

# Mn18Cr18N 钢热成形晶粒变化的模拟研究\*

陈慧琴 刘建生 郭会光

(太原重型机械学院压力加工系, 太原 030024)

**摘要** 运用热耦合刚粘塑性有限元微观模拟技术, 对 Mn18Cr18N 钢护环扩挤复合热成形和冷却过程进行了计算机模拟. 得到了热力参数的分布状况和内部晶粒度变化的规律, 当空冷约 210s 时护环内晶粒可达细匀化. 这为实现护环的控制锻造与控制冷却, 进而控制产品质量提供了理论依据.

**关键词** Mn18Cr18N 钢, 热成形, 有限元模拟, 晶粒度

中图法分类号 TG302

文献标识码 A

文章编号 0412 - 1961(1999)01 - 0053 - 56

## SIMULATION OF MICROSTRUCTURE EVOLUTION DURING HOT FORMING OF Mn18Cr18N RETAINING RING STEEL

CHEN Huiqin, LIU Jiansheng, GUO Hui Guang

Department of Metal Forming, Taiyuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan 030024

Correspondent: CHEN Huiqin, lecturer, Tel: (0351) 6222521 - 472

Manuscript received 1998 - 01 - 19, in revised form 1998 - 08 - 17

**ABSTRACT** Quantitative relationships for microstructure changes are incorporated with thermo - coupled rigid visco - plastic finite element method to simulate expanding - extrusion complex hot forming and cooling process of Mn18Cr18N retaining ring. The distribution of thermo - mechanical parameters and the regulation of grain size changes in retaining ring are obtained, and the grain is evenly refined at air cooling of 210 s. All of these provide theoretical basis for realizing control forging and control cooling, as well as control quality of retaining ring.

**KEY WORDS** steel Mn18Cr18N, hot forming, finite element simulation, grain size

Mn18Cr18N 钢是一种新型的护环材料, 具有良好的抗腐蚀性能<sup>[1]</sup>. 但在护环生产中出现的粗晶、混晶等问题越来越引起了电站大锻件制造厂家的重视, 成为控制产品质量、提高工艺水平的重要环节之一. Mn18Cr18N 钢具有很大的动态再结晶临界应变值, 故在实际热锻坯时, 很难利用动态再结晶机制使晶粒全部细化, 因此细化、均匀化晶粒还需利用热成形后的静态再结晶.

由于大型锻造过程的复杂性, 很难进行现场测试. 而在实验室进行研究, 只能得到简单条件下的微观结构与宏观热力参数间的定量关系, 而计算机模拟场量信息、过程变量则十分方便、经济, 为实验结果应用于复杂生产过程, 对产品质量进行预报和控制提供了有力的工具<sup>[2-4]</sup>.

本文依据由热力模拟试验得出的微观结构数学模型,

用有限元方法对 Mn18Cr18N 钢护环扩挤复合热成形及其冷却过程进行了模拟研究, 显示热力参量场, 预报内部晶粒度分布.

### 1 基本模型

#### 1.1 Mn18Cr18N 护环钢晶粒变化模型

材料在热塑性变形中除经历应力和应变的变化外, 还要发生复杂的微观组织变化(如动、静态再结晶). 再结晶百分比及再结晶晶粒度取决于应变、应变速率、温度及原始组织等参数. 本文通过对 Mn18Cr18N 钢的热力模拟试验结果及金相组织的分析, 得到该钢的动、静态再结晶模型.

##### (1) 动态再结晶模型

动态再结晶临界应变  $\epsilon_c$  与峰值应变  $\epsilon_p$  之间的关系为

$$\epsilon_c = 0.8 \epsilon_p \quad (1)$$

$\epsilon_p$  则与原始晶粒尺寸  $d_0$  ( $\mu\text{m}$ ) 及 Zener-Hollomon 参数  $Z$  有关, 可表示为

\*机械工业部教育司基金资助项目

收到初稿日期: 1998 - 01 - 19, 收到修改稿日期: 1998 - 08 - 17

作者简介: 陈慧琴, 女, 1968 年生, 讲师, 硕士

$$p = 4.2 \times 10^5 d_0^{0.787} Z^{0.15} \quad (2)$$

式中,  $Z = \exp(Q/RT)$ , 其中  $\dot{\epsilon}$  是应变速率( $s^{-1}$ ),  $Q$  是激活能(J),  $R$  是气体参数,  $T$  是变形温度(K).

