

热输入对 10CrNi3MoV 钢 MAG 焊接头 组织和性能的影响

曹文安, 叶 凡, 孙 磊, 刘 健, 牛继承

(中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘 要:为制定合理的焊接工艺, 保证焊接质量, 设置不同焊接热输入进行了 10CrNi3MoV 钢 MAG 焊接。采用微观组织分析、断口观察、力学测试等手段研究了焊接热输入对接头组织及性能的影响。结果表明, 热输入较小时 ($E=11.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $E=14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$), 焊缝组织以针状铁素体为主, 并含有部分粒状贝氏体、先共析铁素体等; 热输入较大时 ($E=18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$), 针状铁素体占比降低, 粒状贝氏体、先共析铁素体等增多, 组织粗化。随热输入的增大, 粗晶区晶粒粗化, 组织由板条马氏体逐步转变为板条贝氏体, 板条界限模糊, 并有粒状贝氏体出现; 焊缝金属强度降低, 冲击韧性先略有升高后显著降低, 断裂形式由微孔聚缩型韧断变为准解理/韧性混合断裂。热输入 $E=14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时, 焊缝组织以细密的针状铁素体为主, 具有最佳强韧性匹配。

关键词: 10CrNi3MoV; 热输入; 组织; 性能; 针状铁素体

中图分类号: TG407

文献标识码: A

Effects of Heat Input on Microstructure and Property of MAG Welded Joints of 10CrNi3MoV Steel

CAO Wenan, YE Fan, SUN Lei, LIU Jian, NIU Jicheng

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: 10CrNi3MoV steel is welded by metal active gas welding (MAG) with different heat input. The effect of heat input on microstructure and mechanical property of the welded joints are investigated by means of microstructure analysis, fracture observation and mechanical tests. Results show that the microstructure of the welded metal is mainly acicular ferrite, with a certain amount of proeutectoid ferrite and granular bainite, when the heat input ($E=11.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$, and $E=14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$) is low. When the heat input ($E=18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$) is high, the amount of acicular ferrite decreases, and the amount of proeutectoid ferrite and granular bainite significantly increase, and the microstructure coarsens. With the increase of heat input, the grain size of the coarse grained heat affected zone (CGHAZ) increases, and the microstructure transforms from lath martensite to lath bainite. The lath boundaries become blurred and the granular bainite emerges. The strength of the welded metal decreases, and the impact toughness increases slightly at first and then decreases significantly. The fracture mode changes from microporous polycondensation ductile fracture to quasi cleavage/ductile mixed fracture. When the heat input is $14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$, the microstructure is mainly fine acicular ferrite and the welded joint has the best combination of strength and toughness.

Keywords: 10CrNi3MoV; heat input; microstructure; property; acicular ferrite

10CrNi3MoV 钢为屈服强度 590 MPa 级低合金高强钢, 因拥有良好的强韧性匹配及综合使用

收稿日期: 2023-06-13

作者简介: 曹文安, 男, 1994 年生, 硕士, 从事船体钢焊接技术研究。E-mail: caowenan10@163.com

引用格式: 曹文安, 叶凡, 孙磊, 等. 热输入对 10CrNi3MoV 钢 MAG 焊接头组织和性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(6): 86-91+110.

CAO W A, YE F, SUN L, et al. Effects of heat input on microstructure and property of MAG welded joints of 10CrNi3MoV steel[J]. Development and Application of Materials, 2023, 38(6): 86-91+110.

性能而被用于重要船体结构的建造。随着船舶建造向自动化、高效化发展,熔化极活性气体保护焊(MAG)在船体焊接中占比不断增加,MAG焊灵活的焊接参数(热输入)调整范围,在满足不同焊接需求的同时,也对焊接接头组织和性能产生重要影响。随焊接热输入变化,接头各区域峰值温度和冷却速率改变,焊缝、热影响区发生不同的组织演变过程,进而对接头各区域力学性能产生影响,不当的焊接热输入将恶化接头组织并严重降低其力学性能。10CrNi3MoV 钢作为调质高强钢,对焊接热输入的敏感性较大,本研究通过设置 $11.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $18.1 \text{ kJ} \cdot$

cm^{-1} 三种热输入,开展 10CrNi3MoV 钢熔化极活性气体保护焊接,研究不同热输入下焊接接头的组织、性能变化规律,为制定合理的焊接工艺、保证工程实际焊接质量提供试验支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用材料为 35 mm 厚 10CrNi3MoV 钢板,焊材采用与钢板等强度匹配的 MAG 焊丝。钢板及焊丝成分如表 1 所示。

