# 钢铁成形

# 42CrMoA 钢热变形过程动态再结晶行为

**刘**凯<sup>1,2,3</sup>, **庞**坤<sup>4</sup>, **宋**建民<sup>5</sup>, **王**新伟<sup>4</sup>, **王**红杰<sup>1,2,3</sup>, **王**雯龙<sup>1,2,3</sup>, 胡俊<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1,2,3</sup> (1.中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103; 2.浙江省宁波表面工程研究中心, 浙江 宁 波 315103; 3.宁波表面工程研究院有限公司, 浙江 宁波 315010; 4.浙江天力机车部件有限公司, 浙江 丽水 323000; 5.宁波市鄞创科技孵化器管理服务有限公司, 浙江 宁波 315010)

摘要:目的 通过 Deform-3D 软件模拟 42CrMoA 钢的热压缩过程,研究在压缩量为 60%、变形温度为 950~ 1 100 ℃和应变速率为 0.01~10 s<sup>-1</sup> 条件下 42CrMoA 钢再结晶模型的可靠性。方法 将热压缩试样沿轴线对半 分开,以试样中心和边部位置作为金相观察区,分析 42CrMoA 钢的热变形行为,将计算得到的动态再结晶 临界模型输入 Deform-3D 软件的前处理模块中,模拟过程的变形参数与实验过程的相同,通过在模拟试样 的心部和边部位置进行点追踪,实现模拟结果和实验结果中组织的对比分析。结果 在压缩过程中 42CrMoA 钢真应力的变化受加工硬化和动态软化协同作用影响。随着温度的升高,试样心部和边部的再结晶体积分 数均有所上升,且试样心部动态再结晶体积分数大于边部的。模拟结果显示,当温度由 1 000 ℃升高至 1 100 ℃时,试样心部动态再结晶体积分数由 75.6%升高至 89.5%,在相同条件下,通过金相观察到试样心部 的动态再结晶体积分数由 73.2%升高至 85.3%。结论 基于 Johnson-Mehl-Avrami 模型改进的 Yada 再结晶模 型可以较好地描述 42CrMoA 钢的动态再结晶过程,实验结果与模拟结果间的相对误差小于 8.35%,验证了 动态再结晶模型的准确性。

关键词:42CrMoA 钢;流动应力;本构方程;动态再结晶行为;微观组织 DOI:10.3969/j.issn.1674-6457.2023.011.017 中图分类号:TG1442.41 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2023)011-0147-09

#### Dynamic Recrystallization Behavior of 42CrMoA Steel during Thermal Deformation

LIU Kai<sup>1,2,3</sup>, PANG Kun<sup>4</sup>, SONG Jian-min<sup>5</sup>, WANG Xin-wei<sup>4</sup>, WANG Hong-jie<sup>1,2,3</sup>, WANG Wen-long<sup>1,2,3</sup>, HU Jun<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1,2,3</sup>

(1. Inner Mongolia Metallic Materials Research Institute, Zhejiang Ningbo 315103, China; 2. Ningbo Surface Engineering Research Center, Zhejiang Ningbo 315103, China; 3. Ningbo Surface Engineering Research Institute Co., Ltd., Zhejiang Ningbo 315010, China; 4. Zhejiang Tianli Motor Parts Co., Ltd., Zhejiang Lishui 323000, China;

5. Ningbo Yinchuang Incubator Co., Ltd., Zhejiang Ningbo 315010, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the reliability of the 42CrMoA steel recrystallization model under the total compression strain of 60%, deformation temperature of 950-1 100 °C and strain rate of 0.01-10 s<sup>-1</sup> by Deform-3D software. The compressed sample was cut along the axis, and the center and edge position of the sample were used as the metallographic observation area. The thermal deformation behavior of 42CrMoA steel was analyzed. The calculated dynamic recrystallization model was input to the pre-processing module of Deform-3D software, and the deformation parameters of the simulation process were the same as

Received: 2023-06-08

基金项目: 宁波市 2025 重大科技攻关项目(2022Z003, 2022Z056, 2023Z013, 2022Z002)

Fund: 2025 Key Science and Technology Research Project of Ningbo (2022Z003, 2022Z056, 2023Z013, 2022Z002)

**引文格式:** 刘凯, 庞坤, 宋建民, 等. 42CrMoA 钢热变形过程动态再结晶行为[J]. 精密成形工程, 2023, 15(11): 147-155. LIU Kai, PANG Kun, SONG Jian-min, et al. Dynamic Recrystallization Behavior of 42CrMoA Steel during Thermal Deformation[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(11): 147-155.

