

动力集中动车组车体手持激光填丝焊接头性能分析

张艳辉, 王陆钊, 苗佳, 马永志, 侯金柱

中车唐山机车车辆有限公司 河北唐山 063000

摘要: Q350EWR1高耐候钢作为铁路机车车辆车体的重要制造材料,其焊接接头的力学性能对车体强度以及机车的使用寿命至关重要。手持激光填丝焊作为一种焊接适应性强的新型焊接工艺,Q350EWR1高耐候钢手持激光填丝焊接头的质量对车体制造技术的革新有着重要意义。通过以2.5mm和4.0mm厚Q350EWR1高耐候钢板材和手持激光填丝焊为载体,对2.5mm对接,4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头进行焊接工艺、金相、硬度、拉伸以及疲劳试验,研究手持激光焊工艺对上述接头力学性能的影响。试验结果表明:焊缝区域出现了大量的贝氏体,3种接头热影响区由完全正火区以及不完全正火区构成,未出现粗晶区且热影响区最大宽度仅为1mm;焊缝区域硬度最高,热影响区次之,母材硬度最低;抗拉强度均不低于母材抗拉强度且断裂位置均位于母材处;2.5mm对接,4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头的疲劳极限分别为203MPa、144MPa、91MPa。

关键词: Q350EWR1钢;力学性能;微观组织;手持激光填丝激光焊

Performance analysis of handheld laser wire filling welding joint for the power concentrated vehicle body

ZHANG Yanhui, WANG Luzhao, MIAO Jia, MA Yongzhi, HOU Jinzhu

CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063000, Hebei, China

Abstract: Q350EWR1 high weather resistant steel is an important manufacturing material for railway locomotive and rolling stock bodies. The mechanical properties of its welded joints are crucial for the strength of the body and the service life of the locomotive. Handheld laser wire filling welding is a new welding process with strong welding adaptability. The quality of the Q350EWR1 high weather resistant steel handheld laser wire filling welding joint is of great significance for the innovation of vehicle manufacturing technology. This article uses 2.5mm and 4.0mm thick Q350EWR1 high weather resistant steel plates and handheld laser wire filling welding as carriers to conduct welding process, metallographic, hardness, tensile and fatigue tests on 2.5mm butt joints, 4.0mm butt joints and 2.5mm+4.0mm lap joints, and study the influence of handheld laser welding process on the mechanical properties of the above joints. The experimental results showed that a large amount of bainite appeared in the weld area, and the heat affected zones of the three types of joints were composed of fully and partially normalized zones. There was no coarse grain zone and the maximum width of the heat affected zone was only 1 mm; The weld zone has the highest

hardness, followed by the heat affected zone, and the base metal has the lowest hardness; The tensile strength is not lower than that of the base material and the fracture location is located at the base material; The fatigue limits of 2.5mm butt joint, 4.0mm butt joint, and 2.5mm + 4.0mm lap joint are 203MPa, 144MPa, and 91MPa, respectively.

Keywords: Q350EWR1 steel; mechanical properties; microstructure; handheld laser wire filling laser welding

1 序言

随着铁路机车车辆制造技术与车体制造材料的不断发展和更新,经济效益高以及环境友好型的材料已被广泛应用于车体的制造生产中。Q350EWR1高耐候钢中添加了一定量的Cu、Cr、Ni等合金元素^[1],相较于传统的碳素钢以及不锈钢,具有较好的力学性能和耐腐蚀性能^[2],焊接性良好,以及经济效益高等特点,已广泛应用于铁路机车车体制造中。针对Q350EWR1高耐候钢的焊接,现阶段主要采用以电弧为热源的熔化极惰性气体保护电弧焊(MIG),非熔化极惰性气体保护电弧焊(TIG)以及熔化极活性气体保护电弧焊(MAG)^[3]。由于以电弧为热源的焊接工艺会造成较大的热输入,因此必然导致焊接接头出现较宽的热影响区以及较大的焊接变形,造成焊接接头力学性能以及耐腐蚀性能的劣化。近年来,得益于激光技术的不断发展,激光焊接设备实现了小型化,手持激光焊接设备极大地改善了以往激光焊接设备可达性较差的缺点,实现了复杂焊缝的激光焊接。同时激光作为一种高

