

激光焊及弧焊对车体钢对接接头疲劳性能影响研究

金希红^{1,2}, 李明明^{1,2}, 何永强^{1,2}, 肖乾³, 陈道云³, 祝卫强³, 罗财滢³

(1. 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室, 湖南 株洲 412001; 2. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001; 3. 华东交通大学交通智能运维技术与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 为探究轨道车辆典型车体母材对接接头的疲劳性能及焊接方式对其的调控作用, 本文以 Q310NQL2 (板厚 2 mm) 和 Q355ME (板厚 3 mm) 两种车体常用材料为研究对象, 采用激光焊与弧焊两种工艺制备 4 组对接接头试样, 进行拉伸与疲劳性能测试。首先通过拉伸试验获取各组接头的弹性极限、屈服强度、强度极限及条件断裂强度等基础力学参数, 以此为依据确定疲劳试验初始应力级; 随后结合升降法测试并计算不同存活率下的条件疲劳极限, 并与 DVS1612 标准进行对比分析。结果表明: 同种材料同厚度条件下, 焊接方式对对接接头疲劳极限具有显著影响; 在相同存活率与置信度下, 弧焊接头的疲劳强度普遍高于激光焊接头。进一步研究发现, 当存活率由 95% 提升至 99.5% 时, 两类接头的疲劳极限均呈明显下降趋势, 该规律与高存活率下疲劳数据分散性增大、工程设计保守性提高的理论预期一致。

关键词: 轨道车辆; 车体钢; 对接接头; 疲劳极限

中图分类号: U270.12

文献标志码: A

Study on the influence of laser welding and arc welding on the fatigue performance of car body steel butt joint

Jin Xihong^{1,2}, Li Mingming^{1,2}, He Yongqiang^{1,2}, Xiao Qian³, Chen Daoyun³, Zhu Weiqiang³, Luo Caiying³

(1. The State Key Laboratory of Heavy-duty and Express High-power Electric Locomotive, Zhuzhou 412001, China; 2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China; 3. Key Laboratory of Transportation Intelligent Operation and Maintenance Technology and Equipment, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To investigate the fatigue performance of typical rail vehicle body base material butt joints and the regulatory effect of welding methods on them, this study uses two commonly used body materials—Q310NQL2 (plate thickness 2 mm) and Q355ME (plate thickness 3 mm)—as research subjects. Four sets of butt joint specimens were prepared using laser welding and arc welding processes, followed by tensile and fatigue performance testing. First, tensile tests determined fundamental mechanical parameters including elastic limit, yield strength, ultimate strength, and conditional fracture strength for each joint group. These values established the initial stress level for fatigue testing. Subsequently, the fatigue limit under various survival rates was tested and calculated using the step-up method, and compared with the DVS1612 standard for analysis. Results indicate that under identical material and thickness conditions, welding method significantly influences the fatigue limit of butt joints. At equivalent survival rates and confidence levels, arc-welded joints generally exhibit higher fatigue strength than laser-welded joints. Further investigation reveals that when the survival rate increases from 95% to 99.5%, the fatigue limit of both joint types shows a pronounced downward trend. This pattern aligns with theoretical expectations that higher survival rates lead to increased dispersion in fatigue data and greater conservatism in engineering design.

Keywords: Rail vehicles; Car body steel; Butt joints; Fatigue limit

随着轨道交通运输向高速化、重载化及长寿命方向演进, 车体结构的轻量化设计与服役可靠性已成为制造领域的核心诉求。焊接作为车体构件成型的关键连接工艺, 其接头质量直接决定了车体整体结构的完整性与长期运营安全性^[1-6]。相较于成分与组织均匀的母材, 焊接接头因热循环作用易形成组织异质区与内应力集中, 成为车体结构中的力学薄弱环节。因此, 深入揭示不同焊接工艺对车体母材对接接头组织及力学性能的调控机制, 对优化焊接工艺参数、延长车体结构疲劳寿命及保障行车安全具有重要工程价值^[7-16]。

在焊接接头性能研究领域，学者们已开展大量探索。赵琦璠等^[17]采用 MIG 焊工艺对 5B72 铝钎合金进行焊接，系统分析接头力学性能与疲劳特性，结果显示接头平均抗拉强度达 285.7 MPa，强度系数为 0.66，断后伸长率 13.44%，且断裂均发生于焊缝区域，通过升降法测试得到其中值疲劳极限为 75 MPa，SEM 断口分析发现终断区存在典型韧窝形貌及 Al₃Sc 强化相，证实 Sc 元素可通过细晶强化与析出强化提升接头性能。韩团结等^[18]采用 MAG 焊对 3 mm 厚 22MnB5 钢板进行对接试验，系统研究焊接电流、焊接电压以及焊接速度对接头成形质量及力学性能的影响规律，旨在解决 22MnB5 高强钢在汽车轻量化领域的高效可靠连接需求。除了上述弧焊领域的研究外，激光焊接作为一种前景广阔的新兴焊接技术，也得到了广泛的应用。张书权^[19]通过试验与检测相结合的方法，利用光纤激光焊对 2.5 mm 厚的 TC4 钛合金展开焊接试验，并借助金相显微镜、扫描电子显微镜、万能拉伸试验机等检测手段，对激光焊接接头的组织和力学性能进行了研究。顾思远等^[20]采用“单激光打底+激光-电弧复合焊”工艺焊接 10 mm 厚 S700MC 高强钢，分析接头组织形态与力学性能关系，发现焊缝粗晶区因魏氏体组织导致硬度梯度增大，成为疲劳裂纹主要萌生源，通过升降法测得母材与焊缝疲劳极限分别为 350 MPa 和 172 MPa，并创新性结合 Weibull 分布模型与三参数幂函数 S-N 模型，拟合得到高精度 P-S-N 曲线，证实该复合焊接工艺可有效降低疲劳性能损失，为高强钢结构寿命预测提供可靠技术方法。

