

大热输入焊接用钢 12MnNiVR 生产工艺及组织性能研究

冯路路^{1,2}, 唐涛¹, 束兴国¹, 乔文玮³, 周峰⁴

(1. 荆楚理工学院机械工程学院, 湖北 荆门 448000; 2. 武汉科技大学高性能钢铁材料及其应用省部共建协同创新中心, 湖北 武汉 430081; 3. 江苏华能电缆股份有限公司, 江苏 高邮 225613; 4. 佛山职业技术学院机电工程学院, 广东 佛山 528137)

摘要: 采用两种不同的生产工艺试制了大热输入焊接用钢 12MnNiVR, 利用光学显微镜、拉伸试验机、低温冲击韧性试验机对试验钢的微观组织和力学性能进行了检验, 以及利用热处理试验炉模拟了试验钢的焊后热处理行为。结果表明: 采用在线淬火+离线回火工艺生产的试验钢, 其组织为大量的回火索氏体和少量的回火贝氏体, 同时大量的碳化物均匀地分布在铁素体基体上。而采用调质工艺生产的试验钢, 室温组织由轧制态下的铁素体和珠光体组织转变为调质后更加均匀的回火索氏体加大量弥散析出的碳化物。两种工艺生产的试验钢均表现为良好的综合力学性能, 而且经模拟焊后热处理试验后, 其性能未发生明显的下降。在线淬火+离线回火工艺具有无需再次升温加热的优点, 能够替代调质工艺, 对降低企业的生产成本具有积极重要的作用。

关键词: 低温储油罐用钢; 12MnNiVR; 回火索氏体; 焊后热处理; 组织; 性能

中图分类号: TF76, TG44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2020)05-0154-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.05.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on Production Process, Microstructure and Properties of 12MnNiVR Steel for High Heat Input Welding

Feng Lulu^{1,2}, Tang Tao¹, Shu Xingguo¹, Qiao Wenwei³, Zhou Feng⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, Hubei, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Advanced Steels, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 3. Jiangsu Huaneng Cable Co., Ltd., Gaoyou 225613, Jiangsu, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Foshan Polytechnic, Foshan 528137, Guangdong, China)

Abstract: The high heat input welding steel 12MnNiVR was trial-produced by two different production processes. The microstructure and mechanical properties of the tested steel were obtained by optical microscope, tensile testing machine and low-temperature impact toughness testing machine, and the post-welding heat treatment behavior of the test steel was simulated by heat treatment test furnace. The results show that the tested steel produced by on-line quenching and off-line tempering process has a large amount of tempered sorbite and a small amount of tempered bainite, and a large number of carbides are evenly distributed on the ferrite matrix. In the quenched and tempered steel, the microstructure at room temperature changes from as-rolled ferrite and pearlite to more homogeneous tempered sorbite with more dispersed carbide after quenching and tempering. The tested steels produced by the two processes both exhibit excellent comprehensive mechanical properties, and after simulated post-weld heat treatment test, their properties did not decrease significantly. The on-line quenching and off-line tempering process has the advantage of eliminating reheating procedure, then can replace the quenching and tempering process, and has a positive and important role in reducing the production cost.

Key words: low temperature storage oil tank steel, 12MnNiVR, tempered sorbite, decreased cooling rate, microstructure, properties

收稿日期: 2019-08-18

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(B2019216), 荆楚理工学院校级科研项目(PY202004)。

作者简介: 冯路路(1982—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事高性能钢铁材料及强化方面的研究。Email: 85013296@qq.com。

通讯作者: 周峰(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事先进金属材料新产品开发及工艺研究。E-mail: 63419822@qq.com。