能量密度的焊接热源,可以实现焊缝的低热输入,避免了较大的焊接变形,以及粗晶区造成的力学性能和耐腐蚀性能的劣化^[4]。

本文以200km/h动力集中动车组车体上不同厚度和不同形式的Q350EWR1高耐候钢手持激光填丝焊接头为研究对象,焊接工艺试验完成后对接头进行金相、硬度、拉伸及脉动拉伸疲劳试验,并对拉伸和疲劳断口形貌进行分析,验证激光焊工艺对Q350EWR1高耐候钢焊接的可行性,以及激光焊工艺对Q350EWR1高耐候钢接头微观组织和力学性能的影响。

2 试验材料

本文以2.5mm和4.0mm两种不同厚度Q350EWR1高耐候钢为母材,采用手持激光填丝焊工艺分别制备2.5mm对接、4.0mm对接、2.5mm + 4.0mm不等厚搭接接头。Q350EWR1高耐候钢与TH500EW II 焊丝的化学成分见表1,力学性能见表2。

表1 Q350EWR1高耐候钢化学成分(质量分数) (%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
Q350EWR1钢	≤0.07	≤0.50	≤1.10	≤0.02	≤0.01	0.30~0.55	0.10~0.65	3.00~5.50
TH500EW II 焊丝	0.012	0.52	0.55	0.006	0.012	0.27	1.92	1.71

表2 Q350EWR1高耐候钢力学性能

项目	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)
Q350EWR1钢	≥350	490~690	≥22
TH500EW II 焊丝	576	663	20

3 试验方法

本文以300mm × 150mm × 2.5mm和300mm × 150mm × 4.0mm两种不同厚度的板材制备试验所需焊接接头。3种接头均采用I形坡口,2.5mm对接、

4.0mm对接坡口间隙为2mm;2.5mm + 4.0mm不等厚搭接接头坡口不预留坡口间隙。试验焊接参数见表3。3种接头形式如图1所示。工艺试验完成后,依照相关试验标准中对试件尺寸的要求,采用线切割对试板进行切割并打磨,完成对3种接头的金相、硬度、拉伸及脉动拉伸疲劳试验,并使用德国蔡司SUPRA 55场发射扫描电镜对拉伸断口以及疲劳失效试件的断口进行扫描,分析断裂原因以及断裂类型,结合试验结果综合评判Q350EWR1高耐候钢手持激光焊接头的微观组织及力学性能。

表3 焊接参数

接头	光束入射角 / (°)	光斑直径 /mm	焊丝直径 /mm	焊道	功率 /W	焦距 /mm	送丝速度 / (mm/s)	焊接速度 / (mm/s)	最大热输入 / (kJ/mm)
2.5mm对接	10	0.15	1.2	1	2000	300	9	8~10	0.25
4.0mm对接				2	2300	300	14	9~12	0.25
2.5mm+4.0mm搭接				1	1700	300	13	8~10	0.21

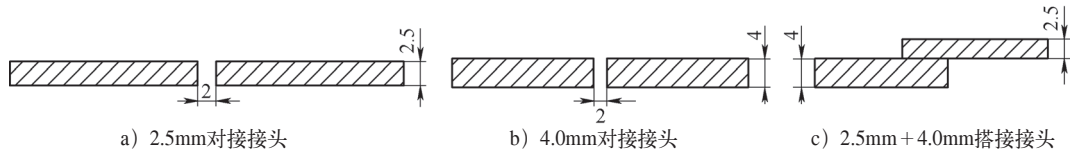


图1 坡口形式

4 试验结果与分析

4.1 组织形貌与硬度检测

图2所示为2.5mm对接、4.0mm对接、2.5mm+4.0mm搭接接头区域宏观和微观组织形貌。由图2可见，3种接头的焊缝区域均由铁素体以及大量的羽毛状贝氏体构成。由于焊接试验完成后焊缝区域冷却速率较大，且在贝氏体转变温度停留较长时间，因此在焊缝区产生了大量的贝氏体^[5]，导致此区域在整个接头中强度最高。

