

18CrNiMo7-6 齿轮钢动态再结晶模型和数值模拟

谢一夔^{1,2}, 王忠英^{1,2}, 付建勋¹, 刘 辉³

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444; 2. 钢铁研究总院华东分院, 江苏 淮安 223007;
3. 安徽建筑大学 材料与化学工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 利用 Gleeble-3500 热模拟机对 18CrNiMo7-6 齿轮钢进行单道次压缩试验, 旨在探索钢材在不同变形温度和应变速率下的动态再结晶行为及晶粒尺寸演变规律。通过建立动态再结晶模型和晶粒尺寸模型, 并利用 Deform-3D 有限元仿真软件进行模拟, 揭示了试样中心区域的完全再结晶特征及其随温度变化的扩展趋势。模拟结果表明: 试样中心区域完全再结晶, 并随着变形温度的增大而扩大。低应变速率条件下, 由于畸变能和位错积累的不足, 使得不完全再结晶区域增加。晶粒尺寸随变形温度的降低而减小, 但可能导致混晶。同时, 低应变速率时中心和膨胀区的晶粒尺寸普遍较大, 而随着变形的增加, 晶粒尺寸在两端呈现出相反的变化趋势, 这种混晶现象尤为显著。

关键词: 18CrNiMo7-6 钢; 动态再结晶; 晶粒尺寸演变; 单道次压缩试验; Deform-3D

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.09.026

中图分类号: TG142.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 09-0195-08

Dynamic recrystallization model and numerical simulation of 18CrNiMo7-6 gear steel

Xie Yikui^{1,2}, Wang Zhongying^{1,2}, Fu Jianxun², Liu Hui³

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. East China Branch of CISRI, Huai'an 223007, China; 3. School of Materials and Chemical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: The single-pass compression tests on 18CrNiMo7-6 gear steel were conducted by Gleeble-3500 thermal simulation machine to explore the dynamic recrystallization behavior and the evolution law of grain size of steel under different deformation temperatures and strain rates. Then, the dynamic recrystallization and grain size models were established and simulated by finite element software Deform-3D, and the complete recrystallization characteristics in the central region of the sample and its changing expansion trend with the temperature were revealed. The simulation results show that the central region of the specimen undergoes complete recrystallization and expands with the increasing of deformation temperature. Under low strain rate condition, the incomplete recrystallization area increases due to the lack of distortion energy and dislocation accumulation. The grain size decreases with the decreasing of deformation temperature, but it may lead to mixed crystal. At the same time, the grain sizes in the center and expansion regions are generally larger under low strain rate condition. With the increasing of deformation, the grain size shows opposite changing trends at both ends, and this mixed crystal phenomenon is particularly significant.

Key words: 18CrNiMo7-6 steel; dynamic recrystallization; grain size evolution; single-pass compression test; Deform-3D

18CrNiMo7-6 齿轮钢以其优异的力学性能和加工性能被广泛用于制造重型和高速齿轮^[1]。以往的研究^[2-4]主要集中在 18CrNiMo7-6 齿轮钢的化学成分、渗碳层深度和显微组织等方面。然而, 热变形过程对 18CrNiMo7-6 齿轮钢的最终性能也具有一定的影响。材料通过热成形获得所需的形状, 以及确

定最终组成、微观结构和性能。

近年来计算机科学迅速发展, 也推动了其他技术的发展, 其中, 有限元方法是计算机科学发展的数值模拟方法, 其利用软件建立计算模型, 简化复杂过程, 展现产品加工情况, 实现节约资源, 缩短生产周期, 降低成本的作用^[5-8]。苏斌等^[9]研究了 RM80 超高强度钢在变形温度为 900~1100 °C、应变速率为 0.01~10 s⁻¹ 条件下的热变形行为, 并进行了有限元模拟, 证明了所构建的本构方程的准确性。陶成等^[10]利用金相法和有限元模拟软件对 TC21 钛合金的热压缩过程进行了数值模拟研究, 将有限元模拟和热变形参数边界条件相结合, 优化了外部工

收稿日期: 2024-02-19; 修订日期: 2024-05-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB2008104)

