

控轧和时效对 570 MPa 超低碳贝氏体钢组织和性能的影响

张爱文

(宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 201900)

摘要 成分 (%) 为 0.02C-1.55Mn-0.62Ni-0.53Cu-0.003 5B-0.055V-0.019Ti-0.028Nb 的超低碳贝氏体钢 ULCS570, 由实验室 50 kg 真空感应炉冶炼, 锻 80 mm 厚板坯, 经开轧温度 1 150 °C, 终轧温度 900 °C 空冷轧成 25 mm 厚板材, 并用 Thermecmaster-Z 热模拟试验机测试了该钢的形变奥氏体连续冷却转变曲线。结果表明, 该钢形变后在 0.1 ~ 30 °C/s 冷却下的组织为贝氏体-铁素体 + 第 2 相或析出物, 轧态抗张强度 σ_b 为 595 MPa, 冲击韧性 A_{KV} 为 180 J, 轧态 + 600 °C 时效时的 σ_b 增加至 610 MPa, A_{KV} 增加至 202 J, 达到 570 MPa 级钢板的性能要求。

关键词 超低碳 贝氏体钢 控轧 连续冷却转变 组织 机械性能

Effect of Control Rolling and Aging on Structure and Properties of 570 MPa Ultra Low Carbon Bainitic Steel

Zhang Aiwen

(Research Institute, Baosteel Group, Shanghai 201900)

Abstract The ultra low carbon bainitic steel ULCS570 (0.02C-1.55Mn-0.62Ni-0.53Cu-0.003 5B-0.055V-0.019Ti-0.028Nb) was melted by a 50 kg vacuum induction furnace in laboratory, of which the 25 mm finished plate was rolled from forged 80 mm slab with beginning rolling temperature 1 150 °C, finishing temperature 900 °C and air cooling. The continuous cooling transformation curves of deforming austenite was measured by a Thermecmaster-Z thermal simulation machine. The results showed that the structure of steel deformed with cooling rate 0.1 ~ 30 °C/s was bainite-ferrite + secondary phase (precipitates); the tensile strength σ_b of steel as rolled condition was 595 MPa, impact toughness A_{KV} 180 J, of which as rolled + 600 °C aged condition the tensile strength σ_b of steel increased to 610 MPa, impact toughness A_{KV} to 202 J to meet the requirement for properties of 570 MPa steel plate.

Material Index Ultra Low Carbon, Bainite Steel, Control Rolling, CCT, Structure, Mechanical Properties

超低碳贝氏体钢(ULCB 钢)是近 20 多年来新发展的一大类高强度、高韧性、多用途钢种。这类钢组织、硬度与板厚的相关性较小, 避免了常规 TMCP 钢的微观组织与板厚、冷速密切相关的特性, 并且其较低的碳当量与焊接裂纹敏感系数使之焊接时可以焊前不预热, 焊后不热处理, 且可以承受大线能量焊接^[1,2]。本文对抗拉强度 570 MPa 级 ULCB 钢(ULCS570)的轧态及时效后的组织与力学性能进行了试验, 测定了此钢的奥氏体连续冷却转变曲线(CCT 曲线), 为该钢种的工业生产提供了一定的试验与理论依据。

1 试验材料及方法

在实验室用 50 kg 真空感应炉冶炼 ULCS570 钢, 浇铸成钢锭, 锻造并锯切成 80 mm × 100 mm × 150 mm 坯, 然后轧成 25 mm 厚板。在钢板宽度、长度方向各 1/4 处取金相、硬度及热模拟试样, 拉

伸、冲击在钢板宽度方向 1/4 处取样。锻造加热温度为 1 200 ~ 1 250 °C, 开锻温度为 1 150 °C, 终锻温度为 900 ~ 950 °C, 锻造后自然空冷。钢的化学成分见表 1, 轧制工艺见表 2。

用 Thermecmaster-Z 热模拟试验机测试了该钢种的形变奥氏体连续冷却转变曲线。观察了压缩试样的组织并测试硬度。热模拟工艺为: 以 20 °C/s 的升温速度加热至 1 200 °C 奥氏体化 3 min, 然后以 10 °C/s 的冷速冷却到 1 050 °C, 保温 5 s 然后以 10/s 的形变速度施以 0.3 的真应变, 再以 10 °C/s 的冷速冷却至 900 °C, 保温 5 s 后以 20/s 的形变速度施以 0.5 的真应变, 保温 2 s 后以 0.1 ~ 30 °C/s 的冷速冷却至室温。

2 试验结果

2.1 硬度及力学性能测试结果

ULCB 钢轧态组织为贝氏体铁素体基体加岛

表 1 ULCB570 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of steel ULCB570 /%

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	B	N	V	Ti	Nb	Ceq	Pcm
0.02	0.03	1.55	0.013	0.008	0.53	0.62	0.003 5	0.004 6	0.055	0.019	0.028	0.299	0.158

注: Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Mo/4 + V/14 + Cr/5; Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B

