

## 工艺参数对 600 MPa 热轧双相钢铁素体转变的影响

张大伟<sup>1</sup> 刘雅政<sup>1</sup> 周乐育<sup>1</sup> 汪飞松<sup>2</sup> 李月兰<sup>2</sup>

(1 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2 马钢股份公司技术中心, 马鞍山 243003)

**摘要** 通过 Gleeble-1500 热模拟机研究了终轧变形 60% 时, 终轧温度 (840 °C 和 860 °C), 快冷至不同温度 (730 ~ 630 °C) 及保温时间 (5 ~ 10 s) 对 DP600 热轧双相钢 ( $\% : \leq 0.1C, \leq 1.5Si, \leq 1.5Mn, \leq 0.10Al, \leq 0.50Cr$ ) 铁素体转变的影响。结果表明, 延长保温时间, 降低终轧温度可明显促进铁素体转变, 提高铁素体体积分数; 第一段快冷后保温温度从 730 °C 降至 630 °C, 铁素体体积增加约 20%, 抗拉强度降低约 60 MPa。

**关键词** 热轧双相钢 DP600 热模拟 铁素体转变

## Effect of Process Parameters on Ferrite Transformation of 600 MPa Hot Rolled Dual-Phase Steel

Zhang Dawei<sup>1</sup>, Liu Yazheng<sup>1</sup>, Zhou Leyu<sup>1</sup>, Wang Feisong<sup>2</sup> and Li Yuelan<sup>2</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;  
2 Technology Center of Maanshan Iron & Steel Company Ltd, Maanshan 243003)

**Abstract** The effect of finishing temperature (840 °C and 860 °C), quick cooling to different temperature (730 ~ 630 °C) and holding time (5 ~ 10 s) on ferrite transformation of DP600 hot-rolled dual-phase steel ( $\% : \leq 0.1C, \leq 1.5Si, \leq 1.5Mn, \leq 0.10Al, \leq 0.50Cr$ ) with finishing rolling deformation 60% has been studied by using Gleeble-1500 thermal simulator. Results show that with increasing holding time and decreasing finishing temperature it is obviously to promote the ferrite transformation and to increase the volume fraction of ferrite in steel; as the holding temperature at first quick cooling drops to 630 °C from 730 °C, the volume fraction of ferrite in steel increases by about 20% and the tensile strength of steel decreases by about 60 MPa.

**Material Index** DP600 Hot-Rolled Dual-Phase Steel, Thermal Simulation, Ferrite Transformation

双相钢以其低屈强比、高初始加工硬化速率、良好强度和延性的配合等优点, 符合我国汽车轻量化的要求, 成为现代汽车用钢的重要组成部分<sup>[1,2]</sup>。近年来采用分段冷却和低温卷取工艺的不含钼低成本热轧双相钢实现工业批量生产, 较快促进了热轧双相钢在汽车行业的应用<sup>[3]</sup>。DP600 热轧双相钢<sup>[4]</sup>在相变过程中, 铁素体的转变对于其两相的比例和马氏体的形态分布有重要的影响。

### 1 实验材料及方法

从钢厂低合金双相钢(表 1)40 mm 厚预精轧坯料上截取阶梯状热模拟实验用试样, 加工后尺寸见图 1(a)。在 Gleeble-1500 热模拟机上进行控轧控冷热模拟实验, 主要分析了终轧温度  $T_1$ 、两段快冷

间隔保温温度  $T_2$  和保温时间  $n$  对实验钢铁素体转变的影响。热模拟工艺为: 以 20 °C/s 的加热速度将实验钢加热到 1 000 °C 保温 120 s, 之后以 40 °C/s 的冷速冷却到  $T_1$  温度, 变形 60%, 再以 40 °C/s 的冷速冷却到  $T_2$  温度, 保温  $n$  秒, 最后以 40 °C/s 的冷速冷却到 200 °C 后空冷(表 2)。

在热模拟实验后的试样上线切割截取拉伸试样, 断面为 4 mm × 3 mm, 标距为 15 mm 加工后尺寸如图 1(b) 所示。金相试样用 4% 硝酸酒精试剂、Lepro 试剂侵蚀。

### 2 实验结果及分析

(1) 保温时间对铁素体转变的影响。840 °C 终轧变形 60%, 快冷至 680 °C 保温 5、8、10 s 后水淬组织为铁素体 + 马氏体(图 2a, b, c), 随保温时间延长, 铁素体体积分数从 81% 逐渐增至 85%、88%, 铁素体晶粒尺寸从 7.2 μm 逐渐增至 9.2、9.4 μm。

