

# 35CrMo 钢动态再结晶的实验研究与数值模拟

叶健松<sup>1</sup>, 徐祖耀<sup>2</sup>

(1. 杭州钢铁集团公司技术中心, 浙江 杭州 310022; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200030)

**摘 要:** 通过单道次压缩试验, 并结合动态再结晶唯象理论, 获得 35CrMo 钢动态再结晶数学模型, 同时应用 MARC 软件对动态再结晶过程进行数值模拟, 与实验结果比较可得出, 该模型能较精确地反映动态再结晶规律。

**关键词:** 动态再结晶; 单道次压缩试验; 数值模拟

**中图分类号:** TG111.7; O242.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-9996 (2004) 05-0023-05

## Experimental research and numerical simulation of dynamic recrystallization of 35CrMo steel

YE Jian-song<sup>1</sup>, XU Zu-yao<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Iron & Steel Group Co., Hangzhou 310022, China;

2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Based on the single-stroke deformation experiment and dynamic recrystallization theory, the mathematical model of dynamic recrystallization of 35CrMo steel was obtained. Meanwhile, the numerical simulation was carried out by MARC software. The experiment and simulation results show that the rule of dynamic recrystallization of 35CrMo steel can be accurately described by the model.

**Key words:** dynamic recrystallization; single-stroke deformation experiment; numerical simulation

## 1 引言

利用计算机仿真软件预测线材生产过程中的组织变化, 并通过线材内部组织结构与力学性能对应关系的数学模型预测产品性能的方法, 在工业生产中有着广阔的应用前景, 而组织性能预测数学模型的开发是与轧制生产过程中发生的动态再结晶冶金学现象紧密相关的, 建立符合实际生产的动态再结晶数学模型, 对于实现线材生产工艺的离线优化设计、新钢种和新工艺的开发以及控轧控冷生产过程的在线控制有着十分重要的意义。

本文首先通过单道次压缩试验获得 35CrMo 钢的应力-应变曲线, 并结合动态再结晶唯象理论<sup>[1]</sup>获得动态再结晶的数学模型, 然后应用有限元软件 MARC 进行动态再结晶过程的数值模拟, 与实验结果吻合较好。

## 2 动态再结晶数学模型

### 2.1 单道次压缩实验方法和结果

单道次压缩实验: 将  $\Phi 8\text{mm} \times 15\text{mm}$  的圆柱体试样装在 GLEEBLE 3500 热模拟试验机上, 以  $20^\circ\text{C}/\text{s}$  的速度加热到  $1200^\circ\text{C}$ , 保温 5min, 然后以  $10^\circ\text{C}/\text{s}$  的冷却速度冷却到变形温度  $T_{\text{def}}$  ( $T_{\text{def}}$  分别为 1150、1100、1050、1000 和  $950^\circ\text{C}$ ), 保温 10s 后进行压缩, 变形量为 50%, 变形速率分别为 0.01、0.1、1.0 和  $10/\text{s}$ , 记录变形过程中的应力-应变, 所得的应力-应变曲线如图 1 所示。

由图 1 可以看出, 在同一变形速率下, 对应于同一应变值, 变形温度越高, 所对应的应力值越低, 并且随着变形温度的降低, 应力峰值向应变增大的方向移动。这是由于在较低温度下变形时, 加工硬化率较高, 回复软化比较困难。而变

收稿日期: 2004-02-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50075053)

