

SWRCH22A冷镦钢的热变形行为和动态再结晶

丁 贝¹ 赵 刚¹ 叶传龙¹ 程 剑¹ 杨 林¹ 李正嵩² 魏福龙²

(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 首钢水城钢铁(集团)有限责任公司技术中心, 六盘水 553028)

摘 要 采用 Gleeble-1500D 热模拟试验机, 对 $\Phi 30$ mm SWRCH22A 冷镦钢中间坯 ($\% : 0.18 \sim 0.20\text{C}, \leq 0.05\text{Si}, 0.80 \sim 0.88\text{Mn}, \leq 0.020\text{P}, \leq 0.015\text{S}, \geq 0.025\text{Al}$) 进行 $850 \sim 1\,000$ °C、变形速度 $0.1 \sim 20 \text{ s}^{-1}$ 、真应变 ≤ 1.0 的单道次压缩变形试验, 得出该钢在不同变形条件下的真应力应变曲线。试验结果表明, 随着温度的升高及应变速率的降低, 钢的流动应力降低, 且动态再结晶在高变形温度和低变形速率下更容易发生。SWRCH22A 钢的动态再结晶变形能 $Q_{\text{def}} = 328\,264 \text{ J/mol}$ 。通过回归分析得到了 SWRCH22A 冷镦钢的流动应力模型和动态再结晶动力学方程, 模型计算与试验结果吻合。

关键词 SWRCH22A 冷镦钢 单道次热压缩 模拟试验 流动应力 动态再结晶

Hot Deformation Behavior and Dynamic Recrystallization of Cold Heading Steel SWRCH22A

Ding Bei¹, Zhao Gang¹, Ye Chuanlong¹, Cheng Jian¹, Yang Lin¹, Li Zhengsong² and Wei Fulong²

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Technological Center, Shougang Shuicheng Iron and Steel (Group) Co Ltd, Liupanshui 553028)

Abstract The single pass compression test of $\Phi 30$ mm intermediate billet of cold heading steel SWRCH22A ($\% : 0.18 \sim 0.20\text{C}, \leq 0.05\text{Si}, 0.80 \sim 0.88\text{Mn}, \leq 0.020\text{P}, \leq 0.015\text{S}, \geq 0.025\text{Al}$) with strain rate $0.1 \sim 20 \text{ s}^{-1}$, real strain ≤ 1.0 at $850 \sim 1\,000$ °C has been carried out by using Gleeble-1500D thermal simulator to get true stress-strain curves of the steel with different deformation parameters. Test results show that with increasing temperature and decreasing strain rate, the flow stress of steel decreases, and its dynamic crystallization occurs easily with low strain rate at higher temperature. The dynamic recrystallization deforming energy of steel SWRCH22A $Q_{\text{def}} = 328\,264 \text{ J/mol}$. The flow stress model and dynamic crystallization equation of cold heading steel SWRCH22A are obtained by regression analysis. The model calculation value nicely coincides with the test measured value.

Material Index Cold Heading Steel SWRCH22A, Single Pass Compression, Simulated Test, Flow Stress, Dynamic Recrystallization

冷镦钢作为金属制品行业的原料, 因其冷成型性能良好, 被广泛用于生产螺钉、销钉和螺母等标准件。采用冷镦工艺生产标准件时变形速度快、变形量大、变形很不均匀, 对冷镦用钢的质量要求很高^[1], 因此提高冷镦用原材料的生产水平是冷镦钢发展的重点。本试验对 SWRCH22A 钢热压缩过程中的流变行为和热变形过程中的动态再结晶行为进行了研究, 为指导其热变形工艺的制定和组织性能的控制提供依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

所用试验材料取自钢厂高速线材分厂生产的

表 1 试验用 SWRCH22A 冷镦钢的内控化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of test cold heading steel SWRCH22A / %

C	Si	Mn	P	S	Al
0.18 ~ 0.20	≤ 0.05	0.80 ~ 0.88	≤ 0.020	≤ 0.015	≥ 0.025

SWRCH22A 冷镦钢中间坯, 断面尺寸为 $\Phi 30$ mm, 其化学成分见表 1^[2]。

1.2 试验方法

将试验材料加工成 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的圆柱体试样, 在 Gleeble-1500D 热模拟机上进行单道次压缩热模拟实验, 实验变形条件如图 1 所示。将试样以 20 °C/s 的速度从室温加热至 $1\,150 \text{ °C}$ 奥氏体化, 保温 5 min 使其均匀后以 10 °C/s 的速度冷却到不同

