

· 组织和性能 ·

30CrMo 钢 60 mm 连铸板坯双道次压缩的奥氏体静态再结晶

郭金星 鲍思前 彭 联 汤顺启

(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 在 Thermecmasto-Z 热模拟机上利用双道次压缩方法实验研究 30CrMo 钢 60 mm 连铸板坯高温变形道次间隔时间内的静态再结晶行为, 分析温度(1 000 ~ 1 150 °C), 变形量(0.1 ~ 0.22), 变形速率(0.1 ~ 10 s⁻¹)以及道次间隔时间(1 ~ 80 s)对其静态再结晶的影响。结果表明, 温度、变形量、变形速率及道次间隔时间的增加都会促进 30CrMo 钢的静态再结晶; 30CrMo 钢的静态再结晶激活能为 184.45 kJ/mol; 根据实验数据建立了静态再结晶动力学模型, 模型预测结果与实验结果吻合较好。

关键词 30CrMo 钢 60 mm 连铸板坯 双道次压缩 静态再结晶 动力学模型

Static Recrystallization of Double-Pass Compressed Austenite of steel 30CrMo 60 mm Casting Slab

Guo Jinxing, Bao Siqian, Peng Lian and Tang Shunqi

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

Abstract The static recrystallization behavior of steel 30CrMo 60 mm casting slab in interval between double-pass of hot deformation has been tested and studied by Thermecmasto-Z thermal simulator and double-pass compressed method to analysis the effect of temperature (1 000 ~ 1 500 °C), deformation (0.1 ~ 0.22), strain rate (0.1 ~ 10 s⁻¹) and interval between passes (1 ~ 80 s) on static recrystallization. Results show that the static recrystallization of steel 30CrMo is improved with increasing temperature, deformation, strain rate and interval between passes; the static recrystallization activation energy of steel 30CrMo is 184.45 kJ/mol; a static recrystallization kinetic model is established based on experimental data and the predicted data better meet the experimental data.

Material Index Steel 30CrMo, 60 mm Casting Slab, Double-Pass Compression, Static Recrystallization, Kinetic Model

30CrMo 钢作为高品质合金结构钢的基体材料, 具有较高的强度、良好的韧性和淬透性, 主要用于化工、建筑、汽车和道具模具等多个行业^[1]。目前, 国内外对于其进行的研究主要集中在 30CrMo 钢的热处理工艺、抗疲劳、耐腐蚀性能和热轧组织与性能等方面^[2-5], 还未见其热变形过程中静态再结晶等方面的研究报道。在热轧加工过程中, 需要通过控制工艺参数来控制产品的最终微观组织。因此, 研究 30CrMo 钢连铸板坯在热变形过程中的静态再结晶行为对制定其热加工工艺有着十分重要的意义。本文利用富士电波 Thermecmasto-Z 热模拟机研究结构钢 30CrMo 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参数。

1 实验材料与方法

本实验所选材料为武钢 CSP 厂生产的 30CrMo

表 1 30CrMo 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel 30CrMo / %

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr
0.26 ~ 0.33	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	<0.03	<0.03	0.15 ~ 0.25	0.8 ~ 1.1

钢, 其化学成分如表 1 所示。薄板连铸坯厚度为 60 mm, 进均热炉前, 在其厚度方向 1/4 层处取厚度为 15 mm 的铸坯样, 空冷之后再机械加工成 Φ8 mm × 12 mm 的圆柱体试样。双道次压缩热模拟实验在富士电波 Thermecmasto-Z 热模拟机上进行。实验考虑不同变形条件的影响, 每组实验道次之间的间隔时间分别为 1, 5, 15, 30, 80 s。

30CrMo 钢双道次压缩实验方案如图 1 所示, 具体工艺如下: 将试样稳定加热到 1 330 °C, 保温 8 min, 加热速度为 20 °C/s。待其充分奥氏体化后, 以 15 °C/s 的速度冷却到需要的温度再保温 10 s, 然后

