

薄板坯连铸连轧 30CrMo 钢的连续冷却转变 (CCT) 曲线和应用

毛新平^{1,2} 谢利群³

(1 广州珠江钢铁有限责任公司, 广州 510730; 2 武汉科技大学材料科学与冶金工程学院, 武汉 430081;

3 广钢集团技术中心薄板坯连铸连轧技术研究所, 广州 510730)

摘要 采用膨胀法测定了 56 mm 薄板坯连铸成 6 mm 板的 30CrMo 钢(/% : 0.32C, 0.20Si, 0.60Mn, 0.20Ni, 0.97Cr, 0.18Mo) 在 0.03 ~ 15.60 °C/s 冷却速率下的连续冷却转变 (CCT) 曲线并观察了各冷却速率下的显微组织。得出 30CrMo 钢的相变临界点 $Ac_3 = 800$ °C, $Ac_1 = 735$ °C, $B_s = 510$ °C, $M_s = 340$ °C, $M_f = 220$ °C。应用结果表明, 30CrMo 钢 6 mm 板卷取后的空冷的冷却速率 ≤ 0.06 °C/s, 当卷取温度为 610 ~ 640 °C 时获得铁素体 + 珠光体组织, 避免贝氏体形成导致强度显著升高和塑性变差。

关键词 30CrMo 钢 薄板坯连铸连轧 CCT 曲线 卷取温度

Continuous Cooling Transformation Curves of Steel 30CrMo Produced by Thin Slab Casting and Rolling Process and Its Application

Mao Xinping^{1,2} and Xie Liqun³

(1 Guangzhou Zhujiang Iron and Steel Co Ltd, Guangzhou 510730; 2 Faculty of Materials Science and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, 430081; 3 Thin Slab Casting and Rolling Research Institute, Technology Center, Guangzhou Iron and Steel Group, Guangzhou 510730)

Abstract The continuous cooling transformation (CCT) curves with cooling rate 0.03 ~ 15.60 °C/s of Steel 30CrMo (/% : 0.32C, 0.20Si, 0.60Mn, 0.20Ni, 0.97Cr, 0.18Mo) 6 mm plate continuous-rolled by 56 mm thin slab are measured by using dilatation method and the microstructure of steel with different cooling rate is observed to get the phase transformation point of steel 30CrMo- $Ac_3 = 800$ °C, $Ac_1 = 735$ °C, $B_s = 510$ °C, $M_s = 340$ °C and $M_f = 220$ °C. Application results show that the cooling rate of 6 mm plate after coiling is ≤ 0.06 °C/s, as coiling temperature is 610 ~ 640 °C, the structure of steel 30CrMo is ferrite + pearlite, it is available to avoid forming bainite structure that leads to obvious increase of strength of steel and deterioration of plasticity of steel.

Material Index Steel 30CrMo, Thin Slab Casting and Rolling, CCT Curves, Coiling Temperature

随着薄板坯连铸连轧技术的推广应用, 至 2009 年底, 全球薄板坯连铸连轧生产线年生产能力达 10 618 万 t, 其中中国已具备 3 280 万 t 年生产能力, 成为全球拥有薄板坯连铸连轧生产线最多、产能最大的国家^[1]。近年来采用薄板坯连铸连轧流程已开发并批量生产系列中碳板带钢^[2,3]。

1 CCT 曲线的测定

1.1 试验过程与方法

测定连续冷却转变 CCT (Continuous Cooling Transformation) 曲线的试验材料选自珠钢生产的 30CrMo 合金结构钢(/% : 0.32C、0.20Si、0.60Mn、0.20Ni、0.97Cr、0.18Mo), 铸坯为 56 mm × 1 250 mm, 成品板为 6 mm × 1 250 mm。将试验钢加工成 $\Phi 3$ mm × 10 mm 的标准圆柱体膨胀试样, 用 Formastor-Digital 全自动相变仪测定试验钢的膨胀曲线, 测定不同冷却速率下的硬度, 应用光学显微镜和电子

显微镜观察试样在各种冷却条件下的显微组织, 采用切线法绘制 CCT 曲线。

为了使原始奥氏体晶粒与终轧后的晶粒尺寸基本相同, 设定加热温度为实际终轧温度 900 °C。在真空保护条件下将试样以 10 °C/s 的速度升至 900 °C, 保温 5 min 以完全奥氏体化。然后以 0.02 ~ 16 °C/s 不同的冷却速率冷却至室温, 并测得试样在冷却过程中的温度-应变膨胀曲线, 即 CCT 曲线。

