

耐候钢激光-MAG 复合焊接头的低温断裂韧性

陈勇**, 陈辉*, 李仁东, 车小莉, 张成竹

西南交通大学材料科学与工程学院, 材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都 610031

摘要 为研究低温下高速列车用耐候钢激光-MAG 复合焊接头的断裂行为, 通过低温断裂韧性试验获得接头焊缝、热影响区和母材的断裂韧性 J_m 。采用 Boltzmann 函数进行拟合分析, 得到各区的韧脆转变温度。结果表明: 随着温度降低, 接头各区域的断裂韧性呈降低的趋势, 母材的低温韧性优于焊缝的低温韧性; 焊缝区的韧脆转变温度约为 $-65.9\text{ }^\circ\text{C}$, 热影响区的韧脆转变温度约为 $-70.4\text{ }^\circ\text{C}$, 均高于母材 ($-81.9\text{ }^\circ\text{C}$)。通过对微观组织和断口形貌的对比分析, 阐明了激光-MAG 复合焊接头各区域的微观断裂机理, 焊缝金属较低的低温断裂韧性主要是由晶粒粗大和存在粗大的先析铁素体造成的。

关键词 激光技术; 耐候钢; 激光-MAG 复合焊接; 低温断裂韧性; 微观组织

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0702004

Low-Temperature Fracture Toughness of Laser-MAG Hybrid Welding Joint in Weather-Resistant Steel

Chen Yong**, Chen Hui*, Li Rendong, Che Xiaoli, Zhang Chengzhu

Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

Abstract To understand the low-temperature fracture behavior of the laser-MAG (metal active gas) hybrid welding joint of weather-resistant steel for high-speed trains, the integral values J_m of fracture toughness of the welding metal, heat-affected zone, and base material are obtained through a low-temperature fracture toughness test. The relationship between fracture toughness and temperature is fitted by the Boltzmann function, and the ductile-to-brittle transition temperature of each zone is obtained. The results demonstrate that the variation trend of the fracture toughness of each zone is reduced as temperature decreases. The base material has higher low-temperature toughness compared with the welding metal. The ductile-to-brittle transition temperatures of the welding metal and heat-affected zone are $-65.9\text{ }^\circ\text{C}$ and $-70.4\text{ }^\circ\text{C}$ respectively, both of which are higher than that of the base material ($-81.9\text{ }^\circ\text{C}$). The micro-fracture mechanism of each zone of the laser-MAG hybrid welding joint is explained based on the observation of the microstructure and fracture morphology. The poor low-temperature fracture toughness of the welding metal is primarily due to the large-size coarse grain and proeutectoid ferrite in the microstructure.

Key words laser technique; weather-resistance steel; laser-metal active gas hybrid welding; low-temperature fracture toughness; microstructures

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

高速列车运行速度的不断提升对其安全可靠性提出了更高的要求。高速列车转向架作为关键的承载部件, 所用材料主要为 SMA490BW 耐候钢, 该钢具有强韧性好、耐大气腐蚀性能优良等特点。目前,

转向架的焊接主要采用熔化极活性气体保护电弧焊 (MAG), 该方法存在热输入大、残余应力大、易出现未焊透缺陷等问题^[1-2]。随着激光焊接技术的不断发展, 激光-电弧复合焊接技术因其能量密度高、熔深大、热输入小、焊接效率高等特点^[3-4] 逐渐被应用于中高强钢的焊接^[5]。

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-02-16; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100202)、国家自然科学基金(51474178)

