

C-Mn-Si 系超级贝氏体钢连续冷却转变 (CCT) 曲线

王凤琪^{1,2} 徐光^{1,2} 陈静^{1,2} 补丛华^{1,2} 邹航^{1,2}

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

摘要 采用热膨胀法和金相法, 通过 Gleeble-1500 热模拟试验机测定 C-Mn-Si 系低碳 (/% : 0.11C, 1.15Si, 1.85Mn, 0.032Al, 0.003Ti, 0.0024N) 和中碳 (/% : 0.35C, 1.11Si, 1.82Mn, 0.041Al, 0.002Ti, 0.0042N) 贝氏体钢在 0.5 ~ 30 °C/s 的冷却速度下连续冷却时的膨胀曲线, 确定相变点, 并结合显微组织, 借助 Origin 软件分别绘制出两种钢的连续冷却转变 (CCT) 曲线。结果表明, 0.11% C 钢当冷却速度 ≤ 1 °C/s 时获得铁素体 + 贝氏体 + 马氏体组织, 冷却速度 ≥ 2 °C/s 时为贝氏体 + 马氏体组织, 0.35% C 钢冷却速度 ≥ 0.5 °C/s 即可获得贝氏体 + 马氏体组织; 随碳含量增加, 贝氏体和马氏体转变温度均降低。

关键词 C-Mn-Si 系贝氏体钢 C 含量 CCT 曲线 相变点 组织

Continuous Cooling Transformation Curves of C-Mn-Si Series Super-Bainite Steel

Wang Fengqi^{1,2}, Xu Guang^{1,2}, Chen Jing^{1,2}, Bu Conghua^{1,2}, Zou Hang^{1,2}

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

Abstract Dilatation curves of C-Mn-Si series low carbon (/% : 0.11C, 1.15Si, 1.85Mn, 0.032Al, 0.003Ti, 0.0024N) and medium carbon (/% : 0.35C, 1.11Si, 1.82Mn, 0.041Al, 0.002Ti, 0.0042N) bainite steel continuous cooling with cooling rate 0.5 ~ 30 °C/s have been measured by using thermal dilation method and metallographic examination with the Gleeble-1500 hot simulation machine to define the phase transformation points, and combined with microstructure observation, the continuous cooling transformation (CCT) curves of two steels are respectively plotted by Origin software. Results show that with cooling rate ≤ 1 °C/s, the structure of 0.11% C steel is ferrite + bainite + martensite, as cooling rate ≥ 2 °C/s, its structure is bainite + martensite, and with cooling rate ≥ 0.5 °C/s the 0.35% C steel has bainite + martensite structure; with increasing carbon content, the transformation temperature of bainite and martensite all decreases.

Material Index C-Mn-Si Series Bainite Steel, C Content, CCT Curves, Phase Transformation Point, Structure

钢的过冷奥氏体连续冷却转变 (CCT- Continuous Cooling Transformation) 曲线图, 可较好地模拟实际生产条件, 所以它能够为制订实际生产工艺提供参考。根据连续冷却转变曲线, 可以选择最适当的工艺规范, 从而得到所需的组织, 达到控轧钢材各种性能的目的。因此, 研究人员对各种金属材料的 CCT 曲线进行了研究^[1-3], 有的还对 CCT 曲线的精确绘制进行了研究^[4]。

本文研究了两种成分的 C-Mn-Si 系超强贝氏体钢的 CCT 曲线和冷却速度对组织的影响。

1 实验材料和方法

ZGJL 真空感应炉公称容量为 25 kg, 中频额定功率 100 kVA, 中频额定频率 2 500 Hz, 中频额定电压 750 V, 极限真空度 5×10^{-2} Pa, 最高熔炼温度 1 700 °C。出钢量约 11 kg 时, 钢锭尺寸: 大头直径

120 mm, 小头直径 60 mm, 高度约 170 mm。

Gleeble-1500D 数控动态热-力学物理模拟试验机所用的试样卡头空间尺寸为高 50 mm、厚 25 mm 和直径 25 mm。

Zeiss Axioplan 2 imaging 显微镜的标准配置观察放大倍率为 50 ~ 1 000 倍。实验材料的化学成分见表 1。

实验用钢 11 kg 钢锭在 $\Phi 300$ mm \times 500 mm 两辊热轧机上轧制成 10 mm \times 50 mm 的扁坯, 机加工成圆柱形热模拟试样。

