

## 湘钢低碳贝氏体钢 XDB685 的研制

夏政海 曹波 曹志强

(湖南华菱湘潭钢铁有限公司湘钢科技开发中心,湘潭 411101)

**摘要** 采用 TMCP(Thermomechanical Controlled Process)-RPC(Relaxed Process Control)-T(Tempering)工艺研制了低碳贝氏体钢 XDB685 [ % :  $\leq 0.09C, 1.20 \sim 1.60Mn, 0.015 \sim 0.055Nb, 0.008 \sim 0.030Ti, 0.2 \sim 0.6(Cr + Ni + Mo + B)$  ]。检验结果表明,40~60 mm 钢板的屈服强度  $\geq 600$  MPa,抗拉强度  $\geq 700$  MPa, -40 °C 冲击功约为 200 J,并具有良好的焊接性能。

**关键词** 低碳贝氏体 高强度钢 TMCP 回火

## Research and Production of a Low Carbon Bainitic Steel XDB685 at Xiangtan Steel

Xia Zhenghai, Cao Bo and Cao Zhiqiang

(R&D Center, Xiangtan Iron and Steel Co Ltd, Hunan Valin Group, Xiangtan 411101)

**Abstract** A low carbon Bainitic steel XDB685 [  $\leq 0.09C, 1.20 \sim 1.60Mn, 0.015 \sim 0.055Nb, 0.008 \sim 0.030Ti, 0.2 \sim 0.6(Cr + Ni + Mo + B)$  ] has developed by using TMCP (Thermomechanical Controlled Process) - RPC (Relaxed Process Control) - T (Tempering) technology. Test results showed that the yield strength of 40~60 mm steel plate was  $\geq 600$  MPa, the tensile strength was  $\geq 700$  MPa, the impact energy at -40 °C was about 200 J, and the steel plate had excellent weldability.

**Material Index** Low Carbon Bainite, High Strength Steel, TMCP, Tempering

低碳(超低碳)贝氏体钢是20世纪70年代后期发展起来的一类钢种,由于其低的碳当量(Ceq)及低的裂纹敏感(Pcm),有着良好的低温韧性和高的强度,简单的钢板制造工艺和较低的结构制造成本,近年来已成为国际钢铁材料研究领域的热点<sup>[1-3]</sup>。TMCP、RPC(弛豫控制相变)技术的不断发展和完善,成为研究低合金高强度钢的最新成果和发展方向。

### 1 试验材料及方法

#### 1.1 高强度低碳贝氏体钢的设计思路与原则

XDB685 采用微合金化设计,充分利用晶粒细化、沉淀强化、位错强化和贝氏体组织强化,并经过高温回火处理,进一步改善钢板的强韧性并使之均匀化。产品设计时,主要考虑以下几点<sup>[4-7]</sup>:

(1)利用微量 B 大幅度增加钢的淬透性,B 和 Mo 的复合作用使奥氏体向铁素体转变推迟,扩大贝氏体转变区间,通过 RPC 工艺应用进一步细化贝氏

体板条束。加入 Cr 增加钢的过冷能力,降低贝氏体转变温度,加入 Ni 提高钢的低温冲击和断裂韧性。

(2)进行 Nb、Ti 微合金化处理,产生细晶强化和沉淀强化,使得大幅度降低钢的碳含量成为可能。

(3)大幅度降低碳含量,抑制珠光体组织的形成,同时有利于消除碳对贝氏体韧性的影响。

(4)回火处理稳定钢板的强韧性,同时消除 B 对韧性的不良影响。

#### 1.2 试验材料的化学成分和工艺试验

XDB685 试验钢由湘钢宽厚板厂冶炼,采用铁水预处理-转炉冶炼-LF 精炼-VD 精炼-连铸工艺生产,连铸坯断面尺寸为 260 mm × 1 880 mm。根据上述设计思路与原则,连铸坯的化学成分如表 1 所示。

TMCP 工艺试验在湘钢宽厚板厂四辊 3 800 mm 粗轧机和精轧机及 ACC 高密度管层流冷却装置上进行,该系统采用了先进的轧制控制和冷却控制模型,中间坯厚度、轧制道次、II 阶段开轧温度、开冷温

