

硼对低温球罐用钢 07MnNiMoVDR 50 mm 板组织与力学性能的影响

王黎¹ 吴涛²

(1 内蒙古伊泰集团有限公司,鄂尔多斯 017000; 2 舞阳钢铁有限责任公司科技部,舞钢 462500)

摘要 低温球罐用钢 07MnNiMoVDR (/%: 0.06 ~ 0.08C, 0.20 ~ 0.30Si, 1.50 ~ 1.60Mn, 0.30 ~ 0.40Ni, 0.10 ~ 0.15Cr, 0.18 ~ 0.25Mo, 0.04 ~ 0.05V, 0.02 ~ 0.04Al) 50 mm 板由 100 t UHP EAF-LF-300 mm × 2 000 mm CC-4 辊可逆轧机轧制工艺生产。研究了 0 ~ 0.002 0% B 对该钢 900 °C 淬火-620 °C 回火的 50 mm 板组织和力学性能的影响。结果表明,加硼能显著提高钢板淬透性,以钢板心部得到均匀贝氏体为主的组织;当硼含量超过 0.001 5% 时,组织粗大并有混晶出现,冲击功下降,抗拉强度 750 MPa 超出标准上限(730 MPa)。当钢中硼含量控制在 0.000 5% ~ 0.001 5% 时钢板有良好的强韧性匹配,抗拉强度 R_m 为 630 ~ 690 MPa,冲击功 140 ~ 275 J,满足标准要求。

关键词 硼 低温球罐用钢 07MnNiMoVDR 50 mm 板 组织 力学性能

Effect of Boron on Structure and Mechanical Properties of 50 mm Plate of Steel 07MnNiMoVDR for Cryogenic Spherical Tank

Wang Li¹ and Wu Tao²

(1 Inner Mongolia YiTai Group Co Ltd, E' erduosi 017000; 2 Technical Center, Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Wugang 462500)

Abstract The 50mm plate of steel 07MnNiMoVDR (/%: 0.06 ~ 0.08C, 0.20 ~ 0.30Si, 1.50 ~ 1.60Mn, 0.30 ~ 0.40Ni, 0.10 ~ 0.15Cr, 0.18 ~ 0.25Mo, 0.04 ~ 0.05V, 0.02 ~ 0.04Al) for cryogenic spherical tank is produced by 100 t UHP EAF-LF-300 mm × 2 000 mm CC-four-high reversing mill rolling process. The Effect of 0 ~ 0.002 0% B on structure and mechanical properties of 50 mm plate of the steel quenched at 900 °C-tempered at 620 °C has been studied. Results show that adding boron can obviously increase hardenability of plate to get homogeneous major bainite structure; as the boron content in steel is more than 0.001 5%, the structure coarsens with occurrence of mixing grains led to impact energy decreasing and tensile strength of steel (750 MPa) larger than the upper limit of standard (730 MPa). As the boron content in steel is controlled in 0.000 5% ~ 0.001 5%, the steel plate has excellent strength-toughness matching i. e. tensile strength 630 ~ 690 MPa and impact energy 140 ~ 275 J to meet the standard requirement.

Material Index Boron, Steel 07MnNiMoVDR for Cryogenic Spherical Tank, 50 mm Plate, Structure, Mechanical Properties

07MnNiMoVDR 是一种调质型低温压力容器用钢板,具有高强度、高韧性、低焊接裂纹敏感性的特点,国家标准 GB19189-2003 中规定压力容器用调质高强度钢板 $P_{cm} \leq 0.21\%$, 检验板厚 1/4 处力学性能。随着容器设计、建造对钢板等原材料质量等级提出越来越高的要求,国内一些设计院提出检验板厚 1/2 处性能的要求,由于标准对裂纹敏感性系数 (P_{cm}) 和碳当量的限制,厚钢板(板厚 > 40 mm)心部很难被淬透,回火后强度、韧性难以匹配,由于硼元素能显著提高钢板淬透性,而且对 P_{cm} 影响较小,在低碳钢中加入少量的硼,能显著降低转变温度和扩大贝氏体形成的冷却速率范围,提高钢的淬透性,然而由于硼元素的加入,可能对低碳贝氏体钢的低温韧性产生较大的负作用。目前,关于加入硼钢对韧性是否有害观点不一致^[1]。通过研究硼含量对 07MnNiMoVDR 钢板热处理状态下的组织与性能的影响,探索出合适的硼元素添加量,再辅以合适的调

