

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.16

焊后热处理对耐候钢焊接接头裂纹扩展速率影响研究

裴 鹏, 胡文浩*, 么超凡, 孙林祥

中车唐山机车车辆有限公司转向架技术中心, 河北 唐山 064099

摘 要: 为明确焊后热处理对耐候钢焊接接头疲劳裂纹扩展特性的影响规律, 支撑轨道车辆焊接结构轻量化设计与焊后工艺优化, 以轨道车辆常用 Q460NE、S355J2W(H) 耐候钢 MAG 焊焊接接头为研究对象, 通过开展疲劳裂纹扩展试验, 研究了焊后热处理+抛丸和焊后抛丸两种工艺处理对接头裂纹扩展速率的影响。基于获取的 Q460NE、S355J2W(H) 焊接接头疲劳裂纹扩展试验数据, 结合 Paris 公式拟合得到了焊后热处理+抛丸和焊后抛丸的 Q460NE、S355J2W(H) 焊接接头的 $da/dN-\Delta K$ 曲线。结果表明: (1) 随着应力强度因子的逐渐增加, 两种工艺下两类钢焊接接头的疲劳裂纹扩展速率整体相近, 无显著差异; (2) 经 Paris 公式拟合后得到的四组焊接接头的 $da/dN-\Delta K$ 曲线 m 值稳定分布在 3.5 ± 0.4 范围内, 焊后热处理+抛丸工艺的 m 值略低于焊后抛丸工艺, 且 Q460NE 与 S355J2W(H) 接头的 m 值差值仅 0.10~0.23, 这表明焊后热处理对于 Q460NE 和 S355J2W(H) 焊接接头裂纹扩展速率影响程度较为有限。研究可为轨道车辆轻量化应用提供参考。

关键词: 焊后热处理; 耐候钢; 焊接接头; 疲劳裂纹扩展速率; Paris 公式; 轨道车辆

中图分类号: TG405 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)04-0128-07

Study on the Effect of Post-weld Heat Treatment on Crack Propagation Rate of Weathering Steel Welded Joints

PEI Peng, HU Wenhao, YAO Chaofan, SUN Linyang

Bogie Technology Center, CRRC Tangshan Rolling Stock Co., Ltd., Tangshan 064099, China

Abstract: To clarify the influence of post-weld heat treatment on the fatigue crack propagation characteristics of weathering steel welded joints and support the lightweight design and post-weld process optimization of rail vehicle welded structures, the MAG welded joints of Q460NE and S355J2W(H) weathering steels commonly used in rail vehicles were taken as research objects. The effects of two processes, i.e., post-weld heat treatment plus shot peening and post-weld shot peening, on the crack propagation rate of the joints were studied through fatigue crack propagation tests. Based on the obtained fatigue crack propagation test data of Q460NE and S355J2W(H) welded joints, the $da/dN-K$ curves of the joints under the two processes were fitted by using the Paris formula. The results show that: (1) With the increase of stress intensity factor, the fatigue crack propagation rates of the two types of steel welded joints under the two processes are generally similar without significant difference; (2) The m values of the $da/dN-K$ curves of the four groups of welded joints fitted by the Paris formula are stably distributed in the range of 3.5 ± 0.4 . The m value of post-weld heat treatment plus shot peening is slightly lower than that of post-weld shot peening, and the difference in m values between Q460NE and S355J2W(H) joints is only 0.10-0.23, indicating that post-weld heat treatment has a limited effect on the crack propagation rate of Q460NE and S355J2W(H) welded joints. This study can provide a reference for the lightweight application of rail vehicles.

Keywords: post-weld heat treatment; weathering steel; welded joint; fatigue crack propagation rate; Paris formula; rail vehicle

引用格式: 裴鹏, 胡文浩, 么超凡, 等. 焊后热处理对耐候钢焊接接头裂纹扩展速率影响研究[J]. 电焊机, 2026, 56(4): 128-134.

收稿日期: 2025-10-13 修回日期: 2025-11-13

基金项目: 中车唐山公司科技项目(P92405; PA2305)

作者简介: 裴 鹏(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道车辆转向架研发与制造技术的研究。

通讯作者: 胡文浩(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向: 轨道车辆焊接技术。E-mail: wenhaohu@163.com。

Citation: PEI Peng, HU Wenhao, YAO Chaofan, et al. Study on the Effect of Post-weld Heat Treatment on Crack Propagation Rate of Weathering Steel Welded Joints[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 128–134.

