

HB400 耐磨钢的生产工艺研究

王生朝¹, 蔡素莉²

(1. 湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学 图书馆, 湖南 株洲 412007)

摘要: 耐磨钢钢板不仅要求具有较高强度及硬度, 而且还要有一定韧性和良好的焊接性, 据此设计了 HB400 调质型耐磨钢的化学成分, 确定了冶炼及轧制工艺。结果表明, HB400 高强耐磨钢板经调质处理后, 平均布氏硬度为 400 HBW, 钢板具备良好的冷弯性能, 同时具备非常良好的可焊性, 各项指标均达到设计要求。

关键词: 耐磨钢; 成分设计; 淬火; 回火

中图分类号: TG335.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)06-0001-04

Investigation of Production Technology of HB400 Wear-Resistant Steel

Wang Shengzhao¹, Cai Suli²

(1. School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Library, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: According to requirements of not only high strength and hardness but also a certain toughness and good weldability of wear-resistant steel plate, the chemical composition of quenched and tempered HB400 wear-resistant steel is designed and the smelting and rolling processes are determined. The results show that the average Brinell hardness of high strength wear-resistant steel HB400 plate reaches 400HBW and has very good cold bending and weldability performance after being quenched and tempered. The indicators meet the design requirements.

Keywords: wear-resistant steel; composition design; quenching; tempering

0 引言

HB400 级耐磨钢被广泛用于制造矿山、筑路、冶金、发电和水泥等工程机械中的耐磨部件, 此类钢板不仅要具有较高强度及硬度, 而且还要有一定韧性和良好的焊接性, 因此, 要求其钢质纯净, 内部组织致密, 板形控制严格, 硬度要求高且均匀。当前国外生产的耐磨钢板主要有: 瑞典奥克隆德生产的 Hardox 系列, 硬度达 HB400, HB500, HB550 及 HB600; 德国迪林根的 400V 和 500V; 德国蒂森克虏伯 XAR400, XAR450, XAR500; 日本 JFE-EH360, EH400 和 EH500 等。国内也有鞍钢、武钢、宝钢等多个厂家生产高强度耐磨钢。本文将介绍 HB400 级耐磨钢的生产情况。

1 成分设计

耐磨钢的成分设计充分考虑了其特性和要求, 依据国内外耐磨钢生产厂家公布的 HB400 级标准(见表 1)设计其成分。耐磨钢中 C 的含量直接影响钢的硬度、韧性、强度、淬硬性和焊接性能。为保证钢的硬度、韧性和耐磨性, 同时考虑钢的焊接性能, 取 $w(C)=0.15\% \sim 0.21\%$ 。耐磨钢中 Si 的含量可提高钢中固溶体的强度, 还可强烈抑制和延缓过冷奥氏体的碳化物分解, 提高奥氏体稳定性^[1]。若 Si 含量过高, 会影响钢的硬度, 因此, 设计时取 $w(Si)=0.2\% \sim 0.7\%$ 。Mn 作为钢的主要强化因素, 不利影响是增大钢的过热敏感性, 晶粒易粗大; 另外, 还增大回火脆性。因此, Mn

收稿日期: 2010-09-18

通信作者: 王生朝(1970-), 男, 河南南阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为材料加工工程,

E-mail: super_wsz@163.com

含量不宜过高,以 $w(\text{Mn})=1.00\% \sim 1.50\%$ 为宜。 Cr 、 Mo 、 Ni 对钢的强化、塑性、低温冲击韧性和淬透性有重要影响,一般取 $w(\text{Cr}) \leq 1.00$, $w(\text{Mo}) \leq 0.50$, $w(\text{Ni}) \leq 0.80$ 。将 P 和 S 等有害元素含量控制在现有工艺装备可达到的最低值。通过采取微合金化手段(添加 Nb 、 V 、 Ti),进一步细化晶粒。通过加入 Nb 和 V 微量元素,可提高奥氏体再结晶温度,以便在后期高温轧制过程中获得良好的 TMCP (thermo mechanical control process,称为热机械控制工艺)效果。另外, Nb 和 V 复合加入

可有效提高钢板强韧性的最佳匹配^[1-2]。通过对成分的优化,化学成分控制见表2。

表1 HB400 耐磨钢企业标准

Table 1 Enterprise standard of wear-resistant steel HB400

国内企业	日本 JFE	瑞典 SSAB	德国 DILLIDUR	日本住友 SUMIHARD
NM400 系列	JFE-EH400A	HARDOX400	400V	K400

