轧后冷却工艺对铌钛微合金化低碳贝氏体钢组织性能的影响

李德发^{1,2}, 王世森², 熊玉彰², 邢淑清¹, 熊 涛², 余宏伟² (1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院,内蒙古包头 014010; 2. 武汉钢铁(集团)公司研究院,湖北 武汉 430080)

摘 要:利用金相显微镜、SEM、TEM方法研究了轧后冷却制度对铌钛微合金化低碳贝氏体钢微观组织结构、第 二相析出及力学性能的影响。结果表明:轧后空冷(弛豫)至一定温度后加速冷却获得铁素体/贝氏体双相组织;随 轧后空冷终止温度降低,铁素体含量增加,晶粒尺寸越大,第二相析出尺寸也有长大趋势,贝氏体形态发生改变,贝 氏体板条边界和取向越不明显,位错密度降低,M/A 形态也发生一定变化;力学性能表现为强度降低,屈强比和韧 塑性得到改善。当轧后空冷终止温度在 725~740℃,然后以 15℃/s 的冷却速度冷却至 440℃,可以获得良好的综 合力学性能,性能满足标准 GB/T 1591 中 Q690 要求。

关键词: 铌钛微合金钢; 低碳贝氏体; 冷却制度; 组织; 性能 文献标志码: A 文章编号: 0449-749X(2013)03-0071-05

Effect of Cooling Process After Rolling on Microstructure and Mechanical Property of Nb–Ti Microalloyed Low–Carbon Bainite Steel

LI De-fa^{1,2}, WANG Shi-sen², XIONG Yu-zhang²,

XING Shu-qing¹, XIONG Tao², YU Hong-wei²

(1. Materials and Metallurgy School, UST Inner Mongolia, Baotou 014010, Nei Mongol, China;

2. Research Institute, Wuhan Iron and Steel (Group) Corp., Wuhan 430080, Hubei, China)

Abstract: The effects of cooling process after rolling on microstructure, precipitated phase and mechanical properties of low-carbon bainite steel were investigated by method of SEM and TEM. The results show that ferrite and bainite dual phases can be obtained with air-cooling and accelerated cooling process after hot-rolled. The percentage of ferrite phase increases with the end of air-cooling temperature reduced, the size of ferrite and precipitated phase is larger, the lath of bainite is sharper and the edge is clearer. The shape of M/A constituent is film-like and changes with temperature. When temperature of completion in air-cooling are between 725 °C and 740°C, then it is cooled to 440 °C with cooling rate of 15 °C/s, the comprehensive mechanical properties are excellent and can reach the requirements of Q690 of GB/T1591.

Key words: Nb-Ti microalloyed steel; low-carbon bainite; cooling process; microstructure; mechanical property

用量很大的低合金高强度中厚板,要求低成本、 高性能。目前国内外大多数高强钢研究集中在热处 理条件和合金元素对钢板组织性能的影响方面^[1], 虽然该方法可以满足性能的要求,但是其高能耗、高 成本和生产周期长的弊端日益显著。因此,近年来 对热轧工艺的研究受到关注,主要集中于通过固溶 强化、细晶强化和析出强化等手段获得更高的强 度^[2],但是随着强度的提高,钢的延展性降低,冷成 形性变差。贝氏体钢的问世很好地解决了这一矛 盾,贝氏体钢中含有相对软的基体相,因此具有低的 屈服强度和良好的成形性,同时由于钢中硬质相的 存在,又具有高的抗拉强度^[3]。针对贝氏体钢轧后 冷却制度的研究报道尚不多见,且对于作用机制方 面的研究尚不透彻。为此,本文以铌钛微合金化试 验钢为研究对象,通过两阶段控制轧制、空冷、快速 冷却工艺,在较为成熟的控轧工艺基础上,研究了轧 后冷却制度对贝氏体钢组织和性能的影响,为贝氏 体钢的工业应用提供试验依据和理论基础。

1 试验方法

试验在某厂转炉-宽厚板产线通过小批量工业 试制形式开展。试验钢化学成分如表1所示。试验

基金项目:内蒙古自然科学基金资助项目(2009MS0811);内蒙古科技大学材料加工过程模拟创新团队基金项目(52303001) 作者简介:李德发(1983一),男,硕士,工程师; E-mail: 303_lee@163.com; 收稿日期: 2012-06-18