作者简介: 谢一夔 (1992-), 男, 博士研究生

E-mail: Asher_xykch@163.com

通信作者: 王忠英 (1967-), 男, 博士, 教授级高工

E-mail: 13357968558@163.com

艺条件。刘莹莹等^[11]研究了经连续变断面循环挤压制备的细晶 TC4 钛合金热加工过程中的动态再结晶行为,并且建立了再结晶分数模型,得到的模拟结果具有较高的精度。Patryk J 等^[12]分析了 Ti64 和 Ti407 合金的热变形行为,利用修正后的有限元模型可视化了试样的温度和局部变形条件的分布,从空间和时间上模拟和解释了微观结构的演变。Irani M 等^[13]成功建立了新型的晶粒尺寸模型,并利用数值模拟方法成功预测了材料在变形过程中的晶粒尺寸分布。目前,关于 18CrNiMo7-6 齿轮钢的再结晶行为的仿真模拟还较少,本文通过热模拟试验的基础,建立了再结晶模型和晶粒尺寸模型,并将其纳入有限元软件子程序进行模拟计算,这为 18CrNiMo7-6 齿轮钢的实际锻造工艺提供了合适的理论依据和工艺参考。

1 试验材料与方案

试验用材料为 18CrNiMo7-6 齿轮钢,加工为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的试样,在 Gleeble-3500 热模拟机上进行等温单次压缩试验,18CrNiMo7-6 齿轮钢的标准化学成分如表 1 所示,余量为铁。为防止试样在高温变形时发生氧化,在加热前对试样进行抽真空处理。在试样两端放置 0.1 mm 厚度的钼箔,减少试样与碳化钨压缩砧头的摩擦,使试样在试验过程中变形均匀。将试样以 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的升温速率加热至 $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 5 min,然后将试样以 $5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的升温速率冷却至试验温度,保温 30 s 后进行单次等温压缩试验。热压缩试验流程如图 1 所示。压缩试验完成后淬火,以保留合金在不同变形条件下的高温变形组织,压缩后试样经抛光腐蚀后在蔡司显微镜下观察,图 2 给出了热变形前退火处理后试样的初始微观组织。

表 1 18CrNiMo7-6 齿轮钢的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 18CrNiMo7-6 gear steel (%, mass fraction)										
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Nb	Mo	V
0.17	0.69	0.007	0.003	0.2	1.66	1.6	0.04	0.033	0.28	0.008

2 试验结果与分析

2.1 本构方程和动态再结晶模型

真应力-真应变曲线是反应材料高温变形行为的重要参数。文献[14]建立了唯象型 Arrhenius 本构方程,计算出 18CrNiMo7-6 齿轮钢的热激活能为

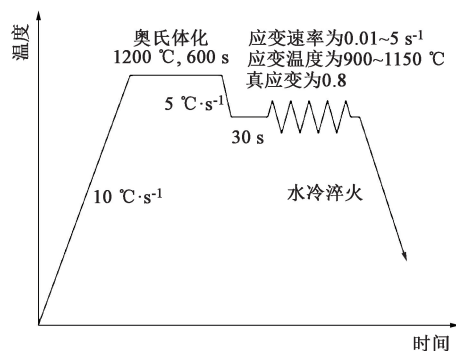


图 1 热压缩试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hot compression test

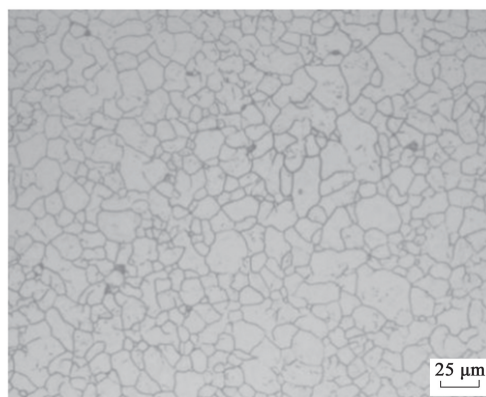


图 2 热变形前退火处理后 18CrNiMo7-6 齿轮钢的微观组织

Fig. 2 Microstructure of 18CrNiMo7-6 gear steel before thermal deformation and after annealing treatment

$350307.94 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$,该模型可以用于描述材料的应变率随温度的变化规律,研究材料的高温变形行为,包括热变形、热加工等过程,该方程的表达式如下:

$$\dot{\varepsilon} = 3.737 \times 10^{13} [\sinh(0.00897\sigma)^{5.745}] \times \exp\left(\frac{-350307.94}{RT}\right) \quad (1)$$

Zener-Hollomon 参数(Z 参数)的表达式如式(2)所示:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{350307.94}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: R 为气体常数,取 $8.314 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; T 为温度, K; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为流动应力, MPa。

材料的动态再结晶过程与塑性变形时的应变变量、应变速率、变形温度以及材料本身的性质密切相关,并且这些因素同时影响着材料发生动态再结晶的临界条件。以上述唯象型本构方程和临界再结晶模型为基础,可以提出再结晶动力学模型,以有效控制塑性变形过程中动态再结晶的程度。这种模型可以促进或抑制动态再结晶过程,从而更好地研究不同变形条件下动态再结晶的程度,并进一步研究动态

