

# 贝氏体钢激光电弧复合焊接接头疲劳裂纹扩展

韩晓辉<sup>1</sup>, 雷正<sup>2</sup>, 李仁东<sup>2</sup>, 刘艳<sup>2</sup>, 陈辉<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

<sup>2</sup>西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

**摘要** 采用标准紧凑拉伸试样对比了超低碳贝氏体钢激光电弧复合焊接接头的电弧主导区、激光主导区、热影响区和母材区的疲劳裂纹扩展速率,总结了各微区疲劳裂纹的扩展特征,分析了裂纹扩展路径发生偏折的原因。结果表明:随着应力强度因子增大,各微区的裂纹扩展速率均提高,但热影响区和母材区裂纹扩展速率的增长率随着应力强度因子的升高而减慢;当应力强度因子较低时,各区疲劳裂纹扩展速率由快到慢的顺序为母材、热影响区、电弧主导区、激光主导区;随着应力强度因子升高到一定值,各区疲劳裂纹扩展速率由快到慢的顺序变为激光主导区、电弧主导区、母材、热影响区;裂纹在热影响区内扩展时的扩展方向会发生明显偏折,并随着应力强度因子增大而产生大量二次裂纹,在焊缝的裂纹中仅发生小幅偏折,这与材料的成分和组织不均匀有关;通过观察各微区的断口认为二次裂纹的产生与硬质相颗粒有关,二次裂纹的产生也是疲劳裂纹扩展速率变化的重要原因。

**关键词** 激光技术; 贝氏体钢; 激光电弧复合焊; 疲劳裂纹扩展; 二次裂纹

中图分类号 V216.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1002014

## Fatigue Crack Propagation of Laser Arc Hybrid Welded Joint of Bainitic Steel

Han Xiaohui<sup>1</sup>, Lei Zheng<sup>2</sup>, Li Rendong<sup>2</sup>, Liu Yan<sup>2</sup>, Chen Hui<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>CSR Qingdao Sifang Co., Qingdao, Shandong 266111, China;

<sup>2</sup>College of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

**Abstract** Standard compact tensile (CT) samples were tested to compare the fatigue crack growth rates (FCGRs) of the arc dominated zone (ADZ), laser dominated zone (LDZ), heat affected zone (HAZ), and base metal (BM), which were sampled on the laser arc hybrid welding joints of an ultra-low-carbon bainitic steel. The growth features of the fatigue crack in each microcell were summarized, and the reason for the deflected path of crack growth was explained. The result shows that the FCGRs increase but the accelerated velocities of the HAZ and BM decrease with the growth of the stress intensity factor (SIF). At the low SIF, the FCGRs decrease in the following sequence: BM, HAZ, ADZ, and LDZ. When the SIF is sufficiently large, the sequence changes to: LDZ, ADZ, BM, and HAZ. The crack-path deflection in the HAZ is observed clearly, and the secondary cracks increase when the SIF increases. However, the crack deflection in the weld zone is not observed clearly. This difference is attributed to the non-uniformity in the material composition and microstructure. The observation of the fracture explains that the generation of the secondary cracks is associated with the brittle phases. Further, the secondary cracks are primarily responsible for the change in the FCGRs.

**Key words** laser technique; bainitic steel; laser arc hybrid welding; fatigue crack propagation; secondary crack

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

转向架作为轨道交通车辆的关键承力和走行机

构,对列车安全可靠运行起到了至关重要的作用。目前我国高速列车所用转向架材料主要有国产 Q345C 以及日本进口 SMA490BW 钢、S355J2W

收稿日期: 2019-05-16; 修回日期: 2019-05-30; 录用日期: 2019-06-17

基金项目: 四川省科技计划项目(2019JDRC0130)

\* E-mail: xnrpt@163.com

钢,这几种钢材具有良好的冲击韧性和疲劳性能,但是由于它们的强度不高,用于转向架的钢材厚度最大超过了 20 mm,在转向架轻量化方面不占优势<sup>[1-4]</sup>。有研究表明,新型纤维复合材料可极大地减小转向架的自重,但是由于列车转向架对材料的特殊要求,目前将复合材料应用于列车转向架还存在一系列技术和成本问题<sup>[5-6]</sup>。新型超低碳贝氏体钢通过采用控冷控轧工艺生产,晶粒细小,组织均匀,屈服强度超过了 700 MPa。同时,贝氏体钢通过严格控制碳含量和合金元素含量可使其焊接性能优良<sup>[7-10]</sup>,可将其用于转向架,理论上可以实现转向架减重,对高铁列车的轻量化发展具有重要意义。

