

Q650 低碳贝氏体钢的研制

饶静^{1,2} 朱远志^{1,2}

(武汉科技大学: 1 钢铁冶金与资源利用省部共建教育部重点实验室; 2 材料与冶金学院, 武汉 430081)

摘要 开发的低碳贝氏体钢 Q650 (C: 0.06 ~ 0.08, Mn: 1.6 ~ 1.8, Cr ≤ 0.3, Nb ≤ 0.06, Ti ≤ 0.02, Mo ≤ 0.15, V ≤ 0.05, B ≤ 0.002) (20 ~ 40) mm × (1 600 ~ 3 200) mm 钢板的生产流程为铁水预处理-120 t 转炉-LF 精炼-连铸-控轧-控冷。通过控制再结晶区单次道次变形量 ≥ 15%, 累积变形量 ≥ 50%, 未再结晶区道次累积变形量 ≥ 60%, 冷却速度 15 °C/s, 终冷温度 ≥ 500 °C, 可获得不同类型的贝氏体相变组织, 并具有良好的综合性能。

关键词 低碳贝氏体钢 研制 控轧控冷 组织 性能

Development and Production of Low Carbon Bainitic Steel Q650

Rao Jing^{1,2} and Zhu Yuanzhi^{1,2}

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education;
2 School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The production flow sheet for (6 ~ 40) mm × (1 600 × 3 200) mm plate of developed low carbon bainitic steel Q650 (C: 0.06 ~ 0.08, Mn: 1.6 ~ 1.8, Cr ≤ 0.3, Nb ≤ 0.06, Ti ≤ 0.02, Mo ≤ 0.15, V ≤ 0.05, B ≤ 0.002) is hot metal pretreatment - 120 t converter - LF refining - slab casting - control rolling and cooling process. With controlling single pass deformation ≥ 15% in recrystallization zone and accumulated deformation ≥ 50%, and passes accumulated deformation ≥ 60% in un-recrystallization zone, controlling cooling speed 15 °C/s and end cooling temperature ≥ 500 °C, the steel has different types of bainite transformation structure and excellent comprehensive properties.

Material Index Low Carbon Bainitic Steel, Development and Production, Control Rolling and Cooling, Structure, Properties

低碳贝氏体钢是近年来国内外新发展起来的与铁素体 + 珠光体钢、传统回火马氏体调质钢并列的一大类新钢种^[1], 主要通过细晶强化, 位错及亚结构强化, Nb、Ti、V 微合金元素析出强化以及 ε-Cu 沉淀强化等方式来保证钢的强韧性匹配极佳和优良的焊接性能^[2]。在生产工艺上通常采用 TMCP (热机械处理) 或 TMCP + RPC (驰豫-析出-控制相变技术), 实现不同类型中温转变贝氏体组织的合理配比, 以提高钢材的综合性能。

高强度低碳贝氏体钢 Q650 的生产在 120 t 转炉-3500 mm 炉卷轧机生产线上完成: 铁水预处理 → 转炉冶炼 → LF 精炼 → 150 mm 板坯连铸 → 控轧 → 控冷。成品规格范围为 20 ~ 40 mm。

1 成分设计

低碳贝氏体钢 Q650 成分设计整体思路为“低 C + 高 Mn + Cr/Mo、Nb、B 微合金化”。C 含量控制在 0.02% ~ 0.08% 最佳^[2], 综合考虑产品的性能要求和生产成本, 将 C 含量控制在此范围的上限。

Mn 含量通常控制在 1% ~ 2%。由于较高的 Mn 含量, 既可以发挥固溶强化作用, 又有利于改善钢材韧性, 还能够使钢的等温转变曲线呈现明显的“海湾线”特征, 有利于获得贝氏体组织^[3], 因此将含量控制在中上限。

