

IF 钢退火过程中再结晶数学模型的探讨*

叶卫平 陈铁群

(武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

R. Le Gall G. Saindrenan

(ISITEM, Nantes University, 44306 Nantes Cedex 03, France)

摘要 采用传统 JMAK 模型和一种新的再结晶模型研究了经 70%、80% 和 90% 冷变形的 IF(无间隙原子) 钢再结晶过程。实验结果表明, 以 $\ln(-\ln(1-x_v))$ 为纵坐标和 $\ln t$ 为横坐标进行回归, JMAK 图呈直线关系, 其 JMAK 指数 n 在 1.33—2.51 之间, 低于理想的 JMAK 指数。采用一个新的再结晶模型对 IF 钢的再结晶过程进行了分析, 用非线性回归方法回归出该模型的参数。该模型可将再结晶过程与其组织参数联系起来, 具有明确的物理意义, 能较好地用于描述 IF 钢再结晶过程。

关键词 IF 钢, 再结晶过程, 数学模型

中图分类号 TB115, TG162.83

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)02-0147-04

MATHEMATICAL MODEL STUDIES OF THE RECRYSTALLIZATION OF IF STEEL IN ANNEALING PROCESS

YE Weiping, CHEN Tiequn

School of Materials Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070

R. Le Gall, G. Saindrenan

ISITEM, Nantes University, 44306 Nantes Cedex 03, France

Correspondent: YE Weiping, associate professor, Tel: (027)87858332, E-mail: ywping618@21cn.com

Manuscript received 2000-07-10, in revised form 2000-09-29

ABSTRACT Both traditional Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) model and new model are used to study the primary recrystallization process of 70%, 80% and 90% cold rolled interstitial free (IF) steel. The results show that most experimental data plotted using the JMAK model are roughly in straight lines, but the JMAK exponent n values, from 1.33 to 2.51, are lower than ideal ones. The new model connecting with three microstructure parameters has good agreement with the experimental data, and could be used to study the recrystallization process of IF steel.

KEY WORDS interstitial free steel, recrystallization process, mathematical model

IF(无间隙原子) 钢具有极优的超深冲性和非时效性等一系列优点, 几乎能满足所有汽车用超深冲板材的性能要求。因此, 近年来发展很快, 其生产和研究领域十分活跃, 成为钢铁材料研究的一个重要方向。与 IF 钢其它生产环节一样, 它的再结晶退火过程也成为研究的重点之一。大量有关 IF 钢再结晶研究资料表明, 目前对再结晶退火的研究主要集中在 IF 钢的再结晶工艺和再结晶组织^[1-3], 而对 IF 钢生产过程中再结晶模型研究甚少, 尤其是具有

明确物理意义的再结晶数学模型几乎未见报道。而采用具有明确物理意义、适合 IF 钢退火工艺的再结晶模型研究其再结晶过程是一项基础研究。它有助于进一步了解 IF 钢在生产中的再结晶过程, 实现最终在生产实际中控制 IF 钢的再结晶过程。在保证 IF 钢深冲性能的前提下, 达到节能降耗、有目的地选择退火生产线上的组件和优化生产投资的目的。

本文首先从传统 JMAK 再结晶模型着手, 研究了经 70%、80% 和 90% 不同冷变形的 IF 钢的再结晶过程。研究表明, IF 钢的再结晶过程可近似看成单相合金形核长大的再结晶过程, 基本符合 JMAK 再结晶模型, 但回归得到的 JMAK 指数偏低。为了更好地研究 IF 钢的再结晶过程, 本文采用一个新的再结晶模型对其进行了分析

* 中法科技合作资助项目 PRA MX 97-03

收到初稿日期: 2000-07-10, 收到修改稿日期: 2000-09-29

作者简介: 叶卫平, 男, 1955 年生, 副教授

研究,用非线性回归方法回归出了该模型的参数.该模型将再结晶过程与其组织参数联系起来,具有明确的物理意义,能较好地用于描述 IF 钢再结晶过程.

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验用 IF 钢由锻坯轧制而成,热轧工艺参数为:加热温度 1250 ℃,压下率 84.7%,终轧温度 950 ℃;从 700 ℃ 开始以 50 ℃/h 的冷速模拟卷曲过程;冷轧变形比分别为 70%,80% 和 90%.冷轧后钢板厚度 0.8 mm,成分(质量分数,%)为:C 0.003,S 0.0019,P 0.016,Al 0.046,N 0.015,Mn 0.208,Ti 0.091,O 0.0032,Si 0.011,Ni 0.057,Cr 0.027,Cu 0.030.

