围变化, 升降法的升降步长为 2.5 MPa。按照 10^7 周次疲劳强度数据满足对数正态分布的假设, 使用 Dixon-Mood 法^[5] 对升降法的试验数据进行统计处理, 获得 10^7 周次疲劳强度均值和标准偏差, 无缺陷和未焊透对接接头疲劳强度的均值分别为 189 MPa 和 33 MPa, 它们的标准偏差分别为: 1.021 和 1.041, 两者 10^7 周次疲劳强度分散性不大。

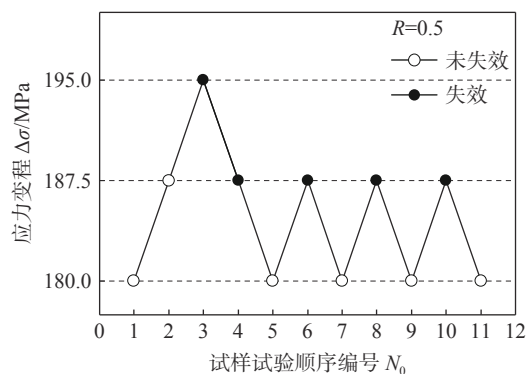


图5 无缺陷对接接头的升降法的试验结果

Fig. 5 Test results of rising and falling method for butt welded joints with no defect

将 10^7 周次前对应的疲劳应力-寿命数据和 10^7 周次对应的概率疲劳强度统一绘制后, 获得的应力比 $R=0.5$ 下的应力变程 ($\Delta\sigma$) 和疲劳寿命 (N_f) 关系 ($S-N$

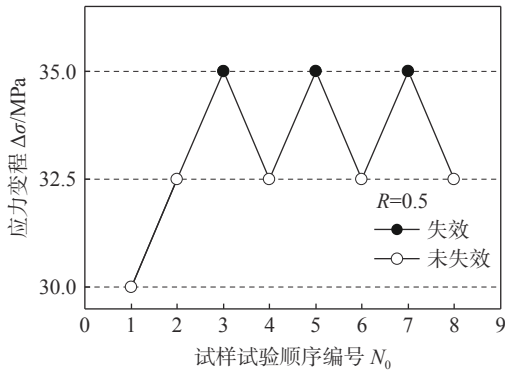


图6 未焊透试样的升降法的试验结果

Fig. 6 Test results of staircase method for specimen with incomplete penetration.

N_f 曲线,如图7所示。由图7可知,用应力变程 $\Delta\sigma$ 表示的无缺陷对接接头疲劳强度从短寿命区的200 MPa降低到长寿命区的180 MPa,其 $\Delta\sigma-N_f$ 曲线倾斜度小。另一方面,未焊透对接接头疲劳强度从短寿命区的180 MPa降低到长寿命区的35 MPa,其 $\Delta\sigma-N_f$ 曲线倾斜度较大。无论是无缺陷还是未焊透对接接头,直到 10^7 周次,其 $\Delta\sigma-N_f$ 曲线均没有出现通常钢铁材料具有的水平段,这意味着这2种对接接头直到 10^7 周次仍没有疲劳强度极限。