表 1 低碳贝氏体钢 XDB685 的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of low carbon Bainitic steel XDB685 / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Cr + Ni + Mo + B
$\leq 0.09$	0.15 ~ 0.55	1.20 ~ 1.60	$\leq 0.020$	$\leq 0.020$	0.015 ~ 0.055	0.008 ~ 0.030	0.2 ~ 0.6

度、终冷温度、冷却速度由人工设定,通过轧制和冷却模型控制,能得到稳定的轧制工艺数据。RPC 工艺试验考虑现场操作的可行性,通过冷却模型控制,设定 II 阶段终轧温度-开冷温度的温度差,系统将在 ACC 前待温至开冷温度,才进行加速冷却,具体 RPC 时间由现场测定。工艺流程为:加热-除鳞-粗轧机轧制-待温-精轧机轧制-RPC-ACC 加速冷却-矫直-空冷。

通过回火试验,避开回火脆性区,回火温度在 520 ~ 680 °C,性能均稳定,强度和韧性有少许差异。

2 试验结果与讨论

2.1 XDB685 钢的连续冷却转变曲线

通过热模拟机实验测定了 XDB685 钢的连续冷却转变曲线(CCT 曲线)(图 1)。由图 1 得知,在不同冷速条件下,贝氏体转变开始温度范围为 450 ~ 650 °C,转变结束温度 300 ~ 520 °C。

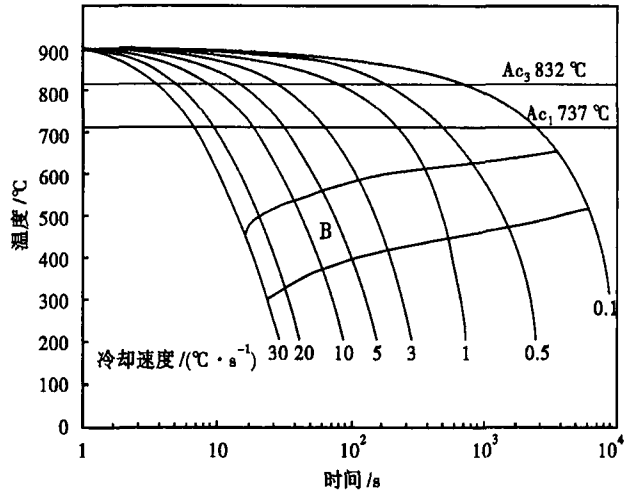


图 1 低碳贝氏体钢 XDB685 的连续冷却转变(CCT)曲线  
Fig.1 Continuous cooling transformation curves of low carbon Bainitic steel XDB685

2.2 不同轧制和冷却工艺下 XDB685 钢的力学性能  
表 2 为轧制和冷却工艺(共轧制 9 块钢板),以

表 2 低碳贝氏体钢 XDB685 的轧制、冷却工艺参数和力学性能

Table 2 Rolling and cooling parameters and mechanical properties of low carbon Bainitic steel XDB685

规格/ mm	I段开-终轧 温度/°C	待温厚度/ mm	II段开-终轧 温度/°C	开-终冷 温度/°C	返红温度/ °C	冷却速度/ (°C·s <sup>-1</sup> )	RPC 时间/ s	R <sub>p0.2</sub> / MPa	R <sub>m</sub> / MPa	A/ %	-40 °C, A <sub>KV</sub> / J
20	1 085-1 035	65	930-848	795-605	625	8	17	575 ~ 625	685 ~ 705	24.0	98 ~ 175
	1 088-1 030		928-848	792-495	521	15	16	620 ~ 630	735 ~ 745	21.0	199 ~ 205
	1 088-1 030		928-845	799-455	483	25	17	680 ~ 725	755 ~ 795	17.0	187 ~ 198
40	1 090-1 043	120	870-817	788-604	628	6	38	600 ~ 620	725 ~ 745	22.0	202 ~ 204
	1 080-1 046		868-812	791-495	518	10	37	625 ~ 635	735 ~ 755	19.5	188 ~ 201
	1 085-1 054		867-815	790-455	468	15	37	640 ~ 665	765 ~ 775	19.5	188 ~ 204
60	1 084-1 050	160	853-821	790-595	620	6	60	595 ~ 625	705 ~ 720	21.0	197 ~ 208
	1 087-1 048		850-822	788-500	532	9	59	620 ~ 635	745 ~ 765	21.0	185 ~ 201
	1 080-1 047		850-861	790-455	477	12	58	630 ~ 655	755 ~ 765	20.5	198 ~ 207