表 1 实验钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of test steels /%

编号	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	N
No1	0.11	1.15	1.85	0.014	0.002	0.032	0.003	0.0024
No2	0.35	1.11	1.82	0.008	0.003	0.041	0.002	0.0042

将试样加工成 $\Phi 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱体,通过 Gleeble-1500 热模拟试验机对两种不同成分的 C-Mn-Si 系贝氏体钢进行变形-冷却实验,以 $20 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 把试样加热到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 360 s 后,以 $0.5 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的冷却速度冷却至室温,测量和记录冷却过程中的膨胀曲线。

将实验后的试样沿径向于中部切开,然后镶嵌成金相试样,研磨、抛光后用 5% 硝酸酒精溶液腐蚀,用 Zeiss Axiplan 2 imaging 显微镜观察试样组织。

2 实验结果

2.1 膨胀曲线

图 1 为 No1 和 No2 钢典型的试样膨胀曲线。金属具有热胀冷缩的特性,随着温度的降低,金属将逐渐收缩,但如果在冷却过程中发生了奥氏体转变,由于晶格结构的变化,金属将产生膨胀,从而在冷却曲线产生拐点。

在图 1(a) 的膨胀曲线上有 703 、 610 、 525 、 $316 \text{ }^\circ\text{C}$ 等拐点,结合图 2(a) 的金相组织,该试样冷却后的组织为铁素体、贝氏体和马氏体,因此可以确定铁素体转变开始和结束温度分别为 $703 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $610 \text{ }^\circ\text{C}$,贝氏体开始转变温度为 $525 \text{ }^\circ\text{C}$,马氏体开始转变温度为 $316 \text{ }^\circ\text{C}$ 。按照该方法可以确定出 No1 钢所有试样的转变温度(表 2)。

2.2 组织

No1 钢在不同冷却速度下的金相组织见图 2 所示。表 2 给出了 No1 钢相变点温度及组织。同理可以得到 No2 钢的相变点温度(图 1b)及组织(表 3)。

3 CCT 曲线的绘制及讨论

按照参考文献[5]介绍的方法,根据表 2 和表 3 的实验结果,利用 Origin 软件可分别绘制出 No1 钢和 No2 钢的 CCT 曲线(图 3a 和图 3b)。

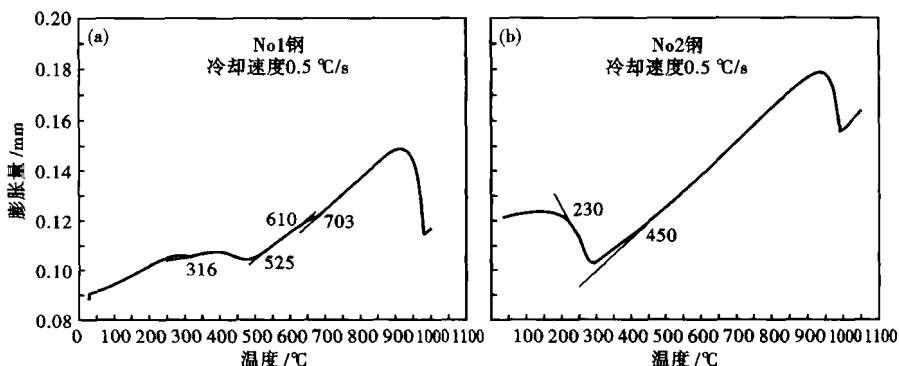


图 1 0.11% C 钢(a)和 0.35% C 钢(b)在 $0.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 冷却速度下的膨胀曲线
Fig. 1 Dilatation curves of 0.11% C steel (a) and 0.35% C steel (b) with cooling rate $0.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$