1600mm 断面的铸坯。

表 1	试验钢化学成分(质量分数)					
Table 1	Chemical composition of tested steel	%				

С	Mn	Si	Р	S	Mo、Cr	Nb	Ti
0.06	1.55	0.35	0.015	0.010	适量	0.05	0.02

应用 JMatPro 软件,以试验钢化学成分为基础,模拟其静态 CCT 曲线(图 1),作为贝氏体钢轧制及冷却工艺制定的基础。模拟冷却速度范围为 0.1~100 °C/s,试验钢相转变温度随冷却速度的增加而降低。冷却速度小于 10 °C/s 时 A_{r3} 温度约为 800 °C,因此轧制阶段终轧温度应大于 800 °C,避免 两相区轧制;珠光体转变开始温度最高为 680 °C,轧 后空冷终止温度应大于该温度;冷却速度大于 10 °C/s 时贝氏体转变温度小于 600 °C,冷却至马氏 体转变点(约 400 °C)以上未转变奥氏体理论上将发 生完全贝氏体相变,从而获得贝氏体为主控组织的 试验钢。



图 1 风湿初静态过冷爽式冲连续冷却转变曲约 Fig. 1 Static state CCT curves of tested steel

铸坯在步进式加热炉内加热到1200℃,到温均 热保温时间大于 30 min,出炉后在四辊可逆式轧机 上进行两阶段控制轧制,终轧温度为 820℃,轧后空 冷待温到不同温度后进行快速冷却,快速冷却速度 为 15℃/s,终冷温度为 440℃。试验钢的控轧控冷 工艺如表 2 所示。1、2、3 号试样终轧后分别空冷到 780、730、680℃。

表 2 控轧控冷工艺参数

Table 2	Main technologica	l parameters of	control rolling	and cooling
---------	-------------------	-----------------	-----------------	-------------

计应知	再结晶区轧制		未再结晶区轧制			穴体化止	加速冷却	
山池村 -	开轧温度/	中间坯厚度/	开轧温度/	终轧温度/	成品厚度/		冷却速度/	返红温度/
猵亏	°C	mm	്റ	്റ	mm	温度/ 0	$(^{\circ}C \cdot s^{-1})$	°C
1	1100	80	900	820	30	780	15	440
2	1100	80	900	820	30	730	15	440
3	1100	80	900	820	30	680	15	440

沿板材纵向截取标准拉伸试样,取样位置为板 宽 1/4 处。拉伸试验在 Zwick 拉伸试验机上进行, 拉伸过程由计算机程序自动控制,在试验过程中记 录工程应力-应变曲线,自动读取拉伸力学性能数 据。冲击试验采用夏比 V 型缺口试样,每组 3 个试 样,尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm,取冲击功平均 值。用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜对控轧控冷 后钢板的微观组织结构和析出相进行观察。

2 试验结果与分析

2.1 冷却制度对力学性能的影响

试验钢力学性能如表 3 所示。可以看出,1 号 试样强度级别最高,但伸长率和屈强比不够理想, 分别为 9.5%和 0.91,降低了试验钢的应用价值; 2 号试样强度级别较高,综合性能最理想,满足 GB/T 1591 中 Q690 指标要求;3 号试样强度级别 最低,虽然伸长率、冲击韧性、屈强比等性能指标 达到较高水平,综合性能可满足 Q550 指标要求, 但是相对 2 号试样,显示未能充分开发该试验钢 的价值潜能。

表 3 试验钢力学性能 Table 3 Mechanical properties of tested steel

			•		
试验钢	屈服强度/	抗拉强度	伸长率/	-20℃冲	同品を
编号	MPa	MPa	%	击功/J	旧班儿
1	735	805	9.5	120	0.91
2	680	785	14.5	155	0.86
3	605	755	16.0	170	0.80

试验钢力学性能随空冷(弛豫)终止温度变化规 律如图2所示。由图可见,随着轧后空冷终止温度 的降低,试验钢的屈服强度、抗拉强度和屈强比均呈 降低趋势,而低温冲击韧性和断后伸长率变化趋势 相反,空冷终止温度太高或太低均会造成综合力学性能不够理想。从试验钢力学性能指标分别随轧后空冷终止温度单调变化趋势分析,该试验钢最高强度级别可达到 Q690 要求,如果要达到 Q690 综合性

能指标要求,对于 30 mm 厚钢板,屈服强度必须大 于等于 670 MPa,抗拉强度在 770~940 MPa,伸长 率大于等于 14%,那么空冷终止温度应该在 725~ 740℃(如图 2 虚线所示)范围内。





Fig. 2 Mechanical properties with the temperature of completion in air-cooling process

