

微合金高强度耐候钢的试验研究

陈庆军¹, 康永林¹, 苏世怀², 张建平², 骆小刚²

(1. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 马鞍山钢铁股份公司技术中心, 安徽 马鞍山 243002)

摘 要: 在实验室试制了 400、460 MPa 级耐候钢, 结果表明, 试验钢屈服强度分别达到 450、550 MPa, 抗拉强度分别达到 545、615 MPa; 400 MPa 级耐候钢的显微组织以铁素体为主, 460 MPa 级的以粒状贝氏体为主; 400 MPa 级的析出物主要是 CuS_2 和 TiN , 主要强化机制是细晶强化、析出强化; 460 MPa 级的析出物主要是 CuS_2 和 $(\text{NbTi})\text{CN}$, 其主要强化机制是细晶强化、析出强化及相变强化。采用电子背散射 EBSD 技术分析了其晶体学取向, 其晶粒间取向主要是大角度晶界。

关键词: 析出; 金相组织; 高强耐候钢; 晶粒取向

中图分类号: TG335.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0449-749X(2005)07-0060-04

Experimental Study on Micro-alloyed High Strength Weathering Steel

CHEN Qing-jun¹, KANG Yong-lin¹, SU Shi-huai², ZHANG Jiar-ping², LUO Xiao-gang²

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Technology Center of Maanshan Iron and Steel Co., Ltd., Maanshan 243002, China)

Abstract: The 400 and 460 MPa weathering steel were rolled by pilot mill. The yield strength and the tensile strength of the 400 MPa steel reached to 450 and 545 MPa, respectively, and those of 460 MPa steel reached 550 and 615 MPa. The microstructure of 400 MPa steel mainly consists of ferrite, while that of the 460 MPa steel consists of granular bainite. The morphology and size of precipitates in hot rolled specimens were observed by H-800 transmission electron microscopy. The precipitates of 400 MPa steel are CuS_2 and TiN , while those of 460 MPa are CuS_2 and $(\text{NbTi})\text{CN}$. The key mechanisms for strengthening of 400 MPa steel are precipitation and refinement strengthening; those of 460 MPa steel are precipitation, refinement and transformation strengthening. The crystallographic orientation was analyzed and observed by EBSD. The orientations among neighboring grains are high angle grain boundaries.

Key words: precipitate; microstructure; high strength weathering steel; grain orientation

高强度耐候钢主要用在车辆、桥梁、房屋、集装箱等各种钢结构上, 由于其在要求高的耐蚀性的同时还要求高的强度级别, 因此对生产工艺水平要求高, 本文进行了 400 MPa 和 460 MPa 级高强耐候钢的试制, 系统分析了其组织性能特点及强化机制。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

在实验室真空感应炉上冶炼高强耐候钢试验用钢, 钢坯尺寸为 120 mm × 100 mm × 65 mm。化学

成分见表 1, 其中 1 号试样是 400 MPa 级耐候钢, 2 号试样是 460 MPa 级耐候钢。

1.2 试验方法

将高强耐候钢坯在实验室二辊试验轧机上轧制成 6 mm 厚的钢板, 共轧制 7 道次, 压下量分配 65 49 33 21 13.5 10 7.5 6 mm; 主要工艺过程: 因考虑到该钢种含铜, 故制定加热工艺时考虑避开铜的熔点附近的裂纹敏感区即 1083^[1], 采取高温快烧, 在热处理炉中将坯加热到 950 保温 30 min, 然后将坯放入炉温为 1200 的加热炉中, 加热

表 1 试验用钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of test steel

钢号	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cu)	w(Cr)	w(Ni)	w([O])	w([N])	w(Ti)	w(Nb)
1	0.076	0.39	0.51	0.100	0.0067	0.29	0.45	0.29	0.0034	0.0030	0.03	—
2	0.060	0.31	1.29	0.034	0.0070	0.25	0.56	0.30	0.0033	0.0025	0.02	0.026

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50334010)

作者简介: 陈庆军(1969-), 男, 博士生, 高级工程师;

E-mail: cqj308632.student@sina.com;

