

Nb、Ti 对高强度耐候钢组织和性能的影响

陈庆军 康永林 谷海容
(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

苏世怀 张建平 骆小刚 马玉平
(马鞍山钢铁股份有限公司技术中心, 马鞍山 243002)

摘 要 为模拟 CSP(紧凑式带材生产)工艺,由实验室 10 kg 真空感应炉冶炼后轧成 6 mm 钢板,试验研究了 Nb、Ti 对成分(%)为 0.060~0.076C, 0.25~0.31Cu, 0.45~0.56Cr, 0.29~0.30Ni 的 400 MPa 和 460 MPa 级高强度耐候钢组织和性能的影响。结果表明,含 0.03%Ti 钢 σ_s 和 σ_b 分别为 450 MPa 和 545 MPa,含 0.03%Nb、0.02%Ti 钢 σ_s 和 σ_b 分别为 550 MPa 和 615 MPa,不含 Nb、Ti 钢 σ_s 和 σ_b 仅为 375 MPa 和 480 MPa。400 MPa 级耐候钢的组织为铁素体+少量珠光体,含 Ti 钢的主要析出物为 Cu_2S (20~25 nm)和 TiN(80 nm),含 Nb、Ti 460 MPa 级钢的组织主要为粒状贝氏体,析出物 Cu_2S 和 (NbTi)CN(30~60 nm),从而提高了钢的强度。

关键词 高强度耐候钢 Nb Ti 微合金化

Effect of Nb-Ti on Structure and Properties of High Strength Weathering Steel

Chen Qingjun, Kang Yonglin and Gu Hairong
(Materials Science and Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Su Shihuai, Zhang Jianping, Luo Xiaogang and Ma Yuping
(Technology Center, Maanshan Iron and Steel Co Ltd, Maanshan 243002)

Abstract To simulate compact strip production (CSP) technology, the effect of Nb-Ti on structure and mechanical properties of 400 MPa and 460 MPa high strength weathering steel - 0.060~0.076C, 0.25~0.31Cu, 0.45~0.56Cr, 0.29~0.30Ni has been studied by 10 kg vacuum induction furnace melting and rolled into 6 mm plate. The results showed that yield strength σ_s and tensile strength σ_b of steel contained 0.03% Ti were respectively 450 MPa and 545 MPa, σ_s and σ_b of steel contained 0.03%Nb-0.02%Ti were 550 MPa and 615 MPa, and σ_s and σ_b of steel no-contained Nb and Ti were only 375 MPa and 480 MPa. The structure of 400 MPa weathering steels were ferrite + minor pearlite, and the main precipitates of steel contained Ti were Cu_2S (20~25 nm) and TiN (80 nm); the structure of 460 MPa steel contained Nb-Ti was mainly granular bainite with precipitates Cu_2S and (NbTi)CN (30~60 nm) therefore the strength of steel increased.

Material Index High Strength Weathering Steel, Nb, Ti, Microalloying

铌、钛一般作为 HSLA 的微合金化元素而加入到钢中,通过晶粒细化和沉淀强化影响钢的组织与性能。为有效发挥铌对抑制奥氏体再结晶的作用,应尽可能采用低的碳、氮含量,对耐大气腐蚀钢进行 Nb 微合金化后在较宽的温度范围内可获得铁素体超细组织^[1]。钛可产生强烈的沉淀强化及中等程度的晶粒细化作用,TiN 可有效阻止奥氏体晶粒在加热过程中的长大,起到细化奥氏体晶粒的作用。

铌、钛作为常见的微合金强化元素,研究其在 CSP 工艺线上生产高强度耐候钢中的作用具有非常重要的意义。

1 试样制备

1.1 高强耐候钢的冶炼和成分

在北京科技大学的德国 Heraeus 的 10 kg 真空感应炉上冶炼 7 kg 左右的钢锭,其尺寸为 120 mm×100 mm×65 mm。所冶炼耐候钢的化学成分见表 1,其中 No.1 试样是含 Ti 的 400 MPa 级耐候钢, No.2 试样是 460 MPa 级耐候钢, No.3 是不含 Ti 的 400 MPa 级耐候钢。

1.2 高强耐候钢的轧制

在北京科技大学的试验轧机上将该坯轧制成 6 mm 厚的钢板,在现有设备能力下,尽量模拟 CSP 生产工艺,共轧制 7 道次,压下量(mm)分配 65→49→33→21→13.5→10→7.5→6;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 1 083 °C 附近的裂纹敏感区^[2],采取高温快烧,在热处理炉中将坯加热到 950 °C 保温