Cr 含量控制在中上限 0.3% 左右, 而将贵金属 Mo 含量降低, 控制在 0.15% 以下。Nb 的加入量为 0.05% 左右。通常 B 添加在 0.001% 就可以产生明显效果, 但含量到 0.002 2% 后影响不再增大, 超过 0.003% 固溶硼过于饱和, 在晶界析出粗大的 BN 会促进铁素体形成, 反而导致淬透性降低^[3,4]。出于对 B 的淬透性的考虑, 加入少量 Ti 以夺取钢中的 N 而使 B 保持固溶状态, 同时 TiN 微细粒子析出还可以阻止加热时晶界迁移从而避免原始奥氏体组织的过分粗化。通常 Ti 含量低于 0.005% 时, 固氮效果差, 超过 0.03% 时, 固氮效果达到饱和^[2]。在 600 °C 以下的一定温度范围内, V₄C₃ 具有最大形核率, 析出强化最明显^[5]。有研究表明, 钢中加入 0.10% 的

表 1 低碳贝氏体钢 Q650 化学成分/%
Table 1 Chemical composition of low carbon bainitic steel Q650 /%

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Ni	Cr	Mo	V	B	Al
0.06~0.08	≤0.30	1.6~1.8	≤0.020	≤0.010	≤0.06	≤0.02	≤0.01	≤0.3	≤0.15	≤0.05	≤0.002	≤0.04

钒可以使强度增加 200 MPa 以上^[6]。Al 的加入主要是细化奥氏体晶粒,其含量在 0.032 5% 时,AlN 在 890~900 °C 析出,可以有效控制奥氏体晶粒的长大^[7]。Q650 具体的化学成分控制见表 1。

2 生产过程控制

2.1 冶炼和连铸

采用 120 t 顶底复吹转炉冶炼,保证底吹畅通,熔池内搅拌充分,钢液温度不低于 1 650 °C。LF 精炼时,加渣料造高碱度渣,加脱氧剂脱氧去硫,渣白、流动性好,出炉吹氩时间 ≥ 8 min,中间包温度控制在 1 530~1 550 °C。

连铸浇注执行先上保护套后开浇的制度,中间包使用单层无碳渣覆盖,结晶器使用专用保护渣。拉坯速度 1~1.2 m/min,拉速稳定。二冷采用弱冷制度,铸坯堆冷 72 h 后清理表面缺陷。连铸还要求低倍组织良好,硫印检测中心偏析 0.5 级,夹杂、裂纹、气泡等 0 级。钢中全氧含量 < 25 × 10⁻⁶,夹杂物总量 < 0.007%。铸坯表面质量良好。

2.2 加热和轧制

加热温度的确定主要是基于对 Nb、B 的考虑,一方面要保证 Nb 在奥氏体中的充分固溶,文献[5]指出,0.10% C-0.06% Nb 的微合金钢 Nb 的全固溶温度应高于 1 176 °C;另一方面 B 的晶界偏聚受温度影响很大。碳含量 0.028%,酸溶 B 0.000 4% 的低碳贝氏体钢,加热到 1 200 °C 保温 15 min,B 的晶界偏聚现象基本消失^[8]。因此加热温度控制在 1 150~1 200 °C。同时由于微合金元素较多,钢坯在均热段应避免强化加热以防止表面产生裂纹。

轧制过程采用传统 TMCP 工艺中的两阶段控轧(CR)。通过奥氏体再结晶区和未再结晶区两阶段控轧,一方面充分细化奥氏体晶粒,为控冷后中温贝氏体转变提供细小的组织,另一方面在组织内引入高密度位错和大量变形带,为贝氏体相变后的微合金元素析出提供有利场所。

再结晶区变形量控制原则是尽可能减少轧制道次,加大单道次变形量,这样不但能够充分破碎晶粒,获得细小的奥氏体晶粒,而且可以避免混晶,获得完全的再结晶。生产中控制再结晶区单道次变形量 ≥ 15%,累积变形量 ≥ 50%。未再结晶区轧制时

钢板温度较低,而且此时的中间坯厚度已经变薄,压缩比相对减小,因此应适当降低单道次变形量,增大道次累积变形量。生产中控制未再结晶区道次累积变形量 ≥ 60%,中间坯厚度为成品厚度的 2~3 倍。最后几道次为了控制良好的板型,采用较小的道次压下量。厚度 25 mm 的 Q650 钢板轧制程序见表 2。