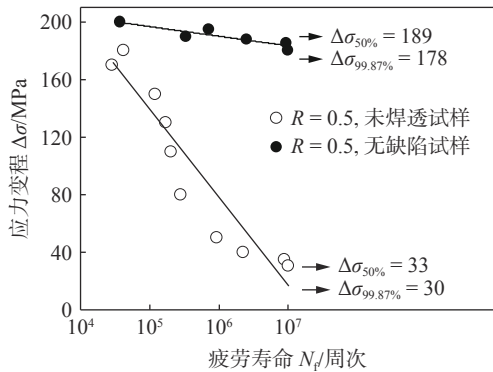


图7 应力变程和疲劳寿命(S-N)曲线

Fig. 7 Stress range versus fatigue life (S-N) curve

比较无缺陷和未焊透对接接头 10^7 周次的3倍标准偏差存活率疲劳强度可知,无缺陷对接接头的疲劳强度是未焊透接头相应值的17%。

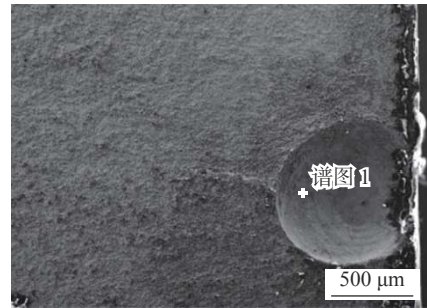
3.2 失效分析

由图8(a)可知,无缺陷接头的疲劳裂纹发生在试样侧面的焊根处;由图8(b)可知,未焊透接头的疲劳裂纹发生在焊根的沟槽内。

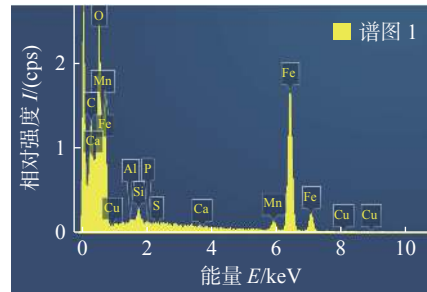


图8 疲劳试样失效示意图

Fig. 8 Schematic diagram of fatigue specimen failure. (a) specimen with no defect; (b) specimen with incomplete penetration



(a) 气泡缺陷 SEM 图



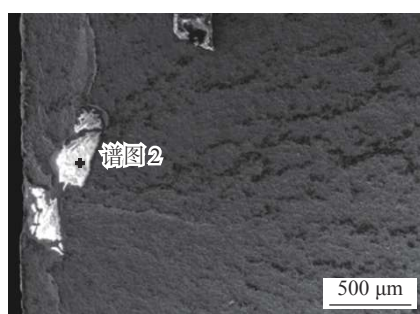
(b) 气泡处能谱图

图9 含气孔缺陷的断口观察代表案例

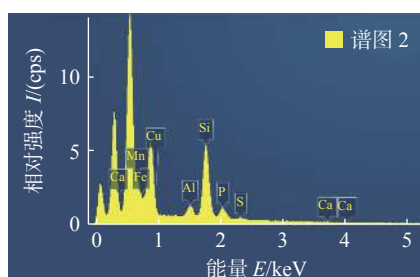
Fig. 9 Representative case of fracture observation with porosity defects. (a) SEM image of bubble defects; (b) EDS spectrum of bubbles

图9和图10为无缺陷对接接头疲劳裂纹发生部位的断口观察代表案例。图9(a)可以看出疲劳裂纹发生位置处有直径约800 μm的坑,图9(b)的能谱显示坑内没有夹杂物成分,因此,该坑是气泡,焊缝开裂是由于焊肉中气泡的应力集中引起。图10(a)可以看出疲劳疲劳裂纹发生位置存在非金属夹杂物,图10(b)的能谱显示非金属夹杂物为Ca-Al-O类,因此,焊缝开裂是由于焊缝中较大尺寸夹杂物周围的应力集中引起^[6]。对无缺陷对接接头的裂纹起因因统计发现,气泡占多数,而夹杂物占少数。

图11所示为未焊透对接接头疲劳裂纹发生部位的断口观察代表案例。图11是一对断口,由图11



(a) 非金属夹杂 SEM 图



(b) 非金属夹杂能谱图

图 10 含非金属夹杂的断口观察代表案例

Fig. 10 Representative case of fracture observation with non-metallic inclusions. (a) SEM image of non-metallic inclusions; (b) EDS spectrum of non-metallic inclusions

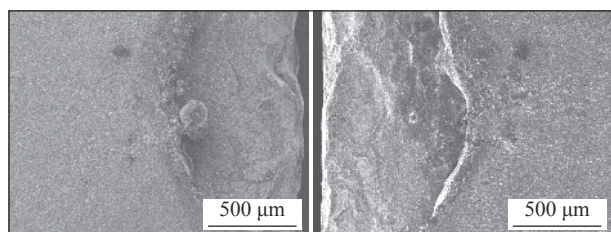


图 11 未焊透试样断口观察代表案例

Fig. 11 Representative fracture surface observation of incomplete penetration specimen