作者简介: 叶健松 (1972-), 男 (汉族), 浙江义乌人, 工程师, 博士。

形温度越高,空位原子扩散和位错进行交滑移、攀移的驱动力越大,因而就更易于发生动态再结晶。当变形温度降低时,应力峰值向应变增大的

方向移动,这表明了变形温度对动态再结晶发生的临界变形量的影响趋势,即峰值应变越大,再结晶越难进行。

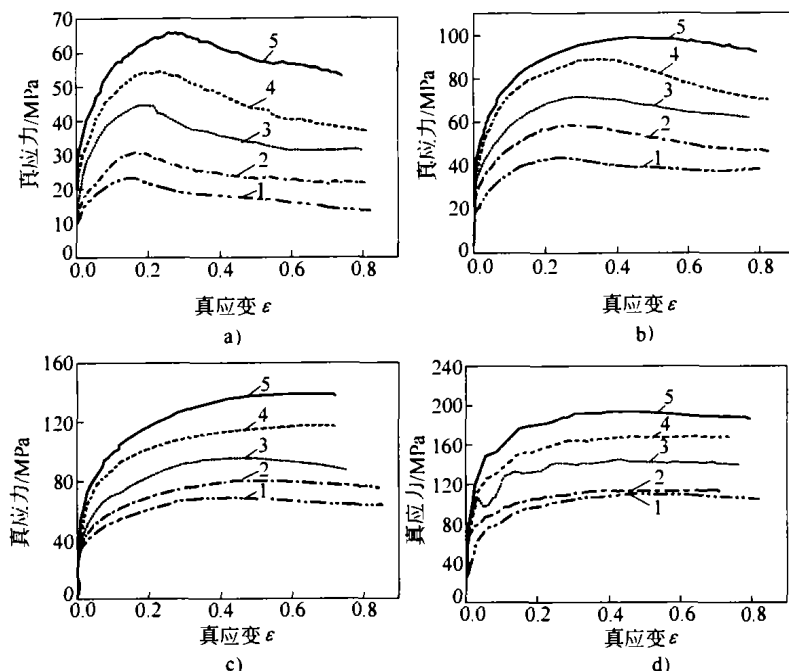


图1 35CrMo 钢应力-应变曲线

a)  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ ; b)  $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ ; c)  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ ; d)  $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

1-1150°C; 2-1100°C; 3-1050°C; 4-1000°C; 5-950°C

变形速率对再结晶也将产生一定的影响。图2为峰值应力与变形速率的关系,在相同的变形温度下,当应变值一定时,变形速率越高,所对应的应力值越大。同时,随着应变速率的增加,应力峰值向应变增大的方向移动。这说明随着应变速率的增大,奥氏体不易发生动态再结晶。这是由于应变速率越大,再结晶的驱动力也越大,然而,加工硬化作用也随着应变速率的增大而增大。因此,再结晶软化与加工硬化二者的作用效果相互平衡时的峰值应力及峰值应变均将增大。综上所述,可得到发生动态再结晶的条件为:变

形温度足够高,应变速率足够低和应变值足够大。35CrMo 钢变形量高于35%和变形速率小于1/s时将较易发生动态再结晶。

## 2.2 计算动态再结晶数学模型

在热变形过程中高温屈服应力决定于变形温度和变形速率,可用下述方程表示<sup>[2-4]</sup>:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = B \exp(\beta \sigma) \quad (1)$$

式中,  $Z$  为 Zener-Hollomon 参数,其物理意义是温度补偿的应变速率因子;  $Q$  为变形激活能;  $R$  为气体常数;  $\sigma$  为应力;  $B, \beta$  为常数。

对式(1)两边同取对数,有:

$$\ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{RT} = \ln B + \beta \sigma \quad (2)$$

根据式(2)可算得不同变形条件下近似的变形激活能为 378.2 kJ/mol。

根据实验获得的峰值应变 ( $\epsilon_p$ ) 和 Zener-Hollomon 参数关系,如图3所示,将其进行线性回归可得如下表达式:

$$\ln \epsilon_p = 0.13811 \ln Z - 5.64838 \quad (3)$$

若取临界应变 ( $\epsilon_c$ ) 为峰值应变 ( $\epsilon_p$ ) 的 0.83, 则临界应变有以下关系式:

$$\epsilon_c = 2.92 \times 10^{-3} Z^{0.13811} \quad (4)$$

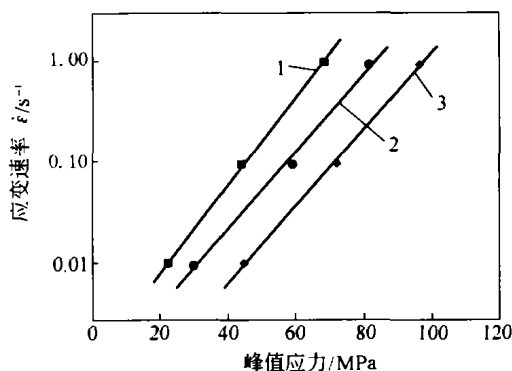


图2 35CrMo 钢变形速率与峰值应力的关系曲线

变形温度/°C: 1-1150; 2-1100; 3-1050

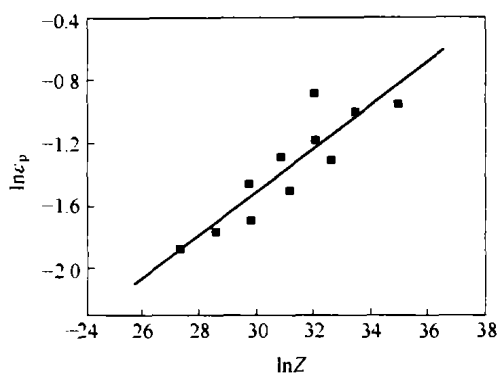


图 3 峰值应变与 Zener-Hollomon 参数的关系曲线  
同理, 稳态流变应变 ( $\epsilon_s$ ) 与 Zener-Hollomon 的关系可表达为:

$$\epsilon_s = 0.03265 \times Z^{0.0972} \quad (5)$$

结合相应条件下动态再结晶百分数, 可获得

该钢动态再结晶的唯象动力学方程:

$$f = 1 - \exp \left[ -3.23 \cdot \left( \frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_s - \epsilon_c} \right)^{1.97} \right] \quad (6)$$

式中,  $f$  为动态再结晶分数。

### 3 数值模拟结果

#### 3.1 热塑性变形模拟结果

图 4 给出了 35CrMo 钢试样在 1100℃、变形速率为 0.1/s 和应变量为 0.125、0.250、0.375 和 0.500 时试样中等效应变的分布。模拟结果图中的右面部分为热模拟试验机的压头, 左面部分为  $\Phi 8\text{mm} \times 15\text{mm}$  的圆柱体试样 1/4 二维平面图。由图可见, 由于试样和压头之间存在较大的摩擦力, 变形后的试样呈鼓形, 这与热模拟试验的情况是一致的。