* E-mail: xnrpt@swjtu.edu.cn; ** E-mail: yognchen@my.swjtu.edu.cn

我国高速列车的服役环境温度可达到-40~+40℃,低温运行环境会对列车结构及其焊缝韧性产生显著影响^[6]。吴向阳等^[7]将转向架用耐候钢电弧焊接,研究了接头的低温性能,低温冲击试验结果表明,焊缝在-50℃下表现出显著的低温韧脆转变特征。荣豪^[8]对比研究了耐候钢激光-电弧复合焊与传统电弧焊试样的低温冲击韧性,结果表明:与MAG相比,激光-电弧复合焊接头各区的低温冲击韧性更优。Chen等^[9]研究发现,恒定磁场辅助激光电弧复合焊接304不锈钢可以减少铁素体含量、细化晶粒,组织分布更均匀,进而可以提高低温冲击韧性。综上可知,对材料韧脆转变特性的研究可通过低温冲击试验获得。在转向架的断裂设计与控制中,材料的断裂韧性是必要指标,因此,开展耐候钢断裂韧性的研究十分必要。何永攀^[10]研究了耐候钢电弧焊接接头的低温断裂韧性,通过对比分析得到了接头各区的韧脆转变温度(母材区为-91.9℃,焊缝区为-51.3℃,热影响区为-62.8℃)和断裂韧性特征值 δ_m 。对于转向架耐候钢断裂韧性的研究,目前主要针对的是传统的电弧焊接方法制得的焊接接头,而对采用激光-MAG复

合焊接技术得到的焊接接头的低温断裂性能的相关研究鲜有报道。鉴于此,本文对12mm厚耐候钢的激光-MAG复合焊接头进行断裂韧性测试,对比研究接头各区的断裂韧性,对将新型焊接技术应用于高速列车的设计制造具有非常重要的意义。

2 试验材料和方法

试验材料为用于高速列车转向架的SMA490BW耐候钢,试样尺寸为300mm×150mm×12mm。填充焊丝为用于轨道车辆的高强度耐大气腐蚀钢焊丝JM-55II,其直径为1.2mm。母材及填充焊丝的化学成分如表1所示。采用激光-MAG复合焊实现对接板的焊接,复合焊接系统由美国IPG公司生产的波长为1.06μm的4kW光纤激光器、芬兰肯比公司生产的KempArc pulse450焊机及机器人组成。焊接过程中使用的混合保护气体由体积分数为85%的氩气和15%的CO₂组成。激光-MAG复合焊采用坡口角度为40°、钝边尺寸为4mm、组焊间隙为1.2mm的对接坡口。激光-MAG复合焊采用激光在前引导的方式,光丝间距为3mm,离焦量为0mm,焊接工艺参数如表2所示。

表1 SMA490BW耐候钢及JM-55II焊丝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of SMA490BW weather-resistance steel and JM-55II welding wire

Material	Mass fraction / %								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
SAM490BW	≤0.18	0.15-0.65	≤1.40	≤0.035	≤0.035	0.30-0.50	0.45-0.75	0.05-0.30	Bal.
JM-55II	0.08	0.36	0.98	0.012	0.011	0.37	0.53	0.042	Bal.

表2 激光-MAG复合焊工艺参数

Table 2 Process parameters of laser-MAG hybrid welding

Welding No.	Laser power / W	Welding speed / (mm·s ⁻¹)	Wire feeding speed / (m·min ⁻¹)	Arc current / A	Welding voltage / V
1	4.0	10	7.5	240	24.8
2	1.0	13	9.0	275	27.4
3	1.0	13	9.0	270	27.2

根据国家标准GB/T 21143—2014《金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法》^[11],选取20,0,-20,-40,-60,-80,-100,-115℃8个温度点,采用三点弯曲试样测试耐候钢激光-MAG复合焊接头焊缝(WM)、热影响区(HAZ)和母材(BM)的断裂韧度 J_m ,其中每个温度点测试4个有效试样。试样取样位置及几何尺寸如图1所示。试样裂纹方向沿焊缝方向,并在PWS-100电液伺服动静万能材料试验系统上预制3mm裂纹;采用乙醇+液氮的方式在自制的低温保温箱中进行冷却,通过温度传感器及液氮输入控制阀控制保温箱内的温度恒

定,温度控制精度为±2℃。在CMT4304万能试验机进行三点弯曲加载,记录载荷与施力点位移关系的曲线,并测量试样断口上的裂纹长度 a_0 。

试验采用J积分来表征耐候钢激光-MAG复合焊接头的断裂韧度,即

$$J_m = J_e + J_p = \left(\frac{FSA}{BW^{1.5}} \right)^2 \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) + \frac{2U_p}{B(W-a_0)}, \quad (1)$$

式中: J_e 和 J_p 分别为J积分值的弹性分量和塑性分量; S 为跨距, $S=4W$; B 为试样厚度; W 为试样宽度; F 为最大载荷; a_0 为初始裂纹长度; E 为弹性模