表1 实验用耐候钢的化学成分和机械性能

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of tested weathering steel

炉号	化学成分/%										机械性能			
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Ti	Nb	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	屈强比
No.1	0.076	0.39	0.51	0.10	0.007	0.29	0.45	0.29	0.03	—	450	545	29.40	0.826
No.2	0.060	0.31	1.29	0.030	0.007	0.25	0.56	0.30	0.02	0.03	550	615	23.84	0.894
No.3	0.065	0.41	0.49	0.08	0.006	0.31	0.50	0.30	—	—	375	480	32.50	0.782

30 min,然后将坯放入炉温为1 200 ℃的加热炉中,加热到1 200 ℃,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 850 ℃,冷却速度约控制在 25 ℃/s,终冷温度控制在 600 ~ 650 ℃。为了模拟 CSP 卷曲后的冷却情况,在热处理炉中(600 ℃→400 ℃冷速 50 ℃/h)缓冷 4 h。

2 试验结果和分析

2.1 高强耐候钢的组织 and 力学性能

根据 GB/T228-2002,采用比例试样,标距 $L_0 = 50$ mm,在北京科技大学力学测试中心的 CMT4105 微机电子万能试验机上进行了拉伸试验,试验结果见表 1。

2.2 轧制试样的金相组织

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 LEICAMRX 金相显微镜下观察其组织(图 1)。

由图 1a₁、b₁ 可以看出:400 MPa 级耐候钢的

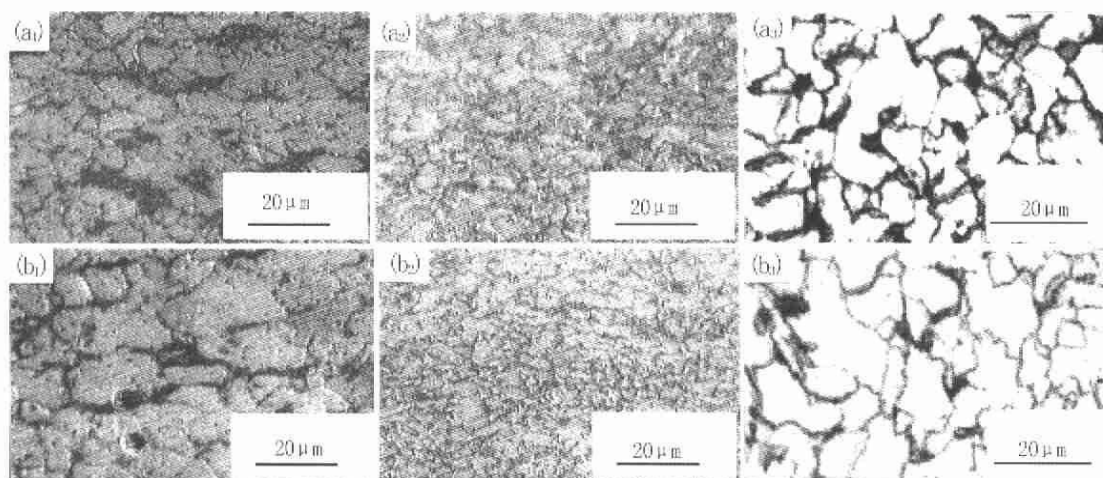


图1 试验 6 mm 高强度耐候钢板的金相组织:a₁, a₂, a₃-板表面;b₁, b₂, b₃-板中心;(a₁, b₁) No. 1-0.03% Ti 耐候钢;(a₂, b₂) No. 2-0.03% Nb-0.02% Ti 耐候钢;(a₃, b₃) No. 3-不含 Ti-Nb 耐候钢

Fig.1 Structure of tested 6 mm plate of high strength weathering steels: a₁, a₂ and a₃- surface layer of plate, b₁, b₂ and b₃- cross section center of plate; (a₁)(b₁) No. 1- 0.03%Ti weathering steel, (a₂)(b₂) No. 2- 0.03Nb-0.02%Ti weathering steel, (a₃)(b₃) No. 3- no-contained Nb-Ti weathering steel

金相组织主要为铁素体组织,珠光体数量较少,约占 8%。平均晶粒尺寸 8.5 μm,晶粒尺寸由表层向中心方向逐渐粗大,主要原因:(1) 成品表层冷却速度快,温降快,并且铸坯(原料)的表层晶粒本身就比中心的细小,因而在相同的变形程度下,表层的晶粒细小。(2) 表层由于剪切形变的作用,表层的形变带多,位错密度比中心高,晶粒形核多发生在能量较高的形变带及奥氏体晶界处,形核位置增加,有利于铁素体晶粒细化。