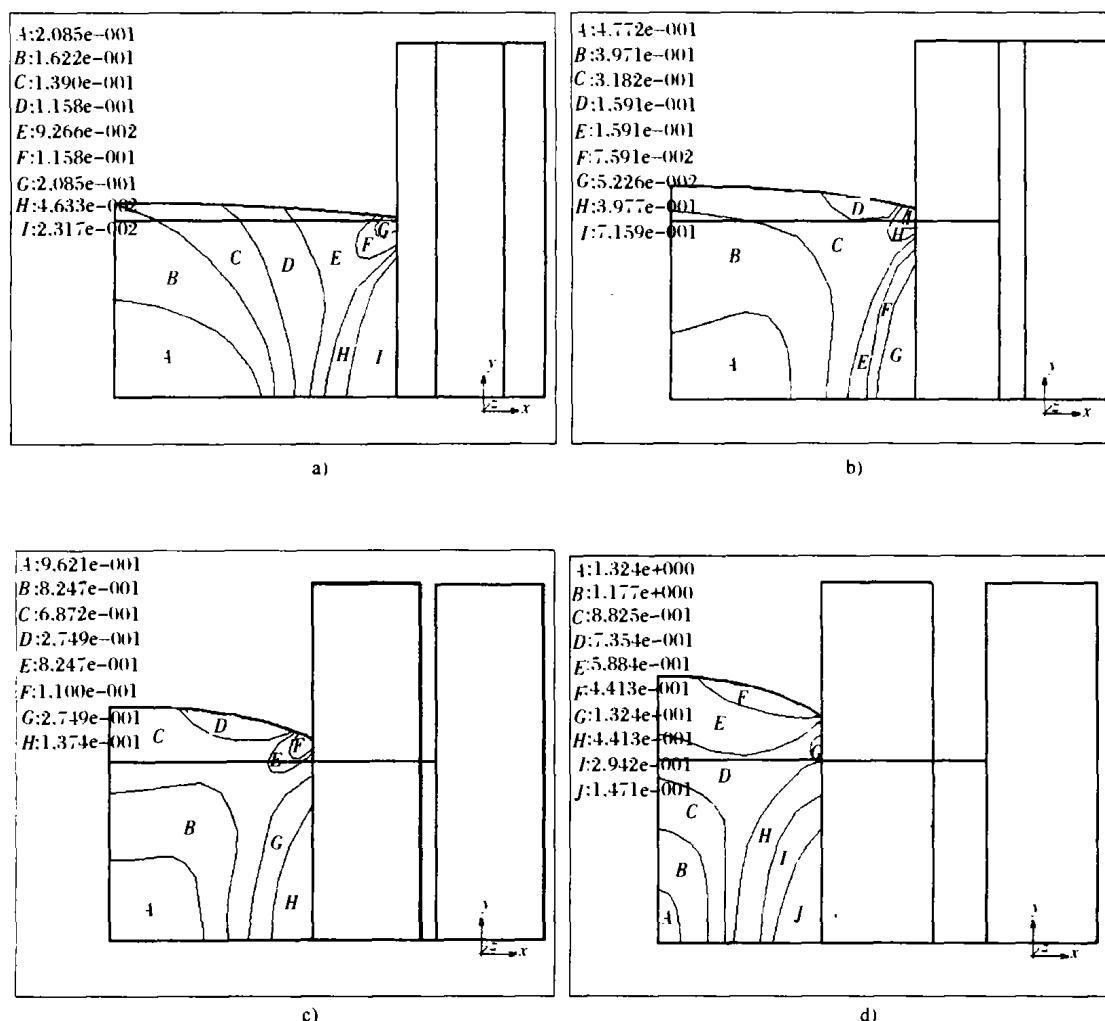


图 4 35CrMo 钢等效应变分布

变形温度: 1100℃; 变形速率:  $0.1\text{s}^{-1}$

变形量: a) 0.125; b) 0.250; c) 0.375; d) 0.500

由图 4 可见, 应变的不均匀性是比较严重的, 当变形量较小时, 位于试样心部大变形区的

变形量最大, 随着变形量的增加, 变形开始由大变形区向粘着区和自由区延伸, 最后, 变形区扩

大, 而粘着区和自由区则有所缩小。

### 3.2 动态再结晶模拟结果

图 5 给出了 35CrMo 钢试样在 1100℃、变形速率为 0.1/s 和应变量分别为 0.125、0.250、

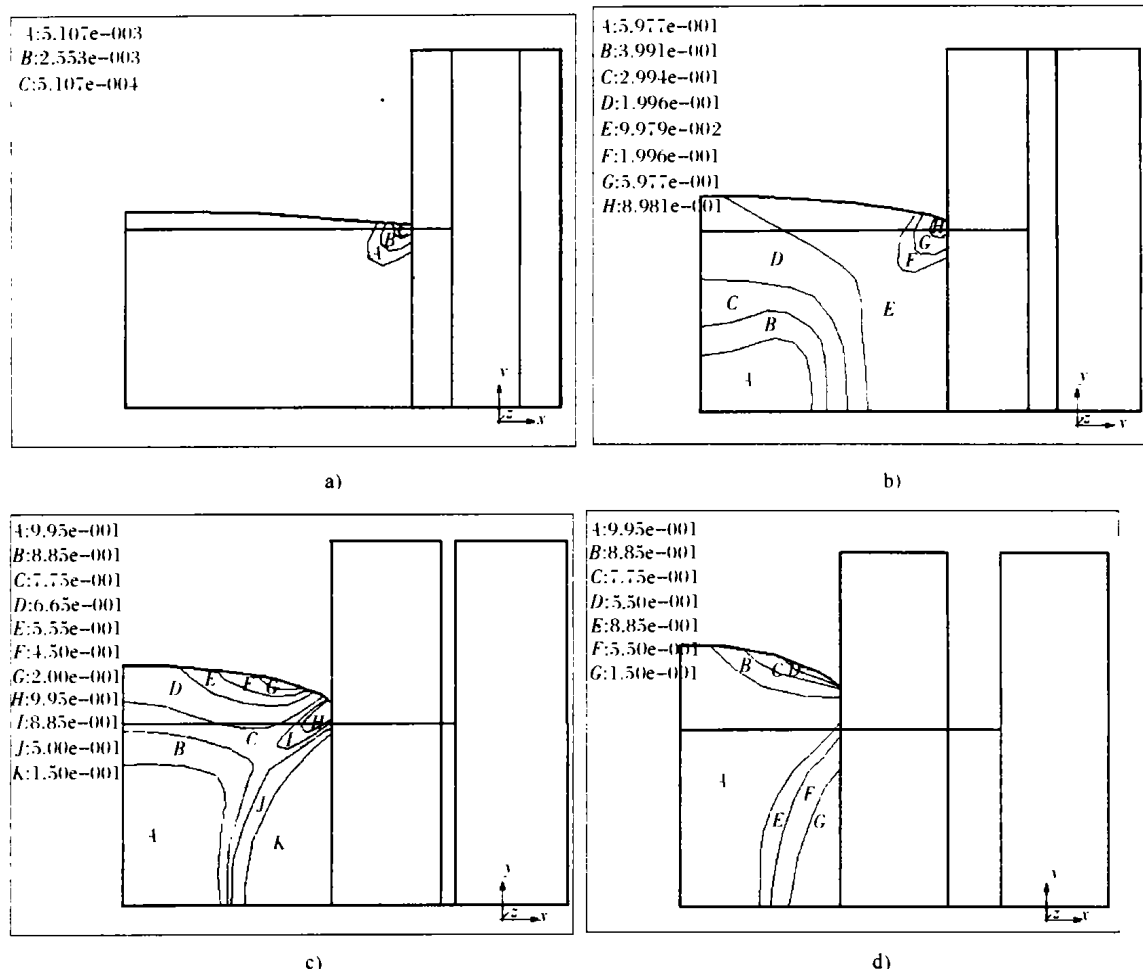


图 5 35CrMo 钢动态再结晶分数的分布

变形温度: 1100℃; 变形速率:  $0.1 \text{ s}^{-1}$

变形量: a) 0.125; b) 0.250; c) 0.375; d) 0.500

0.375 和 0.500 时试样中动态再结晶分数的分布。

由图 5 可知, 动态再结晶的发生始于试样与夹头接触处, 这可能是由于该区开始变形最大, 随着变形量的增大, 动态再结晶发生于大变形区, 然后逐渐向粘着区和自由变形区延伸。从图 5d 可以看出, 当变形量为 0.5 时, 大部分区域的再结晶分数已达到 95% 以上。

### 4 实验结果与分析

图 6 为与图 5 条件相对应的试样金相组织。

从图 5a 可知, 变形量为 0.125 时, 试样表面尖角处开始发生动态再结晶, 而试样芯部没有发生动态再结晶。这一结果从图 6a 的试验结果中可以得到证实。图 5b 模拟结果中试样芯部动态再结晶的百分数为 45%, 而实验结果图 6b 中再结晶的百分数也约为 40%, 两个结果基本一致。图 6d 实验结果也可以看出, 组织已基本发

