

热连轧 E36 船板钢连续冷却相变行为

胡海¹ 赵刚¹ 鲍思前¹ 叶传龙¹ 熊祥江² 李玲玲² 杨小军²

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 湘潭钢铁集团有限公司科技开发中心, 湘潭 411101)

摘要 通过热模拟试验机模拟了 20 mm E36 船板钢(%: 0.15C、0.38Si、1.56Mn、0.011P、0.002S、0.04Nb、0.06V、0.02Ti、0.037Als)经 1 080 ℃ 和 830 ~ 890 ℃ 分别以变形速率 1 s⁻¹ 变形 30% 的双道次轧制及冷却过程, 测得连续冷却转变曲线, 并研究终轧温度和轧后冷却速度(5 ~ 25 ℃/s) 对该钢相变和组织的影响。结果表明, 随着冷却速度的增加, 相变开始温度降低, 珠光体的体积分数减小, 贝氏体的体积分数增大; 随着终轧温度的降低, 相变开始温度升高; 铁素体晶粒随冷却速度的增加和终轧温度的降低而细化。

关键词 E36 船板钢 连续冷却转变曲线 终轧温度 冷却速度

Transformation Behavior of Hot Continuous Rolling E36 Ship Plate during Continuous Cooling

Hu Hai¹, Zhao Gang¹, Bao Siqian¹, Ye Chuanlong¹, Xiong Xiangjiang², Li Lingling² and Yang Xiaojun²
(1 College of Material Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Technological Center, Xiangtan Iron and Steel Group Co Ltd, Xiangtan 411101)

Abstract The double passes rolling and cooling process of 20 mm E36 ship plate steel (%: 0.15C, 0.38Si, 1.56Mn, 0.011P, 0.002S, 0.04Nb, 0.06V, 0.02Ti, 0.037Als) at 1 080 ℃ and 830 ~ 890 ℃ respectively by 30% deformation at strain rate 1 s⁻¹ has been simulated by thermal simulator to get continuous cooling transformation curves and study effect of finishing rolling temperature and cooling speed (5 ~ 25 ℃) after rolling on transformation and structure of the steel. Results show that with increasing cooling speed the initial temperature of transformation decreases, the volume fraction of pearlite decreases and the volume fraction of bainite increases; with decreasing finishing temperature the initial temperature of transformation increases; and with increasing cooling speed and decreasing finishing temperature the ferrite grain size is finer.

Material Index E36 Ship Steel, Continuous Cooling Transformation Curve, Finishing Temperature, Cooling Rate

E36 船板通常用中厚板方式生产, 技术上也比较成熟^[1-4], 但用热连轧方式生产该类钢较少。本文利用热模拟试验机模拟了 E36 船板钢的实际生产工艺, 利用光学显微镜分析了 E36 船板钢的相变行为和组织转变规律, 并重点研究了终轧温度和冷却速度对相变行为和组织转变规律的影响。

1 试验材料与方法

试验材料为热轧船板, 厚度为 20 mm, 沿厚度方向 1/4 处取样加工成 Φ8 mm × 15 mm 的圆柱形试样, 其化学成分如表 1 所示。

将 Φ8 mm × 15 mm 的圆柱形试样加热到 1 200 ℃ 奥氏体化 5 min, 以 3 ℃/s 冷却至 1 080 ℃ 变形, 道次变形量为 30%, 变形速率 1 s⁻¹; 再以 3 ℃/s 分别冷却到 830、860、890 ℃ 变形, 道次变形量为 30%, 变形

速率 1 s⁻¹; 最后分别以 5.0、10.0、15.0、20.0、25.0 ℃/s 的冷却速率冷却到室温(图 1)。根据测得的温度-膨胀量曲线, 采用切线法确定相变时间和相变温度, 结合金相结果绘制连续冷却转变曲线。

2 试验结果和分析

2.1 微观组织特征

由图 2 可以看出, 在冷却速度为 5 ℃/s 时, 组织为多边形铁素体和珠光体, 当冷却速度增加至 10 ℃/s 时开始出现贝氏体组织, 铁素体晶粒尺寸减小, 珠光体逐渐弥散化, 当达到 15 ℃/s 时, 主要由铁素体、粒状贝氏体和少量珠光体组成, 珠光体体积分数