动态再结晶体积分数  $d_d$  为

$$d_d = 1 - \exp\left[-0.693 \left(\frac{\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_s}{\dot{\epsilon}_s - \dot{\epsilon}_c}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中,  $\dot{\epsilon}_s$  为稳态应变, 动态再结晶晶粒尺寸  $d_d(\mu m)$  为

$$d_d = 3.98 \times 10^3 Z^{0.139} \quad (4)$$

(2) 静态再结晶模型

变形后, 通过静态再结晶产生的软化随时间而以一定的速率发生. 这一速率与前变形条件及保持温度有关, 软化曲线一般遵守 Avrami 方程

$$s = 1 - \exp\left[-c \left(\frac{t}{t_0.5}\right)^m\right] \quad (5)$$

式中,  $s$  是在时间  $t(s)$  内已静态再结晶的体积分数;  $t_0.5$  是达到某特定再结晶体积分数  $s$  所需要的时间. 取  $s = 0.5$ , 则  $c = -0.693$ .  $m$  是常数, 当变形小于  $\dot{\epsilon}_c$  时,  $m = 2$ ; 变形大于  $\dot{\epsilon}_c$  时, 分析得出  $m = 1.3325$ . 则  $t_{0.5}$  就是再结晶的体积分数为 50% 时所需的时间, 表示为

$$t_{0.5} = 1.1996 \times 10^{-12} d_0^{3.12} \exp\left[\frac{1.19603 \times 10^5}{RT}\right] \leq \dot{\epsilon}_c \quad (6a)$$

$$t_{0.5} = 5.13 \times 10^{-2} Z^{0.174} \exp\left[\frac{1.19603 \times 10^5}{RT}\right] > \dot{\epsilon}_c \quad (6b)$$

而静态再结晶晶粒尺寸  $d_s(\mu m)$  为

$$d_s = 0.158 d_0^{0.933 - 0.15} \leq \dot{\epsilon}_c \quad (7a)$$

$$d_s = 52.59 Z^{0.0028} > \dot{\epsilon}_c \quad (7b)$$

再结晶完成后( $s \geq 0.95$ ), 进一步的晶粒长大是时间  $t$  和温度  $T$  的函数

$$d^{10} = d_s^{10} + 3.5 \times 10^{32} t \exp(-4.0668596 \times 10^5 / RT) \quad (8)$$

1.2 热耦合温度场分析有限元模型<sup>[5]</sup>

金属塑性成形过程的传热属含内热源的瞬态传热问题, 其能量平衡方程为

$$(\rho C T)_t + \rho \dot{q} - \nabla \cdot (K \nabla T) = 0 \quad (9)$$

式中,  $T$  和  $\dot{T}$  表示温度和温度率,  $K$  是材料的热传导系数;  $\rho$  和  $C$  是材料密度和比热容;  $\dot{q}$  是内热源率,  $\dot{q} = (0.85 - 0.95) \dot{\epsilon}$ .

对式(9) 采用 Galerkin 法进行离散化处理得到

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} = \{Q\} \quad (10)$$

式中,  $[K]$  为热传导矩阵,  $[C]$  为热容矩阵,  $\{Q\}$  为热流向量. 计算中考虑了以下几方面的影响: 塑性变形功生热, 工件自由表面与环境间辐射和对流换热, 工件与模具接触面的热传导以及接触表面摩擦生热.

$\{\dot{T}\}$  可用两点差分展开成为

$$\{T\}_{t+\Delta t} = \{T\}_t + [(1 - \alpha)\{\dot{T}\}_t + \alpha\{\dot{T}\}_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (11)$$

式中,  $\alpha$  为差分因子, 通常取为 0.75.

将式(11) 代入式(10), 得到瞬态温度场有限元方程的增量求解形式

$$\left\{ \frac{1}{\Delta t} [C] + [K] \right\} \{T\}_{t+\Delta t} = \left\{ \frac{1}{\Delta t} [C] - (1 - \alpha) [K] \right\} \{T\}_t + (1 - \alpha) \{Q\}_t + \alpha \{Q\}_{t+\Delta t} \quad (12)$$

2 数值模拟计算实例

护环扩挤复合成形原理如图 1 所示.