再结晶分数。Avrami M 提出了动态再结晶动力学模型中的经典指数型方程^[15]:

$$X_{\text{DRX}} = 1 - \exp \left[-K_d \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right)^{n_d} \right] \quad (\varepsilon > \varepsilon_c) \quad (3)$$

式中: X_{DRX} 为动态再结晶体积分数; K_d 和 n_d 为材料常数; ε_c 为达到临界应力时的应变; ε_p 为达到峰值应力时的应变; ε 为应变量。

求解式 (2) 需要知道其中的所有参数。首先, 需要确定的是 ε_c 和 ε_p 的取值。在文献 [14] 和文献 [16] 中, 利用真应力-真应变曲线和硬化率 (θ - σ) 曲线 (其中, θ 为硬化率, $\theta = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$), 得到了 18CrNiMo7-6 齿轮钢的临界应力与峰值应力的计算公式, 并分别绘制 ε_c 和 ε_p 与 Z 参数的关系式为: $\varepsilon_c = 0.000312Z^{0.22}$ 和 $\varepsilon_p = 0.000442Z^{0.22}$ 。

同时, 动态再结晶体积分数使用式 (4) 进行计算^[17]:

$$X_{\text{DRX}} = \frac{\sigma_r - \sigma}{\sigma_{\text{sat}} - \sigma_{\text{ss}}} \quad (\varepsilon > \varepsilon_c) \quad (4)$$

式中: σ_r 为动态恢复是主要软化机制时的流动应力; σ_{sat} 为饱和应力, 为加工硬化和动态恢复平衡时的应力; σ_{ss} 为动态再结晶而形成的稳态应力。

为了求解上述参数, 需要通过 θ - σ 曲线来确定。图 3 为变形温度为 1050 °C、应变速率为 0.01 s⁻¹ 时的 θ - σ 曲线。该曲线可用于确定饱和应力值 (σ_{sat}) 和稳态应力值 (σ_{ss})^[18-19]。

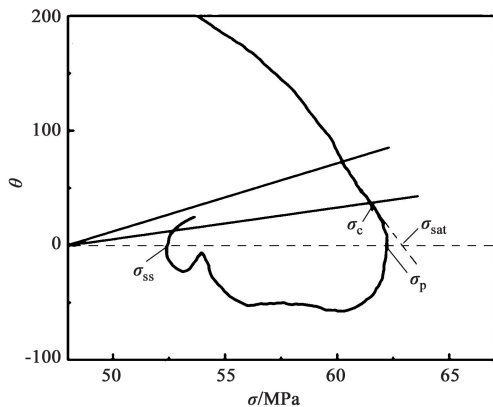


图3 变形温度为 1050 °C, 应变速率为 0.01 s⁻¹ 时的 θ - σ 曲线
Fig. 3 θ - σ curve at deformation temperature of 1050 °C and strain rate of 0.01 s⁻¹

联立式 (3) 和式 (4) 后, 对两边取对数得到式 (5):

$$\ln[-\ln(1 - X_{\text{DRX}})] = \ln K_d + n_d \ln \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right) \quad (5)$$

通过建立 $\ln[-\ln(1 - X_{\text{DRX}})]$ 与 $\ln \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right)$ 之

间的线性关系可以得出 K_d 和 n_d 的数值, 结合之前的 ε_c 和 ε_p 与 Z 参数的关系式, 可以得到 K_d 和 n_d 与 Z 参数的关系式分别为: $K_d = 0.0094Z^{0.19}$ 和 $n_d = 0.587Z^{0.056}$ 。综上计算结果, 得到 18CrNiMo7-6 齿轮钢的动态再结晶动力学公式为:

$$\begin{cases} X_{\text{DRX}} = 1 - \exp \left[-K_d \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_p} \right)^{n_d} \right] & (\varepsilon > \varepsilon_c) \\ \varepsilon_p = 0.000442Z^{0.22} \\ \varepsilon_c = 0.000312Z^{0.22} \\ K_d = 0.0094Z^{0.19} & (\dot{\varepsilon} \leq 0.1 \text{ s}^{-1}) \\ n_d = 0.587Z^{0.056} \\ Z = \dot{\varepsilon} \exp \left(\frac{350307.94}{RT} \right) \end{cases} \quad (6)$$