0 引言

焊接结构疲劳开裂是轨道车辆常见的失效形式之一,目前已有大量的断裂事故均由疲劳裂纹萌生与扩展引发^[1-4]。工程实践表明,很多情况下疲劳裂纹萌生后,其裂纹尺寸仅在微米尺度,此时结构远未达到失效破坏的程度。因此,若能掌握疲劳裂纹扩展规律,进而评估焊接结构的剩余寿命,对于预防轨道车辆焊接结构的灾难性事故发生具有重要意义^[5]。

作为焊接结构服役安全性的一项重要指标,疲劳裂纹扩展速率已受到领域内研究者的重点关注。应力比作为影响裂纹扩展行为的关键参数,其调控作用已得到大量研究验证。郭宏超等人^[6]通过对比不同应力比下 Q690 焊接接头的裂纹扩展特性,发现应力比由 0.1 提升至 0.5 时,接头裂纹扩展速率及门槛值均呈明显下降趋势;马亚飞等人^[7]发现随着应力比增大,焊缝区和母材区的裂纹扩展门槛值逐渐降低,且焊缝区域裂纹扩展门槛值较母材更为敏感。上述研究为理解焊接接头疲劳裂纹扩展机制,以及应力比等参数对于疲劳裂纹扩展速率、门槛值的影响规律提供了参考依据。

然而,实际工程中焊接结构完成焊接后,通常需经历多种焊后处理工艺以提升服役性能^[8-10]。其中,焊后热处理+抛丸复合工艺,已被证实可有效延

长焊接结构的疲劳寿命^[11]但现有研究多聚焦于单一焊后工艺对母材或普通钢材焊接接头的影响,针对轨道车辆用耐候钢(如 Q460NE、S355J2W(H))焊接接头,系统探究焊后热处理与抛丸复合工艺对疲劳裂纹扩展速率的影响报道仍较为匮乏,相关作用机制尚未明确。

鉴于此,本研究以轨道车辆轻量化设计中常用的 Q460NE 和 S355J2W(H) 耐候钢 MAG 焊接接头为研究对象,设计焊后热处理+抛丸、焊后抛丸两种对比工艺方案,通过疲劳裂纹扩展试验获取不同工艺下接头的裂纹扩展数据,系统分析焊后处理工艺对 CT 试样裂纹扩展速率的影响规律,进而为优化轨道车辆耐候钢焊接接头焊后处理工艺、提升轨道车辆焊接结构的轻量化应用提供参考。

1 材料与试验方法

选用轨道车辆低合金高强度钢 Q460NE 与耐候钢 S355J2W(H) 为母材,板厚 12 mm,其化学成分与室温力学性能分别见表 1、表 2。焊接试板下料尺寸为 600 mm×300 mm×12 mm,采用 MAG 焊制备对接接头,焊接设备为松下 YD500-GL 逆变焊机,保护气体配比为 80%Ar+20%CO₂。试板开 60°V 形坡口,钝边 1 mm,采用多层多道焊(共 3 道),具体焊接工艺参数见表 3。

表 1 Q460NE 与 S355J2W(H) 钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of Q460NE and S355J2W(H) steels (wt. %)

牌号	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Ni	Cu	Mo	N	Al	Cr
Q460NE	≤0.20	≤0.60	1.00	0.025	0.020	0.01	0.01	0.006	≤0.30	≤0.80	≤0.10	≤0.025	0.015	—
S355J2W(H)	≤0.16	0.50	0.50	0.030	0.030	—	—	—	—	0.25	—	—	—	0.40

表 2 Q460NE 钢力学性能参数(≤16 mm)

Table 2 Mechanical properties of Q460NE and S355J2W(H) steels

牌号	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%
Q460NE	≥460	540~720	17
S355J2W(H)	≥355	490~630	22

焊成后将两类钢焊接试板各分为两组,分别实施焊后热处理+抛丸与焊后抛丸两种工艺。焊后热

处理在 RT2-1000-7 电阻炉完成,装炉温度不高于 200 °C,升温速率<150 °C/h,在 590±15 °C 保温 1.5 h,随炉冷却速率控制在<120 °C/h。抛丸处理采用 HK-GJPW-TS 轨道悬挂式抛丸机,弹丸直径 0.6~0.8 mm,抛射速度 79 m/s,工件进给速度 1 m/min。