2.1 计算条件

Mn18Cr18N 钢 600 MW 护环热成形参数如下: 环环的内径为 220 mm, 外径为 800 mm, 高为 867.6 mm, 压下速度为 100 mm/s, 摩擦因子为 0.35, 始锻温度为 1250 °C, 原始晶粒尺寸  $d_0$  为 250  $\mu m$ , 模具预热温度为 200 °C.

材料的热物性参数如下: 自由表面对流换热系数  $h$  为 0.295  $W/(m^2 \cdot K)$ , 接触面上受压状态的传导系数  $h_{lub}$  为 10<sup>3</sup>  $W/(m^2 \cdot K)$ , 材料的密度与比热容之积  $C$  为 3770  $J/(kg \cdot K)$ , 热传导系数  $K$  为 36  $W/(m \cdot K)$ , 辐射参数  $\epsilon$  为 8.5  $\times 10^{-6} W/(m^2 \cdot K^4)$ .

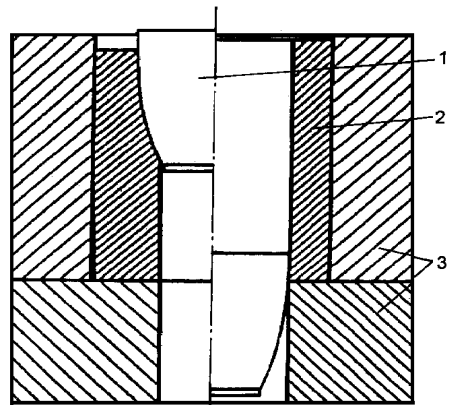


图 1 护环扩挤复合成形示意图

Fig.1 Schematic diagram of expanding - extrusion complex forming of retaining ring

1—upper die 2—ring blank 3—composite lower die

护环扩挤复合成形过程的刚粘塑性有限元模型，采用四结点环单元，且由于对称性仅计算一半。上模划为 144 个单元 177 个结点，下模为 315 个单元 368 个结点，环坯为 312 个单元 360 个结点。

### 2.2 模拟结果及分析

反映材料热成形过程的主要特征参量为温度场(图 2)、应变与应变速率分布(图 3a)等。而热成形过程中材料内部微观结构的变化，可由动态再结晶程度及晶粒度大小来说明(图 3b)。图 2 中工模具内的温度场与图 3a 中应变与应变率的等值线分布符合塑性加工过程中热力因素的变化规律。由图 3 可以看出，在这种等效应变分布条件下环坯内各区域都发生了不同程度的动态再结晶(图 3a)；环坯内壁再结晶体积分数大，晶粒尺寸小，越往外再结晶体积分数越小，晶粒尺寸越大(图 3b)，且晶粒度、再结晶体积分数的分布规律和等效应变的分布规律一致。这符合热变形过程中微观结构的变化机制，即应变越大，再结晶体积分数越大，晶粒越细。图 3b 还表明，热成形后沿环截面动态再结晶的晶粒大小不均匀(96—247 μm)，故要得到均匀化的组织必须在热成形后采用延时冷却，即护环热成形后保持

一定的时间，然后入水冷却。这样，一方面保持了热变形过程中晶粒的细化作用，又能在高能级状态下，通过静态再结晶达到进一步细化晶粒的目的。

图 4 为 Mn18Cr18N 钢护环热成形后不同空冷时刻横截面上晶粒度的分布情况。从图 4a 中可明显看出，环坯热成形后内壁的动态再结晶晶粒细小，而外壁的晶粒粗大。冷却 30 s 后(图 4b)，由于环坯内壁温度高、晶粒细小且成核容易，所以内壁首先发生了静态再结晶，晶粒得到了不同程度的细化。而外壁的温度较低，晶粒较粗，成核较慢，因此静态再结晶速度也较慢。冷却 60 s 后(图 4c)，由于环坯仍处在高温状态，所以内壁完成静态再结晶后，晶粒马上粗化，而外