1.2 试验结果与分析

从图 1、图 2 及表 1 可以看出:

- (1) 在 600 °C 以上, 当冷却速率 ≤ 0.50 °C/s 时, 显微组织为铁素体 + 珠光体组织, HV 为 176 ~ 205;
- (2) 在 520 ~ 600 °C, 过冷奥氏体处于亚稳定状态;
- (3) 在 340 ~ 520 °C, 当冷却速率 ≤ 6.70 °C/s 时, 过冷奥氏体在不同冷却速率下均发生奥氏体向贝氏体的转变, 当温度降低到马氏体相变区发生剩余奥氏体向马氏体的转变, 显微组织为贝氏体组织

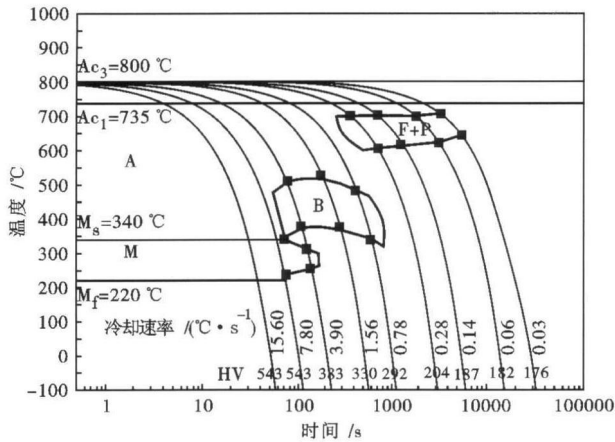


图1 30CrMo 钢的 CCT 曲线
Fig.1 CCT curves of steel 30CrMo

或贝氏体 + 马氏体组织, HV 为 292 ~ 380;

(4) 在 340 °C 以下, 当冷却速率 > 6.70 °C/s 时, 组织为马氏体组织, HV 在 540 左右。

可见, 30CrMo 钢的相变临界点: $Ac_3 = 800\text{ °C}$, $Ac_1 = 735\text{ °C}$, $B_s = 510\text{ °C}$, $M_s = 340\text{ °C}$, $M_f = 220\text{ °C}$ 。

2 CCT 曲线的应用

2.1 试验过程与方法

试验用 30CrMo 钢的化学成分为 (wt%): 0.31 ~ 0.33C, 0.20 ~ 0.23Si, 0.53 ~ 0.64Mn, 0.09 ~ 0.13Cu, 0.19 ~ 0.21Ni, 0.97 ~ 1.00Cr, 0.17 ~ 0.20Mo。设计了两种不同的控制冷却工艺方案:

