

热连轧 Q345R 压力容器板性能研究

杨景红¹, 苏旭², 韩建胜², 刘刚¹

1. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023;

2. 大连造船厂, 辽宁 大连 116600)

摘要:研究了传统轧制和热连轧工艺生产的 Q345R 压力容器板的力学性能及焊接接头性能, 分析了热连轧 Nb-Ti 微合金化对性能的影响。试验结果表明, 低碳、Nb-Ti 微合金化处理的热连轧钢板冲击韧性较传统轧制钢板的提高 2~3 倍, 热连轧钢板焊接接头冲击韧性明显好于传统轧制钢板的, 粗晶区淬硬程度低; 热连轧钢板良好的性能来源于 TMCP 工艺下碳当量的降低及 Nb-Ti 微合金化处理改善的基体及接头微观组织。

关键词:热连轧; Q345R; 韧性; 微合金化

中图分类号: TG 142.1 **文献标识码:** A

Study on Properties of Hot Continuous Rolling Q345R Pressure Vessels Steel Plates

YANG Jing-hong¹, SU Xu², HAN Jian-sheng², LIU Gang¹

1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China;

2. Dalian Shipbuilding Industry Company Limited, Dalian 116600, China)

Abstract: The paper studies the properties of Q345R pressure vessels steel plates produced by conventional and TMCP hot continuous rolling processes respectively. The effect of Nb-Ti microalloyed on properties and relationship between microstructure and properties are investigated. The results show that the impact energy of Nb-Ti microalloyed plates is 2~3 times of that made by conventional process, at the same time, the impact toughness of weldments is higher than that of the plate made by conventional process and the degree of hardening in coarsen zone of hot continuous rolling weldments is less. The better properties of continuous rolling plates come from refined microstructure of base and weldments as low carbon Nb-Ti microalloyed design plus TMCP technology.

Keywords: hot continuous rolling; Q345R; toughness; microalloyed steel

Q345R 压力容器用钢板多用于制造球罐、油漆罐和化工机械设备容器等, 通常需经过拉延、弯曲和焊接等方式加工成一定形状后在承受压力状态下使用, 因其内部装各种易燃易爆的液体或气体, 所以要求压力容器用钢板应具有良好的强韧性和焊接性能。TMCP (Thermo Mechanical Control Process: 热机械控制工艺) 生产的钢板具有良好的冲击韧性, 同时降低钢材的碳当量, 改善焊接性能。对于压力容器用钢及 TMCP 工艺已有较多研究^[1-3], 但就 Nb、Ti 微合金化热连轧钢板与传统轧制钢板性能对比研究的报导较少,

因此, 拟对某钢厂传统轧制和热连轧线生产的 20 mm 厚 Q345R 压力容器用中板的力学性能及其焊接接头性能进行研究, 分析 Nb、Ti 微合金化对性能的影响。

1 试验材料及方法

试验材料为某钢厂生产的两种 20 mm 规格的压力容器用钢板, 分别由传统轧制工艺和低碳、Nb-Ti 微合金化处理的热连轧工艺生产, 试验钢板化学成分分析如表 1 所示。

收稿日期: 2012-11-16

作者简介: 杨景红, 高级工程师, 研究方向: 低合金钢及焊接。E-mail: jhyang2004@163.com。

表1 试验钢板化学成分
Table 1 Composition of tested steels (w)

Steel	C	S	P	Si	Mn	Nb	Ti	Fe
1 [#] (conventional rolling)	0.15	0.006	0.016	0.40	1.5	-	-	Bal.
2 [#] (continuous rolling)	0.08	0.003	0.014	0.23	1.4	0.03	0.014	Bal.