由图2可看出，2.5mm对接接头的热影响区宽度大于4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头中的热影响区宽度，这是由于2.5mm对接接头有着较大的热输入，导致更宽的热影响区，此外对于4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头，更大的板厚导致在完成焊接后以热传导和对流为主的散热效率要高于2.5mm对接接头。基于以上两点，2.5mm对接接头的热影响区宽度要大于4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头的热影响区宽度。值得注意的是，由于以高能量密度的激光作为热源，使焊缝的热输入明显下降，因此以上3种接头均未出现粗晶区。

由图2可见，4mm厚母材区域存在大量的铁素体以及少量的珠光体；而2.5mm厚母材中均匀地分布着珠光体及铁素体，且铁素体的含量要大于珠光体。由于热轧及退火工艺的实施，两种不同厚度的母材区域均由细小的等轴晶构成，未见明显的晶粒沿轧制方向被拉长的现象^[6]。

4.2 显微维氏硬度检测

3种接头硬度分布如图3所示。由图3可见，

2.5mm对接、4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头硬度分布均呈现“凸”字形状，硬度从高到低依次为：焊缝>热影响区>母材。由上述可得，在焊缝区存在大量的羽毛状贝氏体，这是造成焊缝区域硬度最高的原因；另外，由于低热输入，在热影响区由完全正火区与不完全正火区构成，为产生粗晶区，因此热影响区硬度低于焊缝，高于母材。

由于热输入及散热效率的不同，不同接头形式的热影响区宽度存在差异，热影响区宽度的不同同样影响着接头的硬度分布。由图3可见，4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头的热影响区宽度明显要窄于2.5mm对接接头，这一点也很好印证了上述关于接头微观组织形貌的讨论。

由图3可见，对于2.5mm+4.0mm搭接接头，两侧不同厚度母材及相应的热影响区硬度存在明显差异，2.5mm侧母材及热影响区硬度要明显高于4.0mm侧。这是不同厚度母材中珠光体与铁素体含量不同造成的。综上所述，可得出结论：2.5mm母材中珠光体含量要明显高于4.0mm母材，因此搭接接头两侧母材及相应的热影响区硬度出现了明显差异。

4.3 拉伸试验

3种不同接头在室温下进行横向拉伸试验得到的抗拉强度及伸长率见表4。2.5mm对接、4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头的抗拉强度分别为558.4MPa、491.0MPa和555.1MPa，伸长率分别为19.29%、26.43%和23.54%。由于3种接头焊缝区域存在大量的贝氏体，以及热影响区由正火区构成，