在焊接技术领域，激光焊与弧焊作为两类主流的熔焊工艺，长期以来受到国内外学者的广泛关注与深入研究。但在高强度钢焊接领域，二者的系统性对比研究仍存在明显缺口。目前已有的相关研究多集中于单一工艺的性能提升或特定工况下的适用性验证，鲜少将激光焊与弧焊置于统一的评价体系中，从微观组织演化规律、力学性能等维度开展全面的对比分析。这种研究现状的局限性，导致工程技术人员在针对高强度钢构件选择焊接工艺时，缺乏足够的理论依据与数据支撑，难以实现焊接质量、生产效率与综合成本的最优平衡。因此，本研究以国产典型车体母材为对象，采用不同焊接方式制备对接接头，通过系统测试与分析接头静强度及疲劳性能，旨在为轨道车辆制造中高强度钢构件焊接工艺的科学选型与接头质量可靠控制提供直接数据支撑。

1 试验材料与设备

本试验选取的母材为 Q310NQL2(板厚 2 mm)和 Q355ME(板厚 3 mm)两种材料，以同种材料相同厚度对接，焊接方式采用激光焊和弧焊，母材化学成分如表 1、力学性能如表 2 所示。本次拉伸和疲劳试验所用设备为 MTS Landmark 电液伺服疲劳试验机，如图 1 所示，最大加载载荷为 100 kN，最高加载频率 100 Hz。

表 1 母材化学成分(质量分数)(%)

Table 1 Chemical composition of base metal (mass fraction) (%)

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Q355ME	≤0.14	≤0.5	≤1.6	≤0.025	≤0.02	≤0.3	≤0.5
Q310NQL2	≤0.08	≤0.30	≤0.42	≤0.09	≤0.0045	≤0.352	0.14
牌号	Cu	N	Als	Nb	V	Mo	-
Q355ME	≤0.4	≤0.015	≥0.015	≤0.05	≤0.1	≤0.1	-
Q310NQL2	≤0.28	0.02	≤0.017	-	-	-	-

表 2 两种母材的力学性能

Table 2 Mechanical Properties of Two Base Materials

牌号	屈服强度/MPa(≤ 16)	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
Q355ME	≥ 355	470~630	≥ 22
Q310NQL2	≥ 310	≥ 440	≥ 26



图 1 MTS Landmark 电液伺服疲劳试验机

Fig. 1 MTS Landmark electro-hydraulic servo fatigue testing machine

焊接所用设备参数及焊接条件如表 3 所示。

表 3 焊接设备及参数

Table 3 Welding equipment and parameters

序号	工艺	焊接设备	焊丝牌 号	保护气体	离焦 量/mm	激光功 率/W	送丝速度 /(m/min)	焊接电 流/A	电弧电 压/V	焊接速度/ (m/min)
1	激光焊	激光焊机 IPG	THQ— G2Si	99.999%Ar	+5	4900	—	—	—	1.2
2	弧焊 (MAG)	福尼斯 焊机 4000	THQ— G2Si	18%CO2 +82%Ar	—	—	3.9	124	19	0.228

两种材料焊接试板尺寸及切割后的试样开坡口形式如图 2 所示。

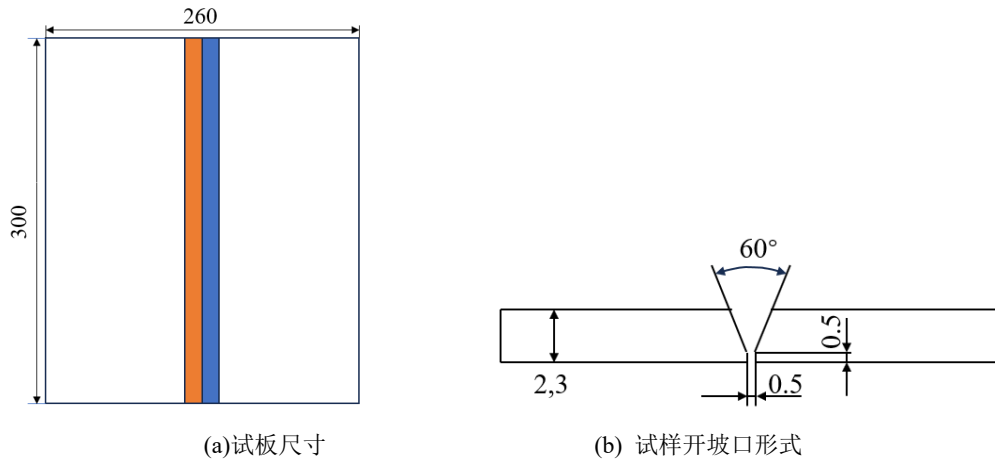


图 2 试板尺寸及试样开坡口形式 (单位: mm)