对照可以看到焊根区裂纹起始位置附近存在焊缝未熔合现象, 未熔合深度约 0.7 ~ 1.5 mm, 未熔合区有气泡分布, 焊根区开裂是由于未熔合造成的应力集中引起。

4 未焊透缺陷尺寸对接头疲劳强度的影响

4.1 疲劳裂纹扩展的门槛值推定

使用全部失效的试验数据, 根据未焊透接头的缺口形状, 选取 $\Delta K = 1.12\Delta\sigma(\pi a)^{1/2}$ 的断裂力学公式^[7], 计算对应于应力变程 ($\Delta\sigma$) 的应力场强度因子 ΔK 。式中: a 为未焊透缺陷的深度, 通过将试样宽度分成 10 个

等间隔, 观察测量每个未焊透接头断口中的 10 个未焊透深度, 然后取其平均值作为 a 。未焊透接头共有 13 个数据, 它们对应的 a 的均值介于 2.8 ~ 3.8 mm 之间。图 12 所示为应力场强度因子 (ΔK) 和疲劳寿命 (N_f) 的关系曲线。由图可知, $10^7 \sim 10^8$ 周次间, $\Delta K-N_f$ 的关系曲线趋于水平, 因此, 可以把 10^8 周次对应的 ΔK 近似的看成应力场强度因子的门槛值 (ΔK_{th})。 ΔK_{th} 对应的 $\Delta\sigma$ 即为疲劳极限强度 ($\Delta\sigma_{th}$), 由图可知, 应力比 $R=0.5$ 条件下的均值 $\Delta K_{th} \approx 4.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

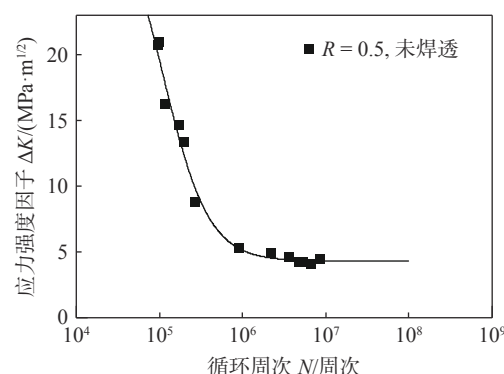


图 12 应力场强度因子和疲劳寿命关系曲线

Fig. 12 Stress field intensity factor and fatigue life relationship curve

4.2 未焊透缺陷尺寸和对接接头疲劳强度的关系

将 4.1 节获得的 $\Delta K_{th} \approx 4.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 代入 $\Delta K = 1.12\Delta\sigma(\pi a)^{1/2}$ 后, 可得应力变程 ($\Delta\sigma$) 和未焊透平均深度 (a) 的关系如下: $\Delta\sigma_{th} = 2.167a^{-1/2}$, 其函数图形如图 13 所示。由图可知, 随着未焊透缺陷尺寸的增加, 材料的疲劳强度下降, 当缺陷尺寸约等于 0.2 mm 时, 疲劳

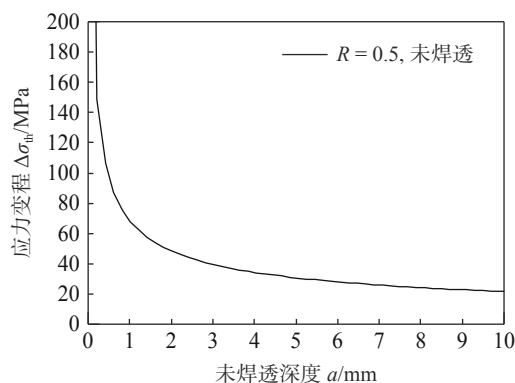


图 13 疲劳强度和未焊透平均深度的关系

Fig. 13 Relationship between fatigue strength and average depth of incomplete penetration

强度接近无缺陷对接接头 10^7 周次的疲劳强度。

5 结论

(1) 无缺陷和未焊透对接接头在 $R=0.5$ 条件下的 10^7 周次的疲劳强度分散性都不大。在 $R=0.5$ 应力比条件下, 未焊透对接接头 10^7 周次的 3 倍标准偏差存活率疲劳强度分别是无缺陷对接接头相应值的 17%。未焊透缺陷大幅度降低了焊接接头的疲劳强度。

