

## 高温合金 800H 的动态再结晶及其模型的建立

何文武, 刘俊伟, 赵晓东, 孙述利, 刘建生

(太原科技大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘 要:**采用单道次热压缩实验分析了变形参数对高温高强合金 800H 热变形的影响。结果表明:初始晶粒尺寸越小、变形温度越高、变形速率越小,越容易出现动态再结晶现象;同样,在能够发生动态再结晶的情况下,变形量的增大促使动态再结晶充分进行;利用拟合得到了 800H 合金的动态再结晶激活能、临界变形量模型、再结晶动力学模型、再结晶运动学模型和再结晶晶粒尺寸模型。采用 Deform-2D 进行晶粒度模拟,仿真模拟结果与金相统计出的再结晶晶粒尺寸变化趋势一致,平均误差为  $4.5\mu\text{m}$ 。极小的平均误差表明所建模型与实际情况符合,可以用于预测 800H 合金热变形过程中再结晶的晶粒尺寸。

**关键词:**800H;动态再结晶;模型;热压缩

**文献标志码:**A    **文章编号:**1001-0963(2014)10-0055-05

## Dynamic Recrystallization and Establishing of Its Models for Superalloy 800H

HE Wen-wu, LIU Jun-wei, ZHAO Xiao-dong, SUN Shu-li, LIU Jian-sheng

(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan Technique and Science University,  
Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** The effect of deformation parameters on hot deformation of superalloy 800H was studied by means of single-pass compression test. It was found that smaller initial grain size, higher deformation temperature and lower strain rate are more easily to cause dynamic recrystallization. And when dynamic recrystallization can take place during deformation, the fraction of dynamic recrystallization increases with increasing of strain. The models of dynamic recrystallization activation energy, critical strain, dynamic recrystallization kinetics, dynamic recrystallization kinematics and grain size of dynamic recrystallization for 800H were obtained through the analysis of data obtained by single-pass compression. The variation tendency for grain size simulated by Deform-2D is consistent with metallographic statistics, and the average error is  $4.5\mu\text{m}$ . Very small average error shows that the model is consistent with practical situation and can be used to predict recrystallized grain size for 800H during thermal deformation.

**Key words:** 800H; dynamic recrystallization; model; thermocompression

800H 相当于中国耐蚀合金 NS112, 由于在高温情况下依然保持着优良的屈服强度和很好的耐还原、氧化、氮化介质及氧化还原交替变化介质腐蚀的性能<sup>[1]</sup> 得到越来越广泛的使用。随着目前第 4 代核电的兴起, 作为核电材料的重要组成部分<sup>[2]</sup>, 从早期成分分析到目前的成形研究, 800H 的研究也越来越深入和完善。目前关于 800H 在热加工过程中的组织演变研究的文献比较鲜见, 曹宇等人的研究也仅

限于再结晶可能性<sup>[3]</sup>。随着数值模拟技术在成形中的应用不断的成熟与发展, 精确预测大型锻件的组织分布也越来越重要, 所以建立完整的 800H 动态软化本构方程也越来越迫切。

本文利用锻态 800H 进行单道次热压缩实验得到的真应力应变曲线, 进行动态再结晶分析并建立本构方程, 为该合金后续热加工工艺提供一定的理论基础。

# 1 实验

## 1.1 实验材料

本次实验用材料为 800H, 由中国某机械集团提供。原始铸坯化学成分见表 1, 然后经过多火次热锻处理。

表 1 800H 的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 800H									%
C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Sb	
0.06	1.10	0.5	0.017	0.001	34.79	22.17	0.047	0.0014	
Cu	Al	Ti	Co	Bi	As	Sn	Fe		
0.024	0.15	0.38	0.015	0.001	0.015	0.001	余量		

