

碳含量对 500 MPa 级特厚钢板组织性能的影响

杨跃辉, 商兴国, 张晓娟, 苑少强

(唐山学院 机电工程系, 河北 唐山 063000)

摘要: 分别采用常规碳和低碳的成分设计开发出了屈服强度 500 MPa 级的特厚调质钢板, 对比分析了其组织和性能的差异, 结果表明: 采用常规成分设计时, 调质处理后获得回火索氏体, 具有高的强韧性匹配, 因此更适合高强度、大厚度产品的生产; 采用低碳贝氏体的成分设计时, 经较低温度回火能获得较高的低温韧性, 但力学性能的热稳定性较差, 因此更适用于较低强度级别的特厚板或薄规格的高强板的生产。

关键词: 特厚钢板; 碳含量; 低碳贝氏体钢; 组织性能; 调质工艺

中图分类号: TG142.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2019)06-0039-04

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2019.06.010

Effect of Carbon Content on the Microstructure and Properties of Super-thick Steel Plate with Yield Strength 500 MPa

YANG Yue-hui, SHANG Xing-guo, ZHANG Xiao-juan, YUAN Shao-qiang

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: The composition designs with conventional carbon and low carbon content are used respectively to develop a super-thick quenched-and-tempered steel plate with yield strength of 500 MPa, then the difference of the microstructure and properties between them is analyzed. The results shows that, with the conventional composition design, the tempered sorbite is obtained with top match of strength and toughness after quenching and tempering treatment, which is more suitable for the products with high strength and great thickness; with the low-carbon bainite composition design, the excellent low-temperature toughness could be obtained through tempering at lower temperature, but the thermal stability of mechanical properties is poor, which is more suitable to the production of the super-thick steel plate with lower strength or the thin high-strength plate.

Key Words: super-thick steel plate; carbon content; low-carbon bainite steel; microstructure and property; quenching and tempering treatment

0 引言

长期以来, 采用调质工艺生产的高强钢, 由于具有很高的综合力学性能, 主要用于大尺寸、

大截面部件^[1-3], 此类钢一般含有相对较高的碳含量(0.10%~0.20%), 而且需添加大量的 Cr, Mo, Ni 等合金元素来提高其淬透性, 进而通过

基金项目: 河北省自然科学基金—钢铁联合研究基金项目(E2019105101); 唐山学院科研创新项目

作者简介: 杨跃辉(1980—), 男, 河北元氏人, 副教授, 博士, 主要从事金属强韧化机制及组织调控技术研究。

获得回火索氏体保证钢的强韧性匹配。

近年来,低碳贝氏体钢在石油天然气管线、工程机械、海洋设施、造船、压力容器等领域得到了广泛的应用,被誉为面向 21 世纪的新一代的钢铁材料。随着低碳贝氏体钢生产技术的进步及研究的不断深入,此类钢的生产技术也逐步用于部分特厚高强钢板的生产^[4-5],而且取得了良好的效果,在保持钢强度的前提下,大幅提高了其韧性和焊接性能。但由于特厚板的生产有其显著的特点,特别是轧制和冷却条件与普通板材相差较大,因此低碳贝氏体钢能否在更大范围内替代传统成分设计的调质高强钢还有待进一步研究。本文通过设计常规碳含量和低碳含量两种成分体系的试验钢,来研究两种体系下钢调质工艺的特点,对比分析热处理过程中钢组织和性能的差异,以提出低碳成分高强钢的适用范围。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为国内某钢厂生产的 100 mm 厚钢板,由 300 mm 连铸坯经两阶段控轧轧成。钢的屈服强度不小于 500 MPa, -40 °C 时仍具有优良的冲击韧性。

本次试验钢的成分设计采用两种思路:①采用常规调质钢的成分设计,添加适量的 Cr, Ni, Mo 元素以保证钢的高淬透性,并进行微合金化处理,以期调质处理后得到回火索氏体,保证钢的强韧性;②采用低碳钢的成分设计,碳含量降至 0.08% 以下,添加相对少量的 Cr, Mo, Ni 元素,同样采用微合金化处理,以期调质后获得回火态低碳贝氏体组织,保证钢获得较高的韧性,并通过贝氏体基体的组织强化和微合金元素的析出,保证钢获得较高的强度。试验钢的成分见表 1。

表 1 试验钢的化学成分 wt%

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr, Mo, Ni	Nb, V, Ti
1#	0.14	0.34	1.55	≤0.012	≤0.005	适量	微量
2#	0.08	0.35	1.40	≤0.012	≤0.005	适量	微量

1.2 试验方法

从钢板头部取试样,并在箱式电阻炉中进

行调质试验。1# 试验钢为常规的成分设计,因此采用了较高的回火温度,其范围为 550 ~ 640 °C; 2# 试验钢由于采用了低碳的成分设计,有利于获得较高的韧性和塑性,故采用了更低的回火温度(500 °C),并与高的回火温度(620 °C)进行对比分析,具体工艺如下。

