

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.16

厚壁15CrMoR钢双丝GMAW焊接工艺研究

袁 浩, 刘国辉, 银润邦, 景德杨, 李 勇

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

摘 要: 针对60 mm厚15CrMoR耐热钢厚板焊接效率与质量控制的难题, 提出采用双丝熔化极气体保护焊(GMAW)工艺进行对接焊试验, 系统表征了接头显微组织演变规律及力学性能特征。结果表明: 通过优化双丝GMAW工艺参数, 可实现单面焊双面成形, 焊缝表面无气孔、夹杂等缺陷。显微组织分析显示, 焊缝区以贝氏体为主, 伴随少量针状铁素体; 热影响区组织呈现显著不均匀性, 粗晶区由粗大贝氏体与粒状贝氏体构成, 细晶区则由细小铁素体基体与粒状贝氏体组成, 母材组织为典型铁素体-珠光体混合结构。力学性能测试表明, 焊接接头抗拉强度达502~504 MPa, 断裂位置均位于母材, 断口呈韧性断裂特征; 焊缝区室温冲击吸收功为150~180 J, 热影响区冲击吸收功为223~282 J, 均高于标准要求。显微硬度分布显示, 热影响区细晶区硬度最高(约220 HV), 母材硬度最低(约150 HV), 热影响区硬度高于母材, 与其细化的显微组织特征相关。研究证实, 双丝GMAW工艺通过协同控制热输入与层间温度, 可有效抑制15CrMoR钢焊接粗晶区脆化倾向, 兼顾焊接效率与接头强韧性。

关键词: 15CrMoR; 双丝GMAW; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0115-06

Study on the Dual-Welding Process for Thick-Walled 15CrMoR Steel

YUAN Hao, LIU Guohui, YIN Runbang, JING Deyang, LI Yong

Dongfang Boiler Group Co., Ltd., Zigong 643001, China

Abstract: To address the challenges of welding efficiency and quality control for 60 mm thick 15CrMoR heat-resistant steel plates, a butt welding test was conducted using a twin-wire gas metal arc welding (GMAW) process. The microstructure evolution and mechanical properties of the welded joint were systematically characterized. Results indicate that optimized twin-wire GMAW parameters achieved defect-free single-side welding with double-side formation, exhibiting no pores or inclusions. Microstructural analysis revealed that the weld zone primarily consisted of bainite with minor acicular ferrite. The heat-affected zone (HAZ) exhibited significant microstructural heterogeneity: the coarse-grained zone (CGHAZ) comprised coarse bainite and granular bainite, while the fine-grained zone (FGHAZ) contained a fine ferrite matrix with granular bainite. The base metal displayed a typical ferrite-pearlite structure. Mechanical tests demonstrated that the joint tensile strength reached 502-504 MPa, with fractures occurring in the base metal, showing ductile fracture characteristics. The room-temperature impact absorption energy of the weld and HAZ ranged from 150-180 J and 223-282 J, respectively, both exceeding standard requirements. Microhardness distribution indicated the highest hardness in the FGHAZ (approximately 220 HV) and the lowest in the base metal (approximately 150 HV), while the weld and CGHAZ exhibited intermediate values. This study confirms that the twin-wire GMAW process, by synergistically controlling heat input and interpass temperature, effectively suppresses brittleness in the CGHAZ, balancing welding efficiency with joint strength and toughness.

Keywords: 15CrMoR; double wire GMAW; microstructure; mechanical properties

引用格式: 袁浩, 刘国辉, 银润邦, 等. 厚壁15CrMoR钢双丝GMAW焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 115-120.

Citation: YUAN Hao, LIU Guohui, YIN Runbang, et al. Study on the Dual-Welding Process for Thick-Walled 15CrMoR Steel[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 115-120.

