

A508c1.3 钢的后动态再结晶模型^①

陈 英^②

钟志平

曹起骧 马喜腾

(中国农业大学机械工程学院) (北京机电研究所)

(清华大学)

摘 要 采用热模拟与定量金相分析法研究了核电 A508c1.3 钢的后动态再结晶。发现动态再结晶百分比对亚动态再结晶过程没有明显的影响。采用多元非线性回归法得到了后动态再结晶模型。

关键词 核电锻件; A508c1.3 钢; 后动态再结晶; 亚动态再结晶

分类号 TG 316.2

The model of Post-dynamic Recrystallization of A508c1.3 Steel

Chen Ying

(College of Machinery Engineering, CAU)

Zhong Zhiping

Cao Qixiang Ma Xiteng

(Beijing Research Institute of mechanical & Electric echnology)

(Tsinghua University)

Abstract The post-dynamic recrystallization of A508c1.3 steel is investigated by means of hot simulation and quantitative analysis of metallography. It was discovered that there is no distinct influence of percentage of dynamic recrystallization on meta-dynamic recrystallization. The model of post-dynamic recrystallization has been obtained by using multivariate nonlinear regression analysis.

Key words nuclear forging; A508c1.3 steel; post-dynamic recrystallization; meta-dynamic recrystallization

对亚动态再结晶机理的研究始于 80 年代初,大多是针对应变速率较高的轧制工艺。此后,虽然有些学者试图从亚动态再结晶与静态再结晶的差异以及与动态再结晶的联系来探讨其发生机理,但大多缺乏有力的证据而处于推测阶段^[1]。由于亚动态再结晶过程进行得异常快速,随着温度与变形速率的不同,其完成时间约为 0.1~3.0 s^[2];另外,从金相组织看,亚动态再结晶发生时,动态再结晶晶粒尚处于长大的初始阶段,晶粒尺寸相对较小,而亚动态再结晶晶粒也比较小,这 2 种组织混杂在一起很难区分开来:这给亚动态结晶过程的研究带来了很大的困难。但是从组织预报的角度看,这 2 种细小的晶粒组织与粗大的未再结晶晶粒尺寸相差悬殊,很容易对其加以区分,因而可将这些细小组织合并在一起,统称为后动态组织,相应的再结晶就是后动态再结晶。实际上,后动态再结晶是亚动态再结晶和动态再结晶晶粒长大这 2 种机制的综合,由此建立的再结晶规律不会影响对热变形后的组织的预报。

收稿日期:1999-07-18

①国家自然科学基金重点资助项目

②陈 英,北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区)201 信箱,100083

A508c1.3 钢为目前国际上流行的核电用钢,为对核电锻件锻造工艺过程中的组织性能进行预测与控制,必须对该钢种的后动态再结晶规律进行研究,将其与动态、静态再结晶模型及有限元技术耦合,形成多工序多机制组织性能预报技术。为此,笔者采用热模拟实验法与定量金相分析法,研究 A508c1.3 钢后动态再结晶过程的数学模型。

1 实验方案

实验材料 A508c1.3 钢取自上海重型机器厂电渣重熔锭。其化学成分(质量分数 $w/\%$)如下: C, ≤ 0.25 ; Si, $0.15 \sim 0.40$; Mn, $1.2 \sim 1.5$; Mo, $0.45 \sim 0.60$; Ni, $0.40 \sim 1.00$; Cr, ≤ 0.25 ; P, S, ≤ 0.0025 。试件尺寸为 $\phi 8 \times 12$ mm, 端面凹槽(直径 7.6 mm, 深度 0.2 mm)装填玻璃润滑剂,使热压缩时试件均匀变形。

