

· 组织和性能 ·

## 双道次热压缩 50CrV4 弹簧钢奥氏体的静态再结晶

吴浩 鲍思前 赵刚 许柳 陈建徽

(武汉科技大学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** 通过 Gleeble-1500 热模拟机对 50CrV4 弹簧钢(成分: 0.53C, 0.18Si, 0.84Mn, 0.012P, 0.003S, 0.92Cr, 0.12V, 0.02Ti) 50 mm 连铸板坯锻制成的 15 mm 板进行双道次热压缩试验。研究该钢在 850 ~ 1 000 °C 以真应变 0.1 ~ 0.25, 应变速率 0.1 ~ 10 s<sup>-1</sup>, 道次间隔 1 ~ 80 s 形变时的静态再结晶行为, 并建立了静态再结晶动力学模型。结果表明, 随温度、应变、应变速率、道次间隔时间增加, 会加速 50CrV4 钢静态再结晶进程; 在 950 °C, 真应变 0.25, 应变速率为 0.1, 1, 10 s<sup>-1</sup> 时, 该钢发生 50% 再结晶所需的时间分别为 8.42, 4.40, 2.22 s; 该钢静态再结晶激活能为 249.974 kJ · mol<sup>-1</sup>。

**关键词** 50CrV4 弹簧钢 50 mm 连铸板坯 双道次热压缩 静态再结晶 动力学模型

## Static Recrystallization of austenite in Two-Pass Hot Compressed Spring Steel 50CrV4

Wu Hao, Bao Siqian, Zhao Gang, Xu Liu and Chen Jianhui

(Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** The two-pass hot compressed test for 15 mm plate forged from 50 mm cast slab of spring steel 50CrV4 (成分: 0.53C, 0.18Si, 0.84Mn, 0.012P, 0.003S, 0.92Cr, 0.12V, 0.02Ti) has been carried out by using Gleeble-1500 thermo-simulation machine. The behavior of static recrystallization of steel during deformation at 850 ~ 1 000 °C with true strain 0.1 ~ 0.25, strain rate 0.1 ~ 10 s<sup>-1</sup> and inter-pass cooling for 1 ~ 80 s is studied and a static recrystallization kinetics model is established. Results show that with increasing temperature, strain, strain rate and inter-pass cooling time the static recrystallizing course of steel 50CrV4 shall be improved; at 950 °C with true strain 0.25, as strain rate is 0.1, 1 and 10 s<sup>-1</sup> the time to occur 50% recrystallization grains in steel is respectively 8.42, 4.40 and 2.22 s; the activation energy for static recrystallization of steel is 249.974 kJ · mol<sup>-1</sup>.

**Material Index** Spring Steel 50CrV4, 50 mm Cast Slab, Two-Pass Hot Compression, Static Recrystallization, Kinetic Model

弹簧钢 50CrV4 具有高的弹性极限和屈强比、高的疲劳极限和足够的塑性和韧性等优良性能, 被越来越多的汽车厂作为汽车离合器的核心材料<sup>[1-2]</sup>。针对弹簧钢 50CrV4 脱碳和动态再结晶进行了初步的研究<sup>[3-4]</sup>。本文利用 Gleeble-1500 热模拟机研究弹簧钢 50CrV4 在热变形过程中的静态再结晶行为, 建立了其静态再结晶动力学模型, 为优化其轧制工艺提供实验和理论依据。

### 1 实验材料和方法

#### 1.1 实验材料

实验研究所用试样取自钢厂 CSP 车间生产弹簧钢 50CrV4 连铸坯, 厚度约为 50 mm。其化学成分(成分) 0.53C, 0.18Si, 0.84Mn, 0.012P, 0.003S,

0.92Cr, 0.12V, 0.02Ti。生产工艺流程为: 原料→电弧炉冶炼→钢包精炼→薄板坯连铸→均热→6 机架热连轧→层流冷却→卷取。电弧炉容量 150 t, 炉料全部是废钢。利用火焰切割从连铸坯中部取一块大约为 200 mm(长) × 100 mm(宽) × 50 mm(厚)的试样, 在实验室箱式电阻炉中加热到 1 100 °C 左右, 再将其锻压成 15 mm 厚, 终锻温度约为 900 °C, 空冷至室温, 然后机加工成 Φ10 mm × 15 mm 的圆柱体小试样。