分别对钢板取样进行基本力学性能测试,用 OLYMPUS GX71 型金相显微镜对试样进行金相观察、晶粒度及夹杂物分析。在 JBN-300 型冲击试验机上进行系列温度冲击试验,记录试样冲击功 KV_2 , 测量不同温度下断面纤维率,用 Quanta600 扫描电子显微镜对典型断口形貌进行观察。依据 JB/T4709—2007《钢质压力容器焊接规程》选择焊接材料及工艺,分别进行手工焊、气保焊和埋弧焊焊接。手工焊采用 $\phi 4.0$ mm 的 J507 焊条,气保焊采用 $\phi 1.2$ mm 的 ER50-6 (H08MnSi) 气保焊丝,埋弧焊采用 $\phi 4.0$ mm 的 H10Mn2 焊丝 + HJ431 焊剂;两种钢板焊材选择一致,钢板不预热,层间温度控制在 100 ~ 150 °C,焊后不进行热处理;焊后分别对钢板焊接接头进行取样,进行接头拉伸和冷弯试验、焊缝和热影响区的冲击试验;热影响区冲击试样取样部

位按 NB/T 47016—2011《承压设备产品焊接试件的力学性能检验》的方法,缺口轴线至试样轴线与熔合线交点的距离大于零,且应尽可能多的通过热影响区。对接头各部位进行维氏硬度测量,测试位置为后焊面下 3 mm,载荷 10 kg。

2 试验结果

2.1 钢板拉伸及冷弯性能

表2为试验钢板的常规力学性能,由表可以看出,两钢板各项力学性能均满足 GB713—2008《锅炉和压力容器用钢板》标准中对 Q345R 力学性能的要求,纵横向无明显差异。Nb-Ti 微合金化处理的热连轧钢板屈服强度较传统轧制钢板提高明显,余量较大,相对指标要求提高 33%,强度提高的同时塑性增加,抗拉强度相差不大。

表2 试验钢板拉伸及弯曲性能
Table 2 Tensile and flexural properties of tested steel

Steel	Sampling direction	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	Z /%	Bending test $\theta = 3a, 180^\circ$, two sides)
1 [#]	Transverse	365,365	545,545	28.0,29.0	68.0,68.5	no crack
	Longitudinal	370,370	545,545	30.0,30.0	75.0,75.0	no crack
2 [#]	Transverse	440,425	545,555	32.5,30.0	76.5,75.0	no crack
	Longitudinal	440,425	545,535	33.0,30.5	77.5,76.5	no crack

2.2 钢板冲击韧性

试验钢板冲击功及断面纤维率随测试温度变化的曲线如图1所示。由图可看出,热连轧、Nb-Ti 微合金化处理的 Q345R 钢板上平台冲击功在 220 J 左右,为传统轧制钢板的 2 ~ 3 倍,0 °C 冲击功在 200 J 左右,-20 °C 冲击功值仍然能达到 160 J,ETT50 及 FATT50 温度都在 -30 °C 左右,脆性转变温度低于 -60 °C,明显好于传统

轧制钢板的,具有较好的冲击韧性,而传统轧制钢板室温冲击功在 80 J 左右,冲击功值随温度下降而线性下降。从断面纤维率看,热连轧钢板室温为 100% 的纤维断口,在 -20 °C 时,纤维断面率也达到 75%,而传统轧制钢板即使在室温也存在明显的晶状断口。图2为两种钢板室温下典型断口扫描形貌,热连轧钢板断口为明显纤维断口,韧窝细小均匀。

