

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.01.17

焊后热处理对 X65 管线钢焊接接头显微组织及拉伸性能的影响

许平非¹, 车洪艳², 翟亚中²

1. 中石化石油工程建设有限公司沙特公司, 北京 100000

2. 钢铁研究总院有限公司 特殊钢研究院, 北京 100081

摘要: 为研究焊后热处理对 X65 管线钢焊接接头显微组织及拉伸性能的影响。采用焊条电弧焊对 X65 管线钢进行多层多道焊接, 并对焊接接头进行 550 °C 保温 2 h 的焊后热处理。结果表明, 热处理有效改善了焊缝区的显微组织, 将粗大的柱状晶转变为细小的块状组织, 并促进了碳化物的析出。力学性能测试显示, 热处理后的焊缝抗拉强度提高至 590 MPa, 断后延伸率达到 31.2%, 显著优于未处理焊缝。分析认为, 晶粒细化、碳化物析出以及晶界钉扎效应共同作用, 提升了焊接接头的室温拉伸强度和韧性。研究结果为优化 X65 管线钢焊接接头性能提供了理论依据, 对提高管道系统的安全性和可靠性具有重要意义。

关键词: X65 管线钢; 焊缝; 焊后热处理; 显微组织; 拉伸性能

中图分类号: TG457.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)01-0122-06

Influence of Post-welding Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of X65 Pipeline Steel Welding Joints

XU Pingfei¹, CHE Hongyan², ZHAI Yazhong²

1. Sinopec Petroleum Engineering Construction Co., Ltd., Saudi Company, Beijing 100000, China

2. Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Special Steel Research Institute, Beijing 100081, China

Abstract: In order to study the effect of post-welding heat treatment on the microstructure and tensile properties of X65 pipeline steel welding joints, multi-layer and multi-pass welding of X65 pipeline steel was carried out using electrode arc welding, and the welding joints were subjected to post-welding heat treatment at 550 °C for 2 hours. The results show that the heat treatment effectively improved the microstructure of the weld zone, transforming the coarse columnar crystals into fine blocky structures, and promoting the precipitation of carbides. Mechanical property tests show that the tensile strength of the heat-treated weld increased to 590 MPa, and the elongation after fracture reached 31.2%, significantly better than the untreated weld. The analysis suggests that the combined effects of grain refinement, carbide precipitation, and grain boundary pinning contribute to the improvement of the room temperature tensile strength and toughness of the welding joints.

Keywords: X65 pipeline steel; welding seam; postweld heat treatment; microstructure; tensile properties

引用格式: 许平非, 车洪艳, 翟亚中. 焊后热处理对 X65 管线钢焊接接头显微组织及拉伸性能的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(1): 122-127.

Citation: XU Pingfei, CHE Hongyan, ZHAI Yazhong. Influence of Post-welding Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of X65 Pipeline Steel Welding Joints[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(1): 122-127.

0 引言

随着国家石油行业的蓬勃发展, 陆地、海底管

道以及各类采油平台的数量不断增多。管道运输是长距离油气输送最安全可靠的方式, 是能源运输工业中的重要组成部分^[1-2]。油气管道在复杂的工

收稿日期: 2024-03-02 修回日期: 2024-05-09

作者简介: 许平非(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气长输管线焊接质量控制等科研工作。E-mail: 2061833313@qq.com。

况环境中面临着诸多挑战,如温度变化、压力波动、腐蚀介质等,这些因素对管道材料的强度、抗断裂性和耐腐蚀性提出了更高的要求^[3-5]。焊接作为管道建设过程中不可或缺的连接形式,其接头质量直接关系到油气管道安全性和服役寿命^[6-7]。然而,焊接接头也是管道系统中易出现缺陷的薄弱环节,例如气孔、裂纹等,这些缺陷会严重影响焊接结构的完整性和管道的长期运行^[8-9]。

