

GH90 高温合金动态再结晶数学模型构建及验证

吕航鹰 黄庆华 齐永杰 余新平
(浙江广厦建设职业技术大学智能制造学院)

摘 要 为研究 GH90 高温合金的动态再结晶行为,在 Gleeble 1500 热模拟试验机上开展了不同温度和应变速率下的等温压缩试验。根据获得的真应力-真应变曲线分析可知,高温状态下 GH90 合金的主要动态软化机制为动态再结晶。通过对真应力-真应变数据进行分析 and 处理,构建了 GH90 合金的动态再结晶临界应变模型和体积分数模型。通过试样微观组织和模型预测结果的对比表明,所构建的 GH90 合金动态再结晶数学模型能够对 GH90 合金动态再结晶行为进行准确描述。

关键词 GH90 高温合金;动态再结晶;数学模型

中图分类号 TG319; TG113.12

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Construction and Verification of Dynamic Recrystallization Mathematical Model for GH90 Superalloy

Lü Hangying, Huang Qinghua, Qi Yongjie, Yu Xinping

(School of Intelligent Manufacturing, Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction)

Abstract: Compression tests under different temperatures and strain rates were conducted on Gleeble 1500 thermal simulated test machine to investigate the dynamic recrystallization behaviors of GH90 superalloy. According to the analysis on the true stress-strain curves, the dynamic softening mechanism of GH90 alloy is dominated by dynamic recrystallization at elevated temperature. Via the analysis and processing of the true stress-strain curves, the dynamic recrystallization critical strain model and volume fraction model of GH90 alloy were constructed. The comparisons between the microstructure of specimens and model prediction results indicate that the constructed dynamic recrystallization mathematical model can accurately describe the dynamic recrystallization behaviors of GH90 alloy.

Key Words: GH90 Superalloy, Dynamic Recrystallization, Mathematical Model

GH90 镍基高温合金在 1 093~1 148 K 时仍能够保持良好的耐腐蚀和抗氧化性,较高的抗蠕变能力、抗拉强度和热疲劳强度^[1],已被广泛应用于叶片、涡轮盘、高温卡箍、高温紧固件及密封件等重要领域。镍基高温合金因其优异的强度和硬度而被列为常温难加工材料^[2-3],所以镍基高温合金通常在高温条件下进行加工^[4]。在高温状态下进行塑性加工时,高温合金不仅会发生由材料流动引起的宏观形状改变,也会发生内部的微观组织演变^[5],且微观组织演变会直接影响和决定制件的性能。动态再结晶作为高温合金一种典型的微观组织演变形式^[6],通过动态再结晶过程能够形成新的细小均匀的晶粒,从而提高制件的性能。因此,对于 GH90 高温合金热塑性变形过程中动态再结晶的研究

具有积极意义。

本研究通过在 1 100~1 400 K、0.001~1 s⁻¹ 的温度和应变速率范围内进行等温压缩试验,获得了 GH90 合金的真应力-真应变数据和微观组织,并研究了 GH90 合金的动态再结晶行为。根据 GH90 合金的热变形行为及微观组织演变分析了其主要的动态软化机制,并通过真应力-真应变数据分析和处理构建了 GH90 合金的动态再结晶临界应变模型和体积分数模型,验证了动态再结晶数学模型的可靠性,以期为 GH90 高温合金的热塑性变形工艺制定和优化提供参考。

1 试验材料及方法

试验合金为 GH90 高温合金,其化学成分见表 1。

收稿日期:2022-10-24;修改稿收到日期:2022-11-20

基金项目:浙江省教育厅一般科研项目(Y202147705);浙江广厦建设职业技术大学机器人技术专业内涵建设子项目(BK0807)

第一作者简介:吕航鹰,女,1987 年出生,硕士,浙江东阳(322100),E-mail:lvhangying2010@sina.com

引用格式:吕航鹰,黄庆华,齐永杰,等. GH90 高温合金动态再结晶数学模型构建及验证[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):599-606.

LÜ H Y, HUANG Q H, QI Y J, et al. Construction and verification of dynamic recrystallization mathematical model for GH90 superalloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):599-606.