表 1 试验用材料化学成分

Table 1 Composition of the experimental materials(*w*)

材料类型	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Ti
钢板	0.100	0.200	0.440	2.870	1.010	0.230	0.069	—
焊丝	0.032	0.484	1.430	2.690	0.090	0.268	—	0.042

1.2 试验方法

采用 Fronius TPS-500i 数字脉冲焊机进行平对接试板焊接,X 形坡口,角度 60° ,装配间隙 0~2 mm。焊前去除待焊坡口附近油污及氧化皮,保护气为 80%Ar+20%CO₂,道间温度 80~120 ℃,正面焊接完成后反面气刨清根焊接。具体焊接工艺参数如表 2 所示。采用 OLYMPUS GX71 型金相显微镜进行金相组织观察;采用 JEM 2100 透射电子显微镜进行焊缝精细结构观察;按照 GB/T 2652—2008 进行焊缝金属拉伸试验;按照 GB/T 2650—2008 进行焊接接头冲击试验;采用 Quanta 650FEG 扫描电子显微镜进行焊缝组织、冲击断口观察。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

试样编号	焊接电流 <i>I</i> /A	电弧电压 <i>U</i> /V	焊接速率 <i>v</i> /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	热输入 <i>E</i> /($\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$)
1	220	25	30	11.0
2	250	26	27	14.4
3	280	27	25	18.1

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

2.1.1 焊缝显微组织

图 1 为三种热输入焊缝金属柱晶区显微组织,均以针状铁素体(AF)为主,并含有部分粒状贝氏体(GB)和先共析铁素体(PF)。当热输入为 $11.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,如图 1(a)、1(d)所示,原柱状晶晶界平行扩展,其上分布有块状先共析铁素体和粒状贝氏体组织,晶内组织为成一定夹角交织分布的针状铁素体和少量粒状贝氏体;热输入为 $14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,如图 1(b)、1(e)所示,晶界处先共析铁素体和粒状贝氏体体积分数降低,有效尺寸缩小,少量细小的侧板条铁素体(FSP)沿晶界向晶内延伸生长,晶内针状铁素体数量增加,尺寸减小,长宽比增大,呈现致密的交错分布特征;热输入为 $18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,如图 1(c)、1(f)所示,焊缝组织明显粗大,先共析铁素体沿晶界析出长大,粒状贝氏体和较为粗大的侧板条铁素体以先共析铁素体为基础向晶内延伸生长,晶内针状铁素体数量明显减少,尺寸增大,并由针

状变为长径比较小的短粗棒状,晶内粒状贝氏体占比增加,与针状铁素体交错分布^[1]。

焊缝组织的差异主要与不同热输入下焊接热循环的改变有关。当热输入为 $11.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,接头冷却速率较快,高温转变产物先共析铁素体难以充分长大,而针状铁素体的形核也因需要孕育期而无法充分进行;随热输入增至 $14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$,针状铁素体在合适的过冷度及成分条件

下,依托第二相质点或夹杂物大量形核,细密的针状铁素体于晶内析出,相互交错形成致密连锁组织^[2];热输入为 $18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,较慢冷却速率使 C 原子在中、高温转变过程中充分扩散,先共析铁素体和侧板条铁素体于晶界处形核长大,晶内铁素体不断长大并部分多边形化,铁素体基体间的富碳奥氏体在较低温度下转变为岛状 M-A,形成粒状贝氏体组织^[3-4]。