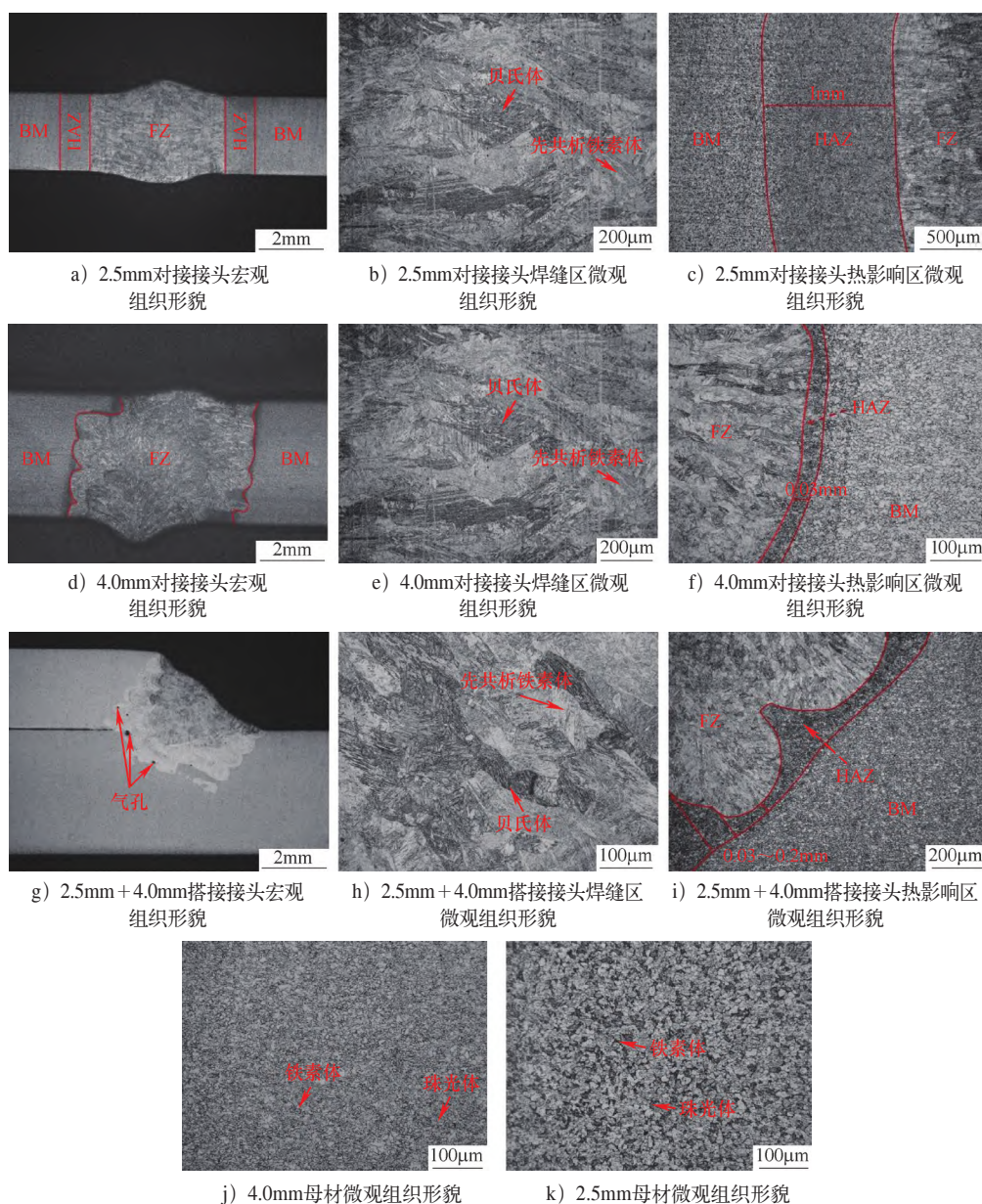


图2 接头宏观和微观组织形貌

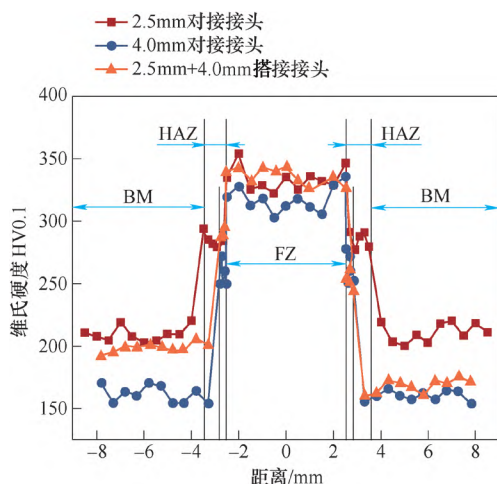


图3 接头硬度分布

导致焊缝和热影响区的强度大幅提高,因此3种接头的最终断裂位置均位于母材。由于两种厚度的母材中铁素体与珠光体含量各有不同,因此2.5mm对接和2.5mm + 4.0mm搭接接头的抗拉强度要高于4.0mm对接接头,而其伸长率要低于4.0mm对接接头。