收稿日期: 2023-06-08

those of the experimental process. The point tracking of the simulation results was carried out at the same position as the metallographic observation area. The results of simulation and experiment were compared and analyzed. It was found that the change of flow stress of 42CrMoA steel was affected by processing hardening and dynamic softening. The recrystallization volume fraction of the center and edge of the sample increased with the increase of temperature. The recrystallization grain volume fraction in the sample center was greater than that at the edge. The simulation results showed that when the temperature increased from 1 000 °C to 1 100 °C, the dynamic recrystallization grain volume fraction of the sample center increased from 75.6% to 89.5%, and the dynamic recrystallization volume fraction of the sample center of the sample increased from 73.2% to 85.3% under the same conditions. The improved Yada recrystallization model based on the Johnson-Mehl-Avrami model can better describe the dynamic recrystallization process of 42CrMoA steel, and the relative error between simulation and test results is smaller than 8.35%, which verifies the accuracy of dynamic reconstruction models.

KEY WORDS: 42CrMoA steel; flow stress; constitutive equation; dynamic recrystallization behavior; microstructure

42CrMoA 钢是具有代表性的中碳、低合金、高强度钢之一。它具有强度高、韧性好、耐磨性好等优点,主要用于尺寸大且形状复杂的受力构件<sup>[1,4]</sup>。 42CrMoA 钢通常通过热锻、热轧和挤压进行变形, 在成形过程中材料的微观结构和流动应力将发生复杂的变化,且材料内部组织演变过程不可预见,通过 Deform-3D 软件可以直观地了解组织的演变规律,这 对 42CrMoA 钢的生产加工具有重要意义<sup>[5-8]</sup>。

目前一些学者对 42CrMoA 钢的热变形行为进行 了大量研究。骆刚<sup>[9]</sup>在指定条件下进行了热压缩实 验,得出了 42CrMoA 钢流动应力的变化规律,然后 利用双曲正弦函数和 Fields-Backofen 方程建立了 42CrMo 钢的峰值流动应力模型和 Fields-Backofen 模型进 行了修正。Lin 等<sup>[10]</sup>建立了 42CrMo 钢的高温本构模 型,并利用 Zener-Hollomon 参数方程解释了流动应 力的变化规律,通过该模型成功预测了 42CrMo 钢的 应力( $\sigma$ )-应变( $\varepsilon$ )曲线。蔺永诚等<sup>[11]</sup>研究了 42CrMo 钢的热压缩流变应力行为,通过对  $\sigma$ - $\varepsilon$ 数据进行修正, 建立了较为准确的本构模型,预测值的最大相对误差 仅为 4.54%。代孟强等<sup>[12]</sup>采用 42CrMoA 钢的应力-应变曲线构建了动态再结晶体积模型,且通过计算验 证了 42CrMoA 钢动态再结晶本构模型的准确性。

随着有限元软件的普及,计算仿真+实验验证已成为研究材料成形的主流手段。然而,目前关于 42CrMoA 动态再结晶模型的研究只停留在理论计算 阶段,有关与软件相结合且与实验相互验证的研究较少。本文通过 Deform-3D 软件模拟了 42CrMoA 钢热 压缩过程,利用点追踪方法,研究了热压缩试样同一 位置组织的动态再结晶体积分数和整体的平均晶粒 体积分数,验证了 42CrMoA 钢动态再结晶模型的准 确性,以期建立能指导实际生产的物理模型。

## 1 实验

实验所用的材料为挤压态 42CrMoA 钢,其化学

成分如表1所示。利用线切割设备在挤压态42CrMoA 钢相应位置获取压缩试样,采用 Gleeble-1500 型热压 缩模拟试验机对 42CrMoA 钢进行热压缩实验。实验 过程示意图和工艺路线如图 1a 所示,试样的具体尺 寸与形状如图 1b 所示。热压缩试样的变形参数如下: 压下量为 60%、应变速率为 0.01~10 s<sup>-1</sup>、变形温度为 950~1 100 ℃,具体过程见图 1。在实验准备阶段, 在试样中间焊接 k 型热电偶以监测试样温度,将石墨 片放置在试样与设备头部接触处以减小试样的摩擦 和压缩过程中的不均匀变形。为了观察试样心部和边



图 1 热压缩试验示意图(a)和压缩前后试样示意图(b) Fig.1 Schematic diagram of thermal compression tests (a) and samples before and after compression (b)