## 1.2 热模拟实验

热模拟实验是在太原科技大学 Gleeble-1500D 热模拟力学实验机上进行的。将经过多火次热锻得到的锻坯加工成  $\phi 8\text{mm} \times 12\text{mm}$  的圆柱试样。为保证温度均匀, 同时晶粒尺寸不明显长大, 实验时以  $20\text{ }^\circ\text{C/s}$  的速度加热至  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  保温  $180\text{ s}$ , 然后以  $10\text{ }^\circ\text{C/s}$  的速度降至变形温度, 保温  $30\text{ s}$  后进行热压缩。具体实验参数为: 实验温度  $950、1050、1150、1250\text{ }^\circ\text{C}$ , 应变速率  $\dot{\epsilon} = 0.005、0.05、0.5、5\text{ s}^{-1}$ , 真应变  $\epsilon = 0.3、0.5、0.7$ , 初始晶粒尺寸  $d_0 = 33、103、166\text{ }\mu\text{m}$ 。实验工艺流程见图 1。实验结束后, 沿着轴向从试样中间切开, 经抛光后腐蚀, 用显微镜观察, 腐蚀剂(体积比)为  $\text{CuSO}_4 : \text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 5 : 5$ 。

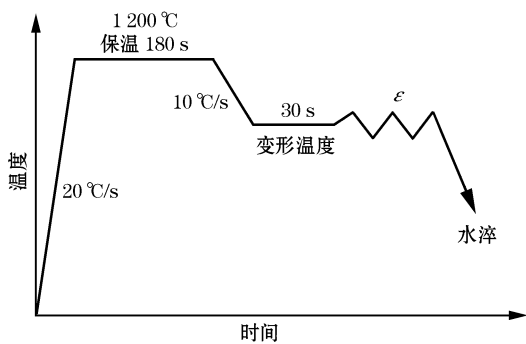


图 1 单道次热压缩实验流程

Fig 1 Flow diagram of thermo-simulation experiment of single-pass compression

# 2 结果及讨论

## 2.1 变形参数对动态再结晶的影响

### 2.1.1 初始晶粒度

从不同初始晶粒度的真应力应变曲线可以看出

(图 2): 初始晶粒度越小, 峰值应力越大, 对应的峰值应变越小, 即临界峰值应变越小, 越容易发生动态再结晶。对于应力增加的现象, 验证了细晶强化理论; 同时细小的晶粒能提供更多的晶界, 即能提供更多的畸变能以达到动态再结晶激活能, 所以越容易进行动态再结晶。从金相组织看, 随着初始晶粒度的减小, 变形后的组织越来越均匀, 这主要是晶粒越细小, 变形时动态再结晶能大面积同时开动的结果。

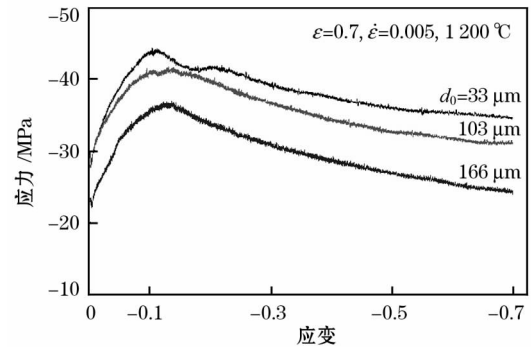


图 2 不同初始晶粒度对真应力应变的影响

Fig 2 Effect of initial grain size on true stress and strain

### 2.1.2 变形速率

图 3 为不同变形速率的真应力应变曲线。应变速率增大时, 峰值应力明显增大。当应变速率为  $0.5\text{ s}^{-1}$  时, 真应力应变曲线在出现峰值后保持水平状态, 属于典型的回复型。应变速率为  $5\text{ s}^{-1}$  时, 一方面, 由于变形速度快, 局部变形能来不及扩散, 积累的能量达到动态再结晶激活能时即发生再结晶现象, 但此情况下的位错密度增殖很快, 使得加工硬化效果也越来越明显, 这时的真应力应变曲线受加工硬化、动态回复及动态再结晶的复合作用出现波浪

