

冷镦钢 SWRCH22A 的静态再结晶行为

丁 贝

(江苏大学京江学院, 镇江 212013)

摘 要 $\Phi 30$ mm 试验冷镦钢 SWRCH22A (/% : 0.18C, 0.04Si, 0.87Mn, 0.013P, 0.010S, 0.039Al) 的生产工艺为 100 t BOF-LF-150 mm \times 150 mm 坯连铸-轧制。用 Gleeble-3500 热模拟试验机, 在 900 $^{\circ}\text{C}$ 和 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 对 SWRCH22A 钢以变形速率 1 s^{-1} 、变形量 0.25, 时间间隔 0.5 ~ 15 s 进行双道次压缩变形试验, 得出应力-应变曲线。分析了变形温度和间隔时间对冷镦钢 SWRCH22A 静态再结晶行为的影响, 采用应力补偿法计算了不同变形条件下的静态再结晶百分数。根据试验数据, 计算出 SWRCH22A 钢的静态再结晶激活能为 $Q_{\text{rec}} = 249\,287 \text{ J/mol}$ 。参考半经验公式, 得到了静态再结晶动力学模型。模型计算与试验结果吻合。

关键词 冷镦钢 SWRCH22A 双道次压缩 静态再结晶 动力学模型

Static Recrystallization Behavior of Cold-Heading Steel SWRCH22A

Ding Bei

(Jingjiang College, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract The production process of $\Phi 30$ mm tested cold-heading steel SWRCH22A (/% : 0.18C, 0.04Si, 0.87Mn, 0.013P, 0.010S, 0.039Al) is 100 t BOF-LF-150 mm \times 150 mm billet casting-rolling. The test of double passes reduction of steel SWRCH22A with strain rate 1 s^{-1} , deformation 0.25 and time interval 0.5 ~ 15 s at 900 $^{\circ}\text{C}$ and 1 000 $^{\circ}\text{C}$ has been carried out by using Gleeble-3500 thermal simulator to get stress-strain curves of steel. The effect of deformation temperature and time interval on static recrystallization behavior of cold-heading steel SWRCH22A is analyzed and the static recrystallization percentage in steel with different deformation conditions is calculated by using stress compensation method. According to the experimental data, the calculated static recrystallization activation energy Q_{rec} of steel SWRCH22A is 249 287 J/mol. And the static recrystallization kinetic model is obtained by reference of semi-empirical formulas. The model calculated values are in agreement with the test results.

Material Index Cold-Heading Steel SWRCH22A, Double Passes Reduction, Static Recrystallization, Kinetic Model

冷镦钢广泛用于生产螺钉、销钉、螺柱和螺母等标准件。冷镦工艺变形速度快、变形量大且不均匀, 对冷镦用钢的塑性、尺寸精度和内在品质提出了很高的要求^[1]。普通标准件用钢的冷顶锻性能差, 普遍存在中废率高的缺点, 难以取得良好的经济效益。SWRCH22A 钢是一种优质标准件用钢, 塑性好, 冷成型性优良, 在各大钢厂均有研发试制。对钢材轧制工艺进行合理的控制, 可确保生产出品质稳定的冷镦钢盘条。

钢材在进入精轧道次时, 由于变形量小, 变形速度快, 变形温度较低, 一般只发生动态回复而难以启动动态再结晶。这种情况下, 静态组织变化就成了主要的软化机制, 它影响着下一道次及其随后道次的变形和组织变化^[2]。因此研究 SWRCH22A 钢的静态再结晶行为是获得良好的组织和性能的基础。

本文以 SWRCH22A 钢为研究对象, 在热模拟试验的基础上, 对该钢种热轧过程的静态再结晶行为进行分析研究, 建立其静态再结晶动力学模型, 为制定变形工艺和工艺优化提供依据。

1 试验材料和方案

试验用原料为钢厂生产的 SWRCH22A 钢中间坯(断面尺寸 $\Phi 30$ mm), 生产工艺流程: 100 t 转炉冶炼(双渣去磷、挡渣出钢) \rightarrow LF 精炼(造白渣脱硫、脱氧、去除夹杂、均匀温度和成分、钙处理) \rightarrow 连铸(150 mm \times 150 mm \times 12 000 mm 方坯、全保护浇注、电磁搅拌、塞棒控流) \rightarrow 高线轧制。其目标成分及试验钢的实际成分如表 1 所示。