部的微观组织,将试样沿图 1b 轴线切开,经过机械 研磨(直至 7000 目)、抛光(至表面没有划痕)及腐 蚀(饱和苦味酸溶液)后,采用 ZEISS-Image 光学显 微镜观察金相组织。

# 2 结果及讨论

## 2.1 真应力-真应变曲线

42CrMoA 钢在不同变形参数下的真实应力( $\sigma$ )-应变( $\varepsilon$ )曲线如图 2 所示。可以看到,应力值受应 变量的影响较为明显,在应变产生初期, $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线呈 迅速上升趋势,直至应力达到最大值;随后,应力值 不再随应变的增大而发生显著变化,曲线趋于稳定, 这可以用加工硬化和动态回复来解释<sup>[13-15]</sup>。可以将  $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线分为 3 个区域:区域 A,应力值急剧升高, 这是因为随着应变的增大,位错大量产生,短时间内 位错密度明显增大,发生增殖和缠结现象,此时加工 硬化占据主导地位<sup>[16]</sup>;区域 B,变形所引起的材料内 部温度的升高使材料动态回复能力增强<sup>[17-18]</sup>,此时  $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线的上升趋势变缓且出现锯齿形波动直到应力 达到峰值;区域 C,随着应变的继续增大,材料内部 发生动态再结晶行为<sup>[19]</sup>,流动应力呈现缓慢下降的趋 势。由图 2a 可知,在应变速率由 0.01 s<sup>-1</sup> 增大到 10 s<sup>-1</sup> 过程中,达到峰值应力所对应的应变值有所增大,在 图 2b~d 中也可以发现此规律。这是由于在应变速率 增大的过程中,位错密度增殖的速度加快,在短时间 内动态回复过程减弱,加工硬化占据主导地位,所需 要的变形力也会增大。

在不同变形条件下 42CrMoA 钢与峰值应力的三 维柱状图如图 3 所示。可以观察到,峰值应力受温度 和应变速率的影响较为明显。峰值应力会随着箭头 (见图 3)所示方向呈非线性下降,由 261.36 MPa (950 ℃、10 s<sup>-1</sup>)降低到 60.466 MPa (1 100 ℃、 0.01 s<sup>-1</sup>)。

## 2.2 本构方程的构建

本文采用常用的 Arrhenius 本构关系模型<sup>[20-21]</sup>。 该本构模型对 42CrMoA 钢热压缩过程中的流动应 力、变形温度和变形速率(*ɛ́*)可以进行较好的描述, 如式(1)所示。

$$\dot{\varepsilon} = A \left[ \sinh(\alpha \sigma) \right]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$
 (1)

在不同应力水平下用不同的幂指数模型来描述  $\dot{\varepsilon}$ 与 $\sigma$ 之间的关系,如式(2)所示。



Fig.2 True stress-true strain curves of 42CrMoA steel at different temperatures



图 3 不同变形条件下的峰值应力 Fig.3 Peak flow stress under different deformation conditions

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad \alpha \sigma > 1.2 \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad \alpha\sigma < 0.8$$
 (3)

式中: *T* 为热力学温度, K; *Q* 为材料热变形激 活能, J/mol; *R* 为气体常数, 8.314 J/(mol·K); *A*、α、 *n*、*A*<sub>1</sub>、*A*<sub>2</sub>、*β*、*n*<sub>1</sub>均为材料常数。

对式(1)~(3)分别进行取对数处理,如式 (4)~(6)所示。

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln \left[ \sinh \left( \alpha \sigma \right) \right] - \left( \frac{Q}{RT} \right)$$
(4)

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \left(\frac{Q}{RT}\right)$$
(5)

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - \left(\frac{Q}{RT}\right) \tag{6}$$

将图 3 中各条件下的  $\sigma$  值代入式 (5) 和式 (6), 对式 (5) 和式 (6) 进行线性拟合, 拟合结果如图 4a 和图 4b 所示,可以求得  $\beta$ =0.055 75,  $n_1$ =7.75 97,  $\beta$  和  $n_1$ 的关系如式 (7) 所示,式 (7) 可以用来反映 动态软化的应力水平参数。

$$\alpha = \beta / n_1 \tag{7}$$

由式(7)得到 $\alpha$ =0.007 18。将不同应变速率、 各变形温度下的应力最大值及 $\alpha$ =0.007 18代入式(4),可以得到 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 的关系曲线,如图 4c 所示,通过对不同曲线斜率取平均值可得n=5.756。

对式(1)两边取自然对数,并将 1/T 的值扩大 1000倍,如式(8)所示。

$$\ln\left[\sinh\left(\alpha\sigma\right)\right] = \frac{\ln\dot{\varepsilon}}{n} - \frac{\ln A}{n} + \frac{1000Q}{nRT}$$
(8)