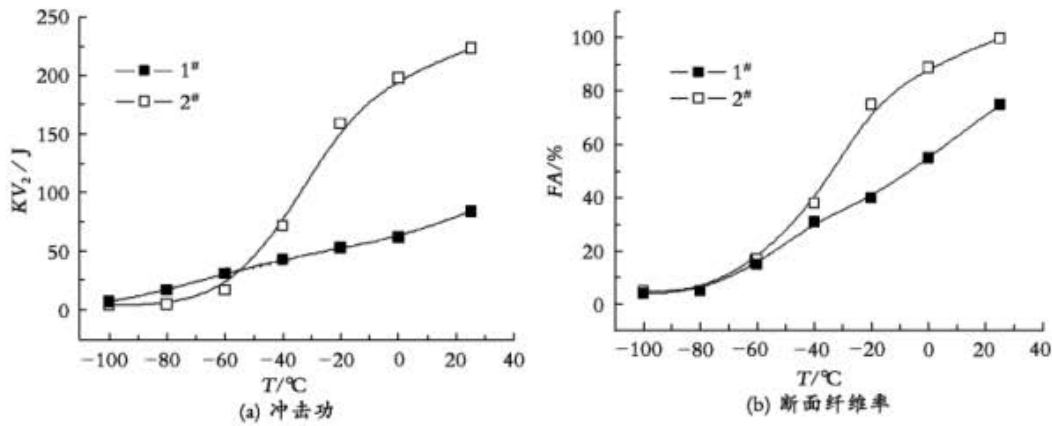


图 1 试验钢板系列温度冲击曲线

Fig. 1 Impact curves of tested steels: (a) impact toughness; (b) shearing section percentage

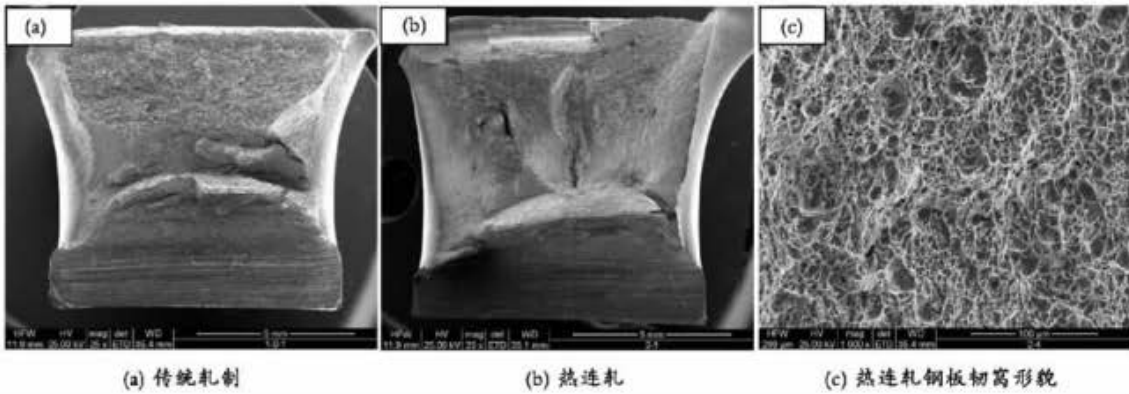


图 2 试验钢板室温时断口扫描形貌

Fig. 2 Fracture SEM morphological of tested steel at room temperature:

(a) conventional rolling; (b) continuous rolling; (c) dimple fracture of continuous rolling

2.3 焊接接头性能

三种焊接工艺焊接接头常规性能结果如表 3 所示,可以看出,两种材料焊接接头拉伸强度相当,接头强度都高于母材的,冷弯性能合格,两者接头性能差异主要表现在接头韧性上;热连轧及传统轧制钢板接头焊缝及热影响区冲击功值都满足规定的接头冲击功指标,但从表 3 可看出,传统轧制钢板热

影响区冲击功低于焊缝金属,热影响区属于薄弱环节,而热连轧板接头焊缝及热影响区冲击韧性都明显高于传统轧制钢板的,特别是热影响区韧性,热连轧钢板较传统轧制钢板的提高幅度较大,手工焊提高了将近 3 倍,气保焊提高 2.3 倍,埋弧焊也提高了 1.7 倍。另外,由于埋弧焊具有较大的热输入,其接头冲击韧性低于手工焊和气保焊的。

表 3 试验钢板接头性能¹⁾

Table 3 Weldments properties of tested plates

Steels	Welding method	R_m /MPa	Fracture position	Bending test $\theta = 4a$ 180°, two sides)	Weld seam (RT)	
					KV ₂ /J	
1 [#]	SMAW	575	base	no crack	164,150,184 (66)	
	GMAW	570	base	no crack	108,124,109 (14)	
	SAW	565	base	no crack	80,82,76 (79)	
2 [#]	SMAW	550	base	no crack	186,198,188 (91)	
	GMAW	580	base	no crack	146,140,150 (45)	
	SAW	570	base	no crack	70,92,90 (84)	
					HAZ (RT)	
					KV ₂ /J	
					58,98,108 (88)	
					90,106,100 (99)	
					100,102,116 (106)	
					278,288,212 (259)	
					234,232,222 (229)	
					154,112,184 (150)	

Note 1): The numbers in brackets are all mean values.