由图 1a₂、b₂ 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,有一些多边形铁素体,其表层的粒状贝氏体的百分数比中心的百分数高,这是由于表层的冷却速度大于中心的冷却速度。

由图 1a₃、b₃ 可以看出,不含 Ti 的 400 MPa 级耐候钢的金相组织以铁素体 + 珠光体为主,其平均晶粒尺寸是 9.6 μm,则由于晶粒细化的原因可提高屈服强度 15 MPa,而二者的屈服强度相差 65 MPa。通过计算析出强化的作用是 36.8 MPa。

综上所述,400 MPa 级的高强耐候钢的显微

组织以铁素体 + 珠光体为主, 由于 Ti 的析出强化及细晶强化作用, 其屈服强度可达到 450 MPa, 460 MPa 级高强耐候钢的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, 延伸率达到 23.8%。

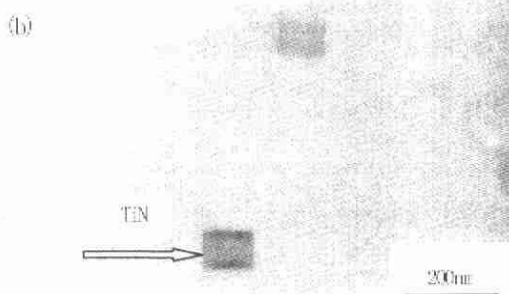
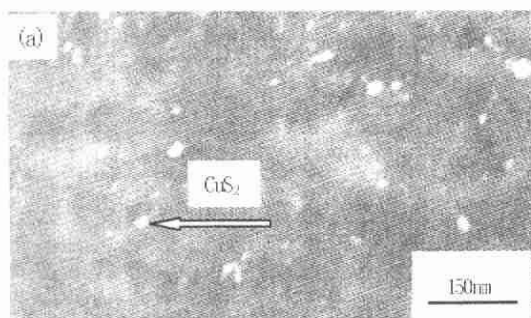


图 2 No. 1-0.03%Ti 耐候钢析出物的形貌: (a) CuS_2 ; (b) TiN

Fig. 2 Morphology of precipitates of No. 1- 0.03Ti weathering steel: (a) CuS_2 ; (b) TiN

钢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)可以看出球形或椭圆形的析出物的尺寸大约在 20 ~ 50 nm 之间, 经对其衍射斑标定分析, 可知较大的析出物为 CuS_2 。20 nm 以下的可能为 $\epsilon\text{-Cu}$, 有一定的析出强化作用^[3]。由图 2(b)可以看出, 方形或立方形形貌的析出物的尺寸大约在 80 nm, 经对该析出物衍射斑标定分析, 确定该析出物是 TiN , 有较好的析出强化作用, 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。

460 MPa 级 No. 2 含 Nb-Ti 耐候钢的析出物形貌见图 3。由图 3 可以看出, 460 MPa 级 No. 2 Nb-Ti 耐候钢的析出物形貌以长方形或方形为主, 尺寸约在 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, 都是面心立方, 晶格常数在 4 ~ 4.5 nm 之间, 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^[4]。

在 460 MPa 级 No. 2 耐候钢的析出物中也观察到了如图 2(a)中所示的析出物 CuS_2 和 $\epsilon\text{-Cu}$, 该析出物有一定的析出强化作用。