860 °C 终轧变形 60%, 快冷至 680 °C 保温 5、8、10 s 后水淬组织仍为铁素体 + 马氏体(图 2d, e, f),

表 1 实验用钢的主要化学成分/%

Table 1 Main chemical composition of test steel /%

C	Si	Mn	P	S	Als	Cr
≤0.1	≤1.5	≤1.5	≤0.050	≤0.010	≤0.10	≤0.50

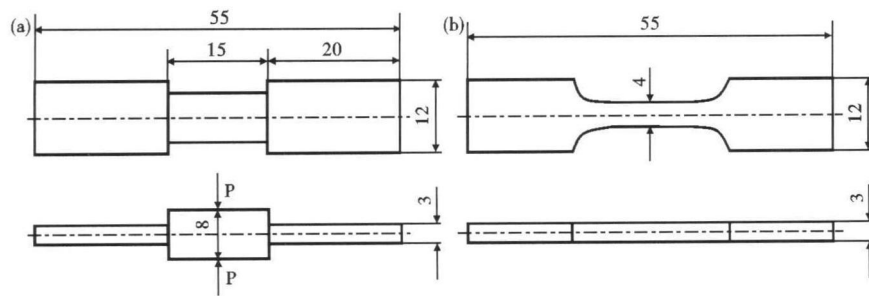


图 1 热模拟(a)和拉伸(b)试样示意图

Fig. 1 Schematics of specimen for thermal simulation (a) and tensile test (b)

表 2 热模拟工艺参数

Table 2 Process parameters for thermal simulation

终轧温度 $T_2/^\circ\text{C}$	保温温度 $T_2/^\circ\text{C}$	保温时间 $t/\text{s}$
840	680	5, 8, 10
860	730, 700, 680, 650, 630	5
860	680	8
860	680	10

随保温时间延长,铁素体体积分数从 72% 逐渐增至 76%、80%,铁素体晶粒尺寸从 6.9  $\mu\text{m}$  增至 8.2、9.2  $\mu\text{m}$ 。

两种终轧温度下,680  $^\circ\text{C}$  保温不同时间得到的力学性能如表 3 所示。840  $^\circ\text{C}$  终轧,时间从 5 s 延长至 8 s,马氏体体积分数降低 4%,抗拉强度由 670 MPa 降至 650 MPa;延长至 10 s,马氏体体积分数又降低 3%,抗拉强度由 650 MPa 降至 605 MPa;860  $^\circ\text{C}$  终轧,680  $^\circ\text{C}$  保温时间从 5 s 延长至 8 s,马氏体体

表 3 终轧温度和 680  $^\circ\text{C}$  保温时间对钢的抗拉强度的影响/MPa

Table 3 Effect of finishing temperature and holding time at 680  $^\circ\text{C}$  on tensile strength of steel /MPa

680 $^\circ\text{C}$ 保温时间/s	终轧温度/ $^\circ\text{C}$	
	840	860
5	670	715
8	650	670
10	605	665

积分数降低 4%,抗拉强度由 715 MPa 降至 670 MPa,延长至 10 s,马氏体体积分数又降低 4%,抗拉强度由 670 MPa 降至 665 MPa。这主要是马氏体的相变强化以及细晶强化共同作用的结果。等轴铁素体的形成是由碳原子的长程扩散控制,保温时间的延长有利于碳原子的扩

散,提高了铁素体中 C、N 原子以及合金元素向周围残余奥氏体的富集的程度,有利于铁素体晶粒的长大以及体积分数的增加,但是铁素体的晶粒尺寸不仅与时间因素有关,还与铁素体相成长端的极限曲率半径、C 在界面处奥氏体侧、铁素体侧的平衡摩尔分数等因素有关<sup>[5]</sup>。在一段时间内延长保温时间能显著促进铁素体充分转变,但随着时间的继续延长,其作用逐渐减弱。

(2) 终轧温度对铁素体转变的影响。终轧温度从 840  $^\circ\text{C}$  提高到 860  $^\circ\text{C}$ ,马氏体体积分数提高 9%,抗拉强度提高 20 ~ 45 MPa (图 2、表 3)。可见降低终轧温度可明显促进铁素体转变,提高铁素体体积分数,细化马氏体尺寸,降低强化相体积分数。在较低的终轧温度下,钢的软化效果较弱,奥氏体中储存的形变能较高,其变形后再结晶的程度较低,所以较低的终轧温度下奥氏体晶粒尺寸小,遗传给相变后的铁素体,细化了铁素体晶粒。所以降低终轧温度能显著促进铁素体转变。