近年来,以埋弧焊^[10]、搅拌摩擦焊^[11]和高能束焊^[12]为代表的先进焊接方法在厚壁管道连接方面表现出焊接接头强度高和热影响区小等明显优势。然而受实际户外作业环境的限制,这些先进焊接技术的应用受到制约。焊条电弧焊因其操作灵活性、设备便携性等特点被认为是油气管道连接的首选方法之一^[13]。

焊条电弧焊在作业过程中,较高的热输入极易导致焊接热影响区晶粒粗化;单道次焊接过程中,母材及热影响区会在短时间经历从室温到高温,再到室温的一次热循环,容易在材料内部产生较高的残余应力^[14]。王子渊等对钢铝的研究发现:焊接过程会不可避免的导致材料中产生焊后残余应力,并且焊后残余应力随着焊接热输入的增加而不断增大。对焊接接头进行热处理可有效降低焊后残余应力^[15]。张勇路等研究发现,GH3230合金焊接板材经过1140~1180℃保温10 min的热处理,不仅使得焊后残余应力得到充分释放,同时提高了组织稳定性^[16]。何逸凡等研究发现,对TC4合金MIG焊接接头进行焊后热处理,横向残余应力和纵向残余应力平均值最大下降为74.2 MPa和70.1 MPa^[17]。

焊后热处理有助于降低和消除焊接过程中产生的应力^[18]。对于需要长期服役的X65管线钢而言,焊接残余应力的存在会影响其长期的服役性能。然而,目前的文献对于该部分的研究报道相对较少。因此本研究采用焊条电弧焊对X65管线钢进行多层多道焊,并对焊接接头进行焊后热处理,对比分析热处理对焊接接头组织及性能的影响。

1 试验材料及方法

试验材料为X65管线钢,管径914 mm,壁厚

28.6 mm。焊接坡口形式如图1所示。焊接设备为SERIMAX SATURNAX 05焊机,采用50%Ar+50%CO₂为保护气体,纯度大于99.99%。焊接材料采用直径为1.0 mm的伯乐ER70S-6焊丝。X65管线钢与焊材的化学成分如表1所示。焊接工艺参数如表2所示。焊后对接头进行热处理,热处理工艺为550℃保温2 h,空冷至室温。

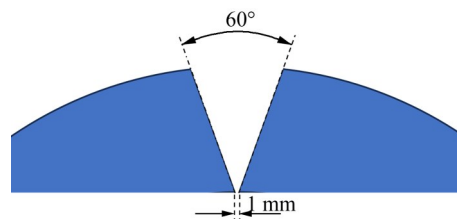


图1 坡口示意

Fig. 1 Schematic diagram of groove

表1 X65管线钢与ER70S-6焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of X65 pipeline steel and ER70S-6 welding wire(wt. %)

材料	C	Mn	Si	Cr	S	P	Fe
X65	0.04	1.32	0.3	0.28	0.000 5	0.005	Bal.
ER70S-6	0.09	1.45	0.88	0.02	0.008	0.004	Bal.

表2 焊接参数

Table 2 Welding parameters

预热温度	层间温度	焊接电流	焊接电压	焊接速度
/°C	/°C	/A	/V	/(cm·min ⁻¹)
79	215	220~260	21~28	55.4~88.8

焊接完成后,为评估焊接接头质量,对焊缝进行了无损检测。采用电火花线切割设备分别从焊缝及母材处切取尺寸为15 mm×15 mm×15 mm的试样;使用400~1000目的砂纸对样品进行打磨和机械抛光处理,待样品表面无划痕后,使用4%硝酸酒精溶液对样品进行腐蚀,腐蚀时间15 s。使用Quanta 650扫描电子显微镜对母材和焊缝的显微组织进行分析。按照GB/T 228.1标准取样进行室温拉伸性能测试,取两个平行试样。拉伸测试后,再次使用SEM对拉伸断口进行观测分析。