表 2 ULCB570 钢加热、轧制和冷却工艺
Table 2 Heating, hot rolling and cooling procedure of steel ULCB570

道次	轧制参数				温度 /℃	冷却	备注
	出口厚度 /mm	压下量 /mm	压下率 /%	温度 /℃			
1	65	20	25	1 150	空冷	粗轧	
2	40	25	38.5	1 080	空冷		
3	30	10	25	980	空冷	精轧	
4	25	5	16.7	900	空冷		

注:(1) 加热温度 1 200 ℃; (2) 保温时间按厚度 80 mm × 1.5 min/mm = 120 min 计算

状第二相。

轧态钢板的屈服强度与抗拉强度分别为 470 MPa 与 595 MPa, 且常温韧性和低温 (-20 ~ -80 ℃) 韧性均大于 47 J (表 3)。满足 JIS SM570 控轧或调质钢板的性能要求。钢板横向冲击韧性比纵向要低, 这与钢中的硫含量较高及轧制组织的各向异性有关。轧态钢板经 600 ℃ 时效后强韧性均有所提高。

表 3 ULCB570 钢的轧态及 600 ℃ 时效后的力学性能
Table 3 Mechanical properties of steel ULCB570 as rolled and as rolled + 600 ℃ aged

状态	规格 /mm	HV10	σ _{0.2} /MPa	σ _b /MPa	δ ₅ /%	ψ /%	A _{KV} /J	
							25 ℃	-60 ℃
轧态	25	197	470	595	22	75	180	115
轧态 + 600 ℃ 时效	25	206	495	610	20	77	202	123

2.2 形变奥氏体 CCT 曲线及压缩试样组织硬度测试结果

2.2.1 形变奥氏体 CCT 曲线

图 1 为 ULCB570 钢形变奥氏体的 CCT 曲线 (成分见表 1)。可以看出, 在整个冷速范围 (0.1 ~ 30 ℃/s) 内, 此钢均获得贝氏体组织, 且硬度 (HV10) 变化不大, 由 0.1 ℃/s 时的 190 缓慢增加至 30 ℃/s 时的 225。特别是 7 ~ 30 ℃/s 冷速范围内硬度几乎不变。

25 mm 厚钢板轧后自然空冷的 HV10 硬度为 197, 对应相同硬度的热模拟试样其冷速约为 0.1 ~ 0.5 ℃/s, 这可以说明在工业生产厚板时只要保

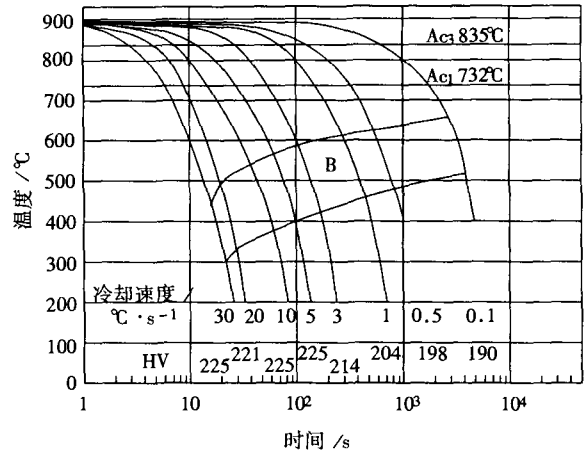


图 1 ULCB570 钢的形变奥氏体 CCT 曲线
Fig.1 CCT curves of deformed austenite of steel ULCB570

证芯部冷速不低于此冷速便可保证厚板从表面到芯部强度均可满足 570 MPa 的要求 (此处不考虑芯部偏析)。即使轧后加速冷却时表面冷速达到 30 ℃/s, 也不会导致表面与芯部的力学性能有较大差异。

2.2.2 压缩试样组织

图 2 为 4 个不同冷速下 ULCB570 钢的显微组织。图 2 可知, 在 0.1 ~ 30 ℃/s 冷速范围内, 组织形态均为贝氏体铁素体基体加第二相或析出物。

3 分析讨论

将钢的碳含量降至 0.02% 甚至以下并加入适当的合金元素, 可以使此类超低碳钢在很宽的冷速范围内获得粒状无碳贝氏体或板条贝氏体为主体的微观组织, 且碳含量的大幅下降, 消除了贝氏体的脆性。

由轧态钢板及热模拟试样的金相组织可知, 该 ULCB570 钢在不同冷速下的组织均为贝氏体铁素体基体加第二相或析出物, 不同冷速下的第二相或析出物比例不同。由图 2 可知, 随着冷速的增加, 贝氏体铁素体板条逐渐增加, 大颗粒岛状第二相逐渐减少; 岛状第二相逐渐演变为板条之间细小第二相, 同时板条内部位错增加。这是因为冷速越高, 贝氏体转变开始温度越低, 相变驱动