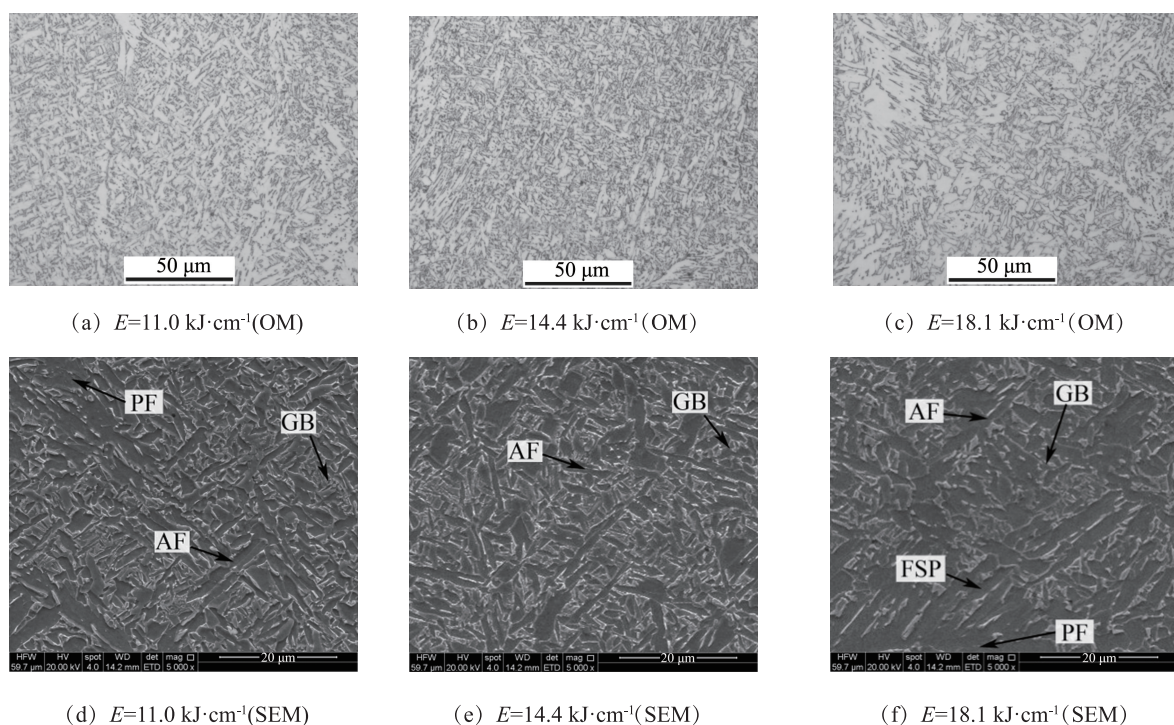


图 1 不同热输入下焊缝显微组织

Fig. 1 Microstructure of weld with different heat inputs

为进一步了解焊缝组织精细结构,采用 TEM 电镜对焊缝组织进行了分析,如图 2 所示。图 2 (a)为焊缝中针状铁素体依托夹杂物形核典型情况,黑色夹杂物位于视野中央,高密度位错的针状铁素体以其为中心向四周延伸生长,相互之间成大角度晶界。采用 EDS 对夹杂物进行分析(如图 3),结果显示其主要成分为 O、Mn、Ti、Si、Al,推测为 Mn、Ti、Si、Al 的复合氧化物。资料显示^[5-8],焊缝中氧化物夹杂可促进针状铁素体的形核,一方面,氧化物的形成使周围 Mn、Ti 等奥氏体相扩大元素含量降低,Mn、Ti 等溶质元素贫乏区出现,增大了 AF 形核驱动力;另一方面,根

据非均质形核理论,夹杂物在焊缝金属中可作为惰性截面降低 AF 形核壁垒;此外,部分氧化物如 TiO 与铁素体的晶格失配度很小,也可促进 AF 在其表面形核。另外,在热输入为 $18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的焊缝中观察到多处粒状贝氏体组织,如图 2 (b)所示,岛状组织位于白色铁素体基体内,其部分表面呈现大量细线状孪晶亚结构,结合选区电子衍射结果,可知该岛状组织为 M-A 组元,图中 M-A 组元呈尖锥状深入铁素体基体,并与之形成较为清晰的相界面,周围贝氏体、铁素体基体位错密度较针状铁素体明显降低。