依据 ASTM E647-2015e1 (Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates) 和

表3 Q460NE与S355J2W(H)钢MAG焊焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters of MAG welding for Q460NE and S355J2W(H) steels

焊接方法	坡口角度/(°)	钝边/mm	道数	电流/A	电压/V	焊接速度/(mm·s ⁻¹)	热输入/(kJ·mm ⁻¹)	焊接时长/s
MAG焊	60	1	1	177	21	3.8	0.78	131.6
			2	233	26.6	3.8	1.30	131.6
			3	262	28	3.6	1.63	138.9

GB/T6398—2017《金属材料疲劳试验疲劳裂纹扩展速率试验方法》标准,分别在经焊后热处理+抛丸和焊后抛丸的Q460NE和S355J2W(H)焊接试板上进行CT试样取样^[5]。CT试样尺寸如图1a所示。采用线切割对Q460NE和S355J2W(H)焊接板进行加工,然后依据图1b进行CT试样取样,为保证准确获得焊缝区域的裂纹扩展速率,CT试样的V型槽设置在焊缝中心位置,并去除焊缝表面余高。疲劳裂纹扩展试验在Instron8801疲劳试验机上进行,试验频率为10 Hz,循环载荷形式为正弦循环载荷,应力比为0.1,疲劳裂纹扩展试验设备如图2所示。

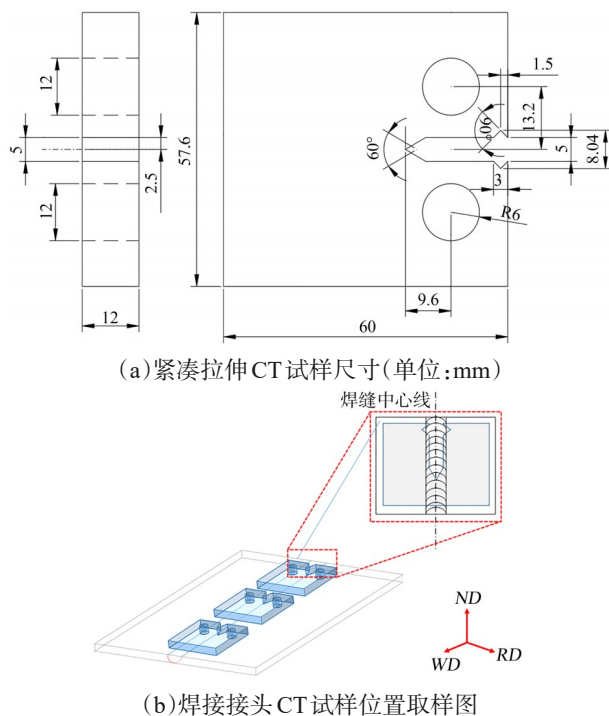


图1 CT试样尺寸及取样位置区域示意

Fig. 1 Schematic diagram of CT specimen size and sampling location

2 试验结果与分析

2.1 疲劳裂纹扩展寿命曲线

图3为Q460NE焊后热处理+抛丸、Q460NE焊



图2 疲劳裂纹扩展试验

Fig. 2 Fatigue crack growth test setup

后抛丸、S355J2W(H)焊后热处理+抛丸以及S355J2W(H)焊后抛丸的CT试样焊缝中心裂纹初始扩展段的 $a-N$ 曲线,四组接头类型的初始裂纹和终止裂纹长度如表4所示。从图中可以看出,随着循环周次的逐渐增加,裂纹长度逐渐增加, $a-N$ 曲线的斜率也逐渐向陡峭的趋势发展,最终裂纹长度扩展到裂纹扩展失稳临界值。图3a、3b为Q460NE焊后热处理+抛丸和Q460NE焊后抛丸CT试样的 $a-N$ 曲线,Q460NE焊后热处理+抛丸表现出相对较高的裂纹扩展寿命。图3c、3d为S355J2W(H)焊后热处理+抛丸和S355J2W(H)焊后抛丸CT试样的 $a-N$ 曲线,S355J2W(H)焊后抛丸表现出相对较高的裂纹扩展寿命。整体来看,四组CT试样的疲劳寿命基本分布在 $4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ 次区间,不同工艺、不同材料间的寿命差异较小,说明焊后热处理对两种耐候钢焊接接头疲劳寿命的影响有限。