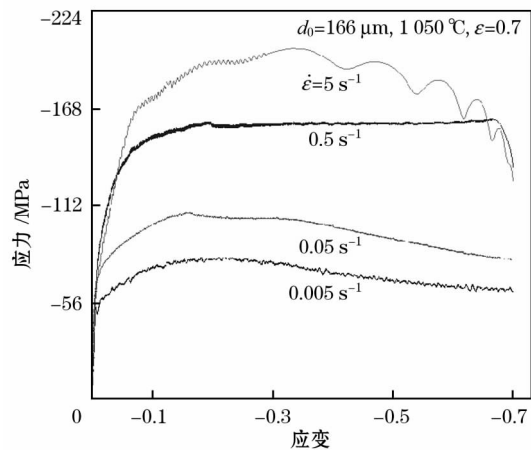


图 3 不同应变速率时的真应力应变曲线

Fig 3 Curves of true stress and strain under different strain rates

状;另一方面,在温度较低时,动态再结晶相对不容易发生,要使动态再结晶发生需要累积足够的应变储能,而一旦发生动态再结晶后,变形储能显著降低,再次发生的话就得等待下一次能量的积累了,即为不连续再结晶,表现在流变应力上为流变应力的起伏。最终曲线呈现下降趋势,说明随着变形量的增大,软化效果大于硬化效果,再结晶进行出现的比例较大(在  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.005\text{ s}^{-1}$ 、 $\epsilon=0.7$  时心部再结晶分数就已经达到 29.2%)。

### 2.1.3 变形温度

从图 4 可以看出流变应力对温度的敏感性<sup>[4]</sup>。应变速率一定,变形温度越高,峰值应力越小,峰值应变也越小,即越容易出现再结晶现象。这是由于变形温度较高时,加工硬化效果越低,动态回复软化的能力越强,空位原子扩散和位错进行交滑移、攀移的驱动力越大,因此越容易出现再结晶现象。同时也可以看到,在高的应变速率下温度越高,曲线波动越小,不连续再结晶现象越不明显。

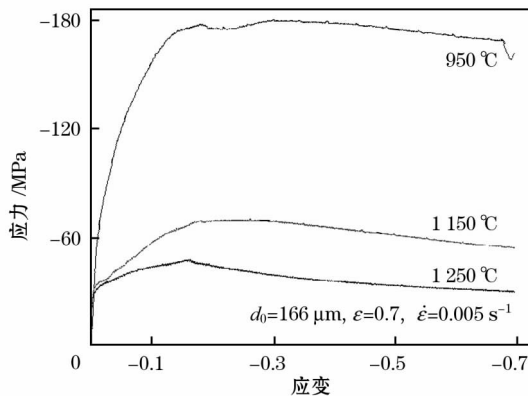


图 4 温度对真应力应变曲线的影响

Fig 4 Influence of temperature on curve of true stress and strain

### 2.1.4 应变量

图 5 为变形量对 800H 流变应力的影响。由图

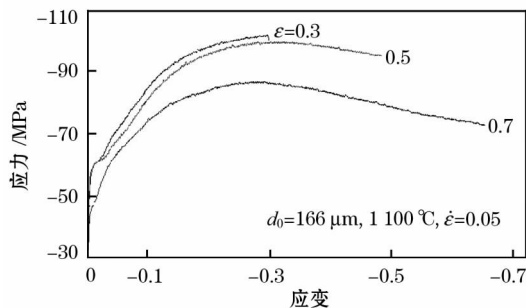


图 5 应变对真应力应变曲线的影响

Fig 5 Influence of strain on curve of true stress and strain curve

可以看出,随着变形量的增加,峰值应力不断减小,对应的峰值应变也减小,即越早出现再结晶现象,且再结晶的分数也增大。有相关文献<sup>[5]</sup>指出,变形量的增大会降低再结晶激活能,另外变形量的增大也会提高变形产生的塑性变形能,都会使再结晶分数提高,强化软化效果。