Fig. 2 Test Plate Dimensions and Specimen Groove Configuration (unit : mm)

2 试验方法

2.1 拉伸试验

在进行疲劳试验前，需要进行拉伸试验测试，以得到焊接接头的弹性极限、屈服强度、强度极限、条件断裂强度等参数，方便后续确定疲劳试验的初始应力级。拉伸试验按照标准 GB/T 2651—2023《金属材料焊缝破坏性试验横向拉伸试验》进行，拉伸试样的尺寸如图 3a、b 所示，此次拉伸试验有两种不同材料（厚度）的两种焊接方式的四组焊接接头，使用 MTS Landmark 电液伺服疲劳试验机来完成拉伸试验，拉伸速率为 2 mm/min，每组分别取 3 个试样作拉伸试验，结果取平均值。

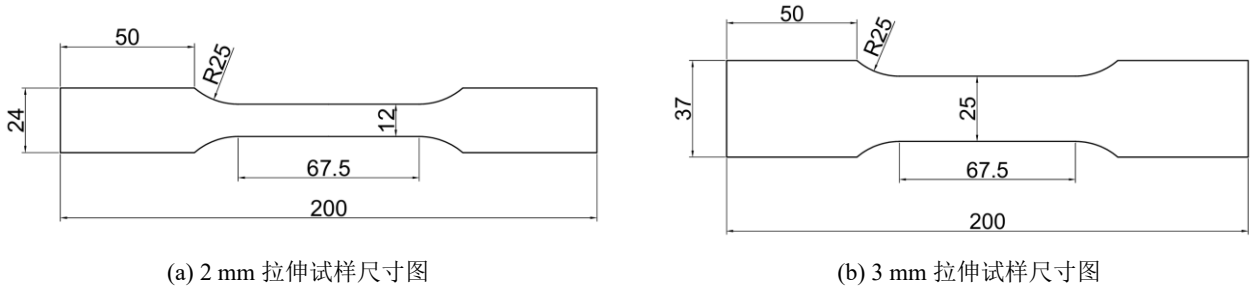


图 3 拉伸试验尺寸设计图（单位：mm）

Fig. 3 Tensile test dimension design drawing (unit : mm)

2.2 疲劳试验

本次疲劳试验采用轴向加载的方式，应力比为 0.1，频率为 40 Hz。疲劳试样尺寸参照 GB/T 3075-2021《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》进行设计，具体尺寸参数如图 4 所示。高周疲劳试验方案遵循国际焊接学会（IIW）推荐标准，试验终止判定依据为：若试样经受 2×10^6 次循环加载后仍未发生断裂，则判定为“越出”并终止该试样试验。

本研究利用“升降法”来进行疲劳极限测试^[21]，具体实施流程如下：

1) 初始应力水平确定：首根试样的应力水平依据前期拉伸试验获取的接头强度参数（屈服强度、强度极限）进行选取，优先选择较高应力水平以快速接近疲劳极限区间；

2) 应力水平调整规则：后续试样的应力设定需依据前一根试样的试验结果实时调整。当第一根试样循环次数未达 2×10^6 次即发生断裂（判定为“破坏”）时，下一根试样的试验需选用低一级应力水平；反之则判定为“越出”，下一根试样的试验则选用高一级应力水平；

3) 试验闭合判定：试验持续进行直至升降图满足“闭合”条件，具体判定标准为：根据已获取的有效数据点终点（“越出”或“破坏”），假设终点之后的待做数据点和有效数据的起点为同一级应力，则判定升降图闭合；

4) 应力增量设定：通过前期拉伸试验计算的得到的疲劳极限，计算得到本次疲劳试验的应力增量为 10 MPa。

中值疲劳强度估计量表达式为

$$\hat{S}_{50} = \frac{1}{n^*} \sum_{i=1}^n n_i^* S_i^* \quad (1)$$

式中： i 为试样序号； n_i^* 为对应应力级 S_i^* 的对子数量； n^* 为总对子数； n 为试样数。

子样标准差的计算式为

$$s^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n^*} [(S_i^* - \hat{S}_{50})^2 n_i^*]}{n^* - 1}} \quad (2)$$