表 2 25 mm Q650 钢板轧制程序表
Table 2 Schedule of rolling for 25 mm Q650 steel plate

道次	厚度/ mm	压下量/ mm	压下率/ %	咬入 角/°	轧制力/ kN	辊缝/ mm
1	125.38	22.62	15.28	12.88	21 430	122.77
2	103.12	22.26	17.75	12.78	22 945	100.32
3	84.23	18.89	18.32	11.77	24 588	81.23
4	65.85	18.38	21.82	11.61	27 980	62.44
5	54.15	11.70	17.77	9.25	34 700	49.92
6	45.43	8.72	16.10	7.99	36 055	41.03
7	38.31	7.12	15.67	7.22	39 956	33.44
8	31.84	6.47	16.89	6.88	42 365	26.67
9	28.58	3.26	10.24	4.88	34 687	24.35
10	26.34	2.24	7.84	4.05	27 800	22.95
11	25.00	1.34	5.09	3.13	18 779	22.71

再结晶区开轧温度控制在 1 050~1 100 °C,未再结晶区开轧温度控制在 950 °C 以下。终轧温度的控制应尽可能接近相变点 Ar₃,但不能低于 Ar₃。这是因为在成分确定但没有快速冷却工艺的条件下,钢板的强韧性主要取决于晶粒细化的程度,终轧温度过高,不能得到充分细化的奥氏体晶粒,温度过低,进入两相区,将会诱导铁素体析出,造成混晶,在贝氏体相中产生大量的变形铁素体,影响成品板材的强度和韧性。因此终轧温度控制在 800 °C。

冷却工艺采取层流冷却装置实现不同冷却速度下的加速冷却(AC)。实际生产中通常将冷却速度控制在 15 °C/s 左右。根据产品性能要求及热矫直机的能力,终冷温度控制在 500 °C 以上,终冷温度过低,对矫直机损坏较大,而且钢板矫直困难,平整度很差。

3 组织与性能

实际生产中得到的组织大多是多边形铁素体(PF)、粒状贝氏体(GB)和板条贝氏体(LB)的单一组织或混合组织,如图 1(a~e)。PF 通常形成于温度较高、冷却速度较慢的条件下,随着温度的降低和冷却速度的增加,GB 的比例增加,在温度最低,冷却