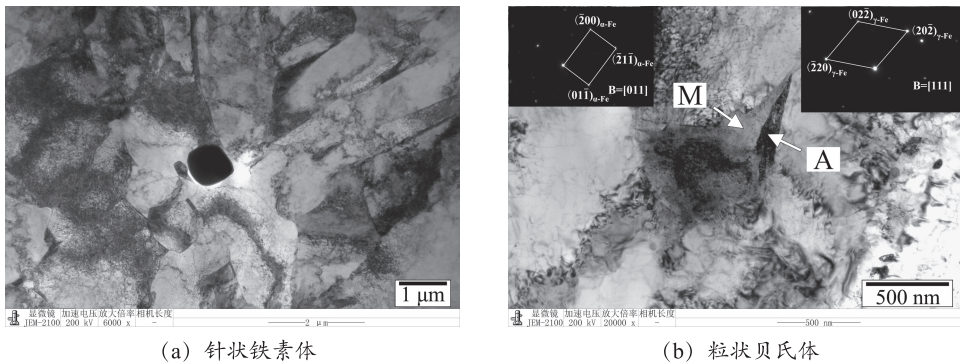


图 2 TEM 下不同焊缝组织形貌

Fig. 2 Morphology of different weld microstrures by TEM

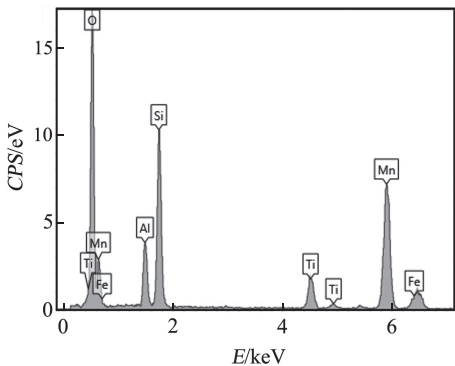


图 3 夹杂物 EDS 分析

Fig. 3 EDS analysis of inclusion

2.1.2 热影响区显微组织

图 4 为三种热输入下焊接接头热影响区典型组织。焊接过程中,粗晶区 (CGHAZ) 受热重新奥氏体化,晶粒于较高峰值温度下严重长大,并于不同的 $t_{8/5}$ 条件下转变为不同组织。热输入较低时 (如图 4(a)), 高温停留时间较短,粗晶区晶粒较小,组织为板条马氏体 (LM) 和板条贝氏体 (LB),板条束以不同位向于晶内交错分布,相互之间为大角度晶界。随热输入增大 (如图 4(b)、4(c)), 粗晶区晶粒度增大,晶内板条间界限模糊,板条马氏体减少,板条贝氏体增多,并有粒状贝氏体出现。

不同热输入下细晶区 (FGHAZ)、临界区 (ICHAZ) 显微组织类似,如图 4(d)、4(e) 所示。细晶区晶粒细小均匀,呈等轴状分布,为细小贝氏体组织;临界区峰值温度介于 $A_{C1} \sim A_{C3}$ 间,加热过程中,C 扩散形成 C 浓度梯度,贫碳区铁素体长大,富碳区转变为细小奥氏体组织,冷却过程中铁素体保留而奥氏体重新相变为室温组织,最

终形成粗细不均的铁素体和细小贝氏体的混合组织。

2.2 力学性能

2.2.1 焊缝拉伸性能

三种热输入下焊缝金属拉伸试验结果如表 3 所示。随热输入增大,焊缝金属屈服、抗拉强度降低。根据显微组织观察结果可知,热输入较低时,焊缝组织以针状铁素体为主,狭长的针状铁素体在晶内交错分布,将晶粒分割成大量细小区域,可显著降低有效晶粒尺寸^[9]。同时,针状铁素体本身拥有较高密度位错,且随冷却速率的提高,位错密度增加,在外力作用下,位错运动产生钉扎缠结,塑性变形抗力增大,使焊缝金属宏观上拥有较高的强度。当热输入过大时,一方面,焊缝组织中针状铁素体数量减少并粗化,有效晶粒尺寸显著增大,先共析铁素体、粒状贝氏体等粗大的中高温产物增多,使组织位错密度下降,抵抗塑性变形的能力减弱;另一方面,较大的热输入使接头熔合比增加,母材对焊缝金属的稀释作用使焊缝中合金的固溶强化效果减弱,也使焊缝金属的强度降低^[10]。

表 3 不同热输入下的焊缝拉伸性能

Table 3 Tensile properties of weld with different heat inputs

热输入 $E/$ ($\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$)	屈服强度 $R_{p0.2}/$ MPa	抗拉强度 $R_m/$ MPa	伸长率 $A/\%$	断面收缩 率 $Z/\%$
11.0	650	727	22.5	73
14.4	641	721	23.0	73
18.1	616	695	23.5	74