质工艺,保证了钢板良好的强韧性匹配。

1 试验材料与方法

试验钢种为 07MnNiMoVDR,化学成分和力学性能要求见表 1。

根据 GB19189-2003 规定,确定试验所用 07MnNiMoVDR 基本成分(质量分数)为(%) : 0.06 ~ 0.08C、0.20 ~ 0.30Si、1.50 ~ 1.60Mn、0.30 ~ 0.40Ni、0.10 ~ 0.15Cr、0.18 ~ 0.25Mo、0.04 ~ 0.05V、0.02 ~ 0.04Al,在此成分基础上,根据硼铁中硼的含量及冶炼时收得率,设计了 5 组不同硼含量的试样(与实际硼含量略有偏差): 1[#](没有加硼)、2[#](0.000 5%)、3[#](0.001 0%)、4[#](0.001 5%)、5[#](0.002 0%)。

采用 100 t 超高功率电弧炉冶炼,LF 精炼并通过真空脱气后,试验的 5 炉钢硼的实际成分,1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#] 试样分别为 0、0.000 5%、0.001 1%、0.001 4%、0.002 1%,真空前采用铝脱氧固氮后加

表 1 低温球罐用钢 07MnNiMoVDR 的化学成分和力学性能要求

Table 1 Requirement for chemical composition and mechanical properties of steel 07MnNiMoVDR for cryogenic spherical tank

化学成分/%										$P_{cm}/\%$	R_{eH}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	-50℃ 横向冲击功 A_{KV}/J
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V						
≤ 0.09	0.15 ~ 0.40	1.20 ~ 1.60	≤ 0.015	≤ 0.005	0.20 ~ 0.50	≤ 0.30	0.10 ~ 0.30	0.02 ~ 0.06	≤ 0.21	≥ 490	610 ~ 730	≥ 17	≥ 80	

注:(1)07MnNiMoVDR 试验钢的焊接裂纹敏感系数($P_{cm}/\%$): $P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$

(2)为改善钢板力学性能,可添加表 1 之外的其他微合金元素。

入硼,中间包钢水容量为 30 t,采用 300 mm × 2 000 mm 断面连铸机连铸成材,经四辊可逆式轧机轧成 50 mm 厚钢板,并通过调质处理:辊压式淬火炉淬火,加热温度 900℃,采用 PLC 自动控制模型加热,高压段冷却速度大于 30℃/s,并在低压段摇摆冷却至室温;620℃回火,总加热时间 3 min/mm。用 8035 型万能试验机和 JBC2602 全自动冲击试验机进行拉伸和冲击试验。用 MM6 金相显微镜观察试样显微组织。

2 试验结果

2.1 不同硼含量对钢板性能的影响

不同硼含量的钢板经热处理后,在板厚 1/2 处取样,加工成试样进行拉伸和 -50℃ 冲击试验。从图 1 可以看出,随硼含量增加,钢板屈服、抗拉强度逐渐升高,当硼含量达 0.002 1% 时,钢板抗拉强度为 750 MPa,已超出标准上限要求(标准 610 ~ 730 MPa),而冲击韧性则表现为先升高后下降的趋势。

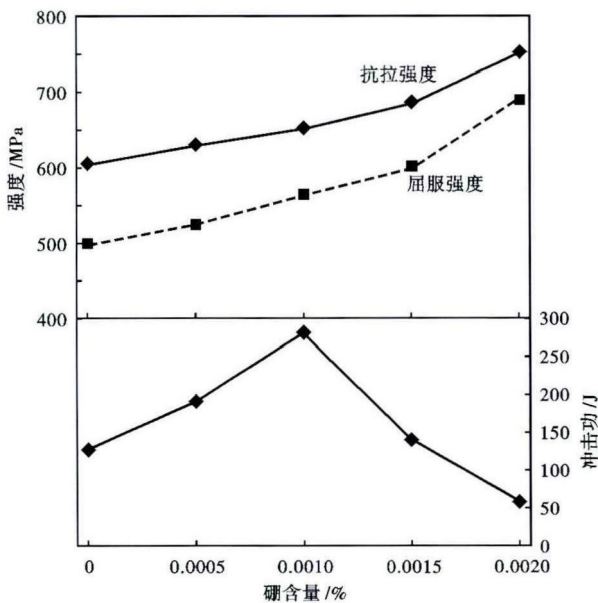


图 1 硼含量对低温球罐用钢 07MnNiMoVDR 强度和冲击功的影响

Fig. 1 Effect of boron content on strength and impact energy of steel 07MnNiMoVDR for cryogenic spherical tank