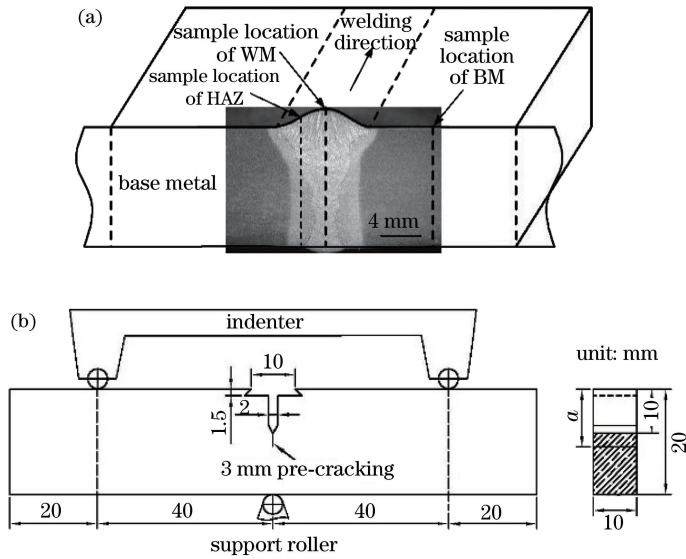


图 1 断裂韧性试样示意图。(a)试样取样位置;(b)试样尺寸及加载装置示意

Fig. 1 Schematic of specimen for fracture toughness test. (a) Sampling positions of specimen; (b) schematic of specimen dimensions and loading device

量, $E=210\text{ GPa}$; ν 为泊松比, $\nu=0.30$; U_p 为力和施力点位移曲线下面积的塑性分量; A 为应力强度因子系数。

为分析耐候钢激光-MAG 复合焊接头各区的断裂特性, 采用蔡司 A1m 显微镜观察接头各区域的微观组织和断裂残留裂纹, 并采用扫描电子显微镜 (Quanta 250, FEI 公司, 美国) 观察断口形貌。

3 结果与讨论

3.1 断裂韧性试验结果分析

韧脆转变温度是评价材料低温脆性的一个重要指标, 图 2 中数据点为耐候钢激光-MAG 复合焊接头各区不同温度下的断裂韧度 J_m 。断裂韧度 J_m 随温度变化的曲线总体上呈 S 形, 采用 (2) 式所示的 Boltzmann 函数表达式对断裂韧性温度变化曲线进行拟合^[9], 可以反映材料断裂韧性随温度的转变关系。函数表达式如下:

$$J_m = \frac{J_1 - J_2}{1 + \exp[(T - T_0)/\Delta T]} + J_2, \quad (2)$$

式中: J_1 为下平台值; J_2 为上平台值; T 为温度; T_0 为韧脆转变温度; ΔT 为转变温度区的温度范围, ΔT 越小, 转变温度区跨越的温度范围越窄, 材料越易由塑性向脆性转变。对激光-MAG 复合焊接头各区的断裂韧度 J_m 值进行拟合, 可以得到各区材料的韧脆转变曲线, 参数结果及拟合误差如表 3 所示。

由图 2 可知: 激光-MAG 复合焊接头各区的断裂韧度 J_m 积分值随着温度的降低逐渐减小; 母材、

焊缝、热影响区的 J_m 分别在 $-60, -40, -50\text{ }^\circ\text{C}$ 开始出现急剧下降, 表明材料开始发生脆性断裂。对比试验温度范围内接头各区的 J_m 可知, 母材的 J_m 最大, 热影响区的 J_m 次之, 焊缝的 J_m 最小, 表明母材的断裂韧性最好, 焊缝的断裂韧性最差。由表 3 可知, 耐候钢母材、焊缝、热影响区的韧脆转变温度分别为 $-81.9, -65.9, -70.4\text{ }^\circ\text{C}$, 表明焊缝的断裂韧性最差。热影响区的断裂韧性高于焊缝, 原因主要为: 激光-MAG 复合焊接头的热影响区较窄, 热影响区中的粗晶区宽仅为 1.3 mm, 如图 5(a) 所示, 本实验中热影响区缺口位置包含顶层焊缝和底层热影响区细晶区的金属。