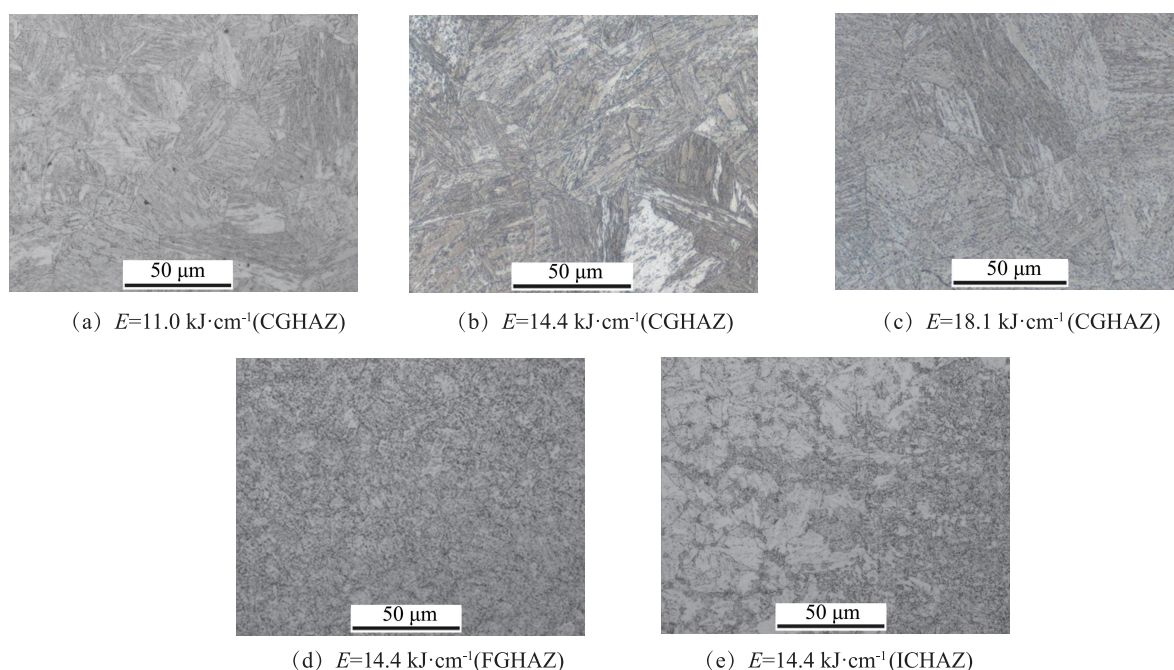


图 4 不同热输入下热影响区显微组织

Fig. 4 Microstructure of HAZ with different heat input

2.2.2 焊缝冲击性能

表 4 为三种热输入下焊缝金属-50℃冲击试验结果,从表中可以看出,随热输入增大,焊缝金属冲击吸收能量先略有增加,后显著降低。当热输入为 $11.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,焊缝金属冲击吸收能量较高,这是因为此时焊缝组织以针状铁素体为主,针状铁素体板条呈相互交错状联锁生长,板条间为大角度晶界,有效晶粒尺寸较小,在冲击载荷作用下,微裂纹扩展至呈一定长宽比的针状铁素体组织时,裂纹扩展阻力增大,路径发生曲折偏转而消耗更多能量,使焊缝金属具有良好的冲击韧性^[11],此时焊缝组织中虽有先共析铁素体等高温产物,但其数量和尺寸较小,对裂纹扩展的影响也较小。当热输入增至 $14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$,焊缝金属中针状铁素体更加细密交错,有效晶粒尺寸更小,裂纹扩展阻力进一步增大。当热输入过大时($E = 18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$),冷却速率过慢使先共析铁素体、侧板条铁素体等高温产物长大,针状铁素体板条也发生粗化,大角度晶界等相界面减少,使裂纹扩展阻力降低。同时,含 M-A 脆硬相的粒状贝氏体也显著增多,如图 2(b) 所示, M-A 组元呈尖锥状深入块状铁素体基体,形成较大的应力集中和较多缺陷,根据 Griffith 断裂理论,此处易成为裂纹源和裂纹扩展通道,

使焊缝金属冲击韧性下降^[12-13]。

表 4 不同热输入下焊缝冲击吸收能量

Table 4 Impact absorption energy of weld with different heat input

热输入 $E/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$	冲击吸收能量 KV_2/J	
	试验值	均值
11.0	109、124、139	124
14.4	124、130、145	133
18.1	81、95、104	93