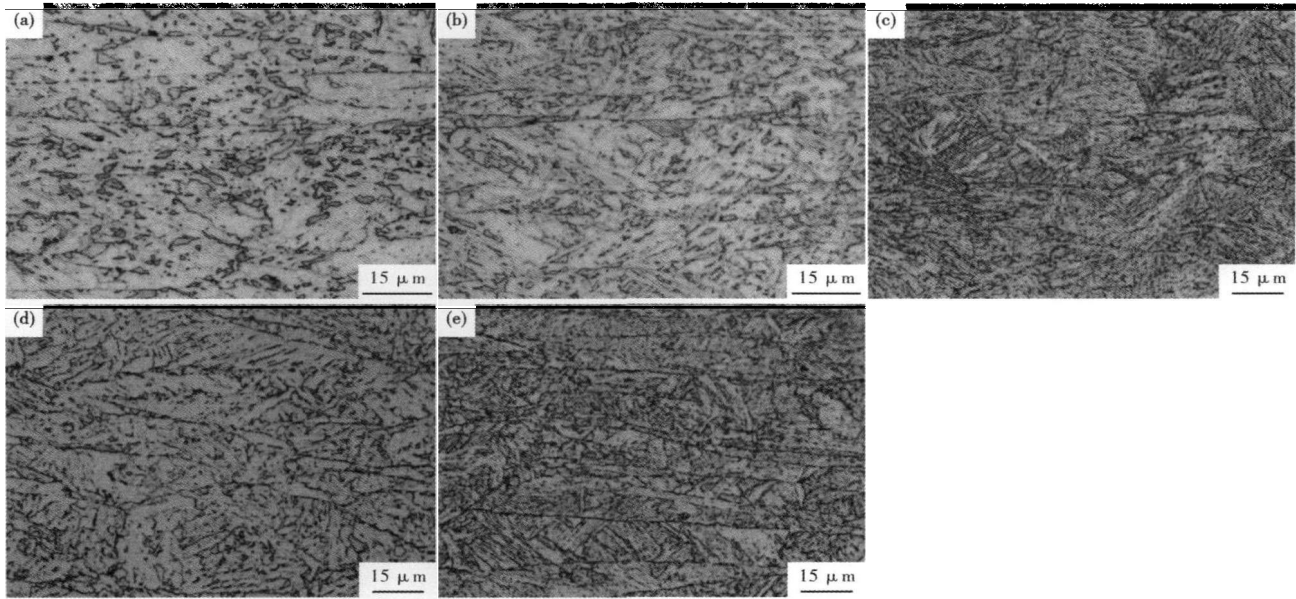


图1 工业生产 Q650 钢板的组织形貌:(a)GB(粒状贝氏体) + PF(多边铁素体) + M/A(马氏体/奥氏体岛);(b)LB(板条贝氏体) + GB + PF + M/A;(c)LB + GB;(d)GB;(e)LB

Fig.1 Morphology of structure of commercial produced plate of steel Q650: (a) GB (granular bainite) + PF (polygonal ferrite) + M/A (martensite / austenite); (b) LB (lath bainite) + GB + PF + M/A; (c) LB + GB; (d) GB; (e) LB

速度最大的条件下生成 LB。组织中获得 60% 的 GB 通常能够得到较好的综合力学性能。

目前低碳贝氏体钢 Q650 已经实现批量生产, 产品性能符合要求, 指标逐渐趋于稳定(表 3)。

表3 低碳贝氏体钢 Q650 产品力学性能

Table 3 Mechanical properties of low carbon bainitic steel Q650

批号	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	屈强比	伸长率/ %	-20 °C 冲击功 (A_{KV})/J		
9019	690	800	0.86	31.0	173	195	209
9020	750	870	0.86	28.0	230	211	196
9021	750	850	0.88	30.0	110	121	144
9022	730	835	0.87	30.5	281	301	272
9023	725	815	0.89	26.0	161	180	156
9024	685	810	0.85	28.0	166	213	139
9025	730	865	0.84	28.0	125	150	139

4 结论

Q650 钢加热温度控制在 1 150 ~ 1 200 °C。再结晶区开轧温度 1 050 ~ 1 100 °C, 未再结晶区开轧温度 950 °C 以下。终轧温度 800 °C。终冷温度 500 °C 以上。再结晶区道次变形量 ≥ 15%, 累积变形量 ≥ 50%, 中间坯厚度控制在成品厚度的 2 ~ 3 倍, 未再结晶区道次累积变形量 ≥ 60%, 可获得良好的综

合性能。

国家自然科学基金资助项目(50874083)

参考文献

- 1 贺信莱. 21 世纪新钢种-超低碳贝氏体钢. 金属世界, 1996, 68 (6): 3
- 2 贺信莱. 高性能低碳贝氏体钢-成分、工艺、组织、性能与应用. 北京: 冶金工业出版社, 2008
- 3 陈文满, 李利, 肖亚, 等. ≥550 MPa 级低合金高强度钢板的研制与开发. 重钢技术, 2009, 52(4): 29
- 4 张华国. 低碳高强度贝氏体钢板 PC80Q 的研制. 特钢技术, 2006, 12(3): 15
- 5 毛新平. 薄板坯连铸连轧技术微合金化技术. 北京: 冶金工业出版社, 2008
- 6 刘健, 张开坚, 陆建生, 等. 微合金元素钒在钢板中的强化机理及应用. 四川冶金, 2009, 31(2): 15
- 7 康永林. 薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- 8 杨善武, 王学敏, 贺信莱. 超低碳钢在铁素体生长过程中硼分布的变化. 钢铁研究学报, 1999, 11(4): 40

饶静(1976-), 女, 硕士生, 工程师, 2000 年武汉大学大学毕业, 金属材料组织、性能研究。

收稿日期: 2010-03-05