图4所示为3种接头的拉伸断口形貌。由图4可见,拉伸断口存在明显的缩颈现象;断口分布着大小不一的等轴韧窝,可以判定Q350EWR1高耐候钢拉伸断裂方式为韧性断裂^[7]。

4.4 脉动拉伸疲劳试验

依照GB/T 3075—2021《疲劳试验 轴向力控制方法》试验方法,使用PLG-100型高频疲劳试验机

表4 拉伸试验结果

试件号	接头形式	试件实际尺寸 (宽×厚) /mm	抗拉强度/MPa		伸长率 (%)		断裂位置
			试验值	平均值	试验值	平均值	
B2-1	2.5mm对接	25.0×2.5	556.3	558.4	20.00	19.29	母材
B2-2		25.0×2.5	560.5		18.57		母材
B4-1	4.0mm对接	25.0×4.0	498.0	491.0	24.29	26.43	母材
B4-2		25.0×4.0	483.9		28.57		母材
L-1	2.5mm+4.0mm搭接	25.0×4.0/2.5	558.6	555.1	22.86	23.54	2.5mm母材
L-2		25.0×4.0/2.5	551.6		24.22		2.5mm母材

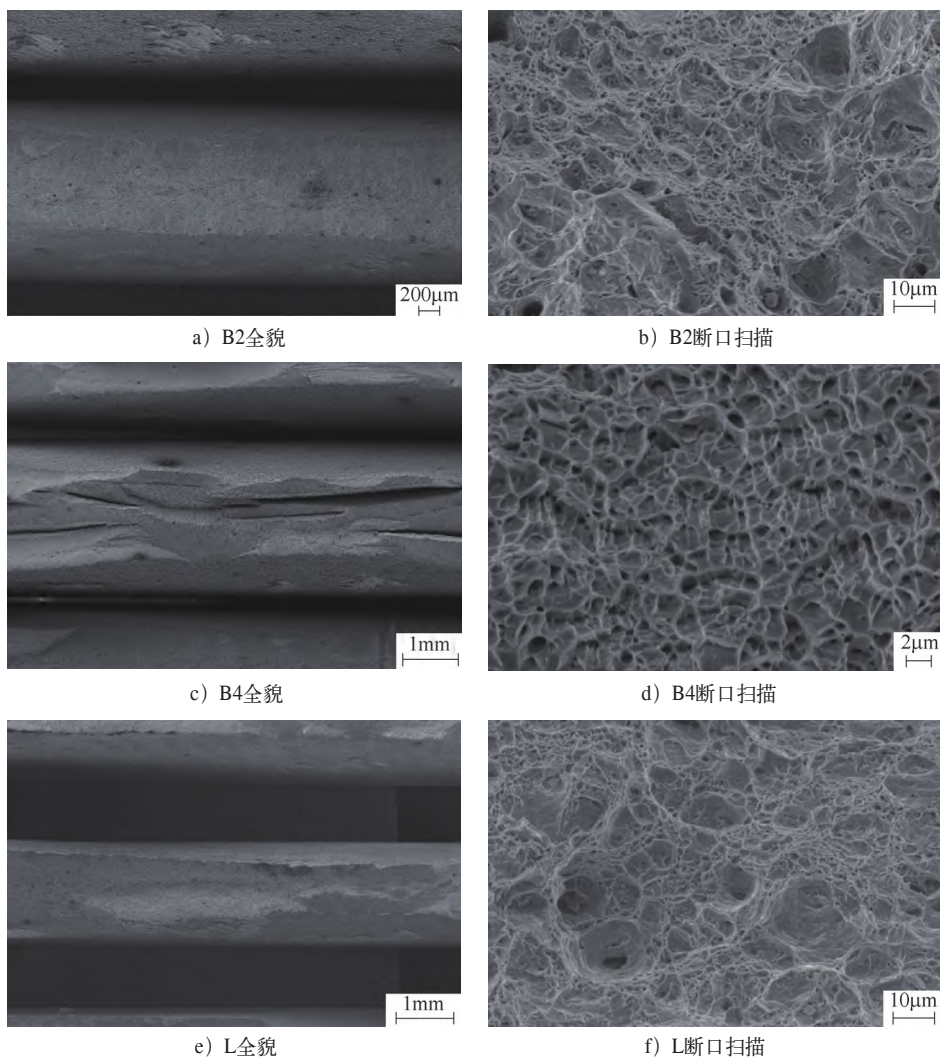


图4 拉伸断口形貌

对3种不同形式的接头进行应力比 $R=0.1$ 的脉动拉伸疲劳试验,得到置信度为90%、试件失效概率为50%的 $P-S-N$ 曲线,计算得到指定循环寿命 $N=10^7$ 下的疲劳强度,并采用德国蔡司SUPRA 55场发射扫描电镜对疲劳断口进行形貌扫描,观察起裂源并分析接头发生疲劳断裂的原因。