收稿日期: 2024-10-25 修回日期: 2025-03-10

作者简介: 袁 浩(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事锅炉、压力容器焊接工艺等方面的研究工作。E-mail: 251834101@qq.com。

0 引言

15CrMoR 钢是在碳素结构钢中加入一定量Cr、Mo 合金元素后,得到的具有更高的高温强度和持久强度的低合金耐热钢材料。该钢一般以退火状态或正火+回火状态供货,供货状态显微组织为珠光体+铁素体,因此也被称为珠光体耐热钢^[1]。相比普通碳素结构钢,它具有很好的抗氧化性能和高温强度,同时还具有优良的耐蚀性、抗氢能力。15CrMoR 主要用于抗高温氢或硫化氢腐蚀结构,及设计温度在 350 ℃~500 ℃的中温压力容器^[2-3]。在常规火电站、核电装置、石油精炼设备、加氢裂化装置等高温加工设备中应用较为普遍。

低合金耐热钢通常有一定的淬硬倾向,根据计算,15CrMoR 钢碳当量一般达到 0.58%,具有较大的淬硬性,同时由于 Cr、Mo 等合金元素属于强碳化物形成元素,在过热区易形成对焊接裂纹敏感的显微组织^[4-5]。基于这些特点,在进行低合金耐热钢焊接时需要采取适当的工艺措施,匹配合适的焊接材料,才能避免焊接裂纹出现^[6-8]。目前,焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊、电渣焊、钨极氩弧焊等^[9]是低合金耐热钢常用的焊接方法,这些方法难以兼顾焊接效率与焊接质量,成为低合金耐热钢生产中遇到的难题。

本文针对 60 mm 厚 15CrMoR 耐热钢进行双丝气保焊工艺试验,观察了焊接接头不同区域显微组织,测试了焊接接头的力学性能,在提高焊接效率的同时保证接头力学性能满足相关规范要求。对于优化 15CrMoR 耐热钢焊接工艺,提升压力容器焊接制造效率与质量稳定性,具有重要的现实意义。

1 试验材料与方法

试验采用的母材为 300 mm×200 mm×60 mm 规格 15CrMoR 耐热钢试板,试板的化学成分及力学性能如表 1、表 2 所示。试板组对示意如图 1 所示。焊接材料的选择以“等强度”为原则,采用 $\varnothing 1.2$ mm 的 ER55-B2 实心气体保护焊焊丝,主要化学成分及熔敷金属力学性能如表 3、表 4 所示。

表 1 15CrMoR 化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 15CrMoR (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb
0.08~0.18	0.15~0.40	0.40~0.70	≤0.025	≤0.010	0.80~1.20	—
V	Ti	Mo	Ni	Cu	B	N
—	—	0.80~1.20	≤0.30	≤0.30	—	—

表 2 15CrMoR 力学性能

Table 2 Mechanical properties of 15CrMoR

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	冲击吸收功 (20 ℃)/KV ₂ /J
450~590	≥295	≥19	≥47

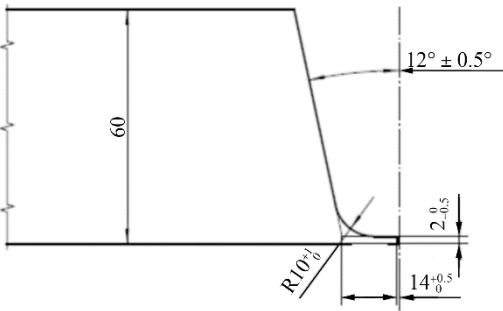


图 1 60mm 厚 15CrMoR 坡口

Fig. 1 Schematic of the 60mm 15CrMoR joint groove

表 3 ER55-B2 焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of ER55-B2 (wt. %)

C	Mn	Si	S	P
≤0.15	0.60~1.50	0.30~0.90	≤0.010	≤0.020
Cr	Ni	Mo	Cu	
1.00~1.60	≤0.20	0.40~0.65	≤0.35	

表 4 ER55-B2 焊丝力学性能

Table 4 Mechanical properties of ER55-B2

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	冲击吸收功(0 ℃) /KV ₂ /J
≥550	≥470	≥19	≥54

试验采用的是一台 Fronius CMT TWIN 双丝焊系统,如图 2 所示,主要由 Fronius CMT 焊接电源、KUKA 机器人、控制柜等部件组成。焊接电源型号为 TPS5000-CMT。该套系统可实现单丝、双丝气保焊接,并可选择 CMT、CMT+P、MIG/MAG、脉冲等不同的焊接模式。

进行焊接前,使用砂纸对坡口侧壁及正、背面两侧 50 mm 范围内进行打磨,去除铁锈、氧化物等,使用无水乙醇清洗坡口侧壁及正、背面两侧 50 mm 范围内,彻底去除铁锈、碎屑、油污、水分及其他对