2.2 晶粒尺寸模型建立

再结晶是热变形过程中最主要的软化机制。在动态再结晶进行过程中晶粒大小会产生重要影响, 动态再结晶过程中引起的晶粒度变化, 最终对金属材料的力学性能起到重要的作用。文献 [20] 和文献 [21] 中热变形晶粒尺寸与 Zener-Hollomon 参数呈正相关, 且动态再结晶稳态晶粒尺寸计算模型为:

$$D_{\text{DRX}} = CZ^n \quad (7)$$

式中: D_{DRX} 为动态再结晶稳态晶粒尺寸; C 和 n 为材料本身相关的常数。

上文中已经计算出 $Z = \dot{\varepsilon} \exp \left(\frac{350307.94}{RT} \right)$, 由于动态再结晶晶粒形核与生长的过程受到不同的热变形参数的影响, 生成的最终晶粒尺寸并不相同, 所以需要建立平均晶粒尺寸模型, 平均晶粒尺寸模型^[22-23]如式 (8) 所示:

$$D_{\text{DRX}} = a_2 \varepsilon^{n_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} \exp \left(-\frac{Q_d}{RT} \right) \quad (8)$$

式中: a_2 、 n_2 、 m_3 为材料相关常数; Q_d 为热激活能, (J · mol⁻¹)。

式 (8) 中影响动态再结晶平均晶粒直径的因素有 3 种: 应变量、变形温度和应变速率。为了计算出尺寸模型公式, 需要知道不同影响因素下的平均晶粒尺寸, 通过 Image-Pro 软件中 Measure 功能进行标定, 统计得到变形试样中心位置的平均晶粒尺寸, 见表 2。

表 2 不同应变参数下试样的平均晶粒尺寸

Table 2 Average grain sizes of samples under different strain parameters

序号	变形温度/℃	应变速率/s ⁻¹	应变量	平均晶粒尺寸/μm
1	900	0.1	0.8	6.11
2	950	0.1	0.8	8.53
3	1000	0.1	0.8	11.14
4	1050	0.1	0.8	18.32
5	1100	0.1	0.8	19.32
6	1150	0.1	0.8	24.86
7	1050	0.01	0.8	19.43
8	1050	1	0.8	13.45
9	1050	5	0.8	10.92
10	1050	0.01	0.05	266.75
11	1050	0.01	0.3	43.35
12	1050	0.01	0.6	37.99

将表 2 中的数据代入式 (8) 进行拟合, 得到 $a_2 = 16983.54$, $n_2 = -0.91$, $m_3 = -0.11$, $Q_d = 81526.25 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。拟合后得到 18CrNiMo7-6 齿轮钢在试验参数内的平均晶粒尺寸计算公式如下:

$$D_{\text{DRX}} = 16983.54 \varepsilon^{-0.91} \dot{\varepsilon}^{-0.11} \exp\left(-\frac{81526.25}{RT}\right) \quad (9)$$

3 数值模拟结果与分析

3.1 有限元模型建立

将式 (1)、式 (2)、式 (6) 和式 (9) 嵌入 Deform-3D 软件子程序中进行模拟计算, 将模拟得到的平均晶粒尺寸与试验结果进行对比分析, 由于材料库中的再结晶公式与之前推导出来的再结晶公式有差异, 需要进行变换, 首先需要确定 50%再结晶应变 $\varepsilon_{0.5}$, 可以借助式 (4) 得到应变 ε 与 X_{DRX} 之间的关系曲线。图 4 为变形温度为 1050 ℃、应变速率为 0.01 s⁻¹ 时的 ε - X_{DRX} 关系曲线, 可以很容易地得到 50 %动态再结晶应变 $\varepsilon_{0.5}$ 。最终算出 50%再结晶应变 $\varepsilon_{0.5}$ 与峰值应变之间存在线性关系: $\varepsilon_{0.5}/\varepsilon_p = 1.30$ 。

表 3 为 18CrNiMo7-6 齿轮钢动态再结晶动力学数学模型所需要的模型, 将再结晶动力学模型公式和再结晶晶粒尺寸预测公式代入软件子程序中进行模拟计算, 将模拟得到的平均晶粒尺寸与试验结果进行对比分析, 以验证计算机进行组织模拟的可靠性。

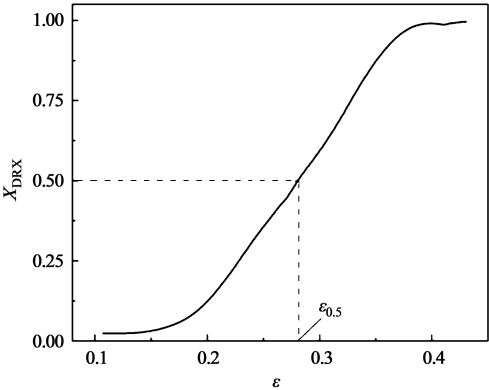


图 4 变形温度 1050 ℃、应变速率 0.01 s⁻¹ 时的 ε - X_{DRX} 关系曲线

Fig. 4 Relation curve of ε - X_{DRX} at deformation temperature of 1050 ℃ and strain rate of 0.01 s⁻¹