(2) 无缺陷对接接头疲劳裂纹大部分起始于焊根附近的焊缝区气泡, 少部分起始于焊缝的非金属夹杂物, 其疲劳开裂均是由于焊缝的材料微观缺陷的应力集中引起; 未焊透对接接头疲劳裂纹均起始于焊根附近的焊缝未熔合部位, 未熔合区有气泡分布, 其焊根区开裂是由于未熔合造成的应力集中引起。

(3) 由于焊接试样在从结构取样后, 大部分的残余应力都被释放, 在相同应力变程的情况下, 高应力比 ($R=0.5$) 试验条件所对应的静态载荷更大, 可以等效弥补一部分被释放的残余应力, 使得试样试验结果更贴切于实际结构情况。

(4) 焊接产生的残余拉应力会显著影响裂纹扩展的门槛值, 使用传统方法测得的门槛值并未忽略这一影响, 由未焊透疲劳试验数据推定的应力比 $R=0.5$ 对应的裂纹扩展的门槛值 ΔK_{th} 约为 $4.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。此结果对应焊缝材料区域真实的疲劳裂纹扩展门槛值, 可以更精确的指导此类接头的损伤容限及疲劳寿命设计。

(5) 基于门槛值 ΔK_{th} 建立了应力比 $R=0.5$ 对应的疲劳极限强度与未焊透缺陷平均深度尺寸的函数关系, 为优化焊接工艺提供依据。

参考文献

- [1] 茹常乐, 王斌杰, 孙守光, 等. 地铁车辆转向架构架的疲劳寿命及可靠性研究 [J]. *铁道车辆*, 2019, 57(7): 8–10, 22.
Ru Changle, Wang Binjie, Sun Shouguang, et al. Fatigue life

and reliability research on bogie frames of metro vehicles [J]. *Rolling Stock*, 2019, 57(7): 8–10, 22.

- [2] 韩晓辉, 张志毅, 李刚卿, 等. 轨道客车轻量化材料及其连接技术的发展与展望 [J]. *焊接*, 2020(10): 34–42.

Han Xiaohui, Zhang Zhiyi, Li Gangqing, et al. Development and prospect of lightweight material and connection technology of rail bus [J]. *Welding & Joining*, 2020(10): 34–42.

- [3] 王秋实, 周劲松, 肖忠民, 等. 电机牵引振动对地铁转向架构架疲劳的影响 [J]. *振动、测试与诊断*, 2022, 42(2): 365–371.

Wang Qiushi, Zhou Jinsong, Xiao Zhongmin, et al. Effect of motor traction vibration on fatigue of metro bogie frame [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(2): 365–371.

- [4] 雷振, 徐良, 徐富家, 等. 激光-电弧复合焊接技术国内研究现状及典型应用 [J]. *焊接*, 2018(12): 1–6.

Lei Zhen, Xu Liang, Xu Fujia, et al. Typical applications and research status of laser-arc hybrid welding technology [J]. *Welding & Joining*, 2018(12): 1–6.

- [5] Dixon W J, Mood A M. A method for obtaining and analyzing sensitivity data [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1948, 43(241): 109–126.

- [6] 陈夏明. 钢/铝激光深熔焊焊接接头组织性能研究 [D]. 江苏苏州: 苏州大学, 2019.

Chen Xiaming. A study on microstructure and properties of steel/aluminum laser deep penetration welded joint [D]. Soochow, Jiangsu, China: Soochow University, 2019.

- [7] Japanese Standards Association. Rolling stock – Bogie – General rules for design of bogie frame strength: JIS E4207-2019 [S]. 2019.

第一作者: 郭廷银, 学士, 工程师; 主要从事焊接结构疲劳强度的研究; gyt870123@163.com。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

郭廷银, 杨坤, 谭鑫, 等. 未焊透对接焊接缺陷对接头疲劳强度的影响 [J]. *焊接*, 2025(x): 1–6.

Guo Tingyin, Yang Kun, Tan Xin, et al. Influence of incomplete penetration of butt welding defects on fatigue strength of welded joints [J]. *Welding & Joining*, 2025(x): 1–6.