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

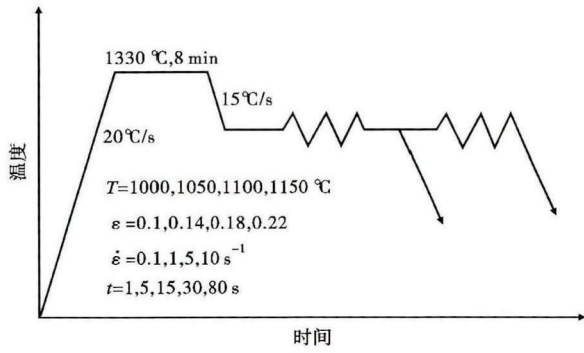


图1 30CrMo 钢铸坯双道次压缩方案

Fig.1 Scheme of double-pass compressed test of steel 30CrMo casting slab

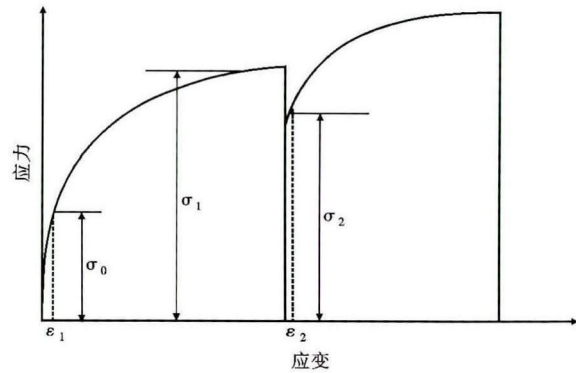


图2 典型双道次压缩应力-应变曲线

Fig.2 Typical double-pass compressed stress-strain curves

分别从不同变形温度 (T)、变形量 (ε)、应变速率 ($\dot{\varepsilon}$) 和保温时间 (t) 4 个方面对试样进行双道次压缩试验,两次压缩实验的相对变形量均相同,在压缩过程中测定应力-应变曲线。

2 结果与分析

2.1 静态再结晶百分数

目前,对静态再结晶的研究主要是通过双道次的应力-应变曲线计算获得静态再结晶软化率来判断材料的静态再结晶行为。软化率的计算方法主要有补偿法(0.2%或2%)、后插法、平均应力法和面积法^[6-10]。由于2%补偿法的数据误差比其他方法小,因此,本文采用2%应力补偿法^[11]来处理数据。图2为形变奥氏体双道次软化的典型示意图。2%应力补偿法的软化率计算公式^[12]是:

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (1)$$

式中: σ_0 -第1道次的屈服应力/MPa; σ_1 -第1道次卸载时的应力/MPa; σ_2 -第2道次的屈服应力/MPa。

2.2 各工艺参数对30CrMo 钢静态再结晶的影响

静态再结晶是指金属在热变形后的等温保持过程中,以变形储存能为驱动力,通过热活化过程再结晶成核和长大而再生成新的晶粒组织,使系统由高能状态转变为较稳定的低能状态的过程。随着道次间隔时间的延长,形核的数目逐渐增加,因而静态再结晶的百分比也相应增加。另外,在不同的变形条件下,静态再结晶的速度也有所不同。图3所示的是不同工艺参数对30CrMo 钢的静态再结晶百分数的影响。

如图3(a)所示,在变形量和应变速率一定时,温度越高,静态再结晶的百分数越大,并且静态再结晶速率也越来越快。如在应变速率为 1 s^{-1} , 变形量为 0.18 时,在变形温度 1150, 1100, 1050, 1000 °C 下发生 50% 静态再结晶的时间分别为 1.84, 3.25, 5.98, 11.57 s。这主要是因为温度越高,金属原子活性越大,形变储存能也越高,从而导致静态再结晶更容易发生,再结晶速率变快。