从热轧棒材坯料上加工出 $\phi 10\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的试样用于等温压缩试验。等温压缩试验参照 ASTM E209-00 标准在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行^[7-8], 具体工艺路线见图 1。首先将试样端面涂敷石墨并垫上钼箔后将试样装夹在热模拟试验机砧座间。将热电偶连接线采用焊接方式固定于试样上记录温度。将试样以 300 K/min 的恒定速度加热至热压缩温度(1 100、1 200、1 300 或 1 400 K)并保温 180 s, 消除试样内部温度差后分别以 0.001、0.01、0.1 及 1 s⁻¹ 的应变速率开始进行热压缩至试样达到初始高度的 45%(5.4 mm)。每次压缩后, 立即对高温变形试样进行水淬以保留压缩完成时的微观组织。然后将变形后的试样沿轴线切割, 打磨并剖光切割面, 采用成分(体积分数)为 12% 的 HF+33% 的 HNO₃+55% 的 H₂O 组成的腐蚀剂对试样剖切面中心区域待观察表面进行处理, 并用 GMM-800 研究级金相显微镜进行微观组织观察和拍摄。晶粒尺寸测量采用 Image-Pro Plus 软件进行。在压缩过程中, 应力和应变数据由装有自动数据采集系统的计算机系统进行监测和记录。

表 1 GH90 高温合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of GH90 superalloy													%
ω_B													
Cr	Co	Ti	Al	Fe	Si	Mn	C	Cu	B	P	S	Ni	
19.2	16.5	2.56	2.36	1.21	0.33	0.2	0.11	0.1	0.1	0.02	0.01	余量	

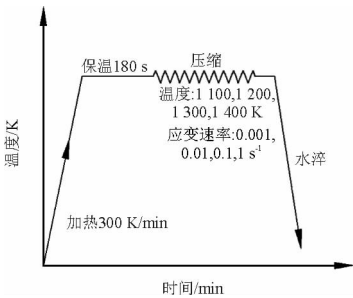


图 1 GH90 合金等温压缩试验过程

Fig.1 Procedures of the isothermal compression tests for GH90 superalloy

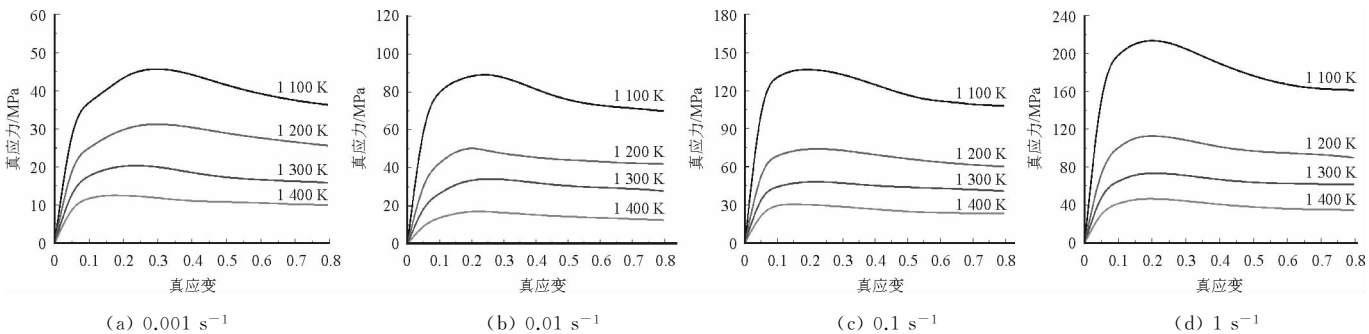


图 3 不同应变速率、应变温度下 GH90 合金真应力-真应变曲线

Fig.3 True stress-strain curves of GH90 superalloy under different strain rates and temperatures

个相当恒定的水平,基本上不随应变的增加而增加。由

2 动态软化机制研究

GH90 高温合金原始微观组织及晶粒尺寸分布见图 2。可以看出,其原始微观组织由尺寸均匀的等轴晶和少量孪晶组成,晶粒尺寸基本呈正态分布。经统计, GH90 高温合金原始平均晶粒尺寸约为 28 μm 。

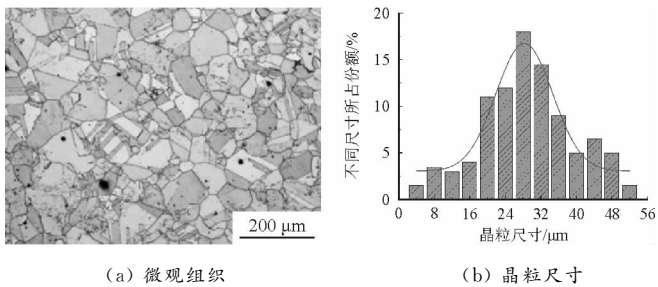


图 2 GH90 高温合金原始微观组织及晶粒尺寸分布
Fig.2 Original microstructure and grain size distribution of GH90 superalloy