2 试验结果与分析

2.1 宏观形貌

焊接接头宏观形貌如图2所示,焊缝成形连续

均匀一致,无咬边、未熔合、未焊透等焊接缺陷。各焊缝间的界限明显,焊缝中的柱状晶均朝着焊缝中心斜向上生长,热影响区较小,约为1~2 mm,且从下到上热影响区宽度逐渐增大。后一道焊缝的焊接过程中,后一道焊接工序对上一道焊缝有热处理的作用;而上部分坡口宽度大,需要多道焊才能完成,因而有着多次热循环,故同层的热影响区会吸收更多的热量,因而热影响区宽度相对较大。

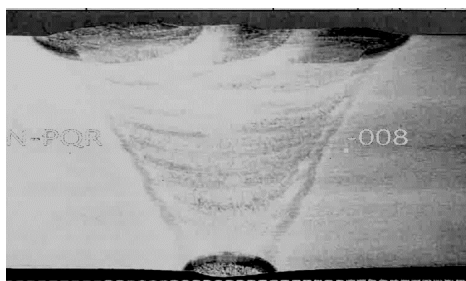


图2 焊接接头宏观形貌

Fig. 2 Macro picture of welded joint

采纳API 1104(2021版)对焊缝进行无损检测,通过射线和超声检测双重检测后,未发现裂纹、气孔、内咬边等缺陷,属合格焊缝。

2.2 显微组织分析

图3为不同倍数下的母材的扫描电镜图片,晶

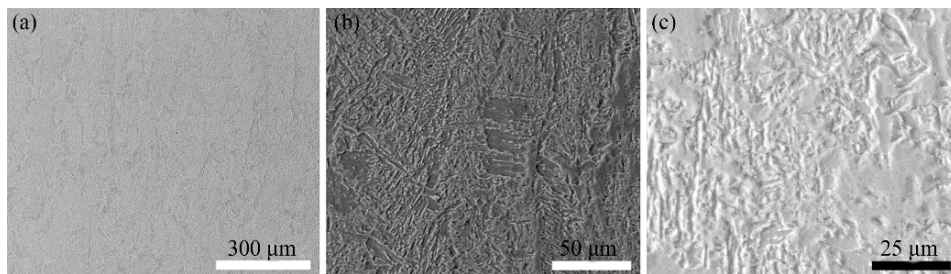


图4 不同倍数下的焊缝的显微组织

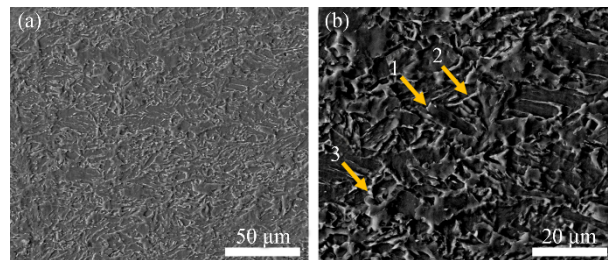
Fig. 4 Microstructure of weld at different magnifications

图5为不同倍数下的热处理后焊缝的扫描电镜图片。由图5a、5b可知,经过热处理之后,原先焊缝区域粗大的柱状晶被消除,晶粒整体细化,晶粒多为细小的块状组织,尺寸多数集中在30~50 μm之间。通过对晶界及晶粒内部的观察分析可知,焊缝经过热处理之后,晶界及晶粒内部析出有白色的粒子。通过对这些颗粒的SEM-EDS分析可知,这些白色颗粒均为碳化物。

2.3 力学性能分析

图6对比了焊缝与母材的室温拉伸性能。其

粒形貌多为不规则的块状或条状,晶粒尺寸大多集中在20~30 μm之间。观察分析图3b可知,晶粒边界存在有较多的白色的粒子。这些粒子大多为呈颗粒状,部分颗粒呈条状分布在晶界处,并且由SEM-EDS分析结果可知,这些白色颗粒为碳化物。



Point	C	Si	Cr	Mn	Fe
1	5.85	0.42	0.34	1.46	Bal
2	9.09	0.44	0.25	1.50	Bal
3	1.90	0.25	0.26	1.47	Bal