#### 1.2 试验方法

在 Gleeble-1500 热模拟机上对弹簧钢 50CrV4 进行双道次压缩热模拟实验。将试样稳定加热到 1 150 °C 进行保温 5 min, 加热速度为 20 °C/s。当试

通讯作者: 鲍思前, 博士, 副教授, 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081 E-mail: baosiqian@163.com

样充分奥氏体化后,将试样以 10 °C/s 的速度冷却到需要的温度再保温 20 s,使各部分温度均匀,对 50CrV4 钢分别从变形温度、应变速率、变形量和道次间隔停留时间 4 个方面进行双道次压缩试验,测定应力-应变曲线,采用 2% 的应力补偿法计算出软化比<sup>[5]</sup>。

(1) 考虑变形温度的影响。双道次压缩的应变速率均为 1 s<sup>-1</sup>,变形温度分别为 850、900、950、1 000 °C,双道次的变形量(真应变)均为 0.2,道次间隔时间分别为 1、5、15、30、80 s。

(2) 考虑变形量的影响。各道次压缩的变形温度均为 950 °C,应变速率均为 1 s<sup>-1</sup>,各道次的变形量(真应变)分别为 0.1、0.15、0.25,道次间隔时间分别为 1、5、15、30、80 s。

(3) 考虑应变速率的影响。各道次压缩的变形温度均为 950 °C,应变速率分别为 0.1、1、10 s<sup>-1</sup>,各道次的变形量(真应变)均为 0.25,道次间隔时间分别为 1、5、15、30、80 s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各参数对弹簧钢 50CrV4 静态再结晶的影响

静态再结晶包括形核和长大的过程。随着道次间隔时间的增加,形核的数目不断增加,再结晶晶粒长大,因而,静态再结晶的体积分数也逐渐增加。在不同的变形条件下,静态再结晶的速度也不同<sup>[7]</sup>。不同工艺参数对弹簧钢 50CrV4 静态再结晶体积分数的影响如图 1 所示。

由图 1(a)可知,在同一应变速率和变形量下,变形温度越高,软化比越大。例如,真应变为 0.2,应变速率为 1 s<sup>-1</sup>,分别在 850、900、950、1 000 °C 变形时,发生 50% (体积分数,下同)静态再结晶所对应的时间分别约为 16.45、5.33、3.20、1.24 s。随着

变形温度的升高,形变畸变能将增大,静态再结晶的速度也随之变快。

由图 1(b)可知,在轧制温度、应变速率和道次间隔时间等变形工艺参数相同的情况下,变形后静态再结晶的百分数会随着变形量的增大而增加。如应变速率为 1 s<sup>-1</sup>,在 950 °C 真应变分别为 0.1、0.15 和 0.25 时,发生 50% 静态再结晶所对应的时间分别约为 12.98、9.10、6.98 s。随着变形量的增大,位错的密度增加,静态再结晶的驱动力加大。

从图 1(c)可知,在道次间隔时间,变形温度,卸载时变形程度等相同条件下,应变速率越高,静态再结晶百分数越大。如在 950 °C,真应变为 0.25,应变速率分别为 0.1、1、10 s<sup>-1</sup>时,它们发生 50% 再结晶所需要的时间分别约为 8.42、4.40、2.22 s。在高应变速率下,动态回复的程度小,因而导致了较高的位错密度,增加了再结晶的驱动力。

### 2.2 静态再结晶的动力学方程

金属的静态再结晶的激活能是一个常量,与钢的化学成分和组织有关,与加工的变形条件无关。变形激活能是材料发生塑性变形时,金属原子发生剧烈的热运动需要跨越的一个能量“门槛值”,是表征材料热变形的重要参数<sup>[7,9]</sup>。静态回复和静态再结晶对金属的组织演变和最终的组织性能有重要影响,对于静态再结晶动力学的研究,目前一般采用 Avrami 方程<sup>[10-11]</sup>。

$$X_s = 1 - \exp \left[ -0.693 \times \left( \frac{t}{t_{0.5}} \right)^n \right] \quad (1)$$