然而在焊接结构件中,焊接接头各微区的组织差异大,焊接残余应力分布不均,力学性能不均匀,成为疲劳失效的重灾区。张晓君<sup>[11]</sup>研究了 12 mm Q345qD 钢 CO<sub>2</sub> 气体保护焊接接头各微区和母材的疲劳裂纹扩展行为,结果表明,各微区内铁素体和珠光体含量不同以及晶粒大小差异是裂纹扩展速率存在差异的主要原因。铁素体作为韧性相,具有很高的抗裂纹扩展的能力,细化的晶粒也有利于抵抗裂纹扩展。张天会等<sup>[12-13]</sup>研究了 20 mm ADB610 贝氏体钢电弧焊焊接接头的疲劳裂纹扩展行为,结果表明:细晶区抵抗疲劳裂纹扩展的能力优于粗晶区,

母材抵抗疲劳裂纹扩展的能力最差;加载载荷对疲劳裂纹扩展行为有显著影响。熊纛<sup>[14]</sup>针对 Q345 钢埋弧焊焊接接头的热影响区和焊缝,在不同的应力强度因子模型下,研究了应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响。Chen 等<sup>[15]</sup>研究了 5 mm SUS316L 奥氏体不锈钢激光-电弧复合焊接接头焊缝和热影响区的疲劳裂纹扩展行为。

综上所述,国内外学者针对焊接接头的疲劳裂纹扩展行为进行了大量研究,但对超低碳贝氏体钢激光-电弧复合焊接接头疲劳裂纹扩展行为的研究还鲜有公开报道,因此,本文针对某新型超低碳贝氏体钢激光-电弧复合焊接接头各微区的疲劳裂纹扩展行为进行研究,以期对超低碳贝氏体钢在转向架及其他工业领域的应用提供数据支撑。

## 2 试验材料和方法

试验材料是某新型超低碳贝氏体钢,厚度为 10 mm,化学成分和基本力学性能如表 1 和表 2 所示。焊丝牌号为 CHW-80C1,其化学成分和基本力学性能分别如表 1 和表 2 所示。焊前采用自主设计的激光清洗系统清理试板表面的油污和铁锈,其中激光器采用美国 IPG 公司生产的 YLPP-1-150V-30 型激光器。

表 1 贝氏体钢及焊丝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of bainite steel and welding wire

Material	Mass fraction /%								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu
Steel	0.05	0.3	1.35	0.001	<0.01	0.33	0.53	0.34	<0.5
Welding wire	0.08	0.43	1.68	0.004	<0.02	0.34	2.87	0.35	0.1

表 2 贝氏体钢及焊丝的基本力学性能

Table 2 Basic mechanical properties of bainite steel and welding wire

Property	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Ductility /%
Steel	>780	>690	>15
Welding wire	798	694	19

采用德国通快(中国)有限公司生产的 TRUMPF TruDisk 10002 型碟片激光器进行焊接

试验,该激光器的额定输出功率为 10 kW,焊机采用福尼斯公司生产的 Fronius TransPlus Synergic 4000 型焊机,激光和电弧采用旁轴复合的方式,并且激光在前,电弧在后,激光束的倾角 10°,焊枪与激光束的夹角为 60°,离焦量为 0 mm,光束间距为 2 mm。试板选用 Y 形坡口,单边坡口为 10°,钝边尺寸为 4 mm,组对间隙为 1 mm。试板背面悬空焊接,焊接工艺参数见表 3。

表 3 激光电弧复合焊接工艺参数

Table 3 Process parameters for laser arc hybrid welding

Parameter	Laser power /kW	Welding speed / (mm·s <sup>-1</sup> )	Filler feeding speed / (m·min <sup>-1</sup> )	Current /A	Voltage /V
Backing weld	4.5	12	10	268	28.0
Cosmetic weld	1	12	12	310	29.2

焊接接头的疲劳裂纹扩展试验参考标准 GB/T 6398—2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》进行,采用紧凑拉伸(CT)试样。在取样时,考虑到复合焊接接头形貌的特殊性,在母材区、热影响区、焊缝区进行分层取样,其中焊缝又分为激光主导区(LDZ)和电弧主导区(ADZ)。热影响区试样的缺口

中心线距焊缝熔合线约 1 mm,所有试样除厚度外,其余尺寸均相同。分层取样方式为:以接头上表面 4 mm 厚 CT 试样来反映接头电弧主导区的疲劳裂纹扩展行为,以接头下表面 4 mm 厚 CT 试样来反映激光主导区的疲劳裂纹扩展行为,如图 1 所示, $\phi$  表示开孔直径。