试验所用的设备为 Gleeble-3500 热模拟试验机, 主要由加力系统、加热系统和计算机控制系统等模块组成, 通常用于热轧、对焊、锻造、连铸、热处理工艺等过程的模拟。将钢材经机械加工成 $\Phi 10$ mm \times 15 mm 的圆柱试样, 以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度加热到 1 150 $^{\circ}\text{C}$, 保温 300 s 使其均匀化后, 以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的速度分别冷却到 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 和 900 $^{\circ}\text{C}$ 。再保温 20 s, 以 1 s^{-1} 的速率进行第 1 道次压缩变形, 变形量为 0.25; 卸载停留一段时间(0.5、1、4、8、15 s)后再以 1 s^{-1} 的速率进行第 2 阶段压缩变形, 变形量仍为真应变

表 1 试验用冷镢钢 SWRCH22A 的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested cold-heading steel SWRCH22A /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Al
标准	0.18~0.22	≤0.05	0.80~0.86	≤0.020	≤0.015	≥0.025
分析	0.18	0.04	0.87	0.013	0.010	0.039

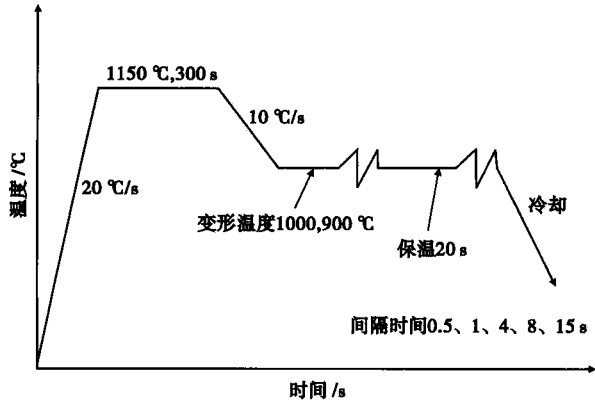


图 1 试验用冷镢钢 SWRCH22A 双道次压缩实验工艺图
Fig.1 Schematics of double-passes reduction test for tested cold-heading steel SWRCH22A

0.25。记录两次变形过程中试样的应力 - 应变数据。工艺流程如图 1 所示。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变曲线

图 2 所示为 SWRCH22A 钢双道次压缩变形的应力-应变曲线。从图 2 中可以看出,当变形程度、变形速率和变形温度的条件都相同时,间隔时间越长静态再结晶进行的就越充分,静态再结晶软化率也就越大^[3]。

图 3(a,b)所示为间隔时间分别为 4 s 和 8 s 时,不同变形温度下 SWRCH22A 钢的应力-应变曲线。从图 3 中可以看出,在相同间隔时间下,随着变形温度的升高,变形抗力显著下降,静态再结晶的软化率也相应增大。

2.2 静态再结晶软化率

根据图 2 所示的双道次压缩试验的应力-应变曲线可以计算静态再结晶软化率。目前常用的计算

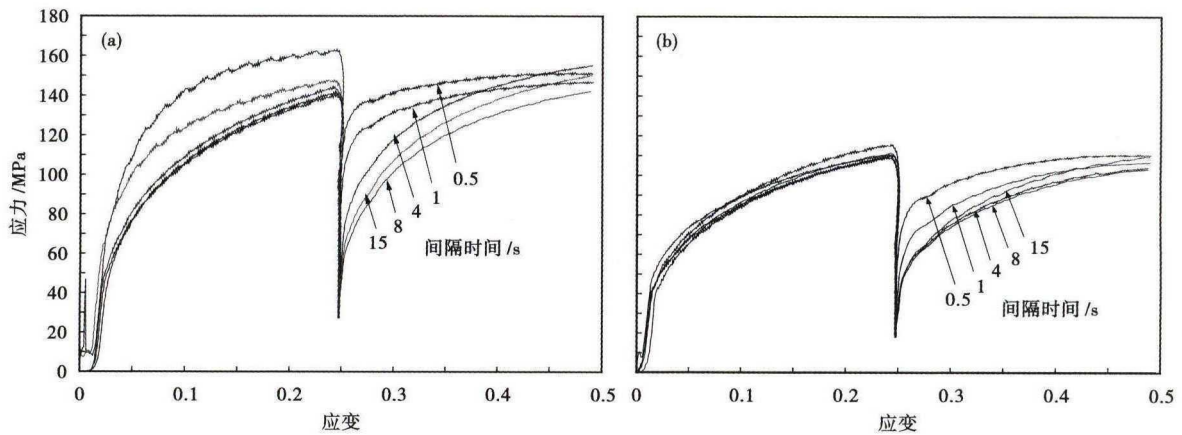


图 2 冷镢钢 SWRCH22A 不同间隔时间的应力-应变曲线:(a)1 000 °C;(b)900 °C
Fig.2 Stress-strain curves of cold-heading steel SWRCH22A with different time interval:(a) 1 000 °C and (b) 900 °C