2.2 裂纹扩展速率

为定量表征裂纹扩展速率与应力强度因子幅值的关系,采用Paris公式对裂纹扩展速率进行拟合。拟合公式为:

$$da/dN = C \Delta K^m \quad (1)$$

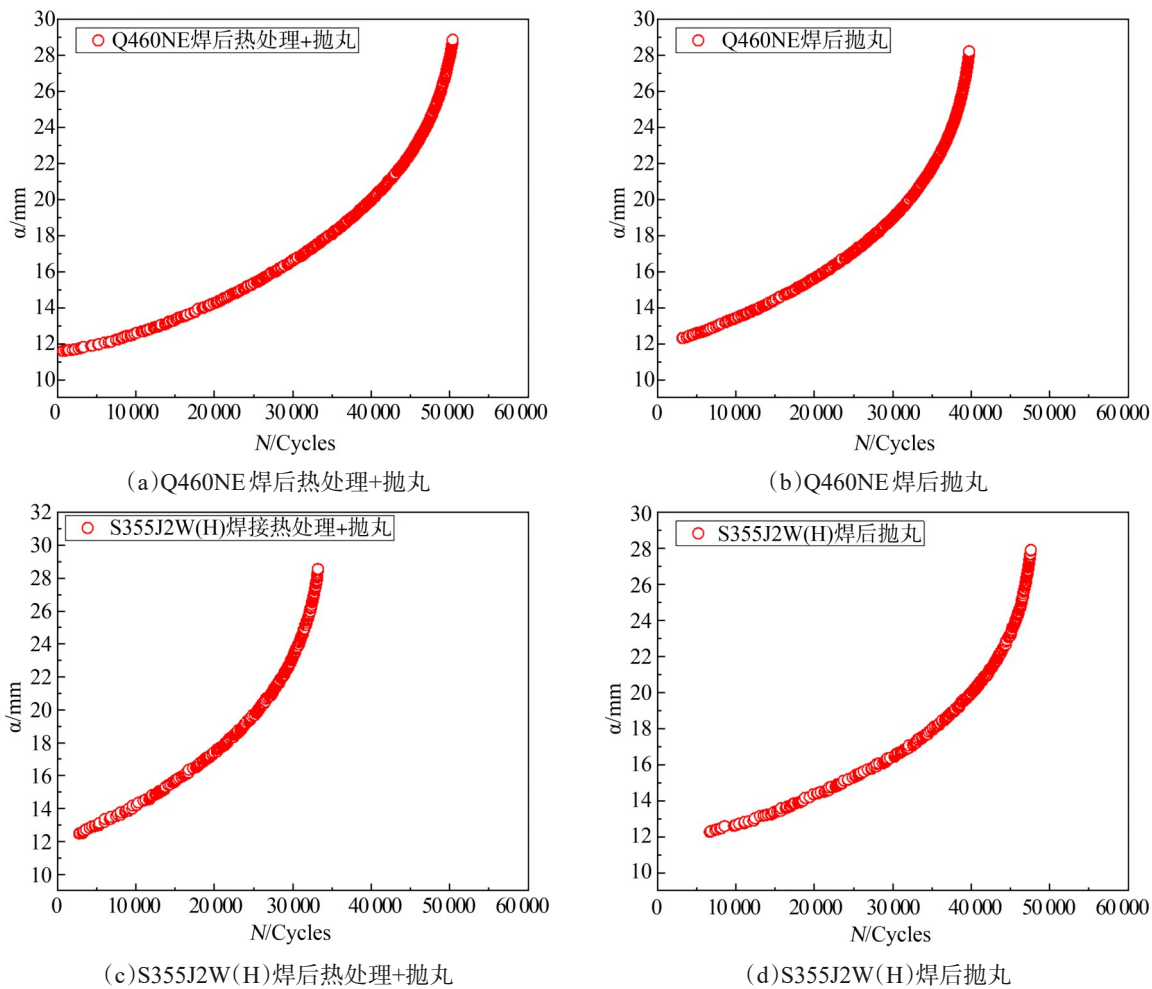


图3 四组CT试样焊缝中心裂纹扩展 $a-N$ 曲线

Fig. 3 $a-N$ curves of crack growth at weld center of four groups of CT specimens