表 3 18CrNiMo7-6 齿轮钢再结晶动力学数学模型

Table 3 Mathematical models of recrystallization kinetics for 18CrNiMo7-6 gear steel

参数	公式
动力学方程	$X_{\text{DRX}} = 1 - \exp\left[-\beta_d \left(\frac{\varepsilon - a_{10}\varepsilon_p}{\varepsilon_{0.5}}\right)^{n_d}\right]$
50%再结晶应变 ($\varepsilon_{0.5}$)	$\varepsilon_{0.5} = 0.000575 \dot{\varepsilon}^{0.22} \exp\left(\frac{77097.75}{RT}\right)$
晶粒粒度模型	$D_{\text{DRX}} = 16983.54 \varepsilon^{-0.91} \dot{\varepsilon}^{-0.11} \times \exp\left(-\frac{81526.25}{RT}\right)$
峰值应变 (ε_p)	$\varepsilon_p = 0.000442 Z^{0.22}$
Zener-Hollomon 参数	$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{350307.94}{RT}\right)$

3.2 变形温度对动态再结晶的影响

图 5 和图 6 分别为应变速率为 0.1 s⁻¹、不同变形温度下的晶粒尺寸和再结晶比例分布模拟结果, 此时的应变量为 0.8。从图 5 中可以看出, 随着变形温度升高, 试样中心部位和两侧膨胀区域的颜色加深, 这代表着粗晶区域的占比增大; 试样两端中间部位的难变形区域的晶粒尺寸均大于 100 μm, 从晶粒尺寸分布云图中可以看出, 950 ℃时平均晶粒尺寸较小, 然而大尺寸的晶粒占比也较大, 这表明混晶的现象比较严重。1050 ℃时的晶粒尺寸也较小, 同时粗晶的占比也减少, 再结晶平均晶粒尺寸随着变形温度的降低而增减小, 但是较低的变形温度会造成混晶。由图 6 可以看出, 试样中心区域均发生了完全再结晶, 并且随着变形温度的增大, 完全再结晶的区域也在增大, 同时细晶区的占比也在增大。

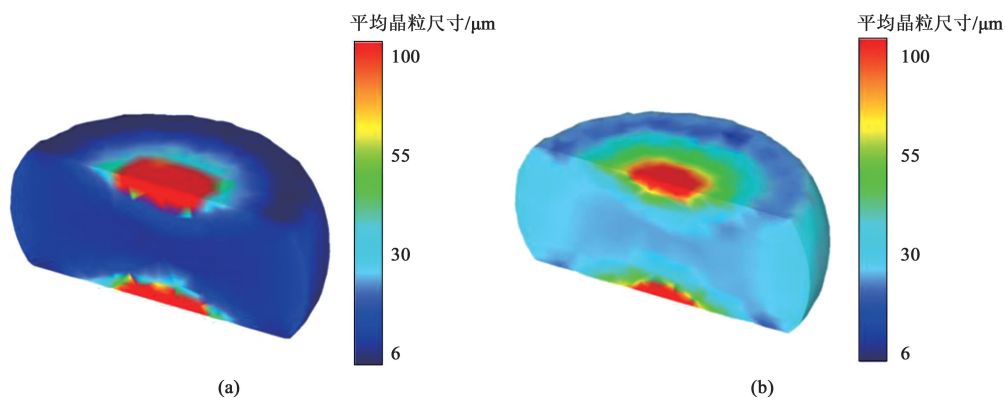


图 5 应变速率为 0.1 s^{-1} 、不同变形温度下的晶粒尺寸模拟结果
(a) 950 °C (b) 1050 °C

Fig. 5 Simulation results of grain size under different deformation temperatures and strain rate of 0.1 s^{-1}