及热轧态不同冷却工艺下的力学性能。从表 2 可见,屈服强度 ≥ 600 MPa,抗拉强度 ≥ 700 MPa,伸长率也较高,-40 °C 的冲击功在 200 J 左右,综合力学性能较好。同时,随着终冷温度的降低,也就是随着冷却速度的提高,屈服强度的上升比较明显。

2.3 XDB685 钢的光学显微组织

钢板表面的主要组织为板条状和粒状贝氏体(图 2a)。60 mm 厚钢板的心部组织为板条状和粒状贝氏体,还有少量多边形铁素体和珠光体(图 2b)。

2.4 XDB685 钢的回火工艺与结果分析

对规格 40 mm 厚度的钢板进行了不同回火温度下的拉伸及冲击性能试验。回火温度为 520 ~ 720 °C,保温 50 min。从图 3(a)可见,520 ~ 680 °C 回火,屈服强度和抗拉强度有上升趋势,但变化不是很明显;回火温度大于 680 °C 时,屈服强度和伸长率

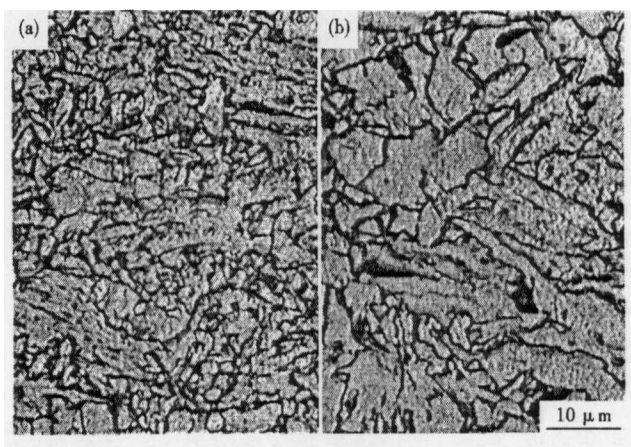


图 2 低碳贝氏体钢 XDB685 60 mm 板的组织形貌:(a)表面;(b)心部  
Fig.2 Structure morphology of 60 mm plate of low carbon Bainitic steel XDB685: (a) surface; (b) center

下降明显,抗拉强度变化不大。从图 3(b)可见,520 ~ 680 °C 回火时,-20 ~ -60 °C 冲击功的差别不大,

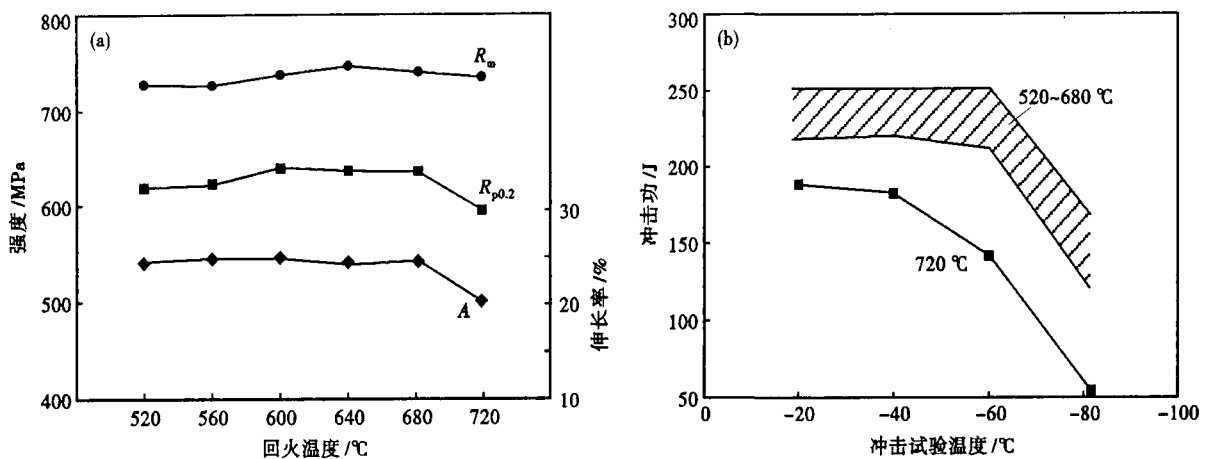


图 3 回火温度对低碳贝氏体钢 XDB685 40 mm 板屈服、抗拉强度和伸长率(a)以及冲击功(b)的影响

Fig 3 Effect of tempering temperature on tensile and yield strength, and elongation (a) and impact energy (b) of 40 mm plate of low carbon Bainitic steel XDB685