表 4 四组接头类型的初始裂纹和终止裂纹长度

Table 4 Initial and final crack lengths of four types of joints

接头类型	初始裂纹长度 /mm	终止裂纹长度 /mm
Q460NE 焊后热处理+抛丸	11.16	29.06
Q460NE 焊后抛丸	11.30	28.41
S355J2W(H) 焊后热处理+抛丸	11.83	28.56
S355J2W(H) 焊后抛丸	12.18	27.92

式中 da/dN 为疲劳裂纹扩展速率; ΔK 为应力强度因子幅值; C 、 m 为材料与工艺相关的拟合参数。

图 4 为四组 CT 试样焊缝中心的 $da/dN-\Delta K$ 拟合曲线, 试验数据与拟合曲线吻合度较高, 说明 Paris 公式可准确描述两种耐候钢焊接接头在不同焊后工艺下的裂纹扩展行为。为了进一步对比焊后热处理+抛丸和焊后抛丸对于焊后接头裂纹扩展速率的影响, 统计了 Q460NE 和 S355J2W(H) 焊接接头

在两组工艺参数下的拟合曲线参数, 如表 5 所示。由表 5 可见, 尽管四组接头类型的 CT 试样焊缝中心裂纹扩展速率参数 C 分布在 10^{-9} 和 10^{-10} 两个数量级附近, 但参数 m 的均值为 3.5 ± 0.4 , 趋近于一个常数, 表明四种试样的裂纹扩展速率曲线斜率相近。

为了进一步对比焊后热处理+抛丸和焊后抛丸对于 Q460NE 和 S355J2W(H) 焊缝中心的裂纹扩展速率的影响, 将四组试样的 $da/dN-\Delta K$ 关系统一对比, 结果如图 5、图 6 所示。由图 5 可见, 四组 CT 试样焊缝中心的裂纹扩展速率几乎在一个分散带, 整体差异较小; 由图 6 可知, 在 $30 \sim 60 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 低应力强度因子区间, 焊后热处理+抛丸工艺接头的裂纹扩展速率略高于焊后抛丸工艺接头。结合表 5 中 m 值进一步分析, 焊后热处理+抛丸焊接接头的 m 值显著低于焊后抛丸焊接接头, 是导致上述区间速率