0 引言

大热输入焊接用钢 12MnNiVR 制造的低温储油罐已经成为石油储备战略的重点物资,在国内外市场价格一直居高不下^[1],其不仅要求具有高强度和优良的低温冲击韧性,还要求具有良好的焊接性能,焊接热输入可以达到 100 kJ/cm 甚至更高^[2],且低裂纹焊接敏感系数 P_{cm} 值要求在 0.2% 以下,同时要求钢材检验模拟焊后热处理 (Simulated post-weld heat treatment, SPWHT) 的性能和耐腐蚀性能^[3],具有一定的生产难度。顾元国等人研究了回火工艺对控制轧制和控制冷却工艺生产的 12MnNiVR 钢组织性能的影响,提出最佳的回火温度为 630 ℃^[4]。杨云清等人研究了新一代储油罐用钢 12MnNiVR 的连续冷却转变 CCT 曲线以及确定了便于工业生产的调质工艺^[5]。余宏伟等人研究回火工艺对调质工艺生产 12MnNiVR 钢组织性能的影响,认为采用调质工艺生产 12MnNiVR 的回火温度需要稳定控制在 660 ℃ 左右^[6]。其其格等人研究了回火工艺对在线淬火 12MnNiVR 钢组织性能的影响,认为经 (625 ~ 655) ℃×60 min 回火后得到回火贝氏体组织,同样能够得

到满足标准要求的钢材^[7]。张朋彦等人在实验室采用 DQ+T 的工艺试制了 12MnNiVR 钢,最终组织为回火索氏体,同时大量细小的碳化物在铁素体晶内和晶界弥散析出^[8]。李新玲^[9]和郑东升^[10]等人分别在鞍钢和南钢采用在线冷却和离线回火工艺试制了 12MnNiVR 钢,认为完全可以采用在线冷却+离线回火工艺替代调质工艺进行储油罐用钢的生产,来降低生产成本,缩短工序流程。采用在线淬火+离线回火工艺和轧制+淬火+回火工艺均能生产出合格的 12MnNiVR 钢,但是两种工艺在各个工序阶段下的组织演变及性能变化还未有相关的文献进行对比分析。

为了研究不同生产工艺对储油罐用钢 12MnNiVR 组织性能的影响,笔者采用 2 种不同的生产工艺分别进行了试制,明确了 2 种生产工艺对 12MnNiVR 组织性能的影响,为实际生产过程中生产工艺的制定提供了技术依据。

1 试验材料及方法

试验钢在某钢铁厂经历铁水预处理脱硫、转炉冶炼、LF 炉精炼、RH 真空脱气、板坯连铸等工序,铸坯厚度为 400 mm,试验钢的化学成分如表 1 所示。

表 1 试验钢的化学成分
Table 1 Chemical compositions of tested steel

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti	Ni	Mo	Fe	P_{cm}
0.09	0.29	1.48	0.008	0.003	0.044	0.017	0.052	0.013	0.22	0.098	Bal.	0.19

其中: $P_{cm}(\%) = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$ 。

从表 1 可以看出,为保证试验钢低温冲击韧性值, C 含量控制在 0.09%,同时添加微合金元素 Nb、V 和 Ti 来细化晶粒和回火过程中析出 Nb、V (C、CN) 等碳化物来起到第二相强化的作用,添加 Mo 元素提高试验钢的淬透性以保证水冷后试验钢的强度,同时添加 Ni 元素来提高试验钢的低温冲击韧性,降低试验钢的韧脆转变温度。合金元素的添加增加了试验钢的低裂纹焊接敏感指数 P_{cm} ^[11-12],但是随着 C 含量的降低, P_{cm} 值最终控制在 0.19%,属于 0.2% 以下的合理范围。

轧制过程中将 400 mm 厚铸坯分为 2 组,第 1 组钢坯采用 4 300 mm 四辊可逆双机架轧机轧制为 32 mm 厚钢板,然后采用超快速冷却装置 (Ultra-fast cooling, UFC) 进行在线水冷 (在线淬火) 至 300 ℃ 后空冷至室温,记为 1[#]。第 2 组钢坯采用相同的轧制工艺轧制为 32 mm 厚钢板,然后采用加速冷却系统

(Accelerated cooling system, ACC) 进行水冷至 600 ℃ 后空冷至室温,记为 2[#]。

第 1 组试验钢的热处理过程是直接将钢板采用 630 ℃ 的回火工艺进行回火。第 2 组试验钢则先进行一次淬火处理,然后采用 660 ℃ 的回火工艺进行回火处理。2 组试验钢的轧制及热处理工艺参数如表 2 所示。

将轧制、淬火、回火热处理后的试验钢,采用砂纸等工具研磨抛光后用 4% 的硝酸酒精溶液 (体积分数) 对抛光面进行腐蚀,采用光学显微镜 (Olympus PEM3-3) 观察试验钢的微观组织形貌。