2.4 接头显微硬度

试验钢板焊接接头各部位维氏硬度试验结果如图3所示。由图可知,接头硬度最高值均出现在热影响区。热连轧与传统轧制钢板接头焊缝和基体的硬度相当,其差别主要反映在热影响区硬度上,由于传统轧制钢板碳含量高,淬硬程度高,使得接头热影响区硬度值明显高于热连轧板,传统轧制钢板热影响区最高硬度为 355

HV10,达到了国际焊接学会提出的具有焊接冷裂纹倾向的临界硬度值 350 HV10^[4],而热连轧钢板焊接热影响区硬度最高值为 270 HV10,降低了 31%。由此可见,热连轧钢板焊接热影响区不会产生明显的硬化现象,具有较低的冷裂纹敏感性,而传统轧制钢板热影响区淬硬现象高于热连轧板,较高的硬度引起韧性急剧降低,同时更容易产生焊接裂纹。

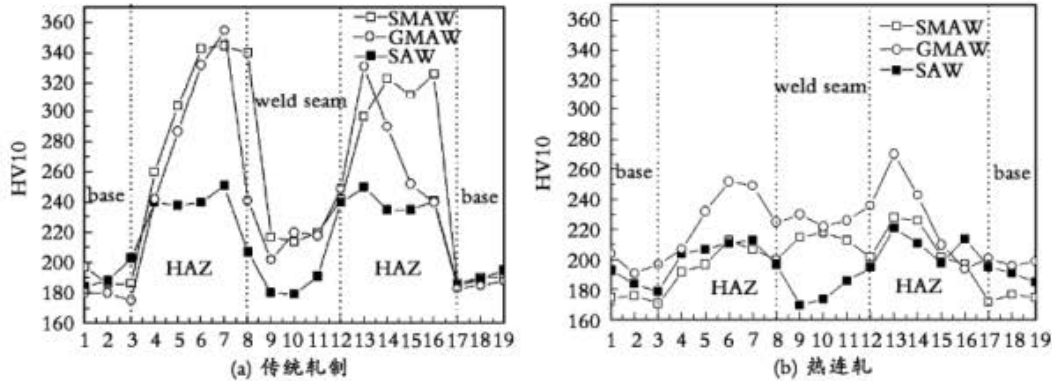


图3 焊接接头各区硬度分布图

Fig. 3 Hardness distributions of weldments: (a) conventional rolling; (b) continuous rolling

2.5 组织观察

图4为两种钢板的金相组织形貌及夹杂物形貌,热连轧生产的 Q345R 钢板组织均匀,珠光体含量

相对较少,组织较细,20 mm 厚钢板晶粒直径在 10 μm 以内,夹杂物为 D 类 1.0 级及 DS 类 0.5 级,而传统轧制钢板组织中夹杂物为 D 类 2.5 级及 DS 类 1.0 级。