## 2.2 动态再结晶动力学模型的建立

### 2.2.1 形变激活能的计算

金属的塑性变形是一个热/力激活过程,通过对不同热加工数据的研究,Sellars 和 Tegart<sup>[6-7]</sup>提出了一种包含变形激活能  $Q$  和温度  $T$  的本构方程,即 Arrhenius 方程。其关系可如下表示:

$$\dot{\epsilon} = A f(\sigma) \exp\left(\frac{-Q_{\text{def}}}{RT}\right) \quad (1)$$

它有 3 种形式:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_{\text{def}}}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(n_2 \sigma) \exp\left(-\frac{Q_{\text{def}}}{RT}\right) \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp[-Q_{\text{def}}/(RT)] \quad (4)$$

式中: $\dot{\epsilon}$  为变形速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\sigma$  为应力,此时一般用稳态应力  $\sigma_s$  代替,  $\text{MPa}$ ;  $Q_{\text{def}}$  为形变激活能,  $\text{J/mol}$ ;  $R$  为气体常数,一般取  $8.314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为变形温度,  $\text{K}$ ;  $\alpha$ 、 $A$ 、 $n$  为材料常数,  $\alpha$  为最优化因子,与材料成分和实验条件有关,  $n$  为加工硬化指数。

Arrhenius 方程 3 种常见形式的适用范围有所不同,幂函数适用于低应力区,指数函数适用于高应力区,而双曲正弦函数可以很好地描述不同应变、应变率、温度时的应力特征。因此这里采用双曲正弦函数,并取  $\sigma$  为峰值应力  $\sigma_p$ 。

通过对 Gleeble-1500D 热模拟得到的实验数据进行分析计算,并利用 origin8.1 进行数据处理可得:

$$\dot{\epsilon} = 7.87 \times 10^{16} [\sinh(0.009 \sigma_p)]^{5.521} \cdot \exp\left(\frac{-479670}{RT}\right) \quad (5)$$

引入综合表示材料热变形条件的 Zener-Hollomon 参数:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{479670}{RT}\right) \quad (6)$$

### 2.2.2 临界变形量的推导

发生动态再结晶的临界变形量 ( $\epsilon_c$ ) 与钢的初始奥氏体晶粒尺寸和变形条件 ( $\dot{\epsilon}$ 、 $T$ ) 有关,考虑到临界应变不能直接由真应力应变曲线得到,经验证<sup>[8]</sup>取  $\epsilon_c = 0.8 \epsilon_p$ ,峰值应变则可以由峰值应力对应

求出,即峰值应变可以由真应力应变曲线上读出。

$$\epsilon_p = A_1 d_0^{m_1} Z^{n_1} \quad (7)$$

式中: $A_1, m_1, n_1$  为只与材料本身相关的常数。根据测得的不同变形参数的应变值线性回归出各个参数值为: $A_1 = 2.89 \times 10^{-5}, m_1 = 0.133, n_1 = 0.195$ , 则

$$\epsilon_p = 2.89 \times 10^{-5} d_0^{0.133} \dot{\epsilon}^{0.195} \exp\left(\frac{93536}{RT}\right) \quad (8)$$

### 2.2.3 再结晶分数模型的确定

动态再结晶分数模型是以 Avrami 方程为基础的,即

$$X_d = 1 - \exp\left[-K_1 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}}\right)^{K_2}\right] \quad (9)$$

式中: $K_1, K_2$  为材料常数; $\epsilon_{0.5}$  为发生 50%再结晶的变形量,其表达式为

$$\epsilon_{0.5} = E_1 d_0^{E_2} \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q_{dyn}}{RT}\right) \quad (10)$$