表 1 E36 船板钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of E36 ship plate steel /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	V	Ti	Ni	Cu	Als	Sn
0.15	0.38	1.56	0.011	0.002	0.02	0.04	0.06	0.02	0.33	0.03	0.037	0.027

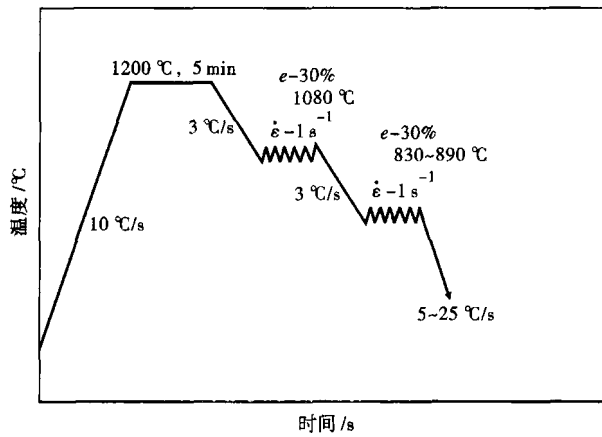


图1 热模拟实验工艺方案示意图

Fig. 1 Schematics of thermal simulating test schedule

逐渐减少,贝氏体体积分数逐渐增加,20 °C/s时,主要由铁素体及贝氏体组成,贝氏体的体积分数进一步增大,25 °C/s时,组织由铁素体、贝氏体、少量马氏体及残余奥氏体组成,随着冷却速度的增加,珠光体的体积分数逐渐减少,贝氏体的体积分数逐渐增加。随着冷却速度的增加,所需临界形核自由能与均匀形核时的临界形核自由能相比逐渐减小,铁素体的形核数目逐渐增加,晶粒细化^[5]。

由图3可知,在相同的冷却速度下,终轧温度为830 °C/s时,组织中 铁素体的晶粒尺寸比终轧温度为890 °C/s时组织中 铁素体的晶粒尺寸要小,这是因为较低的终轧温度限制了原子的扩散能力,晶粒

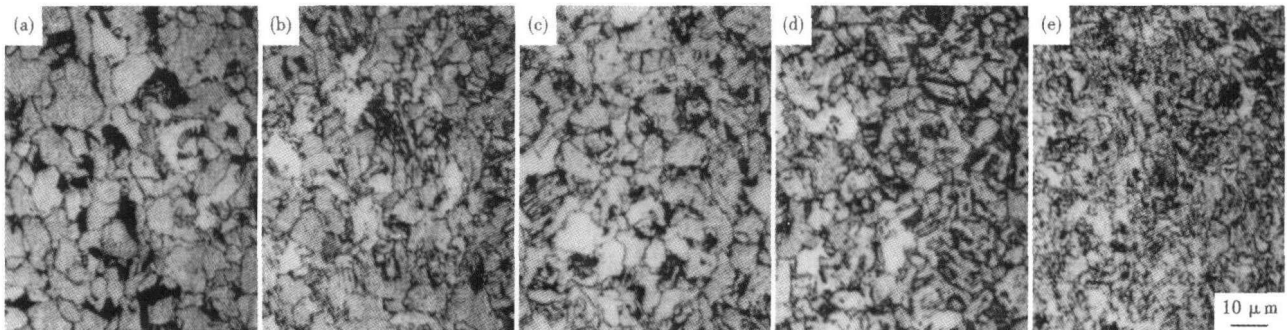


图2 冷却速度对 E36 船板钢组织形貌的影响:终轧温度-890 °C;冷却速度/(°C · s⁻¹)- (a)5, (b)10, (c)15, (d)20, (e)25

Fig. 2 Effect of cooling speed on structure morphology of E36 ship plate steel; finishing temperature-890 °C; cooling speed/(°C · s⁻¹)- (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20 and (e) 25

的长大速率就受到了抑制,而且在相同的变形条件下,较低的终轧温度使得回复作用减弱,试样的形变储能就更高,形核驱动力就更大,形核率也就更高,所以在这些因素的共同作用下,使得铁素体的晶粒尺寸随着终轧温度的降低而逐渐减小。