3.2 断口特征及微观组织分析

耐候钢及其激光-MAG 复合焊接头各区域在不同温度下的断口形貌如图 3~5 所示。由图 3 可知: $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 母材试样的断口上存在大量凹凸不平的韧窝, 且韧窝尺寸较大, 表现为韧性断裂特征; 随着温度降低, 韧窝尺寸逐渐减小; 当温度为 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 断口上出现了撕裂棱和准解理面, 断裂机制转变为韧窝+准解理断裂形式; 随着温度进一步降低, 脆性断裂特征逐渐显著, $-100\text{ }^\circ\text{C}$ 时断口基本为解理台阶及少量二次裂纹, 断裂机制完全转变为解理断裂。

由图 4 可知: 焊缝金属在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的断口主要为细小的韧窝形貌, 且韧窝尺寸小于母材断口上的韧窝尺寸, 断裂机制为微孔聚合型, 这表明焊缝金属的韧性低于母材金属的韧性; 随着温度降低, 断口上的韧窝尺寸逐渐减小; 当温度为 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 断口上出

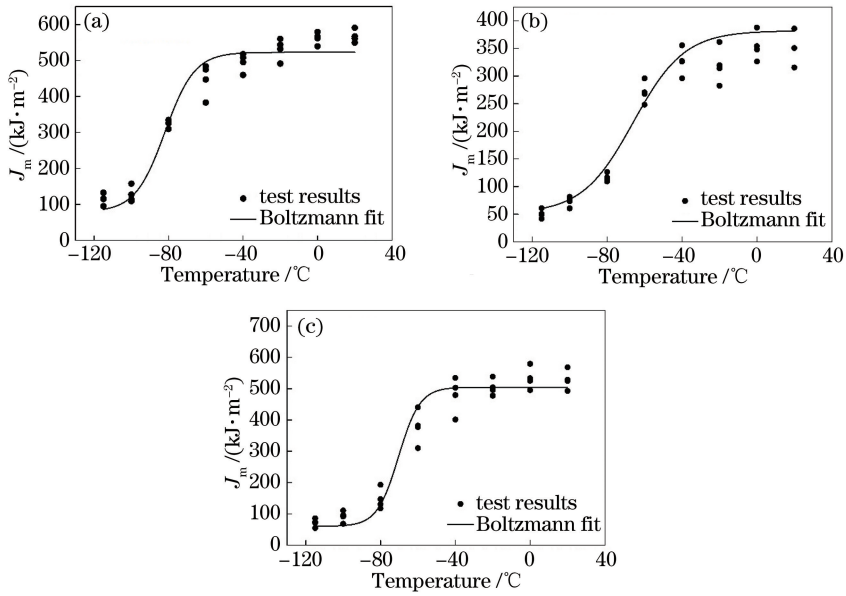


图 2 激光-MAG 复合焊接头不同区域断裂韧度随温度的变化。(a)母材;(b)焊缝;(c)热影响区
Fig. 2 Fracture-toughness J_m of each zone in laser-MAG welding joint as a function of temperature.

(a) BM; (b) WM; (c) HAZ

表 3 激光-MAG 复合焊接头各区域韧脆转变曲线参数

Table 3 Parameters for ductile-to-brittle transition curves of each zone in laser-MAG hybrid welding joint

Welded zone	$J_1 / (\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2})$	$J_2 / (\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2})$	$T / ^{\circ}\text{C}$	$\Delta T / ^{\circ}\text{C}$	R^2
BM	79.41	522.75	-81.95	7.96	0.983
WM	51.56	381.86	-65.99	13.65	0.991
HAZ	60.43	504.72	-70.42	5.73	0.992