1.2 实验方法

从冷轧板上将试样切成 8 mm×10 mm 规格,其中长度方向为轧制方向.为保证试样在退火过程中不发生氧化,将试样装入石英管抽真空并用 Ar 回压 1 至 2 次,而后用火焰加热封口.将不同变形量的试样放入 590 ℃ 至 675 ℃ 炉内进行等温退火.每隔一定时间从炉内取出一个试样,用金相法测量各等温温度下已再结晶分数随时间的变化.为能够清楚显示再结晶组织边界,实验中采用了如下浸蚀剂和浸蚀参数^[4]:先用活化剂(5%HF+95%H₂O₂)进行 15—30 s 活化,而后用浸蚀剂 A(15%HF+85%H₂O₂)浸蚀 3—8 s,最后用浸蚀剂 B(20%H₃PO₄+1%HF+4%H₂O₂+75%H₂O)再浸蚀 5—10 s.浸蚀后立即用酒精清洗烘干.

浸蚀好的试样用美国 Pixera 数码专业显微摄像系统拍摄金相照片,而后用 Image Tool 2.0 图形处理软件分析并计算已再结晶分数.为了降低测量误差,每一试样采用 3—5 个视场进行分析,测量结果与其显微硬度进一步对比检验.

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

图 1 为不同变形量的 IF 钢在 610、630 和 650 ℃ 再结晶动力学曲线.与其它单相合金一样,IF 钢等温退火再结晶动力学曲线成“S”形.从图上可见,随变形量增加或等温温度的提高,再结晶形核前的孕育期以及再结晶完成时间明显缩短.例如,在 630 ℃ 等温退火,当变形量从 70% 增加到 90%,孕育期从 8 min 降至 3 min;而完全再结晶时间也从 90 min 缩短到 60 min.

2.2 JMAK 模型

如认为 IF 再结晶是均匀形核,其过程可用传统的 Johnson-Mehl-Avrami-Kolonagorov (JMAK) 模型^[5]来描述

$$X_v = 1 - \exp(-kt^n) \quad (1)$$

其中 X_v 为已再结晶分数(体积分数), t 为时间, n 为

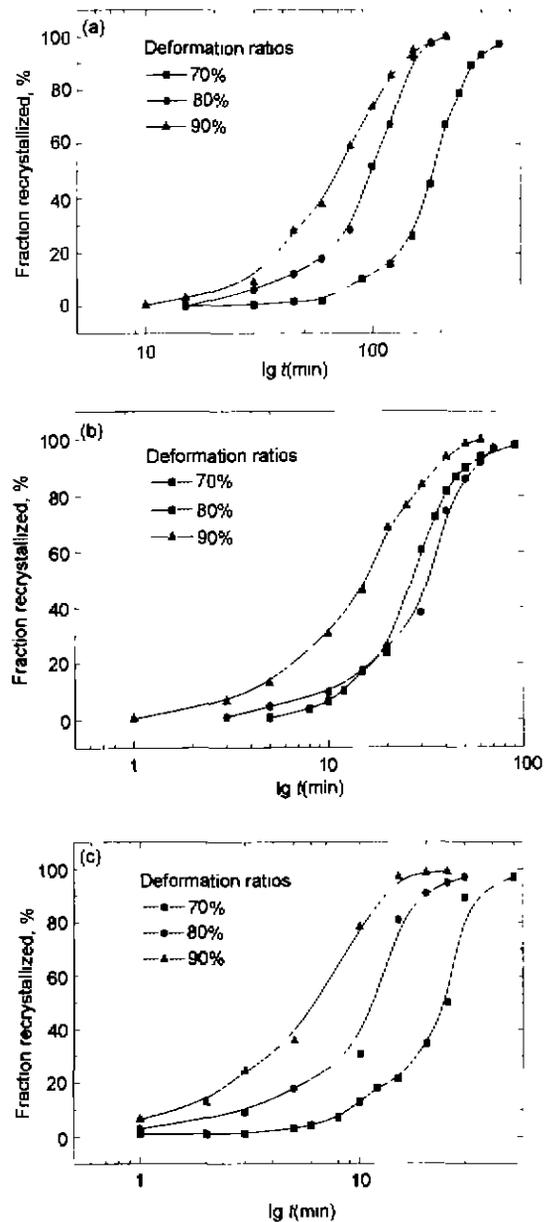


图 1 三种不同变形量的 IF 钢在 610、630 和 650 ℃ 再结晶动力学曲线

Fig.1 Effect of deformation on the recrystallization kinetics of IF steel annealed at three deformation ratios