表2 HB400 耐磨钢的熔炼控制成分

Table 2 Melting control components of wear-resistant steel HB400

项目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti	Al	B
熔炼成分	0.17~0.22	≤ 0.70	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.010	≤ 0.08	≤ 1.40	≤ 0.50	0.040	0.017~0.050	0.022~0.030	0.03	≤ 0.004

2 生产工艺

2.1 炼钢工艺

工艺流程如下:电炉炼钢→LF精炼→真空处理→连铸→铸坯清理→铸坯加热→轧制→ACC→钢板矫直→淬火加回火处理→钢板切割(取样)→检查或检验→入库。

钢板的熔炼成分控制应符合表2的规定。电炉出钢条件: $w(\text{C}) \leq 0.07\%$, $w(\text{P}) \leq 0.007\%$ 。LF炉精炼:保证全程吹 Ar 良好;白渣保持时间 $t_1 \geq 30 \text{ min}$,成分和温度合适,扒渣。

采用电炉冶炼,严格控制钢水纯净度,特别是控制钢水中磷和碳的含量,一般越低越好。同时,为提高钢水中合金的回收率,进一步降低钢水有害元素含量,在精炼过程,通过利用造渣技术,充分保持白渣时间(一般超过40 min),清除或降低钢水中氧、硫的含量,保证钢水还原气氛,确保合金回收。同时,为有效地清除钢水中的夹杂物,在钢水中通入惰性气体(如:氩气),对钢水进行充分搅拌,保证夹杂物充分上浮,确保夹杂物被有效清除,进一步提高钢水纯净度。为降低钢水中气体含量,通过真空处理,保持足够的抽真空时间。

2.2 连铸工艺

液相线的温度:板厚 $d \leq 50 \text{ mm}$ 的钢板,其 $T_{\text{LL}} = 1515 \text{ }^\circ\text{C}$;板厚 $d > 50 \sim 150 \text{ mm}$ 的钢板,其 $T_{\text{LL}} = 1512 \text{ }^\circ\text{C}$ 。中间包过热度控制范围 $20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$,连铸拉速相比其它大生产钢种要低。铸坯下线堆垛缓冷 $20 \sim 24 \text{ h}$ 后温送轧钢。

为保证铸坯的内在质量,在连铸工艺设计时,强调合理制定中间包过热度,控制铸坯内部偏析和缩孔的产生,一般是在钢的液相线温度以上 $20 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同

时,结合铸坯厚度和铸机状况,选择合理的拉坯速度,通常选择比低碳低合金钢种系列降低 0.05 m/min 。通过采用铸坯堆垛缓冷措施,减少铸坯内部应力。

2.3 轧制工艺

2.3.1 钢坯加热

加热工艺执行II组钢的规定。当采用连续加热方式的炉体时,为控制钢板不平度,钢坯加热必须均匀、烧透,应尽可能保证钢坯在炉子中“均热段”的时间,一般可根据炉子的加热能力选择 $6 \sim 8 \text{ min/cm}$,总时间 $9 \sim 12 \text{ min/cm}$;充分保证合金强化元素在奥氏体中的固溶效果。

2.3.2 轧制

钢板采用“热机械轧制”,即II型控轧模式,以细化晶粒、沉淀强化和变形强化为主要目的,进一步提高钢板的强韧性。

在奥氏体的再结晶区进行多道次大变形量(每道次变形量必须大于再结晶临界变形量)高温粗轧,通过变形/再结晶反复进行奥氏体的充分细化。此阶段需控制开轧温度和压下量,开轧温度一般控制在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

在奥氏体再结晶区轧制后进入精轧阶段,精轧时,板坯必须保证合适的带温凉钢厚度、开轧温度,通常采用适当增加厚度(一般凉钢厚度为钢板厚度 $+40 \sim 60 \text{ mm}$),进行板坯凉钢,待温度降至奥氏体的不再结晶区时,进行钢板精轧。通过提高轧制力,可增大奥氏体不再结晶区的变形量,使奥氏体充分压扁,在拉长的奥氏体晶粒内产生高密度的变形孪晶和变形带,使奥氏体晶粒内部的变形能和变形缺陷增多,从而有利于提高相变的驱动力,减少带状区域相变温度差,有利于铁素体均匀形核,最终晶粒细化并减少带状组织。同时,微合金元素的碳氮化物因应变诱导析出,提