图3 不同倍数下的母材的显微组织及点扫结果

Fig. 3 Microstructure of base metal at different magnifications and EDS results

图4为不同倍数下的焊缝的扫描电镜图片。由图4a、4b可知,焊缝区域多为柱状晶,晶粒尺寸粗大,晶粒长达300 μm以上。在较高的倍数下对显微组织观察可知,晶界处及晶粒内部未观察到有白色的碳化物颗粒。

中,母材的平均抗拉强度为650 MPa;平均断后延伸率为22%;焊缝平均抗拉强度为570 MPa;平均断后延伸率为20.6%;热处理后的焊缝,其室温抗拉强度为590 MPa,平均断后延伸率为31.2%。

图7对比了母材与热处理前后焊缝的室温拉伸断口。通过对母材与焊缝的拉伸断口分析可知,所有断口均呈现出韧性断裂特征。断口表面均观察到有韧窝的存在。不同之处在于,母材断口的表面的韧窝整体相对深而均匀;焊缝断口宏观形貌上呈现椭圆状,并且韧窝的深浅不一,这可能与材料

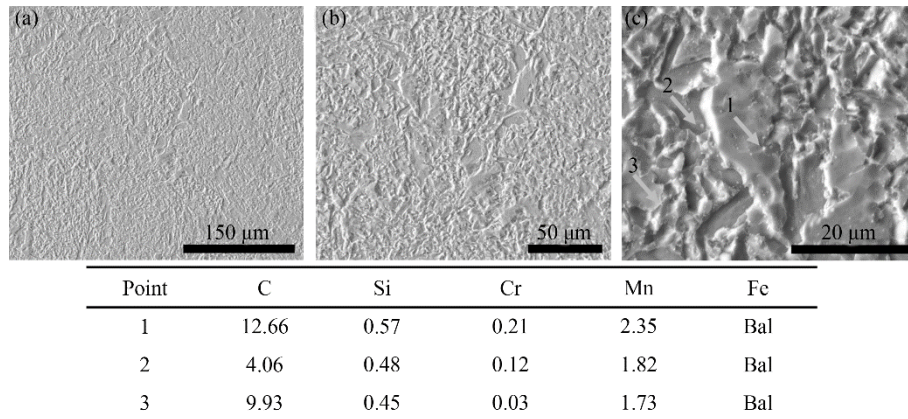


图 5 不同倍数下热处理后的焊缝的显微组织及点扫结果

Fig. 5 Microstructure of weld after heat treatment at different magnifications and EDS results

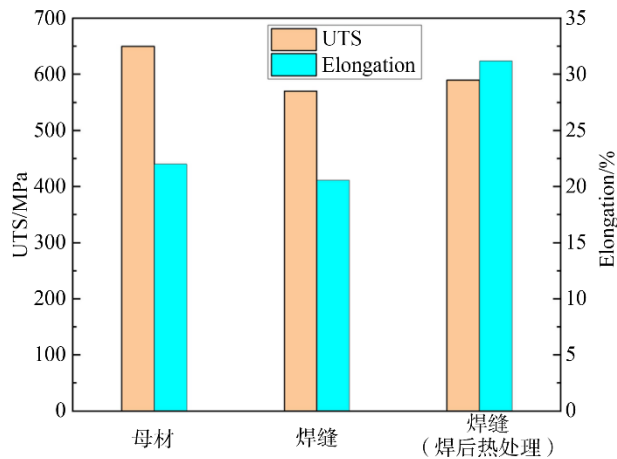


图 6 母材与不同状态下焊缝的室温拉伸性能对比

Fig. 6 Comparison of tensile properties of base metal and welds in different states at RT