(a) 610 ℃ (b) 630 ℃ (c) 650 ℃

JMAK 指数; k 为常数

以实验数据 $\ln(-\ln(1-X_v))$ 为纵坐标和以 $\ln t$ 为横坐标作 JMAK 图,采用软件 Origin V 4.10 进行最小二乘法线性回归并作图.可求得回归线性方程和 JMAK 模型中的系数和指数,结果见图 2 和表 1.从回归情况来看,相关系数和标准差分别在 $R=0.97-0.99$ 和 $SD=0.07-0.41$ 之间,实验数据能较好符合线性规律. JMAK 指数有随变形量增大和退火温度提高有降低的趋势,其范围在 1.33—2.51 之间,但明显低于理想的 JMAK 指数值.因

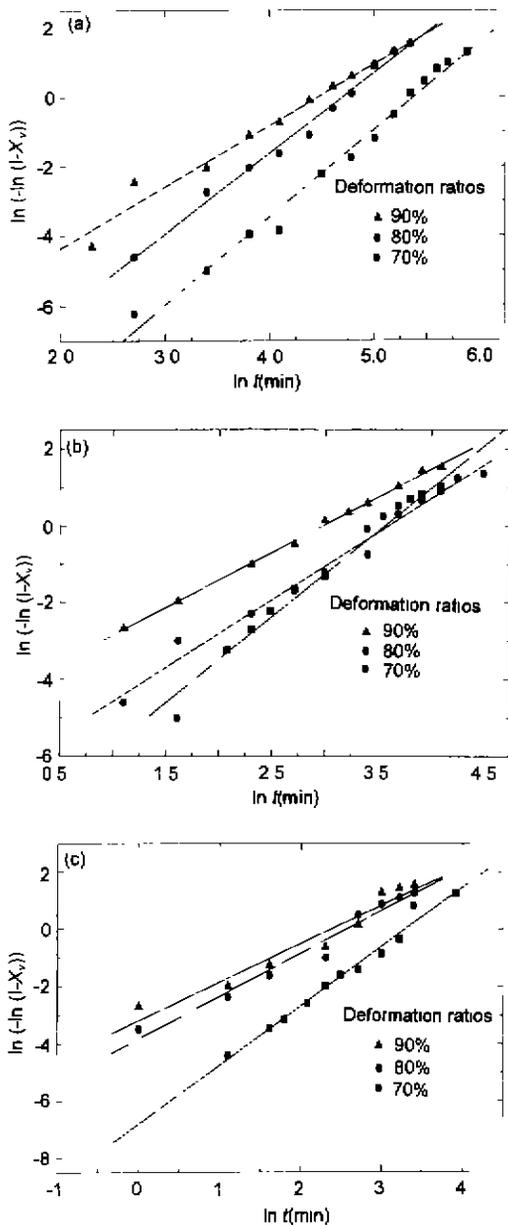


图 2 三种不同变形量的 IF 钢在 610, 630 和 650 °C 退火的 JMAK 图

Fig.2 JMAK plots of the recrystallization kinetics of IF steel deformed at three deformation ratios (a) 610 °C (b) 630 °C (c) 650 °C

此, 可以认为 IF 钢的再结晶过程不完全符合 JMAK 方程推导时的各处均匀形核和形核率为常数的假设。

2.3 新的再结晶模型

以上用传统的 JMAK 模型描述 IF 钢的再结晶过程的结果是, 其 JMAK 指数 n 均在 1.33—2.51 之间, 低于三维形核的 JMAK 模型要求 (三维形核 JMAK 模型 n 值^[5] 约在 3—4), 由此可看出用 JMAK 模型描述 IF 钢的再结晶过程显得过于简单, 为了更好地了解 IF 钢的再结晶过程, 有必要建立适用于 IF 钢生产过程的再结晶

