

引用格式:刘五兵,王世清,李方坡.Q690D 多道次 GMAW 接头的组织和力学性能[J].热加工工艺,2024,53(3):53-56+61.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212719

http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

Q690D 多道次 GMAW 接头的组织和力学性能

刘五兵^{1,2}, 王世清¹, 李方坡²

(1. 西安石油大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 中国石油集团石油管工程技术研究院, 陕西 西安 710077)

摘要:在无预热和焊后热处理的条件下,采用熔化极气体保护焊(GMAW)和 CHW-80C1 实芯焊丝对 20 mm 厚 Q690D 热机械轧制钢板进行多道次焊接试验,分析该钢焊接接头的组织转变特征和冲击性能。结果表明,采用 CHW-80C1 焊丝可获得成型优良的焊接接头;Q690D 各道次的焊缝组织相似,均由粒状贝氏体和少量的针状铁素体、先共析铁素体组成;热影响区由粒状贝氏体、针状铁素体、先共析铁素体及 M-A 组元组成。焊缝与细晶热影响区的冲击吸收功相对于母材的有一定幅度的下降,焊缝与细晶热影响区的断裂类型均为韧性断裂。

关键词:Q690D 钢;熔化极气体保护焊(GMAW);显微组织;冲击韧性;断口

中图分类号: TG444+.77

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)03-0053-04

Microstructure and Mechanical Properties of Q690D GMAW Multi-Pass Welding Joint

LIU Wubing^{1,2}, WANG Shiqing¹, LI Fangpo²

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China; 2. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract: Under the condition of no preheat and post-weld heat treatment, the multi-pass welding test of 20 mm thick Q690D TMCP steel plate was carried out by using gas metal arc welding (GMAW) and cored welding wire CHW-80C1. The microstructure transformation characteristics and impact properties of the welded joint were analyzed. The results show that excellent welding joint can be obtained by using CHW-80C1 welding wire. The weld metal microstructure of each pass of Q690D are all composed of granular bainite, a small amount of acicular ferrite and proeutectoid ferrite. The heat affected zone consists of granular bainite, acicular ferrite, proeutectoid ferrite and M-A components. The impact absorption energies of the weld metal (WM) and fine grained heat affected zone (FGHAZ) are lower than that of base metal. The fracture modes of the WM and FGHAZ are ductile fracture.

Key words: Q690D steel; gas metal arc welding(GMAW); microstructure; impact toughness; fracture

Q690D 低合金高强度结构钢在 GB/T1591—2018 标准中被定义为上屈服强度 R_{eH} 不小于 690 MPa 的钢材,通常具有高强韧、易成型和耐腐蚀性等综合性能,被广泛应用于工程机械装备制造、高层建筑、桥梁、石油化工等领域^[1-2]。国内外学者对 Q690D 的组织性能及焊接性已开展过相关研究。宋

欣等^[3]研究了不同成分不同工艺条件下 Q690D 的力学性能及微观组织,通过对终冷温度的控制和热处理工艺可获得板条贝氏体、粒状贝氏体、铁素体与贝氏体的混合组织及淬火马氏体和回火索氏体组织。Zhang 等^[4]研究了预疲劳损伤对 Q690 高强钢的影响,发现预损伤可降低 Q690 的强度与韧性,随着预损伤程度的增加其韧性急剧下降,而弹性模量受此影响较小。康澜等^[5]通过高周疲劳试验研究了 Q690D 应力-疲劳寿命曲线,结果表明 Q690D 高强钢的疲劳性能远高于普通钢的,疲劳性能优越。韩振仙等^[6]通过对 Q690D 高强钢进行小铁研试验研究发现,不预热焊接时,裂纹率不合格,而预热温度为 60℃时,裂纹率为零。陈素文等^[7]在结合试验与有限元的基础上,提出了 Q690D 焊接箱型截面柱的弯矩-曲率滞

收稿日期:2021-10-08

基金项目:中国石油天然气集团公司科研项目(2018E-2101,2019B-1404)

作者简介:刘五兵(1995-),男,甘肃天水人,硕士研究生,从事焊接及石油装备新材料新工艺开发与应用;

E-mail:liuwubing163@163.com

通讯作者:王世清(1980-),女,副教授,博士,主要从事材料表征、摩擦焊、高能束焊、超声波点焊、热处理及焊接数值模拟等研究;

E-mail:sqwang@xsyu.edu.cn

回模型,为 Q690D 高强钢结构的弹塑性地震反应分析提供依据。陈玉喜等^[8]发现大热输入会导致 Q690E 钢焊缝与过热区产生联生结晶,焊缝柱状晶粗大,显著降低焊缝冲击性能。黄学伟等^[9]研究了 Q690D 高强度钢材及焊缝连接件在常温和高温后的断裂性能。然而,关于 Q690D 多道次焊接接头的显微组织及焊缝(WM)与细晶热影响区(FGHAZ)的冲击性能的相关研究较少。本文在无预热和焊后热处理的工艺条件下采用熔化极气体保护焊(GMAW)和 CHW-80C1 实芯焊丝对 20 mm 厚的 Q690D 热机械轧制钢板进行多道次焊接试验,分析焊接接头的组织特征、焊缝与细晶热影响区的冲击性能,并对其断口形貌与断裂机理进行观察与探讨,从而为后续该钢种的焊接工艺优化提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验母材为 20 mm 厚的国产 Q690D 热机械轧制钢板,其化学成分如表 1 所示,合金元素总量为 3.49%。Q690D 钢的显微组织如图 1 所示,由粒状贝氏体组成,晶粒度等级为 8.0 级;其力学性能如表 2