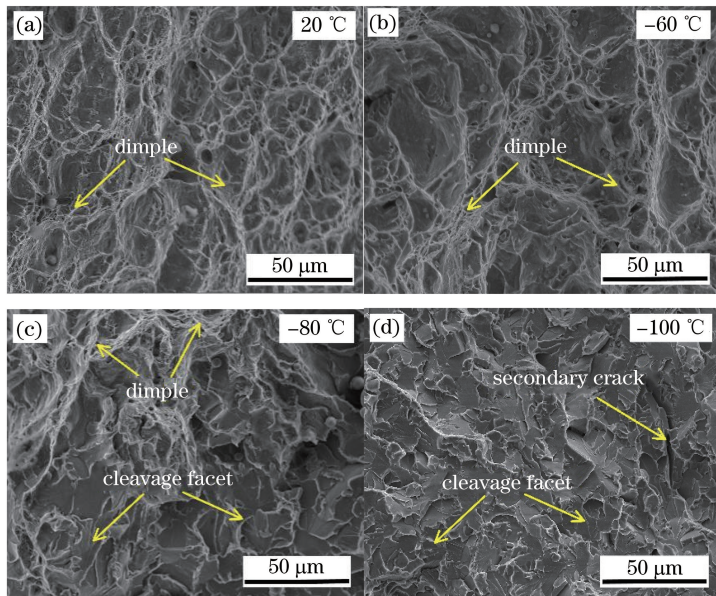


图 3 不同温度下母材试样断口的微观形貌

Fig. 3 Micro-morphologies of fracture surfaces of BM specimen at different temperatures

现较多的河流花样,断裂机制为韧窝+准解理断裂;当温度降低至 -100°C 时,断口基本为解理台阶、河流花样及二次裂纹,断裂机制为典型的解理断裂。

由图 5 可知:在 20°C 时,热影响区断口表现为细小的韧窝形貌,断裂机制为微孔聚合型;随着温度降低至 -40°C ,断口上的韧窝数量显著减少,断口

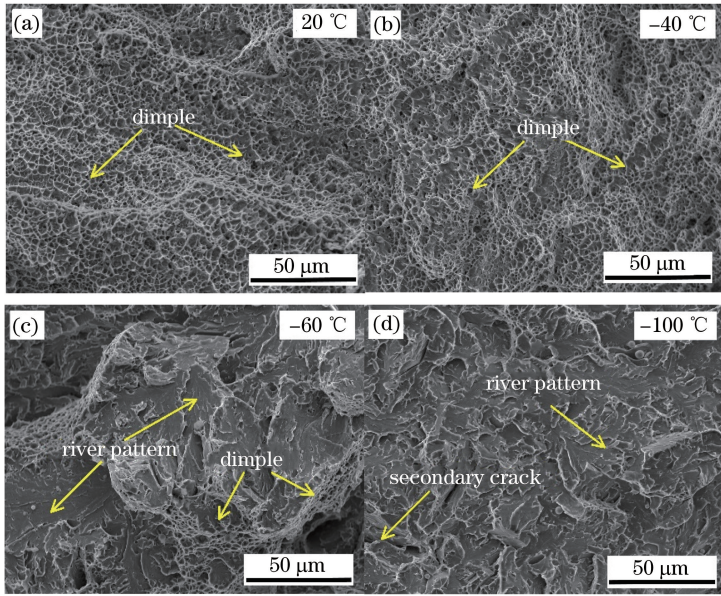


图 4 不同温度下焊缝试样断口的微观形貌

Fig. 4 Micro-morphologies of fracture surfaces of WM specimen at different temperatures

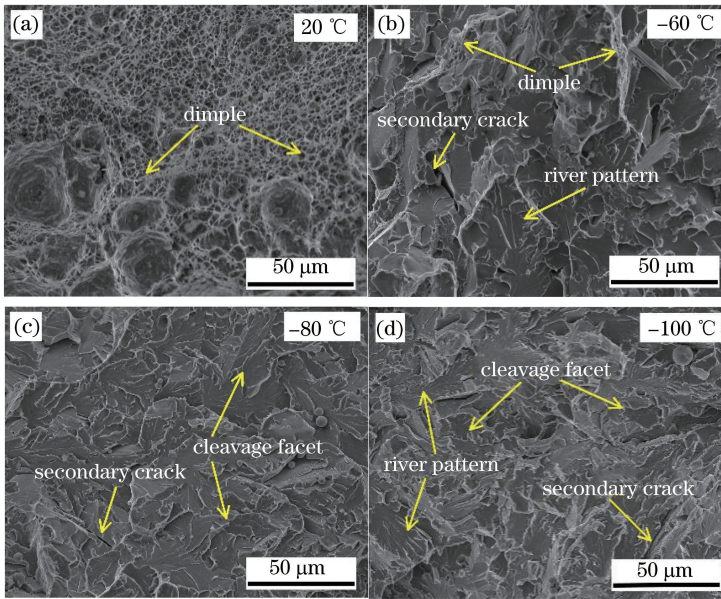


图 5 不同温度下热影响区试样断口的微观形貌

Fig. 5 Micro-morphologies of fracture surfaces of HAZ specimen at different temperatures

