

热轧冷却工艺对 Nb-Ti 微合金双相钢组织和性能的影响

陈连生^{1,2} 那顺桑² 狄国标¹ 张洪波² 王月香¹ 刘振宇¹ 刘相华¹ 何舒星³

(1 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学), 沈阳 110004;

2 河北理工大学冶金与能源学院, 唐山 063009; 3 唐山国丰钢铁有限公司, 唐山 063000)

摘要 研究了热轧后空冷(800~850℃→750℃)+水冷(750℃→300~180℃)的两段式和水冷(782℃→760℃)+空冷(760℃→713℃)+水冷(713℃→414℃)三段式冷却方式对双相钢(%:0.08C, 1.02Mn, 0.22Si, 0.02Nb, 0.01Ti)组织和机械性能的影响。结果表明,采用两段式冷却方式可得到铁素体+分散的板条马氏体组织,并使铁素体尺寸达 5.5 μm,钢的屈服强度为 345~365 MPa,抗拉强度为 565~575 MPa,屈强比为 0.60~0.65,优于三段式冷却方式轧制的双相钢。

关键词 Nb-Ti 微合金化 热轧双相钢 控制冷却 组织 力学性能

Effect of Hot Rolled Cooling Process on Structure and Properties of Nb-Ti Microalloy Dual Phase Steel

Chen Liansheng^{1,2}, Na Shunsang², Di Guobiao¹, Zhang Hongbo², Wang Yuexiang¹,
Liu Zhenyu¹, Liu Xianghua¹ and He Shuxing³

(1 State Key Laboratory of Rolling & Automation, Northeast University, Shenyang 110004;

2 Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009; 3 Guofeng Iron and Steel Co Ltd, Tangshan 063000)

Abstract The effect of hot rolled plate air cooling (800~850℃ to 750℃) + water cooling (750℃ to 300~180℃) two stage cooling mode and water cooling (782℃ to 760℃) + air cooling (760℃ to 713℃) + water cooling (713℃ to 414℃) three stage cooling mode on structure and mechanical properties of dual steel 0.08C, 1.02Mn, 0.22Si, 0.02Nb, 0.01Ti has been studied. Results showed that 5.5 μm ferrite + dispersed lath martensite structure could be got by two stage cooling mode, and yield strength of steel was 345~365 MPa, tensile strength 565~575 MPa, yield strength-tensile strength ratio 0.60~0.65 which were better than that by three stage cooling mode.

Material Index Nb-Ti Microalloying, Hot Rolling Dual Phase Steel, Control Cooling, Structure, Mechanical Property

双相钢是指由低碳钢和低碳合金钢经临界区处理或控制轧制而得到的、主要由铁素体和马氏体所组成的钢。它以高的加工硬化率、低的屈强比和连续屈服,满足了汽车各部件的应用条件;尤其是其所具有的高强度可使汽车重量降低,进而节约燃料。目前热轧双相钢主要用来冲制轿车车体的纵横梁、保险杠、车门内外板、车体后盖板、车顶面板、车体各种框架、轮辋、轮辐控制臂及各种安全零件。

试验分别采用两段式和三段式冷却方式得到了热轧双相组织,并分析了典型工艺的精细显微组织,为现场生产提供了参考。

1 试验材料和方法

试验用钢的化学成分见表 1。

表 1 试验用钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel / %

C	Mn	Si	Nb	Ti	Al
0.08	1.02	0.22	0.02	0.01	0.034

坯料在箱式电阻炉中加热到 1 200℃,保温 2 h,用 Φ450 二辊轧机轧制 11 道次。坯料及各道出口厚度(mm)依次为 66-50-40-32-26-20-15-11-8-6-4-3。

热轧后分别采用空冷(800~850℃→750℃)+水冷(750℃→300~180℃)两段式冷却(A1、A4)和水冷(782℃→760℃)+空冷(760℃→713℃)+水冷(713℃→414℃)三段式冷却(B1),并采用红外线测温仪测量轧制过程中轧件温度的变化。