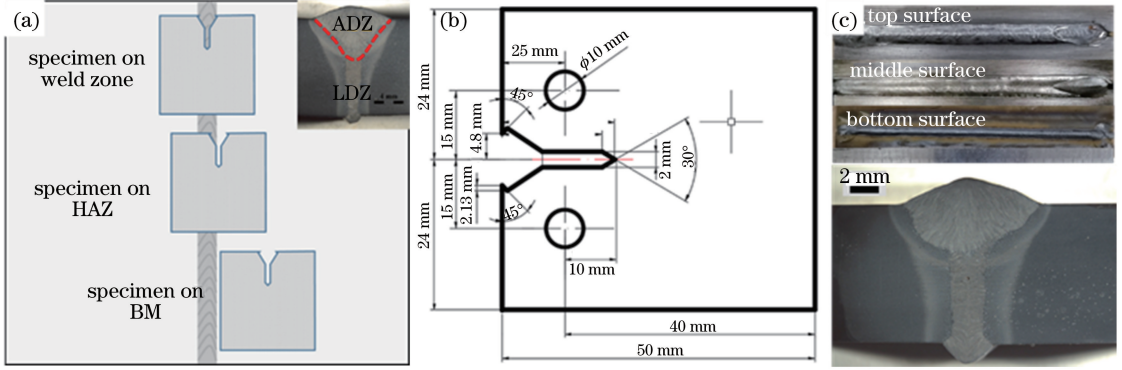


图 1 CT 试样。(a)取样位置;(b)试样尺寸;(c)焊缝形貌

Fig. 1 CT sample. (a) Location; (b) sample size; (c) weld surface

在应力比  $R=0.1$ 、频率  $f=5\text{ Hz}$  的条件下,采用成都时代宏宇检测仪器有限公司生产的 KLTJC1010 型腐蚀损伤动态测试系统在室温下进行疲劳裂纹扩展试验,采用幅值恒定的正弦波形载荷。试验时先对试样预制长度为 2~5 mm 的初始裂纹,采用柔度系数法,借助夹式引伸计采集疲劳过程中的裂纹长度,记录循环次数与裂纹长度的实时数据。试验数据采用拟合方法进行处理,在得到裂纹长度  $a$  与循环次数  $N$  的函数关系后求导得出一定裂纹长度下对应的疲劳裂纹扩展速率。

度因子增大,母材区和热影响区的裂纹扩展速率降低。当  $\Delta K > 55.53\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  时,热影响区的裂纹扩展速率超过母材和焊缝;当  $\Delta K > 81.25\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  时,激光主导区的裂纹扩展速率最大,超过了母材区和热影响区;当  $\Delta K > 89.50\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  时,热影响区的速率又开始减慢,甚至低于母材;当  $\Delta K > 99.14\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  时,各区裂纹扩展速率从大到小的顺序为激光主导区、电弧主导区、母材、热影响区。对比焊缝的激光主导区和电弧主导区可以发现:当  $\Delta K < 52.06\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  时,焊缝两个区域的裂纹扩展速率差异不大;当  $\Delta K > 52.06\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  时,激光主导区的扩展速率高于电弧主导区。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 疲劳裂纹扩展速率

图 2 是超低碳贝氏体钢激光电弧复合焊接接头各微区 CT 试样疲劳裂纹扩展试验结果,由图可见,母材区的疲劳裂纹扩展门槛值明显低于热影响区的疲劳裂纹扩展门槛值,且都低于焊缝区的疲劳裂纹扩展门槛值,说明母材的抗疲劳裂纹开裂能力最差,其次是热影响区,而焊缝的电弧主导区和激光主导区最好。在三个区域内,裂纹在第一阶段快速扩展速率的增加率相近,均很快进入稳定扩展阶段。焊缝疲劳裂纹进入缓慢扩展的应力强度因子是  $52\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,明显高于热影响区的  $48\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  以及母材区的  $38\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。当应力强度因子幅值  $\Delta K < 52.06\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  时,母材区裂纹扩展速率最大,然后依次为热影响区、电弧主导区、激光主导区;随着应力强

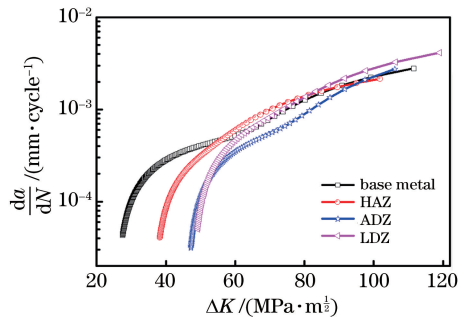


图 2 微区试样的疲劳裂纹扩展速率

Fig. 2 Fatigue crack growth rate of micro area sample

疲劳裂纹扩展途径上的晶粒大小、组织及化学成分对扩展速率具有重要影响<sup>[16]</sup>。贝氏体钢复合焊缝组织以针状铁素体为主,且含有部分贝氏

体。由图 3(b)、(c)所示,第二道焊的热作用形成的激光主导区比电弧主导区具有更粗大的组织。焊缝区组织具有高强、高硬、韧性差的特征,起裂困难,但起裂后裂纹的扩展速率较快。热影响区的组织分布不均匀:粗晶区以板条贝氏体(LB)为主,含有大量粒状贝氏体(GB),并且板条贝氏体中碳化物片层较厚;细晶区以粒状贝氏体为主,并含有部分板条贝氏体;不完全相变区是贝氏体和块