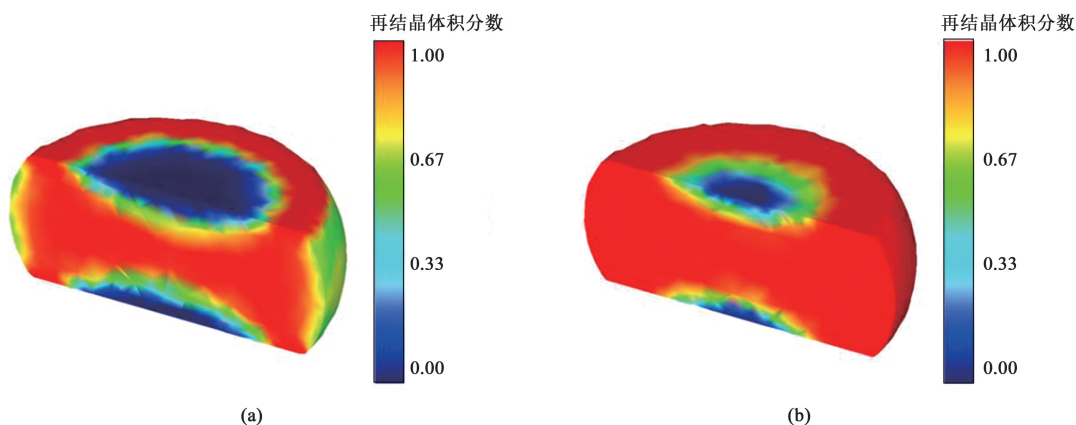


图 6 不同变形温度下再结晶体积分分数分布模拟结果
(a) 950 °C (b) 1050 °C

Fig. 6 Simulation results of recrystallization volume fraction distribution under different deformation temperatures

3.3 变形速率对动态再结晶的影响

图 7 和图 8 分别为变形温度为 1050 °C、不同应变速率下的晶粒尺寸和再结晶比例分布模拟结果,

此时的应变量为 0.8。图 7 中可以看出, 随着应变速率的降低, 试样中心部位和膨胀区域的晶粒尺寸增大, 两端的粗晶区域逐渐增大, 晶粒尺寸同时出

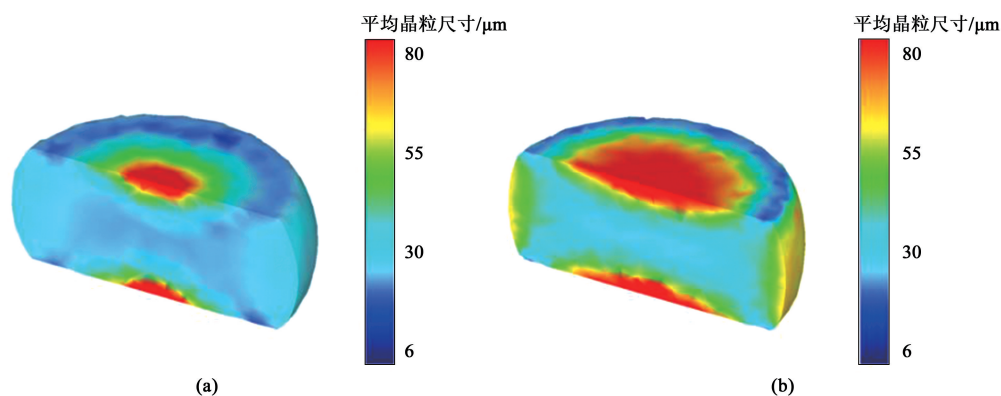


图 7 变形温度为 1050 °C、不同的应变速率下的晶粒尺寸模拟结果
(a) 0.1 s^{-1} (b) 0.01 s^{-1}

Fig. 7 Simulation results of grain size under different strain rate and deformation temperature of 1050 °C

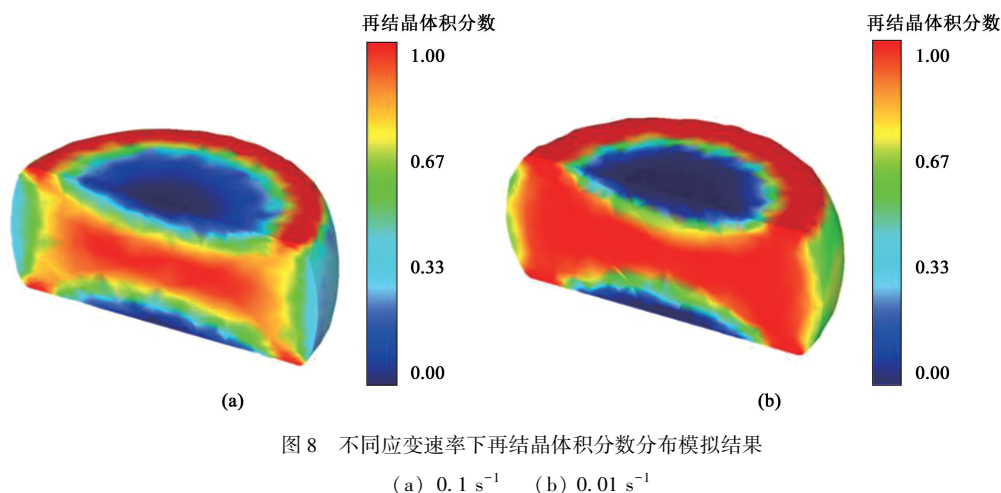


Fig. 8 Simulation results of recrystallization volume fraction distribution under different strain rates