从图3(b)可以看出,在变形温度和应变速率一

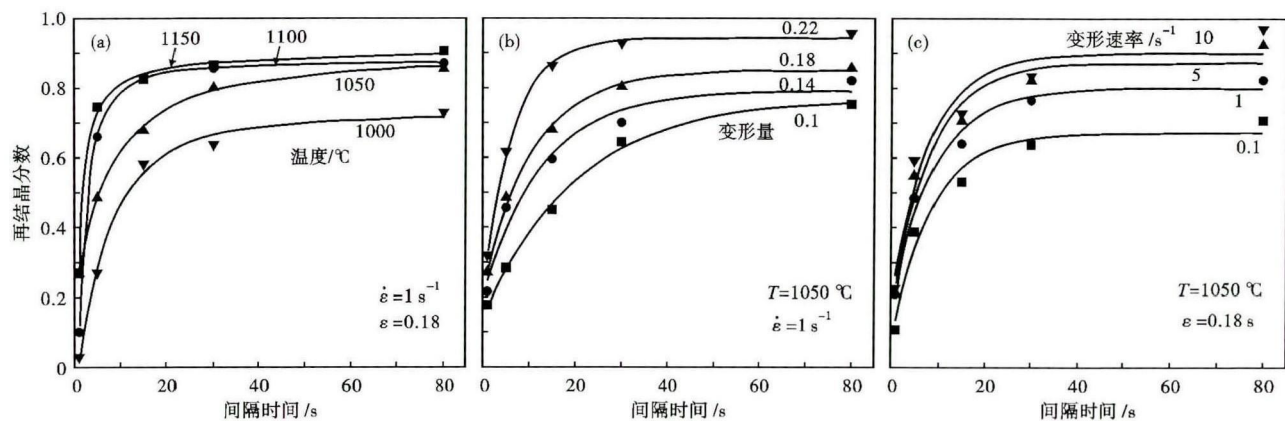


图3 (a)温度;(b)变形量;(c)变形速率对30CrMo 钢静态再结晶百分数的影响

Fig.3 Effect of temperature (a), deformation (b) and strain rate (c) on percentage of static recrystallization of steel 30CrMo

定时,静态再结晶百分数随着变形量的增加而增加。如在变形温度为1 050 ℃,变形速率为 1 s⁻¹,间隔时间都为 80 s 时,变形量为 0.22 的静态再结晶的分数达到了 95.56%,而变形量为 0.1 的只有 75.15%。这是由于随着变形量的增加,金属内部的位错密度迅速增大,材料的变形储存能也随之增加。再结晶驱动力的增加导致静态再结晶的形核率增大,因而再结晶体积分数也随之增加。

由图 3(c)可知,在变形温度和变形量一定时,随着应变速率的增大,静态再结晶的百分数也随之增大。如在变形温度为1 050 ℃,变形量为 0.18,间隔时间均为 30 s 时,变形速率为 0.1 s⁻¹的静态再结晶百分数为 63.93%,而变形速率为 10 s⁻¹的则达到了 83.73%。这是因为在其他条件相同时,随着应变速率的增大,一方面,金属内部的位错增殖速度加快;另一方面,热变形过程中的动态回复程度降低,位错的消失速率减慢。两方面的共同作用使得热变形后材料内部的位错密度急剧增大,静态再结晶的驱动力得以迅速增加,从而造成静态再结晶百分数的增加。

2.3 静态再结晶的动力学方程

对于奥氏体区静态再结晶的动力学方程的研究有很多,目前应用较多的是阿弗拉密(Avrami)方程,方程可表述为^[13-14]:

$$X_s = 1 - \exp\left[-0.639 \times \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^k\right] \quad (2)$$

式中: X_s -静态再结晶分数; $t_{0.5}$ -发生 50% 静态再结晶所用的时间/s; k -与材料相关的常数; t -静态再结晶时间/s。

公式(2)中, $t_{0.5}$ 受变形温度、变形量、应变速率和初始晶粒尺寸以及金属的组成成分的影响,Sellars 和 Jonas^[15]等人给出的 $t_{0.5}$ 的计算公式:

$$t_{0.5} = A\varepsilon^a \dot{\varepsilon}^b d_0^c \exp\left(\frac{Q_{rec}}{RT}\right) \quad (3)$$