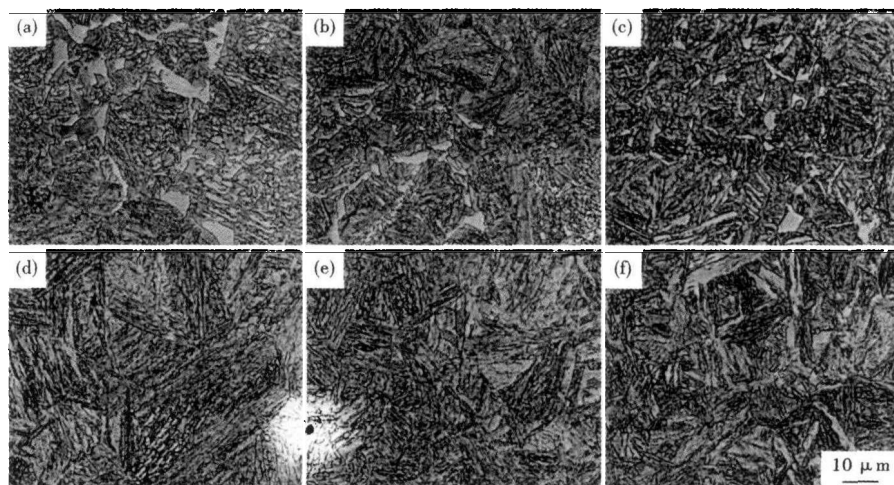


图 2 0.11% C 钢的组织形貌,冷却速度/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$:(a)0.5;(b)1;(c)2;(d)5;(e)10;(f)30
Fig. 2 Morphology of structure of 0.11% C steel, cooling rate/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$: (a) 0.5; (b) 1; (c) 2; (d) 5; (e) 10; (f) 30

表 2 0.11% C 钢 (No1) 相变点及组织
Table 2 Phase transformation point and structure of 0.11% C steel (No1)

冷却速度/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	A→F 转变温度/ $^\circ\text{C}$		A→P 转变温度/ $^\circ\text{C}$		B 转变温度/ $^\circ\text{C}$		M 转变温度/ $^\circ\text{C}$		组织
	开始	结束	开始	结束	开始	结束	开始	结束	
0.5	703	610	-	-	525	316	316	-	F+B+M
1	678	618	-	-	522	332	332	-	F+B+M
2	-	-	-	-	511	338	338	-	B+M
5	-	-	-	-	483	340	340	-	B+M
10	-	-	-	-	453	340	340	-	B+M
20	-	-	-	-	423	339	339	-	B+M
30	-	-	-	-	399	339	339	-	B+M

由图 3(a) 和图 3(b) CCT 曲线可以看出,随着冷却速度的增大,贝氏体相变的起始点逐渐降低。如实验中的 No1 钢,在冷却速度 $< 2 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,最终的室温组织有铁素体、贝氏体和马氏体;在冷却速度 $\geq 2 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 而 $< 30 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,最终的室温组织只有贝氏体和马氏体;当冷却速度 $\geq 30 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 后,最终的室温组

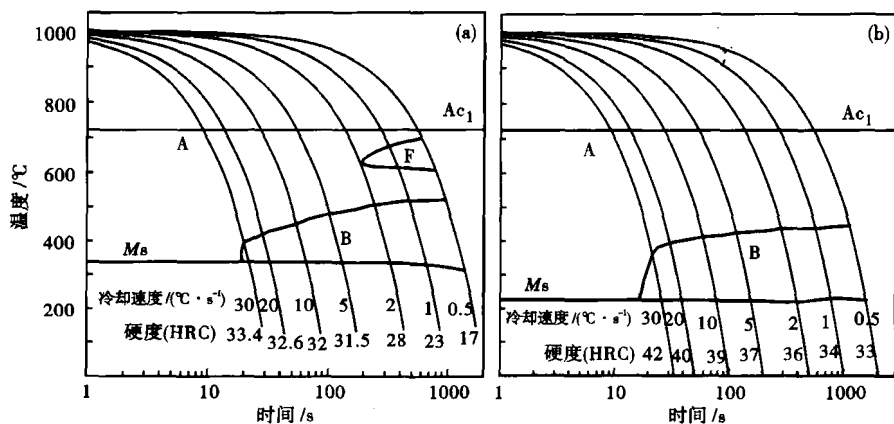


图 3 No1 钢 (/% : 0.11C, 1.15Si, 1.85Mn, 0.032Al, 0.003Ti, 0.0024N) (a) 和 No2 钢 (/% : 0.35C, 1.11Si, 1.82Mn, 0.041Al, 0.002Ti, 0.0042N) (b) 的 CCT 曲线