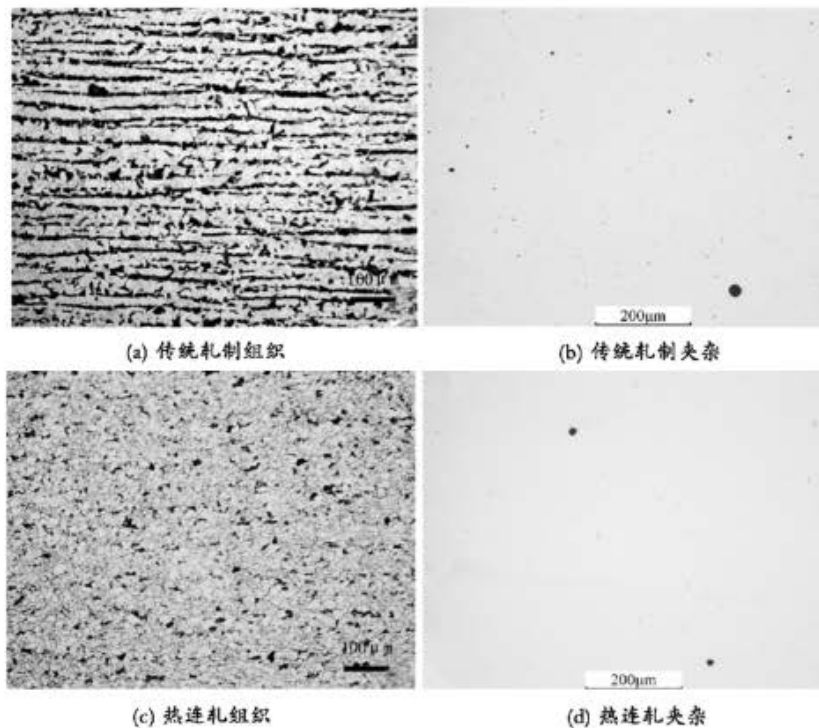


图4 试验钢板基体组织及夹杂物形貌

Fig. 4 Microstructure and inclusions of tested steels: (a), (b) conventional rolling plate; (c), (d) continuous rolling plate

图 5 为试验钢板接头焊缝的金相组织,热连轧钢板与传统轧制钢板焊缝组织相比,组织类型差别不大,都由针状铁素体 (AF)、晶界先共析铁素体 (PF) 及少量魏氏组织铁素体 (WF) 组成,各种组织的量及形态在不同工艺下有所差别。手工焊、气保焊焊缝组织中针状铁素体量较多,晶界先共

析铁素体及魏氏组织铁素体量较少,组织较细,而埋弧焊接头焊缝主要由粗大的先共析铁素体及魏氏组织铁素体为主;连轧板接头焊缝组织更细小,粗大魏氏组织铁素体及先共析铁素体量明显减少,针状铁素体份数明显更多 (如图 5),使得热连轧钢板接头焊缝性能好于传统轧制钢板的。

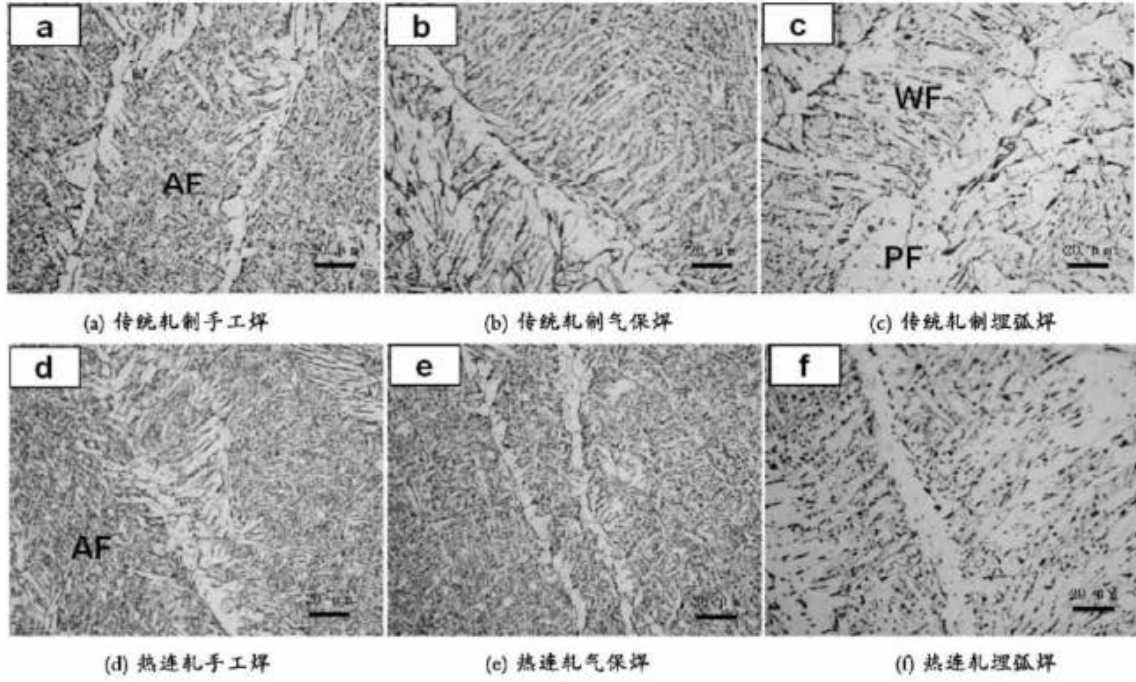


图 5 接头焊缝金相组织

Fig. 5 Weld seam microstructure of conventional rolling plates: (a) SMAW ; (b) GMAW ; (c) SAW and continuous rolling plates; (d) SMAW; (e) GMAW; (f) SAW