状铁素体的混合物。热影响区组织不均匀可以适当增大裂纹扩展的阻力,从而降低扩展速率。试验结果表明,热影响区的裂纹扩展速率介于焊缝和母材之间。分析焊缝激光主导区裂纹扩展速率大于电弧主导区的原因后可以发现,电弧主导区的组织更加细小均匀,激光主导区粗大的组织降低了焊缝的韧性。焊缝韧性差,裂纹扩展速率更快,这与图 2 中的结果吻合。

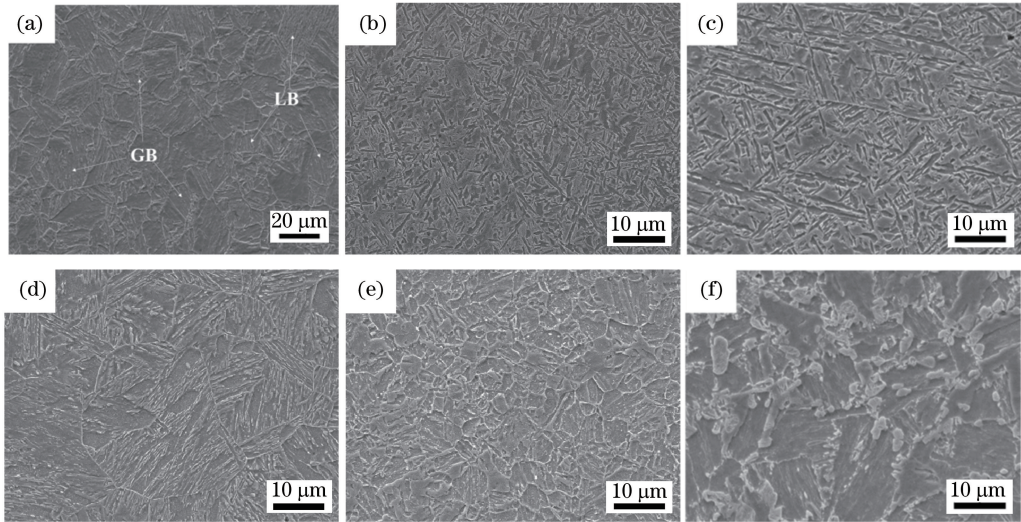


图 3 各微区的微观组织。(a)母材区;(b)电弧主导区;(c)激光主导区;(d)粗晶区;(e)细晶区;(f)不完全相变区  
Fig. 3 Microstructures of microcells. (a) BM; (b) ADZ; (c) LDZ; (d) CGHAZ; (e) FGHAZ; (f) non-full phase transformation area

### 3.2 疲劳裂纹扩展路径

图 4 是在各微区试样表面观察到的疲劳裂纹扩展路径图。疲劳裂纹扩展路径在焊缝和热影响区都发生了偏折,但偏折角度不一样。焊缝中裂纹扩展路径的偏折角约为  $30^\circ$ ,裂纹总体沿着垂直于受力方向向前扩展;热影响区中裂纹扩展路径的偏折比较严重,甚至出现了垂直偏折的路径,如图 4(c)中(3)号局部区域所示,主裂纹在该区域扩展时发生了两次明显的垂直偏折,这是因为热影响区严重不均匀。在裂纹扩展过程中,裂纹尖端遇到不均匀组织后,可能会造成不同角度方向上裂纹扩展分力的大小不同,当某一方向的分力达到开裂所需的力时,裂纹扩展方向便转向该方向,并沿着此方向扩展,即扩展路径更容易发生偏折。此外,在偏折处发现了表面二次裂纹,这是因为在偏折位置区域存在应力集中,为二次裂纹的出现提供了条件。

进一步对比裂纹在各微区中扩展路径可以发现,裂纹在热影响区扩展时,如图 5 所示,主裂纹附近出现了大量的表面二次裂纹,在焊缝中并未出现明显的表面二次裂纹。分析热影响区内出现的表面

二次裂纹的原因不难发现,裂纹萌生于细晶区和不完全相变区。在低  $\Delta K$  时经过不完全相变区,如图 6(b)所示,裂纹在扩展路径方向上未发生明显的偏折,因此也未出现二次裂纹;当裂纹穿过不完全相变区达到母材边界时,由于母材组织和不完全相变区的差异较大,裂纹扩展阻力增大,此时裂纹将沿着裂纹扩展阻力最小的方向扩展。由于不完全相变区在焊接热输入的影响下会形成高碳区和低碳区,高碳区的抗裂纹扩展能力较差,裂纹扩展方向因此可能会从母材转向高碳区;低碳区的抗裂纹开裂能力较差,裂纹转向区域的应力集中可能会造成低碳区出现表面二次裂纹。为了进一步了解裂纹扩展前后的不同行为,本文对比了不同微区试样在裂纹扩展速率为  $10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{cycle}^{-1}$  附近和应力强度因子  $\Delta K = 80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  两种情况下的断口形貌,如图 7 和图 8 所示。当扩展速度为  $10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{cycle}^{-1}$  时,在裂纹起裂位置附近,各试样断口均比较平整,电弧主导区和激光主导区均发现了较多短小的二次裂纹,而母材区和热影响区仅有少量细小的二次裂纹。激光主导区和电弧主导区的二次裂纹特征相近,各自

