

## 0.75C-0.11V 微合金钢的静态再结晶行为

任安超<sup>1,2</sup> 吉玉<sup>1</sup> 赵隆崎<sup>1</sup> 袁泽喜<sup>2</sup> 宋新丽<sup>2</sup> 沈冬冬<sup>2</sup>

(1 武汉钢铁(集团)公司研究院,武汉 430080; 2 武汉科技大学材料与冶金学院,武汉 430081)

**摘要** 通过 Thermecmator-Z 型热模拟机研究了 0.75C-0.11V 微合金钢双道次压缩试验 850 ~ 1 000 °C 奥氏体区等温变形后道次间隙时间内的软化行为。结果显示,在 30% 变形量、3 s<sup>-1</sup> 变形速率下,当变形温度 ≥ 1 000 °C, 该钢完成再结晶弛豫时间 ≤ 100 s; 变形温度 ≤ 880 °C 时,即使弛豫时间延长,再结晶亦难以进行。

**关键词** V 微合金化高碳钢 变形温度 静态再结晶

## Behavior of Static Recrystallization of 0.75C-0.11V Microalloy Steel

Ren Anchao<sup>1,2</sup>, Ji Yu<sup>1</sup>, Zhao Longqi<sup>1</sup>, Yuan Zexi<sup>2</sup>, Song Xinli<sup>2</sup> and Shen Dongdong<sup>2</sup>

(1 Research and Development Center, Wuhan Iron and Steel (Group) Corp, Wuhan 430080;

2 School of Material Science and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** The softening behavior of 0.75C-0.11V microalloy steel isothermal deforming at austenitic area 850 ~ 1 000 °C within interval of passes has been studied by double-pass compression test using Thermecmator-Z thermal simulation machine. Results indicated that with 30% deformation and 3 s<sup>-1</sup> deforming rate, as deformation temperature ≥ 1 000 °C, the relaxation time for performing recrystallization was ≤ 100 s, and as deformation temperature ≤ 880 °C, it was difficult even extending relaxation time to put forward recrystallization of steel.

**Material Index** V Microalloying High Carbon Steel, Deformation Temperature, Static Recrystallization

### 1 试验材料和方法

试验钢的化学成分(%)为: 0.75C、0.74Si、0.96Mn、0.11V、0.01Ti。试验全部在热模拟机(Thermecmator-Z)上进行,采用双道次压缩实验,测试真应力-真应变曲线。试验用钢为真空感应炉冶炼,浇铸成 50 kg 铸锭,铸锭尺寸为 Φ170 mm × 350 mm。在均热炉中加热至 1 250 °C,均热 2 h 后开始轧制,开轧温度为 1 100 °C,平轧两道次后立轧,再改为平轧,平轧最后一道次的压下量为 20%,终轧时的板厚为 12 mm,终轧温度为 880 ~ 900 °C,最后空冷到室温。将热轧后的板材用线切割加工成 Φ8 mm × 12 mm 圆柱试样(图 1)。

热模拟机先将试样以 10 °C/s 加热到 1 250 °C,保温 15 min,以保证其中的 V(CN) 的微合金元素充分固溶。然后以 5 °C/s 的冷速冷却到设定的变形温

度,等温进行两次压缩变形,每次变形量均为 30%,变形速率均为 3 s<sup>-1</sup>。两次形变之间停留不同的弛豫时间。

模拟实际热轧生产中各阶段的轧制温度: 1 150 °C 开始轧制 → 1 000 °C 左右粗轧结束 → 950 °C 左右开始精轧 → 850 °C 精轧结束。

### 2 静态再结晶软化分数计算

在计算再结晶分数时,有多种方法<sup>[1]</sup>,试验采用 0.2% 补偿法计算,应用这种方法测定的软化率与静态再结晶分数基本相同。将两次压缩变形后得到的应力-应变曲线按照公式(1)进行数据处理,得到再结晶软化分数。图 2 为变形后的应力-应变图。

再结晶软化分数的计算公式:

$$X = (\sigma_m - \sigma_r) / (\sigma_m - \sigma_0) \quad (1)$$

式中: X- 再结晶软化率/%;  $\sigma_m$ - 第 1 次卸载前的流变应力/MPa;  $\sigma_0$ - 第 1 次加载时的屈服应力/MPa;  $\sigma_r$ - 第 2 次加载时的屈服应力/MPa。

其理论原理是:奥氏体经过第 1 次变形后,产生加工硬化。在第 2 次变形以前经过一定的弛豫时间,奥氏体晶粒会发生静态再结晶,使晶粒得以重生,有大量变形缺陷的原始晶粒将大多被新的无应变晶粒取代,从而第 1 次形变产生的加工硬化效果