表 1 Q690D 钢的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of Q690D steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	V	Cu
0.0928	0.187	1.215	0.00715	0.00254	0.478	0.402	0.822	0.00260	0.0380	0.246

表 3 焊丝的化学成分(质量分数,%)和力学性能
Tab.3 Chemical composition(wt%) and mechanical properties of the welding wire

C	Mn	Si	S	P	Mo	Cu	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A(\%)$	-20°C KV/J
0.076	1.860	0.520	0.006	0.007	0.600	0.210	700	820	18	70

表 4 焊接工艺参数
Tab.4 Welding process parameters

焊接道次	电流 I/A	电压 U/V	送丝速度 $/(\text{in}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $/(\text{in}\cdot\text{min}^{-1})$
1	180~200	25~26	260~280	18~20
2	210~218	28~29	310~320	15~16
3~4	200~210	27~29	300~310	15~16
5~8	190~205	23~27	310~320	15~17
9	170~180	25~26	230~240	18~19
10~11	150~170	24~25	230~240	18~19

注:1 in/min=25.4 mm/min

1.3 试验方法

从焊接试件上取样,采用 2% 的硝酸酒精溶液

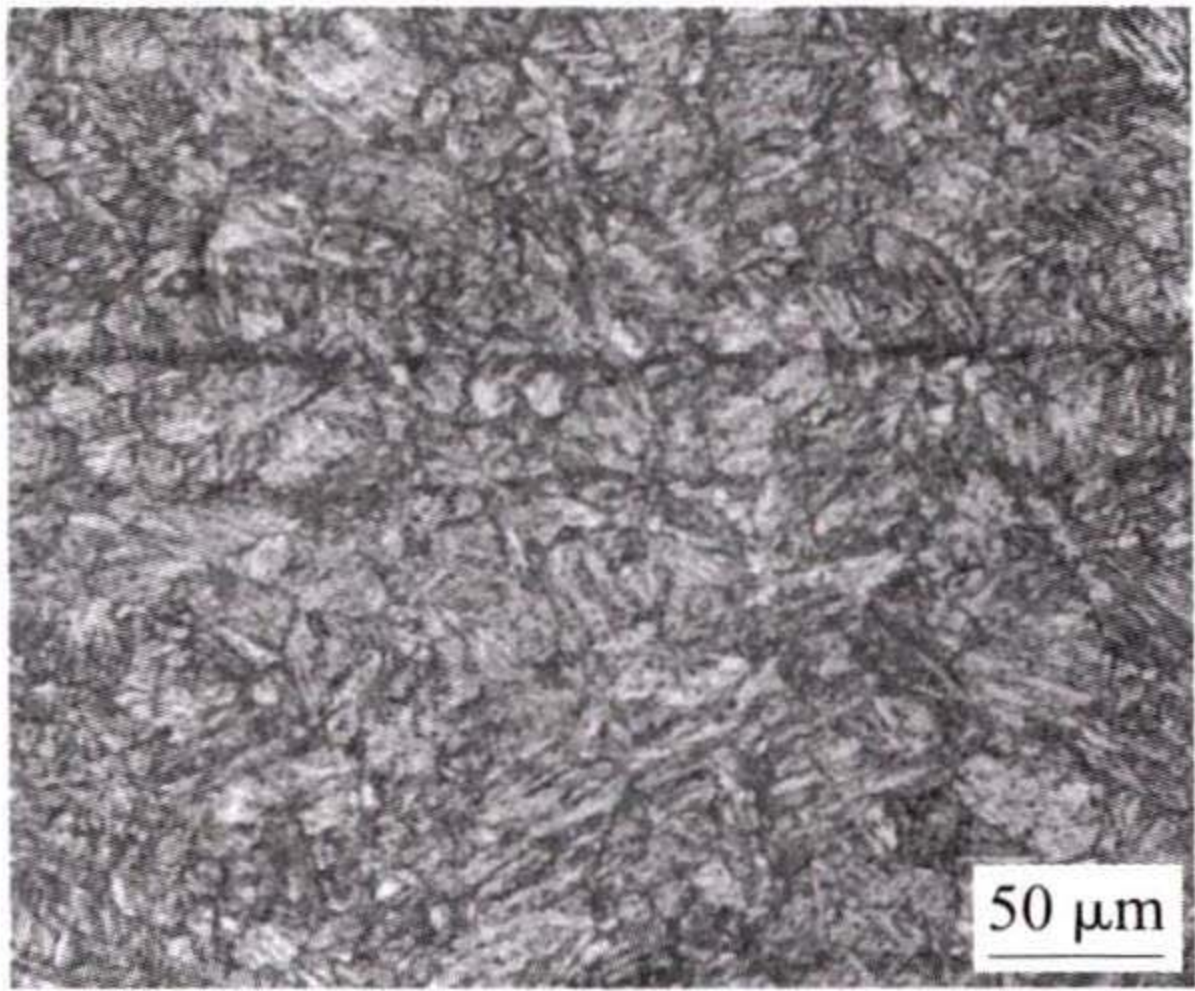


图 1 Q690D 钢的显微组织
Fig.1 Microstructure of Q690D steel

表 2 Q690D 钢的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of Q690D steel

$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A(\%)$	-20°C KV/J	硬度(HV10)
854	897	36.3	257, 257, 233	276~290

