700 M Pa 级超低碳高强度贝氏体厚钢板的 晶粒细化机制研究

夏政海¹,曹志强¹,罗 登¹,张永东¹,刘 凯²,吴开明²

(1. 湖南华菱湘潭钢铁有限公司科技开发中心, 湖南 湘潭, 411101;

2. 武汉科技大学冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉, 430081)

摘要:根据超低碳微合金化的成分设计意图,采用控制轧制和控制冷却工艺得到细化的贝氏体组织,利用光学 显微镜、FESEM 和TEM 对各类微观组织和析出物进行了研究和分析。结果表明,700 MPa 级超低碳贝氏体 厚钢板为细小均匀的粒状贝氏体和少量针状铁素体与多边形铁素体的复合组织,其屈服强度不小于 580 MPa, 抗拉强度不小于 700 MPa,低温冲击韧性为-20℃,Akv不小于 150 J。钢板具有强度高、韧性好和焊接 性能良好的特点,其强度和韧性的良好匹配主要是由于在粒状贝氏体相变前形成了 少量的针状铁素体分割 奥氏体晶粒,从而细化了最终的复合组织。

关键词:超低碳钢;贝氏体;针状铁素体;厚板;组织细化

中图分类号: TG 111; TG 142 文献标志码: A 文章编号: 1674 3644(2009) 03 0264 06

超低碳贝氏体钢(ULCB 钢) 是近 20 年来国际上新发展的一大类高强度、高韧性、多用途的钢种^[1-3]。ULCB 钢主要分为两大类:一是以美国和加拿大为代表的 CurNbB 系列; 二是以日本为代表的 MurNbB 系列。我国开发的 MurNbB 系列 钢属于贝氏体钢^[2-3],该类钢的合金成分设计已突破原有的高强度低合金钢的模式,大幅度地减少 了钢中碳的含量($w(C) \leq 0.05\%$),彻底消除了碳 对贝氏体钢韧性的损伤,钢的强度不再依赖碳的 含量,而是主要靠位错强化、微合金钢控轧强化、 细化晶粒强化以及 e Cu 的沉淀强化等手段来保 证钢的强度水平,从而使该类钢强韧性匹配极佳, 尤其是焊接性能较传统的需要调质处理的 HY-80、HY-100 系列等钢种有了大幅度的提高。

目前,我国使用传统的 600~ 800 M Pa 级厚 钢板主要采用较高合金量的调质钢,这类钢板低 温韧性不好,尤其是焊接性能差,构件焊接时不得 不进行钢板焊前预热和焊后消除应力热处理,一 般预热温度在 120 ℃以上,使得钢板和构件制造 成本十分昂贵,严重制约了钢结构和工程机械制 造行业的发展。由于 ULCB 钢优良的综合性能 和较低的生产和制造成本,使得该类钢广泛应用 于煤炭机械、工程机械和钢结构行业以及寒冷地 带的油气管线、海洋设施和舰船等方面^[+5],并朝 着更高强度级别和多功能化的方向发展。为此, 本文根据超低碳微合金化的成分设计意图,采用 光学显微镜、场发射扫描电子显微镜(FE-SEM) 和透射电子显微镜(TEM)对各类微观组织和析 出物进行了研究和分析,以期为工业化批量生产 超低碳贝氏体厚钢板提供试验依据和理论支撑。

1 试验与方法

试验材料为工业性试制的 700 MPa 级低碳 微合金高强度贝氏体钢厚钢板,采用的生产工艺 流程如下:铁水预处理[→]转炉冶炼[→]LF 精炼[→] VD 真空脱气[→]连铸[→]加热炉加热[→]初轧[→]精轧 [→]控冷[→]回火工艺,其化学成分如表 1 所示。

从试验钢板上截取小试样,将纵截面(沿轧制 方向) 磨平、抛光,用3% 的硝酸酒精浸蚀后在 Olympus BM51 光学显微镜和 FEI 生产的 Sirion 200 SEM 下对微观组织进行研究和分析。使用 双喷减薄方法制备薄膜样品在 FEI 生产的 Tecnai G2 20 型 TEM 下对微观组织与析出相进行 研究和分析。

收稿日期: 2008-11-13

基金项目:湖北省自然科学基金计划青年杰出人才资助项目(2006ABB037);湘钢新产品研究与开发基金资助项目;教育部新世纪优 秀人才支持计划资助项目(NCET-05-0680).