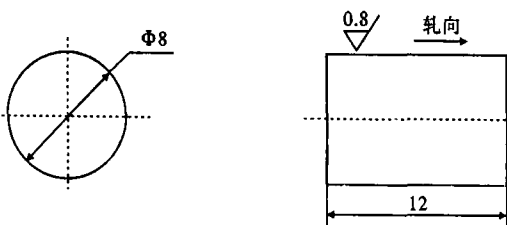


图 1 试验钢热模拟试样尺寸

Fig. 1 Size of steel for thermal simulation test

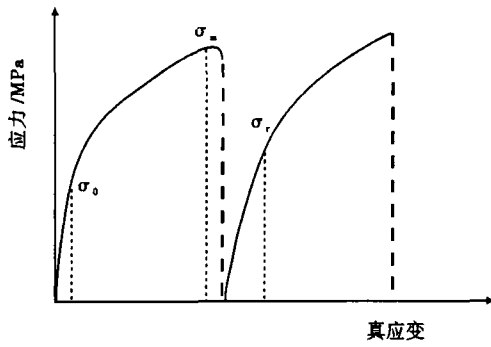


图2 试验钢变形后的应力-应变图  
Fig. 2 Stress-strain curves of deformed test steel

会有所减弱。在此基础上,再进行第2次变形,又会产生新的加工硬化,两次硬化效果最后累加起来,使奥氏体强度有所升高。因此,两次变形卸载时屈服应力的差值就是在弛豫时间里因为奥氏体静态再结晶软化抵消掉的硬化效果,用应力-应变曲线算得的再结晶软化率可以表征静态再结晶的分数。如果在弛豫时间内奥氏体晶粒完全再结晶,第1次的加工硬化效果完全消除,第2次变形加载时的屈服应力应该和第1次的一致。如果是部分再结晶,则第2次加载时的屈服应力会在第1次的加工硬化基础上有较大程度提高。

### 3 试验结果与分析

图3可见,试验钢1000℃以上的再结晶非常迅速,在100s以内就完成了再结晶;在950℃等温变形时,等温10~30s出现平台,30s以后再结晶迅速进行;随着等温变形温度的降低,再结晶过程显著减慢,920℃和900℃等温变形时,曲线分别出现平台,再结晶过程受到阻碍,完全再结晶所需的弛豫时间增至1000s以后,且随着变形温度的降低弛豫时间明显增加。当等温变形温度继续降低至880℃和

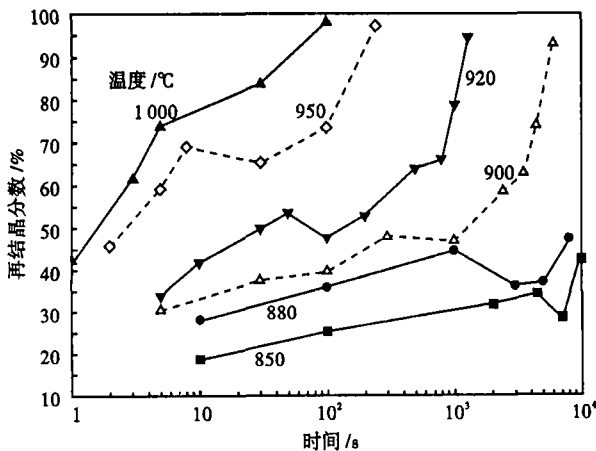


图3 试验钢等温静态再结晶分数-时间的关系  
Fig. 3 Relation between isothermal static recrystallization percent of test steel and time

850℃时,再结晶过程变得非常困难,弛豫时间增加到10000s时,再结晶分数仍只有40%左右。

由950,920,900℃3条曲线可知,平台结束后再结晶过程继续进行,由图3中曲线的变化趋势来看,平台后的再结晶过程较平台出现以前有加速的倾向。

将3个等温变形温度出现的平台进行比较,由图4可见,随着等温变形温度的降低,平台出现的时间在延长,平台处的再结晶分数在降低。其原因是高的等温变形温度促使了沉淀析出的第二相粒子聚合长大。相反,等温变形温度越低,第二相粒子聚合长大的过程将越慢,平台持续的时间越长,再结晶过程变得越来越困难。因此,这表明随着等温变形温度的降低,再结晶受阻碍的过程变得越来越明显。

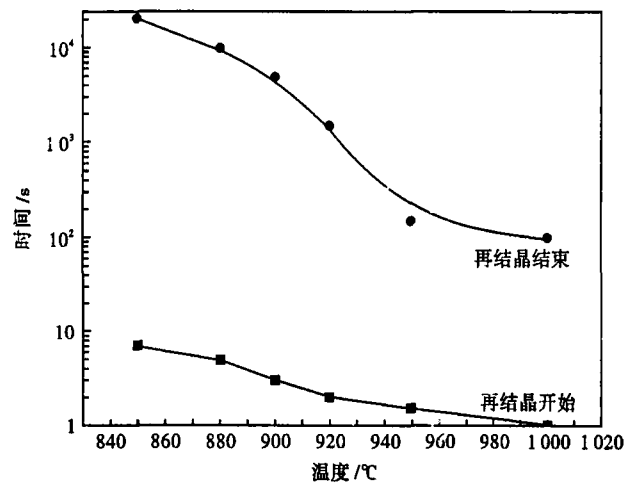


图4 试验钢再结晶温度-时间曲线  
Fig. 4 Recrystallization temperature - time curves for test steel

### 4 结论

试验钢变形温度在1000℃以上,再结晶非常迅速,在100s以内就完成了再结晶;随着等温变形温度的降低,再结晶过程显著减慢;而在880℃以下发生再结晶已经变得非常困难;变形温度在900~950℃,由于发生应变诱导析出,抑制了静态再结晶的进行,导致软化速率线上出现了平台。

武汉市科技计划资助项目(20061002085)

#### 参考文献

- 1 Fernandez A I, Lopez B, Rodriguez Ibabe J M. Relationship Between the Austenite Recrystallization Fraction and the Softening Measured From the Interrupted Torsion Test Technique. Scripta Materialia, 1999, 40(5):543

任安超(1976-),男,工程师,2001年武汉科技大学毕业,高速重轨研制。

收稿日期:2007-10-12