将相应的数据代入式(8),得到相应拟合关系图,

如图 4d 所示。对式(8)求偏微分并整理,如式(9) 所示。

$$Q = R \left[ \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln \left[ \sinh \left( \alpha \sigma \right) \right]} \right]_{T} \left[ \frac{\partial \ln \left[ \sinh \left( \alpha \sigma \right) \right]}{\partial \left( \frac{1}{T} \right)} \right]_{\dot{\varepsilon}}$$
(9)

将气体常数 R、T一定时  $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 的斜率和应变速率  $\dot{\epsilon}$  不变时  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1000 / T$ 的斜率代入式(9),求得 Q=396.269 J/mol。

在热加工过程中,常用 Zener-Hollomon 提出的 温度补偿因子 Z 来表示应力、温度和应变速率的协同 关系<sup>[22-23]</sup>,如式(10)所示。

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) = A\left[\sinh\left(\alpha\sigma\right)\right]^n \tag{10}$$

对式(10)两边取对数,如式(11)所示。

$$\ln Z = \ln A + n \ln \left[\sinh\left(\alpha\sigma\right)\right] \tag{11}$$

将 Q 值代人式 (10), 求得 Z, 再通过图 4c 得到  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$  的线性关系,如图 5 所示。  $\ln A$  是 式 (11) 线性拟合曲线的截距,可以求得 A=2.078 48× 10<sup>16</sup>。此时式 (1) 中所有的未知参数均为已知,因此, 42CrMoA 钢在本实验条件下的本构方程如式 (12) 所示。

$$\dot{\varepsilon} = 2.07848 \times 10^{16} \left[ \sinh(0.00718\sigma) \right]^{5.69838} \exp\left(\frac{-396269}{RT}\right)$$
(12)

包含 Z 参数的表述如式(13)所示。  
$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{-276881}{2}\right) =$$

$$\frac{2}{RT} = \frac{10}{RT} \left( \frac{RT}{RT} \right)^{-1}$$
(13)

 $2.07848 \times 10^{16} [\sinh(0.00718\sigma)]^{5.000}$ 

#### 2.3 动态再结晶模型的建立

#### 2.3.1 动态再结晶临界条件

为了明确 42CrMoA 钢在本实验条件下 DRX 的临 界条件,现以 950 ℃为例,绘制该条件下的加工硬化 率-应力( $\theta$ - $\sigma$ )曲线,如图 6 所示。根据 Najafizadeh 和 Jonas 提出的三阶多项式拟合 $\theta$ - $\sigma$ 曲线<sup>[22]</sup>,如式(14) 所示。

 $\theta = a\sigma^3 + b\sigma^2 + c\sigma + d \tag{14}$ 

式中: a、b、c、d为相关系数。通过对  $\theta$ - $\sigma$ 曲线 进行三次多项式拟合,可得出 a、b、c、d,对式(14) 求二阶偏导可得式(15),令式(15)得 0 可求得动 态再结晶临界值  $\sigma_c$ ,其对应的应变即为临界应变  $\varepsilon_c$ 。 得到的不同条件下的临界应变与峰值应变的关系如 表 2 所示。可知,在相同温度下,随着应变速率的增 大,临界应变  $\varepsilon_c$ 也有所增大。

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\sigma} \left( -\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}\sigma} \right) = 0 \Longrightarrow \sigma_{\mathrm{c}} = -\frac{b}{3a} \tag{15}$$



图 4  $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$  (a)、 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$  (b)、 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \left[\sinh(\alpha \sigma)\right]$  (c)、 $\ln \left[\sinh(\alpha \sigma)\right] - 1000/T$  (d)的关系曲线 Fig.4 Relationship curves of  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$  (a),  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$  (b),  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \left[\sinh(\alpha \sigma)\right]$  (c),  $\ln \left[\sinh(\alpha \sigma)\right] - 1000/T$  (d)