形貌主要为河流花样和解理面；当温度降低至 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，断口上基本为河流花样、解理台阶及较多的二次裂纹，断裂机制为解理断裂。对比各区的断口可知，焊缝金属的韧窝尺寸较小，表明其断裂韧性最差。随着温度降低，焊缝金属最先出现脆性断裂特征，表现出较大的低温脆性。

耐候钢及其激光-MAG 复合焊接接头各区域的微观组织特征如图 6 所示。由图 6(b) 可知，耐候钢的母材组织为铁素体(F)和沿板材轧制方向呈带状分布的珠光体(P)。图 6(c) 为焊缝激光区的组织，

主要为沿晶界分布的粗大先共析铁素体(PF)，晶内为粒状贝氏体(GB)、细小的珠光体和少量针状铁素体(AF)。图 6(d) 为焊缝电弧区的组织，由于填充、盖面层所用激光功率减小，热输入较小，同时前道焊接对其有预热缓冷作用，组织的冷却速率较慢，故组织为沿晶界分布的粗大先共析铁素体，晶内为针状铁素体、侧板条铁素体(SF)和少量贝氏体(B)。由图 6(e)~(g) 可知：热影响区粗晶区的晶粒粗大，主要为粒状贝氏体和粗大的针状铁素体；细晶区为细小的珠光体和铁素体；不完全正火区为块状铁素体