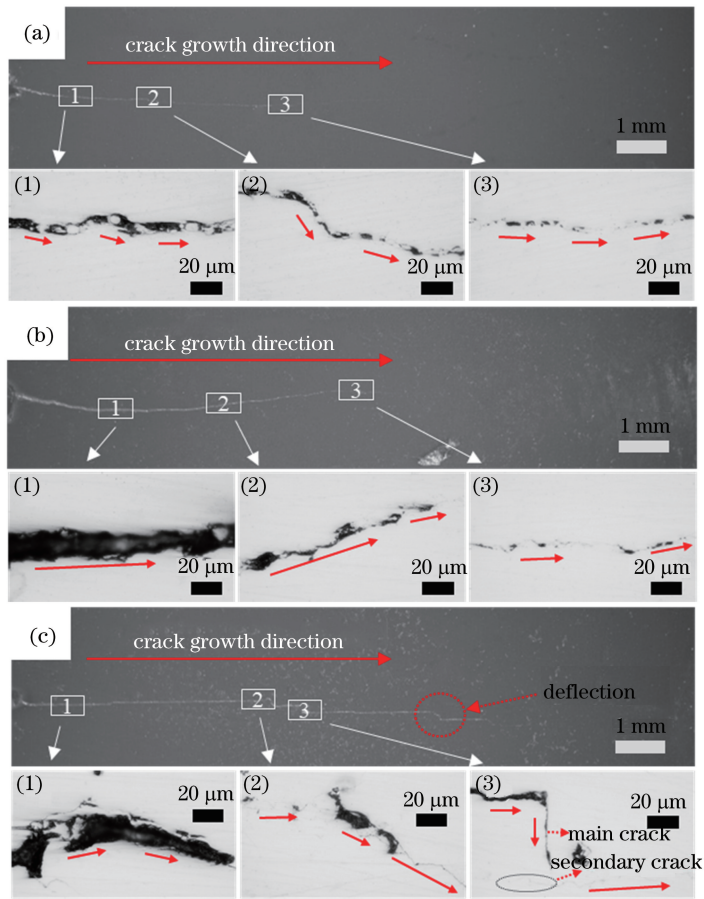


图 4 疲劳裂纹扩展路径。(a)电弧主导区;(b)激光主导区;(c)热影响区  
Fig. 4 Path of fatigue crack propagation. (a) ADZ; (b) LDZ; (c) HAZ

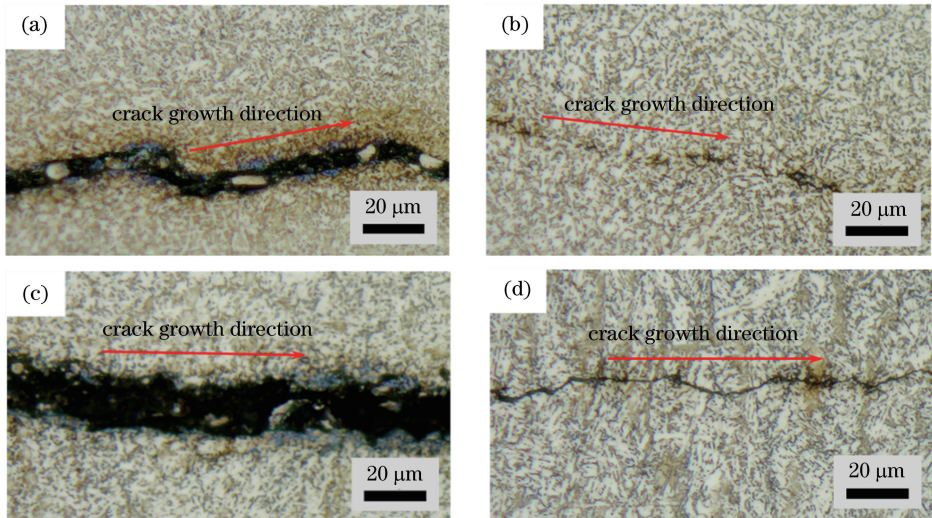


图 5 焊缝区裂纹扩展路径。(a)电弧主导区的低  $\Delta K$  区;(b)电弧主导区的高  $\Delta K$  区;  
(c)激光主导区的低  $\Delta K$  区;(d)激光主导区的高  $\Delta K$  区

Fig. 5 Fatigue crack propagation path of weld area. (a) Lower  $\Delta K$  area of ADZ;  
(b) higher  $\Delta K$  area of ADZ; (c) lower  $\Delta K$  area of LDZ; (d) higher  $\Delta K$  area of LDZ