将轧后试样沿轧制方向切取金相试样,经研磨和机械抛光后,用 4% 硝酸酒精和 Lepre 溶液腐蚀,采用 Leica 光学显微镜观察金相组织,使用 INSTRON4206 电子机械试验机进行拉伸试验。并制取薄膜试样,用电子显微镜分析精细组织和析出物。

2 试验结果及讨论

2.1 试验结果

不同工艺条件下试验钢的拉伸试验结果见表 2,对应的光学显微组织照片如图 1 所示。

表2 Nb-Ti 微合金双相钢的冷却工艺参数和力学性能
Table 2 Cooling process parameters and mechanical properties of Nb-Ti microalloy dual phase steel

工艺编号	温度/℃					屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	屈强比
	终轧	水冷结束	空冷结束	水冷开始	卷取				
A1	800	-	750	750	300	365	565	20.01	0.65
A4	850	-	750	750	180	345	575	24.72	0.60
B1	782	760	713	713	414	435	500	29.24	0.87

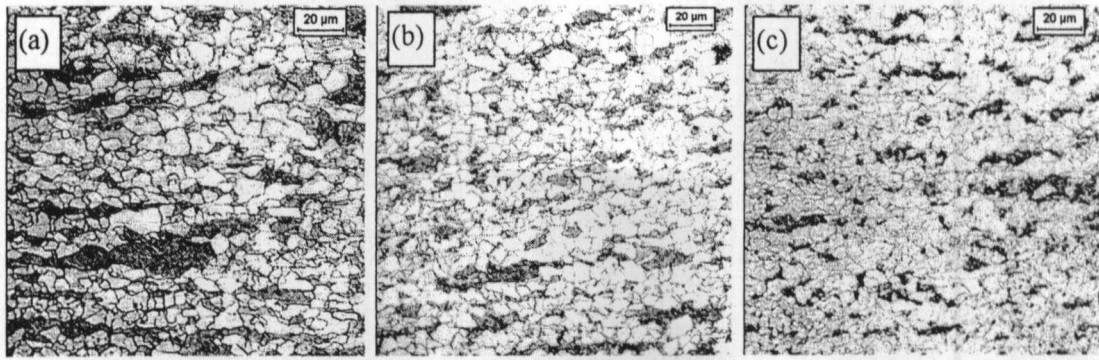


图1 Nb-Ti 微合金双相钢的组织:冷却工艺 A1 (a), A4 (b), B1 (c)
Fig. 1 Structure of Nb-Ti microalloy steel: cooling process A1 (a), A4 (b), B1 (c)

2.2 典型组织性能的讨论

由图1(a)看出, A1 中形成大块的条带状马氏体, 而它周围铁素体晶粒较小, 这是由于终轧温度低, 铌通过固溶拖拽的作用抑制了静态再结晶的发生, 使奥氏体晶粒变成拉长的扁平状; 钢中大量的晶界、孪晶界、位错和变形带极大地提高了铁素体的形核率和长大速率, 所以加速了铁素体的形成。但是奥氏体中的变形带不均匀, 即使有变形带也并非都可以提供铁素体形核点。晶界上生成了细小的铁素体, 相变过程中固溶的 C、N 扩散至未相变的奥氏体, 即扩散至拉长的奥氏体内, 奥氏体更加稳定, 抑制贝氏体相变^[1]。铁素体的量决定了残余奥氏体的淬透性, 铁素体的含量越多^[2], 贝氏体相变的鼻尖位置移向更长的时间, 在冷却过程中抑制了贝氏体的相变。铁素体含量高, 贝氏体含量就低, 大部分是马氏体。铁素体的含量越低, 贝氏体含量越高, 而马氏体含量固定不变。

图2(a)可以看出扩散导致的锯齿状的马氏体出现。在接下来的水冷至 M_s 点以下, 大块带状奥氏体相变为马氏体, 形成的大块状马氏体, 容易产生裂纹, 导致塑性明显降低, 延伸率只有 20%, 对强度也有不利影响。但是由于板条状马氏体(见图2b)的强韧化作用, 抗拉强度仍能够达到 560 MPa。