内部组织形貌的不均匀有关。

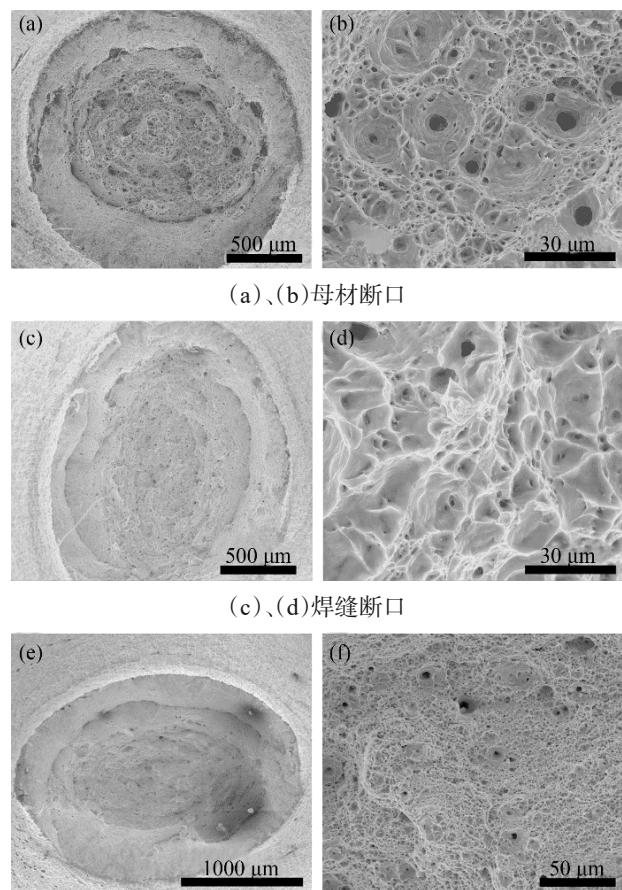
2.4 讨论分析

(1) 焊缝分析。

通过对比焊丝与母材的成分可知,焊丝的选择原则为等强度匹配。两者在部分元素的含量上存在一定的差别,主要在于焊丝有着相对较高的 Si 含量与 C 含量, Si 含量的适当提高有助于改善焊接过程中熔池的流动性,有助于减少并降低焊缝中气孔等缺陷的产生^[19],焊接过程中会存在有 C 元素的烧损,降低接头的性能,而焊丝中提高 C 元素的含量有助于弥补过程中的 C 元素烧损。

(2) 焊后热处理对显微组织的影响。

因焊条电弧焊存在高热输入、高冷速等特点,焊接过程中,焊材及周围的母材均发生熔化,故而使得焊缝区的显微组织相对较大;且本实验采用多



(e)、(f)热处理后焊缝的拉伸断口

图 7 室温拉伸断口形貌的 SEM 图片

Fig. 7 SEM pictures of tensile fracture morphology at RT

层多道焊,后一道焊缝的焊接过程因会产生大量的热,可以消除上一道焊缝中存在的一部分残余热应力;但是后一道焊缝焊接过程中的较高的热输入对上一道焊缝起到了热处理的作用,进一步加剧了晶粒尺寸的粗化^[20]。因而焊缝区域的显微组织多为

大尺寸的柱状晶。并且由于焊接完成后,焊接接头迅速冷却至室温,碳化物等形成元素来不及析出而固溶于基体中,因而焊缝区未观察到有明显的碳化物析出。

而热处理之后,一方面优化了焊缝区的显微组织,组织形貌由原来粗大的柱状晶变为细小的不规则块状组织,但整体尺寸上仍然大于母材区域的晶粒尺寸;另一方面,在热处理过程中,过饱和固溶于基体中的C等碳化物形成元素从基体中析出并相互反应形成碳化物粒子,分布于晶粒内部与晶界处。

(3)显微组织变化的对性能的影响。

热处理之后,焊缝区域的晶粒尺寸得到细化,并且促进了碳化物粒子在晶界处与晶粒内部的析出。显微组织的改变直接导致了材料在性能上的差异。材料性能主要受如下因素影响:固溶元素,晶粒尺寸,第二相粒子等^[21]。晶粒的细化直接促进了材料拉伸强度的提高,同时晶界处析出的碳化物颗粒可以起到很好的钉扎晶界,阻碍位错的运动的作用;但是由于本试验中碳化物析出数量的有限性,故而对性能的提高作用不是很明显。而晶粒内部析出的碳化物粒子对韧性的改善也有很大的促进作用。拉伸变形过程中,晶粒内部的碳化物粒子可以将产生的位错钉在晶界内,避免了位错运动至晶界处,使得材料在断裂前可以承担更多的变形,极大地改善了材料的韧性^[22]。