式中:  $X_s$ - 停留时间内完成静态再结晶的体积分数;  $n$ - 材料常量;  $t_{0.5}$ - 完成 50% 再结晶所需的时间/s;  $t$ - 静态再结晶时间/s。

发生 50% 再结晶所需时间  $t_{0.5}$  与变形工艺参

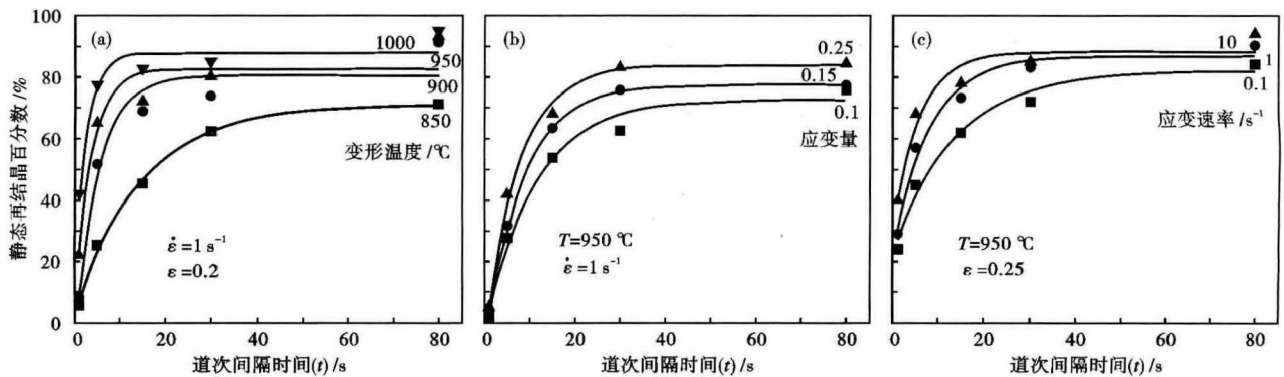


图 1 温度(a),真应变(b)和应变速率(c)对 50CrV4 钢静态再结晶百分数的影响

Fig. 1 Effect of temperature (a), true strain (b) and strain rate (c) on percentage of static recrystallized grains in steel 50CrV4

数,如变形温度、变形量、初始奥氏体晶粒尺寸及应变速率密切相关,可由式(2)表示<sup>[12]</sup>。

$$t_{0.5} = A\varepsilon^p \dot{\varepsilon}^q d^n \exp\left(\frac{Q_{\text{rec}}}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: $A$ 、 $p$ 、 $q$ 、 $s$ -常数; $\varepsilon$ -应变; $\dot{\varepsilon}$ -应变速率; $R$ -气态常数; $T$ -绝对温度; $Q_{\text{rec}}$ -静态再结晶变形激活能; $d$ -初始奥氏体晶粒尺寸,本文不考虑热变形时奥氏体晶粒尺寸的影响,取 $s=1$ <sup>[13]</sup>。

两边分别取对数可得到:

$$\ln t_{0.5} = \ln A + p \ln \varepsilon + q \ln \dot{\varepsilon} + \ln d + \frac{Q_{\text{rec}}}{RT} \quad (3)$$