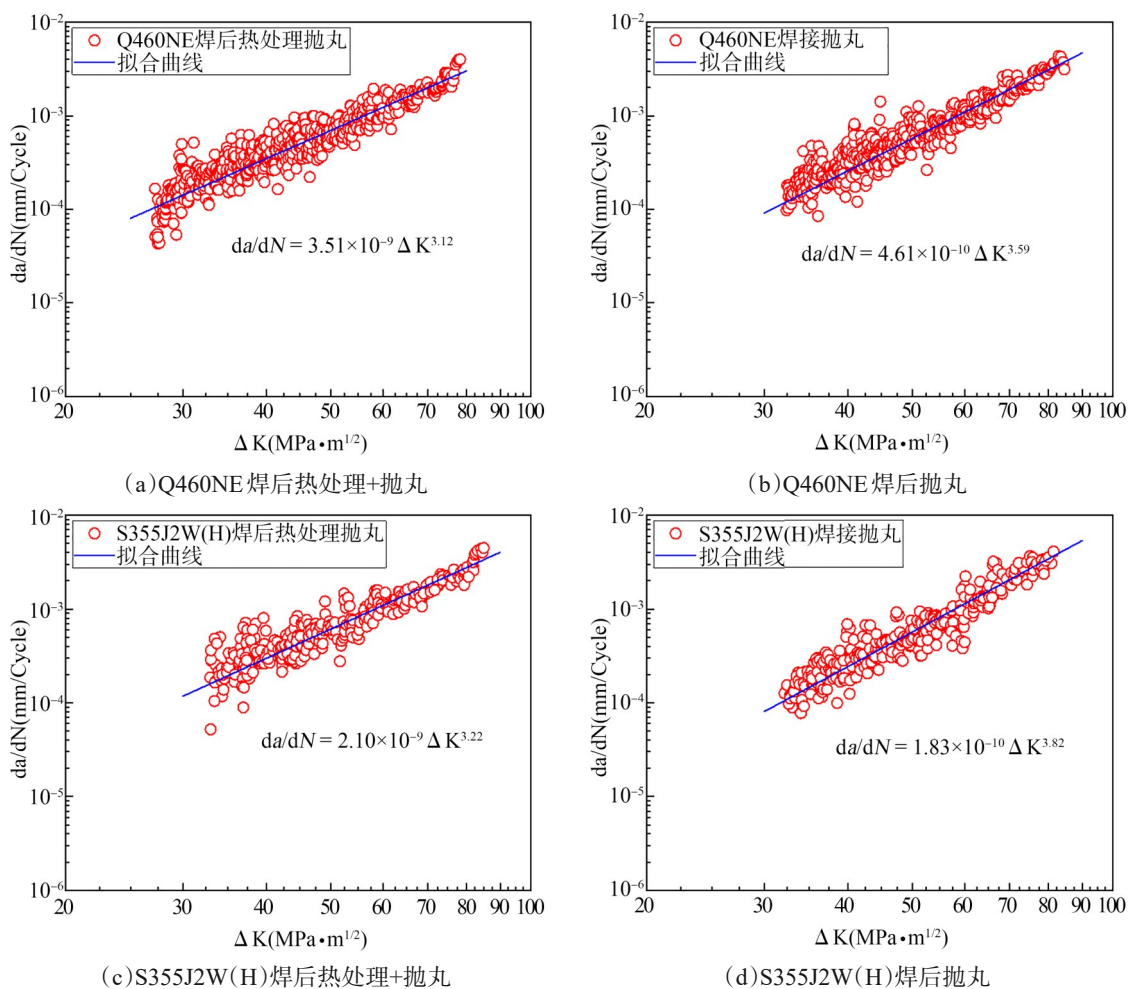


图4 四组CT试样焊缝中心裂纹扩展的 da/dN - ΔK 拟合曲线

Fig. 4 da/dN - ΔK fitting curves of crack growth at weld center of four groups of CT specimens

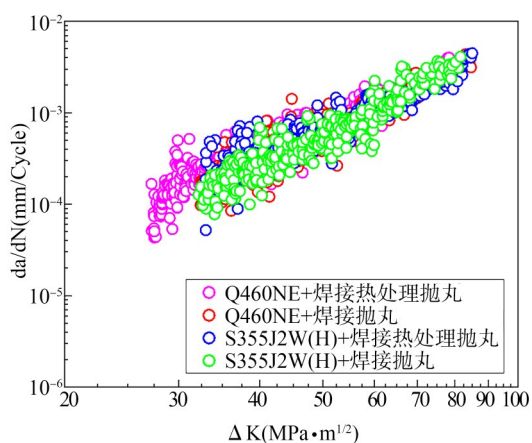


图5 4组接头CT试样焊缝中心裂纹扩展速率对比

Fig. 5 Comparison of crack growth rates at weld center of four groups of CT specimens

差异的主要原因。

从应力强度因子全区间看,如图6所示,在低应

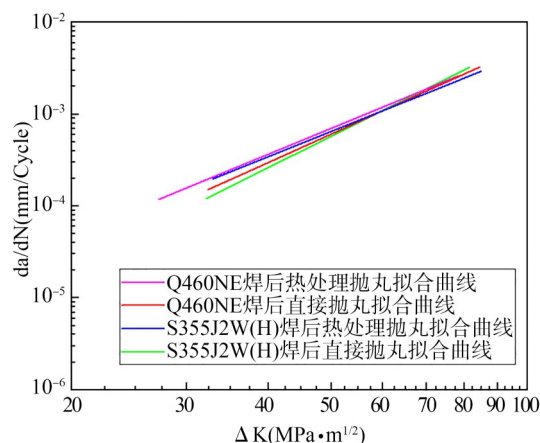


图6 4组接头CT试样焊缝中心裂纹扩展速率拟合曲线

Fig. 6 Comparison of fitting curves of crack growth rates at weld center of four groups of CT specimens