高铁素体更多转变的形核位置, 在此区域一般开轧温度控制在 900~950 °C。对于终轧温度的控制, 应适当降低终轧温度, 控制奥氏体晶粒的回复软化, 快速冷却到相变并加速转变, 从而有效地细化晶粒。通常将终轧温度控制在接近 Ar₃ 附近, 一般可控制在 760~820 °C^[3-4]。

开坯工艺: 开轧温度 1 050 °C, 终轧温度 ≤ 950 °C, 轧后堆垛缓冷。拆垛后应及时带温清理、切割, 清理切割温度应 ≥ 150 °C。为防止钢坯“裂纹”及“炸裂”, 钢坯清理后, 需及时入炉加热, 严禁冷钢坯入炉加热。

钢板轧制工艺: 采取 II 型控制轧制。其工艺为: 开轧温度 ≥ 1 050 °C, 凉钢厚度为钢板厚度 + 30 mm。II 阶段开轧温度 ≤ 900 °C (其中板厚 15~19 mm 为 ≤ 930 °C; 板厚 12~14 mm 为 ≤ 950 °C; 板厚 ≤ 10 mm 为 ≤ 970 °C), 终轧温度 ≤ 850 °C。

2.4 钢板热处理工艺

为使钢板最大可能转变为马氏体组织, 依据淬火机的能力, 采用水淬工艺, 按设备最大水量控制。淬火工艺加热温度: (930 ± 10) °C。据钢板系列回火试验

表明: 钢板回火温度范围较宽, 在 200~500 °C 温度范围内回火均能满足硬度要求。在 500 °C 以下回火时, 其强度、硬度、塑韧性几乎不发生变化, 具有良好的强韧性, 说明该钢具有较强的回火抗力^[5]。因此, 初步确定回火工艺加热温度为 300~400 °C (目标 320 °C), 保温系数为 4.0~5.0 min/mm, 板厚增加可适当提高回火温度。

3 产品实物质量解剖试验

依据工厂工业化试制标准, 对不同厚度规格的 HB400 高强耐磨钢板进行了钢的纯净度、力学性能、钢板硬度、冷弯性能和组织夹杂物等试验分析工作。

3.1 钢板纯净度

钢板杂质含量控制低, 钢质纯净。各项杂质的质量分数为: $w(P)=0.010\%$, $w(S)=0.002\%$, $w(N)=48 \times 10^{-6}$, $w(H)=1.5 \times 10^{-6}$, $w(O)=14 \times 10^{-6}$ 。

3.2 钢板力学性能

钢板主要力学性能测试数据见表 3。

表 3 力学性能测试数据

Table 3 Mechanical properties of high strength wear-resistant steel HB400

厚度 / mm	质量等级	硬度 HB	拉伸性能				横向冲击能 / J		
			$R_{p0.2}/MPa$	R_M/MPa	$A_{50l}/\%$	$R_{p0.2}/R_M$	常温	0 °C	-20 °C
10	C	420	1 140	1 300	14	0.88	93	55	
15	D	413	1 100	1 190	18	0.92	62	42	28
20	A	393	1 190	1 350	18	0.88	55		
30	D	416	1 190	1 450	13	0.82	43	38	22
35	A	398	1 220	1 360	15	0.9	67		
40	C	380	1 250	1 320	14	0.95	58	55	
50	B	401	1 100	1 430	12	0.77	46	31	
50	A	387	1 120	1 200	12	0.93	45		

注 $R_{p0.2}$ 表示钢板屈服强度; R_M 表示钢板抗拉强度; A_{50l} 表示钢板延伸率; $R_{p0.2}/R_M$ 表示屈强比。

3.3 钢板硬度

钢板主要硬度性能测试数据见表 4。

表 4 硬度检验结果

Table 4 Hardness test results

规格 / mm	各部位硬度检验结果 HB						同板差 HB
	上表层	上 1/4 处	1/2 处	下 1/4 处	下表层	平均值	
20	417	420	423	420	420	420	6
40	415	426	409	415	415	416	11
50	390	388	388	388	393	389	5

3.4 冷弯性能

钢板主要弯曲试验结果见表 5。

表 5 弯曲试验结果

Table 5 Bending test results

板厚 / mm	方向	弯心尺寸 d				
		3.0a	2.5a	2.0a	1.5a	1.0a
20	纵向	○		○		△
	横向	○	○	○	○	△
40	纵向	○				×
	横向	○	○	○	△	