修订日期: 2004-09-29

到1200 ℃,并保温 1 h。采取再结晶区和未再结晶区两阶段控轧,终轧温度是 850 ℃,冷却速度约控制在 25 ℃/s,终冷温度控制在 600 ~ 650 ℃。为了模拟卷曲后的冷却情况,在热处理炉中(600 ~ 400 ℃冷速 50 ℃/h)缓冷 4 h。

将线切割后的轧制试样经磨制、机械抛光后,用 4 %的硝酸酒精溶液浸蚀,在扫描电镜下观察其组织并在其附件系统上进行背散射电子衍射试验(EBSD)。将轧制试样进行碳膜萃取复型,在透射电镜下观察析出物的尺寸、形貌。测试了试验钢的力学性能。

2 试验结果及讨论

2.1 试验钢的力学性能

试验钢的拉伸试验结果见表 2。

表 2 高强耐候钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of high strength weathering steel

钢号	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A /%
1	450	545	29.40
2	550	615	23.84

2.2 轧制试样的金相组织

由图 1(a)、(b)可以看出:400 MPa 级耐候钢的金相组织主要为铁素体组织,珠光体数量较少,约占 8 %,铁素体晶粒平均尺寸为 8.9 μm ,晶粒尺寸由表层向中心方向逐渐增大,表层与中心晶粒尺寸相差 1.8 μm 。

由图 1(c)、(d)可以看出,460 MPa 级轧制试样不同部位的金相组织以粒状贝氏体为主,同时有一些多边形铁素体,其表层的粒状贝氏体的质量分数比中心的质量分数高,这是由于表层的冷却速度大

于中心的冷却速度。

综上所述,400 MPa 级的高强耐候钢的金相显微组织以铁素体 + 珠光体为主,由于 Ti 的细晶强化及析出强化作用,其屈服强度可达到 450 MPa,460 MPa 级高强耐候钢的金相显微组织以粒状贝氏体和多边形铁素体为主,晶粒尺寸比 400 MPa 的细小,其显微组织与化学成分和冷却速度有关。粒状贝氏体组织具有较高的屈服强度,达到 550 MPa,并且塑性也不错,伸长率达到 23.8 %。

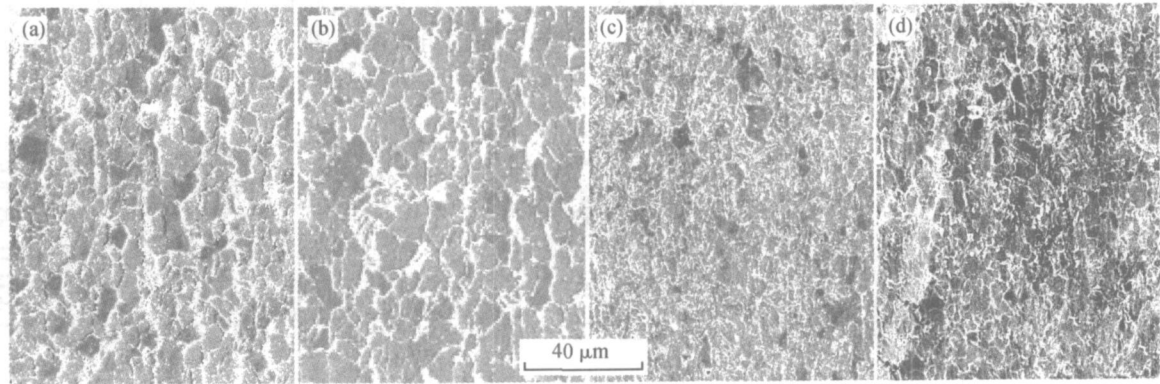
2.3 轧制试样的析出物

(1) 400 MPa 级耐候钢的析出物形貌

由图 2 可以看出,400 MPa 级耐候钢(1 号试样)的析出物形貌以球形或椭球形和长方形或立方形为主,由图 2(a)、(b)可以看出球形或椭圆形的析出物的尺寸在 20 ~ 50 nm 之间,经对其衍射花样标定分析,可知较大的析出物为 CuS_2 。小于 20 nm 以下的可能为 -Cu ,有一定的析出强化作用^[2]。由图 2(c)、(d)可以看出,经对该析出物衍射花样标定分析,确定该析出物是 TiN ,其尺寸大约在 80 nm 左右,有一定的析出强化作用,并且其作为第二相粒子,阻止奥氏体和铁素体晶粒长大,细化了晶粒尺寸,获得优良的综合力学性能。