采用热处理试验炉 (型号: XY-1600VCB) 进行钢板的模拟焊后热处理 (SPWHT) 试验,模拟焊后热处理试验加热温度为 585 ℃,保温时间为 160 min。

按照 GB/T228《金属材料室温拉伸试验方法》进行钢板室温拉伸性能测试,按照标准 GB/T229

《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行钢板的低温冲击韧性测试。

表2 试验钢的轧制、冷却和热处理参数
Table 2 The parameters of rolling, cooling and heat treatment of tested steel

编号	开轧温度/℃	再轧温度/℃	终轧温度/℃	开冷温度/℃	终冷温度/℃	水冷速度/(℃·s ⁻¹)
1 [#]	1 170	910	860	850	300	35
2 [#]	1 170	910	860	850	680	10

注: 1[#]钢热处理工艺: 回火(630℃+80 min); 2[#]钢热处理工艺: 淬火(930℃+水冷), 回火(660℃+80 min)。

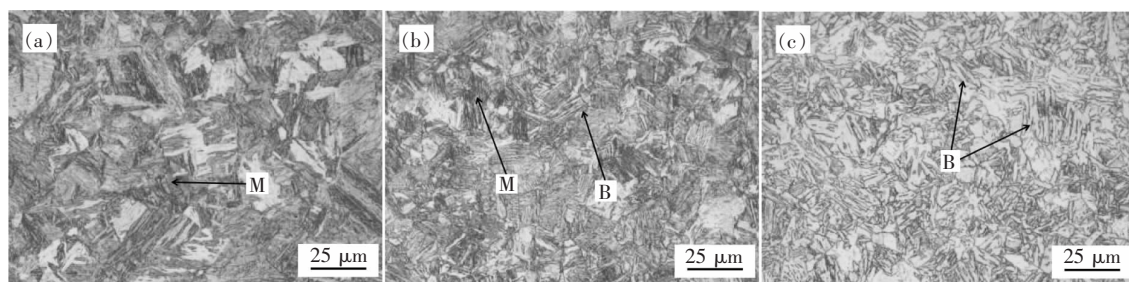
2 结果与讨论

2.1 试验钢轧制后金相显微组织

1[#]试验钢轧制完成后直接采用 UFC 冷却系统在线淬火, 其金相显微组织如图1所示。1[#]试验钢采用控轧控冷工艺, 精轧阶段处于奥氏体未再结晶区, 轧制完成后采用超快速冷却系统(UFC)直接水冷完成在线淬火, 即轧后立即进入控冷阶段。超快速冷却阶段钢板近表面由于冷速很大过冷奥氏体直接发生马氏体相变, 转变为板条马氏体组织, 如图1(a)所示; 而钢板厚度方向由于板厚效应导致冷却速度的降低, 在钢板厚度1/4处部分过冷奥氏体发生了贝氏体转变, 出现了少量的

板条贝氏体组织, 形成了马氏体+部分贝氏体组织, 如图1(b)所示; 随着钢板厚度1/2处冷却速度进一步降低, 部分过冷奥氏体发生了先共析转变, 形成了少量的先共析铁素体, 最终组织转变为块状铁素体+贝氏体组织的混合组织, 如图1(c)所示。