力强度因子范围内,焊后热处理+抛丸焊接接头的裂纹扩展速率较高,而当应力强度因子超过60 MPa

$\cdot m^{1/2}$ 附近时, 焊后抛丸焊接接头的裂纹扩展速率则高于焊后热处理+抛丸焊接接头。这是由于焊后热处理+抛丸焊接接头疲劳裂纹扩展曲线斜率(m 值) 低于焊后抛丸焊接接头斜率, 因而在低应力强度因子范围内焊后热处理+抛丸焊接接头裂纹扩展速率更高, 但在高应力强度因子范围内则裂纹扩展速率下降。此外, 尽管焊后热处理+抛丸、焊后抛丸下 S355J2W 焊接接头 m 值高于 Q460NE 焊接接头, 但二者差值分别为 0.10 和 0.23, 并未展现出较大的差异。因此, 仍然可以认为 S355J2W、Q460NE 焊接接头有着较为相近的裂纹扩展速率。基于此, 如果在轨道车辆制造过程中采用强度更高的 Q460NE 代替 S355J2W, 可在保持轨道车辆焊接结构整体强度不变的基础上, 进一步降低车身自重, 进而为轨道车辆轻量化提供参考。

表 5 四组接头类型 CT 试样焊缝中心裂纹扩展速率拟合曲线的 C 和 m 值

Table 5 Fitting parameters C and m of crack growth rate curves for four types of joints

试样	C	m
Q460NE 焊后热处理+抛丸	3.51×10^{-9}	3.12
Q460NE 焊后抛丸	4.61×10^{-10}	3.59
S355J2W 焊后热处理+抛丸	2.10×10^{-9}	3.22
S355J2W 焊后抛丸	1.83×10^{-10}	3.82

3 结论

以轨道车辆常用耐候钢 Q460NE 和 S355J2W (H) 焊接接头为研究对象, 分别进行了焊后热处理+抛丸和焊后抛丸处理下的 CT 试样疲劳裂纹扩展速率试验, 基于 Paris 模型揭示了焊后热处理对接头裂纹扩展行为的影响规律, 主要结论如下:

(1) 对于 Q460NE 焊接接头, 相较于焊后抛丸, 焊后热处理+抛丸表现出相对较高的裂纹扩展寿命。对于 S355J2W (H) 焊接接头, 焊后抛丸则表现出相对较高的裂纹扩展寿命。但从总体来看, 两种焊后工艺处理后, 两类耐候钢焊接接头的疲劳裂纹扩展寿命均集中在 $4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ 次区间, 工艺与材料带来的寿命差异整体较小, 焊后热处理未显著改变接头疲劳寿命水平。

(2) 四组试样的 Paris 拟合参数 m 稳定分布在

3.5 ± 0.4 范围内, 曲线斜率接近; 在低应力强度因子区间, 热处理+抛丸接头扩展速率略高, 高应力区间则趋势相反, 该差异由 m 值不同导致, 进一步证实焊后热处理对裂纹扩展速率的影响有限。

(3) 相同焊后热处理工艺下, S355J2W (H) 与 Q460NE 焊接接头的 m 值差值仅 0.10~0.23, 两种材料的疲劳裂纹扩展特性无本质区别。

(4) 综合力学性能与裂纹扩展行为, 采用强度更高的 Q460NE 替代 S355J2W (H) 用于轨道车辆焊接结构具备可行性, 可在保证结构抗疲劳开裂能力与承载安全性的前提下, 实现结构轻量化设计。

参考文献:

[1] 王苹, 裴宪军, 钱宏亮, 等. 焊接结构抗疲劳设计新方法与应用[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 349-360.
WANG P, PEI X J, QIAN H L, et al. New Fatigue Resistance Design Method and Application of Welded Structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 349-360.

[2] 杨建国, 郝建松, 李曰兵, 等. 含表面裂纹焊接结构疲劳评定的质量等级方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 82-89.
YANG J G, HAO J S, LI Y B, et al. Quality Grade Method for Fatigue Assessment of Welded Structures with Surface Cracks [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 82-89.

[3] 熊志亮, 王苹, 孟金奎, 等. 铝合金 CT 试样焊接残余应力重分布分析[J]. 焊接学报, 2021, 42(1): 65-69.
XIONG Z L, WANG P, MENG J K, et al. Analysis of Welding Residual Stress Redistribution in Aluminum Alloy CT Specimens [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(1): 65-69.

[4] 陈秉智, 何正平, 李向伟, 等. 某构件焊缝疲劳开裂的寿命预测方法应用对比[J]. 焊接学报, 2022, 43(5): 63-68.
CHEN B Z, HE Z P, LI X W, et al. Comparison and Application of Life Prediction Methods for Fatigue Cracking of Welds in a Component [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(5): 63-68.