2.2 冷却制度对显微组织的影响

不同冷却工艺下金相组织如图 3 所示,(a)、 (b)、(c)分别对应试验钢编号 1、2、3。可以看出,试 验钢金相组织均为铁素体和贝氏体,随着空冷段终 止温度的降低,铁素体晶粒尺寸逐渐增大,铁素体在 组织中的含量逐渐增加,这是由于空冷终止温度均 低于相变温度 *A*_{r3},加速冷却之前已有部分过冷奥 氏体发生了先共析铁素体转变。从金相组织中可以 看到,铁素体主要在原奥氏体晶界形核并长大,随着 终止温度的降低,铁素体相变从奥氏体晶界向晶内 推进。当终止温度为 680 ℃时,组织仍以贝氏体相 变为主,但出现块状铁素体组织区域,并有先共析铁 素体晶核形成,说明该冷却速度下,开始发生先共析 铁素体转变,铁素体呈明显块状并分割贝氏体区域。 1、2 号试样铁素体、贝氏体形态和分布需借助 SEM 观察,如图 4 所示。



(a)1号试样; (b)2号试样; (c)3号试样。图 3 不同冷却工艺下金相组织



1号试样以细长的板条贝氏体组织为主,2号试 样以粒状贝氏体为主,即随着空冷终止温度降低,粒 状组织逐渐增多,板条组织逐渐减少,原奥氏体晶粒 内的粒状贝氏体组织较粗大,组织中原奥氏体晶界 处存在铁素体,这些铁素体并未使原奥氏体晶界消 失,而是向原奥氏体晶界一侧生长,样品组织中虽然 铁素体不明显,但也存在一些由晶界生长的与晶内 粒状贝氏体存在较明显边界的中温转变组织。板条 间的残余奥氏体或 M/A 岛的形状为片状,空冷终 止温度越低,板条组织清晰度也降低,位向越模糊, 板条间的组元由连续薄膜状变得不连续。

2.3 冷却制度对贝氏体结构及析出物的影响

图 5 为试验钢轧后空冷到不同终止温度时的贝 氏体结构及析出物。从图中可以看出,1 号试样由 长而平行分布的贝氏体板条组成,板条间的取向 差极小,小角度晶界比例较高,组织均匀,并且贝氏



(a) 1 号试样; (b) 2 号试样。
图 4 1、2 号试样 SEM 照片
Fig. 4 SEM of No. 1 and No. 2 test steels



(a)1号试样; (b)2号试样; (c)3号试样; (d)能谱图。
图 5 不同冷却工艺下贝氏体结构及析出物分析
Fig. 5 Microstructure of bainite and precipitated phase at different cooling processer

体板条内含有很高密度的位错,板条之间存在尺寸 细小的薄片状 M/A 岛,析出物较少,大小约为 $10\sim$ 30 nm,均匀分布于贝氏体板条间。随着轧后空冷终 止温度降低,贝氏体板条宽化,以扩散为主的粒状贝 氏体逐渐增多,部分呈短棒状和粒状,边界清晰度降 低,大角度晶界比例显著增大,位错密度降低,析出 物明显曾多且有长大趋势,不规则尺寸 M/A 组织 细化,呈薄膜状,如图 5(b)所示。当空冷终止温度 降到 680 ℃时,从图 5(c)中可以看出,贝氏体铁素体 板条是由贝氏体铁素体亚板条及亚板条间的残余奥 氏体组成。这些贝氏体铁素体亚板条厚度约 200~ 400 nm,热加工阶段产生的变形奥氏体发生长时间 回复,通过相互缠结形成亚晶界分割贝氏体板条,沿 亚板条长度的方向,残余奥氏体膜或位错墙将贝氏 体铁素体板条分割成不等的几段,呈块状和大颗粒 状。析出物分布于贝氏体板条晶界和铁素体贝氏体 相界面处,已充分聚集长大呈球形和不规则长条,大 小约为 50~100 nm。对试验钢析出物进行能谱分 析,不同冷却制度下析出物具有相似能谱,析出物均 为 Nb、Ti 的碳氮化物。

3 讨论

轧后冷却制度主要通过改变试验钢的微观组织 结构和第二相析出对力学性能产生影响。为了轧制 工艺及轧后冷却工艺的有效实施,试验钢中加入微 量 Nb、Ti 等合金元素可以抑制低碳贝氏体钢高温 奥氏体的变形再结晶行为,提高再结晶温度,扩大非 再结晶区^[4]。试验用低碳贝氏体钢的奥氏体再结晶 温度在 950 ℃以上,经非再结晶区变形后空冷一段 时间,变形奥氏体内发生回复,晶内大量变形位错重 组,形成有一定取向差的亚结构组织,这些小角度亚 晶界通常本身并不很稳定,因为微量 Nb、Ti 的加 入,在形变及空冷(驰豫)过程中形成各种形式的应 变诱导析出相,它们对位错亚结构的钉扎作用大大 增强了位错胞状结构的稳定性,同时增加了相变的 有效形核核心,使中温转变贝氏体组织呈多方向形 核生长有利于组织细化^[5]。在随后的冷却过程中, 过冷的奥氏体将转变成各种形态的 α-Fe 并伴有第