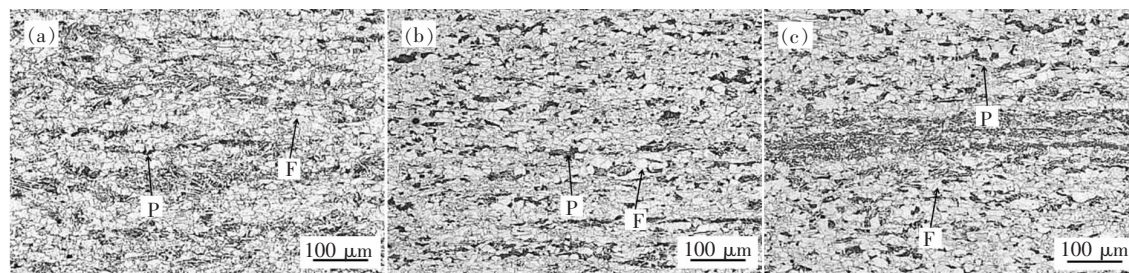
2[#]试验钢轧制后金相显微组织如图2所示。其轧制阶段同样采用的是控制轧制和控制冷却工艺, 第一阶段粗轧开轧温度1 170℃, 第2阶段精轧开轧温度为910℃, 低于奥氏体再结晶温度960℃, 属于未再结晶区轧制, 能够有效地破碎奥氏体晶粒, 形成了大量的变形带, 显著增加奥氏体的晶界, 同时在晶粒的内部也形成了高密度的位错和大量的亚结构, 增大了有效形核面积, 给后续相变提供大量的形核位置, 从而起到细化晶粒的作用。钢板轧制完成后立即进入加速冷却系统(ACC)进行控制冷却, 开冷温度为850℃, 终冷温度为680℃, 冷却速度为10℃/s, 试验钢在此冷却速度下完成了先共析转变和共析转变, 室温组织由大量铁素体和少量珠光体组成, 如图2所示。钢板近表面, 厚度1/4处和厚度1/2处均由铁素体和珠光体组成, 近表面铁素体晶粒较细, 晶粒度等级较高, 大约在13级左右, 而沿着厚度方向晶粒度等级逐渐降低。



(a)近表面; (b)厚度1/4处; (c)厚度1/2处

图1 1[#]试验钢轧制后在线淬火的光学显微组织

Fig. 1 Microstructure of 1[#] tested steel after rolling and quenching on line



(a)近表面; (b)厚度1/4处; (c)厚度1/2处

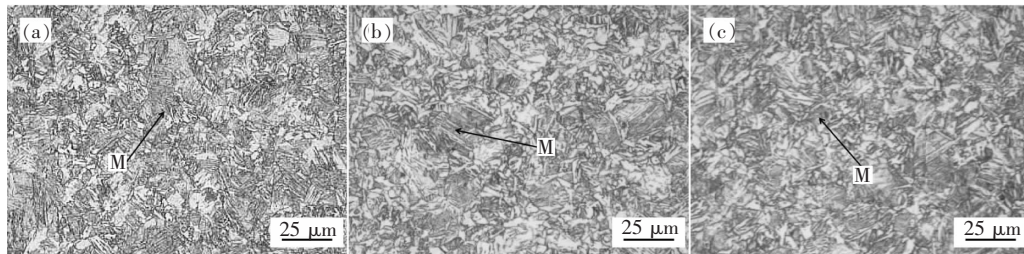
图2 2[#]试验钢轧制后的光学显微组织

Fig. 2 Microstructure of 2[#] tested steel after rolling

2.2 试验钢淬火后金相显微组织

2[#]试验钢轧制完成后得到的是铁素体和珠光体的混合组织,其离线淬火后的金相显微组织如图 3 所示。淬火再次加热升温时发生铁素体和珠光体的逆共析转变,加热温度达到 930 ℃ 保温 30 min 后完成奥氏体化,水冷淬火时钢板发生马氏体相变,转变为单一的马氏体组织,钢板近表面由于冷却速度大

于钢板厚度 1/4 和 1/2 处,其马氏体晶粒相对细小。2[#]试验钢的马氏体晶粒尺寸对比 1[#]试验钢更加细小均匀,这是因为再次升温加热过程中,轧制冷却时产生的第二相粒子(即碳化物、碳氮化物)属于高熔点的硬质相,在高温下对奥氏体晶界的移动起到钉扎作用,有效地阻止奥氏体晶粒的长大,细化奥氏体晶粒,淬火后得到细小的马氏体晶粒。