(1) 卷取温度 $\geq 600\text{ °C}$, 处于铁素体 + 珠光体相

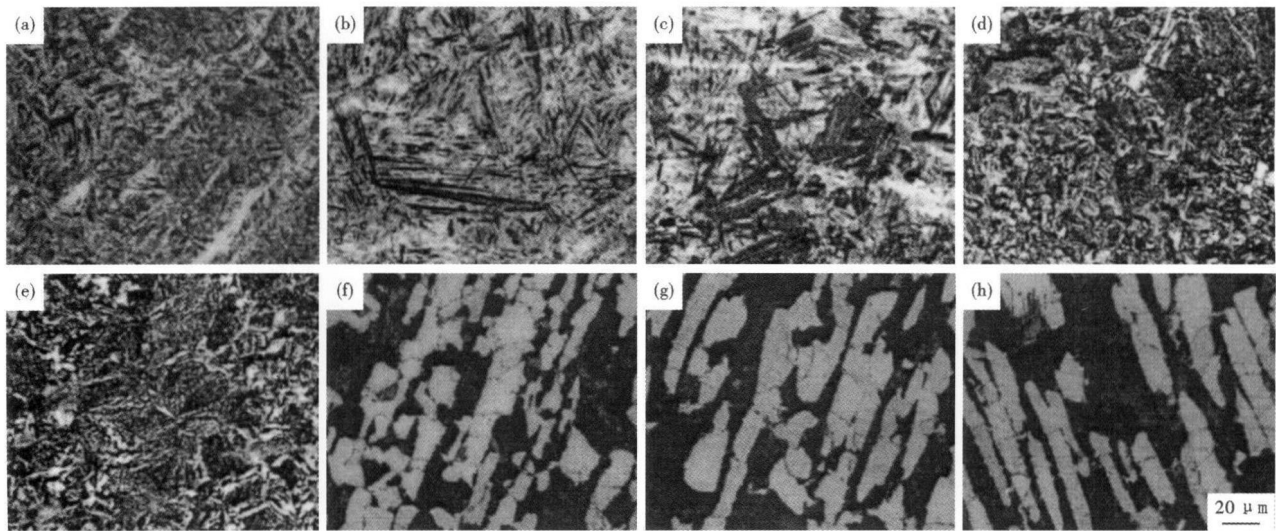


图2 30CrMo 钢的组织形貌, 试样号和冷却速度 / ($\text{°C} \cdot \text{s}^{-1}$) - (a) No1, 15.60; (b) No2, 7.80; (c) No3, 3.90; (d) No4, 1.56; (e) No5, 0.78; (f) No6, 0.28; (g) No7, 0.14; (h) No8, 0.06

Fig.2 Morphology of structure of steel 30CrMo, sample No and cooling rate / ($\text{°C} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) No1, 15.60; (b) No2, 7.80; (c) No3, 3.90; (d) No4, 1.56; (e) No5, 0.78; (f) No6, 0.28; (g) No7, 0.14; (h) No8, 0.06

表1 冷却速率对 30CrMo 钢硬度和组织的影响

Table 1 Effect of cooling rate on structure and hardness of steel 30CrMo

试样号 No	冷却速率/ ($\text{°C} \cdot \text{s}^{-1}$)	硬度 (HV)	显微组织
1	15.60	542.80	马氏体
2	7.80	543.63	马氏体
3	3.90	382.88	贝氏体 + 马氏体
4	1.56	329.49	贝氏体
5	0.78	292.44	贝氏体
6	0.28	204.22	铁素体 + 珠光体
7	0.14	186.55	铁素体 + 珠光体
8	0.06	181.57	铁素体 + 珠光体
9	0.03	176.46	铁素体 + 珠光体

变区;

(2) 卷取温度在 510 ~ 600 °C, 处于过冷奥氏体

亚稳定区, 在 B_s 点以上。

2.2 试验结果与分析

从表 2 和图 3 得到:

第 1 种方案卷取温度 $\geq 600\text{ °C}$, 试验钢抗拉强度为 755 ~ 880 MPa, 伸长率为 16.0% ~ 21.5%, 金相组织为铁素体 + 珠光体;

第 2 种方案卷取温度为 510 ~ 600 °C, 试验钢抗拉强度为 895 ~ 1350 MPa, 伸长率为 2% ~ 17%, 其中当卷取温度在 580 ~ 600 °C, 试验钢抗拉强度 $\leq 1000\text{ MPa}$, 金相组织为铁素体 + 珠光体, 当卷取温度 $\leq 575\text{ °C}$, 试验钢抗拉强度大于 1000 MPa, 金相组织中出现贝氏体, 随着钢中贝氏体体积分数的增加甚至全部为贝氏体组织, 试验钢抗拉强度增加。

表 3 冷却工艺对 30CrMo 钢组织和力学性能的影响
Table 3 Effect of cooling process on structure and mechanical properties of steel 30CrMo

试样 No	工艺方案	厚度/mm	卷取温度/℃	层流冷却速率/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	卷取后冷却速率/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	抗拉强度/MPa	伸长率/%	金相组织
1	1	4.00	637	32.1	0.036	780	21.5	铁素体 + 珠光体
2	1	3.60	635	32.6	0.036	755	21.0	铁素体 + 珠光体
3	1	2.80	621	37.5	0.034	880	20.0	铁素体 + 珠光体
4	1	2.45	626	37.8	0.033	860	16.0	铁素体 + 珠光体
5	2	2.75	591	39.1	0.031	925	16.5	铁素体 + 珠光体
6	2	2.45	587	39.6	0.030	970	16.0	铁素体 + 珠光体
7	2	3.10	580	36.6	0.029	1 305	4.0	贝氏体 + 少量(铁素体 + 珠光体)
8	2	2.45	575	46.0	0.029	1 340	4.0	贝氏体 + 少量(铁素体 + 珠光体)
9	2	3.10	572	36.1	0.029	1 305	4.0	贝氏体 + 少量(铁素体 + 珠光体)
10	2	4.00	570	29.7	0.029	1 050	8.5	贝氏体 + 少量(铁素体 + 珠光体)
11	2	2.65	566	43.4	0.028	1 350	3.0	贝氏体 + 少量(铁素体 + 珠光体)
12	2	3.90	565	31.5	0.028	1 320	3.0	贝氏体