图 6 为热连轧与传统轧制钢板接头粗晶区典型组织,可看出,传统轧制钢板粗晶区组织中魏氏组织铁素体板条 (WF lath) 粗大,魏氏组织铁素体量多;连轧板粗晶区组织较细,组织中铁素体板条细小,板条间碳化物弥散、细小;组织中

存在的细小粒状贝氏体 (GB) 分割了粗大的魏氏组织铁素体板条。这种组织上的差别反映到冲击功及硬度上使得热连轧与传统轧制钢板接头热影响区性能出现较大的差异,热连轧板接头热影响区冲击韧性明显高于传统轧制钢板的。

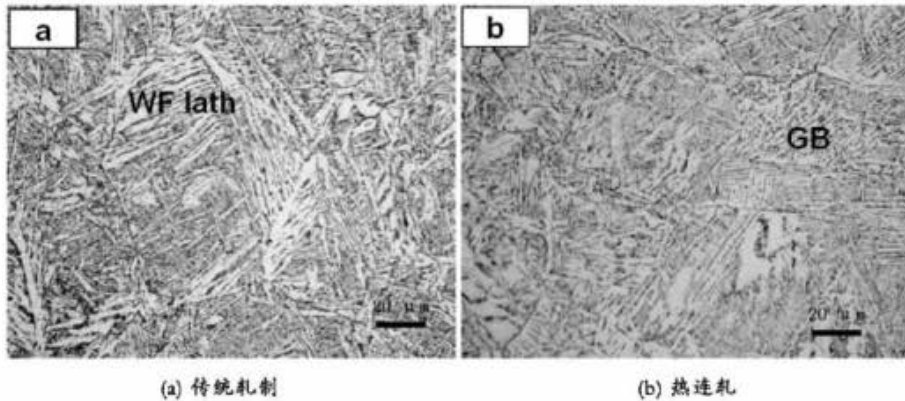


图 6 接头粗晶区典型组织比较 (手工焊)

Fig. 6 Microstructures of coarsen grain heat affected zone of SWAM: (a) conventional rolling plates; (b) continuous rolling plates

3 结果分析及讨论

试验钢板性能结果显示,热连轧钢板韧性明显好于传统轧制钢板的,由两钢的成分上看,传统轧制钢板为常规压力容器钢成分设计,C、Si含量较高;而对于采用TMCP的连轧板,采用了低碳的Nb、Ti微合金化设计,降低了C、S及Si含量,其中,C元素降低了将近50%,并添加少量Nb,采用微Ti处理,配合控轧控冷工艺,明显细化了钢板组织,消除了珠光体带状偏析,减少并细化夹杂物,使钢板组织均匀化,大幅度提高材料韧性。

试验用热连轧Q345R压力容器钢板具有优良的综合力学性能,钢板屈服强度高,塑韧性好。新工艺降低了S、P含量,Nb、Ti微合金化处理阻碍了奥氏体晶粒长大,提高了未再结晶区温度,增大未再结晶区变形量,极大增加了晶界、变形带等缺陷面积,使得最终组织得以细化;同时,低碳及控冷工艺,消除了珠光体带状偏析。综合分析,晶粒细化及组织均匀化是热连轧板韧性大幅度提高的主要原因。