式中: $E_1, E_2$  为材料常数; $Q_{dyn}$  为动态再结晶激活能。当  $\epsilon_c < \epsilon < \epsilon_s$  时,

$$X_d = \frac{\sigma_c - \sigma}{\sigma_{ss}^A - \sigma_{ss}^B} \quad (11)$$

式中: $\sigma_c$  为临界应力; $\sigma$  为应力应变曲线上应变为  $\epsilon$  时的应力值; $\sigma_{ss}^A$  为假象金属未发生动态软化得到的稳态应力值; $\sigma_{ss}^B$  为稳态应力,具体意义及位置见图 6。由于在有动态软化的应力应变曲线中  $\sigma_{ss}^B$  是可以由曲线直接读出来的,而  $\sigma_{ss}^A$  则可以由文献[9]的方法求得。

结合式(11)计算出动态再结晶分数为 50%的  $\epsilon_{0.5}$ , 对照应力应变曲线读出  $\epsilon_{0.5}$ , 并且根据金相组织测量的结果进行相应的调整。根据不同变形参数的  $\epsilon_{0.5}$  回归出:

$$\epsilon_{0.5} = 6.8 \times 10^{-4} d_0^{0.556} \dot{\epsilon}^{0.263} \exp\left(\frac{20261}{RT}\right) \quad (12)$$

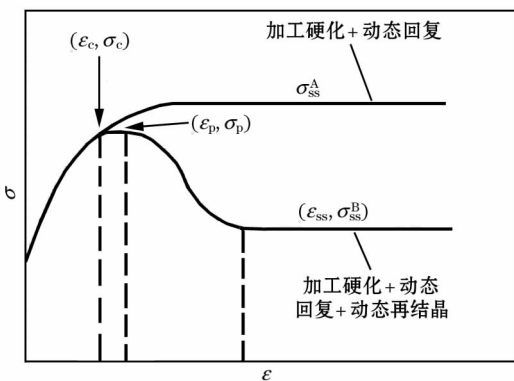


图 6 典型热变形真应力应变曲线

Fig 6 Typical true stress and strain curves of thermal deformation

$$X_d = 1 - \exp\left[-0.03 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}}\right)^{1.77}\right] \quad (13)$$

### 2.2.4 动态再结晶晶粒尺寸模型

动态再结晶晶粒尺寸  $D_{drx}$  正比于  $Z$  参数的指数函数<sup>[10]</sup>,其表达式为:

$$D_{drx} = AZ^n \quad (14)$$

式中: $A$  和  $n$  为只与金属材料自身相关的常数。根据线性回归得到:

$$D_{drx} = 5228 \dot{\epsilon}^{-0.1312} \exp\left(\frac{-62933}{RT}\right) \quad (15)$$

## 3 模型分析及拟合

### 3.1 变形参数对再结晶的影响

临界变形量可表征奥氏体发生动态再结晶的难易程度。由应力应变曲线得到的不同变形温度和变形速率下发生动态再结晶的峰值应变,结合公式  $\epsilon_c = 0.8\epsilon_p$  可知:随着温度的升高、应变速率的降低,临界应变越来越小,意味着越来越容易发生动态再结晶;在低温情况下,高的应变速率则需要很大的应变。

### 3.2 动态再结晶模型的拟合

将 800H 相关数据加载到 Deform-2D 数据库中,进行数值模拟计算。由于在 Gleeble-1500D 中进行等温压缩,认定工件与外界不进行导热;摩擦因子采用基于能量法给出的由压缩后的试样高度和最大直径来反求<sup>[11]</sup>;压下速度则由文献[12]计算。

将 Deform-2D 模拟得到的再结晶晶粒尺寸  $D_a$  与由金相图片得到的再结晶晶粒尺寸  $D_m$  进行对比(图 7),可以看出,二者符合度非常高,由公式  $\Delta = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\text{abs}(D_m - D_a)}{D_m} \right]$  可得平均误差为 19%,再结晶晶粒尺寸平均值为 4.5  $\mu\text{m}$ 。从二者的斜率也可以

