

基于 CSP 工艺锯片钢 75Cr1 静态再结晶研究

宋娜娜¹ 鲍思前¹ 赵刚¹ 蔡珍² 徐洋¹ 黄祥斌¹

(1 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;

2 武汉钢铁(集团)公司研究院, 武汉 430080)

摘要 试验用 75Cr1 钢(成分: 0.76C, 0.30Si, 0.70Mn, 0.45Cr, 0.010P, 0.003S) 的 CSP 流程为 150 t BOF-LF-60 mm 板坯连铸-连轧。通过 Thermecmastor-Z 热模拟实验机对取自锯片钢 75Cr1 60 mm 铸坯的试样进行了双道次热压缩实验, 分析了温度(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, 并采用 2% 应力补偿计算了不同变形条件下的静态再结晶百分率, 建立了基于 CSP 工艺锯片钢 75Cr1 静态再结晶动力学模型。利用 VB 编制模拟软件, 结合现场生产工艺参数, 预报 CSP 工艺生产 75Cr1 钢热轧过程中组织演变, 得出 75Cr1 钢合适的精轧工艺-精轧入口温度 1 150 °C, 变形量 0.22, 应变速率 1 s⁻¹, 道次间隔时间 30 s。

关键词 锯片钢 75Cr1 CSP 工艺 双道次压缩 静态再结晶 动力学模型 模拟软件

A Study on Static Recrystallization of Saw Steel 75Cr1 Based on CSP Process

Song Nana¹, Bao Siqian¹, Zhao Gang¹, Cai Zhen², Xu Yang¹ and Huang Xiangbin¹

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Research and Development Center, Wuhan Iron and Steel Co Ltd, Wuhan 430080)

Abstract The CSP flowsheet of tested steel 75Cr1 (composition: 0.76C, 0.30Si, 0.70Mn, 0.45Cr, 0.010P, 0.003S) is 150 t BOF-LF-60 mm Slab Casting-Continuous Rolling. The test of double-pass hot deformation of sample taking from 60 mm casting slab of steel 75Cr1 has been carried out by Thermecmastor-Z thermal simulator to analyze the effect of temperature (1 000 ~ 1 150 °C), deformation (0.1 ~ 0.22), strain rate (0.1 ~ 10 s⁻¹) and pass interval time (1 ~ 80 s) on static recrystallization of steel. And static recrystallization fraction in different deformation conditions is calculated by using 2% stress compensation method, and the static recrystallization kinetic model of saw steel 75Cr1 based on CSP process is established. The evolution of structure of steel 75Cr1 in hot-rolling process of CSP flowsheet may predict by VB simulation software combined with process parameters at situ. It is obtained that the suitable finishing rolling process parameters for steel 75Cr1 are finishing inlet temperature of steel 1 150 °C, deformation 0.22, strain rate 1 s⁻¹ and pass interval time 30 s.

Material Index Saw Steel 75Cr1, CSP Process, Double-Pass Compression, Static Recrystallization, Kinetic Model, Simulation Software

75Cr1 钢作为高合金工具钢, 因具有较高的强度和硬度以及超高的耐磨性而广泛应用于制造石材、建筑和工程等行业所用的锯片^[1]。目前, 75Cr1 钢的生产还主要采用传统热连轧工艺, 由于钢种自身及生产特点的原因仍存在一系列问题。与此相比, 以 CSP 为典型工艺的薄板连铸连轧技术经均热炉加热和高压水除磷后直接进入精轧机轧制, 成品的组织和性能得到了明显的改善, 同时节约了生产成本, 为此前期课题组对基于 CSP 工艺生产的 30CrMo, SKS51 和 50CrV4 等中高碳钢开展了相关组织相变、脱碳及再结晶的研究^[2-4]。本文针对武钢

CSP 工艺生产的锯片钢 75Cr1 进行静态再结晶规律研究, 结合 75Cr1 钢动态再结晶研究^[5], 利用 VB 编制模拟软件, 对不同工艺参数下 75Cr1 钢热轧过程组织演变规律进行预报, 以优化其轧制工艺。

1 实验材料与方法

本实验所选材料为武钢 CSP 厂生产的 75Cr1 钢连铸坯, 在进隧道炉前利用摆动剪剪断连铸坯, 连铸坯的断开尺寸为宽 1 200 mm, 厚 60 mm。在其厚度方向上 1/4 层处取厚度为 15 mm 的铸坯样, 机加工成 $\Phi 8$ mm \times 12 mm 的圆柱体热模拟样。其化学成