二相的进一步析出,因此轧后冷却制度成为影响最 终相变组织结构及析出物的重要因素。

第二相析出主要为 2 个阶段:一阶段为变形前 析出,另一阶段为析出物控制阶段,变形、空冷(驰 豫)及冷却过程中均有析出,较快冷却条件下,冷却 过程中析出量很小^[6]。析出强化主要是通过细小的 析出物分散于基体中,阻碍位错运动而产生强化作 用,作用效果取决于析出物的平均直径和体积分 数^[7]。从试验钢析出物 TEM 分析可以看出,析出 物的大小与分布主要取决于试验钢试制工艺中唯 一变量因素即轧后空冷(弛豫)终止温度,终止温 度越低,第二相析出越充分,析出物不断聚集长 大,其中 2 号试样析出物大小及分布对性能影响 最为有利。

试验钢终轧后空冷时间的延长即空冷终止温度 降低,使组织中铁素体的含量增加,其晶粒尺寸变 大。根据 Hall-Petch 公式^[8],铁素体晶粒尺寸增 大,屈服强度降低。对于多相钢,除了铁素体晶粒尺 寸外,贝氏体组织结构及位错密度也对屈服强度有 影响。一般而言,多相钢的抗拉强度随着硬相体积 分数的增加而增大。由于1号试样中的硬质相体积 分数最大且具有较高的位错密度,因此显示出最高 的抗拉强度。随着终轧后空冷弛豫时间的增加,组 织中的铁素体量逐渐增加,硬质相在组织中的比例 则逐渐减少且位错密度降低,因而2、3号试样的抗 拉强度依次降低。软硬相的比例同时也反应了对屈 强比和韧塑的影响,随着硬相比例的降低,屈强比和 韧塑性得到改善。另外,通常认为板条贝氏体强度 高,粒状贝氏体韧性和伸长率优于板条贝氏体,但大 多数中温转变时,2种组织很难截然分开^[9]。

4 结论

 1)未再结晶区轧制空冷(弛豫)至一定温度后 加速冷却可以获得铁素体/贝氏体双相组织,轧后空 冷终止温度是影响铁素体/贝氏体比例以及铁素体 晶粒大小的关键因素,同时也决定着第二相析出的 形貌和尺寸并且对贝氏体形貌有一定影响。

2) 轧后冷却制度主要通过改变试验钢的微观 组织结构和第二相析出对力学性能产生影响。轧后 空冷(弛豫)终止温度越低,铁素体含量越高,晶粒尺 寸越大,贝氏体板条边界和取向越不明显,位错密度 下降,对力学性能起决定性作用;轧后空冷(弛豫)终 止温度越低,第二相析出越充分,析出物不断聚集长 大,当空冷终止温度约为 730 ℃时,试验钢析出物大 小及分布对性能影响最为有利。

3) 当轧后空冷终止温度在 725~740℃,然后 以 15℃/s 的冷却速度冷却至 440℃,可以获得良好 的综合力学性能,性能满足标准 GB/T 1591 中 Q690 要求。

参考文献:

- [1] 贺信莱,尚成嘉,杨善武,等.高性能低碳贝氏体钢的组织细化 技术及其应用[J].金属热处理,2007,32(12):1.
- [2] 王建泽,康永林,杨善武,等. 轧后冷速对低碳贝氏体钢组织性 能影响[J]. 塑性工程学报,2007,14(5):116.
- [3] Huang Y D, Froyen I. Important Factors to Obtain Homogeneous and Ultrafine Ferrite-Pearlite Microstructure in Low Carbon Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002,124(1-2):216.
- [4] 宋维锡. 金属学[M]. 北京:冶金工业出版社,1989.
- [5] **刘宗昌.** 材料组织结构转变原理[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006.
- [6] Li Long, Yang Chunzheng, Ding Hua, et al. Study on Microstructures and Mechanical Properties of B510I Steel by TMCP
 [J]. Materials Science Forum, 2005, 475-479(1):77.
- [7] Medina S F, Vega M I, Chapa M. Critical Cooling Temperature and Phase Transformation Kinetics Instructural Steels Determined by Mean Flow Stress and Dilatometry[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16(2):163.
- [8] 王有铭,李曼云,韦光.钢材的控制轧制和控制冷却[M].北 京:冶金工业出版社,2009.
- [9] Hong Sheng, Xu Pingguang, Bai Bingzhe, et al. A New Duplex Microstructure Grain Boundary Allotriomorphic Ferrite/ Granular Bainite[J]. Heat Treatment of Metal,2000(11):1.