式中: ε -变形量; $\dot{\varepsilon}$ -应变速率/s⁻¹; d_0 -初始晶粒尺寸/ μm ; Q_{rec} -静态再结晶变形激活能/(J·mol⁻¹); R -气体常数,取 $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T -变形温度/K; A, a, b, c -与材料相关的常数。

本文实验制备试样时设定的加热温度和保温时间相同,晶粒尺寸相同,故不考虑热变形时奥氏体晶粒尺寸的影响^[16],所以公式(3)可表示为:

$$t_{0.5} = A\varepsilon^a \dot{\varepsilon}^b \exp\left(\frac{Q_{rec}}{RT}\right) \quad (4)$$

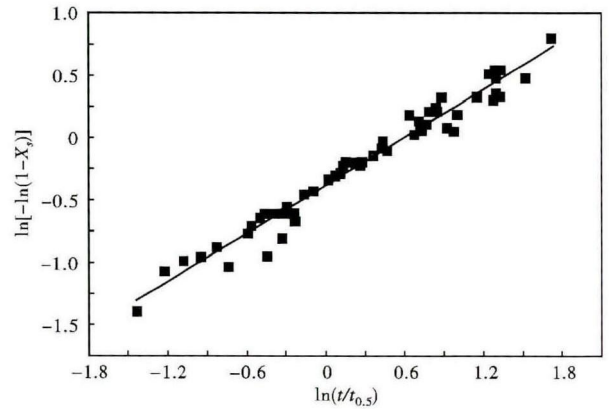


图 4 $\ln[-\ln(1-X_s)]$ 与 $\ln(t/t_{0.5})$ 的关系

Fig. 4 Relation between $\ln[-\ln(1-X_s)]$ and $\ln(t/t_{0.5})$

2.3.1 系数 k 的确定

对公式(2)两边求自然对数,得:

$$\ln[-\ln(1-X_s)] = \ln 0.693 + k \ln(t/t_{0.5}) \quad (5)$$

由于 $t_{0.5}$ 和 k 对某一具体的变形参数和材料是定值,因此,分别作出不同变形温度、不同变形量和不同应变速率下的 $\ln[-\ln(1-X_s)] - \ln(t/t_{0.5})$ 图形,经回归得到 k 的值为 0.64(图 4)。

2.3.2 $t_{0.5}$ 公式中各系数的确定

对公式(4)两边求自然对数,可得:

$$\ln t_{0.5} = \ln A + a \ln \varepsilon + b \ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q_{rec}}{RT} \quad (6)$$

根据实验数据对各个系数进行线性回归,得到 $Q_{rec} = 184.454 \text{ kJ/mol}$, $a = -2.09$, $b = -0.172$, $A = 8.61 \times 10^{-9}$ 。

2.4 模型验证

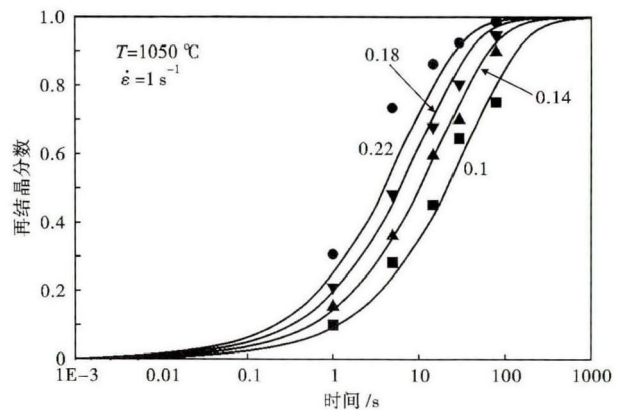


图 5 30CrMo 钢静态再结晶体积分数的实验值(点)与预测值(曲线)的比较

Fig. 5 Comparison between experimental data (dots) and predicted data (curves) of static recrystallization volume fractions of steel 30CrMo