(a)近表面; (b)厚度 1/4 处; (c)厚度 1/2 处

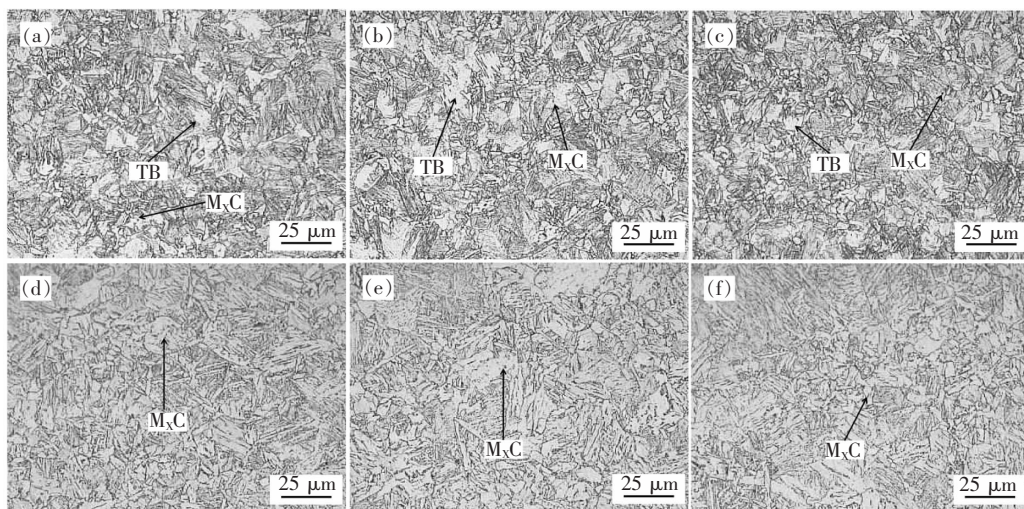
图 3 2[#]试验钢淬火后的光学显微组织

Fig. 3 Microstructure of 2[#] tested steel after quenching

2.3 试验钢回火后金相显微组织

试验钢回火后金相显微组织如图 4 所示。1[#]试验钢回火温度为 630 ℃,保温时间为 80 min,回火时原始的马氏体组织发生分解,逐渐转变为铁素体和珠光体以及碳化物,大量的碳化物在铁素体基体上均匀弥散地析出,得到回火索氏体组织,同时部分贝氏体组织转变为回火贝氏体组织,部分区域仍然保留马氏体条束状的形貌。2[#]试验钢淬火时得到的单

一马氏体组织经 660 ℃ 回火保温 80 min 后,其室温组织为回火索氏体组织,片状铁素体仍然保留着板条马氏体的形貌,珠光体在铁素体晶界上出现,同样在铁素体基体上分布了大量的细小碳化物,室温组织由轧制态的铁素体珠光体组织转变为调质热处理后的回火索氏体组织。对比可以看出 2[#]试验钢比 1[#]试验钢所得到的回火索氏体组织更加均匀,晶粒细化程度较明细,碳化物的分布也更加弥散。



(a)1[#] 近表面; (b)1[#] 厚度 1/4 处; (c)1[#] 厚度 1/2 处; (d)2[#] 近表面; (e)2[#] 厚度 1/4 处; (f)2[#] 厚度 1/2 处

图 4 1[#]和 2[#]试验钢回火后的光学显微组织

Fig. 4 Microstructure of 1[#] and 2[#] tested steel after tempering

2.4 试验钢的力学性能

分别对2组试验钢在轧制、淬火、回火和模拟焊后热处理的机械性能进行了测试,测试结果如图5所示。

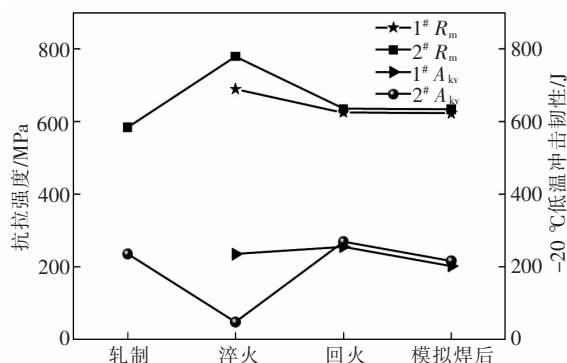


图5 1#和2#试验钢在不同工艺状态下的抗拉强度和-20 °C低温冲击韧性值

Fig. 5 Tensile strength and impact toughness at -20 °C of 1# and 2# tested steels under different process conditions