作者简介: 夏政海(1966), 男, 华菱湘潭钢铁有限公司高级工程师. E mail: xgxiazh@126. com

SEM 和 TEM 都装有 X 射线能谱仪(EDXS) 系统,可对各种物相进行分析。

表 1 700 MPa 级 贝氏体钢的化学成分(w_B/%) Table 1 Chemical composition of a 700 MPa grade bainitic steel

С	Si	M n	Р	S	Al	В
≤0.06	≤0.55 1	1. 00~ 1. 60	≤0.025	≤0. 025	≤0.045	≤0.003
Cr	NI	b T	i	Mo	Ni	V
≤0.60) ≤0.	06 ≤0	. 20	≤0.40	≤1.00	≤0. 10

2 结果与讨论

2.1 700 MPa 级贝氏体钢 CCT曲线计算与分析

700 M Pa 级钢的 CCT 曲线采用 JM atPro 软 件进行计算和模拟。根据湘潭钢铁有限公司(简 称湘钢)类似高强度钢的生产实际情况,在相变之 前,奥氏体晶粒大小约为 12μ m,计算模拟的 700 MPa 级钢的 CCT 曲线如图 1 所示。由图 1 可看 出,在不同的冷却速率下,可得到铁素体、贝氏体 和马氏体的转变产物:①在 605 ℃开始出现有奥 氏体有变;③在 0.1~1.0 ℃/s 的冷却速率范围 内转变为铁素体和珠光体;④在约 1~50 ℃/s 的 较大冷却速率范围内转变为铁素体和贝氏体。由 计算模拟可知,对于超低碳贝氏体钢,终轧结束后 的冷却速率必须合适(10~30 ℃/s)。过强会得 到马氏体组织,过弱会得到多边形铁素体。



图 1 计算模拟的 700 MPa 级贝氏体钢的 CCT 曲线 ●一铁素体为 0.1%; ◆一珠光体为 0.1%; ■一贝氏体 为 0.1%;* 一珠光体为 99.9%; ▲ 一贝氏体为 99.9% Fig. 1 Calculated CCT curves of a 700 MPa grade bainitic steel

2.2 700 M Pa 级贝氏体钢的显微组织及其分析 图 2 为 36 mm 厚板表面、1/4 厚度和中心的 光学显微组织。图 3 为 36 mm 厚板轧态 1/4 厚 度的 SEM 微观组织。由图 2、图 3 可看出,700 MPa 级钢的微观组织主要为贝氏体。在贝氏体 组织中主要为粒状贝氏体(GB),还有少量的针状



(a)36mm 厚板表面



(b) 36 mm 厚板 1/4 厚度



(c)36mm 厚板中心

图 2 36 mm 厚板轧态的光学显微组织 Fig. 2 Optical micrographs of an as rolled 36 mm thick plate

铁素体(AF)和马氏体/残留奥氏体(M/A)小 岛^[6],铁素体以多边形铁素体(PF)为主,少量的 针状铁素体的形成对于得到细化的复合组织具有 重要的作用。粒状贝氏体团的边界不规则,在粒 状贝氏体组织中可见零乱分布的细小 M/A 岛。 由图 3 可看出, M/A 岛的大小约为 1~ 3 µm。36 mm 厚板轧态表面、1/4 厚度和中心的光学显微 组织类型相同,组织粗细略微有些差别。由图 3 还可看出,轧态厚板从中心到表面针状铁素体的 数量增多, M/A 岛数量减少;从中心到表面 M/A 岛的大小也不断变小。这主要是由于厚板表面的 冷却速率较快,中心的冷却速率较慢。由图 1 可 看出,较快的冷却速率容易得到贝氏体和铁素体。