(2) 460 MPa 级耐候钢的析出物形貌

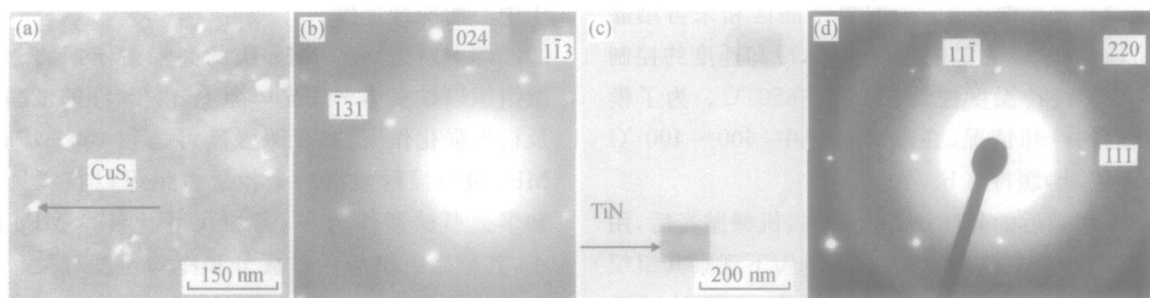
由图 3 可以看出,460 MPa 级耐候钢(2 号试样)的析出物形貌以长方形或方形为主,尺寸在 30 ~ 60 nm,经对该析出物能谱分析,确定该析出物是复合析出物 $(\text{NbTi})\text{CN}$,有较好的析出强化作用。这可能由于 Nb 或 Ti 的碳化物、氮化物及碳氮化物的晶格类型,晶格常数相差不大,所以它们之间很容易相互溶解,形成 Nb 和 Ti 的复合碳氮化物^[3]。



(a) 1 号试样表层; (b) 1 号试样中心; (c) 2 号试样表层; (d) 2 号试样中心

图 1 1、2 号试样不同部位的金相组织

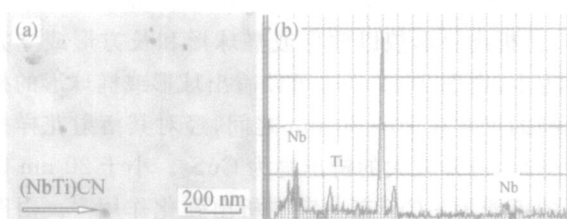
Fig. 1 Microstructures at different positions of specimens 1 and 2



(a) CuS_2 形貌; (b) CuS_2 衍射花样; (c) TiN 形貌; (d) TiN 衍射花样

图 2 1 号试样不同的析出物的形貌及衍射花样

Fig. 2 Morphology and electron diffraction patterns of different precipitates of specimen 1



(a) 2 号试样的析出物形貌; (b) 2 号试样的析出物能谱

图 3 2 号试样的析出物形貌及能谱

Fig. 3 Morphology and energy spectrum diagram of precipitates of specimen 2

在 460 MPa 级耐候钢 2 号试样的析出物中也观察到了如图 2(a) 中所示的析出物 CuS_2 和 $-\text{Cu}$, 该析出物有一定的析出强化作用。