相应存活率的安全疲劳极限为

$$\hat{S}_p = \hat{S}_{50} + u_p \beta s^* \quad (3)$$

式中： p 为存活率； β 为标准差修正因数； u_p 为与存活率相关的标准正态偏量。

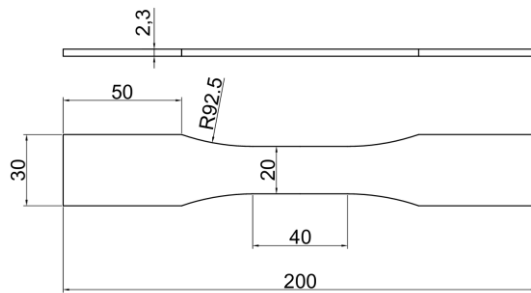


图4 疲劳试样尺寸图 (单位: mm)

Fig.4 Fatigue specimen size diagram (unit : mm)

3 试验结果

3.1 拉伸试验结果

实验前两种焊接方式得到的焊接接头宏观形貌如图5所示，4组对接接头拉伸后典型断口位置如图6所示，2 mm (Q310NQL2)激光焊对接接头、2 mm (Q310NQL2)弧焊对接接头、3 mm (Q355ME)激光焊对接接头断裂位置均在母材处，3 mm (Q355ME)弧焊对接接头断裂位置在焊缝边缘。

如图7所示，对于应力指标，2 mm 焊接接头中弧焊对接接头的屈服强度、强度极限、弹性极限、条件断裂强度都比激光焊的高；3 mm 焊接接头中激光焊接接头的除弹性极限外的各项应力指标与弧焊相近，弹性极限则显著高于弧焊。对于塑形指标，2 mm 激光焊对接接头的断面收缩率和断后伸长量都最大，3 mm 激光焊对接接头的断面收缩率最小，3 mm 弧焊对接接头的断后伸长量最小，特别对于同种材料的断后伸长量，激光焊接比弧焊的接头更大。



图5 焊缝宏观形貌

Fig.5 Macrographic morphology of the weld

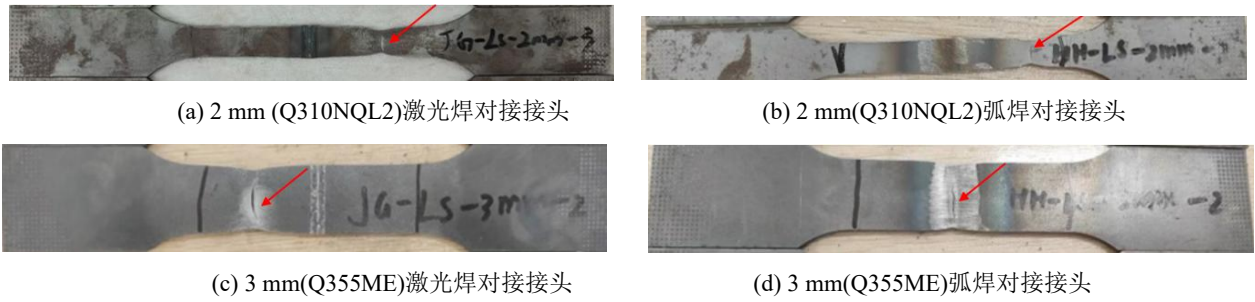


图 6 拉伸断裂试件断口位置

Fig.6 Fracture position of tensile fracture specimen

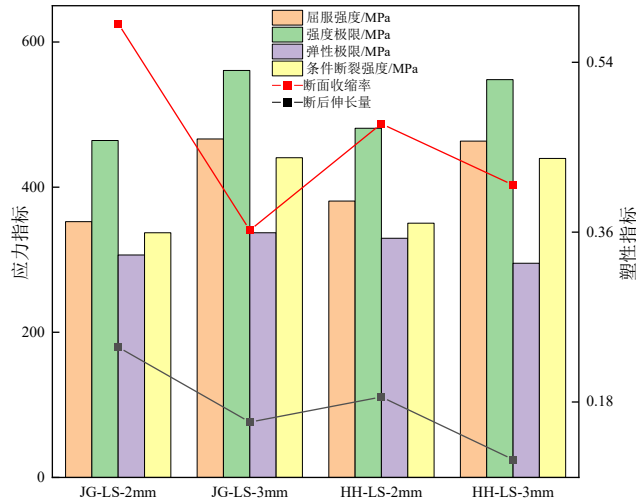


图 7 拉伸试验结果

Fig.7 Tensile test results

3.2 疲劳实验结果

根据试验结果分别绘制 4 种规格试样的疲劳试验升降图，具体如图 8 所示（图中“X”代表试样在达到指定循环次数前发生“断裂”，“O”代表试样经受指定循环次数后“未断裂”）。由图 8 可知，4 组升降图均满足前文所述的“闭合”判定条件，且每组有效子样对数量均为 6。基于该组有效数据，利用式(1)~式(3)，可求解得到不同存活率（如 95%、99.5%）与置信度下的接头条件疲劳极限。