1#试验钢采用的是直接在线水冷淬火+离线回火的工艺进行生产,其淬火后的性能存在强度偏高,-20 °C低温冲击韧性偏低的现象,回火后抗拉强度出现下降,低温冲击韧性略有升高,模拟焊后热处理后其强度未出现明显的下降,-20 °C低温冲击韧性略有下降。2#试验钢经轧制后,采用离线淬火+离线回火的调质工艺进行生产,轧制后其强度水平偏低,韧性水平处于较合理的范围,当再次升温加热淬火

后强度得到迅速提升,但是低温冲击韧性出现下降,属于典型的马氏体组织性能,经660 °C高温回火后,强度下降,低温冲击韧性大幅改进,得到较为优越的综合力学性能配比,同样的经模拟焊后热处理后综合力学性能仍然维持在较高的水平。

3 结论

1) 12MnNiVR大热输入焊接用钢采用在线淬火+离线回火进行生产,其组织为大量的回火索氏体和少量的回火贝氏体,大量的碳化物均匀弥散地分布在铁素体基体上。在线淬火后得到较好的综合力学性能,经离线回火后强度略有下降,低温冲击韧性略有提高,模拟焊后热处理后,综合力学性能未出现明显的降低。

2) 12MnNiVR大热输入焊接用钢轧制后再采用调质工艺进行生产,室温组织由轧制态下的铁素体和珠光体组织转变为调质后的回火索氏体加大量弥散均匀析出的碳化物,组织更加均匀。调质工艺对比在线淬火+离线回火工艺,组织均匀性和综合力学性能均占优势,模拟焊后热处理后,表现为更加稳定的综合力学性能。

3) 在线淬火+离线回火工艺具有自身的优点,无需再次升温加热奥氏体化,减少了淬火生产工序,缩短了生产流程,节约了能源,降低了生产成本,且其生产的12MnNiVR钢仍然能满足标准的各项要求,能够替代调质工艺,对企业的生产经营具有积极的作用。

参考文献

- [1] Jia Yincui. Research and application status of domestic production of high strength steel for large crude oil storage tanks[J]. Petroleum and Chemical Equipment 2013, 16(9): 32-34.
(贾银翠. 大型原油储罐用高强钢国产化研究及应用现状[J]. 石油和化工设备 2013, 16(9): 32-34.)
- [2] Jiang Huifeng. Current status and development trend of quenched and tempered high strength low-alloy steel plates for pressure vessels in china[J]. Hot Working Technology 2015, 44(4): 16-19.
(江慧丰. 我国压力容器用低合金调质高强度钢板的现状与发展趋势[J]. 热加工工艺 2015, 44(4): 16-19.)
- [3] Shen Yang, Leng Ju, Wang Cong. On the heterogeneous microstructure development in the welded joint of 12MnNiVR pressure vessel steel subjected to high heat input electrogas welding[J]. Journal of Materials Science and Technology 2019, 35(8): 1747-1752.
- [4] Gu Yuanguo. Study on tempering process of mechanical steel 12MnNiVR[J]. Hot Working Technology 2015, 44(22): 152-156.
(顾元国. 机械用钢 12MnNiVR 的回火工艺研究[J]. 热加工工艺 2015, 44(22): 152-156.)
- [5] Yang Yunqing, Tang Zhiyu, Yang Xiaobing *et al.* Research of heat treatment process and mechanical properties for 12MnNiVR steel plate[J]. Wide and Heavy Plate 2014, 20(1): 14-20.
(杨云清, 唐治宇, 阳小兵, 等. 12MnNiVR 钢板热处理工艺及性能研究[J]. 宽厚板 2014, 20(1): 14-20.)

(下转第165页)