[5] 白林越, 邵飞, 高磊, 等. 基于多因素的焊接结构疲劳裂纹扩展速率分析[J]. 计算力学学报, 2020, 37(3): 349-354.
BAI L Y, SHAO F, GAO L, et al. Fatigue Crack Growth Rate Analysis of Welded Structures Based on Multiple Factors [J]. Chinese Journal of Computational

- Mechanics, 2020, 37(3):349-354.
- [6] [1]郭宏超,关晓迪,王万祯,等.Q690 高强钢对接焊缝疲劳裂纹扩展行为研究[J/OL].工程力学,2025:1-15 [2025-10-13]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250714.1444.006>.
- GUO H C, GUAN X D, WANG W Z, et al. Study on Fatigue Crack Growth Behavior of Q690 High-Strength Steel Butt Welds[J]. Engineering Mechanics, 2025: 1-15. [2025-10-13]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250714.1444.006>.
- [7] 马亚飞,程尔祥,吴显顺,等.Q550E 高强钢及焊接接头的疲劳裂纹扩展研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2025,47(1):142-151.
- MA Y F, CHEN E X, WU X S, et al. Study on Fatigue Crack Growth of Q550E High-Strength Steel and Its Welded Joints[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(1):142-151.
- [8] 王匀,朱凯,殷苏民,等. 激光冲击载荷对低合金钢焊件残余应力场的影响[J]. 电焊机, 2015, 45(4): 165-169.
- WANG Y, ZHU K, YIN S M, et al. Effect of Laser Shock Loading on Residual Stress Field of Low-Alloy Steel Weldments[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(4):165-169.
- [9] 王桂阳,王海斗,张玉波,等. 超声冲击法提高焊接接头疲劳特性研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(5): 87-94.
- WANG G Y, WANG H D, ZHANG Y B, et al. Research Progress on Improving Fatigue Properties of Welded Joints by Ultrasonic Peening[J]. Materials Reports, 2016, 30(5):87-94.
- [10] 张林儒,李业雄,李志强,等. TIG 电弧重熔处理工艺在动车组转向架制造中的应用[J]. 电焊机, 2018, 48(3):341-343.
- ZHANG L R, LI Y X, LI Z Q, et al. Application of TIG Arc Remelting Process in Manufacturing of EMU Bogies[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(3):341-343.
- [11] 张增焕,李昊,孙小峰,等. 喷丸处理对铝锂合金激光焊接结构性能的影响[J]. 航空制造技术, 2019, 62(12):36-41.
- ZHANG Z H, LI H, SUN X F, et al. Effect of Shot Peening on Properties of Al-Li Alloy Laser-Welded Structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(12):36-41.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 64 页

- 107697.
- [12] Salem M, Le Roux S, Hor A, et al. A new insight on the analysis of residual stresses related distortions in selective laser melting of Ti-6Al-4V using the improved bridge curvature method[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36:101586.
- [13] Rashid R, Masood S H, Ruan D, et al. Effect of scan strategy on density and metallurgical properties of 17-4PH parts printed by Selective Laser Melting (SLM)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249:502-511.
- [14] MASOOMI M, THOMPSON S M, SHAMSAEI N. Laser powder bed fusion of ti-6Al-4V parts: Thermal modeling and mechanical implications[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 118-119:73-90.
- [15] Liu C Y, Tong J D, Jiang M G, et al. Effect of scanning strategy on microstructure and mechanical properties of selective laser melted reduced activation ferritic/martensitic steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 766:138364.
- [16] LIANG X, DONG W, CHEN Q, et al. On incorporating scanning strategy effects into the modified inherent strain modeling framework for laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37:101648.
- [17] LIU B, LI B Q, LI Z. Selective laser remelting of an additive layer manufacturing process on AlSi10Mg[J]. Results in Physics, 2019, 12:982-988.
- [18] Giganto S, Martinez-Pellitero S, Barreiro J, et al. Impact of the laser scanning strategy on the quality of 17-4PH stainless steel parts manufactured by selective laser melting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20:2734-2747.
- [19] Condruz M R, Matache G, Paraschiv A, et al. Microstructural and tensile properties anisotropy of selective laser melting manufactured IN 625[J]. Materials, 2020, 13(21):4829.
- [20] LIVERANI E, FORTUNATO A, LEARDINI A, et al. Fabrication of Co-Cr-Mo endoprosthetic ankle devices by means of selective laser melting (SLM)[J]. Materials & Design, 2016, 106:60-68.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>