由以上计算可得出 30CrMo 钢静态再结晶动力学方程为:

$$\begin{cases} X_s = 1 - \exp\left[-0.693 \times \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{0.64}\right] \\ t_{0.5} = 8.61 \times 10^{-9} \varepsilon^{-2.09} \dot{\varepsilon}^{-0.172} \exp\left(\frac{184\,454}{8.31 T}\right) \end{cases} \quad (7)$$

利用建立的静态再结晶模型对上述实验不同工艺参数下的静态再结晶软化率进行预测,将预测结果与实验计算的结果进行对比。图 5 所示的是变形温度为 1 050 ℃,应变速率为 1 s⁻¹时,静态再结晶体积分实验值与预测值的比较。显然,预测结果与

实验结果较吻合。

3 结论

(1)变形温度、变形量、变形速率和保温时间的增加均促进 30CrMo 钢静态再结晶的发生。

(2)通过对实验数据的分析,计算出 Avrami 指数 *n* 平均值为 0.64,静态再结晶激活能为 184.45 kJ/mol,推导出 30CrMo 钢的静态再结晶动力学方程,且模型计算结果与实验结果较吻合。

湖北省自然科学基金项目(2014CFB819)资助

参考文献

[1] 谢利群,毛新平. TSCR 工艺生产 30CrMo 热轧带钢的实践[J]. 轧钢,2012,29(1):33-37.

[2] 刘荣凤,陈沙古,王清远,等. 30CrMo 的疲劳实验研究[J]. 科学技术与工程,2009,9(5):1230-1235.

[3] 郭建明,冯永强,李锦时,等. 30CrMo 钢热处理后性能影响因素的研究[J]. 锅炉制造,2000(2):58-64.

[4] 张继信,樊建春,张来斌,等. 30CrMo 合金钢的冲蚀磨损性能研究[J]. 润滑与密封,2012,37(4):15-18.

[5] 毛新平,谢利群. 薄板坯连铸连轧 30CrMo 钢的连续冷却转变(CCT)曲线和应用[J]. 特殊钢,2012,33(3):44-46.

[6] Kim S, Lee Y, Jiang B L. Modeling of Recrystallization and Austenite Grain Size for AISI 316 Stainless Steel and Its Application to Hot Bar Rolling[J]. Materials Science and Engineering A,2003,357(1-2):235-239.

[7] Zhang Z H, Liu Y N, Liang X K, et al. The Effect of Nb on Recrystallization Behavior of Nb on Recrystallization Behavior of a Nb Micro-Alloyed Steel[J]. Materials Science and Engineering A,2008,474(1-2):254-260.

[8] 蔺永诚,陈明松,钟 赓. 42CrMo 钢形变奥氏体的静态再结晶[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(2):411-415.

[9] 徐 光,徐楚韶,赵嘉蓉,等. Ti-IF 钢多道次变形静态再结晶研究[J]. 钢铁钨钛,2005,26(4):39-42.

[10] Ma Bo, Peng Yan, Jia Bin, et al. Static Recrystallization Kinetics Model After Hot Deformation of Low-Alloy Steel Q345B[J]. Science Direct,2010,17(8):61-66.

[11] Li Xiong, Zhang Hong-bing, Ruan Xue-yu, et al. Kinetics for Static Recrystallization Afterhot Working of 0.38C-0.99Cr-0.16Mo Steel[J]. Journal of Central South University of Technology,2004,11(4):353-357.

[12] Rao K P, Prasad Y K D V, Hawboly E B. Study of Fractional Softening in Multi-Stage Hot Deformation[J]. Journal of Materials Processing Technology,1998,77(1):166-174.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Stewart G R, Jonas J J. Static and Dynamic Strain Aging at High Temperatures in 304 Stainless Steel[J]. ISIJ International,2004,44(7):1263-1272.

[16] Fernández A I, Uranga P, López B, et al. Static Recrystallization Behavior of a Wide Range of Austenite Grain Sizes in Microalloyed Steels[J]. ISIJ International,2000,40(9):893-901.

郭金星(1989-),男,硕士研究生,2011年武汉大学(本科)毕业,中高碳钢组织和性能控制。
E-mail:274140702@qq.com

收稿日期:2015-10-08

欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告