(a) 36 mm 厚板轧态 1/4 厚度(低倍)



(b) 36 mm 厚板轧态 1/4 厚度(高倍) 图 3 36 mm 厚板轧态 1/4 厚度的 SEM 照片 Fig. 3 SEM microstructures of the 1/4 thickness in an as rolled 36 mm thick plate

图 4 为 36 mm 厚板回火 1/4 厚度的光学显 微组织。图 5 为 36 mm 厚板 轧态 1/4 厚度的 SEM 微观组织。由图 4、图 5 可看出,700 M Pa 级 钢的回火组织仍是贝氏体和铁素体。在 550 ℃进 行回火时,钢的组织形态无明显变化,主要是为了 进一步改善钢板的组织均匀性,降低钢板贝氏体 中的位错密度,使粒状贝氏体中的板条进行回复, 改善钢板的强韧性。



图 4 36 mm 厚板回火态 1/4 厚度的光学显微组织 Fig. 4 Optical micrographs of the 1/4 thickness in an as tempered 36 mm thick plate



图 5 36 mm 厚板回火态 1/4 厚度的 SEM 照片 Fig. 5 SEM micrographs of the 1/4 thickness in an as tempered 36 mm thick plate

贝氏体的形态一般可分为上、下贝氏体、粒状 贝氏体和无碳贝氏体等^[1]。ULCB钢由于具有低 的碳含量,其组织形态属于无碳贝氏体。贝氏体 板条之间无碳化物,板条内亦无碳化物析出,板条 内存在大量的位错,板条的边界由位错墙构成,板 条之间存在一些尺寸非常细小的残留奥氏体小岛 (见图 6 中黑色小岛)。板条内部位错线相互缠 结,有的区域位错已经排列成明显的多边形网状。 因此,位错强化是 ULCB钢的重要强化手段。

在 ULCB 钢组织中,由于冷却速率的不同, 可出现多种不同形态的贝氏体,这些贝氏体由于 形成过程不同,除点阵结构均为体心立方外,其形 貌、亚结构、位错密度等均不尽相同,但在实际研 究中较难加以区分。本研究中的贝氏体可将其归 纳为粒状贝氏体。



图 6 36 mm 厚板轧态 1/4 厚度的 TEM 照片 Fig. 6 A TEM microstructure of 1/4 thickness in an as rolled 36 mm thick plate

2.3 700 M Pa 级贝氏体钢的析出物及其分析

对于 700 M Pa 低碳微合金贝氏体钢,由于含 有 N b、T i 和 V 微合金元素,因此拟对其析出情况 进行分析。通过透射电子显微镜分析发现:①析 出物(见图 7 中箭头处)的形貌有的表现为方形, 有的表现为近似球形,有的形状不规则;②析出物 的大小为 30~50 nm。由析出物的能谱分析(见 图 8)表明,析出物为 Nb 和 T i 的 C、N 复合析出 物。

2.4 700 M Pa 级贝氏体钢的力学性能

湘钢 700 MPa 级贝氏体钢根据低碳微合金 化成分设计意图,采用控制轧制和控制冷却得到 了以粒状贝氏体为主的组织,经过 550 ℃的回火 工艺得到了综合力学性能优异的钢板。湘钢生产 的高强度 700 MPa 级钢,具有细小均匀的粒状贝 氏体+ 铁素体的微观组织,晶粒度控制在 12 级以 上,组织晶粒度差异控制在 1.5 级以内,力学性能 均匀,屈服强度不小于 580 MPa,抗拉强度不小于 700 MPa,低温冲击韧性为- 20 ℃,*A* kv不小于 150 J。

2.5 700 M Pa 级贝氏体钢的组织细化机理分析
 2.5.1 微合金化元素的作用

700 M Pa 级高强度钢的成分设计主要考虑了 4 个方面的因素: ①充分扩大钢种的非再结晶区 温度范围,保证轧后基体中有很高的位错密度; ② 在变形和变形后有很快的微合金元素析出相在应 变诱导下析出; ③冷却时在贝氏体相变前尽可能 出现少量的针状铁素体组织; ④钢种在高强化后 仍有很好的韧性与焊接性。