所示,Q690D 钢具有良好的强度、硬度与塑韧性。

1.2 焊接工艺

依据 GB/T19869.1—2005 制备焊接对接板试件,试板尺寸为 500 mm×200 mm×20 mm,加工成 V 型坡口,坡口角为 46°,钝边 2 mm。采用熔化极气体保护焊,焊接设备为林肯 F500 焊机,焊丝选用直径为 1.2 mm 的 CHW-80C 实芯焊丝,保护气体为 80% Ar+20%CO₂,气体流量为 20~25 L/min。焊丝的化学成分和力学性能见表 3,焊接工艺参数见表 4。焊前对试板进行除锈、抛光、打磨,在不进行焊前预热与焊后热处理的条件下进行焊接试验。

腐蚀后,利用 OLS4100 激光共聚焦显微镜进行显微组织观察。采用 ZBC2752-8 冲击试验机依据 ASTM A370-20 评定接头焊缝和细晶热影响区的冲击韧性。冲击试样的取样位置在距离焊缝上表面 2 mm 处,试样尺寸为 10 mm×10 mm×50 mm,缺口形式为 V 型,在焊缝与细晶热影响区各取 3 个冲击试样,试验温度为-20、20℃。采用扫描电镜(SEM)对焊缝与细晶热影响区的冲击断口微观形貌进行观察与分析。