选取不同热输入下焊缝金属冲击断口进行观察。图 5(a) 为 $E = 14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时 $KV_2 = 145 \text{ J}$ 冲击断口的放射区形貌,主要以细小、密集排列的韧窝构成,韧窝底部分布有大量球状夹杂物,试样受冲击载荷断裂时,在应力集中作用下,微孔于夹杂物/金属基体表面萌生,并不断长大聚集形成微裂纹,裂纹延伸扩展产生断裂,宏观表现为微孔聚缩型韧性断裂。夹杂物能谱分析结果显示,其主要成分为 Mn、Ti、Si、Al 的复合氧化物,与 TEM 下观察到的夹杂物一致。图 5(b) 为 $E = 18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时 $KV_2 = 81 \text{ J}$ 冲击断口的放射区形貌,以准解理刻面、撕裂棱及韧窝组成的延性脊构成,为准解理+韧性的混合断裂,由于裂纹在准解理刻面扩展过程中消耗能量较少,表现为

冲击韧性显著下降。

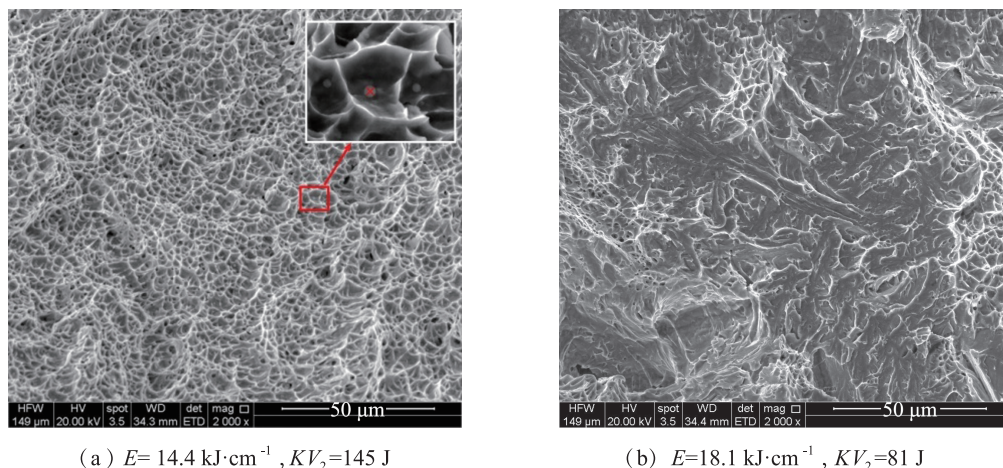


图5 冲击断口形貌

Fig. 5 Morphology of impact fracture

3 结论

(1) 在 $11.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 三种热输入下,焊缝组织均以针状铁素体、先共析铁素体、粒状贝氏体为主。热输入较小时 ($E = 11.0 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $E = 14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$),焊缝组织主要为针状铁素体,并含有部分粒状贝氏体、先共析铁素体等,热输入较大时 ($E = 18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$),针状铁素体占比降低、尺寸增大,形态由针状变为长径比较小的短粗棒状,粒状贝氏体、先共析铁素体增多,组织明显粗化。

(2) 随热输入增大,粗晶区高温停留时间增加,晶粒粗化,组织由板条马氏体逐步转变为板条贝氏体,板条界限模糊,并有粒状贝氏体出现。

(3) 随热输入增大,焊缝金属强度降低,冲击韧性先稍升高后显著降低;焊缝冲击断口由微孔聚缩型韧性断裂变为准解理/韧性的混合断裂形式。热输入为 $14.4 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,焊缝组织以细密的针状铁素体为主,具有最佳强韧性匹配;热输入为 $18.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ 时,焊缝组织针状铁素体减少,含 M-A 硬脆相的粒状贝氏体增加,先共析铁素体等高温产物长大,使焊缝金属强度降低、韧性恶化。

参考文献:

[1] KANG J S, SEOL J B, PARK C G. Threedimensional characterization of bainitic microstructures in

low-carbon high-strength low-alloy steel studied by electron backscatter diffraction[J]. Materials Characterization, 2013, 79: 110-121.

[2] 秦华,刘政军,苏允海,等.热输入对 BWELDY-960Q 钢焊接接头组织性能的影响[J].焊接学报, 2015, 36(6): 103-106.

[3] 尚成嘉,王学敏,周召瑾,等. Mn-Mo-Nb-B 低碳微合金钢中温转变组织的演化[J].金属学报, 2008, 44(3): 287-291.

[4] 何亮,牛继承,张玉祥. Mo 元素对船用高强钢碱性焊条熔敷金属组织和性能的影响[J].材料开发与应用, 2017, 32(6): 34-39.