表 2



 图 6 950 ℃各应变条件下的加工硬化率 θ 与流动应力 σ之间的关系曲线
 Fig.6 Relationships between θ and σ under different deformation conditions at 950 ℃

deformation conditions				
<i>T</i> /°C	$\dot{arepsilon}$ / s <sup>-1</sup>	$\varepsilon_{\rm c}$	$\varepsilon_{ m p}$	$\varepsilon_{\rm c}/\varepsilon_{\rm p}$
950	0.01	0.278	0.371 2	0.751
	0.1	0.304	0.384 5	0.791
	1	0.270	0.498 7	0.541
	10	0.393	0.600 5	0.654
1 000	0.01	0.131	0.204 7	0.64
	0.1	0.206	0.294 1	0.701
	1	0.213	0.419 1	0.508
	10	0.334	0.574 1	0.581
1 050	0.01	0.104	0.177 1	0.590
	0.1	0.263	0.330 8	0.795
	1	0.215	0.435 1	0.495
	10	0.379	0.580 4	0.653
1 100	0.01	0.103	0.148 7	0.690
	0.1	0.148	0.225 8	0.657
	1	0.230	0.382 0	0.601
	10	0.324	0.482 8	0.671

各变形条件下的临界应变值(ε。)及其与峰值应变

(*ε*<sub>p</sub>)比值统计

Tab.2 Values statistics of  $\varepsilon_c/\varepsilon_p$  under different

## 2.3.2 动态再结晶临界应变模型

Deform-3D 软件中临界应变和峰值应变的关系

如式(16)所示。

$$\varepsilon_{\rm c} = \alpha_{\rm l} \varepsilon_{\rm p} \tag{16}$$

由表 2 可知,  $\alpha_1$  值为 0.59~0.795, 本文取  $\alpha_1$ =0.65。 有限元软件 Deform-3D 中的  $\varepsilon_p$ 表达式如式(17)所示。

$$\varepsilon_{\rm p} = a_{\rm l} d_0^{n_{\rm l}} \dot{\varepsilon}^{m_{\rm l}} \exp\left(\frac{Q_{\rm l}}{RT}\right) \tag{17}$$

式中: $d_0$ 为初始晶粒尺寸; $Q_1$ 为再结晶激活能;  $a_1, m_1$ 为线性回归常数。由于 $d_0=50 \mu m$ ,令 $A_1=a_1d_0^{n_1}$ , 并对式(17)两边取自然对数,如式(18)所示。

$$\ln \varepsilon_{\rm p} = \ln A_{\rm l} + m_{\rm l} \ln \dot{\varepsilon} + \frac{Q_{\rm l}}{RT}$$
(18)

利用表 2 的数据对式 (18)进行回归分析,通过 拟合得到  $\ln \varepsilon_p - \ln \dot{\varepsilon} \ln \ln \varepsilon_p - 1/T$  关系图,如图 7 所 示。求得方程中各系数分别为  $Q_1$ =40 397.13 J/mol,  $m_1$ =0.140 635,  $A_1$ =0.053 4。将所得系数代入式 (17) 得到 42CrMoA 钢的临界应变方程,如式 (19)所示。



图 7 ln  $\varepsilon_p$ 与 ln  $\dot{\varepsilon}$ 和 1/T 的线性关系 Fig.7 Relationship between ln  $\varepsilon_p$  and ln  $\dot{\varepsilon}$  and 1/T

#### 2.3.3 动态再结晶动力学模型

本文选择的再结晶模型是基于 Johnson-Mehl-

Avrami 模型改进的 Yada 模型<sup>[24]</sup>,如式(20)~(21) 所示。

$$x_{\rm drex} = 1 - \exp\left[-\beta_{\rm d} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\rm c}}{\varepsilon_{0.5}}\right)^{k_{\rm d}}\right]$$
(20)

$$\varepsilon_{0.5} = a_2 d_0^{n_2} \dot{\varepsilon}^{m_2} \exp\left(\frac{Q_2}{RT}\right) \tag{21}$$

式中:  $x_{drex}$  为动态再结晶体积分数;  $\varepsilon_{0.5}$  为动态 再结晶体积分数 50%时的应变;  $Q_2$  为动态再结晶体 积分数 50%时的激活能;  $\beta_d$ 、 $k_d$ 、 $a_2$ 、 $n_2$ 、 $m_2$ 为材料 常数。对式(20)和(21)取对数后,代入图 2 中的 热压缩实验结果,利用 Origin 软件进行线性拟合,可 得  $\beta_d$ =0.153 1,  $k_d$ =2.354 7,  $a_2$ =0.045 1,  $n_2$ =0.132 4,  $m_2$ =0.215 2,  $Q_2$ =48 056.2 J/mol。因此, 42CrMoA 钢 的动态再结晶动力学方程如式(22)、式(23)所示。

$$x_{\rm drex} = 1 - \exp\left[-0.1531 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\rm c}}{\varepsilon_{0.5}}\right)^{2.354\ 7}\right]$$
(22)

$$\varepsilon_{0.5} = 0.045 \, 1d_0^{0.132} \, \dot{\varepsilon}^{0.215} \, ^2 \exp\left(\frac{48\,056.2}{RT}\right) \tag{23}$$