2.2 不同硼含量对钢板组织的影响

图 2 为不同硼含量钢板板厚 1/2 处金相组织照片,图 2(a) 没有加硼的组织为贝氏体 + 铁素体 + M-A 岛混合组织,晶粒度为 8 级。出现该组织主要原因是受冷却能力及碳当量限制,钢板心部很难淬透,发生了中高温组织转变,产生混合组织。图 2(b ~ d) 硼含量分别为 0.000 5%、0.001 1%、0.001 4%,组织类型为贝氏体 + 少量铁素体,晶粒度 8 级。图 2(e) 硼含量为 0.002 1%,组织为贝氏体组织,钢板晶粒度严重不均匀,为 5 ~ 5.5 级,存在明显的晶粒粗大,具体见表 2。

试验结果表明,随着设计硼含量的增加,钢板心部由贝氏体 + 铁素体 + M-A 岛演变为均匀的单一贝氏体组织,而当设计硼含量大于 0.001 5% 时晶粒度级别呈下降趋势。

3 分析与讨论

3.1 硼对组织的影响

微量硼能使钢的淬透性显著提高的看法有:

(1) 奥氏体在淬火冷却过程中硼原子偏聚于晶界上,降低晶界能,抑制了铁素体的形核,推迟铁素体的形成,同时晶界上的硼原子也阻滞晶界原子的扩散,使铁素体在晶界上扩散形核减缓,从而增加淬透性^[2];

(2) 只有处于固溶体中的硼才对淬透性产生有利的影响,为了提高淬透性,固溶体中硼的溶度应不低于 0.000 2%,考虑到硼的存在会降低晶界能,故可以推测,硼的最大含量将出现在缺陷最多处,此处

表 2 硼含量对低温球罐用钢 07MnNiMoVDR 组织的影响
Table 2 Effect of boron content on structure of steel 07MnNiMoVDR for cryogenic spherical tank

试样	设计的硼含量/%	实际硼含量/%	晶粒度/级	组织状态
1#	0	0	8.5	贝氏体 + 铁素体 + 粗大 M-A 岛
2#	0.000 5	0.000 5	8	贝氏体 + 少量铁素体 + 细小弥散分布 M-A 岛
3#	0.001 0	0.001 1	8	贝氏体 + 少量铁素体
4#	0.001 5	0.001 4	7	贝氏体
5#	0.002 0	0.002 1	5	粗大贝氏体

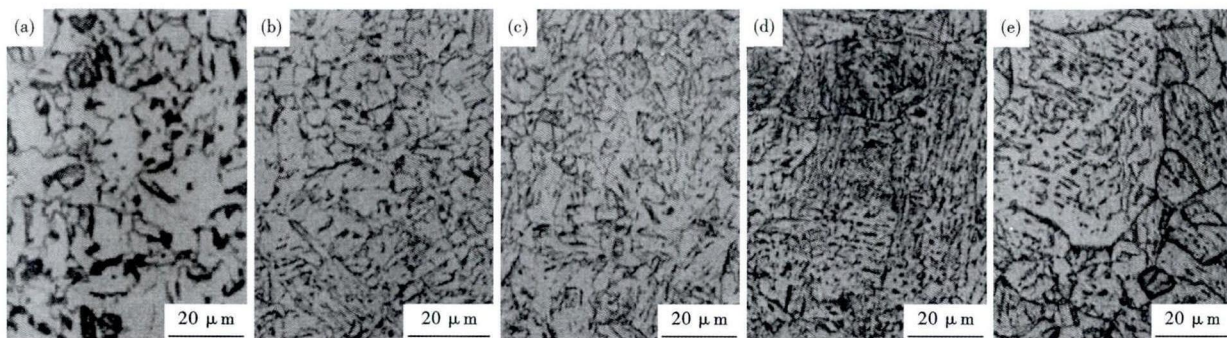


图2 硼对低温球罐用钢 07MnNiMoVDR 50 mm 板组织形貌的影响, B/% : (a) 0; (b) 0.000 5; (c) 0.001 1; (d) 0.001 4; (e) 0.002 1
Fig. 2 Effect of boron on morphology of structure of steel 07MnNiMoVDR 50 mm plate for cryogenic spherical tank, boron content /% : (a) 0; (b) 0.000 5; (c) 0.001 1; (d) 0.001 4; (e) 0.002 1