由图1(c)所示的 B1 工艺生产的微合金双相钢的金相组织可以看出, 马氏体分布在铁素体基体上, 但是从图3拉伸曲线可以看出, B1 有屈服平台出

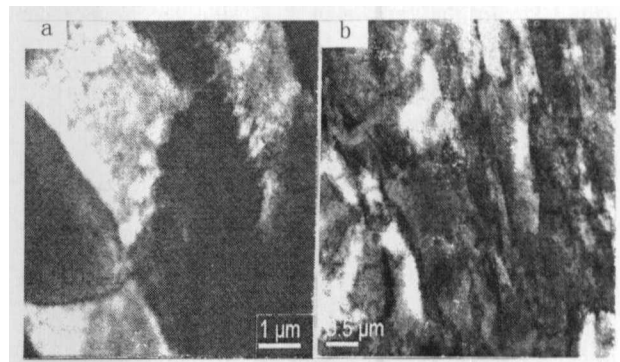


图2 A1 冷却工艺 Nb-Ti 微合金双相钢的马氏体形貌, TEM: (a) 锯齿状马氏体; (b) 板条状马氏体
Fig. 2 Morphology of martensite in Nb-Ti microalloy steel by A1 cooling process, TEM: (a) sawtooth martensite; (b) lath martensite

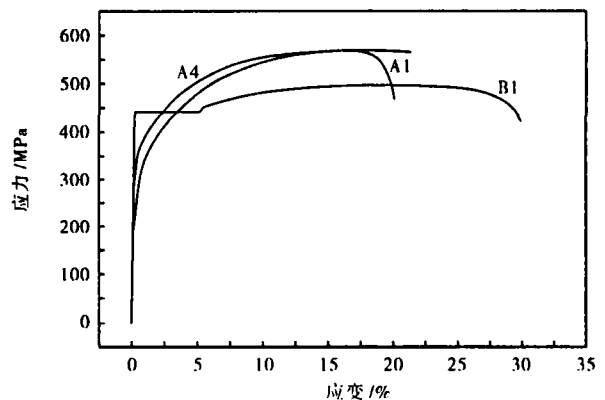


图3 不同冷却工艺 Nb-Ti 微合金双相钢的应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of Nb-Ti microalloy dual phase steel by different cooling process

现,虽然延伸率达到 29%,抗拉强度只有 500 MPa,屈强比达到 0.874,这和较高的卷取温度有关。

出现连续屈服的条件是在室温下必须有 $10^6 \sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 足够的自由位错密度。位错主要是马氏体相变的膨胀在铁素体内产生,但是随后的高温慢速冷却会使间隙原子扩散形成气团或是析出物钉扎位错,仍然会出现屈服平台^[3],所以 M_s 以下冷却很重

要。由于 414 °C 卷取后冷速很慢,且温度较高,有利于间隙原子扩散,出现了间隙原子或是 Nb、Ti 碳氮化物钉扎位错(见图 4a),这是出现屈服平台的原因。图 4(b)证明,晶界上也有大块的碳化物出现,碳化物的出现是由于较高的卷取温度造成马氏体的回火以及铁素体的时效,这种现象使抗拉强度下降。