的走向相近,但是激光主导区的二次裂纹开口宽度稍大于电弧主导区。母材区和热影响区试样断口的塑性变形特征和疲劳辉纹特征明显,焊缝激光主导

区和电弧主导区试样呈准解理断裂特征。大量二次裂纹的产生会消耗裂纹扩展所需的驱动能量,从而降低裂纹的扩展速率,增强材料的抗开裂能力,这

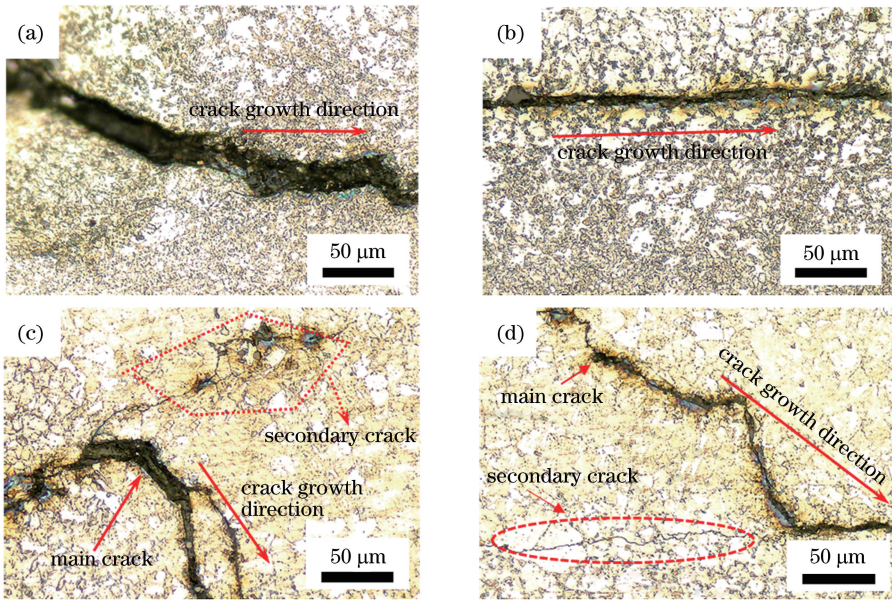


图 6 热影响区裂纹扩展路径。(a)起裂位置;(b)低  $\Delta K$  区;(c)偏折 1;(d)偏折 2  
 Fig. 6 Fatigue crack propagation path of HAZ. (a) Starting crack position;  
 (b) lower  $\Delta K$  area; (c) deflection position 1; (d) deflection position 2

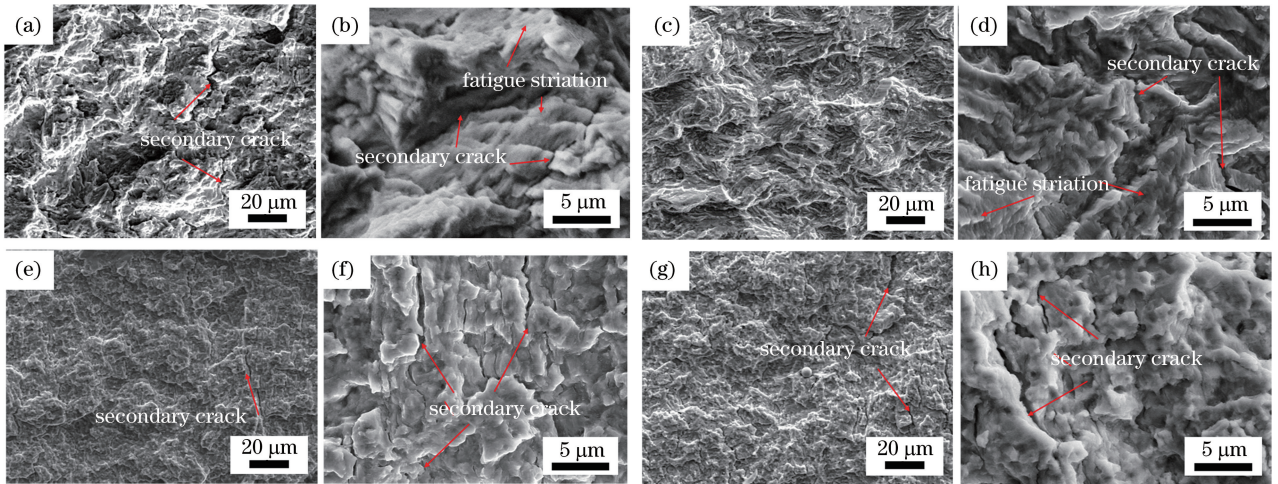


图 7  $da/dN = 10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{cycle}^{-1}$  时各微区试样的断口形貌。(a)母材区;(b)母材区的局部放大;(c)电弧主导区;  
 (d)电弧主导区的局部放大;(e)激光主导区;(f)激光主导区的局部放大;(g)热影响区(HAZ);(h) HAZ 的局部放大  
 Fig. 7 Fracture morphology of each microcell when  $da/dN = 1 \times 10^{-4} \text{ mm} \cdot \text{cycle}^{-1}$ . (a) Base metal; (b) local  
 amplification of base metal; (c) ADZ; (d) local amplification of ADZ; (e) LDZ; (f) local amplification of LDZ;  
 (g) HAZ; (h) local amplification of HAZ