(1) 1# 试验钢: 900 °C 保温 1 h, 水冷 550 °C, 580 °C, 600 °C, 620 °C, 640 °C 保温 2 h, 空冷。

(2) 2# 试验钢: 900 °C 保温 1 h, 水冷 500 °C, 620 °C 保温 2 h, 空冷。

热处理后分别测定钢板 1/4 和中心部的强度、延伸率和 -40 °C 冲击韧性,并取全厚度金相试样,使用显微镜观察钢板金相组织。

2 试验结果及分析

2.1 1# 试验钢的性能及分析

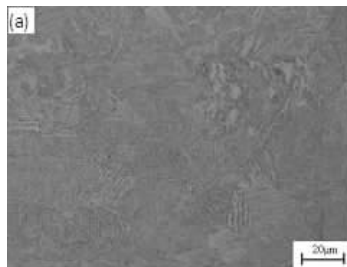
调质处理后 1# 试验钢的性能如表 2 所示。由表 2 可以看出,钢的强度和延伸率均能够达到标准要求,但当回火温度较低时其低温韧性较差,且稳定性较低,存在单值较低的情况。当回火温度升至 600 °C 以上时,钢的低温韧性显著改善,但当回火温度过高(640 °C)时,回复和再结晶导致的软化效果增强,钢的强度下降较快。

表 2 1# 试验钢的性能

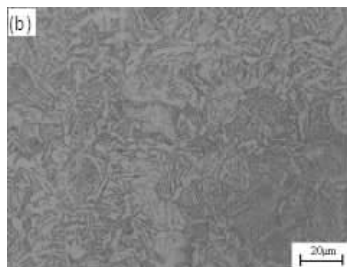
回火温度 /°C	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 (%)	位置	-40 °C 冲击功/J		
					值 1	值 2	值 3
550	583	671	22.4	1/4	158	191	132
				1/2	27	58	85
580	516	617.1	23	1/4	114	120	179
				1/2	134	185	105
600	533	626.5	23.6	1/4	87	144	203
				1/2	111	184	124
620	530	623	23	1/4	211	225	129
				1/2	139	100	149
640	504.9	596.5	24.1	1/4	160	200	225
				1/2	298	137	236

图 1 为 1# 试验钢淬火后的金相组织。从图 1 中可以看出,从钢的表面到中心,组织由马氏体转变为贝氏体,由于贝氏体中含有较多的碳化物富碳相,必然导致冲击韧性变差。增加钢中的碳含量能够使钢强度上升,但由于钢的淬透性仍较低或淬火过程中冷速较慢,组织生成了一定量的贝氏体,而贝氏体中的碳化物呈

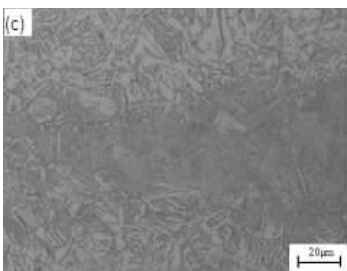
连续分布,导致钢韧性较差,即便经过回火,碳化物的分布状况也很难发生根本性的改变,因此在设定的回火温度区间内,钢的韧性无法得到明显改善。只有进一步提高钢的淬透性,进而获得以马氏体为主的组织(回火后得到回火索氏体),才能保证较好的强韧性匹配,因此通过成分的优化,提高淬透性,1# 试验钢的韧性有进一步改善的可能。



(a) 表面



(b) 板厚 1/4



(c) 板厚 1/2

图 1 1# 试验钢淬火后的金相组织

2.2 2# 试验钢的性能及分析

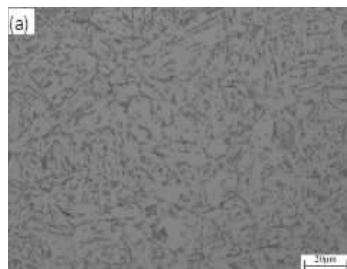
调质处理后 2# 试验钢的性能如表 3 所示。由表 3 可以看出,经过 500 °C 和 620 °C 回火后试验钢的强度和延伸率与 1# 钢基本处于同一水平,但对 1# 钢而言,随回火温度升高,强度总体呈下降的趋势,冲击韧性在 620 °C 回火时达到最优。2# 钢则呈现出不同的变化趋势,与 500 °C 回火相比,620 °C 回火后钢的强度

基本未降低,这是由于 2# 钢中添加了较多的微合金元素,这些元素在 620 °C 回火过程中大量析出,产生了强烈的析出强化效果。同时,由表 3 中也可以看出,620 °C 回火后钢的低温韧性反而变差。