(3) 含铌钛高强度耐候钢的强化机制分析

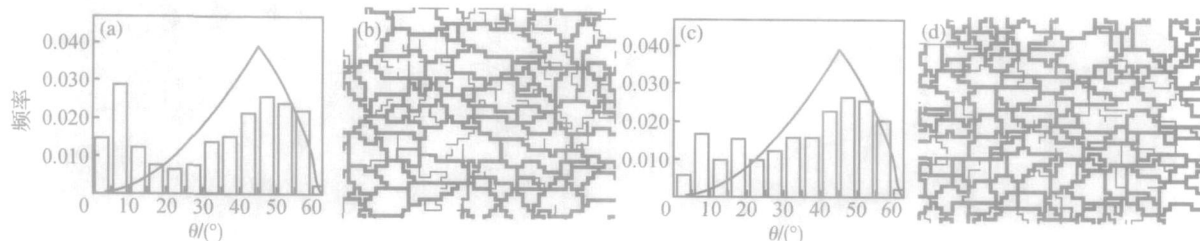
460 MPa 级与 400 MPa 级的化学成分相比较, 除了含有 Nb 外, 仅锰的质量分数比 400 MPa 的高 0.78%, 由于 Mn 的增加可提高其屈服强度约 25 MPa^[4], 而实际屈服强度比 400 MPa 级的高 100 MPa, 除了锰的强化因素外, 还有其他的因素。

460 MPa 级耐候钢析出物的尺寸及其晶粒尺寸明显比 400 MPa 的细小, 这是由于微合金元素 Ti 的加入, 在高温加热阶段 TiN 的析出, 阻止奥氏体

晶粒的长大, 使铸坯原始晶粒尺寸比较细小, 在轧制过程中, 形变诱导析出, Nb(CN) 在奥氏体晶界或位错、变形带等储存能较高处析出, 阻止晶粒粗化及再结晶形核, 抑制再结晶, 具有较强的溶质拖曳作用, 析出 Nb 延迟再结晶的作用要大于 Ti 的作用, 使铁素体晶粒细化。Nb、Ti 的复合微合金化主要强化机制, 除了细晶强化和析出强化, 对该钢种应该还包括相变强化, 在相变温度点, 较低的碳含量使奥氏体中有较高的固溶 Nb, 而固溶 Nb 对连续冷却过程中的 CCT 曲线与随后的相变有较大的影响, 使相变温度降低, 尤其在高的冷速下, 产生大量的中温转变产物, 如粒状贝氏体, 含 Nb 的奥氏体分解转变产物一般具有较高的位错密度, 这种位错密度较高的粒状贝氏体组织会提高产品的强度^[5]。当然在 460 MPa 级耐候钢中之所以在较低的冷速下就可以产生粒状贝氏体组织, 也与该钢比 400 MPa 级的含有较高的 Mn 有关, Nb、Mn 使该钢 C 曲线右移, 提高了奥氏体的稳定性, 阻止其向铁素体转变。

2.4 轧制试样的 EBSD 微观组织分析

400 MPa 级耐候钢的晶粒取向差分布图及晶粒取向的组织图见图 4(a)、(b), 460 MPa 级的见图 4(c)、(d)。



(a) 1 号试样取向差分布图; (b) 1 号试样晶粒取向差绘制的组织图;

(c) 2 号试样取向差分布图; (d) 2 号试样晶粒取向差绘制的组织图

图 4 试样的铁素体取向分析

Fig. 4 Orientation analysis on ferrite of specimens

由图4可以看出,400 MPa和460 MPa级耐候钢晶粒间的取向均以大角度晶界($>15^\circ$)为主,但由图4(b)、(d)可以看出在晶粒内部存在一些亚晶,并且400 MPa级的亚晶数量比460 MPa级的多,但460 MPa级的晶粒明显比400 MPa级的晶粒尺寸细小,这也是其强度比400 MPa级的高的主要原因之一。由图4(a)、4(c)可以看出,400 MPa级的小角度晶界占的比例比460 MPa级的高,并且两者的晶体取向差峰值在 $40\sim 60^\circ$ 之间。铁素体一般在奥氏体晶界形核长大,并且和原始奥氏体之间的取向关系遵守K-S规则,即 $\{111\} // \{011\}$; $\langle 011 \rangle // \langle 111 \rangle$ [6,7]。

3 结论

(1) 实验室试制的400、460 MPa级耐候钢,其屈服强度分别达到450、550 MPa,抗拉强度分别达到545、615 MPa,伸长率分别为29.40%、23.8%。