图2 高效双丝焊接系统

Fig. 2 Schematic of the twin wire welding system

焊接过程有害的物质。试板预热温度为 200 °C。

打底焊道采用单丝气体保护焊, 填充焊道和盖面焊道采用双丝气体保护焊, 双丝的间距 10 mm, 前后丝始终处于同一熔池中。焊接过程中始终采用在正面进行焊接, 以实现单面焊双面成形。焊接保护气体采用 98 %Ar+2%O₂ 混合气, 保护气体流量设置为 20 L/min(双丝焊时前后丝相同), 送丝速度为 6.5~7.5 m/min(双丝焊时前后丝相同), 焊接电流为 220~230 A(双丝焊时前后丝相同), 焊接电压为 24~25 V(双丝焊时前后丝相同), 焊接速度为单丝 400 mm/min、双丝 800 mm/min, 道间温度控制在 200 °C~250 °C。正面施焊完毕后, 对打底焊道进行渗透检验, 采用角向磨光机进行打磨清根以去除打底焊道缺陷, 然后对去除部位进行补焊。焊接完成后进行 640 °C~675 °C 保温 4~4.5 h 焊后热处理^[10-11]。

焊接完成后对试板进行无损检测, 并对接头的金相试样进行显微组织特征分析, 按照 NB/T 47014—2011 进行接头的力学性能测试。

2 试验结果与讨论

2.1 焊接接头的宏观形貌

焊接接头截面如图 3 所示。可以看到, 经历多层多道焊接的接头成形良好, 焊缝中没有气孔、夹杂等宏观缺陷, 根部可见清根补焊后的焊缝。焊缝盖面宽度约 65 mm, 背面根焊道宽度约 30 mm。焊缝顶部余高 2 mm 左右。

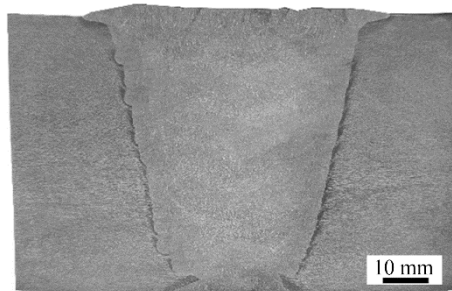


图3 焊接接头截面宏观形貌

Fig. 3 Cross section of the joint

2.2 焊接接头的微观组织

图 4 为接头各区域微观组织, 从前至后分别为焊缝、熔合区、粗晶区、细晶区和母材。图 4a 为焊缝微观组织, 可以看到, 焊缝组织主要由小岛状的贝氏体组成, 同时存在针状铁素体。在低合金耐热钢焊缝凝固过程中, 焊缝金属经过了铁素体析出和贝氏体转变两个过程。首先当焊缝金属温度降低到 Ac₃ 以下时, 熔池中的过冷奥氏体开始发生铁素体转变, 而当温度进一步下降到贝氏体转变温度范围内(550 °C~400 °C)时, 焊缝金属开始发生贝氏体转变。由于 ER55-B2 焊材具有约 0.6% 的 Si 元素和 1.3% 左右的 Cr 元素, 促进了粒状贝氏体的形成。同时由于焊后热处理的作用, 进一步提升了小岛状的贝氏体所占比例, 使得最终得到的接头焊缝中具有较强的回火贝氏体组织, 从而使得焊缝具备较高的强度和良好的韧性。

图 4b 为熔合区微观组织, 右侧为焊缝区, 左侧为热影响区粗晶区, 组织普遍较为粗大。图 4c 为粗晶区微观组织, 该区域主要为贝氏体, 在粗大的贝氏体间夹有白色的岛状组织以及少量的粒状贝氏体。图 4d 为细晶区微观组织, 该区域主要由细小的白色块状铁素体与细小的粒状贝氏体组成^[12-13]。粗晶区与细晶区组织的差异主要是由于其受热过程的差别, 粗晶区经历更高的回火温度与更快的冷却速度, 其晶粒的尺寸更大。细晶区贝氏体的形成温度更低, 贝氏体中的铁素体晶粒整体尺寸就更小, 贝氏体的强度和硬度也就越高。图 4e 为 15CrMoR 母材微观组织, 其组织特征为铁素体、珠光体以及少量的粒状贝氏体^[14]。