A4 的抗拉强度为 575 MPa,延伸率为 24.7%,

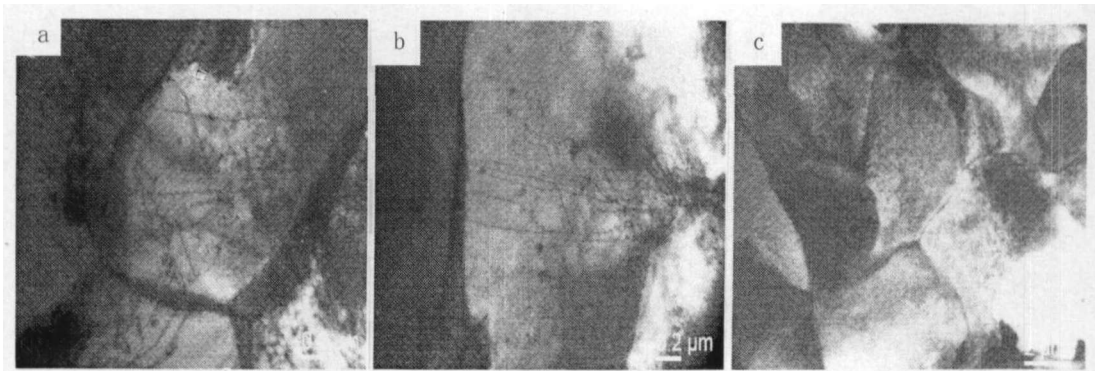


图 4 B1 冷却工艺 Nb-Ti 微合金双相钢中的 Nb-Ti 碳氮化物(a),晶界碳化物(b); A4 冷却工艺 Nb-Ti 微合金钢中铁素体形貌(c)
Fig. 4 Nb-Ti carbo-nitride (a) and grain boundary carbide (b) in Nb-Ti microalloy dual phase steel by B1 cooling process; Morphology of ferrite in Nb-Ti microalloy dual phase steel by A4 cooling process (c)

屈强比为 0.6,达到了良好的强塑性配合,这与细小的、清洁的铁素体有关^[4]。A4 的铁素体晶粒尺寸为 5.5 μm ,在晶界上没有碳化物出现,图 4(c)为纯净的铁素体晶粒。

从以上对比可以看出,A4 比 A1 有更多的马氏体,二者的马氏体体积含量分别是 11.3% 和 9%。A4 中马氏体均匀分布于细小的铁素体基体上,马氏体的强化作用明显,使其抗拉强度比 A1 提高 10 MPa。对比 A4 和 A1 生产工艺,在含 Nb 热轧双相钢中,850 °C 的终轧温度对于保持均匀的铁素体晶粒是必要的,750 °C 的层流开始温度可以保证足量的铁素体的生成,固溶的 C、N 可以充分扩散至未相变的奥氏体,析出相较少,铁素体的塑性较好,在快速冷却至 180 °C 卷取时,抑制贝氏体的相变,大部分剩余奥氏体转变为马氏体。

3 结论

(1) Nb、Ti 的添加抑制了奥氏体的再结晶,大量存在的晶界、位错、变形带提高了铁素体的形核率和长大速率,加速了铁素体相变,可以达到细化晶粒和简化工艺的目的;但应调整工艺参数避免混晶组织以及析出物钉扎位错。

(2) 通过透射电镜分析得到,双相钢的连续屈服现象与大量的自由位错有关,而工艺参数的变化

会影响自由位错的数量。

(3) 铁素体-马氏体双相钢的性能不但与钢中马氏体含量有关,还与铁素体晶粒尺寸及其纯净度有关。两段式冷却工艺,可使 Nb-Ti 微合金双相钢获得 5.5 μm 铁素体 + 分散的马氏体双相组织,其综合机械性能优于三段式冷却工艺轧制的双相钢。

河北省自然科学基金资助项目(编号 E2006000353)

参考文献

- 1 Jun-ichi Mano, Nobuo Aoyagi, Toshiyuki Kato. Production of As-Hot-Rolled Dual Phase Steel Sheets by Controlled Cooling. Conference Proceeding of International Conference on Technology and Application of HSLA Steels, 1983; 287
- 2 Waterschoot T, De Cooman B C, Vanderschueren D. Influence of Run-out Table Cooling Patterns on Transformation and Mechanical Properties of High Strength Dual Phase and Ferrite-bainite Steels. Ironmaking and Steelmaking, 2001(2): 185
- 3 Hansen S S, Pradhan R R. Structure/Property Relationships and Continuous Yielding Behavior in Dual-phase Steels. Fundamentals of Dual-Phase Steels. New York: AIME, 1981; 137
- 4 Davies R G. On the Ductility of Dual Phase Steels. Formable HSLA and Dual-Phase Steels, 1983; 25

陈连生(1968-),男,教授,1998 年燕山大学毕业,轧制新工艺及钢材组织性能控制。

收稿日期:2006-11-07