2 试验结果与分析

2.1 焊接件宏观形貌

图 2 为焊接件的宏观形貌。由图 2 (a)、(b)可

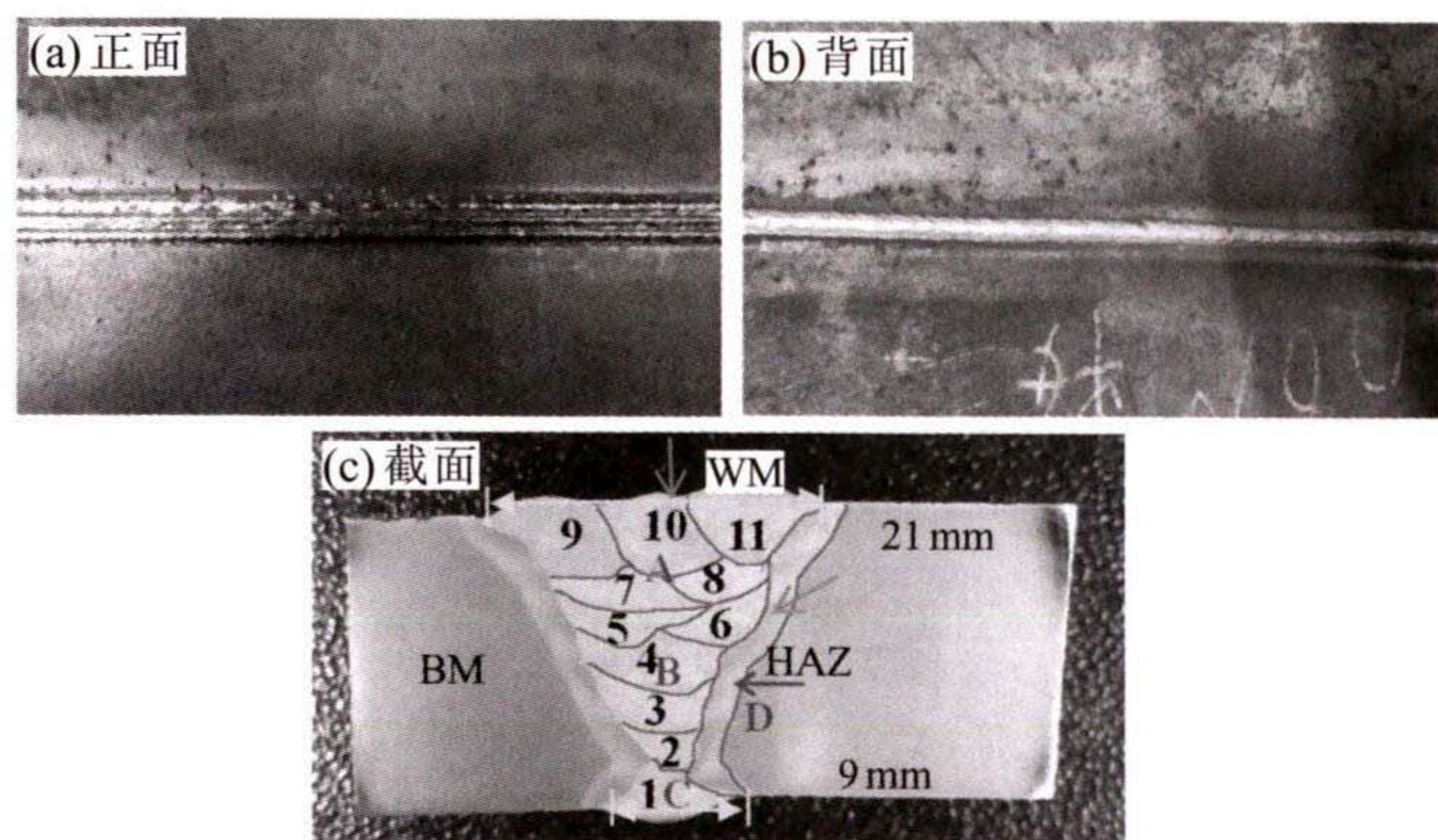


图2 焊接件的宏观形貌
Fig.2 Macro-morphologies of the weldment

知,焊缝整体成型情况良好,飞溅较少,无咬边、未焊满、焊瘤、弧坑、烧穿、下塌、外部气孔、表面裂纹等焊接缺陷。由图2(c)焊缝截面图可知,焊缝顶部的宽度是底部宽度的2.33倍,焊缝、热影响区层次清晰,各道次之间完全熔合,无焊接缺陷。

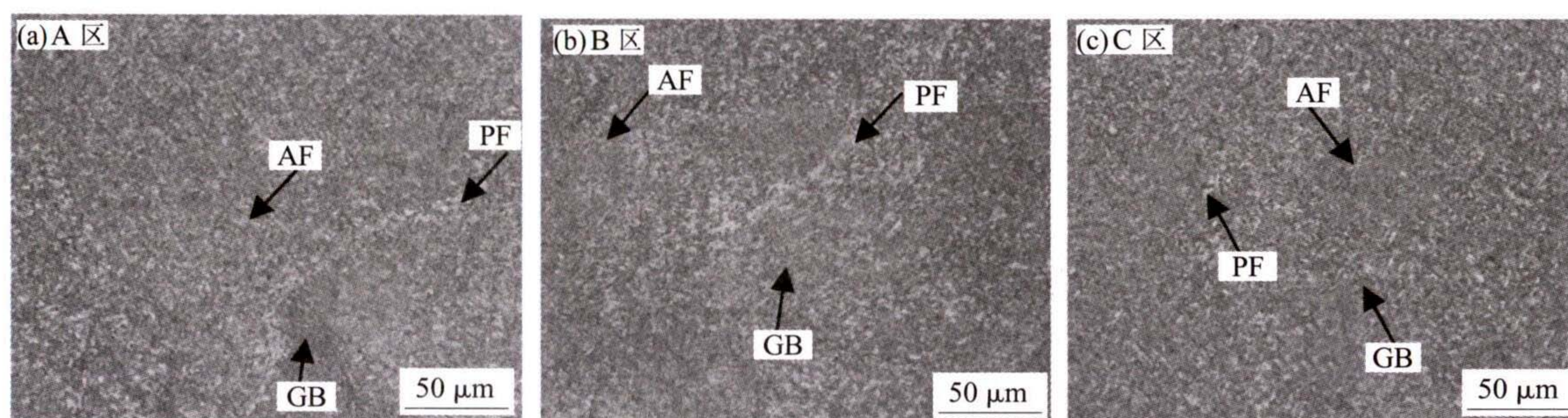


图3 图2(c)中焊缝各区的微观组织
Fig.3 Microstructure of each region of the weld metal shown in Fig.2(c)

体组织^[11]。

2.2.2 热影响区显微组织

Q690D 热影响区根据组织特征可分为熔合区(FZ)、粗晶区(CGHAZ)、细晶区(FGHAZ)和部分相变区(ICHAZ)。图4为图2(c)中D区域的热影响区显微组织。图4(a)为热影响区的低倍组织,在图4(a)中左上侧为焊缝区(WZ),右侧紧邻的为熔合区和粗晶区,向右侧依次是细晶区、部分相变区和母材(BM)。图4(b)是熔合区显微组织,此区域范围较窄,由粗大的粒状贝氏体与少量的针状铁素体以及在铁素体晶界上析出M-A组元组成,通常是裂纹、脆性破坏的发源地。图4(c)为粗晶热影响区的显微组织,此区的温度范围在1100~1450℃,金属处于过热状态,冷却后得到粗大的组织,显微组织为晶粒粗大的粒状贝氏体。图4(d)为细晶热影响区的显微组织,此区的金属在焊接时被加热到1100℃~ A_{c3} ,