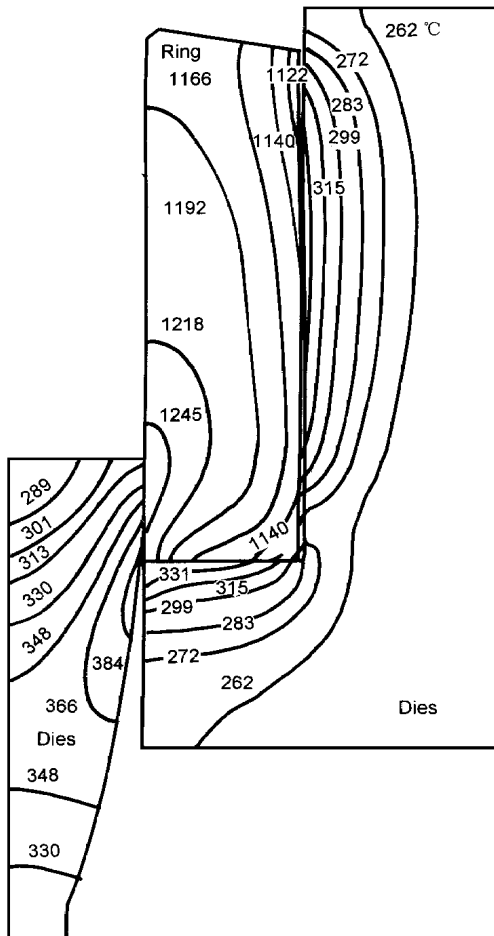


图 2 变形终了时环件和模具温度场  
Fig. 2 Temperature field in formed ring and dies

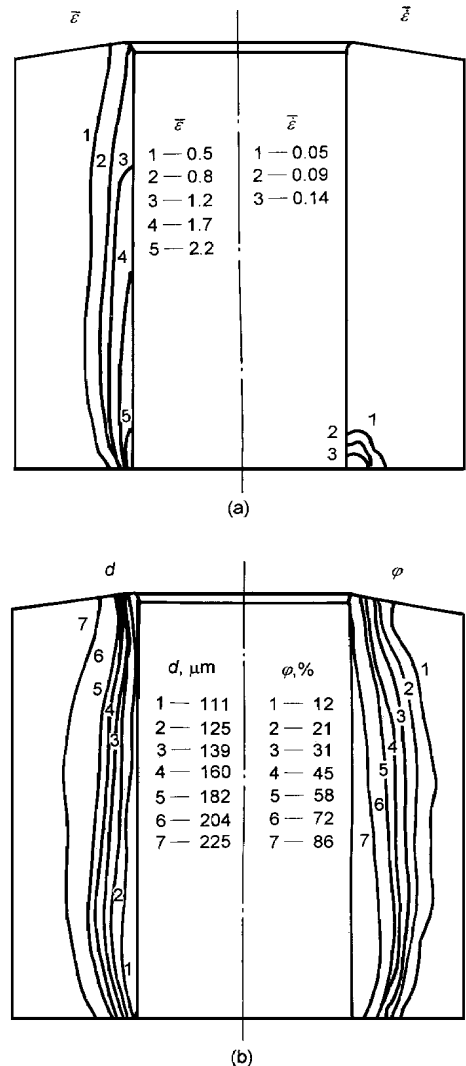


图 3 成形后环坯内变形和再结晶参数分布

Fig. 3 Parameters distribution of deforming and recrystallization in formed ring  
(a) strain and strain rate ( $s^{-1}$ ) (b) grain size d (μm) and volume fraction (%) of recrystallization