但 720 °C 回火时,冲击功较低,在 -80 °C 时,不同回火温度下冲击功均有大幅度下降,说明钢板在 -60 ~ -80 °C 开始脆性转变。

以上试验表明,在 520 ~ 680 °C 温度范围内回火,钢板力学性能均较为稳定,冲击功在 -60 °C 内也较为稳定,当回火温度达到 720 °C 时,接近  $A_{c1}$  温度,贝氏体中过饱和碳化物析出,高密度位错逐渐消失,导致屈服强度降低,伸长率和冲击功下降,当钢板达到韧-脆性转变温度时,冲击功下降十分明显。通过回火处理,钢板能够达到良好的强韧性匹配,强度更加

稳定,冲击韧性优于不回火钢板。

### 2.5 XDB685 钢的焊接性能

对于低焊接裂纹敏感性钢,焊接试验是检验钢板焊接性能的重要手段。选用规格 40 mm 厚度的钢板进行焊接试验。试验主要测定焊接接头的拉伸、弯曲性能及冲击功。表 3 为焊接接头拉伸弯曲性能和冲击功。试验结果表明,拉伸断裂部位在母材侧,断裂性能指标符合技术要求,正向和反向弯曲均完好,焊接接头冲击功满足技术要求,焊接接头力学性能良好。

表 3 低碳贝氏体钢 XDB685 焊接接头拉伸弯曲性能和冲击功

Table 3 Tensile and bending properties and impact energy of welding joint of low carbon Bainitic steel XDB685

焊接方法	焊接线能量/ ( $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	拉伸弯曲				-40 °C 冲击功/J		
		$R_m$ /MPa	拉断部位	$D=3a$ , 正弯 180°	$D=3a$ , 反弯 180°	焊缝	熔合线	线外 1 mm
手工焊	22.0	715,725	母材	完好	完好	125,132,107	67,69,59	201,200,197
气保焊	19.5	705,715	母材	完好	完好	99,87,88	68,77,84	205,187,179
埋弧焊	19.4	710,715	母材	完好	完好	123,122,131	67,55,68	187,188,167

### 3 结论

(1) 湘钢采用 TMCP-RPC-T 工艺试制的微合金低碳贝氏体钢 XDB685,其屈服强度  $\geq 600$  MPa,抗拉强度  $\geq 700$  MPa,均较高,伸长率也较高,-40 °C 的冲击功在 200 J 左右,综合力学性能良好。

(2) XDB685 钢还具有良好焊接性能,适合制造工程机械、桥梁、高层建筑和压力容器重要结构件。

#### 参考文献

- 1 Wang X M, He X L, Yang S W, et al. Refining of Intermediate Transformation Microstructure by Relaxation Processing. ISIJ International, 2002, 42(12):1553
- 2 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. Univ & Tech. Beijing (English Edition), 2001, 8(3):214

- 3 Okamoto H, Oka M. Recent Research on Bainitic Microstructures and Transformation Behaviors of Very Low Carbon HSLA Steels. Final Report of Bainitic Research Committee, ISIJ, 1994:49
- 4 尚成嘉,王学敏,杨善武,等. 高强度低碳贝氏体钢的工艺与组织细化. 金属学报, 2003, 39(10):10
- 5 侯华兴,于功利,张鹏远,等. 冷却工艺对超低碳贝氏体钢强韧性影响的研究. 钢铁, 2006, 41(3):44
- 6 李国彬,刘昌明. 控轧控冷工艺对低碳贝氏体钢组织性能的影响. 轧钢, 2005, 22(4):10
- 7 武会宾,尚成嘉,赵运堂,等. 回火对低碳贝氏体钢组织稳定性及力学性能的影响. 钢铁, 2005, 40(3):62

夏政海(1966-),男,工程师,1988年东北大学毕业,特殊钢新产品研发。

收稿日期:2007-12-03