温度(850、900、950、1 000 ℃),保温 20 s 后,以不同的变形速率(0.1、1、10、20 s⁻¹)对试样进行压缩变形。

2 试验结果与分析

2.1 流动应力曲线

SWRCH22A 冷镦钢在不同变形条件下的流动应力曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出,在低应

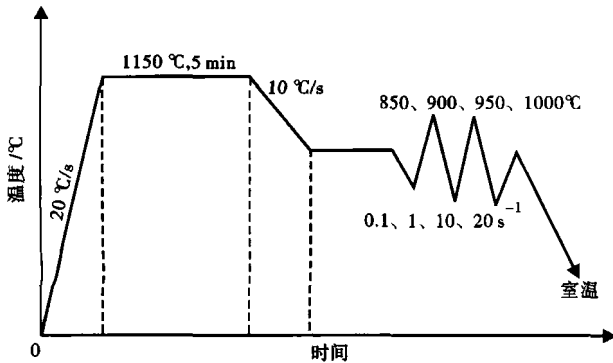


图 1 SWRCH22A 冷镦钢单道次压缩变形实验工艺示意图
Fig.1 Schematics of single pass compression test process for cold heading steel SWRCH22A

变速率下($\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ 和 1 s^{-1}),曲线出现明显的峰值,而且随着变形温度的升高,峰值应变和峰值应力相应降低;当应变速率很大时($\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ 和 20 s^{-1}),不论温度多高,试样均以动态回复为主,基本不发生动态再结晶。这表明,变形温度越高、变形速率越低,该钢种就越容易发生动态再结晶。

这是由于钢以较慢的应变速率变形(即蠕变变形)时,晶界的滑动和滑移变形均会发生,在蠕变变形中的滑移起因于伴随溶质原子拖拉的位错运动,当位错密度增加到某一定值,变形过程中会出现动态再结晶。而在高应变速率的变形过程中,即使温度很高,也难发生晶界滑移,在没有溶质拖拉的条件下,位错运动仅能发生滑移变形,因此不能达到动态再结晶^[3]。

2.2 动态再结晶型流动应力模型的回归

流动应力模型近 20 年来得到了不断地发展和完善。20 世纪七八十年代被人们广泛接受的是日

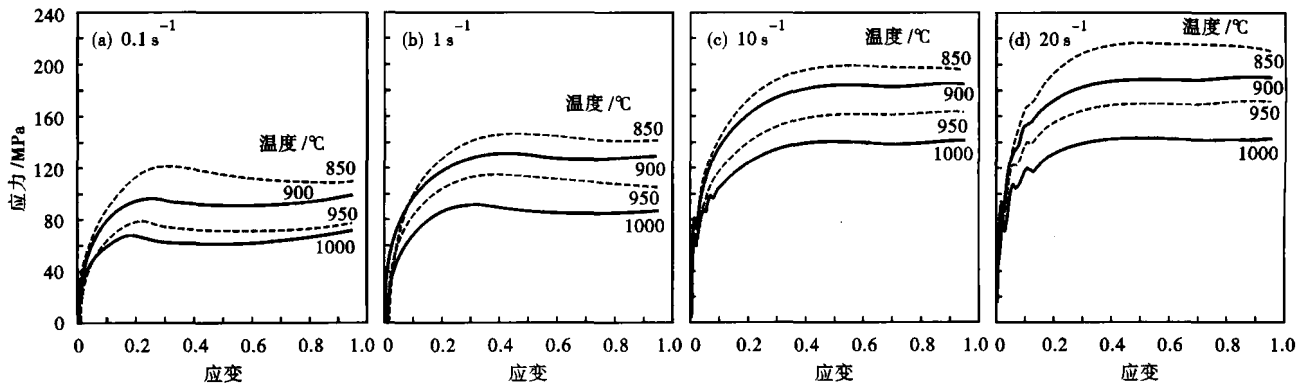


图 2 不同变形温度 SWRCH22A 冷镦钢的真应力应变曲线,变形速率/s⁻¹:(a)0.1;(b)1;(c)10;(d)20
Fig.2 True stress-strain curves of cold heading steel SWRCH22A at different deformation temperature, strain rate /s⁻¹: (a) 0.1; (b) 1; (c) 10; (d) 20