#### 2.3.4 动态再结晶晶粒尺寸模型

在 Deform-3D 中,动态再结晶晶粒尺寸模型如式(24) 所示<sup>[25]</sup>。

$$D_{\rm drex} = a_3 d_0^h \varepsilon^{n_3} \dot{\varepsilon}^{m_3} \exp\left(\frac{Q_3}{RT}\right)$$
(24)

式中: *D*<sub>drex</sub> 为动态再结晶平均晶粒尺寸; *a*<sub>3</sub>、*h*、 *n*<sub>3</sub>、*m*<sub>3</sub>、*Q*<sub>3</sub>为带回归系数。对式(24)取对数,如式 (25)所示。

 $\ln D_{\rm drex} = \ln a_3 + h \ln d_0 + n_3 \ln \varepsilon + m_3 \ln \dot{\varepsilon} + Q_3 / RT \quad (25)$ 

令  $\ln a_3$ + $h \ln d_0$ + $n_3 \ln \epsilon$ = $\ln A_3$ ,将不同变形条件下 测得的  $D_{drex}$ 代入式(25),可以得到  $m_3$ =-0.099,  $Q_3$ =-76 166.38 J/mol,  $A_3$ =33 618.65。获得的 42CrMoA 钢的动态再结晶晶粒尺寸模型方程如式(26)所示。

$$D_{\rm drex} = 3\,361\,856\dot{\varepsilon}^{-0.099}\,\exp\!\left(\frac{-76\,166.38}{RT}\right)$$
 (26)

# 3 有限元模拟

#### 3.1 材料模型建立与参数设置

采用 Deform-3D 软件对热压缩实验进行数值模 拟,试样尺寸与实际尺寸相同,如图 1 所示。根据 2.2 与 2.3 中的结果,将得到的流动应力本构模型和 动态再结晶模型等输入 42CrMoA 钢的材料数据库 中。有限元仿真的基本参数与实际实验的参数相同, 具体如下:初始温度为 950、1 000、1 050、1 100 ℃, 应变速率为 0.01 s<sup>-1</sup>,模具温度为 400 ℃,摩擦因数 为 0.5,传热系数为 2 N/(mm·s ℃),初始晶粒尺寸为  $50 \ \mu m_{\circ}$ 

## 3.2 模拟结果与实验验证

通过模拟得到的试样在变形温度为 1000 ℃和 1100 ℃、应变速率为 0.01 s<sup>-1</sup>条件下材料心部(P1) 和边部(P2)的动态再结晶体积分数和平均晶粒体积 分数如图 8 所示。由图 8a 可知,材料的动态再结晶 行为主要发生在材料心部位置,在 1000 ℃时,心部 的动态再结晶体积分数达到 75.6%,而边部的动态再 结晶体积分数只有 54.4%,远远低于心部数值,这主 要是因为心部位置的等效应变高于边部位置的,较大 的应变使材料内部产生较大的位错密度,促使再结晶 晶粒更容易形核,动态再结晶行为更容易发生,且由 心部到边部动态再结晶体积分数呈现逐渐降低的趋 势。同时,当温度由 1 000 ℃升高至 1 100 ℃时,心 部动态再结晶体积分数由 75.6%升高至 89.5%,由图 8c 和图 8d 可知,在 1 000 ℃时,材料平均晶粒尺寸 在 15 µm 以下的占比为 76.5%左右,此时再结晶晶粒尺 寸大多为 5~17.5 μm, 而在 1 100 ℃时, 材料平均晶 粒尺寸在 15 μm 以下的占比为 50%左右,此时再结晶 晶粒尺寸大多为 7.5~25 μm。这是由于温度升高使材 料内部的热激活增强, 使动态再结晶开始的临界应变 降低, 从而在相同的应变量下, 温度越高, 动态再结 晶分数越高, 同时也伴随着晶粒的长大。

式样在变形温度为 1 000 ℃和 1 100 ℃、应变速 率为 0.01 s<sup>-1</sup>条件下材料心部(P1)和边部(P2)的 金相组织(五角星代表再结晶晶粒、三角形代表未再 结晶晶粒)如图 9 所示。可知,材料心部晶粒尺寸明 显小于边部的,且晶粒细化程度远大于边部的,这是 由于心部应变量大于边部的,用于发生再结晶的能量 也大于边部的,当变形温度由 1 000 ℃升高至 1 100 ℃时,心部再结晶晶粒尺寸由 3.5~15.7 µm 增大 到 5.5~20.3 µm,再结晶体积分数由 73.2%增大到 85.3%,这与模拟结果相吻合。通过金相观察得到的 结果较好地验证了动态再结晶模型的可靠性,其相对 误差小于 8.35%。