2.3 焊接接头的力学性能

接头截面的显微硬度分布如图 5 所示。结合硬

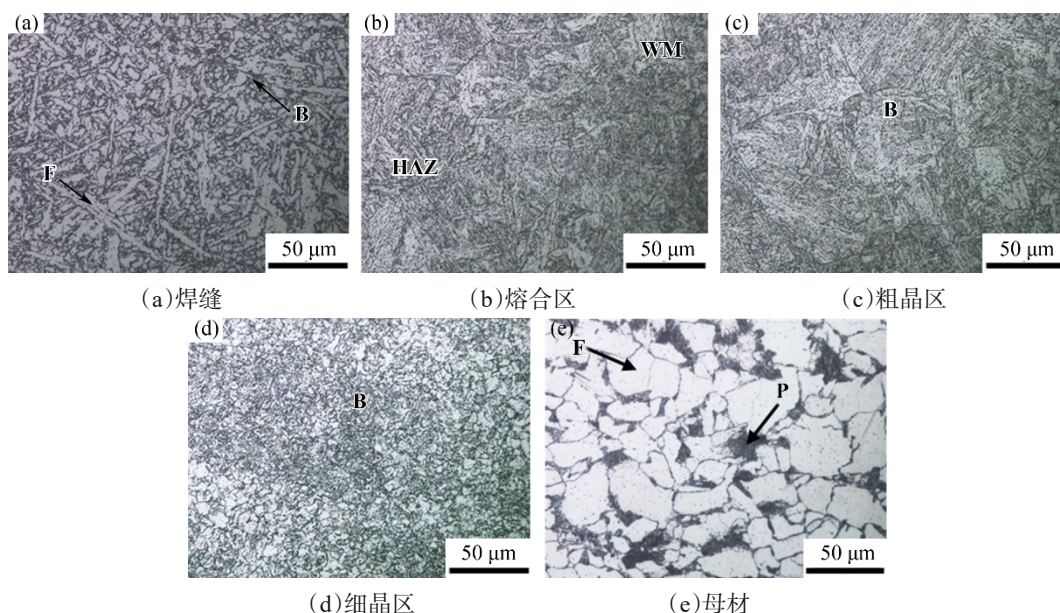


图4 各区域微观组织

Fig. 4 Microstructure of different areas

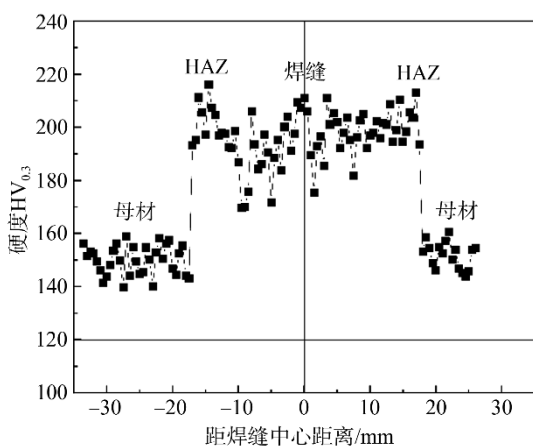


图5 接头截面显微硬度分布

Fig. 6 Hardness distribution of the joint cross section

度分布与接头显微组织来看,接头焊缝区与热影响区硬度水平接近,与母材平均水平相比高出许多,这是因为焊缝组织与热影响区的组织以贝氏体为主,母材的组织以铁素体为主。在焊缝区,较多的小岛状贝氏体组织出现也使得焊缝具备较高的强度与良好韧性。热影响区贝氏体尺寸进一步减小,特别细晶区出现了较多的粒状贝氏体,硬度进一步升高,在接头截面中属于强度与硬度最高的区域,同时贝氏体尺寸的降低也提升了材料的韧性。母材区域为片状铁素体及珠光体与少量粒状贝氏体,该区域的强度及硬度较焊缝及热影响区有明显降低,将在接头的拉伸结果中有所体现。