- (牛靖, 陈宏远, 刘甲, 等. X70 大变形钢焊接接头热影响区软化及其影响研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45 (21): 176–179.)
- [12] Chen Yanqing, Du Zeyu, Xu Lianghong. Microstructure and mechanical properties of heat affected zone for X80 pipeline steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31 (5): 101–104.
(陈延清, 杜则裕, 许良红. X80 管线钢焊接热影响区组织和性能分析[J]. 焊接学报, 2010, 31 (5): 101–104.)
- [13] Zhao Bo, Li Guopeng, Wang Xu *et al.* Thermal simulation experiments research on heat-affected zone embrittlement and softening of X80 pipeline steel [J]. Welded Pipe and Tube, 2016, 39 (3): 16–19.
(赵波, 李国鹏, 王旭, 等. X80 钢焊接热影响区脆化软化现象热模拟试验研究[J]. 焊管, 2016, 39 (3): 16–19.)
- [14] Jia Lu, Liu Yichun, Jia Shujun *et al.* Softening of heat affected zone of high-strain pipeline steel [J]. Materials Science and Technology, 2018, 26 (3): 37–44.
(贾璐, 刘意春, 贾书君, 等. 抗大变形管线钢热影响区软化问题的研究[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26 (3): 37–44.)
- [15] Jia Lu, Liu Yichun, Jia Shujun *et al.* Effect of heat input on microstructure and properties of welding heat affected zone of high-deformability pipeline steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43 (1): 126–131.
(贾璐, 刘意春, 贾书君, 等. 热输入对抗大变形管线钢焊接热影响区组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43 (1): 126–131.)
- [16] Hu Jun, Du Linxiu, Xie Hui *et al.* Effect of weld peak temperature on the microstructure, hardness and transformation kinetics of simulated heat affected zone of hot rolled ultra-low carbon high strength Ti-Mo ferritic steel [J]. Materials & Design, 2014, 60: 302–309.
- [17] Maurer W, Ernst W, Rauch R *et al.* Evaluation of the factors influencing the strength of HSLA steel weld joint with softened HAZ [J]. Welding in the World, 2015, 59 (6): 809–822.
- [18] Hamada M, Hirata H, Okaguchi S *et al.* Material design for line pipe steel to minimize HAZ softening and obtain good HAZ toughness [J]. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008, 18 (3): 204–210.
- [19] Mohtadi-Bonab M A, Eskandari M, Szpunar J A. Texture, local misorientation, grain boundary and recrystallization fraction in pipeline steels related to hydrogen induced cracking [J]. Materials Science & Engineering A, 2015(620): 97–106.

编辑 张继东

(上接第158页)

- [6] Yu Hongwei, Yang Bo, Li De *et al.* Tempering process control of low yield and tensile strength ratio quenched and tempered steel plate 12MnNiVR for oil storage tank [J]. Wide and Heavy Plate, 2014, 20 (2): 9–12.
(余宏伟, 杨波, 李德, 等. 低屈强比调质大罐钢板 12MnNiVR 的回火工艺控制[J]. 宽厚板, 2014, 20 (2): 9–12.)
- [7] Qi Qige, Yu Wei, Wu Huibin *et al.* Effect of tempering process on microstructure and mechanical properties of 12MnNiVR steel plate by direct quenching [J]. Hot Working Technology, 2008, 37 (24): 100–103.
(其其格, 余伟, 武会宾, 等. 回火工艺对在线淬火 12MnNiVR 钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2008, 37 (24): 100–103.)
- [8] Zhang Pengyan, Zhu Shuxun, Zhang Huiyun *et al.* Effects of DQ-T process on microstructure and mechanical properties of 12MnNiVR steel [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33 (12): 1726–1730.
(张朋彦, 朱澍勋, 张慧云, 等. DQ-T 工艺对 12MnNiVR 钢组织和力学性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33 (12): 1726–1730.)
- [9] Li Xinling, Qiao Xin, Gao Qiang. Online cooling technology of oil tanker steel 12MnNiVR [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23 (Supplement 1): 152–158.
(李新玲, 乔馨, 高强. 石油储罐用钢 12MnNiVR 在线冷却工艺研究[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23 (增刊1): 152–158.)
- [10] Zheng Dongsheng. Industrialized production of direct quenching steel 12MnNiVR in NISCO [J]. Wide and Heavy Plate, 2016, 22 (5): 10–13.
(郑东升. 在线淬火 12MnNiVR 钢在南钢的工业化生产[J]. 宽厚板, 2016, 22 (5): 10–13.)
- [11] Vinay Kumar Yadav, Vidit Gaur, Singh I V. Effect of post-weld heat treatment on mechanical properties and fatigue crack growth rate in welded AA-2024 [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 779: 1–10.
- [12] Yang Han, Zhao Wengui, Hua Yanping *et al.* Weldability of 610 MPa grade high strength plate steel 12MnNiVR for oil storage tanks [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18 (Supplement 1–2): 769–772.

编辑 杨冬梅