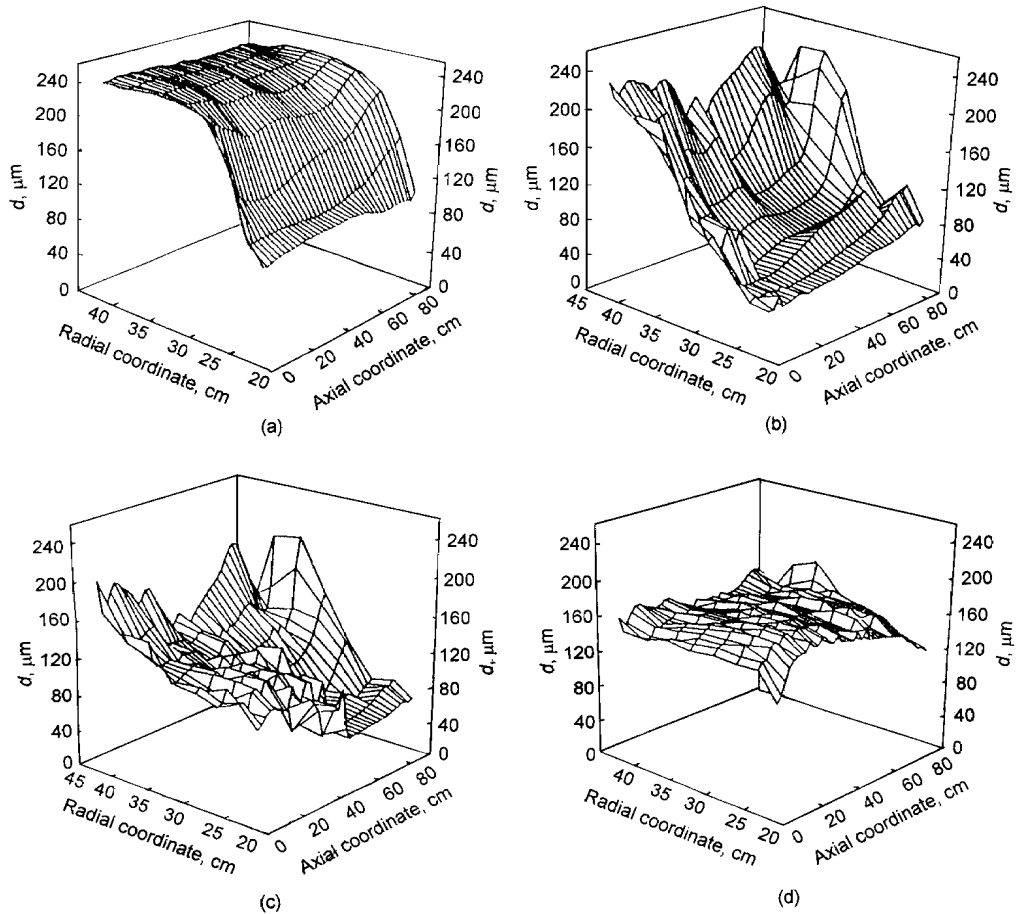


图4 空冷不同时间后环坯内晶粒度分布立体图

Fig. 4 Grain size distribution on cross section of ring at different cooling times

(a) 0 s (b) 30 s (c) 60 s (d) 210 s

壁晶粒还处在静态再结晶中. 随着冷却过程的推移, 环坯温度不断降低, 上述过程逐渐减缓, 环坯截面上, 晶粒大小渐趋均匀. 冷却到 210s 后(图 4d), 晶粒分布达到了平衡均匀. 此时, 马上淬水, 环坯内均匀、细小的晶粒组织即可保留下来. 从而为锻件最终获得细匀化组织创造了有利条件. 否则, 由于此时温度仍较高, 晶粒会继续长大, 引起晶粒粗化, 恶化护环锻件的性能.

### 3 结论

采用热耦合刚粘塑性有限元微观模拟技术, 对 Mn18Cr18N 钢护环扩挤复合热成形及冷却过程进行了模拟研究, 所得有关场量信息符合环件热成形参量变化规律. 数值模拟结果表明, Mn18Cr18N 钢护环热成形后晶粒分布很不均匀, 需要通过控制冷却使之细匀化, 当空冷 210 s 时

护环内晶粒大小达到均匀平衡. 由此为护环控制热成形工艺的实施及产品质量的控制、生产优质的大锻件提供了理论依据.

### 参考文献

- [1] Rambaud J B, Cazenave R H. *Steel Forgings*. New York: ASTM, 1984: 258
- [2] Karhausen K, Köpp R. *Steel Res*, 1995; 66: 20
- [3] Xu S G, Cao Q X, Lian J C. *J Plast Eng*, 1994; 1(2): 24  
(许思广, 曹起骧, 连家创. 塑性工程学报, 1994; 1(2): 24)
- [4] Karhausen K, Köpp R. *Steel Res*, 1992; 63: 247
- [5] Liu J S, Zhang Q L, Chen H Q. *J Taiyuan Heavy Mach Inst*, 1997; 18: 226  
(刘建生, 张巧丽, 陈慧琴. 太原重型机械学院学报, 1997; 18: 226)