后动态再结晶发生在动态再结晶变形后的高温停顿期,实验首先要保证热变形时应变 ϵ_i 落在动态再结晶区,即 $\epsilon_c < \epsilon_i < \epsilon_s$, 对应的动态再结晶百分比为 χ_{dyn} 。为此,需要精确控制温度、应变速率和应变,因而再结晶实验在 Gleeble -1500 型热模拟相上进行。以初始晶粒尺寸 d_0 、变形温度 θ 、动态再结晶百分比 χ_{dyn} 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 及变形后的停顿时间 t 为影响后动态再结晶的因素。热变形后保温 t 秒,然后水冷以保留高温组织。变形参数如表 1 所示。试验按照 5 因子 4

表 1 变形参数

因子	水 平			
	1	2	3	4
$d_0/\mu\text{m}$	200	140	80	50
$\theta/^\circ\text{C}$	1150	1050	950	850
$\chi_{dyn}/\%$	90	60	40	20
$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	0.500	0.100	0.020	0.005

水平正交试验表 $L_{16}(4^5)$ 进行。共 16 组试件,每一组试件按预定参数变形后均使高温停顿 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 600 s。热模拟工艺方案如图 1 所示,其中预热温度 θ_0 由初始晶粒尺寸 d_0 确定, ϵ 由相应的 $\dot{\epsilon}$ 和 χ_{dyn} 根据下式^[3]确定:

$$\begin{cases} \epsilon_p = 2.16 \times 10^{-2} Z^{0.121} \\ \epsilon_c = 0.8 \epsilon_p \\ \epsilon_s = 4.016 \times 10^{-2} Z^{0.1124} \\ \chi_{dyn} = 1 - \exp \left[-0.693 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}} \right)^2 \right] \\ \epsilon_{0.5} = 7.18 \times 10^{-3} Z^{0.0826} \\ d_{dyn} = 5.604 \times 10^3 Z^{-0.2878} \\ Z = \dot{\epsilon} \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \end{cases}$$

式中: ϵ_c 为动态再结晶临界应变;

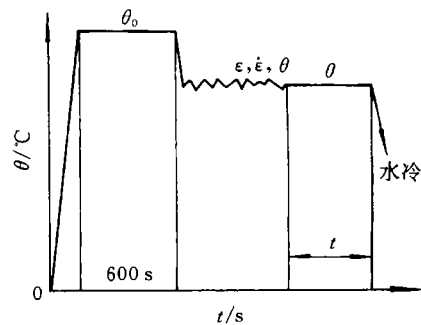


图 1 A508c1.3 钢后动态再结晶热模拟方案

- ϵ_s 为稳定动态再结晶应变;
 χ_{dyn} 为动态再结晶体积百分比;
 $\epsilon_{0.5}$ 为 50% 动态再结晶的当量应变;
 d_{dyn} 为动态再结晶晶粒直径, μm ;
 Q 为动态再结晶激活能, $Q = 260\,250.9 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$;
 R 为气体常数, $R = 8.31 \text{ J}(\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

将激冷试件沿子午面剖开,制成金相试样,用 60 °C 饱和苦味酸溶液腐蚀以获得原奥氏体晶界,采用割线法测量子午面中部的晶粒直径。

2 后动态再结晶模型的建立

在热变形结束瞬间,动态再结晶百分比为 χ_{dyn} ,未再结晶百分比为 $(1 - \chi_{\text{dyn}})$ 。在动态再结晶区域,大部分应变能得到释放,因而后续停顿期发生类似于完全动态再结晶晶粒的长大过程;而在未发生动态再结晶的区域,已形成一定数量的再结晶晶核,只是尚未长大,在后续的停顿期将发生无孕育期的亚动态再结晶,其再结晶百分比为 χ_{meta} 。由于后动态再结晶可以视为动态再结晶晶粒的长大与亚动态再结晶两种机制的综合,因此总的后动态再结晶百分比可表示为

$$\chi_{\text{post}} = \chi_{\text{dyn}} + (1 - \chi_{\text{dyn}})\chi_{\text{meta}}$$