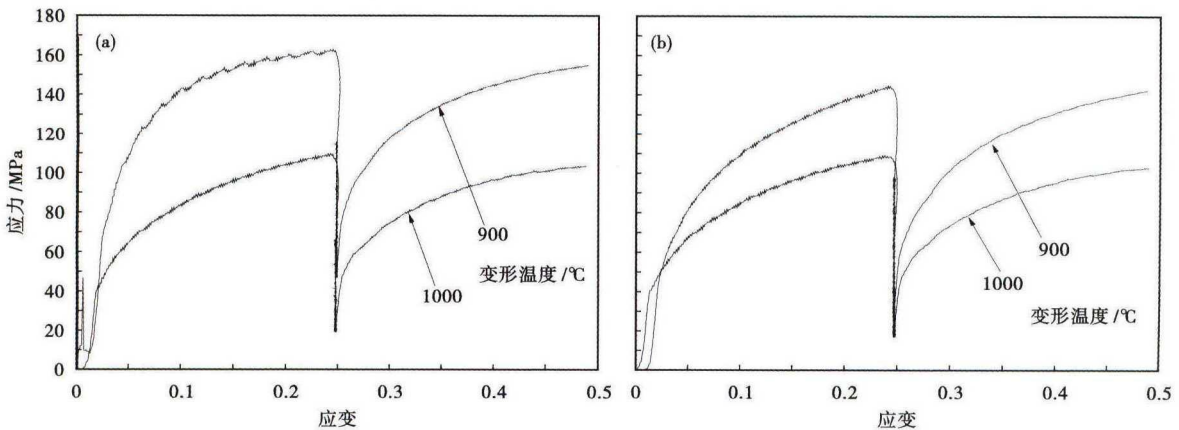


图 3 冷镢钢 SWRCH22A 900 °C 和 1 000 °C 应力-应变曲线:间隔时间-(a)4 s;(b)8 s
Fig.3 Stress-strain curves of cold-heading steel SWRCH22A at 900 °C and 1 000 °C with time interval 4 s (a) and 8 s (b)

方法有应力补偿法和平均应力法等^[4]。本文采取应力补偿法来确定试验钢种的静态再结晶软化率,采用2%应力补偿法来进行计算,如图4所示。

采用应力补偿法计算静态再结晶软化率 X_s 定义为:

$$X_s = (\sigma_{1max} - \sigma_{2s}) / (\sigma_{1max} - \sigma_{1s}) \quad (1)$$

式中: σ_{1max} - 第1次加载结束的应力/MPa; σ_{1s} - 第1次加载时的屈服应力/MPa; σ_{2s} - 第2次加载时的屈服应力/MPa。

不同变形温度和间隔时间对 SWRCH22A 钢静态再结晶软化率的影响如图5所示。从图5中可以看出,当其他变形条件不变时,静态再结晶软化率随变形温度的升高和间隔时间的增长而增大。因为变形温度的升高会提高原子的活动能力,促进形变金属储存能的释放,从而加快静态再结晶发生的速度;同时随着间隔时间的延长,变形金属会经过回复阶

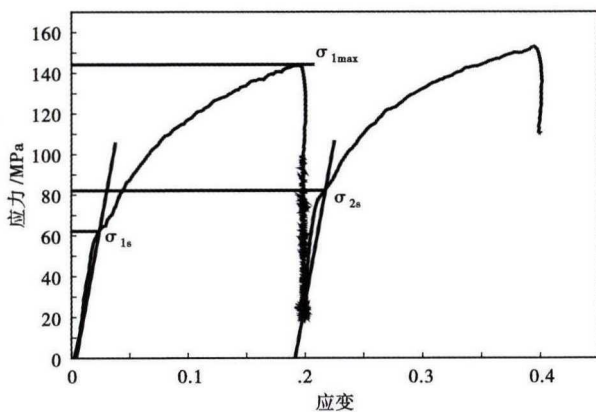


图4 应力补偿法测定静态再结晶率示意图

Fig.4 Schematics of illustration to determine static recrystallization fraction by stress off-set method