2.2 连续冷却转变曲线

E36 钢在不同终轧温度下的连续冷却转变曲线见图4,在5 ~ 25 °C/s冷却速度范围内,随着冷却速度的增加,室温组织依次由铁素体和珠光体向贝氏体和马氏体转变,奥氏体向铁素体转变温度范围在721 ~ 625 °C。由图4可以看出,随着冷却速度的增加,奥氏体向铁素体的开始转变温度逐渐降低,通过不同终轧温度的连续冷却转变曲线对比可知,终轧温度越低,相变开始温度越高,相变开始时间提前,连续冷却转变曲线整体向

上移动,尤其在终轧温度为860 °C时这一变化趋势较为明显。

2.3 终轧温度对铁素体晶粒尺寸和连续冷却转变曲线的影响

随着终轧温度的降低,铁素体晶粒细化,这是因为一方面试样终轧温度较低,原子的扩散能力降低,抑制了晶粒的长大速率;另一方面,较低的终轧温度

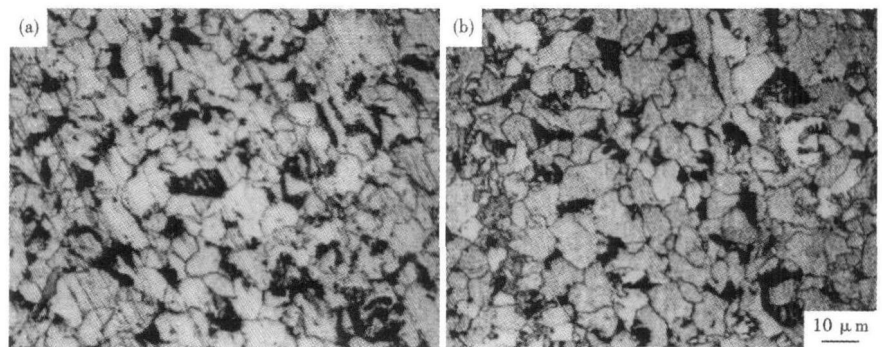


图3 终轧温度对 E36 船板钢组织形貌的影响:冷却速度-5 °C/s;终轧温度/°C- (a)830, (b)890

Fig. 3 Effect of finishing temperature on structure morphology of E36 ship plate steel; cooling speed-5 °C/s; finishing temperature/°C- (a) 830 and (b) 890

和变形过程中较短的间隙时间使变形晶粒的回复软化作用减弱,增加变形过程中的储存能,提高了形核驱动力和相变驱动力,使得形核率增加,相变时间减少,加速相变的进行,使曲线向上移动,而且较高的变形量和变形速率使得形变诱导铁素体相变的作用较为明显,大变形使得位错密度升高,增加了相变时的形核位置,也加大了铁素体的形核速率^[6]。

2.4 冷却速度对相变开始时间的影响

由图 5 可以看出,总体上相变开始时间随着冷却速度的增大而缩短,当冷却速度 $< 10 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,随着冷却速度的增大,相变开始时间迅速缩短;当冷却速度 $\geq 10 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,冷却速度的增大对相变开始时间的影响逐渐减小,相变开始时间下降的比较缓和。同时还可以看出,终轧温度越高,在相同冷却速度下,相变开始时间越长。

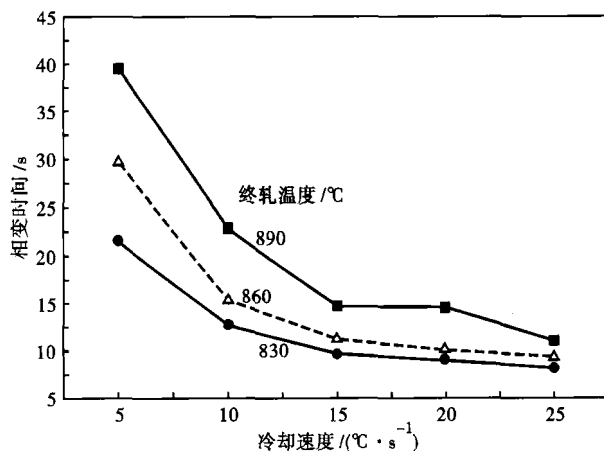


图 5 终轧温度和冷却速度对相变开始时间的影响
Fig. 5 Effect of finishing temperature and cooling speed on transformation time of steel