[5] 万响亮,李光强,吴开明.低合金高强钢针状铁素体组织特征和形成机理[J].钢铁研究学报, 2016, 28(6): 1-12.

[6] SHIGESATO G, SUGIYAMA M. Development of in situ observation technique using scanning ion microscopy and demonstration of Mn depletion effect on intragranular ferrite transformation in low-alloy steel [J]. Journal of Electron Microscopy, 2002, 51(6): 359-367.

[7] SHIM J H, BYUN J S, CHO Y W, et al. Mn absorption characteristics of Ti_2O_3 inclusions in low carbon steels[J]. ScriptaMaterialia, 2001, 44(1): 49-54.

[8] WAN X L, WANG H H, CHENG L, et al. The formation mechanisms of interlocked microstructures in low-carbon high-strength steel weld metals[J]. Materials Characterization, 2012, 67: 41-51.

[9] WAN X L, WEI R, WU K M. Effect of acicular ferrite formation on grain refinement in the coarse-grained region of heat-affected zone[J]. Materials Characterization, 2010, 61(7): 726-731.

(下转第 110 页)

的急剧降低,利用该特征可测定材料的断裂强度 I_b 。

参考文献:

- [1] 薛钢. 基于应力第一不变量 I_1 的断裂准则假设[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(6): 1-5.
- [2] 薛钢. 承受双向等拉应力的平面应变 I 型裂纹线弹性断裂的 I_1 准则与 K 准则一致性分析[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(1): 1-8.
- [3] 薛钢. 各向同性均质材料典型断裂行为的 I_1 断裂准则适用性分析[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(4): 1-5.
- [4] 薛钢. 承受单向静拉应力的有限宽板双边对称裂纹尖端 $I_1/\sigma_{\text{Mises}}$ 的分布函数[J]. 材料开发与应用, 2016, 31(1): 8-12.
- [5] 薛钢, 王涛, 杨超飞, 等. 基于 I_1 断裂准则的铁素体型钢焊接氢致开裂机制研究[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(4): 49-52.

- [6] 薛钢. 基于 Mises 屈服准则和 I_1 断裂准则的焊接接头力学特性分析[J]. 材料开发与应用, 2022, 37(5): 1-10.
- [7] 薛钢, 宫旭辉, 高珍鹏, 等. 近似二维应力状态下 I_1 断裂准则假设有效性的试验验证[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(3): 1-9.
- [8] MEYERS M A, CHAWLA K K. Mechanical behavior of materials[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [9] CALLISTER W D. Materials science and engineering: an introduction[M]. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [10] 薛钢. 各向同性均质弹塑性材料圆棒试样单向拉伸试验变形特性与应力应变本构关系的相关性分析[J]. 材料开发与应用, 2022, 37(2): 24-36.

(上接第 91 页)

- [10] 安同邦, 单际国, 魏金山, 等. 热输入对 1 000 MPa 级工程机械用钢接头组织性能的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 42-49.
- [11] CHENG L, WU K M. New insights into intragranular ferrite in a low-carbon low-alloy steel[J]. Acta Materialia, 2009, 57(13): 3754-3762.
- [12] 曹志民, 张贵锋, 张建明, 等. Q690C 粒状贝氏体钢 MAG 焊接头中 M-A 组元的演变及其对热影响

区冲击韧度的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 84-92.

- [13] WANG Z F, SHI M H, TANG S, et al. Effect of heat input and M-A constituent on microstructure evolution and mechanical properties of heat affected zone in low carbon steel [J]. Journal of Wuhan University of Technology - Mater Sci Ed, 2017, 32(5): 1163-1170.

(上接第 99 页)

- [19] GLOWINSKI R, PIRONNEAU O. Finite element methods for navier-stokes equations[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1992, 24: 167-204.
- [20] DENN M M. Extrusion instabilities and wall slip[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33: 265-287.
- [21] Rippl A, Pittman J, Sienz J. Three-dimensional simulation of rubber profile extrusion with integration of rheological data [C]. Proceeding of Sixth

ESAFORM, 2003.

- [22] Rippl A, Pittman J, Sienz J. Three-dimensional simulation of rubber extrusion using finite element analysis. [C]. Proceedings of the Tenth ACME, 2002.
- [23] ROSENBAUM E E, HATZIKIRIAKOS S G. Wall slip in the capillary flow of molten polymers subject to viscous heating [J]. AIChE Journal, 1997, 43(3): 598-608.