本的 Shida, Misaka 等提出的模型^[3],根据此模型所建立的拟合动态再结晶型应力-应变曲线的模型为:

$$\sigma = a\epsilon^b \dot{\epsilon}^c \exp[-(dT/1000 + e\epsilon)] \quad (1)$$

式中: ϵ - 应变; $\dot{\epsilon}$ - 应变速率/s⁻¹; T - 绝对变形温度/K; a, b, c, d, e - 待回归的参数。

这里仅对动态再结晶型曲线(即发生了动态再结晶)的流动应力模型进行回归,回归时将数据分成峰值前和峰值后两组,可以分别得到上式中各参数的值,见表 2。

用回归出的模型得到的流动应力曲线与实测的流动应力曲线基本吻合,见图 3。

2.3 动态再结晶特征应变模型

表 2 峰值前、后流动应力模型回归参数
Table 2 Regression coefficient of flow stress model before and after peak value

项目	a	b	c	d	e	相关参数 R
峰值前	5 802.46	0.527	0.074 6	2.393 1	1.269 3	0.987
峰值后	14 576.71	-0.007 8	0.129 2	4.007	0.141 4	0.984

金属的塑性变形是一个热/力激活的过程^[4],可用 Zener-Hollomon 方程表示其关系:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_{\text{def}}}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \quad (2)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ - 应变速率/s⁻¹; T - 绝对变形温度/K; R - 气体常数,取 8.314 J/(mol · K); Q_{def} - 动态再结晶激

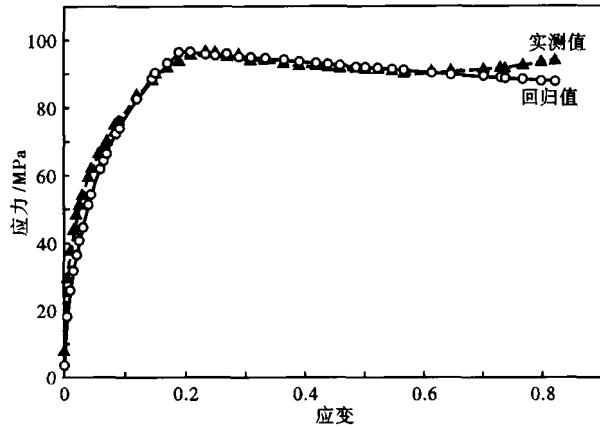


图 3 SWRCH22A 冷镦钢动态再结晶应力-应变曲线模型计算值与实测值

Fig. 3 Calculated value of dynamic recrystallization stress-strain curve model and measured value, cold heading steel SWRCH22A

活能; σ_p - 峰值应力/MPa; A, α, n - 分别是与钢种有关的材料常数, α 变化很小, 取值为 0.012。

由式(2)可以得到:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \cdot \exp\left(-\frac{Q_{\text{def}}}{RT}\right) \quad (3)$$

对上式两边取对数, 然后分别对 $1/T$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 求偏导数:

$$Q_{\text{def}} = Rn \left\{ \frac{\partial [\ln \sinh(\alpha\sigma_p)]}{\partial (1/T)} \right\}, n = \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma_p)]} \quad (4)$$

用最小二乘法线性拟合, 可得各变形温度下的 $1/T$ 与 $\ln [\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 、 $\ln [\sinh(\alpha\sigma_p)]$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 线性图 (图 4)。由拟合所得的平均斜率可求出 B 和 n 值,

$$\text{即 } B = \frac{\partial [\ln \sinh(\alpha\sigma_p)]}{\partial (1/T)} = 7.383, n = 5.5125。$$

将得到的 B, n 值代入式(4), 可得到试验钢种的变形激活能 $Q_{\text{def}} = 338264 \text{ J/mol}$ 。由此可将 Zener-Hollomon 参数方程写为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{338264}{RT}\right) \quad (5)$$

根据方程(5)可以得到不同变形温度、变形速度下的 Z 参数。而对于峰值应变 ϵ_p , 许多研究者都认为 $\epsilon_p \propto Z^{p[5]}$, 因此可建立峰值应变与温度补偿应变速率因子 Z 的关系如下 (k, p 为常数):

$$\epsilon_p = kZ^p \quad (6)$$

根据实验数据对上式(6)进行线性回归, 从而确定出系数 $k, p, k=0.00185, p=0.1516$ 。由此, 可得到 SWRCH22A 钢的峰值应变表达式为:

$$\epsilon_p = 0.00185 Z^{0.1516} \quad (7)$$

2.4 动态再结晶动力学方程

动态再结晶是一个热激活过程, 动态再结晶动力学模型一般采用 JMA 方程^[6]。

$$f_{\text{dyn}} = 1 - \exp[-b(Z)t^{n(Z)}] \quad (8)$$

式中: f_{dyn} - 动态再结晶分数/%; $b(Z), n(Z)$ - 均为 Zener-Hollomon 参数的函数。假定达到临界应变 ϵ_c 时, 再结晶分数为 0.5%, 稳态应变 ϵ_s 对应的再结晶分数为 99%, 代入上面的 JMA 方程可求出:

$$n(Z) = \frac{-6.823}{\ln \frac{t_c}{t_s}}; b(Z) = \frac{0.005}{t_c^{n(Z)}} \quad (9)$$

式中: $t_c = \frac{\epsilon_c}{\dot{\epsilon}}; t_s = \frac{\epsilon_s}{\dot{\epsilon}}$ 。根据试验结果求出 t_c 和 t_s , 即

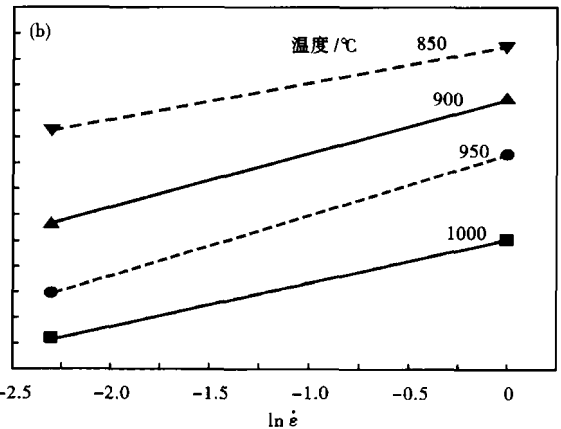
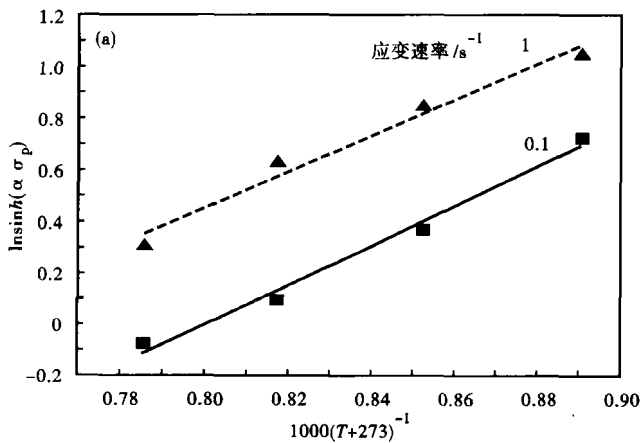


图 4 求系数 B (a) 和 n (b) 的斜率图

Fig. 4 Slope diagram for determining coefficient B (a) and n (b)

可求出不同变性条件下 JMA 方程(8)的值。

常用的动态再结晶动力学模型为 Avrami 方程的另一种形式:

$$X_{\text{dyn}} = 1 - \exp\{-\beta[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]^m\} \quad (10)$$

式中: X_{dyn} - 动态再结晶分数; ε_p 、 ε_c - 峰值应变和临界应变; β 、 m - 待回归的参数。

根据式(7)可以求出 SWRCH22A 钢的峰值应变,取临界应变 $\varepsilon_c = 0.8 \varepsilon_p$,可由峰值应变得到相应的临界应变,根据方程(8)得到的动态再结晶分数对式(10)进行非线性拟合,可得到 β 和 m 的值,得到该钢种的动态再结晶动力学模型为:

$$X_{\text{dyn}} = 1 - \exp\{-1.275[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]^{2.549}\} \quad (11)$$

图5为方程(11)所得的动态再结晶动力学曲线与实测值的对比图。

3 结论

(1)SWRCH22A 冷镦钢在不同变形条件下流动

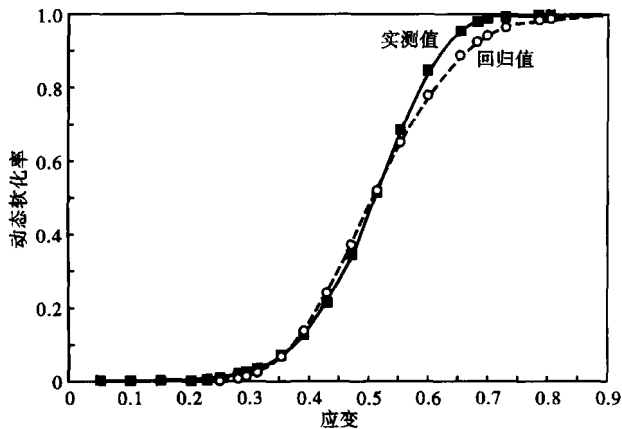


图5 SWRCH22A 冷镦钢的实测和回归的动态再结晶曲线
Fig.5 Measured and regression-analyzed dynamic recrystallization curves, cold heading steel SWRCH22A