2.5 冷却速度对铁素体晶粒尺寸的影响

热连轧工艺轧后加速冷却使相变时的过冷度增加,铁素体的临界形核尺寸减小,铁素体的形核位置也由晶界转移到晶粒内部,促进了晶内形核,增加了形核率,这些晶内组织首先分割奥氏体,使后转变相在更狭小的空间内长大,另外铁素体、珠光体转变属于扩散性相变,冷却速度增大,就限制了原子的运动能力,相变由扩散性向非扩散性过渡,转变以中温

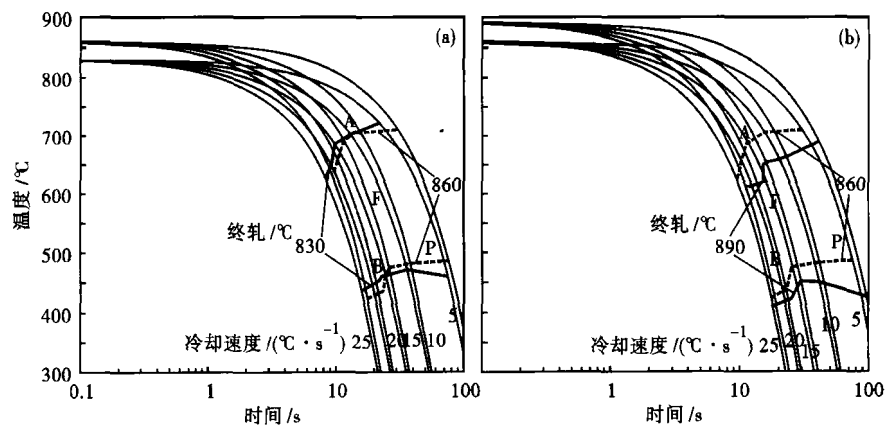


图 4 终轧温度对连续冷却时相变温度的影响:终轧温度- (a) 830 $^\circ\text{C}$ 和 860 $^\circ\text{C}$; (b) 860 $^\circ\text{C}$ 和 890 $^\circ\text{C}$

Fig. 4 Effect of finishing temperature on transformation temperature of steel during continuous cooling: finishing temperature- (a) 830 $^\circ\text{C}$ and 860 $^\circ\text{C}$; (b) 860 $^\circ\text{C}$ and 890 $^\circ\text{C}$

低温转变为主,使奥氏体的分解在较低的温度下进行^[7]。再加上微合金元素的低温弥散析出作用,共同抑制了晶粒长大,使晶粒细化^[7]。

3 结论

(1) 随着冷却速度的增加,珠光体体积分数逐渐减小,贝氏体的体积分数逐渐增加。

(2) 随着终轧温度的降低连续冷却转变曲线整体向上移动,相变的开始时间提前,铁素体晶粒细化。

(3) 当冷却速度为 $5 \sim 10 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$ 时, E36 船板钢的显微组织主要由珠光体和铁素体组成; $10 \sim 15 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,其显微组织主要由铁素体、珠光体和贝氏体组成; $15 \sim 25 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$ 时,显微组织主要由铁素体、贝氏体组成。

参考文献

- 徐洪庆,李胜利,孙浩. FH40 船板钢连续冷却过程中的相变行为研究. 宽厚板, 2009, 15(3): 34
- 王涛,闫洪. 船板钢 E36 轧后控冷工艺的制定. 锻压技术, 2008, 33(1): 47
- 崔凤平,孙玮,刘彦春,等. 中厚板生产与质量控制. 北京:冶金工业出版社, 2008
- 孙本荣. 中厚钢板生产. 北京:冶金工业出版社, 1993
- 程晓茹,任勇,张细菊,等. E36 船板钢连续冷却转变行为研究. 武汉科技大学学报, 2008, 10(5): 536
- 肖国华,肖寄光,王福明,等. 含钒高强度船体结构钢的连续冷却转变. 北京科技大学学报, 2006, 28(9): 831
- 宋维锡. 金属学. 北京:冶金工业出版社, 1989

胡海(1985-),男,硕士研究生,2008年湖北汽车工业学院毕业,轧制过程计算机控制。

收稿日期:2010-12-13