与本试验中焊缝抗开裂能力优于母材和热影响区相吻合。

当裂纹扩展到  $\Delta K = 80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$  附近时,如图 8 所示,电弧主导区和激光主导区试样断口上仍存在大量二次裂纹,裂纹开口宽度稍有增大,断口仍然呈准解理特征;母材区和热影响区试样断口上的二次裂纹相比起裂位置明显增多,裂纹开口尺寸变大。母材区和热影响区试样断口上的疲劳辉纹特征明显,断口发生了明显的塑性变形,抵抗裂纹扩展的

能力提高,在高应力强度因子幅值下甚至优于焊缝抵抗裂纹扩展的能力。二次裂纹的产生有多种模式。一种模式是:主裂纹在扩展时,其尖端因遇到硬质相颗粒而受到较大阻力时,便会在尖端位置周围产生严重的应力集中,当材料不能发生明显的塑性变形时,应力集中便无法释放,从而产生了大量的二次裂纹,并且二次裂纹优先于主裂纹产生;当驱动力大于硬质相颗粒的阻力时,主裂纹将穿过该硬质相颗粒继续向前扩展。该模式下的二次裂纹产生及硬质相颗粒的

阻挡有利于降低裂纹的扩展速率。另一种模式是主裂纹在遇到硬质相颗粒后扩展方向发生转向,绕着硬

质相颗粒沿边界继续向前扩展,同时在转向位置沿硬质相颗粒另一边界位置产生细长的二次裂纹。

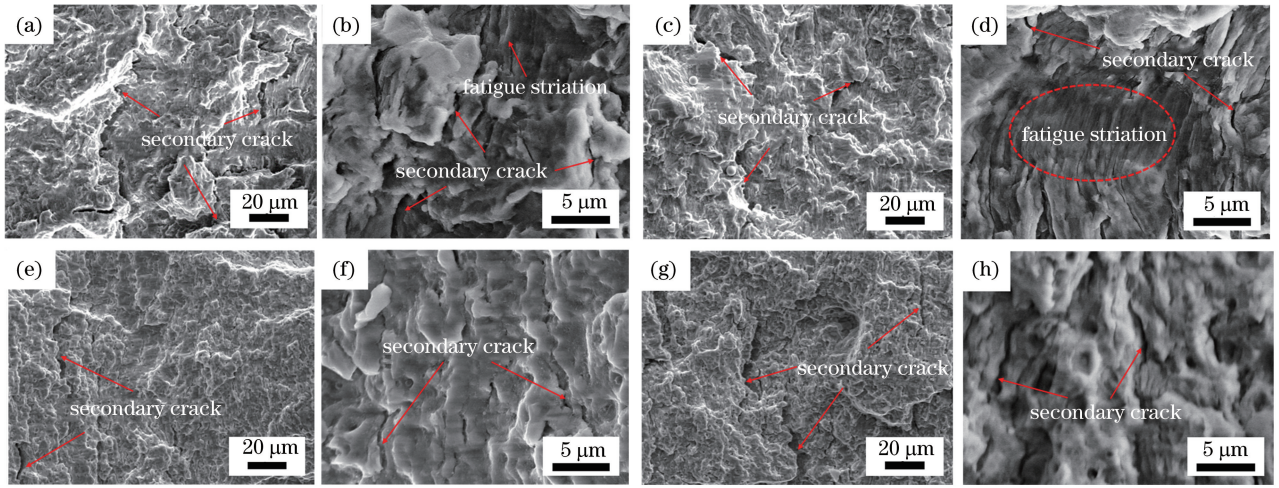


图8  $\Delta K = 80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$  各微区试样的断口形貌。(a)母材区;(b)母材区的局部放大;(c)电弧主导区;(d)电弧主导区的局部放大;(e)激光主导区;(f)激光主导区的局部放大;(g)HAZ;(h)HAZ的局部放大

Fig. 8 Fracture morphology of each microcell when  $\Delta K = 80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$ . (a) Base metal; (b) local amplification of base metal; (c) ADZ; (d) local amplification of ADZ; (e) LDZ; (f) local amplification of LDZ; (g) HAZ; (h) local amplification of HAZ