现增大的趋势。同时,由图8可以看出,在应变速率为 0.1 s^{-1} 时,试样中心区域发生了完全再结晶,在应变速率为 0.01 s^{-1} 的情况下,试样再结晶不完全发生的区域较大,这使得该条件下的平均晶粒尺寸较大,然而该条件下中心区域的再结晶体积分数达到了完全再结晶,总体上的再结晶程度较低。再结晶程度较低的区域,晶粒也比较粗大。这是由于较低的应变速率不利于晶界处的位错的积累,从而无法提供再结晶形核过程中需要的驱动力。并且在低应变速率较低时,存储的畸变能较低。由于形变速度慢,畸变能分布较为均匀,降低了局部的不稳定性,这有利于晶粒均匀长大。

3.4 变形区域对结晶尺寸的影响

图9为变形温度为 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为 0.1 s^{-1} 、应变量为 0.8 时的模拟晶粒尺寸分布云图与金相图片的对比。模拟计算结果显示,在试样两端的粗晶区,最大的晶粒尺寸在 $142.7\sim 156.2\text{ }\mu\text{m}$ 之间,这与图9c中的晶粒金相图片相吻合。在膨胀区域的模拟晶粒尺寸在 $36.6\sim 48.1\text{ }\mu\text{m}$ 之间,基本对应了图9a中的晶粒尺寸,在变形量最大、晶粒尺寸最细的中心部位,模拟得出晶粒尺寸在 $21.2\sim 31.4\text{ }\mu\text{m}$ 之间,如图9b相吻合。由此可见,再结晶晶粒尺寸预测公式的预测精准度较高,对现实生产具有一定的指导意义。

4 结论

(1) 依据重载高线速度齿轮材料18CrNiMo7-6齿轮钢在高温变形过程中的动态再结晶体积分数随工艺参数的变化规律,建立了该合金的动态再结晶

动力学模型。

(2) 建立了晶粒尺寸模型,结合尺寸模型和结晶动力学模型,应用Deform-3D对试验材料进行动态再结晶模拟,建立单道次热压缩有限元模拟模型,分析了再结晶程度与混晶之间的关系。模拟发现,试样中心区域均发生了完全再结晶,并且随着变形温度的增大,完全再结晶的区域也在增大,在低应变速率时,由于畸变能和位错积累的不足,使得再结晶发生不完全区域增大。

(3) 再结晶平均晶粒尺寸随着变形温度的降低而减小,但是较低的变形温度会造成混晶。较低的应变速率下晶粒的尺寸较大,随着变形的增加,中心部位和膨胀区域的晶粒尺寸降低,但是两端的晶粒尺寸和粗晶区域增大,混晶的情况更加明显。

参考文献:

- [1] Wang G, Gao C, Zhang Y X, et al. Size effect on the fatigue performance of 18CrNiMo7-6 alloy steel [J]. Steel Research International, 2021, 92 (9): 2100054.
- [2] Yue Z, Shuyan W, Guang T X, et al. Effect of microstructure on fatigue-crack propagation of 18CrNiMo7-6 high-strength steel [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 163: 107027.
- [3] Bambach D M, Stieben A, Bleck W. 18CrNiMo7-6 with TRIP-effect for increasing the damage tolerance of gear components-Part I: Alloy design [J]. Materials Science Forum, 2014, 3129 (783-786): 633-638.
- [4] Wang G, Zhang Y, Gao C, et al. Effect of residual stress and microstructure on corrosion resistance of carburised 18CrNiMo7-6 steel [J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2020, 67 (4): 357-366.
- [5] 李腾. 700 MPa 级汽车大梁钢的动态再结晶与数值模拟 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.