(2) 400 MPa级耐候钢的金相组织以铁素体+珠光体为主,460 MPa级的以粒状贝氏体为主,有少量的多边形铁素体。

(3) 400 MPa级耐候钢的析出物主要是 CuS_2 和 TiN , CuS_2 的尺寸在 $20\sim 50\text{ nm}$ 之间, TiN 的尺寸大约 80 nm ;460 MPa级的析出物主要是 CuS_2 和 $(\text{NbTi})\text{CN}$, $(\text{NbTi})\text{CN}$ 的尺寸在 $30\sim 60\text{ nm}$ 之间,该尺寸的析出物产生了较大的强化作用。

(4) 460 MPa级耐候钢比400 MPa级的屈服强度高近100 MPa,除了由于Mn的增加可提高其屈服强度约25 MPa,主要是由于Nb、Ti复合微合金

化,产生了更大的强化作用,其主要强化机制是细晶强化、析出强化及相变强化。

(5) 400 MPa和460 MPa级耐候钢晶粒间的取向差均以大角度晶界为主($>15^\circ$),其峰值在 $40\sim 60^\circ$ 之间。

参考文献:

- [1] 周德光,傅杰,柳得鲁,等. CSP薄板表面裂纹的形成机理与预防措施[J]. 北京科技大学学报,2002,24(4):405. (ZHOU De-guang, FU Jie, LIU De-lu, et al. Forming Mechanism and Preventive Measures of the Surface Crack in Thin Strip Produced by CSP[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(4):405.)
- [2] Yuuji KIMURA, Setsuo TAKAKI. Phase Transformation Mechanism of Fe-Cu Alloys[J]. ISIJ International, 1997, 37(3):290-295.
- [3] 赵西成,于大全. 20MnVB钢碳氮化物析出相的研究[J]. 金属热处理,1999,(4):18. (ZHAO Xi-cheng, YU Da-quan. Study on Carbonitride Precipitate Phase of 20MnVB Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 1999, (4):18.)
- [4] 俞德刚. 钢的强韧化理论与设计[M]. 上海:上海交通大学出版社,1990:81.
- [5] Okaguchi S, Hashimoto T, Ohtani H. Effect of Nb, V and Ti on Transformation Behavior of HSLA Steel in Accelerated Cooling[M]. Thermec Iron and Steel Institute of Japan, 1988:330-336.
- [6] Hurley P J, Hodgson P D. Formation of Ultra-fine Ferrite in Hot Rolled Strip: Potential Mechanisms for Grain Refinement[J]. Materials Science and Engineering, A302, 2001, 206-214.
- [7] Bevis Hutchingson, Lena Ryde, Eva Lindth. Texture in Hot Rolled Austenite and Resulting Transformation Products[J]. Materials Science and Engineering, A257, 1998, 9-17.

(上接第48页)

5 结论

利用数值模拟仿真技术,结合复合形寻优手段和矢量理论最终建立了SP轧机系统的优化模型,以SP轧机侧压机构最大有效行程和同步框架最大近似匀速区间为目标函数,通过优化前后对比可知:优化后同步优化匀速段的区间增加了39.6%,模块的最大有效行程增加了49.76%。结果表明,本文的优化效果明显,这为加大SP轧机的定宽范围,进一步减少连铸坯的种类提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 李保生,汪建春,王福臣,等. SP大侧压定宽机运动学分析[J]. 武汉冶金科技大学学报,1996,(12):457-462. (LI Bao-sheng, WANG Jian-chun, WANG Fu-chen, et al. The Kinematical Analysis of Sizing Press[J]. Journal of Wuhan Yezin University of Science and Technology, 1996, (12):457-462.)
- [2] 冯宪章,刘才,江光彪,等. 宝钢SP定宽机侧压框架动力学分析[J]. 重型机械,2004,2(254):34-37. (FENG Xian-zhang, LIU Cai, JIANG Guang-biao, et al. Dynamics Analyse for SP Rolling Mill's Side Framing of Baosteel[J]. Heavy Machinery, 2004, 2(254):34-37.)