## 4 结 论

研究了超低碳贝氏体钢激光电弧复合焊接接头各区域疲劳裂纹的扩展速率和扩展路径,得出以下结论:1)各微区裂纹扩展速率随应力强度因子的变化而变化。随着应力强度因子增大,热影响区裂纹扩展速率的增速是先快后慢,激光主导区的增速最快,电弧主导区的增速先慢后快。2)疲劳裂纹扩展路径在焊缝激光主导区和电弧主导区会发生小幅偏折,在热影响区会发生严重偏折,大幅偏折时会出现二次裂纹;热影响区组织的不均匀性是造成裂纹扩展方向偏折的主要原因。3)应力强度因子对各微区疲劳断裂方式的影响不明显。焊缝激光主导区和电弧主导区呈准解理断裂的方式,热影响区断口发生了明显的塑性变形,且有疲劳辉纹特征。应力强度因子升高,热影响区主裂纹周围的二次裂纹就会增多,但激光主导区和电弧主导区二次裂纹的数量变化不明显。

### 参 考 文 献

[1] Hong M, Wang Q, Su Z Q, *et al.* In situ health monitoring for bogie systems of CRH380 train on Beijing-Shanghai high-speed railway[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45(2): 378-395.

[2] Lewandowski J, Rozumek D. Cracks growth in S355 steel under cyclic bending with fillet welded joint[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016, 86: 342-350.

[3] Mao Z T, Pu X W, Wang W D, *et al.* Comparison of welding deformation and residual stress in Q345 steel thin-plate joints induced by laser beam welding and gas metal arc welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0602010. 毛志涛, 蒲晓薇, 汪维登, 等. Q345 钢激光焊与气体保护焊的焊接变形与残余应力对比[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0602010.

[4] Wu X Y, Zhang Z Y, Liu Y J, *et al.* Study on mechanical properties of SMA490BW steel welded joint in bullet train at low temperatures [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(19): 29-31, 35. 吴向阳, 张志毅, 刘拥军, 等. 高速列车转向架 SMA490BW 耐候钢焊接接头低温性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(19): 29-31, 35.

[5] Yu D L, Deng X J, Liu S Q, *et al.* Application of composite material technology on bogie[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38 (s1): 17-22. 虞大联, 邓小军, 刘韶庆, 等. 复合材料技术在转向架中的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38 (s1): 17-22.

[6] Li L J, Wang J R, Li J. The application of new-type lightweight materials in bogie parts [J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition), 2017,

- 30(4): 42-46.
- 李梁京, 王继荣, 李军. 新型轻材料在转向架部件中的应用[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 42-46.
- [7] Lan L Y, Qiu C L, Zhao D W, *et al.* Microstructural characters and toughness of different sub-regions in the welding heat affected zone of low carbon bainitic steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, 47(8): 1046-1054.
- 兰亮云, 邱春林, 赵德文, 等. 低碳贝氏体钢焊接热影响区中不同亚区的组织特征与韧性[J]. 金属学报, 2011, 47(8): 1046-1054.
- [8] Rodríguez-Galeano K F, Rodríguez-Baracaldo R, Mestra-Rodríguez A, *et al.* Influence of boron content on the fracture toughness and fatigue crack propagation kinetics of bainitic steels[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2016, 86: 351-360.
- [9] Lei Z L, Chen Y B, Song G X, *et al.* Weld appearance of CO<sub>2</sub> laser gas metal arc hybrid welding for ultra-low carbon bainitic steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 3068-3073.
- 雷正龙, 陈彦宾, 宋国祥, 等. 超低碳贝氏体钢 CO<sub>2</sub> 激光气体金属弧焊复合焊接成形特性[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 3068-3073.
- [10] Zhao L, Chen W Z, Zhang X D. Microstructure and mechanical properties of laser welded heat-affected zone in new ultra-low carbon bainitic steel [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(3): 408-412.
- 赵琳, 陈武柱, 张旭东. 新一代超低碳贝氏体钢激光焊接热影响区的组织和性能[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 408-412.
- [11] Zhang X J. Experimental study on the welded joints fatigue strength and fatigue crack growth test of Q345qD steel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- 张晓君. Q345qD 钢焊接接头疲劳强度和疲劳裂纹扩展性能试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [12] Zhang T H, Guo L, Shi J, *et al.* Fatigue crack propagation with probability for ADB610 steel welded joints [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(1): 79-82.
- 张天会, 果霖, 施杰, 等. ADB610 钢焊接接头概率疲劳裂纹扩展分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 79-82.
- [13] Zhang T H. The reliability study on crack growth of new low-carbon bainitic steel weld joints [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- 张天会. 新型低碳贝氏体钢焊接接头疲劳裂纹扩展可靠性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [14] Xiong Y. Fatigue crack driving force parameter for crack growth in welded joint [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(18): 72-79.
- 熊纓. 基于新裂纹扩展驱动力参量的焊接接头疲劳裂纹扩展的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18): 72-79.
- [15] Chen R, Jiang P, Shao X Y, *et al.* Analysis of crack tip transformation zone in austenitic stainless steel laser-MIG hybrid welded joint [J]. *Materials Characterization*, 2017, 132: 260-268.
- [16] Li Q G, Huang X F, Huang W G. Fatigue property and microstructure deformation behavior of multiphase microstructure in a medium-carbon bainite steel under rolling contact condition[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 125: 381-393.