Li T. Dynamic Recrystallization and Numerical Simulation of

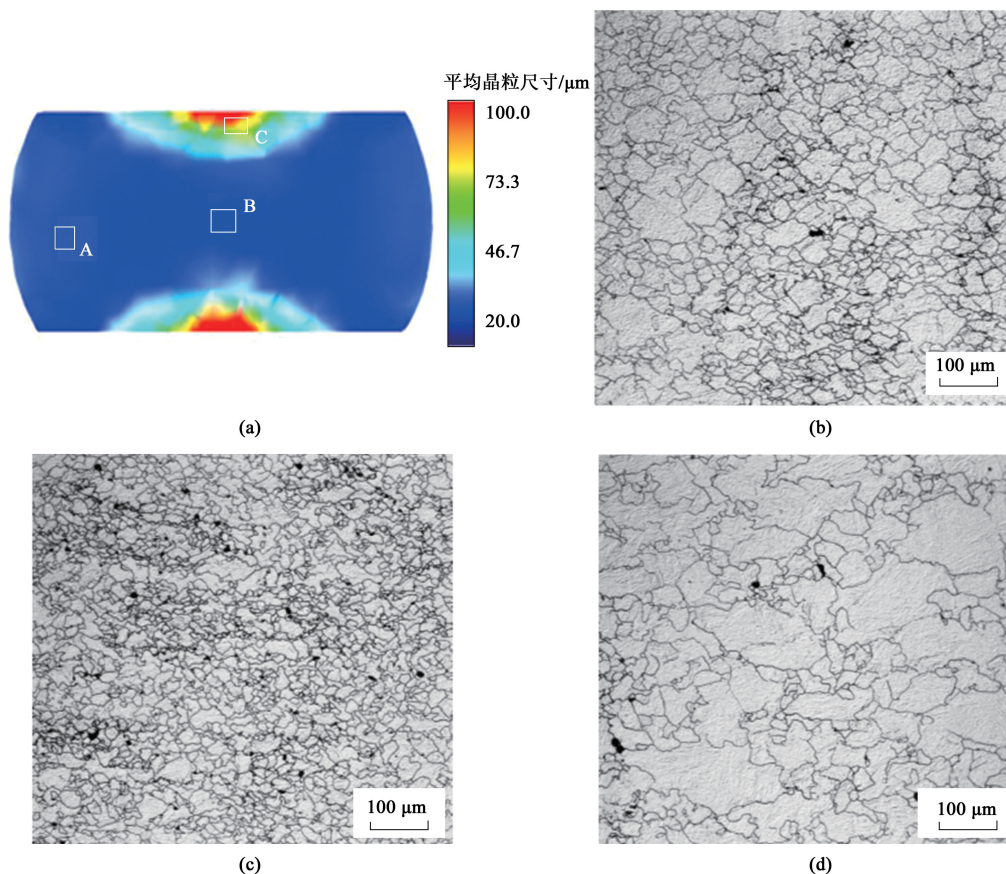


图9 模拟晶粒尺寸分布云图与金相组织对比

(a) 分布云图 (b) 区域 A (c) 区域 B (d) 区域 C

Fig. 9 Comparison between grain size distribution nephogram by simulation and metallographic structures

(a) Distribution nephogram (b) Area A (c) Area B (d) Area C

700 MPa Grade Automobile Beam Steel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.

- [6] 李帮松, 曾祥帅, 曾梦婷, 等. 锻造态 GH4169 高温合金热变形行为的有限元模拟 [J]. 热处理, 2023, 38 (3): 18-24.

Li B S, Zeng X S, Zeng M T, et al. Finite element simulation of hot deformation behavior of as-forged GH4169 superalloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 38 (3): 18-24.

- [7] 邱媛媛. 下压速率对 42CrMo 钢动态再结晶的影响规律 [J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57 (2): 106-109.

Qiu Y Y. Influence rule of pressing rate on dynamic recrystallization of 42CrMo steel [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2022, 57 (2): 106-109.

- [8] 杜帅, 李颖, 李敏, 等. H156 热作模具钢动态再结晶的试验与数值模拟研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 245-252.

Du S, Li Y, Li M, et al. Experiment and numerical simulation study on dynamic recrystallization for H156 hot work die steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 245-252.

- [9] 苏斌, 孙瑜蔓, 陈刚, 等. RM80 超高强度钢热变形行为及有限元模拟 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (11): 212-220.

Su B, Sun Y M, Chen G, et al. Thermal deformation behavior and finite element simulation on RM80 ultra-high strength steel [J].

Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (11): 212-220.

- [10] 陶成, 崔霞, 欧阳德来, 等. TC21 钛合金热压缩工艺数值模拟与试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (8): 195-201.

Tao C, Cui X, Ouyang D L, et al. Numerical simulation and experimental study on hot compression process of TC21 titanium alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (8): 195-201.

- [11] 刘莹莹, 李嘉懿, 郭文虎, 等. 细晶 TC4 钛合金的动态再结晶行为及数值模拟 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (11): 4137-4145.

Liu Y Y, Li J Y, Guo W H, et al. Dynamic recrystallization behavior and numerical simulation of fine grain TC4 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (11): 4137-4145.

- [12] Patryk J, Hugh S, Sumeet M, et al. Finite element modeling of hot compression testing of titanium alloys [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31 (9): 7160-7175.

- [13] Irani M, Lim S, Joun M. Experimental and numerical study on the temperature sensitivity of the dynamic recrystallization activation energy and strain rate exponent in the JMAK model [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8 (2): 1616-1627.

(下转第 229 页)