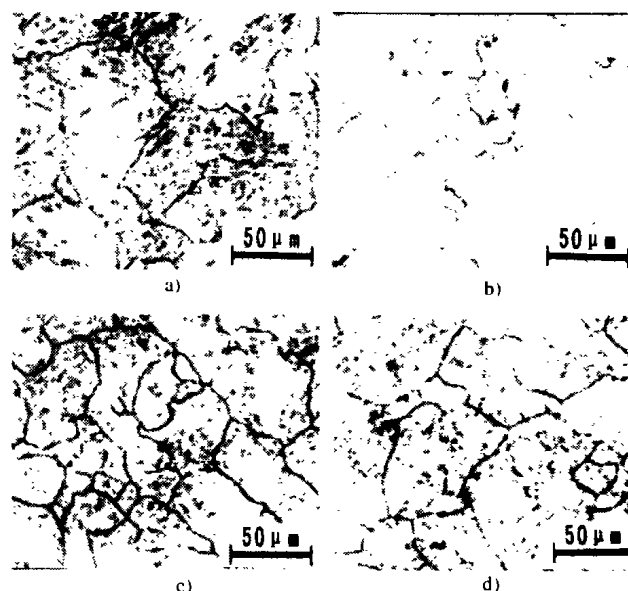


图 6 试样芯部金相组织

变形温度: 1100℃; 变形速率:  $0.1 \text{ s}^{-1}$

变形量: a) 0.125; b) 0.250; c) 0.375; d) 0.500

## 镀锌板非光整边缺陷影响因素的有限元分析

王 通 书

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 应用商业有限元软件平台 Marc 建立了镀锌板四辊光整机的模拟系统, 分析了轧制过程中轧件变形情况, 充分考虑了不同镀锌原板厚度、压下率、前后张力、以及弯辊力等工艺因素对镀锌板非光整边缺陷形成的影响, 以及消除非光整边缺陷的辊型要求。

**关键词:** 镀锌板; 光整; 边部缺陷; 有限元法

**中图分类号:** TG335.55; O242.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-9996 (2004) 05-0027-03

## Analysis of 3-D deformation for skin-passed galvanized sheet edge defects

WANG Tong-shu

(University of Science &amp; Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A simulation system of four high skin-passed rolling mill for galvanized sheet was developed with three dimensional elastic-plastic finite element method based on the large commercial software - Marc. The rules of lateral metal flow were gained in different thickness of sheet, reduction, forward and backward tension and force of roll bending.

**Key words:** galvanized sheet; skin pass rolling; edge defects; finite element method

20 世纪 90 年代以来, 钢板镀锌技术飞速发展, 对镀锌板的质量要求也越来越高, 尤其以汽车用镀锌板和家电用镀锌板为甚。为了控制其板形和表面质量, 均需在镀锌板生产上配置光整机, 一般采用四辊光整机。对光整机的装备水平和操作水平要求极高, 否则在前部工序工艺因素

的综合作用下, 钢板两边易产生一种称为非光整边的表面缺陷, 即镀锌板两边各有一定量的条带难于压下, 光整不到, 镀锌后的锌花不能细化, 造成用户须将板带两边各裁掉 5~25mm 才能使用。对此国内外学者开展了不少研究<sup>[1-4]</sup>。

为了进一步研究四辊光整机中轧件特别是轧

生动态再结晶, 并且部分晶粒已开始长大, 这与图 5d 中试样芯部动态再结晶的百分数为 95% 以上的模拟结果比较吻合; 同时, 这一结果在图 1c 中 1100℃ 应力-应变曲线中也显示出。

## 5 结论

(1) 35CrMo 钢在变形温度足够高, 变形量大于 35% 和变形速率小于 1/s 的条件下易发生动态再结晶; 该钢的变形激活能约为 378.2kJ/mol。

(2) 35CrMo 钢动态再结晶唯象理论的数学模型为:  $f = 1 - \exp \left[ -3.23 \cdot \left( \frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_s - \epsilon_c} \right)^{1.97} \right]$ , 其中参数  $\epsilon_c = 2.92 \times 10^{-3} Z^{0.1381}$ ,  $\epsilon_s = 0.03265 \times$

$Z^{0.0972}$ 。

## 参考文献:

- [1] Roberts W, Sandberg A, Siwecki T, etc. Proc. conf. HSLA Steels, Technology and Applications, Philadelphia, ASM, (1983): 67.
- [2] Garofalo F. Fundamentals of creep and creep rupture in metals [M]. New York: Macmillan, 1965.
- [3] Roberts W. Microstructure evolution and flow stress during hot working [A]. Strength of metals and alloys, Proceedings of the 7<sup>th</sup> international conference [C]. 1986. 1859-1891.
- [4] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation [J]. Acta Metall, 1966, 9 (14): 1136-1138.

收稿日期: 2003-11-25

收修改稿日期: 2004-03-01

作者简介: 王通书 (1973-), 男 (汉族), 内蒙古包头人, 硕士。