3 结论

试验通过对母材以及热处理前后的X65管线钢焊接接头进行组织与性能分析,得出如下结论:

(1)焊缝成形良好,无焊接缺陷。

(2)焊缝组织为粗大的柱状晶,其整体平均尺寸远远高于母材,室温抗拉强度低于母材。

(3)焊后热处理优化了焊缝区的显微组织,焊缝区晶粒得到细化,同时促进了碳化物在晶界与晶粒内部的析出,改善了焊缝区的拉伸性能。

参考文献:

[1] 潘继平. 基于管道运输的中国二氧化碳驱油提高采收率发展现状与前景展望[J]. 国际石油经济, 2023, 31

(03):1-9.

PAN J P. Status quo of China's CCUS-EOR with CO₂ pipeline transportation and its prospects [J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(03):1-9.

[2] 王赵平, 杜鑫. 长输管道焊接施工中裂纹的控制方法探究[J]. 大众标准化, 2022(17):133-135.

WANG Z P, DU X. Exploration of crack control methods in welding construction of long-distance pipelines [J]. Popular Standardization, 2022(17):133-135.

[3] 任鹏伟, 唐兴颖, 覃祖安, 等. 深海环境因素对管线钢腐蚀行为影响研究进展[J]. 油气储运, 2023, 42(05):492-508.

REN P W, TANG X Y, QIN Z A, et al. Research progress of the influence of deep-sea environment factors on corrosion behavior of pipeline steel [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(05):492-508.

[4] 贾彦杰, 周聪, 李立英, 等. 管线钢焊接接头韧性影响因素及评价方法[J]. 电焊机, 2023, 53(05):43-53.

JIA Y J, ZHOU C, LI L Y, et al. Research Status of Influencing Factors and Evaluation Methods for Toughness of Pipeline Steel Joints [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(05):43-53.

[5] 李佳蔓, 王丹, 姜锦涛, 等. X70管线钢在南海环境下的腐蚀行为研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2022, 42(06):49-55.

LI J M, WANG D, JIANG J T, et al. Corrosion Behavior of X70 Steel in South China Sea Environment [J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2022, 42(06):49-55.

[6] 薛永盛, 刘鹏鹏, 王峰, 等. 大管径X80级管线钢焊接弯头热处理工艺研究[J]. 焊接技术, 2023, 52(05):75-78.

XUE Y S, LIU P P, WANG F, et al. Study on heat treatment process of welded elbow of large diameter X80 pipeline steel [J]. Welding Technology, 2023, 52(05):75-78.

[7] 张捷, 钟远, 文作伟, 等. 厚壁P92钢管道焊接热处理工艺试验研究[J]. 焊接技术, 2023(5):91-95.

ZHANG J, ZHONG Y, WEN Z W, et al. Experimental study on welding heat treatment process for thick-walled P92 steel tube [J]. Welding Technology, 2023(5):91-95.

[8] 魏恩忠. 高锰钢辙叉闪光焊接头缺陷分析[J]. 焊接, 2023(05):51-57.