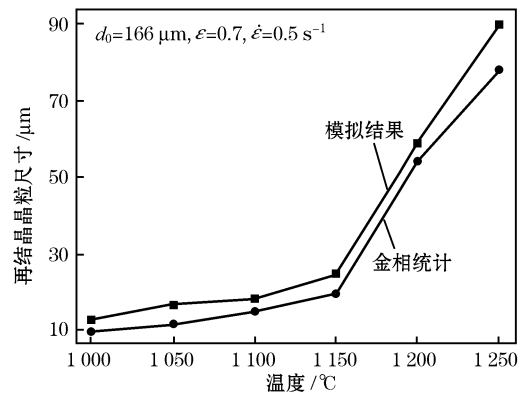


图 7 数值模拟与金相统计得到的动态再结晶晶粒尺寸的对比

Fig 7 Dynamic recrystallization grain sizes obtained by simulation and metallographic statistics

看出,在 1150℃ 以前,再结晶晶粒长大很缓慢,超过 1150℃ 后再结晶晶粒迅速长大。

#### 4 结论

1) 初始晶粒尺寸越小,变形温度越高,变形速率越小,应变量越大,动态再结晶越容易发生;在能够发生动态再结晶的条件下,变形量越大,动态再结晶进行得越完全。

2) 对热模拟实验数据进行分析计算,建立了  $\epsilon_p$ 、 $\epsilon_{0.5}$ 、 $X_d$ 、 $D_{drx}$  的表达式。

3) 由 Deform-2D 数值模拟计算的动态再结晶晶粒尺寸与由金相图片测量得到的尺寸的平均差值为 4.5  $\mu\text{m}$ ,且二者变化趋势一致,说明模型预测值与实际值符合较好,可以用来预测动态再结晶晶粒尺寸。

本文得到太原科技大学大型铸锻件研究所的帮助,在此深表感谢!

#### 参考文献:

- [1] 程晓农,王荣荣,李东升,等. 800H 合金的高温抗氧化性能[J]. 材料热处理学报,2012,33(6):95.
- [2] 郑楠溪. 高温气冷堆用金属材料研究综述[J]. 核电工程与技术,1990,3(2):36.
- [3] 曹宇,邱洪双,马天军,等. 800H 合金热变形行为的研究[J]. 东北大学学报:自然科学版,2012,33(2):213.
- [4] 孙朝阳,刘金榕,李瑞,等. Incoloy 800H 高温变形流动应力预测模型[J]. 金属学报,2011,47(2):191.
- [5] 王俊峰,贾淑果,陈少华,等. 变形量对 Cu-Ni-Si 合金再结晶行为的影响[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2012,33(1):5.
- [6] Rao K P, Hawbolt E. Development of Constitutive Relationships Using Compression Testing of a Medium Carbon Steel [J]. Transactions of the ASME Journal of Engineering Materials and Technology,1992,114(1):116.
- [7] Gronostajski Z J. Development of Constitutive Equation of Copper-Silicon Alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology,1996,60(1):621.
- [8] 吴瑞恒,朱洪涛,张鸿冰,等. 0.95C-18W-4Cr-1V 高速钢动态再结晶的数学模型[J]. 上海交通大学学报,2001,35(3):339.
- [9] 陈世佳. 大锻件材料 30Cr2Ni4MoV 钢的热变形特性研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [10] 何宜柱,陈大宏,雷廷权,等. 形变 Z 因子与动态再结晶晶粒尺寸间的理论模型[J]. 钢铁研究学报,2000,12(1):26.
- [11] Ebrahimi R, Najafizadeh A. A New Method for Evaluation of Friction in Bulk Metal Forming [J]. Journal of Materials Processing Technology,2004,152(2):136.
- [12] 俞汉清,陈金德. 金属塑性成形原理[M]. 北京:机械工业出版社,2010.