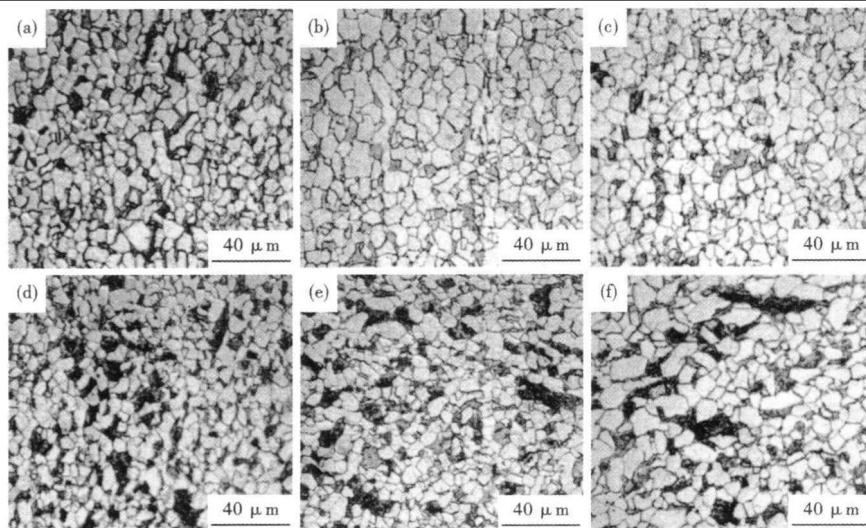


图 2 试验钢 840  $^\circ\text{C}$  (a, b, c) 和 860  $^\circ\text{C}$  (d, e, f) 终轧变形 60% 快冷至 680  $^\circ\text{C}$  保温 5 s (a, d), 8 s (b, e), 10 s (c, f) 水淬的铁素体 + 马氏体双相组织形貌

Fig. 2 Ferrite + martensite dual-phase structure morphology of test steel finishing-deformed 60% at 840  $^\circ\text{C}$  (a, b, c) and 860  $^\circ\text{C}$  (d, e, f) then quick cooling to 680  $^\circ\text{C}$  for 5 s (a, d), 8 s (b, e) and 10 s (c, f), water cooling

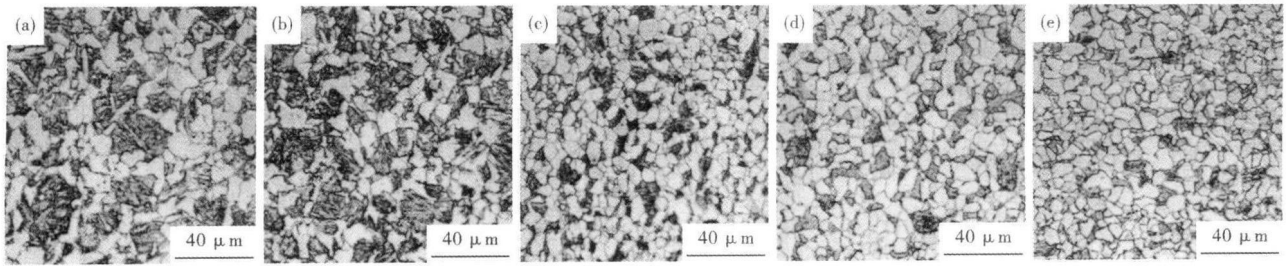


图3 试验钢 860 °C 终轧变形 60% 快冷至 730 °C (a), 700 °C (b), 680 °C (c), 650 °C (d), 630 °C (e) 保温 5 s 水淬的铁素体 + 马氏体双相组织形貌

Fig. 3 Ferrite + martensite dual-phase structure morphology of test steel finishing-deformed 60% at 860 °C then quick cooling to 730 °C (a), 700 °C (b), 680 °C (c), 650 °C (d) and 630 °C (e) for 5 s, water cooling

(3) 第一段快冷后保温温度对铁素体转变的影响。860 °C 终轧变形 60%, 快冷至 730 ~ 630 °C 5 s 后水淬组织亦铁素体 + 马氏体双相组织(图3)。随着保温温度的降低, 铁素体体积分数明显增加, 马氏体形态也由大块弥散到细小弥散分布, 铁素体体积分数由 60% 增至 79%。

由形核率公式(1)可知<sup>[6]</sup>:

$$\dot{N} \propto \exp\left(-\frac{\Delta G_c}{KT}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_A}{KT}\right) \quad (1)$$