和不均匀分布的带状珠光体。显微硬度的测试结果表明激光-MAG 复合焊接接头热影响区的硬度大于焊缝金属的硬度,母材区的硬度最低。激光作用区的

热影响区较填充盖面层更窄,裂纹缺口位置包含细晶区和部分焊缝区的组织,其性能也为各区的综合性能。

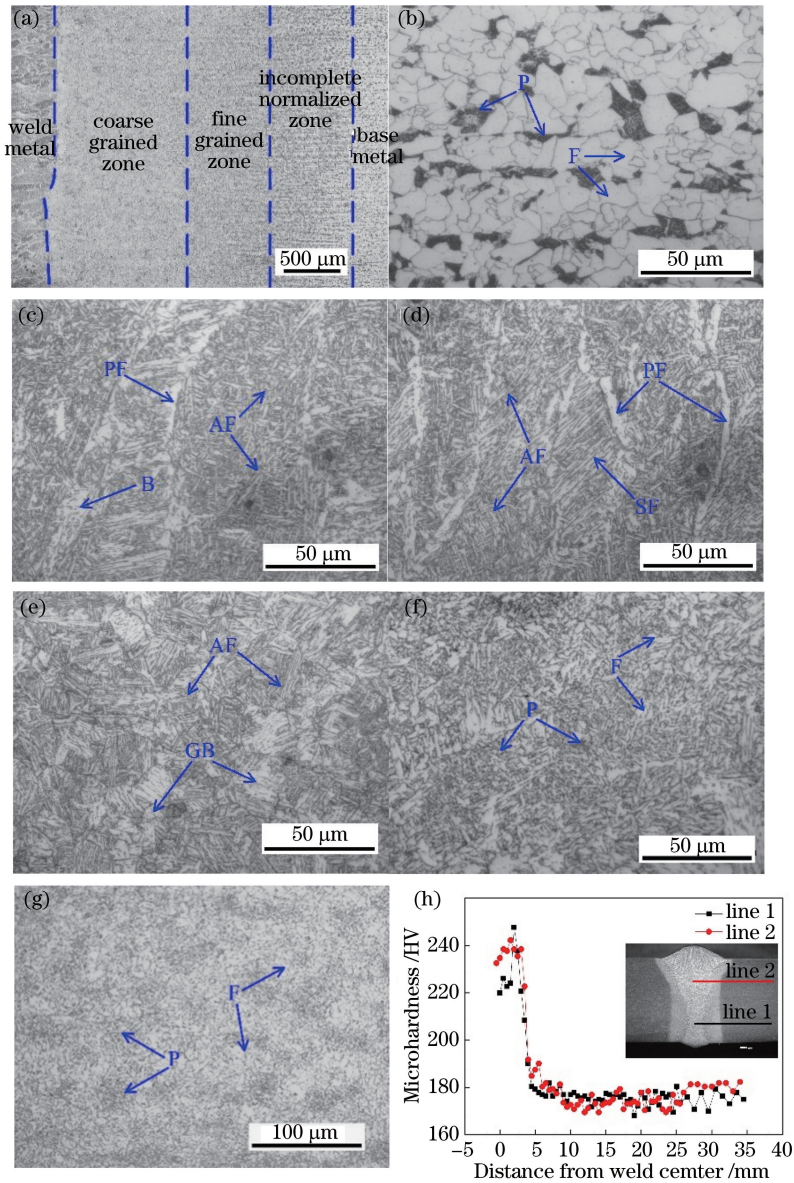


图 6 激光-MAG 焊接接头不同区域的显微组织及显微硬度。(a)焊接接头;(b)母材;(c)焊缝激光区;(d)焊缝电弧区;(e)粗晶区;(f)细晶区;(g)不完全正火区;(h)显微硬度

Fig. 6 Microstructures and micro-hardness of different zones in laser-MAG hybrid welding joint. (a) Welding joint; (b) BM; (c) WM-laser zone; (d) WM-arc zone; (e) coarse grained zone; (f) fine grained zone; (g) incomplete normalized zone; (h) micro-hardness

对比分析焊接接头各区组织差异和低温下裂纹扩展路径微观形貌(图 7)的差异可知:低温下母材的断裂形式主要为穿晶型解理断裂,裂纹在遇到大角度晶界时,由于大角度晶界阻碍裂纹的扩展,因此扩展路径会发生偏转;由于母材金属的晶粒尺寸细小,晶界多,故可有效阻碍裂纹的扩展,从而具有较高的低温韧性。焊缝金属由于组织晶粒粗大且分布

不均匀,粗大的先析铁素体内部存在的小角度晶界,对裂纹扩展的阻碍作用较小,裂纹会在先共析铁素体界面快速扩展^[12-13]。晶粒细化可以提高材料的解理断裂应力和屈服强度,且对解理断裂应力的提升作用最为显著^[14-15]。晶粒粗大是造成焊缝金属低温韧性降低的主要原因,因此需要通过控制工艺参数来控制焊缝组织的晶粒尺寸。

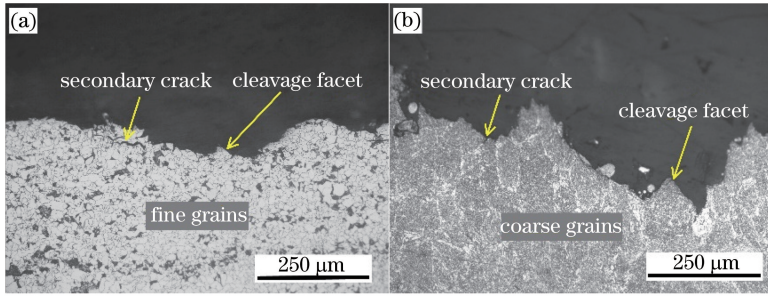


图 7 不同区域裂纹扩展路径的形貌。(a)母材;(b)热影响区

Fig. 7 Morphology of crack propagation path in different zones. (a) BM; (b) HAZ

4 结 论

针对用于高速列车的耐候钢的激光-MAG 复合焊接接头,研究温度对接头各区断裂韧性的影响,并结合微观组织、断口形貌从微观角度进行分析,得出以下结论:1)耐候钢激光-MAG 复合焊接头各区的低温断裂韧性随着温度降低整体呈降低的趋势,母材的断裂韧度最高,焊缝的断裂韧度最低,热影响区介于两者之间,且各区存在明显的韧脆转变区间,母材区、焊缝区、热影响区的韧脆转变温度分别为 $-81.9, -65.9, -70.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;2)接头各区低温下的断裂机制均为解理断裂,母材因晶粒细小而断裂韧度较高,焊缝组织分布不均匀、晶粒粗大和存在粗大的先析铁素体,显著降低了其断裂韧度,需要进一步研究激光-MAG 复合焊材料、工艺过程,以获得更均匀的组织;3)激光-MAG 复合焊焊缝和热影响区的低温断裂韧性相差较小,且热影响区更窄。研究结果为激光-MAG 复合焊应用于高速列车耐候钢的焊接提供了技术储备。