表 1 不同变形量的 JMAK 方程中 k 值和 n 值的回归数据

Table 1 Values k and n in JMAK equation fitted for three deformation ratios

Temperature C	70%		80%		90%	
	n	k	n	k	n	k
610	2.51	1.35×10^{-6}	2.31	1.84×10^{-5}	2.11	7.13×10^{-5}
630	2.23	$3.56 \cdot 10^{-4}$	1.76	1.78×10^{-3}	1.60	$8.17 \cdot 10^{-4}$
650	2.07	1.10×10^{-3}	1.49	2.19×10^{-2}	1.33	$5.96 \cdot 10^{-2}$

数学模型, 用于揭示 IF 钢再结晶退火的规律, 为优化 IF 钢的再结晶退火工艺提供理论依据。新的再结晶模型由式 (2) 和式 (3) 给出^[6]

$$X_v = \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^3 \quad (2)$$

$$D = D_{\max} \cdot \tanh \left[\frac{M}{D_{\max}} \cdot (\rho_{\text{ini}} - \rho_v) \cdot t \right] \quad (3)$$

式中, D 为再结晶时晶粒尺寸, m ; D_{\max} 为再结晶完成后晶粒尺寸, m ; ρ_{ini} 为再结晶前时位错密度, m^{-2} ; ρ_v 为再结晶后位错密度, m^{-2} ; M 为晶界迁移率, $m \cdot s^{-1} \cdot J^{-1}$; t 为时间, s 。

再结晶后的位错密度约为再结晶前的位错密度的百万分之一, 因此, 相对于再结晶前的位错密度, 再结晶后的位错密度可忽略不计。再结晶前的位错密度可用式 (4) 来估算^[7]

$$\rho_{\text{ini}} = 8\pi(1-\nu) \left(\frac{\sigma}{Gb} \right) \quad (4)$$

式中, $\nu=0.33$; $G=8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$; $b=2.03 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, σ 根据其显微硬度换算确定^[8]。这样 ρ_{ini} 就可以通过计算得到, 而 D_{\max} 可通过测量获得, 则新的再结晶模型中的晶界迁移率 M 可通过非线性回归确定, 由此也就确定了再结晶模型。根据该再结晶模型回归的结果见图 3。从回归结果来看, M 回归的误差在 $\pm 6.75 \cdot 10^{-17}$ 至 $\pm 5.09 \times 10^{-18}$ 之间, 因此该模型基本上能用于描述 IF 钢的再结晶过程。但在高形变、高再结晶温度的条件下, 再结晶在很短的时间内完成, 这时再结晶过程与新的再结晶模型偏差较大, 例如, 图 3c 中形变量 90% 的情况。

一般认为再结晶是通过再结晶晶核的成长及相应大角度晶界的移动来进行的, 在这一过程中, 涉及了大角度晶界的迁移和形变组织结构的消除, 再结晶的驱动力是由形变组织中的形变储存能提供的, 而储存能绝大部分 (约 80%—90%) 以位错形式储存于变形金属中^[9]。因此, 再结晶的驱动力与形变基体的位错密度成正比^[10]。该再结晶模型有机地将晶界迁移率、位错密度等与再结晶过程密切相关的组织参数结合起来, 物理意义明确。