试验测得的数据为应力幅值，需要将其转化为应力最大值

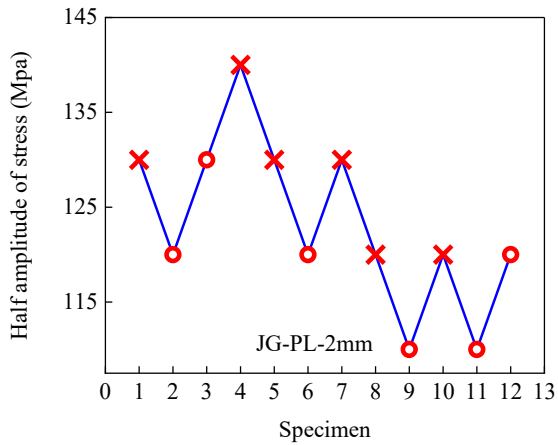
$$\sigma_{\max} = \frac{2\sigma_a}{1 - R_\sigma} \quad (4)$$

式中： σ_{\max} 为应力最大值； σ_a 为应力幅值； R_σ 为循环应力比。

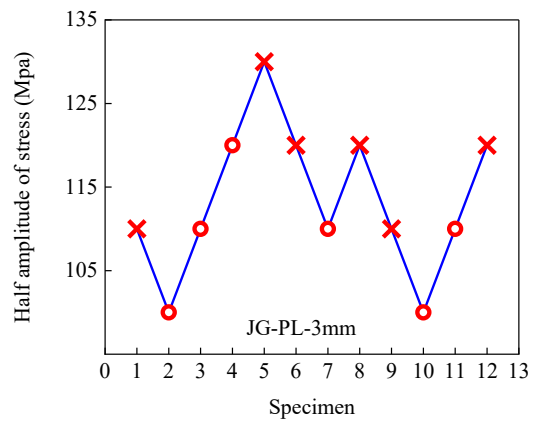
利用 MKJ 图来对比 4 组焊接接头的疲劳极限值，MKJ 图曲线计算如下

$$\sigma_{\max} = 150 \cdot 1.04^{-x} \frac{2(1 - 0.3R_\sigma)}{1.3(1 - R_\sigma)} \quad (5)$$

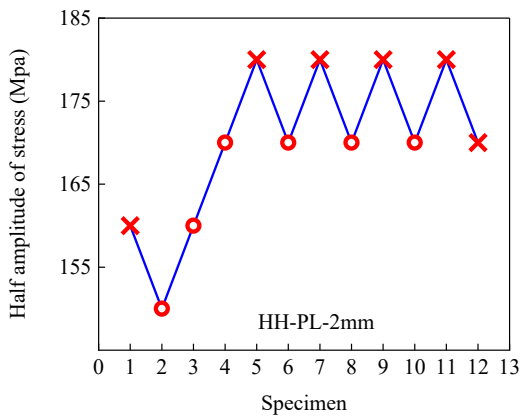
式中： x 为 MKJ 曲线的指数值，可以通过试验结果反推得到，4 组焊接接头在不同存活率和置信度条件下的指数值如表 4 所示。