式中:  $\dot{N}$ - 形核速率;  $\Delta G_c$ - 晶核的形核功/(J · mol<sup>-1</sup>);  $\Delta G_A$ - 激活能/(J · mol<sup>-1</sup>);  $K$ - 常量/[J · (K · mol)<sup>-1</sup>];  $T$ - 绝对温度/K。

$$\text{其中 } \Delta G_c \propto 1/\Delta T^2 \quad (2)$$

式中:  $\Delta T$ - 过冷度。

由公式(2)可知, 晶核的形核功与过冷度呈反比, 形核速率与晶核形核功成反比, 而  $\Delta G_A$  与温度关系不大, 可视为常数, 所以对于一般金属来说, 当超过亚稳极限  $\Delta T^*$  后, 过冷度越大, 形核速率越大。

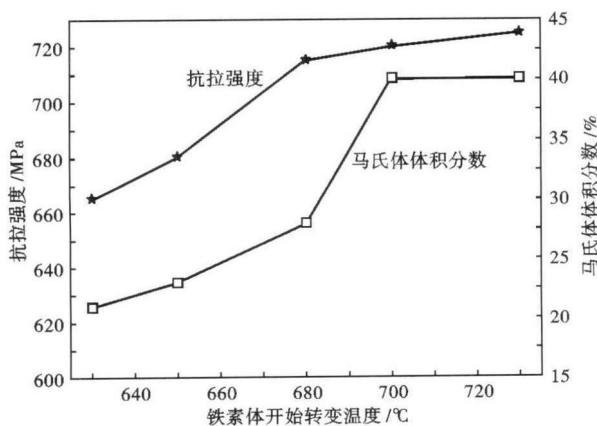


图4 铁素体开始转变温度对试验钢抗拉强度和马氏体体积分数的影响

Fig. 4 Effect of initial transformation temperature of ferrite on tensile strength and volume fraction of martensite of test steel

降低保温温度等同于过冷度的增加, 利于铁素体的形核。铁素体开始转变温度从 730 °C 降至 630 °C, 抗拉强度从 725 MPa 降至 665 MPa, 马氏体体积分数降低约 20% (图4)。虽然随过冷度增加, 铁素体和马氏体都被细化, 但由于马氏体含量的差别, 相变强化作用大于细晶强化。对于双相钢而言, 细化晶粒有助于提高铁素体和马氏体的强度, 更重要的是细化晶粒有助于优化马氏体的分布状态<sup>[7,8]</sup>。即降低铁素体开始转变温度对于促进铁素体转变有显著作用, 同时会在一定程度上降低强度。

### 3 结论

(1) 延长两段快冷间隔保温时间, 有利于提高铁素体体积分数, 降低抗拉强度。

(2) 其它条件相同的前提下, 降低终轧温度可明显促进铁素体转变, 提高铁素体体积分数。

(3) 降低铁素体开始转变温度对于促进铁素体转变, 降低抗拉强度有显著作用。

### 参考文献

- 田志强, 唐 获, 江海涛, 等. 汽车用双相钢研究与生产现状. 机械工程材料, 2009, 33(4): 1
- 康永林, 邝 霜, 尹显东, 等. 汽车用双相钢板的开发与研究进展. 汽车工艺与材料, 2006(5): 1
- 贾 松, 刘雅政, 周乐育, 等. 回火温度对热轧双相钢组织和力学性能影响研究. 武汉科技大学学报, 2010, 33(2): 180
- 时晓光, 刘仁东, 韩 斌, 等. 热轧双相钢 DP600 组织性能的研究. 钢铁研究学报, 2010, 22(4): 39
- 王 倩, 杨忠民, 吴庆辉, 等. 低碳钢先共析铁素体和形变诱导铁素体的相变机制、组织和性能. 特殊钢, 2008, 29(4): 8
- 宋维锡. 金属学. 北京: 冶金工业出版社, 2007
- Xu H W, Yang W Y, Sun Z Q. Mechanical Properties of Fine-Grained Dual Phase Low-Carbon Steels Based on Dynamic Transformation. Journal of University of Science and Technology, Beijing, 2008, 15(5): 556
- Hong S C, Lee K S. Influence of Deformation Induced Ferrite Transformation on Grain Refinement of Dual Phase Steel. Materials Science and Engineering, 2002, A323: 148

张大伟(1985-), 男, 硕士研究生, 从事双相钢研究。

收稿日期: 2010-10-27