2.4 影响再结晶的因素

实验结果表明, 退火温度对 IF 钢再结晶有明显的影 响。例如, 80% 冷变形的试样在 590 °C 退火需要 6 h 完

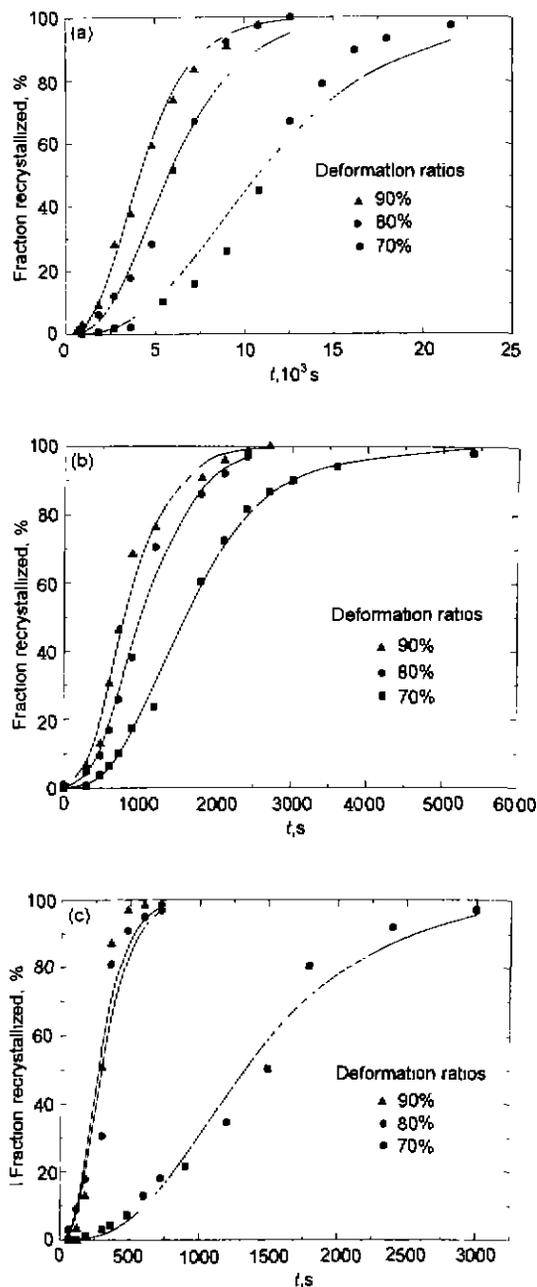


图3 根据新的再结晶模型回归的再结晶曲线

Fig.3 Recrystallization curves fitted by the new model
(a) annealed at 610 °C (b) annealed at 630 °C
(c) annealed at 650 °C

成再结晶。但是当退火温度超过 675 °C，完全再结晶很快就完成，在 700 °C 退火仅需 1—2 min 再结晶就已经结束。在该温度下，很难测量材料的再结晶动力学曲线。形

变量对 IF 钢再结晶也有明显的影响，形变量越大，则在等温的条件下，完成再结晶所需的时间越短。其原因是在该条件下，再结晶晶粒的形核及长大都显著提高。从实验结果来看，研究 IF 钢退火再结晶动力学的最佳温度范围在 600—675 °C。

3 结论

(1) 用 JMAK 模型研究了经 70%、80% 和 90% 冷变形的 IF 钢的再结晶过程。实验结果表明，以 $\ln(-\ln(1-X_v))$ 为纵坐标和 $\ln t$ 为横坐标进行回归，JMAK 图呈直线关系，但其 JMAK 指数 n 在 1.33—2.51 之间，低于理想的 JMAK 指数 (约为 3—4)。

(2) 新的再结晶模型有机地将晶界迁移率、位错密度和再结晶晶粒直径这些与再结晶过程密切相关的组织参数结合起来。用新的再结晶模型研究 IF 钢的再结晶过程。在实验采用的冷变形范围内，具有误差小、模型物理意义明确等优点。

(3) 退火温度和形变量对 IF 钢再结晶都具有明显的影响。最佳研究 IF 钢退火再结晶动力学的温度范围在 600—675 °C。

参考文献

- [1] Elias J A, Hook R E. *AIIME*, 1970, (9): 348
- [2] Samajdar I, Verlinden B, van Houtte P. *Acta Mater.* 1998; 8: 2751
- [3] Wang X. *J Iron Steel Res*, 1995; (1): 60
(王 绪 钢铁研究学报, 1995; (1): 60)
- [4] Fortunati S, Abbruzzese G, Di Nunzio P E. *Mater Sci Forum*, 1992; 94-96: 431
- [5] Humphreys F J, Hatherly M. *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*. Pergamon, Elsevier Science Ltd, UK, 1995: 188
- [6] Gavard L, Le Gall R, Montheillet F. *Mater Sci Eng*, 2001; A258, to be published
- [7] Senkov O, Jonas J J, Froes F H. *Mater Sci Eng*, 1998; A255: 49
- [8] Michael F A, David R H J. *Engineering Materials 1*. Pergamon Press, Headington Hill Hall, UK, 1980: 81
- [9] Mao W M, Zhao X B. *The Metallic Recrystallization and Grain Growth*. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1994: 15
(毛卫民、赵新兵 金属的再结晶与晶粒长大 北京: 冶金工业出版社 1994. 15)
- [10] Chao Y Z, Tao W D. *Iron Steel Abroad*, 1997; (7): 16
(曹尚之、陶卫董 国外钢铁, 1997; (7): 16)