2.3 轧制试样的析出物

为了研究金属中的析出相, 观察其大小、分布、形貌和结构, 将切割后轧制试样碳膜萃取复型, 在 H800 透射电镜下观察析出物的大小、形貌。

400 MPa 级 No. 1 耐候钢的析出物形貌见图 2。由图 2 可以看出, 400 MPa 级 No. 1 含 Ti 耐候

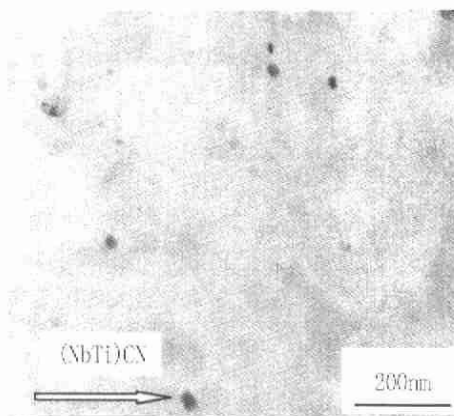


图 3 No. 2 Nb、Ti 耐候钢的析出物形貌

Fig. 3 Morphology of precipitates of No. 2- 0.03Nb-0.02Ti weathering steel

2.4 含铌钛高强度耐候钢的强化机制分析

按文献[5]中计算微合金元素固溶度积的公式, 对于 400 MPa 级的耐候钢, TiC 、 TiN 在奥氏体完全固溶的温度分别为: 1 025 $^{\circ}\text{C}$ 、1 638 $^{\circ}\text{C}$, 对于 460 MPa 级的耐候钢, TiC 、 TiN 、 NbC 、 NbN 在奥氏体完全固溶的温度分别为: 961 $^{\circ}\text{C}$ 、1 580 $^{\circ}\text{C}$ 、1 062 $^{\circ}\text{C}$ 、941 $^{\circ}\text{C}$, 其稳定性增强的依次顺序是: NbN 、 TiC 、 NbC 、 TiN 。为了降低钢中固溶氮含量, 加入微量钛, 使钢中的氮被钛固定, 从而间接提高了铌的强化作用。由于加入微合金元素 Nb, 阻止了晶粒长大, 细化了晶粒, 并且提高了再结晶温度, 采取

了控轧控冷, 保证其精轧阶段在未再结晶区轧制, 提高了产品力学性能。

460 MPa 级 No.2 耐候钢与含 Ti 的 400 MPa 级 No.1 耐候钢的化学成分相比较, 除了含有 Nb 外, 仅 Mn 含量比 400 MPa 级的高 0.78%, 则由于 Mn 的增加可提高其屈服强度约 25 MPa^[6], 而实际屈服强度比含 Ti 400 MPa 级的高 100 MPa, 除了锰的强化作用外, 还有其他的原因。

460 MPa 级耐候钢析出物的尺寸及其金相组织的晶粒尺寸明显比 400 MPa 的细小, 这是由于在高温加热阶段 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, 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 的复合微合金化的强化机制, 除了析出强化和细晶强化, 对该钢种应该还包括相变强化。在相变温度点, 较低的 C 含量, 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^[7]。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。

3 结论

(1) 模拟薄板坯连铸连轧生产工艺, 试轧的 400 MPa 和 460 MPa 级含 Nb、Ti 的耐候钢, 其屈服强度 σ_s 分别达到 450 MPa、550 MPa, 抗拉强度 σ_b 分别达到 545 MPa、615 MPa, 延伸率分别为 29.4%、23.8%, 不含 Nb、Ti 的耐候钢其屈服强度

仅 375 MPa, 抗拉强度仅 480 MPa。

(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 的尺寸大约在 20 ~ 50 nm, TiN 的尺寸约 80 nm; 460 MPa 级的析出物主要是 CuS_2 和 (NbTi)CN, (NbTi)CN 的尺寸在 30 ~ 60 nm, 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, 其主要强化机制是析出强化、细晶强化及相变强化。

国家自然科学基金资助项目(50334010)

参考文献

- 1 Bepari M A and Whiteman J A. The Effect of Nitrogen on the Precipitation Behavior of Nb (C, N) in Continuously-Cooled Low-Carbon Structural Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996 (56): 839
- 2 周德光, 傅杰, 柳得槽, 等. CSP 薄板表面裂纹的形成机理与预防措施. *北京科技大学学报*, 2002, 24(4): 405
- 3 Yuji Kimura and Setsuo Takaki. Phase Transformation Mechanism of Fe-Cu Alloys. *ISIJ International*, 1997, 37(3): 290
- 4 赵西成, 于大全. 20MnVB 钢碳氮化物析出相的研究. *金属热处理*, 1999(4): 18
- 5 王有铭, 李曼云, 韦光. 钢材的控制轧制和控制冷却. 北京: 冶金工业出版社, 1995: 52
- 6 俞德刚. 钢的强韧化理论与设计. 上海: 上海交通大学出版社, 1990. 81
- 7 Okaguchi S, Hashimoto T and Ohtani H. Effect of Nb, V and Ti on Transformation Behavior of HSLA Steel in Accelerated Cooling. *Thermec Iron and Steel Institute of Japan*, 1988: 330

陈庆军, 男, 35 岁, 高级工程师, 在读博士。从事连轧工艺控制技术及塑性加工过程模拟仿真等研究。

收稿日期: 2004-09-06

·告作者、读者·

本刊与《万方数据—数字化期刊群》《中国学术期刊(光盘版)》等数据库有合作关系, 自 1995 年以来过刊全文资料已入网“万方数据—数字化期刊群”, 并向读者提供信息服务, 本刊所付稿酬已含上述服务的报酬。凡未及时声明不同意将其论文收录数据库的, 均视为将入编数据库权利授予本刊编辑部。