接头的力学性能测试结果如表5~表7所示。从检测结果可以观察到,拉伸强度高于母材,断裂的位置位于母材;弯曲试验中的4个试样中有3个试样在焊缝处开裂但均在标准规定的开裂3mm范围内,说明焊接接头的塑性指标达到标准要求;从焊接接头的冲击韧性来看,焊缝区的冲击韧性最大值为180 J,最小值为150 J;而热影响区的冲击韧性最大值为282 J,最小值为223 J,其韧性指标达到要求。力学性能的测试结果这与此前的显微组织特征及硬度分布曲线反映出的接头特点相对应。即焊缝与热影响区的贝氏体组织所占比例的增加使得该区域的材料强度和硬度明显高于以块状铁素体为主的母材。焊缝区的塑性和韧性随着贝氏体尺寸的增大亦有所降低,从接头的组织上来看,热影响区反而拥有更为均衡的性能,这从冲击试验的结果上也能体现出来。

图5为扫描电镜下观察到的接头拉伸试样断口微观形貌,在断口内有大量韧窝存在,结合接头拉伸结果分析,15CrMoR双丝焊接接头拉伸试验属于典型的韧性断裂。拉伸试样断裂位置位于靠近热影响区的母材区域,该区域的组织由细小的铁素体与贝氏体组织向块状铁素体过渡,组织不均匀性比较显著,强度和硬度低于焊缝及热影响区,同时由于受到焊接热循环的影响,焊接应力水平较高,属

表 5 接头拉伸试验结果

Table 5 Tensile test results of welded joint

试样编号	宽度/mm	厚度/mm	面积/mm ²	总载荷/N	抗拉强度/MPa	断裂位置和特征
1	25.2	14.3	360.36	181 579	504	母材, 韧性断裂
2	25.5	22.8	581.40	292 602	503	母材, 韧性断裂
3	25.1	13.5	338.85	170 073	502	母材, 韧性断裂
4	25.0	22.7	567.50	285 976	504	母材, 韧性断裂

表 6 接头弯曲试验结果

Table 6 Bending test results of welded joint

试样编号	试验类型	厚度/mm	弯芯直径/mm	弯曲角度/(°)	结果
1	侧弯	10	40	180	开裂 1.64 mm
2	侧弯	10	40	180	开裂 0.30 mm
3	侧弯	10	40	180	开裂 1.80 mm
4	侧弯	10	40	180	无开口缺陷

表 7 接头冲击试验结果

Table 7 Impact test results of welded joint

试样编号	试验温度/°C	缺口位置	冲击吸收功(KV2)/J
1-3	室温	热影响区	223, 237, 282
4-6	室温	焊缝	180, 164, 150

于焊接接头的薄弱区域,此试样的断裂发生在该区域。但该区域的组织拥有较好的韧性,因此在接头的断裂形式及断口形貌上,表现为典型的韧性断裂。

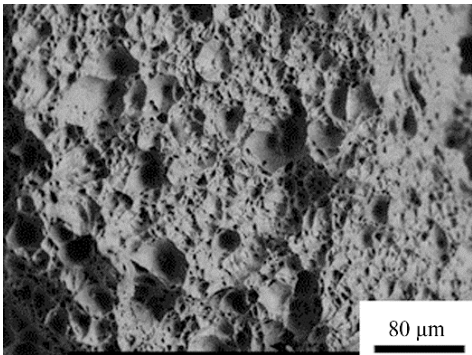


图 6 接头拉伸断口微观形貌

Fig. 6 SEM image of the joint tensile fracture

3 结论

(1)采用双丝气保焊工艺焊接 15CrMoR,通过采用科学合理的工艺措施,可以获得成形良好的焊接接头,焊缝无气孔、裂纹、夹杂等缺陷。

(2)15CrMoR 双丝气保焊焊缝的组织主要呈贝氏体加针状铁素体特征,热影响区则表现出明显的组织不均匀性。粗晶区主要由贝氏体和少量粒状

贝氏体构成,而细晶区则包含细小的铁素体基体和粒状贝氏体。

(3)15CrMoR 双丝气保焊接头力学性能良好,接头抗拉强度最低为 502 MPa,拉伸试样断口位于母材,为典型的韧性断裂;焊缝金属室温冲击吸收功≥150 J,热影响区室温冲击吸收功≥223 J,接头具有良好的冲击韧性。

参考文献:

[1] GB 713-2014, 锅炉和压力容器用钢板[S].2014.