应力的特点是:在低应变速率下($\dot{\varepsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ 和 1 s^{-1}),曲线出现明显的峰值,发生动态再结晶,当应变速率增加时,未发生动态再结晶。

(2)通过回归确定了 SWRCH22A 冷镦钢动态再结晶型流动应力曲线的模型:

$$\text{峰值前 } \sigma = 5802.46\varepsilon^{0.527} \dot{\varepsilon}^{0.0746} \exp[-(2.39317/1000 + 1.2693\varepsilon)]$$

$$\text{峰值后 } \sigma = 1457.1\varepsilon^{-0.0078} \dot{\varepsilon}^{0.1292} \exp[-(4.0077/1000 + 0.1414\varepsilon)]$$

(3)得到了 SWRCH22A 钢的动态再结晶变形激活能: $Q_{\text{def}} = 338264 \text{ J/mol}$;得出了峰值应变与 Zener-Hollomon 参数的关系式 $\varepsilon_p = 0.00185 Z^{0.1516}$,动态再结晶动力学模型为:

$$X_{\text{dyn}} = 1 - \exp\{-1.275[(\varepsilon - \varepsilon_c)/\varepsilon_p]^{2.549}\}$$

中国博士后科学基金资助项目(2012M511282)

参考文献

- [1] 先越蓉. 冷镦钢的生产与发展[J]. 特殊钢,2005,26(3):31-34.
- [2] 何 猛,赵秀芳. SWRCH22A 冷镦钢的生产实践[J]. 冶金标准化与质量,2011,49(4):41-44.
- [3] 金 蕾,徐有容. C-Mn 钢热变形行为及其流变应力模型的研究[J]. 上海大学学报,1999,5(2):124-127.
- [4] 魏 洁,唐广波,刘正东. 碳锰钢热变形行为及动态再结晶模型[J]. 钢铁研究学报,2008,20(3):31-35.
- [5] 邹菲菲. 09CuPtIRE 钢动态再结晶的有限元数值模拟[D]. 山东大学硕士学位论文,2007:23.
- [6] 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.

丁 贝(1989-),女,硕士研究生,钢的组织性能的控制研究。

收稿日期:2012-08-18

· 特钢信息 ·

2012 年特钢冶炼学术年会简讯

2012 年特钢冶炼学术年会于 2012 年 10 月 16~19 日在湖南省衡阳市隆重召开,会议由中国金属学会特殊钢分会特钢冶炼学术委员会主办,华菱衡阳钢管有限公司协办。会议主题是“十二·五”特钢发展方向论坛。有来自全国的特钢企业、科研院所及相关辅助企业共 50 余个单位的 110 余名代表参加了会议。会议邀请的专家有原科技部材料处处长黄世兴,中国金属学会特殊钢分会副理事长、北京科技大学李士琦教授,中国金属学会特殊钢分会秘书长、钢铁研究总院副院长董瀚,国家工程轧制中心主任、北京科技大学工程院院长唐荻教授等。会议收录论文 40 余篇。

黄世兴处长对“十二·五”特钢发展方向进行了解析,董瀚秘书长对高性能钢的创新与实践做了精彩报告,唐荻院长对高品质特殊钢的问题及对策进行了深入的分析。来自衡阳、宝钢、南钢、宣钢等特钢企业的领导、专家分别对电炉及转炉炼钢、特殊钢精炼和连铸、新产品研制、品种及质量控制等方面发表了各自领域的最新研究成果。会议围绕特钢企业如何适应行业当前发展趋势,促进特钢技术进步,降低消耗与成本,提高特钢产品质量等问题进行了探讨。

本次会议是特钢冶炼学术委员会承上启下的一次重要会议,酝酿了新一届特钢冶炼委员会的领导人选及会员组成名单,对特钢冶炼委员会今后的工作进行了深入讨论,对我国特钢冶炼的技术进步起到良好的引领作用。

(特钢分会特钢冶炼委员会)