图5所示为Q350EWR1高耐候钢3种接头的 $P-S-N$

曲线。2.5mm对接、4.0mm对接、2.5mm+4.0mm搭接接头失效循环次数 N -应力范围 $\Delta\sigma$ 双对数坐标系下对所得试验数据进行拟合,得到 $S-N$ 曲线表达式分别为: $\Delta\sigma=680.77N^{-0.075}$, $\Delta\sigma=648.83N^{-0.0933}$, $\Delta\sigma=351.132N^{-0.08389}$ 。由上式计算所得,2.5mm对接、4.0mm对接、2.5mm+4.0mm搭接接头在指定循环寿命 $N=10^7$ 下的疲劳极限分别为203MPa、144MPa

和91MPa。参照国际焊接协会对不同焊接结构疲劳等级分类,编号为213保留余高,承受横向载荷的对接接头的 FAT 值为80MPa,编号为614承受横向载荷且在根部起裂的搭接接头的 FAT 值为36MPa。因此可以判定本文中3种接头疲劳性能良好。

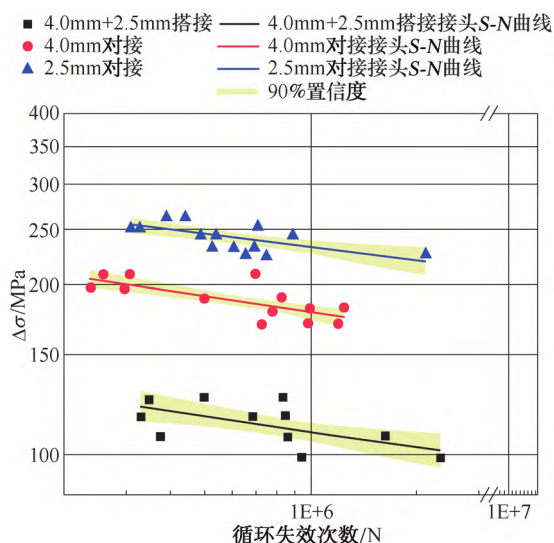


图5 不同形式接头的 P - S - N 曲线

图6所示为疲劳试件失效宏观形貌。由于本文中疲劳试件均未去除焊接余高,试件截面几何形状的突变在疲劳试件焊趾处存在较大的应力集中,因此2.5mm对接和4.0mm对接接头疲劳试件失效位置均位于焊趾处(见图6a、b),2.5mm+4.0mm搭接接头疲劳试件失效位置位于焊跟处(见图6c)。由于搭接接头本身结构的原因,在焊跟处存在应力集中