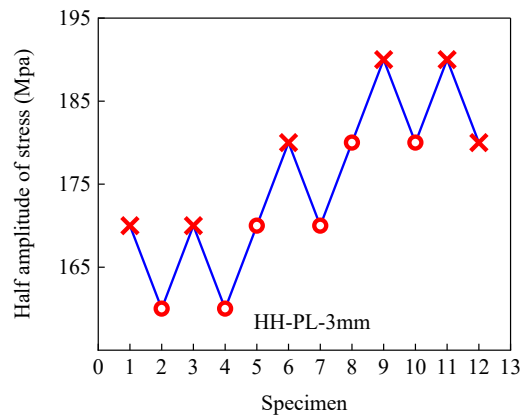
(a) 2 mm Q310QL2 激光焊



(b) 3 mm Q355ME 激光焊



(c) 2 mm Q310QL2 弧焊



(d) 3 mm Q355ME 弧焊

图 8 条件疲劳极限升降图

Fig. 8 Conditional fatigue limit diagram

表 4 MKJ 曲线的指数值 x

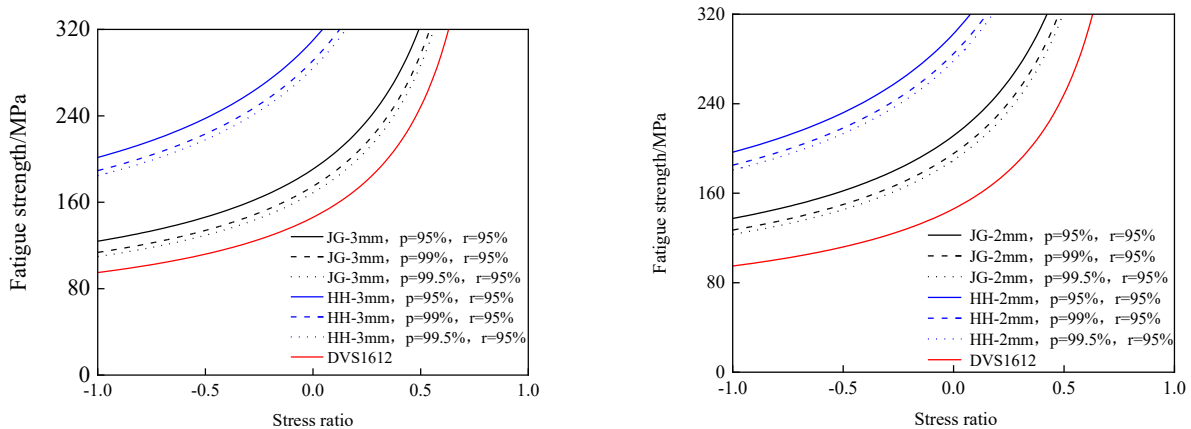
Table 4 Index value x of MKJ curve

材料	焊接方式	存活率/%	x
Q355ME	激光焊	95	4.8667
		99	7.0953
		99.5	7.977
	弧焊	95	-7.5246
		99	-5.9264
		99.5	-5.3013
Q310QL2	激光焊	95	2.2287
		99	4.2295
		99.5	5.016
	弧焊	95	-6.9067
		99	-5.3595
		99.5	-4.7627

基于式 (5), 本文选取 DVS1612 标准中 S355 钢的对接接头 MKJ 曲线 (存活率 99.5%) 作为参照,

绘制了 Q355ME 钢材（板厚 3mm）和 Q310NQL2（板厚 2mm）对接接头在两种焊接工艺下的 MKJ 曲线，如图 9 所示。

从图中可以明显看出，对于同种材料以及相同厚度的焊接接头试样，不同焊接方式对接头的疲劳极限具有显著影响。在相同存活率与置信度下，弧焊焊接接头的疲劳强度普遍高于激光焊接接头，此外，随着存活率 p 的提高（从 95%至 99.5%），两类焊接接头的疲劳极限均呈现下降趋势，这与疲劳数据分散性增加、设计保守性提高的预期一致。



(a) Q355ME(板厚 3 mm)

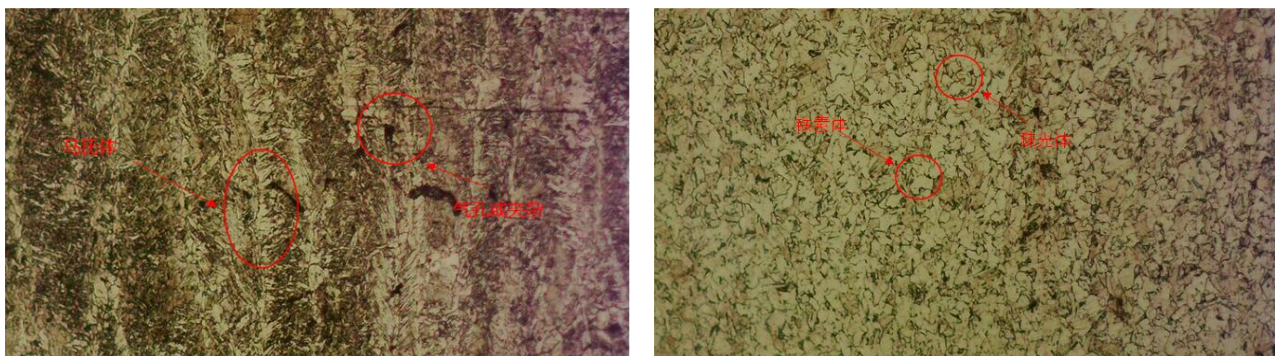
(b) Q310NQL2(板厚 2 mm)

图 9 试验值与 DVS1612 标准的 MKJ 曲线对比

Fig.9 Comparison of test value and MKJ curve of DVS1612 standard

3.3 试验结果分析

疲劳试验结果显示，弧焊焊接接头的疲劳强度普遍高于激光焊接接头。为进一步探究这一现象的成因，本研究对 Q355ME 钢激光焊接与弧焊焊接接头的疲劳失效断口进行了金相分析，结果如图 10 所示。由图 10 可见，激光焊接试样的断口组织中不仅存在大量马氏体，还伴有气孔或夹杂缺陷；而弧焊焊接试样的断口组织则主要由铁素体与珠光体构成。



(a) 3 mm Q355ME 激光焊断口金相组织

(b) 3 mm Q355ME 弧焊断口金相组织

图 10 疲劳断口金相组织

Fig. 10 Metallographic microstructure of fatigue fracture surface

因此，结合弧焊与激光焊接接头焊缝的宏观形貌观察及疲劳断口的金相组织分析结果可知，弧焊接头的疲劳极限普遍高于激光焊接头，具体原因如下：

1) 焊缝成形与缺陷差异: 激光焊接过程中由于热输入集中、熔池蒸发剧烈, 易形成气孔、未熔合及焊趾下凹等缺陷, 这些缺陷在焊趾或焊缝表面形成应力集中区, 是疲劳裂纹的主要萌生源。弧焊接头成形较圆滑、气孔率较低, 应力集中系数较小, 因此疲劳裂纹萌生延后, 疲劳寿命提高。