2.2 焊接接头微观组织

2.2.1 焊缝显微组织

焊缝的显微组织受到熔合比及焊接工艺条件等因素的影响,焊缝的冷却速度发生改变,焊缝显微组织即发生变化。图3为焊缝各区的显微组织。由图可知,焊缝各区域的组织特征相近,均由粒状贝氏体(GB)与少量的针状铁素体(AF)、先共析铁素体(PF)组成。由于受后续焊道的热循环的作用影响,B、C区域的晶粒得到一定细化。粒状贝氏体是在块状铁素体基体上分布有富碳奥氏体或其他分解产物的组织,富碳奥氏体常以小岛状或小河状分布在块状铁素体基体上^[10]。由于焊丝中的Mn元素与O元素结合形成弥散高熔点的MnO氧化物颗粒,在焊缝金属冷却过程中诱导针状铁素体形核,以其为基点向各个不同的方向呈辐射状生长,不同取向的铁素体相遇后即停止长大,最终形成细小的针状铁素

显微组织为晶粒细小的粒状贝氏体。图4(e)为部分相变区的显微组织,焊接时该区金属被加热到 A_{c1} ~ A_{c3} ,部分组织发生了重结晶,显微组织由先共析铁素体、粒状贝氏体及M-A组元组成的混合组织,此区域特点是晶粒大小不一,组织不均匀,力学性能不均匀。

2.3 冲击韧性分析

冲击韧性作为材料抵抗冲击载荷的抗力指标,能敏感反映出焊接区微观缺陷和显微组织的变化。图5为焊缝和细晶热影响区的平均冲击吸收功。结果表明,在-20℃的试验条件下,焊缝与细晶热影响区的冲击吸收功相对于焊丝的分别提高了67.14%、98.57%,相对于母材分别降低了53.01%、44.18%;在20℃的试验条件下,焊缝与细晶热影响区的冲击吸收功相对于焊丝的分别提高了13.33%、33.33%,相对于母材分别降低了45.82%、36.25%。图6(a)、(b)