WEI E Z. Analysis of defects in flash welded joint of hadfield steel frogs [J]. Welding & Joining, 2023(05):

- 51-57.
- [9] 杜凤,胡正阳,任帅,等. 管线钢环焊缝缺陷对腐蚀的影响研究进展[J]. 当代化工研究,2023(10):15-17.
DU F, HU Z Y, REN S, et al. Research Progress on the Effect of Pipeline Steel Girth Weld Defects on Corrosion[J]. Modern Chemical Research, 2023(10):15-17.
- [10] 李中平,昌发祥,代志健,等. X80级大口径直缝埋弧焊管的开发[J]. 金属材料与冶金工程,2023,51(01):15-19.
LI Z P, CHANG F X, DAI Z J, et al. Development of Grade X80 Large Diameter Longitudinal Submerged Arc Welded Pipe [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2023, 51(01):15-19.
- [11] 戎泽玉. 镀锌层对 DP590 高强度钢搅拌摩擦焊组织及力学性能的影响[D]. 河南:郑州大学,2021.
RONG Z Y. The Effect of Coated Zn layer on the microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding of DP590 High Strength Steel Plates [D]. Henan: Zhengzhou University, 2021.
- [12] 范霁康,战英扬,徐鸿林,等. Q235 钢薄板激光焊接头微观组织与力学性能[J]. 焊接技术, 2023, 52(02):43-46.
FAN J K, ZHAN Y Y, XU H L. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of Q235 steel sheet[J]. Welding Technology, 2023, 52(02):43-46.
- [13] 王野. 手工电弧焊的焊接工艺浅谈[J]. 冶金管理, 2022(03):13-15.
WANG Y. Discussion on the Welding Process of Manual Arc Welding[J]. China Steel Focus, 2022(03):13-15.
- [14] 王俊胜,韩佳辰,彭志刚. 预热温度对 Q370R 球罐用钢焊接残余应力的影响[J]. 焊接技术, 2021, 50(10):18-21.
WANG J S, HAN J C, PENG Z G. Effect of preheating temperature on welding residual stress of Q370R spherical tank steel [J]. Welding Technology, 2021, 50(10):18-21.
- [15] 王子渊,夏劲松,李强. 钢铝复合接头热影响分析[J]. 船舶, 2022, 33(02):46-53.
WANG Z Y, XIA J S, LI Q. On the Influence of Welding Heat on the Steel-Aluminum Transition Joint [J]. Ship & Boat, 2022, 33(02):46-53.
- [16] 张勇路,鞠泉,胡曼,等. GH3230 合金的焊后热处理[J]. 金属热处理, 2021, 46(06):116-119.
ZHANG Y L, JU Q, HU M, et al. Post weld heat treatment of GH3230 alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(06):116-119.
- [17] 何逸凡,陈东高,张龙,等. TC4 钛合金 MIG 焊接头热处理后组织性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(06):164-170.
HE Y F, CHEN D G, ZHANG L, et al. Research on microstructure and properties of TC4 titanium alloy MIG welded joints after heat treatment [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(06):164-170.
- [18] 武振. 管线钢 X65 的研究与应用[J]. 中国金属通报, 2020(08):211-212.
WU Z. Research and Application of Pipeline Steel X65 [J]. China Metal Bulletin, 2020(08):211-212.
- [19] 周恺武,刘金水,卢源志,等. 添加 Si 粉激光深熔焊钢/铝接头的显微组织与性能[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14):58-65.
ZHOU D W, LIU J S, LU Y Z, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Deep Penetration Laser Welding Joints in Steel/Aluminum with Si Powder Addition [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14):58-65.
- [20] 王浩博,陈小康,李建军,等. 焊接顺序及焊接方向对 X80 管线钢残余应力的影响[J]. 制造技术与机床, 2023(05):124-128.
WANG H B, CHEN X K, LI J J, et al. Effect of welding sequences and welding direction on the residual stress in X80 pipeline steel [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(05):124-128.
- [21] 刘帅,颜莹,王斌,等. 热处理对 42CrMoVRE 钢强韧化机制的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(06):90-99.
LIU S, YAN Y, WANG B, et al. Effect of heat treatment on strengthening and toughening mechanism of 42CrMoVRE steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(06):90-99.
- [22] Liu G, Zhang G J, Jiang F, et al. Nanostructured high-strength molybdenum alloys with unprecedented tensile ductility [J]. Nature Materials, 2013, 12(4):344-350.