2) 表面处理: 弧焊接头经焊后打磨, 焊趾过渡圆滑、缺陷减少, 表面应力集中显著降低, 并形成一定压应力层, 延缓疲劳裂纹萌生与扩展; 而激光焊接头未打磨, 焊趾凹陷及飞溅等不连续处导致应力集中和残余拉应力较高, 易促使裂纹早期萌生, 疲劳寿命因而明显降低。

3) 显微组织特征差异: 弧焊焊缝组织以铁素体+珠光体为主, 晶粒虽稍粗大, 但韧性较好, 对裂纹扩展具有更强的阻滞作用, 激光焊焊缝组织主要由细针状马氏体组成, 硬度高但塑性较低, 裂纹扩展阻力较弱, 因此弧焊对接接头疲劳强度大于激光焊。

4 结论

通过拉伸试验得到焊接接头的弹性极限、屈服强度、强度极限、条件断裂强度等参数, 之后根据得到的参数采用升降法并参照 DVS1612 标准对 4 种焊接接头疲劳性能进行了研究, 得出以下结论。

1) 对于应力指标, 2 mm 厚度 Q310NQL2 厚度接头中, 弧焊对接接头的屈服强度、强度极限、弹性极限及条件断裂强度均高于同规格激光焊接头; 而 3 mm 厚度 Q355ME 材料接头则呈现差异化特征, 激光焊对接接头除弹性极限显著高于弧焊接头外, 其余应力指标与弧焊接头基本持平。

2) 对于塑形指标, 塑形性能参数表现出明显的材料—工艺关联性。2 mm 厚度 Q310NQL2 激光焊对接接头的断面收缩率与断后伸长量均为四种接头中最大值; 3 mm 厚度 Q355ME 接头中, 激光焊对接接头断面收缩率最小, 弧焊对接接头断后伸长量最小。值得注意的是, 针对同种材料同厚度的接头试样, 激光焊工艺制备的接头其断后伸长量普遍大于弧焊接头, 这一规律为焊接工艺的塑形优化提供了参考。

3) 对于同种材料同厚度的焊接接头试样, 焊接方式对其疲劳极限具有显著调控作用。在相同存活率与置信度条件下, 弧焊对接接头的疲劳强度普遍高于激光焊对接接头, 表明两种焊接工艺在接头微观组织与应力分布上的差异, 直接影响了接头的抗疲劳能力。进一步分析存活率的影响可知, 当存活率由 95% 提升至 99.5% 时, 两类焊接接头的疲劳极限均呈现明显下降趋势。这一现象与高存活率要求下疲劳数据分散性增大、工程设计保守性提高的理论预期完全一致, 可为该类焊接接头在不同可靠性要求场景下的应用提供数据支撑。

4) 弧焊接头因焊缝成形良好、缺陷少、表面经打磨光滑、组织韧性高、残余应力低, 综合疲劳性能显著优于激光焊接头。激光焊接头的疲劳极限偏低主要受气孔、焊趾凹陷及马氏体脆化组织的共同影响。通过优化激光焊接工艺参数、提高保护气体纯度、改善焊趾成形并配合后续表面打磨或喷丸等强化处理, 可有效提高激光焊接接头的疲劳强度与服役可靠性。

参考文献

- [1] RAY T, Kundu J, Kundu A, et al. Fatigue behaviour of laser spot welds in dual phase 780 steel [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105374.
- [2] 李维平, 姚银, 李前, 等. 表面残余应力对车轴疲劳强度的影响[J]. 铁道机车与动车, 2025, 7: 8-10+14.
LI W P, YAO Y, LI Q, et al. Impact of surface residual stress on axle fatigue strength[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2025, 7: 8-10+14.