图 9 不同条件下心部与边部的显微组织 Fig.9 Microstructures of different positions at different deformation deformation conditions

# 4 结论

1)42CrMoA 钢的流变应力行为受变形温度和应 变速率的影响。当温度恒定时,流动应力随应变速率 的增大而增大,当应变速率恒定时,流动应力随变形 温度的升高而减小。流动应力曲线可以分为3个区域: 区域A(应力快速上升)、区域B(应力达到峰值)、 区域C(应力处于稳定)。这是加工硬化和动态软 化协同作用的结果。42CrMoA 钢的本构方程如下:

 $\dot{\varepsilon} = 2.078 \, 48 \times 10^{16} \left[ \sinh(0.007 \, 18\sigma) \right]^{5.698 \, 38} \exp\left(\frac{-396 \, 269}{RT}\right)$ 

2)42CrMoA 钢再结晶体积分数与温度和应变量 呈正相关,但是温度升高会导致晶粒尺寸增大。

3) 42CrMoA 钢动态再结晶模型方程如下:

$$\begin{split} \varepsilon_{\rm p} &= 0.0534 \dot{\varepsilon}^{0.140\ 635} \exp\!\left(\frac{40\ 397.13}{RT}\right) \;; \quad x_{\rm drex} = 1 - \\ \exp\!\left[-0.1531\!\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\rm c}}{\varepsilon_{0.5}}\right)^{2.354\ 7}\right] \;; \; \varepsilon_{0.5} &= 0.045\ 1d_0^{0.132\ 4} \dot{\varepsilon}^{0.215\ 2} \;. \\ \exp\!\left(\frac{48\ 056.2}{RT}\right) \;; \; D_{\rm drex} = 336\ 1856 \dot{\varepsilon}^{-0.099} \exp\!\left(\frac{-76\ 166.38}{RT}\right) \circ \\ &\equiv 12$$
比较模拟结果与实验结果,可知,该模型适用于 42CrMoA 钢组织模拟。

#### 参考文献:

[1] CHEN M S, YUAN W Q, LIN Y C, et al. Modeling and

Simulation of Dynamic Recrystallization Behavior for 42CrMo Steel by an Extended Cellular Automaton Method[J]. Vacuum, 2017, 146: 142-151.

- [2] QUAN G Z, ZHAO L, CHEN T, et al. Identification for the Optimal Working Parameters of As-extruded 42CrMo High-Strength Steel from a Large Range of Strain, Strain Rate and Temperature[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 538: 364-373.
- [3] GUO L, WANG F, ZHEN P, et al. A Novel Unifified Model Predicting Flow Stress and Grain Size Evolutions during Hot Working of Non-uniform As-cast 42CrMo Billets[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(2): 531-545.
- [4] CAI Z M, JI H C, PEI W H, et al. Hot Workability, Constitutive Model and Processing Map of 3Cr23Ni8Mn3N Heat Resistant Steel[J]. Vacuum: Technology Applications & Ion Physics: The International Journal & Abstracting Service for Vacuum Science & Technology, 2019, 165: 324-336.
- [5] LIN Y C, CHEN M S, ZHONG J. Study of Static Recrystallization Kinetics in a Low Alloy Steel[J]. Computational Materials Science, 2009, 44(2): 316-321.
- [6] QIN F, LI Y, QI H, et al. Deformation Behavior and Microstructure Evolution of As-cast 42CrMo Alloy in Isothermal and Non-isothermal Compression[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2016, 25(11): 1-9.
- [7] BOBBILI R, MADHU V. An Investigation into Hot Deformation Characteristics and Processing Maps of High-Strength Armor Steel[J]. Journal of Materials En-

gineering and Performance, 2015, 24(12): 4728-4735.