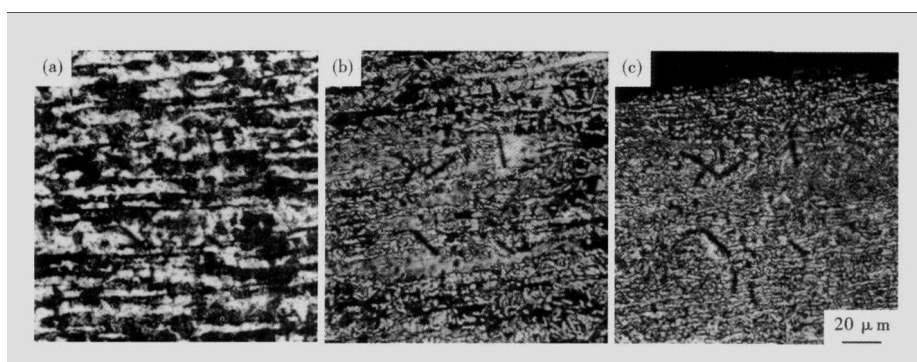


图 3 卷取温度对 30CrMo 钢 6 mm 板组织和抗拉强度的影响: 卷取温度 635 $^{\circ}\text{C}$, 试样 No2, 铁素体 + 珠光体, 755 MPa (a); 580 $^{\circ}\text{C}$, 试样 No7, 铁素体 + 珠光体 + 贝氏体, 1 015 MPa (b); 565 $^{\circ}\text{C}$, 试样 No12, 贝氏体, 1 320 MPa (c)

Fig. 3 Effect of coiling temperature on structure and tensile strength of steel 30CrMo 6 mm plate: Sample No, coiling temperature and tensile strength- (a) No2, ferrite + pearlite, 635 $^{\circ}\text{C}$, 755 MPa; (b) No7, ferrite + pearlite + bainite, 580 $^{\circ}\text{C}$, 1 015 MPa; (c) No12, bainite, 565 $^{\circ}\text{C}$, 1 320 MPa

2.3 结果讨论

(1) 两种控制冷却工艺方案下, 试验钢的层流冷却速率均大于珠光体或贝氏体的形成临界冷却速率(6.70 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$), 而试验钢的层流冷却速率全部大于 28 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$; 因此, 在层流冷却过程试验钢不发生相变, 相变是在卷取之后的缓慢冷却过程中发生的。卷取后的缓慢空冷过程中, 冷却速率均小于 0.06 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。因此在第 1 种控制冷却工艺方案中, 卷取温度 ≥ 600 $^{\circ}\text{C}$, 在 ≤ 0.06 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷却速率下, 过冷奥氏体全部转变为铁素体 + 珠光体; 在第 2 种控制工艺方案中, 其中卷取温度在 510 ~ 600 $^{\circ}\text{C}$ 时, 在冷却速率 ≤ 0.06 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的情况下, 组织中贝氏体的体数分数增加, 铁素体和珠光体组织减少, 铁素体尺寸减小。当卷取温度达到 565 $^{\circ}\text{C}$ 时, 组织全部为贝氏体组织。

(2) 钢中组织全部为铁素体 + 珠光体组织时, 钢的抗拉强度较低, 伸长率较好, 铁素体尺寸越大,

强度越低, 钢材的后续加工性能越好; 随着低温组织贝氏体体积分数的增加, 钢的抗拉强度增加, 伸长率降低; 当钢中全部为贝氏体组织时, 强度最大, 伸长率最小, 加工性能最差。

3 结论

为了获得综合性能较为理想的 30CrMo 钢, 合理的卷取温度应 ≥ 600 $^{\circ}\text{C}$, 保证钢中的组织为铁素体 + 珠光体组织, 避免贝氏体组织的形成而导致强度显著升高和塑性变差。考虑卷取温度过高容易导致产生

表面质量及卷形问题, 最佳卷取温度值为 610 ~ 640 $^{\circ}\text{C}$ 。

2010 年广东省重大专项: 先进汽车结构用钢共性技术研究及产业化(2010A080407003)

参考文献

- 1 殷瑞钰, 张 慧. 新形势下薄板坯连铸连轧技术的进步与发展方向. 钢铁, 2011, 46(4): 1
- 2 广州珠江钢铁有限责任公司. 一种生产 30CrMo 热轧钢板的方法. 中国专利 201010019526. 6, 2010
- 3 湖南华菱涟源钢铁有限公司. 一种基于薄板坯工艺的中高碳高强度的生产方法. 中国专利 200810048357. 1, 2008

毛新平(1965-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 钢铁材料研究。

收稿日期: 2011-11-26