Nb、Ti和 V 三种微合金元素都可以在奥氏 体中析出,因为在奥氏体中的溶解度较大而扩散 速率较小,故在奥氏体中的析出较为缓慢,应变可



(a) Nb 和 Ti 的 C、N 复合析出物(低倍)



(b)Nb和Ti的C、N复合析出物(高倍)
图 7 36 mm 厚板轧态 1/4 厚度析出物的形貌
Fig. 7 TEM micrographs of precipitate morphology of the 1/4 thickness in an as rolled 36 mm thick plate



图 8 36 mm 厚板轧态 1/4 厚度析出物的能谱分析 Fig. 8 Energy dispersive X ray spectra and composition of the precipitates in an as rolled 36 mm thick plate 加速析出过程,即应变诱导析出^[1-5]。微合金钢中 Nb(C、N)在未变形奥氏体中需要很长的等温时 间才能使过饱和的 Nb 完全析出。Nb 在变形奥 氏体中会产生应变诱导析出,其析出量会超过平 衡溶度积公式所预测的量,即形变使 Nb 在奥氏 体中的溶度积降低,形变温度越高,这种作用越明 显。Nb在变形奥氏体中应变诱导析出较在未变 形奥氏体中大为缩短。

700 M Pa 级贝氏体钢通过对微合金化的设 计,在 900 ℃以上轧制时进入非再结晶区,由于 Nb、Ti、B 等元素在变形基体内的偏聚与析出,使 再结晶过程难以进行,变形奥氏体内畸变积累,位 错密度很快升高。由于在该区域多道次的变形以 及道次之间的中间停留,在最终轧制后变形晶粒 内存在大量形变位错、形变带以及各种大小的微 合金元素析出物(在前几道轧制后析出)。通过微 合金元素在这些微结构上的应变诱导析出,最终 可得到充分细化的组织,一方面主要体现在针状 铁素体的形成分割原奥氏体,另一方面体现在析 出强化以及与位错的交互作用^[79]。

微合金元素 Nb 对奥氏体再结晶的阻碍在两 个方面起作用:一是固溶于奥氏体中的 Nb 偏聚 在晶界处产生溶质原子的拖曳作用,抑制奥氏体 的再结晶过程。在同样条件下, Nb 所产生的拖 曳作用大于 Ti、V、Mo、Mn 等合金元素;二是通 过在变形奥氏体中应变诱导析出 Nb(C、N)细小 粒子钉扎住晶粒边界而起作用,阻碍再结晶的进 行。

2.5.2 针状铁素体的作用

针状铁素体的形成对细化钢铁材料组织有明 显的作用^[7]。首先,钢中合适类型和大小的夹杂 物和/或析出物可促进晶内铁素体的形成。其次, 材料成分(如合金元素 V、B 等)会影响晶内铁素 体与晶界铁素体的形成、长大和竞争。另外,加工 条件(如冶炼和轧制工艺)也会影响晶内铁素体的 形成。再者,过冷度和冷却速率等对晶内铁素体 的形态和尺寸也有明显影响。板条状铁素体比针 状或等轴状铁素体更有利于分割奥氏体晶粒和促 使晶粒细化。此外,冶炼条件和合金化方式和方 法对夹杂物种类、数量和尺寸产生影响,进而影响 晶内铁素体的分布。因此,在适当的条件下得到 板条状形态和一定数量较大的晶内铁素体可有效 地细化低碳微合金钢的组织。在本研究中,采用 微合金化设计和较大的冷却速率等手段形成一定 量的针状铁素体,则可有效地分割奥氏体晶粒。 这些先形成的针状铁素体把变形奥氏体晶粒分割 成许多细小区域,从而限制了后续的粒状贝氏体 相变在这些小区域中进行,从而可得到充分细化 的复合组织(见图9)^[7]。本研究贝氏体厚钢板具 有强度和韧性的良好匹配主要是由于在粒状贝氏 体相变前形成了少量的针状铁素体分割了奥氏体 晶粒,从而细化了最终的复合组织。