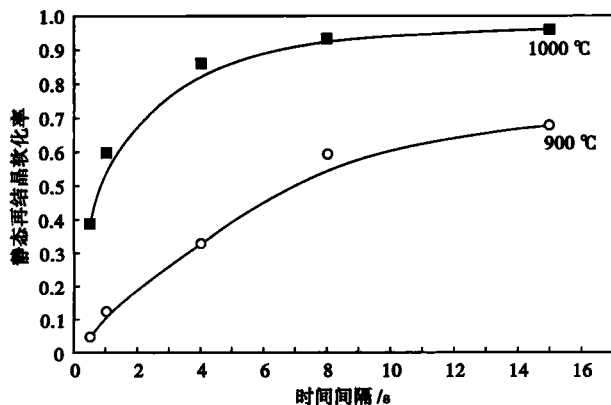


图5 温度和间隔时间对冷镢钢 SWRCH22A 静态再结晶软化率的影响

Fig.5 Effect of temperature and time interval on softening rate of static recrystallization of cold-heading steel SWRCH22A

段到达再结晶阶段,软化程度就会相应增加^[5,6]。

2.3 静态再结晶激活能

研究表明,钢的静态再结晶激活能 Q_{rex} 与变形温度、变形速率和应变等无关,主要由材料化学成分决定。可以根据静态再结晶软化率曲线中静态再结晶完成50%所对应的时间来确定静态再结晶激活能。静态再结晶达到50%对应的时间 $t_{0.5}$ 与静态再结晶激活能之间的关系可以表示为^[7]:

$$t_{0.5} = A \epsilon^a \dot{\epsilon}^b D_0^c \exp(Q_{rex}/RT) \quad (2)$$

式中: $t_{0.5}$ - 发生静态再结晶对应的时间/s; Q_{rex} - 静态再结晶激活能/(kJ · mol⁻¹); R - 气体常数,取8.314 J/(mol · K); T - 绝对变形温度/K; D_0 - 原始奥氏体晶粒尺寸; ϵ - 应变; $\dot{\epsilon}$ - 应变速率; A, a, b, c - 材料常数。

将公式(2)两边取对数,可得:

$$\ln t_{0.5} = \ln A + a \ln \epsilon + b \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q_{rex}}{RT} \quad (3)$$

对一特定钢种,其化学成分一定, $\ln t_{0.5}$ 与 $1/T$ 之间呈线性关系,直线的斜率即为 Q_{rex}/R 。根据试验数据,测出不同温度下的 $t_{0.5}$ 数值,可得 $\ln t_{0.5}$ 与 $1/T$ 之间的关系曲线(直线),此直线的斜率即为试验钢种的 Q_{rex}/R ,由此可以求出静态再结晶激活能^[8-9]。

根据试验结果所得到的有关数据见表2。根据表2数据可以整理出 $\ln t_{0.5}$ 与 $1/T$ 关系曲线图。

由表2可作出 $\ln t_{0.5}$ 和 $1/T$ 的关系曲线,如图6所示。

表2 冷镢钢 SWRCH22A 静态再结晶激活能的有关数据
Table 2 Related data for calculation of static recrystallization activation energy of cold-heading steel SWRCH22A

$t_{0.5}$	$\ln t_{0.5}$	T	$1/T$	$(1/T) \times 1000$
3.2	1.163 151	1 173	0.000 853	0.852 515
0.9	-0.105 36	1 273	0.000 786	0.785 546

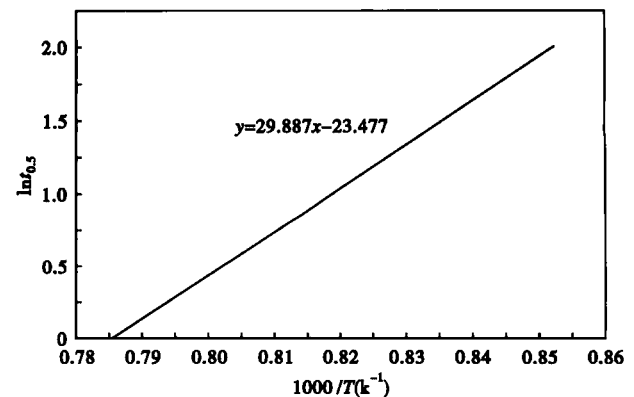


图6 冷镢钢 SWRCH22A $\ln t_{0.5}$ 与 $1/T$ 关系曲线

Fig.6 Relation curves between $\ln t_{0.5}$ and $1/T$ of cold-heading steel SWRCH22A