表 1 75Cr1 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel 75Cr1 / %					
C	Si	Mn	Cr	P	S
0.76	0.30	0.70	0.45	0.010	0.003

分如表 1 所示。

CSP 即紧凑式带钢生产工艺, 流程为: 150 t 转炉冶炼→LF 精炼→薄板坯连铸机→剪切机→辊底式隧道加热炉→均热炉→事故剪→高压水除磷机→7 机架精轧机→层流冷却→卷取机。

为了模拟 CSP 工艺直轧直接变形的粗大奥氏体, 需要首先获得与 CSP 工艺生产的薄板坯奥氏体晶粒尺寸相当的试样, 通过预备实验得到试样经过 1 330 °C 保温 8 min 后奥氏体尺寸 257.85 μm, 故确认此温度和时间作为研究 75Cr1 钢静态再结晶规律的奥氏体化温度和时间; 然后在富士电波 Thermecmator-Z 热模拟机上进行双道次压缩实验, 实验变形条件如图 1 所示, 首先以 20 °C/s 的速度将试样从室温加热至 1 330 °C, 保温 8 min, 再以 15 °C/s 的速度冷至不同的变形温度, 保温 10 s 使试样温度均匀, 然后进行第 1 次压缩, 间隔一定时间后进行第 2 次压缩, 第 2 次压缩的变形条件与第 1 次相同。记录实验的载荷行程数据, 计算得到各种变形条件下的真应力-应变曲线, 采用 2% 的应力补偿法计算静态软化率。双道次压缩实验分别考虑到变形温度、变形量、应变速率和保温时间的影响, 具体为:

(1) 变形温度

双道次压缩的应变速率均为 1 s⁻¹, 变形温度分别为 1 000 ~ 1 150 °C, 变形量均为 0.18, 道次间隔时间分别为 1、5、15、30、80 s。

(2) 变形量

各道次压缩的变形温度均为 1 000 °C, 应变速率均为 1 s⁻¹, 各道次的变形量分别为 0.1、0.14 和

0.22, 道次间隔时间分别为 1、5、15、30、80 s。

(3) 应变速率

各道次压缩的变形温度均为 1 000 °C, 变形量均为 0.18, 各道次的应变速率分别为 0.1、1、10 s⁻¹, 道次间隔时间分别为 1、5、15、30、80 s。

2 实验结果与分析

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]。本文采用数据误差相对偏小的 2% 应力补偿法^[11]来处理数据, 2% 应力补偿法计算软化率的公式^[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 75Cr1 钢静态再结晶的影响

静态再结晶是指金属在热变形后靠金属余温发生的再结晶, 由于不发生在热变形过程中, 故称为静态再结晶。连轧时, 在粗轧道次的间隙时间内和精轧后, 都有可能发生静态再结晶。这是一个使系统由高能状态转变为较稳定的低能状态的过程, 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。静态再结晶的速度在不同的变形温度、变形量、应变速率下也有所不同。图 2 所示的是不同工艺参数对 75Cr1 钢的静态再结晶百分数的影响。

如图 2(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 1 150、1 100、1 050、1 000 °C 下发生 50% 静态再结晶的时间分别为 1.12、1.88、3.19、6.27 s。这是由于温度越高, 原子的活性越大, 金属的原子震动越剧烈, 原子内部的变形储存能越高, 而变形储存能又是再结晶的驱动力, 所以静态再结晶百分数随着温度升高而增大。

从图 2(b) 可以看出, 在变形温度和应变速率一定时, 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 °C, 应变速率为 1 s⁻¹, 间隔时间都为 80 s 时, 变形量为 0.22 的静态再结晶的百分数达到了 95.62%, 而变形量为 0.1 的只有 69.74%。这是由于变形量越大, 金属内部的位错密