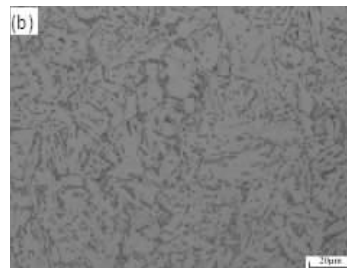
表 3 2# 试验钢的性能

回火温度 /°C	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 (%)	位置	-40 °C 冲击功/J		
					值 1	值 2	值 3
500	558	656	20.0	1/4	237	186	211
				1/2	183	230	219
620	569	641	23.3	1/4	35	25	33
				1/2	250	222	48

图 2 给出了 2# 试验钢淬火后的金相组织。由图 2 可以看出,组织以粒状贝氏体为主,晶粒度仅为 6.5~7 级,晶粒粗大且不均匀,晶内的 M/A 也较粗大,且 M/A 边角呈尖锐状,变形过程中在边角处形成大的应力集中,导致钢的韧性降低,且高温回火后(620 °C),粗大的 M/A 分解出大量集中分布的碳化物,导致钢的低温韧性较低,且易于出现单值较低的现象^[6];但当回火温度较低时(500 °C),M/A 只分解出细小、弥散的碳化物,故对钢韧性的影响较小^[7-8]。由此可见,采用低碳成分设计,且组织中含有粗大 M/A 时,经较低温度回火可以获得高的冲击韧性,但钢组织性能的热稳定性变差。



(a) 板厚 1/4



(b) 板厚 1/2

图 2 2# 试验钢淬火后的金相组织

由上述结果可以看出,采用低碳成分设计生产特厚高强钢板时,需大量添加 Ni, Cr, Mo 等合金元素来获得较高的强度(碳是提高钢的淬透性、强度特别是抗拉强度最有效的元素,因此碳含量的降低使得获得更高的抗拉强度更加困难),不但导致生产成本大幅提高,且在钢板中心部易于出现粗大的 M/A,经过较高温度回火后,M/A 区域碳化物的大量析出会导致钢的低温韧性恶化。因此,在现有的淬火冷却条件下,此种成分设计不适合生产厚度超过 100 mm,屈服强度 500 MPa 以上的钢产品。在此类产品的生产过程中,采用常规碳含量设计并进行调质处理能够获得更优良的综合力学性能。

3 结论

(1)采用常规碳和低碳的成分设计均能够生产出性能满足要求的钢产品,但两种成分的钢所采取的热处理工艺有较大的差异。

(2)采用常规碳含量的钢,通过高温回火获得回火索氏体能得到良好的强韧性匹配,由于碳含量对淬透性和强度的提高作用非常明显,因此贵重合金元素的加入量可适当降低,这种成分设计适合于高强度级别、大厚度钢板的生产。

(3)采用低碳成分设计的钢,由于淬火态组织较为粗大,M/A 也相应粗化,在较低温度回火后即能获得较高的低温韧性,而再升高回火温度 M/A 区域碳化物则会集中析出,导致韧

性恶化,因此经过 500 °C 回火后钢就能够获得优良的综合力学性能。

参考文献:

- [1] 高志玉,潘涛,王卓,等.高淬透性硼微合金化特厚板钢成分优化设计[J].工程科学学报,2015,37(4):447-453.
- [2] 帅勇,孙乐飞,闫博,等.回火工艺对海洋工程用钢 E690 组织与性能的影响[J].金属热处理,2016,41(12):97-101.
- [3] 胡锋,张晓雪,车马俊,等.心部组织对特厚超高强海工钢力学性能的影响[J].金属热处理,2018,43(1):107-112.
- [4] 张志军,高雅,王少义.TMCP+回火型高性能耐候桥梁钢 A709M-HPS-485WT2 的研究开发[J].宽厚板,2017,23(5):1-4.
- [5] 杨跃辉,赵英利,许磊,等.低碳贝氏体型特厚调质高强钢强韧化机理研究[J].热加工工艺,2013,24(10):180-183.
- [6] 杨婷,苏航,罗小兵,等.高强度船体钢淬火工艺下截面组织与性能均匀性[J].钢铁研究学报,2017,29(7):583-589.
- [7] 刘东雨,方鸿生,白秉哲,等.我国中低碳贝氏体钢的发展[J].江苏冶金,2002,30(3):1-5.
- [8] 洪良,左秀荣,姬颖伦,等.厚规格 X80 管线钢低温断裂行为研究[J].材料研究学报,2018,32(1):33-41.

(责任编辑:夏玉玲)

(上接第 8 页)

- [10] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3):900-906.
- [11] 韩京清,黄远灿.二阶跟踪-微分器的频

率特性[J].数学的实践与认识,2003,33(3):71-74.

- [12] 王新华,陈增强,袁著祉.基于扩张观测器的非线性不确定系统输出跟踪[J].控制与决策,2004,19(10):1113-1116.

(责任编辑:李秀荣)