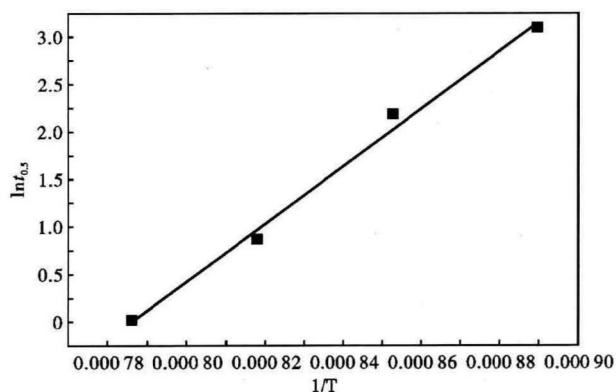


图2 50CrV4 钢  $\ln t_{0.5}$  与  $1/T$  曲线关系图

Fig 2 Relation between  $\ln t_{0.5}$  and  $1/T$ , steel 50CrV4

### 参考文献

- [1] 李永德,柳洋波. 汽车用高强度弹簧钢 50CrV4 的超高周疲劳性能的研究[C]. 第 7 届全国 MTS 材料试验学术会议,大连,2007.
- [2] 姜英禹. 50CrV4 弹簧扁钢的开发[J]. 新疆钢铁,2012,1(1):1-5.
- [3] 杨林,余驰斌,鲍思前,等. 50CrV4 脱碳分析及其对淬硬性的影响[J]. 钢铁钒钛,2013,34(2):88-92.
- [4] 余冲,赵刚,鲍思前,等. 50CrV4 奥氏体变形流动应力的研究[J]. 热加工工艺,2013,42(2):20-23.
- [5] 高永生,田晓春. 50CrV4 钢热轧变形抗力实验研究[J]. 机械设计,1995,12(11):55-57.
- [6] 滴永诚,陈明松. 42CrMo 钢形变奥氏体静态再结晶[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(2):411-416.
- [7] 徐光,徐楚韶. Ti-IF 钢多道次变形静态再结晶研究[J]. 钢铁钒钛,2005,26(4):42-48.
- [8] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007:196-202.
- [9] 李壮. 热轧带钢奥氏体静态再结晶模型的研究[J]. 塑性工程学报,2004,11(4):30-33.
- [10] Cho S H, Kang K B, Jonas J J, et al. Effect of Manganese on Recrystallization Kinetics of Niobium Microalloyed Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology,2002,18(3):389-395.
- [11] Gómez M, Medina S F, Quispe A, et al. Static Recrystallization and Induced Precipitation in a Low Nb Microalloyed Steel[J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan (International), 2002, 42(4):423-431.
- [12] Medina S F, Mancilla J E. Static Recrystallization Modelling of Hot Deformed Steels Containing Several Alloying Elements[J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan (International), 1996, 36(8):1070-1083.
- [13] Fernández A I, Uranga P, López B, et al. Static Recrystallization Behavior of a Wide Range of Austenite Grain Sizes in Microalloyed Steels[J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan (International), 2000, 40(9):893-901.

由于变形激活能与变形条件无关,所以  $\ln t_{0.5}$  与  $1/T$  之间呈线性关系,如图 2 所示。

将图 1 实验数据进行回归分析可以得到,  $A = 4.856 \times 10^{-12}$ ,  $p = -2.983$ ,  $q = -6.754$ ,  $n = 0.542$ ,  $Q_{\text{rec}} = 249.974 \text{ kJ/mol} = 249974 \text{ J/mol}$ , 拟合出弹簧钢 50CrV4 静态再结晶的动力学公式如下:

$$X_s = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{0.542}\right] \quad (4)$$

$$t_{0.5} = 4.856 \times 10^{-12} \varepsilon^{-2.983} \dot{\varepsilon}^{-6.754} d \exp\left(\frac{249974}{RT}\right) \quad (5)$$

### 3 结论

(1) 变形温度、变形量、应变速率及道次间隔时间是影响静态再结晶百分数的重要因素,这几个参数增加都会加速弹簧钢 50CrV4 静态再结晶进程。

(2) 通过回归法计算 Avrami 指数  $n$  平均值为 0.542, 静态再结晶激活能为 249.974 kJ/mol, 建立了弹簧钢 50CrV4 静态再结晶的 Avrami 方程动力学模型。

中国博士后科学基金项目(2012M511282), 湖北省教育厅科学研究计划重点项目(D20131106)资助

吴浩(1990-),男,硕士研究生,2012年武汉科技大学(本科)毕业,中高碳钢组织和性能控制。

E-mail:840879793@qq.com

收稿日期:2014-06-15