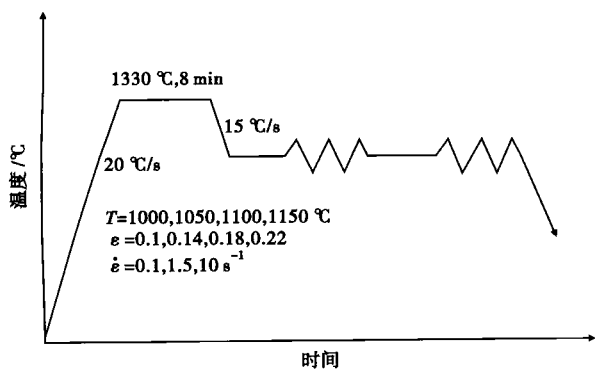


图 1 75Cr1 钢铸坯双道次压缩实验方案

Fig. 1 Scheme of double-pass compressed test of steel 75Cr1 casting slab

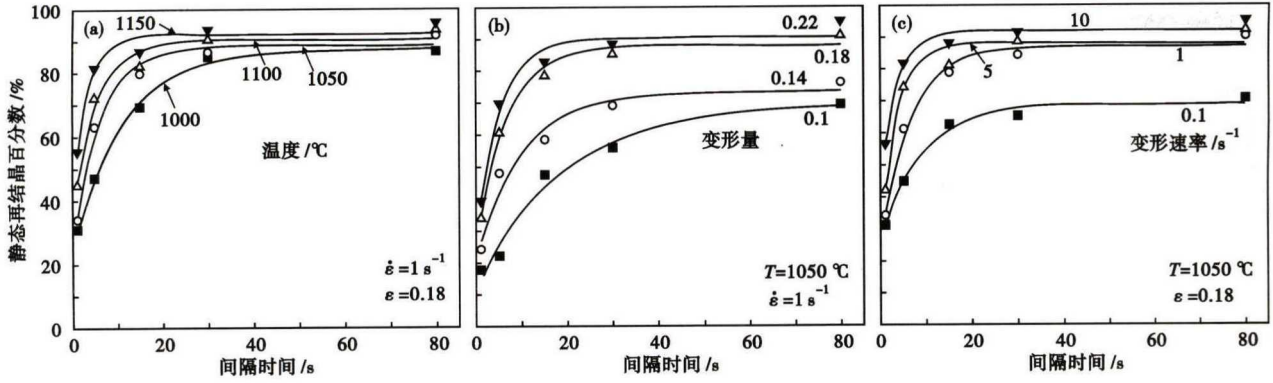


图2 (a)变形温度;(b)变形量;(c)应变速率对 75Cr1 钢静态再结晶百分数的影响

Fig.2 Effect of deformation temperature (a), deformation (b) and strain rate (c) on percentage of static recrystallization of steel 75Cr1

度也迅速增大,变形储存能增大,增大了再结晶的驱动力,再结晶形核率增加,促进了静态再结晶的发生。

由图2(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1050 °C,变形量为0.18,间隔时间均为30 s时,应变速率为0.1 s⁻¹的静态再结晶百分数为65.19%,而应变速率为10 s⁻¹的则达到了90.68%。

这是由于应变速率增大时,位错增殖速度加快;同时动态回复程度发生的程度低,故其位错消失速度减慢,为静态再结晶储备了较大的能量,促进了静态再结晶的发生。

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]:

$$X_s = 1 - \exp \left[-0.693 \times \left(\frac{t}{t_{0.5}} \right)^k \right] \quad (2)$$

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、应变速率、变形量和初始晶粒尺寸以及金属本身性质的影响,Sellars和Jonas^[15]等人给出了 $t_{0.5}$ 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。

但由于本文实验中试样制备时设定的加热温度和保温时间相同,晶粒尺寸相同,故忽略热变形时初始晶粒尺寸的影响^[16],所以 $t_{0.5}$ 计算公式可表示为:

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

2.3.1 系数k的确定

对公式(1)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 对某一具体的材料和变形参数是定值,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 $\ln [-\ln(1 - X_s)]$ 与 $\ln(t/t_{0.5})$ 关系,拟合得到 k 的值为0.52(图3)。

2.3.2 $t_{0.5}$ 公式中各系数的确定

对公式(3)两边求自然对数,可得:

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

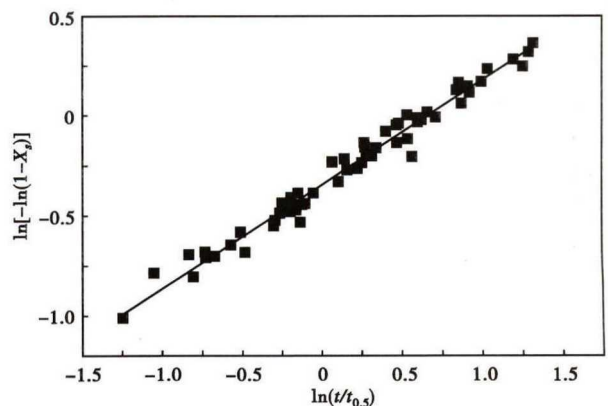


图3 $\ln [-\ln(1 - X_s)]$ 与 $\ln(t/t_{0.5})$ 的关系

Fig.3 Relation between $\ln [-\ln(1 - X_s)]$ and $\ln(t/t_{0.5})$

根据实验数据对各个系数进行线性回归,得到 $Q_{rec} = 171.828 \text{ kJ/mol}$, $a = -2.99$, $b = -0.403$, $A = 3.103 \times 10^{-9}$ 。