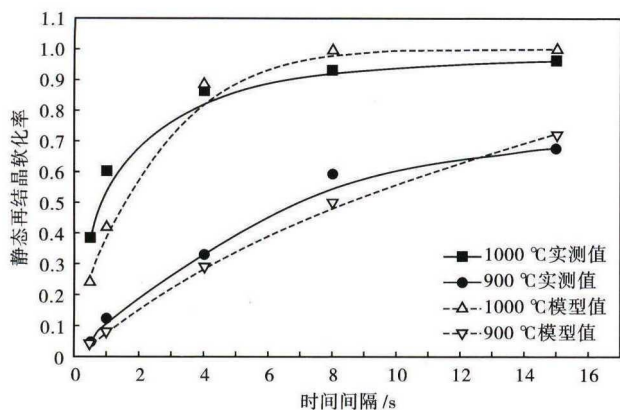


图 7 冷镦钢 SWRCH22A 静态再结晶分数实测值和模型值比较

Fig. 7 Comparison between measured values and mold calculated values of static recrystallization fraction of cold-heading steel SWRCH22A

根据图 6 可知,乘以气体常数 R ,得到的静态再结晶激活能 $Q_{\text{rex}} = 249\ 287\ \text{J/mol}$ 。

2.4 静态再结晶动力学方程

大量试验研究表明,钢的静态再结晶动力学一般遵循 Avrami 方程:

$$X_s = 1 - \exp[-0.693(t/t_{0.5})^n] \quad (4)$$

式中: X_s - 静态再结晶体积分; $t_{0.5}$ - 静态再结晶完成 50% 时所需要的时间; t - 静态再结晶发生所用的时间; n - 常数。

参考文献

- [1] 唐修昌,游光明,阮细保,等. SWRCH22A 冷镦钢的开发与生产[J]. 江西冶金,2009,29(1):1-4.
- [2] 窦晓峰,鹿守理,赵辉. Q235 低碳钢静态再结晶模型的建立[J]. 北京科技大学学报,1999,21(1):1-7.
- [3] 丁 贝. SWRCH22A 冷镦钢再结晶行为及组织的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2013.
- [4] 陈庆军,康永林,孙 浩,等. X70 管线钢热变形奥氏体的静态再结晶行为[J]. 北京科技大学学报,2007,29(12):1212-1215.
- [5] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007:194-201.
- [6] 张丽兰,吴耀栋. 热变形处理对建筑用 HRB400 钢筋微观组织与性能的影响[J]. 铸造技术,2015,36(9):2237-2239.
- [7] 赵 阳. 微合金非调质钢热变形行为与组织性能研究[D]. 沈阳:东北大学博士学位论文,2011.
- [8] 徐 光,张丕军. 金属低温变形理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2007:96-126.
- [9] 刘英义. 热变形奥氏体静态再结晶行为的研究[J]. 鞍山科技大学学报,2004,27(6):414-416.
- [10] Kazeminezhad M. On the Modeling of the Static Recrystallization Considering the Initial Grain Size Effects[J]. Mater Science and Engineering A,2008,486(1/2):202-207.
- [11] Medina S F, Mancilla J E. Static Recrystallization Modelling of Hot Deformed Steels Containing Several Alloying Elements. ISIJ International,1996,36(8):1070-1076.

静态再结晶完成 50% 所用的时间 $t_{0.5}$ 可用公式 (2) 进行计算。根据试验数据,同时参考半经验公式,回归可得 SWRCH22A 钢的静态再结晶动力学模型。如公式 (5) 和公式 (6) 所示:

$$X_s = 1 - \exp(-0.693 t/t_{0.5}) \quad (5)$$

$$t_{0.5} = 8 \times 10^{-17} D_0^2 \varepsilon^{-4} \exp(249\ 287/RT) \quad (6)$$

采用此模型计算所得的静态再结晶软化率与试验所得的数值比较图如图 7 所示,从图 7 中可以看出模型计算值与试验实测值相近,都反映了变形温度越高、间隔时间越长静态再结晶进行得越充分,表现在数值上就是静态再结晶软化率越大^[10-11]。

3 结论

(1) 冷镦钢 SWRCHA 进行双道次压缩热模拟试验,其静态再结晶软化率随温度的升高和间隔时间的增加而增加。

(2) 根据试验结果,参考半经验模型,得到了 SWRCH22A 钢静态再结晶的动力学方程:

$$t_{0.5} = 8 \times 10^{-17} D_0^2 \varepsilon^{-4} \exp(249\ 287/RT)$$

$$X_s = 1 - \exp(-0.693 t/t_{0.5})$$

(3) 由试生产工艺参数可知,精轧机组各道次的轧制时间极短。若要获得较好的静态再结晶软化程度,精轧温度一般取 900 °C 左右。

丁 贝(1989-),女,硕士(武汉科技大学),讲师,2010 年武汉科技大学(本科)毕业,钢的组织性能的控制与研究。
E-mail:105024410@qq.com

收稿日期:2017-04-06