- [8] CHEN X F, TANG B, LIU D, et al. Dynamic Recrystallization and Hot Processing Map of Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy during the Hot Deformation[J]. Materials Characterization, 2021, 179: 111332.
- [9] 骆刚. 42CrMo 热塑性流变及动态再结晶行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
   LUO Gang. Study on Thermoplastic Rheology and Dynamic Recrystallization Behavior of 42CrMo[D].
   Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [10] LIN Y C, CHEN M S, ZHONG J. Effect of Temperature and Strain Rate on the Compressive Deformation Behavior of 42CrMo Steel[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2008, 205(1/2/3): 308-315.
- [11] 蔺永诚,陈明松,钟掘. 42CrMo 钢的热压缩流变应力 行为[J]. 中南大学学报, 2008(3): 549-553.
  LIN Yong-cheng, CHEN Ming-song, ZHONG Jue.
  Rheological Stress Behavior of Hot Compression of 42CrMo Steel[J]. Journal of Central South University, 2008(3): 549-553.
- [12] 代孟强, 桂在涛, 廖振成, 等. 42CrMoA 钢动态再结 晶行为研究[J]. 热处理, 2022, 37(2): 1-10.
  DAI Meng-qing, GUI Zai-tao, LIAO Zhen-cheng, et al. Dynamic Recrystallization Behavior of 42CrMoA Steel[J]. Heat Treatment, 2022, 37(2): 1-10.
- [13] HAN Lin, ZHANG Hao-yu, CHENG Jun, et al. Thermal Deformation Behavior of Ti-6Mo-5V-3Al-2Fe Alloy[J]. Crystals, 2021, 11(10): 1245.
- [14] LIU Y, GENG C, LIN Q, et al. Study on Hot Deformation Behavir and Intrinsic Workability of 6063 Aluminum Alloys Using 3D Processing Map[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 713: 212-221.
- [15] LIANG Qiang, LIU Xin, LI Ping, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Map of High-Strength Nickel Brass[J]. Metals, 2020, 10(6): 782.
- [16] WANG L, LIU F, ZUO Q, et al. Prediction of Flow Stress for N08028 Alloy under Hot Working Conditions[J]. Materials and Design, 2013, 47(5): 737-745.
- [17] CHEN X X, ZHAO G Q, ZHANG C S, et al. Constitutive Modeling and Microstructure Characterization of 2196 Al-Li Alloy in Various Hot Deformation Conditions[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 326-342.
- [18] 王晓溪,张翔,王华东,等.基于热加工图的 6061 铝 合金热压缩变形特性研究[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(9): 5.

WANG Xiao-xi, ZHANG Xiang, WANG Hua-dong, et al. Research on Hot Compression Deformation Characteristics of 6061 Aluminum Alloy Based on Hot Working Diagram[J]. Special Casting and Non-ferrous Alloys, 2017, 37(9): 5.

- [19] 孙文伟,张楚函,赵亚军,等.奥氏体不锈钢的热压 缩本构方程及动态再结晶行为[J]. 机械工程材料, 2022,46(6):9.
  SUN Wen-wei, ZHANG Chu-han, ZHAO Ya-jun, et al. Thermal Compression Constitutive Equation and Dynamic Recrystallization Behavior of Austenitic Stainless Steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022,
- 46(6): 9.
  [20] 毛敏, 栾佰峰, 李飞涛, 等. β-T51Z 合金的热变形行 为与组织演变研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(4): 1211-1219.
  MAO Min, LUAN Bai-feng, LI Fei-tao, et al. Study on Hot Deformation Behavior and Microstructure Evolution of β-T51Z Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(4): 1211-1219.
- [21] ZHANG H M, CHEN G, CHEN Q, et al. A Physically-based Constitutive Modelling of a High Strength Aluminum Alloy at Hot Working Conditions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 743: 283-293.
- [22] 赵宪明, 吴迪, 陈学军. 60Si2Mn 钢动态再结晶数学 模型的实验研究[J]. 钢铁研究学报, 2003(5): 3.
   ZHAO Xian-ming, WU Di, CHEN Xue-jun. Experimental Study on Mathematical Model of Dynamic Recrystallization of 60Si2Mn Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003(5): 3.
- [23] HE A, WANG X T, XIE G L, et al. Modified Arrhenius-type Constitutive Model and Artificial Neural Network-based Model for Constitutive Relationship of 316LN Stainless Steel during Hot Deformation[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(8): 721-729.
- [24] KARHAUSEN K, KOPP R, SOUZA M M D. Numerical Simulation Method for Designing Thermomechanical Treatments, Illustrated by Bar Rolling[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1991, 20(6): 351-363.
- [25] 肖凯,陈拂晓. 铸态铅黄铜动态再结晶模型的建立[J]. 塑性工程学报, 2008(3): 132-137.
  XIAO Kai, CHEN Fu-xiao. Establishment of Dynamic Recrystallization Model of Cast Lead Brass[J]. Chinese Journal of Plastic Engineering, 2008(3): 132-137. 责任编辑: 蒋红晨