2.4 模型验证

由以上计算可得出 75Cr1 钢静态再结晶动力学方程为:

$$\begin{cases} X_t = 1 - \exp\left[-0.693 \times \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{0.52}\right] \\ t_{0.5} = 3.103 \times 10^{-9} \varepsilon^{-2.998} \dot{\varepsilon}^{-0.403} \times \exp\left(\frac{171.828}{8.314 T}\right) \end{cases} \quad (7)$$

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 4 所示的是静态再结晶体积分数预测值与实测值的整体比较,图中

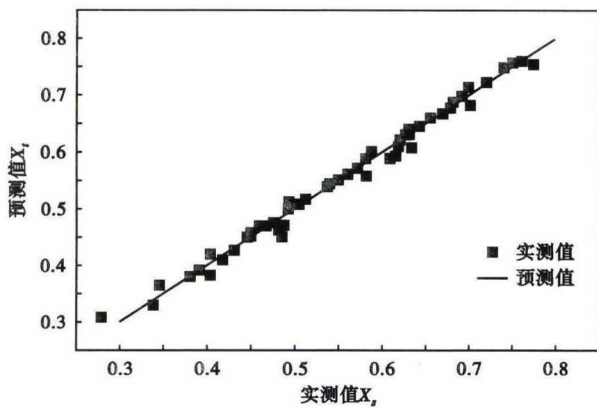


图 4 75Cr1 钢静态再结晶体积分数的实测值(点)与预测值(线)的比较

Fig. 4 Comparison between experimental data (dots) and predicted data (line) of static recrystallization volume fraction of steel 75Cr1

两者相关系数 $R = 0.9267$ 。显然,预测结果与实验结果较吻合。

2.5 75Cr1 钢热轧过程组织预报

根据上述实验中建立的 75Cr1 钢静态再结晶动力学模型,结合前期课题组对基于 CSP 工艺 75Cr1 钢动态再结晶的研究,利用 VB 编制模拟软件,预报不同工艺参数下 75Cr1 钢热轧过程组织演变规律。该软件主要包括两方面的内容:

(1) 实验中建立的动态、静态再结晶动力学模型以及未再结晶和残余应变模型;

(2) 对热连轧过程中的各种参数进行计算,主要是压下制度、温度变化制度、轧制速度制度以及道次间隙时间的计算。

以成品厚度不同时组织预报为例,图 5 中(a, b)所示的是精轧入口温度为 $1038 \text{ }^\circ\text{C}$,铸坯晶粒尺寸为 $1000 \text{ }\mu\text{m}$,F1 和 F2 机架压下率均为 50%,且成品宽度为 1250 mm ,卷重为 4.8 t 时,不同成品厚度(6 mm 和 2 mm)75Cr1 钢热轧过程组织预报结果。

从图 5 中可以看出,成品厚度减小,第 7 道次动态再结晶百分数越大。由于 CSP 生产线上 F1、F2 和 F3 机架温度较高,且机架之间道次间隔时间较长,静态再结晶可以充分进行,机架间没有发生未再结晶的现象,第 3 和第 4 机架之后,道次压下量较小,温度较低,且道次间隔时间较短,动态再结晶百分数明显降低,而静态再结晶也没有足够的时间充分进行,导致出现部分未再结晶现象。但两种不同厚度 75Cr1 钢成品组织预报的区别主要在第 7 道次上,因为前 6 个道次压下量相同,成品厚度越小,第 7 道次需要的压下量就越大,变形量增大促进了动