图 9 针状铁素体和贝氏体精细复合组织的形成示意图 Fig. 9 Schematic illustration showing formation mechanism of a fine mixed microstructure of intragranular ferrite and bainite

3 结语

根据超低碳微合金化的成分设计意图, 经过 工业试制得到了细小均匀的粒状贝氏体+ 针状铁 素体+ 多边形铁素体的复合组织。晶粒度控制在 12级以上,组织晶粒度差异控制在 1.5级以内。 厚钢板力学性能均匀、稳定,其抗拉强度大于 700 MPa,低温冲击韧性良好,焊接性能优良。

参考文献

- Bhadeshia H K D H. Bainite in steels [M]. London: The Institute of Material, 2001: 343-396.
- [2] 翁宇庆. 超细晶钢一钢的组织细化理论与控制技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2003: 1-18.
- [3] Yang S W, Wang X M, Shang C J, et al. Relaxation of deformed austenite and refinement of bainite in a Nb containing microalloyed steel [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 8(3): 214 217.
- [4] Shang C J, Wang X M, He X L, et al. A special TM CP used to develop a 800 MPa grade HSLA steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 8(3): 224-228.
- [5] Wang X M, He X L, Yang S W, et al. Refining of intermediate transformation microstructure by relaxation processing [J]. ISIJ International, 2002, 42:1 553-1 559.
- [6] Yakubtsov I A, Boyd J D. Bainite transformation during continuous cooling of low carbon microalloyed steel[J]. Materials Science Technology, 2001, 17(3): 296 301.
- [7] Wu K M, Li Z G, Guo A M, et al. Microstructure evolution in a low carbon Nb Ti microalloyed steel
 [J]. ISIJ International, 2006, 46(1): 161-165.
- [8] Roberts W, Lidefelt H, Sandberg A. Mechanism of enhanced ferrite nucleation from deformed austenite in microalloyed steels [C]//C M Sellars, G J Dar

vies. Proceedings of Sheffield Conference on Hot working and Forming Processes. London: The Metal Society. 1980: 38. the recrystallization of austenite during hot deformation[C] // NY: Metallurgical Society of AIME, 1981: 129.

[9] Cuddy L J. The effect of microalloy concentration on

Grain refinement mechanism of a 700 MPa ultralow carbon bainite heavy plate steel

X ia Zhenghai¹, Cao Zhiqiang¹, Luo Deng¹, Zhang Yongdong¹, Liu Kai², Wu Kaiming²

(1. Research and Development Center, Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd.,

Hunan Valin Group, Xiangtan 411101, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory for Systems Science

on Metallurgical Processing, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: A fine grained bainite microstructure was obtained by means of an ultralow carbon and microalloyed steel design in conjunction with thermomechanical controlled process (TMCP). The microstructure and precipitates were investigated by Olympus optical microscope, field emission scanning electron microscope (FE-SEM) and transmission electron microscope (TEM). The results show that the mixed microstructure of granular bainite and a small amount of acicular ferrite and polygonal ferrite is observed in a 700 MPa ultralow carbon bainite microalloyed heavy plate steel. The yield strength and tensile strength of the plate is larger than those of 580 MPa and 700 MPa, respectively. The impact toughness A_{kv} is larger than 150 J at -20 °C. The plate has a good combination of high strength, good toughness and weldability. The good matching of high strength and good toughness should be attributed to the fine grained mixed microstructure consisting of granular bainite and acicular ferrite. The acicular ferrite, formed prior to granular bainite transformation, has effectively divided the austenite into many small regions, and consequently granular bainite transformed at lower temperatures is restricted in the small regions, which explains the microstructure refinement. **Key words** ultralow carbon steel; bainite; acicular ferrite; heavy plate; microstructure refinement

[责任编辑 徐前进]