是最可能形成铁素体的地方。因此,在一定淬火条件下,为了获得给定成分钢的最大淬透性,要求溶解的硼含量不低于为降低铁素体析出之晶界能所必须的硼含量。根据 50 mm 厚 07MnNiMoVDR 钢板加硼量淬透性试验结果,有效的硼含量不应低于 0.000 5%,才能保证钢板心部以均匀的贝氏体组织为主。

3.2 硼对晶粒度的影响

钢中随硼的质量分数增加,奥氏体晶粒尺寸明显增大,主要原因是由于冶炼时加入的硼含量或添加工艺不当,而造成钢中 B 与 N 形成 BN,减少了 AlN 的生成数量,在升温过程中 BN 先溶解于奥氏体,根据第二相粒子钉扎晶界时解钉的理论^[3],由于钢中细小氮化铝大量减少,减弱了细小氮化铝对均热过程中原始奥氏体晶粒、轧制过程中奥氏体再结晶晶粒以及相变后贝氏体长大的钉扎作用,从而促进了热轧板晶粒的长大。钢板在随后的热处理过程中遗传了热轧态粗大的晶粒,造成转变后的贝氏体粗大^[4],这是造成冲击韧性差的主要原因之一。

加入过多的硼对低碳贝氏体钢的韧性恶化,同时体现在生成的未溶解硼碳化物在晶界上偏聚,由于晶粒粗大,晶界面积减少,导致硼碳化物聚集长大引起了晶界脆化,而且硼碳化物容易引起微裂纹,受到外力后极易扩展,造成冲击韧性恶化^[5]。

3.3 组织与性能关系

07MnNiMoVDR 属于调质型低碳贝氏体钢,钢板正常组织为贝氏体组织,当钢板厚度规格较厚时,受化学成分、 P_{cm} 和冷却能力限制,心部很容易出现贝氏体 + 铁素体 + M-A 岛的混合组织, M-A 为高碳的硬相组织,颗粒较大时对基体有割裂作用,受力过程中容易产生裂纹,并提供裂纹扩展的通道^[6],导致钢板冲击韧性下降,而产生的块状铁素体是强度

偏低的主要原因。通过添加适量的硼,使钢板心部产生均匀的贝氏体组织,同时为了避免由于添加数量过多或工艺不当而造成的晶粒粗大或晶界处硼相的产生,对添加的数量进行控制,后续再辅以合适的调质工艺使钢板力学性能达到良好的强韧性匹配。

4 结论

(1) 加 0.000 5% ~ 0.001 5% 的硼能显著提高 07MnNiMoVDR 钢板的淬透性,使钢板心部淬火后获得均匀的贝氏体为主的组织;加硼量 $\geq 0.002 0\%$ 时,硼有诱发晶粒粗化的倾向,是导致 07MnNiMoVDR 钢板冲击韧性降低的主要原因之一。

(2) 07MnNiMoVDR 为低碳贝氏体钢,厚板热处理后心部存在混合组织是强韧性很难匹配的主要原因,加入 0.000 5% ~ 0.001 5% B 时,钢板强韧性匹配良好。

参考文献

- [1] 齐俊杰,黄运华,张跃. 微合金化钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:68-69.
- [2] 黄维刚,方鸿生,郑燕康,等. 硅对 Mn-B 系空冷贝氏体组织与性能的影响[J]. 金属热处理学报,1997(11):8-13.
- [3] 王小燕,肖丽俊,仇圣桃,等. 硼微合金化对 CSP 生产低碳铝镇静钢带性能的影响[J]. 中国冶金,2006,16(7):28-29.
- [4] 赵爱民,毛卫民,孙峰,等. 硼对耐磨球墨铸铁组织和力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2001,13(1):60-63.
- [5] 贺信莱,褚幼义,张秀林,等. 硼在钢中的分布[J]. 金属学报,1977,13(4):235-244.
- [6] 蔡建伟. HSLA 钢中 M-A 组织的形成动力学及其对力学性能的影响[D]. 秦皇岛:燕山大学材料系,2007:66-71.

王黎(1970-),男,高级工程师,1994 年内蒙古工业大学毕业,压力容器设备设计制造研究。

E-mail:wangliyt@126.com

吴涛(1982-),男,工程师,2008 年武汉理工大学毕业,中厚钢板开发及工艺研究。

收稿日期:2013-07-11