从TMCP热连轧与传统轧制钢板焊接接头性能对比试验结果可看出,热连轧钢板焊接性能,特别是接头韧性明显好于传统轧制钢板的。热连轧板接头良好的性能主要来源于基体组织及性能的改善,热连轧板由于碳含量低,碳当量下降,接头冲击性能,特别是热影响区韧性好,淬硬程度低;研究表明^[5-6],母材的合金化方式及其组织状态对接头热影响区的韧性有重大的影响,要保证热影响区的韧性,除选择合理的焊接线能量外,最主要的是用母材的高韧性和低热敏感性来保证。微合金化效果对母材的强度和韧性有很大的影响,同时对其焊接热影响区的韧性影响很大。试验用热连轧钢板通过低碳微合金成分设计及先进TMCP工艺使得组织细小均匀,钢质纯净,夹杂物细小并分布均匀。从接头组织来看,焊缝中含Ti氧化物夹杂、Nb、Ti微合金析出物弥散分布于奥氏体晶内,促进了晶内细晶铁素体形核,抑制晶界粗大魏氏组织铁素体及先共析铁素体形成,增加了晶内针状铁素体的体积分数。热连轧板粗晶区组织更加细小,细小粒状贝氏体组织分割了粗大魏氏组织铁素体板条,阻碍

裂纹扩展的有效晶粒尺寸减小。同时,组织中碳化物及M-A组元弥散、细小,分布均匀,使得焊缝及热影响区具有更高的韧性。

4 结论

①)TMCP热连轧Q345R压力容器钢板具有优良的力学性能,钢板屈服强度高,塑性好,特别是冲击韧性较传统轧制钢板的提高2~3倍。

②)TMCP热连轧Q345R压力容器钢板具有良好的焊接性,接头冲击韧性大幅度提高,焊缝组织针状铁素体含量多,粗晶区魏氏组织铁素体较少、组织较细,淬硬程度低。

③)热连轧钢板良好的性能来源于低碳微合金化处理及TMCP工艺控制,使得材料碳当量降低,基体组织得以细化及均匀化。

参考文献:

- [1] 张亨金,卫英慧,刘东风,等.超细晶粒Q235钢板力学性能和强韧化机理研究[J].太原理工大学学报,2006,37(6):667-669.
Zhang H J, Wei Y H, Liu D F, et al. Study on mechanical properties and strengthening and toughening mechanism of ultrafine grained Q235 steel plates [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(6): 667-669.
- [2] 张晶波.TMCP工艺生产36kg级高强度船板研究[J].中厚板,2009,15(2):16-18.
Zhang J B. Study on 36kg high strength hull plate produced by TMCP [J]. Wide and Heavy Plate, 2009, 15(2): 16-18.
- [3] 朱伏先,李艳梅,刘彦春,等.控轧控冷条件下Q345厚板的生产工艺研究[J].钢铁,2005,40(6):32-37.
Zhu F X, Li Y M, Liu Y C, et al. Study on production of Q345 plate by controlled rolling and cooling [J]. Iron and Steel, 2005, 40(6): 32-37.
- [4] 柴锋,杨才福,张永权,等.含铜时效钢焊接粗晶区组织与韧性分析[J].焊接学报,2006,27(6):56-60.
Chai F, Yang C F, Zhang Y Q, et al. Coarse-grained heat affected zone microstructure and toughness of copper-bearing age-hardening steels [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(6): 56-60.

- [5] 辛希贤,高惠临,徐学利,等.西部管线用钢焊接粗晶区的韧性研究[J].焊管,1996,19(6):10—14.
Xin X X, Gao H L, Xu X L, *et al.* Studying on toughness of welded coarse grain zone in west pipeline [J]. Welded Pipe and Tube, 1996, 19 (6) : 10—14.
- [6] 徐学利.管线钢焊接粗晶区韧性控制因素研究[J].石油工程建设,2003,29(8):1—2.
Xu X L. Research of control factors for tenacity at thick crystal welding area of pipeline steel [J]. Petroleum Engineering Construction, 2003, 29 (8) : 1—2.

编辑:房威)

加入“常州精密钢管博客官方知识星球”即可免费下载所有的专业技术文档!

常州精密钢管博客 知识星球

专业的 钢铁知识 钢管知识 热处理知识 钢铁行业资讯 分享网站

官方网站: <http://www.josen.net>

微信扫码加入星球

 知识星球