- [3] 李文夏, 张祥杰, 李兵, 等. 轨道交通车辆铝合金焊接接头疲劳性能测试标准对比分析[J]. 标准科学, 2025, S1: 146-149.
LI W X, ZHANG X J, LI B, et al. Comparative Analysis of Fatigue Performance Testing Standards for Aluminum Alloy Welded Joints in Rail Transit Vehicles[J]. Standard Science, 2025, S1: 146-149.
- [4] 杜纵横. 基于 IIW-2259-15 标准的地铁构架疲劳性能研究[J]. 机车车辆工艺, 2025, 61(3): 34-38.
DU Z Z. Research on fatigue performance of metro vehicle structures based on IIW-2259-15 standard[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2025, 61(3): 34-38.
- [5] 张旭. 车轴表面处理提高疲劳强度关键工艺研究[D]. 大连交通大学, 2025.
ZHANG X. Research on the key process of axle surfacetreatment to improve fatigue strength[D]. Dalian Jiaotong University, 2025.
- [6] Lin L, Shang X. Time series forecasting of train axle fatigue crack acoustic emission signals by integrating multi-head attention mechanism into DLinear model[J]. Applied Acoustics, 2025, 240: 110922-110922.
- [7] SHARMA S K, SHARMA R C, LEE J. Effect of rail vehicle-track coupled dynamics on fatigue failure of coil spring in a suspension system[J]. Applied Sciences, 2021, 11(6): 1-17.
- [8] HU YANAN, WU SHENGCHUAN, WITHERS P J, et al. Corrosion fatigue lifetime assessment of high-speed railway axle EA4T steel with artificial scratch[J]. Engineering Frac ture Mechanics, 2021, 245: 107588.
- [9] 宋玉刚,程明忠. 城市轨道交通车辆弹簧疲劳寿命估计研究[J].太原学院学报(自然科学版), 2025, 43(2): 53-58.
SONG Y G, CHENG M Z. Research on Fatigue Life Estimation of Urban Rail Transit Vehicle Spring[J]. Journal of Taiyuan University(Natural Science Edition), 2025, 43(2): 53-58.
- [10] CHEN R, CHEN J Y, WANG P, et al. Impact of wheel profile evolution on wheel-rail dynamic interaction and surface initiated rolling contact fatigue in turnouts[J]. Wear, 2019, 438/439: 203109.
- [11] 张振先, 吴兴文, 吴圣川, 等. 铁道车辆转向架振动疲劳载荷定义方法探讨[J]. 机械工程学报, 2024, 60(22): 311-328.
ZHANG Z X, WU X W, WU S C, et al. Investigation on Load Definition of Vibration Fatigue of Railway Vehicle Bogie[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(22): 311-328.
- [12] 张祎薇, 陈奇迹. 碳纤维复合材料在轨道交通领域的研究方法与应用发展[J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(4): 92-96.
ZHANG Y W, CHEN Q J. Research Methods and Application Development of Carbon Fiber Composite Materials in the Field of Rail Transportation[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2024, 53(4): 92-96.
- [13] Peng B, Wu X, Chen Z, et al. Fatigue failure mechanism of a metro bogie frame and its Mitigation method[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 174: 109511-109511.
- [14] 胡定祥, 朱程, 金鑫, 等. 基于频域特征的城市轨道交通车辆转向架疲劳分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8): 256-262+270.
HU D X, ZHU C, JIN X, et al. Fatigue Analysis of Urban Rail Transit Vehicles Bogies Based on Frequency Domain Features[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(8): 256-262+270.
- [15] 阚晓阳, 胡悦兵, 张世欣, 等. 轨道交通车辆用 5083 铝合金单边角接头的疲劳性能研究[J]. 电焊机, 2024, 54(5): 60-64+116.
KAN X Y, HU Y B, ZHANG S X, et al. Study on Fatigue Properties of Single Side Corner Joint of 5083 Aluminum Alloy for Rail Transit Vehicle[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(5): 60-64+116.
- [16] 杨丽, 耿庆涛, 黄健, 等. 轨道交通通用 6005A 铝合金疲劳断裂特征分析[J]. 上海电气技术, 2023, 16(3): 24-27.
YANG L, GENG Q T, HUANG J. Analysis of Fatigue Fracture Characteristic of 6005A Aluminum Alloy Used in Rail Transit[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2023, 16(3): 24-27.
- [17] 赵琦璠, 许鸿吉, 朱厚淳, 等. 5B72 铝钪合金 MIG 焊接头力学性能与疲劳性能研究[J].焊接技术, 2025, 54(6): 44-47.
ZHAO Q F, XU H J, ZHU H C, et al. Research on mechanical and fatigue properties of 5B72 Al-Sc alloy MIG welded joints[J]. Welding Technology, 2025, 54(6): 44-47.
- [18] 韩团结, 王铎, 张新戈, 等. 工艺参数对 22MnB5 钢 MAG 焊接头成形及性能影响研究[J]. 电焊机, 2025, 55(11): 64-71+81.
HAN T J, WANG D, ZHANG X G, et al. Effect of Process Parameters on Weld Formation and Mechanical Properties of MAG Welded Joints for 22MnB5 Steel [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(11): 64-71+81.

- [19] 张书权, 王守武, 王立跃, 等. TC4 钛合金激光焊接接头的组织与力学性能[J]. 焊接, 2025, (11): 74-78+87.
ZHANG S Q, WANG S W, WANG L Y, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded joints of TC4 titanium alloy[J]. Welding & Joining, 2025, (11): 74-78+87.
- [20] 顾思远, 李子骏, 刘洋, 等. S700MC 高强钢激光-电弧复合焊接接头组织与疲劳性能研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(14): 142-150+157.
GU S Y, LI Z J, LIU Y, et al. Study on Weld Microstructure and Fatigue Properties of S700MC High Strength Steel Joint by Laser-arc Hybrid Welding[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(14): 142-150+157.
- [21] 汪洁, 胡绪腾, 贾旭, 等. 盘用材料缺口特征尺寸对缺口强度的影响[J]. 航空发动机, 2021, 47(2): 68-73.
WANG J, HU X T, JIA X, et al. The influence of notch characteristic size of disc material on notch strength[J]. Aeroengine, 2021, 47(2): 68-73.



第一作者: 金希红(1970—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 中车首席专家。研究方向为电力机车及城轨车辆,



通信作者: 陈道云 (1988—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为结构强度与可靠性。