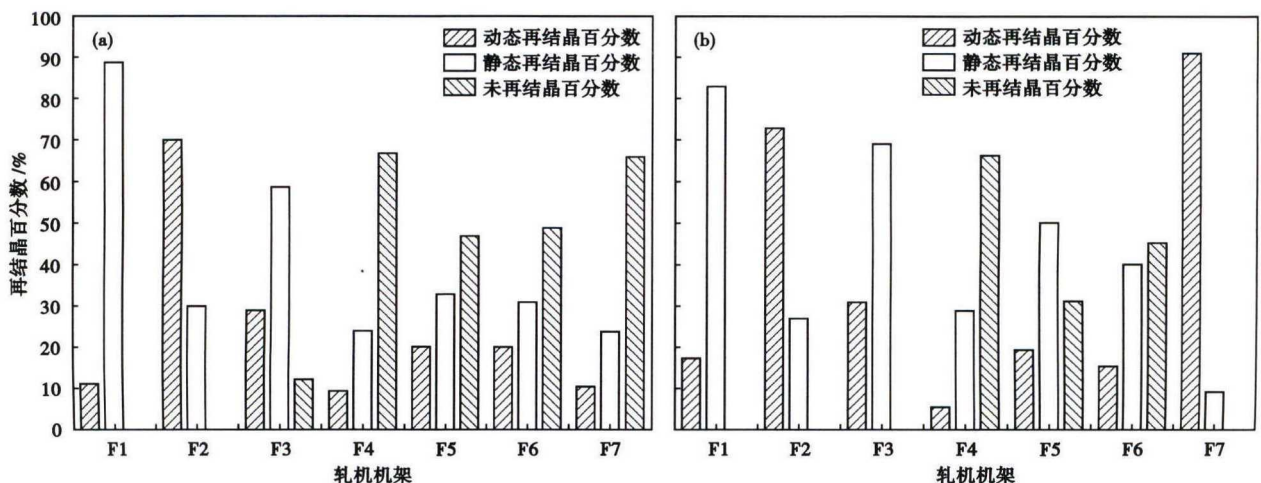


图 5 75Cr1 钢 6 mm(a)和 2 mm(b)热轧板再结晶百分数的预报结果

Fig. 5 Forecast results of recrystallization fraction of 6mm (a) and 2 mm (b) hot-rolled plate of steel 75Cr1

态再结晶的发生。

通过对 75Cr1 钢进行单、双道次热模拟压缩实验,分析其不同工艺参数下再结晶规律,利用模拟软件预报相应条件下组织演变规律,并结合对生产设备及其他实际生产情况的考虑,得出 75Cr1 钢最佳精轧工艺参数:精轧入口温度 1 150 ℃、变形量 0.22、应变速率 1 s⁻¹、道次间隔时间 30 s。

3 结论

(1)随着变形温度、变形量、应变速率和保温时间的增加,锯片钢 75Cr1 静态再结晶体积分数逐渐增加。

(2)通过对实验数据的分析,计算出 Avrami 指数 k 平均值为 0.52,静态再结晶激活能 171.828 kJ/mol,建立了 75Cr1 钢的静态再结晶动力学方程,且动力学方程的计算结果和实验结果吻合度高。

(3)通过 VB 模拟软件对基于 CSP 工艺 75Cr1 钢不同厚度成品的热轧组织演变规律进行预报,得出最佳精轧工艺参数为精轧入口温度 1 150 ℃、变形量 0.22、应变速率 1 s⁻¹、道次间隔时间 30 s。

湖北省自然科学基金项目(2014CFB819)和武汉市科学技术计划项目(2015010303010150)资助

参考文献

[1] 徐立山,林大帅.锯片用钢 75Cr1 的开发[J].河北冶金,2015(1):4-6.

[2] 郭金星,鲍思前,彭联,等.30CrMo 钢 60mm 连铸板坯双道次压缩的奥氏体静态再结晶[J].特殊钢,2016,37(2):54-57.

[3] 张亚琦,赵刚,鲍思前,等. SKS51 脱碳分析及其对淬硬性的影响[J].热加工工艺,2012,41(8):189-191.

[4] 吴浩,鲍思前,赵刚,等.双道次热压缩 50CrV4 弹簧钢奥氏体的静态再结晶[J].特殊钢,2014,35(6):51-53.

[5] 郭金星.基于 CSP 工艺合金工具钢 75Cr1 再结晶研究及组织预报[D].武汉:武汉科技大学,2016.

[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):235-239.

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

[8] 蔺永诚,陈明松,钟 撼.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].钢铁钒钛,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 after Hot 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.

宋娜娜(1993-),女,硕士研究生,2014 年北华航天工业学院(本科)毕业,中高碳钢组织和性能控制。
E-mail:597205041@qq.com

收稿日期:2017-04-18

欢迎订阅 2018 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010