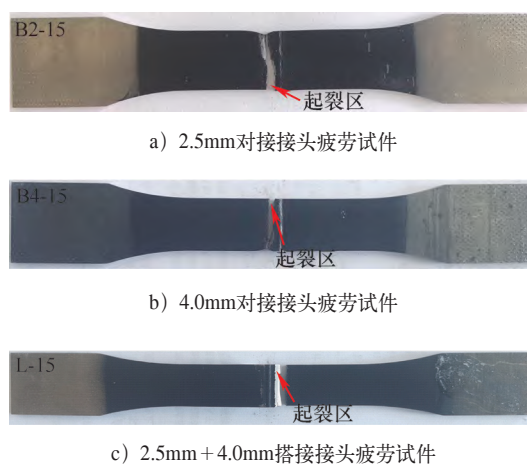


图6 疲劳试件失效宏观形貌

成为疲劳裂纹形核的诱因,因此2.5mm+4.0mm搭接接头的起裂位置均位于焊根处。

疲劳断口主要分为起裂区、裂纹扩展区及终断区3个区域,疲劳断口形貌如图7所示。由图7a可见,疲劳裂纹的形核位于试件边缘焊趾区域,由于试件未去除焊接余高,因此在焊趾处出现应力集中现象,因此裂纹的形核位置位于焊趾处;同时,裂纹扩展方向垂直于板厚方向。由图7b可见,在疲劳裂纹扩展区可清晰地观察到垂直于疲劳裂纹扩展方向的二次剪切裂纹和波浪状疲劳辉纹,这是具有较好塑性的金属材料发生疲劳断裂的重要特征^[8]。由图7c可见,在疲劳断裂试件的终断区内分布着大小不一的密集等轴韧窝,因此终断区为韧性断裂。

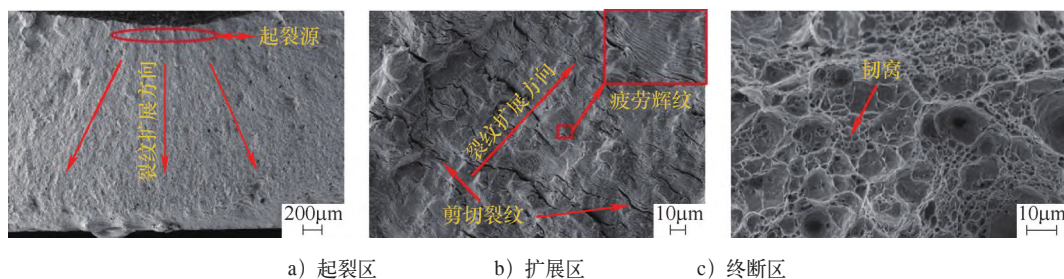


图7 疲劳断口形貌

5 结束语

1) 本文中3种接头焊缝区域均由贝氏体+铁素体构成,焊缝中大量贝氏体的出现很大程度上提高了焊缝区域的强度和硬度;由于相较于传统熔焊方式更低的热输入,热影响区由完全正火区以及不完全正火区构成;2mm厚Q350EWR1高耐候钢板材中的珠光体含量要明显高于4mm厚板材。

2) 2.5mm对接、4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头抗拉强度分别为558.4MPa、491.0MPa和555.1MPa,3种接头的抗拉强度均高于母材强度。两种对接接头均断于母材处,2.5mm+4.0mm搭接接头断于2.5mm母材侧。由于2.5mm板材中珠光体的含量要高于4mm板材,因此2.5mm对接与2.5mm+4.0mm搭接接头的抗拉强度相当,4.0mm对接接

头抗拉强度略低于其他两种接头。拉伸断口分布着密集的等轴韧窝，断裂类型可判定为韧性断裂。

3) 3种接头硬度分布呈“凸”字形状。焊缝区由于贝氏体的存在硬度最高；热影响区由于焊接热源的作用，经过了正火处理，因此硬度低于焊缝；母材区硬度最低。由于2.5mm厚板材中珠光体含量较高，因此2.5mm厚母材硬度大于4.0mm厚母材。