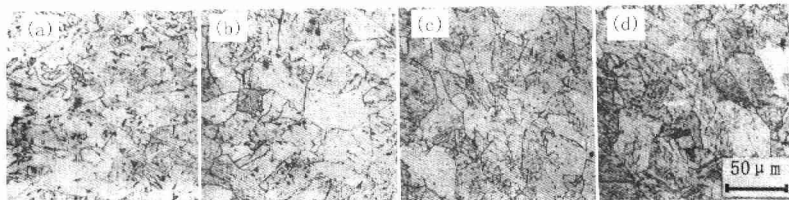


图 2 ULCB570 钢不同冷速下的光学显微组织/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0.1; (b) 1; (c) 5; (d) 30
Fig. 2 Structure of steel ULCB570 with different cooling rate $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 0.1; (b) 1; (c) 5; and (d) 30

力越大,碳原子的扩散不充分,碳在奥氏体内的富集只能在短距离内,导致贝氏体内的 M/A 组元尺寸减小,数量相应增加。同时贝氏体形态由粒状无碳贝氏体向板条状贝氏体转变,冷速增加,导致板条内部的位错密度上升。

另外该钢中加入了铜,由 600 $^{\circ}\text{C}$ 时效后钢板的硬度与力学性能不降反升可得,时效消除了轧态钢板的残余应力,且固溶于基体中的过饱和铜时效析出为弥散分布的 $\epsilon\text{-Cu}$ 。 $\epsilon\text{-Cu}$ 时效析出峰值温度约在 500 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 之间,当时效温度低于峰值温度时,随着温度上升,强度提高;当时效温度高于峰值温度时,随着时效温度的上升强度下降^[1]。此钢中加入了微合金元素 Nb 与 Ti,在时效时除了 $\epsilon\text{-Cu}$ 析出与长大外,还会有 Nb, Ti(C, N) 质点的析出与长大^[4]。对于铜含量不是很高的 ULCB 钢,时效时间可以短一些。如果时效时间过长,先期时效析出的细小析出物聚集长大后,时效后硬度下降。

ULCB570 钢经 600 $^{\circ}\text{C}$ 时效 30 min 后,强度与韧性均有所上升,这说明该时效温度和时间均可,且较短的时效时间可以提高工业生产的效率。

该钢的碳含量为 0.02%, 碳当量为 0.299%, 焊接裂纹敏感指数为 0.158%, 三个指标均很低,说明该钢属易焊接钢。文献[2]对成分、组织及性能与本文类似的钢做过焊接评定。焊接热影响区最高硬度仅为 280HV10, 且焊接输入热量达 20 kJ/mm 时, 钢板焊缝抗拉强度达到了与母材同等以上的水平; 并且焊接部位 -5 $^{\circ}\text{C}$ 的夏氏冲击吸收能高达 100 J 以上, 这说明此类钢可以适应 20 kJ/mm 的大线能量焊接。在 Y 型焊接裂纹试验中, 在气温 30 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 80% 的环境下, 防止裂纹产生的预热温度为 0 $^{\circ}\text{C}$ 。该文献中报道的钢板厚

度达 75 mm 以上, 可以实现非调质快速生产。

4 结论

(1) 实验室研究成功了厚度 25 mm、抗拉强度 570 MPa 级 ULCB 钢。轧态钢板经 600 $^{\circ}\text{C}$ 时效 30 min 后强韧性上升。轧态与时效后的钢板均满足 JIS S570 控轧或调质钢板的要求。

(2) 形变奥氏体连续冷却曲线测试结果表明, 只要能保证工业生产时不同厚度(厚度大于 25 mm)的钢板芯部冷速不小于 0.1 ~ 0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 即可满足抗拉强度不小于 570 MPa。同时该钢的组织与性能具有很宽的冷速适应性, 即使冷速高达 30 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 其硬度与强度也变化不大。这种成分的 ULCB570 钢在生产厚板时表面和芯部组织、硬度及性能差异很小。

(3) 随冷速的提高, ULCB570 钢组织逐渐由粒状无碳贝氏体向板条状贝氏体转变, M/A 组元和析出物逐渐细小, 位置逐渐由粒状无碳贝氏体内部向板条贝氏体的板条之间转移。

参考文献

- Shyichin W, Powe K. The Effect of Alloying Elements on the Structure and Mechanical Properties of ULCB Steels. *J Mater Sci*, 1993, 28 (19): 5169
- 岡津光浩, 林透, 天野虎. 種低炭素ベイナイトを利用した非調質 570 MPa 級厚肉高張力鋼板とその溶接部特性. *川崎鋼鐵技報*, 1998, 30(3): 131
- 周桂峰, 文嘉冰, 李平和, 等. 超低碳贝氏体钢 ULCB600 组织结构及性能的研究. *钢铁*, 2000, 35(12): 47
- 王学敏, 周桂峰, 杨善武, 等. 不同 Cu 含量超低碳钢的时效行为. *金属学报*, 2000, 36(2): 113

张爱文(1972-), 男, 硕士, 工程师, 1998 年东南大学毕业, 从事钢铁新材料开发和研究。