Fig. 3 CCT curves of No1 steel (/% : 0.11C, 1.15Si, 1.85Mn, 0.032Al, 0.003Ti, 0.0024N) (a) and No2 steel (/% : 0.35C, 1.11Si, 1.82Mn, 0.041Al, 0.002Ti, 0.0042N) (b)

表 3 0.35% C 钢 (No2) 相变点及组织

Table 3 Phase transformation point and structure of 0.35% C steel (No2)

冷却速度 / ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	A→F 转变温度/ $^{\circ}\text{C}$		A→P 转变温度/ $^{\circ}\text{C}$		B 转变温度/ $^{\circ}\text{C}$		M 转变温度/ $^{\circ}\text{C}$		组织
	开始	结束	开始	结束	开始	结束	开始	结束	
0.5	-	-	-	-	450	230	230	-	B + M
1	-	-	-	-	440	233	233	-	B + M
2	-	-	-	-	437	221	221	-	B + M
5	-	-	-	-	426	223	223	-	B + M
10	-	-	-	-	413	223	223	-	B + M
20	-	-	-	-	397	225	225	-	B + M
30	-	-	-	-	358	224	224	-	B + M

织没有贝氏体,只有马氏体。

另外,贝氏体的形成与碳含量有关。对比实验中的 No1 钢和 No2 钢,碳含量在一定范围内降低,贝氏体转变温度升高,易于获得贝氏体组织。同时,马氏体相变开始点也与碳含量有关,随着碳含量的

升高,马氏体相变开始点降低。

4 结论

(1) 绘制了两个钢种的过冷奥氏体连续冷却转变 (CCT) 曲线。

(2) 碳含量在一定范围内降低,贝氏体转变温度升高,易于获得贝氏体组织。

(3) 随着碳含量的升高,马氏体相变开始点 (Ms) 降低。

参考文献

- 1 马晓莉,陈翠欣,冯建航,等. 60 钢 C 曲线的重新测定. 金属热处理, 2008, 33(7):96
- 2 冯红超,苟亚娟,张耀斌,等. HQ785 钢 CCT 曲线测定及显微组织研究. 热处理技术与装备, 2010, 31(4):40
- 3 何振波,赵延阔,王晓峰,等. Al-Zn-Mg-Sc 合金连续冷却转变曲线的测定. 材料与冶金学报, 2010, 9(1):43
- 4 Xu Guang, Wan Lun, Yu Shengfu, et al. A New Method for Accurate Plotting Continuous Cooling Transformation Curves. Materials Letters, 2008, 62: 3978
- 5 徐光,王巍,张鑫强. 金属材料 CCT 曲线测定及绘制. 北京: 化学工业出版社, 2009

王凤琪(1989-),女,硕士研究生,金属材料组织和性能。

收稿日期:2011-10-22

下 期 要 目

铁水罐吹气辅助驱渣水模型实验	许 飞等
张力对冷轧 304 奥氏体不锈钢薄板形影响的数值模拟	董丽丽等
辐射对气淬渣滴冷却换热的影响	卢宏伟等
U75V 重轨钢 BD2 开坯过程有限元数值模拟和分析	陈 林等
GCr15 轴承钢 LF 含 BaO 精炼渣系脱硫研究	杨吉春等
非 API 13Cr 系油套管用马氏体不锈钢的发展现状	邢 娜等
钢水 C、Si 含量对 VOD 精炼不锈钢喷溅的影响	安 杰等
600 MPa 级 Nb-Ti 微合金高强度钢的开发	殷 胜等
CaO-MgO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 类夹杂物塑性化对帘线钢加工断丝率的影响	王世芳等
顶底复吹转炉蒸汽在 100 t VD 精炼设备上的应用	罗 圣