注 ○ 表示无裂纹; △ 表示微小裂纹; × 表示裂纹; a 表示试验钢板的厚度; 冷弯角度为 180°。

3.5 夹杂物和组织的显微分析

钢板夹杂物的显微分析结果见表 6。

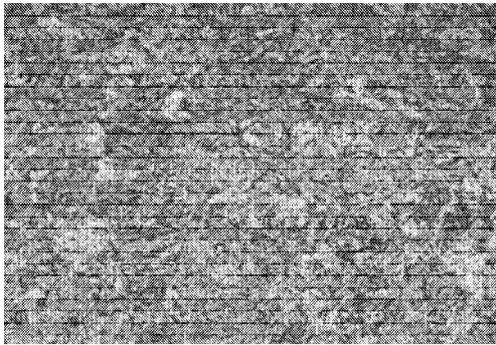
表6 夹杂物显微分析结果

Table 6 Microscopic analysis of inclusion

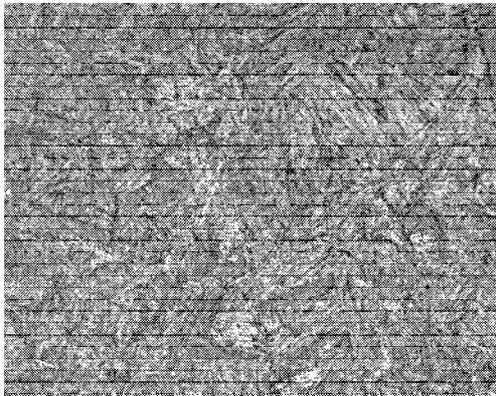
钢板规格 / mm	检验部位	钢板质量等级							
		A		B		C		D	
		粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系
20	表层	0	0	0.5	0	0	0	0	0
	1/4处	0	0	0	1.0	0	0.5	0	1.0

表6显示, 各类非金属夹杂物控制在1.0级以下。

钢板组织控制均匀, 板厚 ≤ 50 mm的钢板表面与1/2处组织保持均匀一致, 为均匀的回火马氏体组织(淬火+回火), 结果见图1。



a) 表面



b) 板厚1/2处

图1 钢板金相组织 (500 ×)

Fig. 1 Microstructure of steel (500 ×)

4 结语

HB400 高强耐磨钢板经调质处理后, 平均布氏硬度为400HBW, 钢板具备良好的冷弯性能, 同时具备非常好的可焊性。钢板各项指标均达到标准要求, 说明从成分设计到冶炼、轧制工艺设计合理, 该项技术具有较强的市场竞争力和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 梁学平. NR400高强度贝氏体耐磨钢板的组织与耐磨性能[J]. 安徽工业大学学报, 2009, 26(4): 350-352.
Liang Xueping. Microstructure and Wear Resistance of NR400 High Strength Bainite Wear-Resistant Steel Plate[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2009, 26(4): 350-352.
- [2] 梁学平. 南钢非调质耐磨钢生产工艺实践[J]. 现代冶金, 2009, 37(4): 30-32.
Liang Xueping. Production Practice of Non-Quenched and Tempered Wear Resistant Steel at Nangang[J]. Modern Metallurgy, 2009, 37(4): 30-32.
- [3] 张亚丽. 调质型耐磨钢 WNM400 的研制开发[J]. 宽厚板, 2008, 14(6): 10-11.
Zhang Yali. Development of Quenched and Tempered Type Wear Resistant Steel WNM400[J]. Wide and Heavy Plate, 2008, 14(6): 10-11.
- [4] 杨军, 李静, 张涛, 等. 无碳化物贝氏体耐磨钢板组织与性能的研究[J]. 钢铁, 2004, 39(7): 62-64.
Yang Jun, Li Jing, Zhang Tao, et al. Study on Structure and Properties of Bainite Wear-Resistance Steel Plate Without Carbide[J]. Iron and Steel, 2004, 39(7): 62-64.
- [5] 邓想涛, 王昭东, 袁国. HB450低合金超高强耐磨钢组织与性能[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(7): 942-943.
Deng Xiangtao, Wang Zhaodong, Yuan Guo. Microstructure and Mechanical Properties of HB450 Ultra-High Strength Low-Alloy Abrasion Resistant Steel[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2010, 31(7): 942-943.

(责任编辑: 李玉珍)