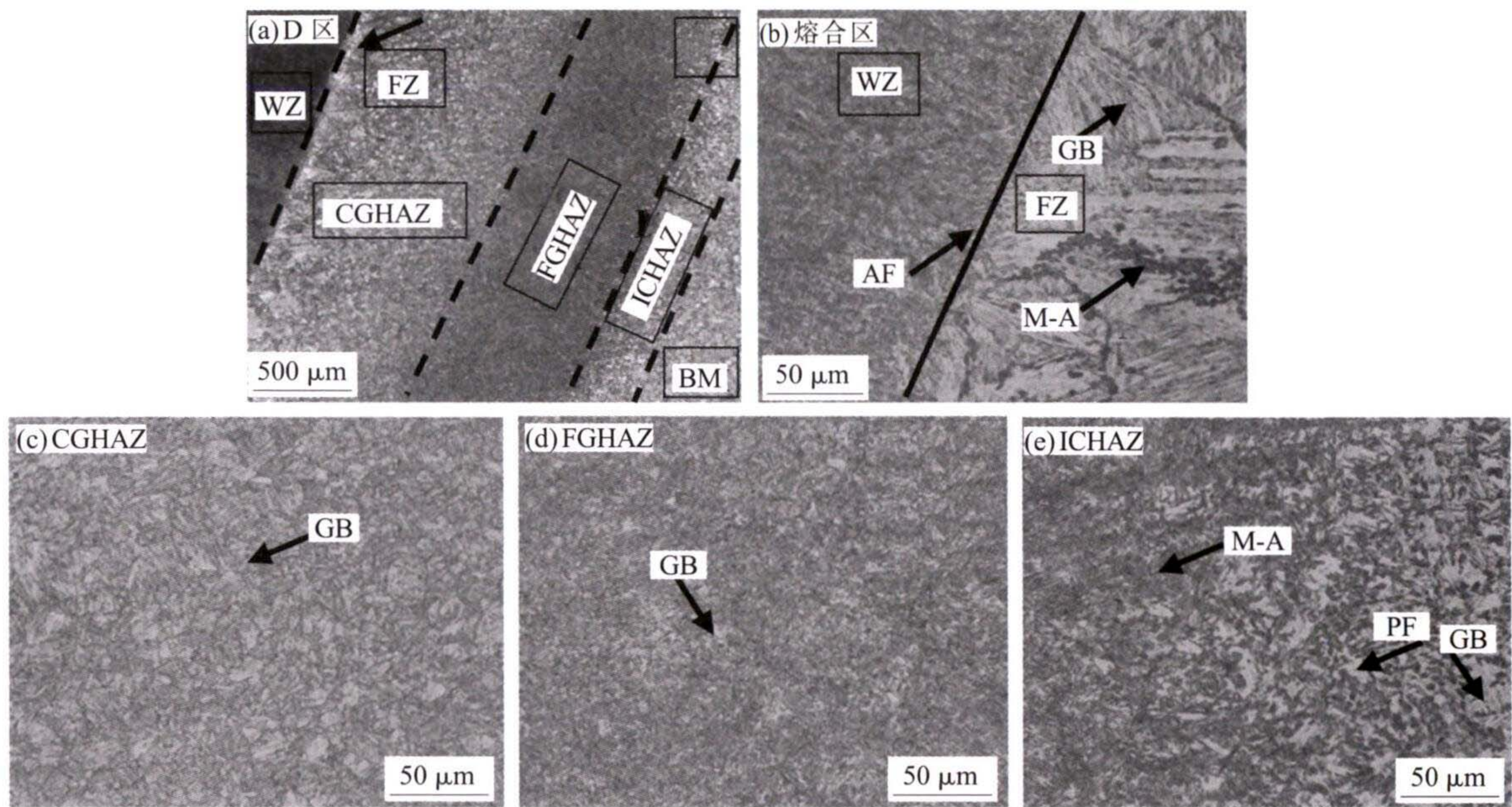


图 4 热影响区的显微组织
Fig.4 Microstructure of the HAZ

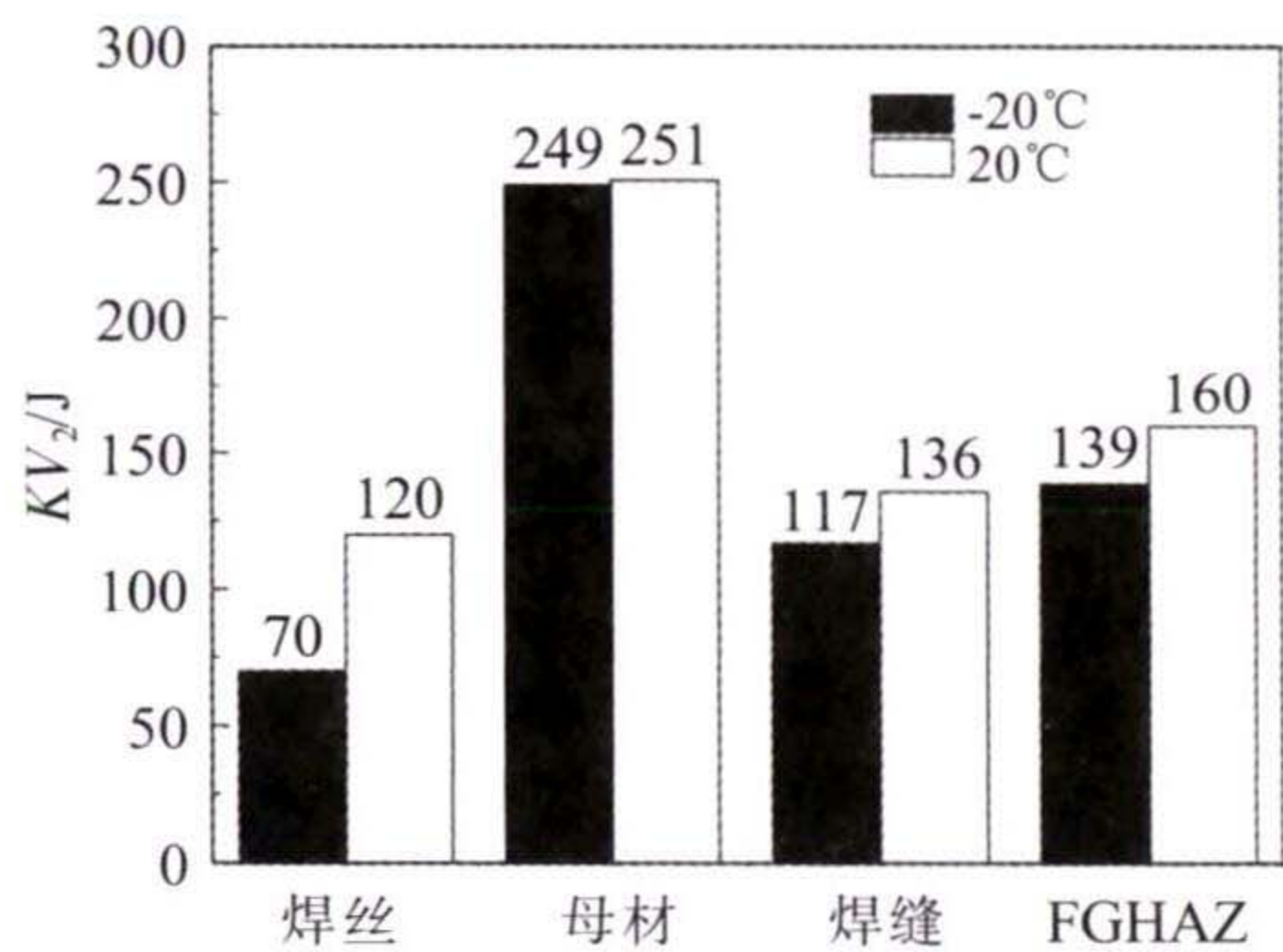


图 5 焊缝和细晶热影响区的平均冲击吸收功
Fig.5 Average impact absorbed energy of the weld metal and FGHAZ

为 Q690D 焊缝的冲击断口形貌,焊缝断口断面较为平整,微观形貌具有典型的韧窝特征,韧窝小且分布均匀,表明组织较为均匀致密,除此之外,可观察到一定的夹杂物粒子和微孔,说明韧窝的产生机理为微孔聚集型断裂,表现出较高的韧性。图 6(c)、(d) 为 Q690D 细晶热影响区的冲击断口形貌,宏观断口形貌较为粗糙,微观断口形貌具有韧窝+准解离的形貌特征,韧窝较大也伴有一定的微孔,断裂机理为韧性断裂。微观断口形貌变化较大主要是因为接头细晶热影响区的冲击韧性受到焊缝形状、热影响区组织和冲击试样缺口位置的影响,想准确测定细晶热影响区的冲击韧性是十分困难的,名义上为细晶热影响区的冲击吸收功,实际上缺口破断区域包括粗晶热影响区和部分相变区。