尽管亚动态再结晶本身并不含有形核过程,而只是动态再结晶形核的长大过程,但还是可以用 Avrami 方程^[4,5]来描述:

$$\chi_{\text{meta}} = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right]$$

其中 $t_{0.5} = A\epsilon^p d_0^r \chi_{\text{dyn}}^q \exp\left(\frac{Q_{\text{meta}}}{RT}\right)$, $n, A, p, r, q, Q_{\text{meta}}$ 为待定系数。

经多元非线性回归发现, χ_{dyn} 的指数 $q = -0.0019$, 在 $0 < \chi_{\text{dyn}} < 1$ 的范围内, $\chi_{\text{dyn}} \approx 1$, 即动态再结晶百分比对亚动态再结晶过程没有明显的影响,这与经典的静态再结晶过程严重依赖于应变是截然不同的。不计 χ_{dyn} , 对实验数据重新进行非线性回归(相关系数为 0.904), 得

$$\left. \begin{aligned} \chi_{\text{post}} &= \chi_{\text{dyn}} + (1 - \chi_{\text{dyn}})\chi_{\text{meta}} \\ \chi_{\text{meta}} &= 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{1.41}\right] \\ t_{0.5} &= 4.4389 \times 10^{-8} \epsilon^{-0.19917} d_0^{1.035} \exp\left(\frac{131490.9}{RT}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $t_{0.5}$ 为发生 50% 亚动态再结晶所需的时间, s;

T 为停顿期的温度, K;

t 为停顿时间, s。

在后动态再结晶过程中,动态再结晶晶粒与亚动态再结晶晶粒混在一起难以区分,因而取其平均晶粒尺寸作为后动态再结晶晶粒尺寸 d_{post} ; 又由于 d_{post} 在整个过程中呈长大趋势,因此,后动态再结晶晶粒尺寸可表示为

$$d_{\text{post}}^m = d_{\text{dyn}}^m + B\epsilon^p d_0^r \chi_{\text{dyn}}^q \exp\left(\frac{-s}{t}\right) \exp\left(\frac{-Q_{\text{post}}}{RT}\right)$$

其中: $m, p, q, r, s, Q_{\text{post}}$ 为待定系数。

经多元非线性回归(相关系数为 0.979), 得

$$d_{\text{post}}^2 = d_{\text{dyn}}^2 + 2.3547 \times 10^{11} \epsilon^{-0.0228} d_0^{0.014} \chi_{\text{dyn}}^{-0.0367} \exp\left(\frac{-7.7067}{t}\right) \exp\left(\frac{-191900}{RT}\right) \quad (2)$$

式(1)和(2)可用来描述 A508c1.3 钢后动态再结晶过程及其晶粒变化, 适用于锻造变形条件: 温度 850~1200 °C, 应变速率 $10^{-3} \sim 0.5 \text{ s}^{-1}$ 。

3 结 论

1) 热模拟与金相分析发现 A508c1.3 钢的动态再结晶百分比对亚动态再结晶过程没有显著的影响。

2) 采用多元非线性回归得到了 A508c1.3 钢的后动态再结晶模型。

参 考 文 献

- 1 Hodgson P D, Jonas J J, Yue S. Strain accumulation and post-dynamic recrystallization in C-Mn steels. *Materials Science Forum*, 1993, 113~115: 473~478
- 2 Roucoules C, Yue S, Jonas J J. Effect of alloying elements on metadynamic recrystallization in HSLA steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1995, 26A(1): 181~190
- 3 王连生. 核电压力壳上法兰空心锻造工艺的数值模拟和实验研究: [学位论文]. 北京: 清华大学, 1995
- 4 Sellars C M. Hot working and forming processes. In: Sellars C M, Davies G J, ed. *Proceedings of an International Conference on Hot Working and Forming Processes*. London: Metals Society, 1979. 3~15
- 5 Hodgson P D, Gibbs R K. Mathematical model to predict mechanical properties of hot rolled C-Mn steels. *ISIJ International*, 1992, 32(12): 1329~1338