参 考 文 献

[1] Lu H, Xing L W, Chen D J. Research on A-MAG welding of weathering resistant steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(11): 105-108.
路浩, 邢立伟, 陈大军. 高速列车用耐候钢活性 MAG 焊接技术[J]. 焊接学报, 2013, 34(11): 105-108.

[2] Rao Q P, Wu X Y, Tao C Q, *et al.* Fatigue performance of laser-MAG hybrid welding T joint on SMA490BW steel [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(10): 158-163.
饶清鹏, 吴向阳, 陶传琦, 等. SMA490BW 钢激光-MAG 复合焊 T 型接头疲劳性能[J]. 电焊机, 2014, 44(10): 158-163.

[3] Wang Z J, Xu G J, Li W H, *et al.* Fiber-laser-MAG

hybrid welding process of 14-mm thick EH36 high strength steels and joint performances [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1002007.
王子健, 徐国建, 李午红, 等. 14 mm 厚 EH36 高强度钢光纤激光-MAG 复合焊工艺及接头组织性能[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1002007.

[4] Tao C Q, Wu X Y, Wang Q Y, *et al.* Comparative study for laser-MAG hybrid welding and MAG welding of SMA490BW weather-resistance steel [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(12): 35-39.
陶传琦, 吴向阳, 王秋影, 等. SMA490BW 耐候钢激光-MAG 复合焊与 MAG 焊对比研究[J]. 电焊机, 2014, 44(12): 35-39.

[5] Li H Y, Tan C W, Zhang Q, *et al.* Effect of heat source order on coupling mechanism and mechanical properties of joints in laser-arc hybrid welding of HG785D high-strength steels [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502006.
李昊岳, 檀财旺, 张强, 等. 热源顺序对 HG785D 高强度钢激光-电弧复合焊耦合机理与接头性能的影响 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502006.

[6] Wu Y S, Zhang Z Y, He Y P, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of SMA490BW weathering steel welded joints at low temperature [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(13): 51-54.
武永寿, 张志毅, 何永攀, 等. SMA490BW 耐候钢接头组织及低温力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(13): 51-54.

[7] 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.

[8] Rong H. Research of laser-mag hybrid arc welding process on weathering resistant steel SMA490BW [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,

2015.
荣豪. 耐候钢 SMA490BW 激光-MAG 电弧复合焊接工艺研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [9] Chen R, Jiang P, Shao X Y, *et al.* Improvement of low-temperature impact toughness for 304 weld joint produced by laser-MIG hybrid welding under magnetic field [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247: 306-314.
- [10] He Y P. Research on the low-temperature performance of S355J2W steel welded joints [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
何永攀. S355J2W 钢及焊接接头低温性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [11] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. *Metallic materials: unified method of test for determination of quasi-static fracture toughness: GB/T 21143—2014* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国
- 国家标准化管理委员会. *金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法: GB/T 21143—2014* [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [12] Díaz-Fuentes M, Iza-Mendia A, Gutiérrez I. Analysis of different acicular ferrite microstructures in low-carbon steels by electron backscattered diffraction. Study of their toughness behavior [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, 34(11): 2505-2516.
- [13] Rodríguez-Ibabe J M. The role of microstructure in toughness behaviour of microalloyed steels [J]. *Materials Science Forum*, 1998, 284/285/286: 51-62.
- [14] Song R, Ponge D, Raabe D. Mechanical properties of an ultrafine grained C-Mn steel processed by warm deformation and annealing [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(18): 4881-4892.
- [15] Wang W, Shan Y Y, Yang K. Study of high strength pipeline steels with different microstructures [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 502(1/2): 38-44.