[2] 齐淑改. 15CrMoR 反应器的焊接[J]. 焊接技术, 2004 (06): 64-65.

QI S G. Welding of reactor made of 15CrMoR [J]. Welding Technology, 2004(06): 64-65.

[3] 张一任, 房务农, 韩金节, 等. 焊后热处理对 15CrMoR 钢板性能的影响[J]. 压力容器, 2001(04): 27-29.

ZHANG Y R, FANG W N, HAN J J, et al. The effect of Postweld Heat Treatment on the Properties of 15CrMoR Steel Plate[J]. Pressure Vessel Technology, 2001 (04): 27-29.

[4] 李向明. 15CrMo 低合金钢焊接技术总结[J]. 机械管理开发, 2012(05): 89-90+92.

LI X M. Technical Summary of 15CrMo Low Alloy Steel Welding[J]. Mechanical Management and Development, 2012(05): 89-90+92.

[5] 边美华. 15CrMoR 钢厚壁压力容器焊接工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

BIAN M H. Research on Welding Process of Thick-walled Pressure Vessels for 15CrMoR Steel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

[6] 王晋生, 吴喜民. 15CrMoR 耐热钢焊接性能研究[J]. 大型铸锻件, 2006(01): 14-16.

WANG J S, WU X M. The Welding Performance Research for 15CrMoR Heat Resistant Steel [J]. Heavy Casting and Forging, 2006(01): 14-16.

[7] 张洪斌, 胡博坤, 刘继红, 等. 15CrMoR 压力容器用钢板焊接工艺研制分析[J]. 设备管理与维修, 2019 (09): 39-40.

- ZHANG H B, HU B K, LIU J H, et al. Research and Analysis of Welding Process for 15CrMoR Pressure Vessel Steel Plate[J]. Plant Maintenance Engineering, 2019(09):39-40.
- [8] 梁杰,王金生,舒欣欣,等. 15CrMoR 钢的焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2021, 50(03):59-60.
- LIANG J, WANG J S, SHU X X, et al. Study on welding technology of 15CrMoR steel[J]. Welding Technology, 2021, 50(03):59-60.
- [9] 郭晓春,周国大,邱海萍,等. 低合金耐热钢 15CrMoR 的焊接工艺[J]. 化工装备技术, 2000(01):48-51.
- GUO X C, ZHOU G D, QIU H P, et al. Welding Process of Low Alloy Heat-resistant Steel 15CrMoR [J]. Chemical Equipment Technology, 2000(01):48-51.
- [10] 郭城湘,王朗,白林,等. 焊后热处理温度对 15CrMoR 钢对接接头性能的影响[J]. 压力容器, 2023, 40(04):15-20.
- GUO C X, WANG L, BAI L, et al. Effects of post-weld heat treatment temperature on the properties of 15CrMoR butt welded joint[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(04):15-20.
- [11] 唐立娜. 15CrMoR 钢板的焊接工艺研究[J]. 中国化工装备, 2016, 18(04):39-41+20.
- TANG L N. The Welding Technology Research for 15CrMoR Steel [J]. China Chemical Industry Equipment, 2016, 18(04):39-41.
- [12] 杨雄,李鹏. 中温压力容器用钢 15CrMoR 焊接接头组织与性能研究[J]. 宽厚板, 2023, 29(01):6-9.
- YANG X, LI P. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of 15CrMoR Steel for Medium Temperature Pressure Vessel [J]. Wide and Heavy Plate, 2023, 29(01):6-9.
- [13] 胡效东,戚振,吕建涛,等. 15CrMoR 钢多层焊缝的组织力学性能[J]. 金属热处理, 2014, 39(10):131-136.
- HU X D, QI Z, LV J T, et al. Microstructure and mechanical properties of 15CrMoR multi-layer welding seam [J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(10):131-136.
- [14] 陈文静,屈金山,谢君,等. 15CrMoR 钢材的焊接接头组织及其硬度分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2006(04):35-37+107-108.
- CHEN W J, QU J S, XIE J, et al. Discussion of the Microstructure and Hardness of Welded Joints for Steel 15GrMoR[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2006(04):35-37+107-108.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>