4) 2.5mm对接、4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头疲劳极限分别为203MPa、144MPa和91MPa。参照国际焊接协会对不同焊接结构疲劳等级分类可判断3种接头疲劳性能优异。疲劳断口有着明显的起裂源、扩展区及终断区。扩展区分布着垂直于裂纹扩展方向的二次剪切裂纹和疲劳辉纹，符合疲劳断裂的特性。

参考文献:

[1] 朱宇, 丁宁, 熊毅. Cu-P-Cr-Ni-Mo耐候钢热变形和再结晶行为分析研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41 (12): 68-71.

[2] 陈勇, 陈辉, 李仁东, 等. 耐候钢激光-MAG复合焊接头的低温断裂韧性[J]. 中国激光, 2019, 46 (7): 92-99.

[3] 马龙. SMA490BW耐候钢TIG焊接接头残余应力分析[J]. 焊接, 2024 (6): 68-73, 80.

[4] 孙洪斌, 杨少军, 张丛, 等. 耐候钢Q370qENH埋弧焊接接头锈蚀行为与机理研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44 (1): 152-156.

[5] 张运通. 耐候钢激光填丝焊T型接头组织与疲劳性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2022.

[6] 张运通, 孙杨, 魏巍, 等. 激光焊工艺对Q310NQL2耐候钢T形接头疲劳强度的影响[J]. 焊接技术, 2021, 50 (12): 17-21, 129-130.

[7] 刘红宁, 王艳俊, 杨上陆, 等. 焊后热处理对中锰TRIP钢激光焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 电焊机, 2023, 53 (7): 9-15.

[8] 刘超. Q345NQR2耐候钢薄板激光焊接接头拉伸与疲劳性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

(收稿日期: 20241227)

(上接第25页)

behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys[J]. USA: Worcester Polytechnic Institute, 2004.

[25] SOICHIRO K, SHINYA M, NAOYA K. Secondary Battery: JP19920320559[P]. 2024-09-25.

[26] 胡子杰. 灰铸铁表面激光熔覆制备Ni60/ZrO₂涂层及其性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2024.

[27] 何启浪, 张益豪, 师文庆, 等. 铜含量对316L激光熔覆钴基涂层组织与性能影响[J]. 激光技术, 2024, 48 (4): 527-533.

[28] HUANG G L, HE Y, LONG S J, et al. Microstructure, compressive performance and wear resistance of pure molybdenum additively manufactured via laser powder bed fusion[J/OL]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2024-06-01. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106740.

[29] 杨凯欣, 孙文磊, 肖奇, 等. 激光熔覆Fe06+(TiC/Mo)复合涂层硬度及耐磨性能研究[J]. 激光技术, 2023, 47 (3): 393-399.

[30] LOU B Y, LUO K C, XU B. The influence of

temperature on Cr-Ti coating in carbon steel: International Conference on Physical & Numerical Simulation of Materials Processing Scientific[C]. USA: Springer, 2007: 1157-1161.

[31] DAI N, ZHANG L C, ZHANG J, et al. Corrosion behavior of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2016, 102: 484-489.

[32] PAN J, THIERRY D, LEYGRAFC. Electrochemical impedance spectroscopy study of the passive oxide film on titanium for implant application[J]. Electro Chimica Acta, 1996, 41 (7-8): 1143-1153.

[33] ROSENTHAL H, BEILIS I, GOLDSMITH S, et al. A spectroscopic investigation of the development of a hot-anode vacuum arc[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1996, 29 (5): 1245.

[34] KIM J, FLORIAN B, JÜRGEN BEHM R, et al. Temperature-dependent insertion and adsorption of titanium on spinel Li₄Ti₅O₁₂(111) thin films – an angle-resolved XPS study[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2018 (20): 18319-18327.

(收稿日期: 20250221)