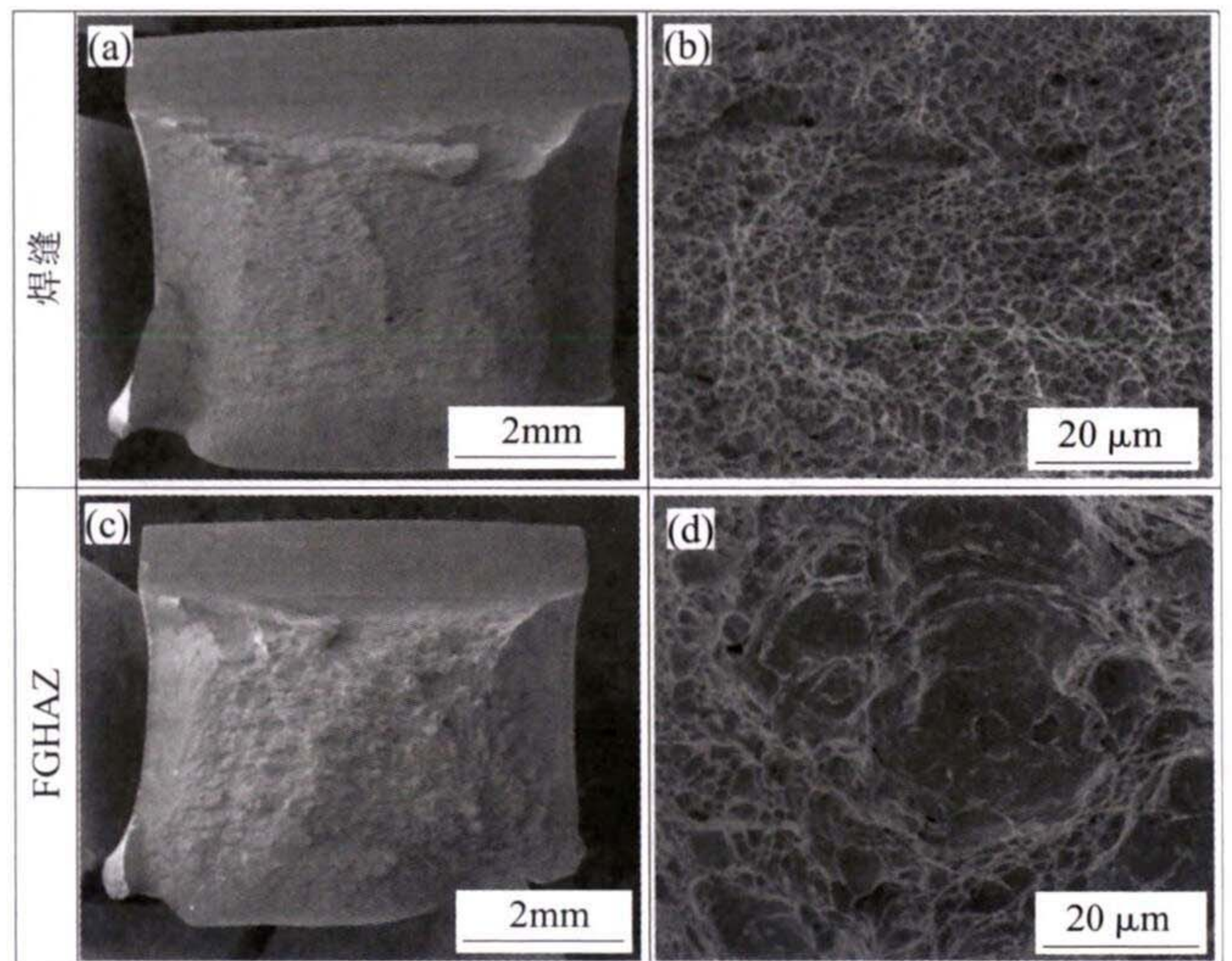


图 6 焊缝和细晶热影响区的冲击断口形貌
Fig.6 Impact fractographs of the weld metal and FGHAZ

3 结论

(1) 对于 20 mm 厚的 Q690D 低合金高强度钢板在无焊前预热与焊后热处理的条件下,采用 GMAW 和实芯焊丝 CHW-80C1 获得了成型优良的焊接接头。

(2) 焊缝显微组织均由粒状贝氏体和少量的针状铁素体、先共析铁素体组成。粗晶热影响区、细晶热影响区的显微组织分别为晶粒粗大、晶粒细小的粒状贝氏体,部分相变区的显微组织由先共析铁素

(下转第 61 页)

参考文献:

- [1] 吴杰,薛松柏,费文潘,等. 铝/钢异种材料钎焊研究现状与发展趋势[J]. 材料导报,2019,33(11):3533-3540.
- [2] 薛松柏,王博,张亮,等. 中国近十年绿色焊接技术研究进展[J]. 材料导报,2019,33(9):2813-2830.
- [3] 秦国梁,武传松. 铝合金/钢异种材料熔钎焊接工艺及其研究现状[J]. 机械工程学报,2016,52(24):24-35.
- [4] 石常亮,何鹏,冯吉才,等. 铝/镀锌钢板 CMT 熔钎焊界面区组织与接头性能[J]. 焊接学报,2006,27(12):61-64.
- [5] Yang J, Hu A M, Li Y L, et al. Heat input intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2019,272:40-46.
- [6] Mohammadpour M, Yazdian N, Yang G, et al. Effect of dual laser beam on dissimilar welding-brazing of aluminum to galvanized steel [J]. Optics and Laser Technology,2018,98:214-228.
- [7] Xue J Y, Li Y X, Chen H, et al. Effects of heat input on wettability, interface microstructure and properties of Al/steel butt joint in laser-metal inert-gas hybrid welding-brazing [J]. Journal of Materials Processing Tech,2018,255:47-54.
- [8] Gao M, Chen C, Mei S, et al. Parameter optimization and mechanism of laser-arc hybrid welding of dissimilar Al alloy and stainless steel [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,74:199-208.
- [9] Chen S H, Li S Q, Li Y, et al. Butt welding-brazing of steel to aluminum by hybrid laser-CMT [J]. Journal of Materials Processing Technology,2019,272:163-169.
- [10] 李杰,石玟,黄健康. Si 对铝/钢 MIG 熔钎焊接头界面组织的影响[J]. 热加工工艺,2016,45(23):235-237.
- [11] 袁军军,李聪,甘瑞根,等. 铝/镀锌钢激光填丝熔钎焊对接接头的组织与力学性能[J]. 热加工工艺,2018,47(11):71-75.
- [12] Chen S H, Huang J H, Ma K, et al. Influence of a Ni-foil interlayer on Fe/Al dissimilar joint by laser penetration welding [J]. Materials Letters,2012,79:296-299.
- [13] Tan C W, Zang C W, Xia H B, et al. Influence of Al additions in Zn-based filler metals on laser welding-brazing of Al/steel [J]. Journal of Manufacturing Processes,2018,34:251-263.
- [14] 崔凌越,米高阳,胡席远,等. 基于 CuSi₃ 焊丝的激光熔钎焊钢/铝异种金属工艺分析[J]. 焊接学报,2018,39(9):6-12.
- [15] 杨旭东,石岩,刘佳. 铜箔中间层对铝/钢异种金属激光对接焊接头质量的影响 [J]. 机械工程学报,2014,50(14):143-149.
- [16] Chen S H, Zhai Z L, Huang J H, et al. Interface microstructure and fracture behavior of single/dual-beam laser welded steel-Al dissimilar joint produced with copper interlayer [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,82:631-643. 

(上接第 56 页)

体、粒状贝氏体及 M-A 组元组成。

(3) 在-20℃与 20℃的试验条件下焊缝与细晶热影响区的冲击吸收功相对于母材的有一定幅度的下降,表明焊丝与母材低强匹配效果欠佳,焊缝冲击断口呈现韧窝状,细晶热影响区的冲击断口呈现韧窝+准解离的形貌,二者均为韧性断裂。

参考文献:

- [1] Musa M H A, Maleque M A, Ali M Y. Heat affected zone morphology of TIG torch welded HSLA steel in presence of Ti and V Microalloying elements [J]. Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials,2020,4:439-444.
- [2] Wang W Y, Zhang Y H, Xu L, et al. Mechanical properties of high-strength Q960 steel at elevated temperature [J]. Fire Safety Journal,2020,114:103010.
- [3] 宋欣,谌铁强. 工程机械用低成本高强度 Q690D 的研制与开发[J]. 焊管,2016,39(5):17-24.
- [4] Zhang C T, Wang R H, Song G B. Effects of pre-fatigue damage on mechanical properties of Q690 high-strength steel [J]. Construction and Building Materials,2020,252:118845.
- [5] 康澜,洪书涛. Q690D 高强钢的疲劳性能试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(8):35-42.
- [6] 韩振仙,段青辰,孙满春,等. Q690D 调质高强钢抗裂性研究及显微组织分析[J]. 煤矿机械,2019,40(6):91-93.
- [7] 陈素文,陆志立,陈星,等. Q690D 高强钢箱型截面柱的滞回性能 [J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(8):1135-1143.
- [8] 陈玉喜,刘亮,张华军,等. 焊接热输入对低合金高强钢焊缝组织和韧性的影响[J]. 上海交通大学学报,2015,49(3):306-309.
- [9] 黄学伟,张潇舸,魏晨呈,等. Q690D 钢材十字形焊接接头高温后断裂破坏试验研究 [J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(5):57-65.
- [10] 陆恒昌,邢淑清,陈重毅,等. 调质态 Q690D 高强钢 GMAW 多道次焊接组织与性能 [J]. 金属热处理,2014,39(10):120-124. 