图 3 是 GH90 合金在温度为 1 100~1 400 K、应变速率为 0.001~1 s⁻¹、真应变为 0~0.8 范围内的真应力-真应变曲线。可以看出, GH90 合金应力-应变曲线演变过程主要表现为 3 个阶段。第 1 阶段为加工硬化阶段,其特点是流动应力急剧上升。在这一阶段,变形过程中位错的大量产生和增殖导致加工硬化迅速发展,同时,由于在高温状态下容易发生位错交滑移、攀移和缠结,位错湮灭所伴随的动态回复软化作用较弱,无法抵消加工硬化作用^[9]。第 2 阶段为软化阶段,此时 GH90 合金流动应力增长速率随着应变的增加而逐渐降低直至负值,其流动应力则先达到峰值再逐渐降低,软化作用明显增强,这是由于 GH90 合金在高温变形过程中触发了动态再结晶。当动态回复和动态再结晶引起的动态软化率与加工硬化率相等时,流动应力达到峰值,由于动态再结晶的存在,流动应力逐渐降低直至稳定阶段。在第 3 阶段(稳定阶段),流动应力保持在一

此看出,动态再结晶是 GH90 合金的主要动态软化机

制。

可以发现,变形温度和应变速率对 GH90 合金的流动应力均有明显影响。对比可知,流动应力随变形温度的升高和应变速率的降低而降低。从微观角度上讲,这与 GH90 合金的动态软化机制密不可分。由于较低的应变速率为动态再结晶形核能量积累提供了更长的时间,较高的变形温度则能够提高原子活性和晶界流动能力,促进位错湮灭和动态再结晶晶粒形核和长大,从而降低了流动应力水平^[10]。此外,从图 3 还可发现,较高的温度(如 1 300 K 和 1 400 K)下,试样压缩完成时曲线已经达到或接近稳态,说明动态再结晶程度较高,而在较低温度下,试样压缩完成时曲线仍处于下降阶段,表明动态再结晶程度相对较低。

3 动态再结晶动力学模型

3.1 临界应变模型

本研究通过 Sellars 模型来描述 GH90 高温合金动态再结晶发生的临界条件。Sellars 模型将动态再结晶的临界应变和峰值应变描述为线性关系,而峰值应变的主要影响因素有初始晶粒尺寸、应变速率和变形温度,

其关系可表示^[11]。

$$\epsilon_c = a\epsilon_p \tag{1}$$

$$\epsilon_p = a_1 d_0^{n_1} \dot{\epsilon}^{m_1} \exp[Q_1/(RT)] \tag{2}$$

式中, a 、 a_1 、 n_1 、 m_1 为常数; ϵ_c 和 ϵ_p 分别为临界应变和峰值应变; d_0 为原始晶粒尺寸; Q_1 为热变形激活能; T 和 $\dot{\epsilon}$ 分别为温度和应变速率; R 为气体摩尔常数,其值为 8.314 J/(mol · K)。

相关研究表明,发生动态再结晶的临界条件通常可以认为是当应变硬化率 $|\text{d}\theta/\text{d}\sigma|$ 达到最小值时,对应于 $(\text{d}\sigma/\text{d}\epsilon)-\sigma$ 曲线的拐点^[12]。 θ 为加工硬化率,可由图 3 中的压缩试样真应变-应力数据计算得到。通过计算得到了不同变形条件下的 GH90 高温合金变形过程中的 $\theta-\sigma$ 曲线,见图 4。可以看出,不同条件下 $\theta-\sigma$ 曲线都存在明显的拐点,这表明合金在等温压缩过程中均发生了动态再结晶。通过不同条件下 $\theta-\sigma$ 曲线的拐点能够确定不同变形条件下的临界应变和临界应力。同时,可以通过真应力-真应变数据确定峰值应力和峰值应变。

$$\theta = \text{d}\sigma/\text{d}\epsilon \tag{3}$$

式中, σ 为真应力; ϵ 为真应变。

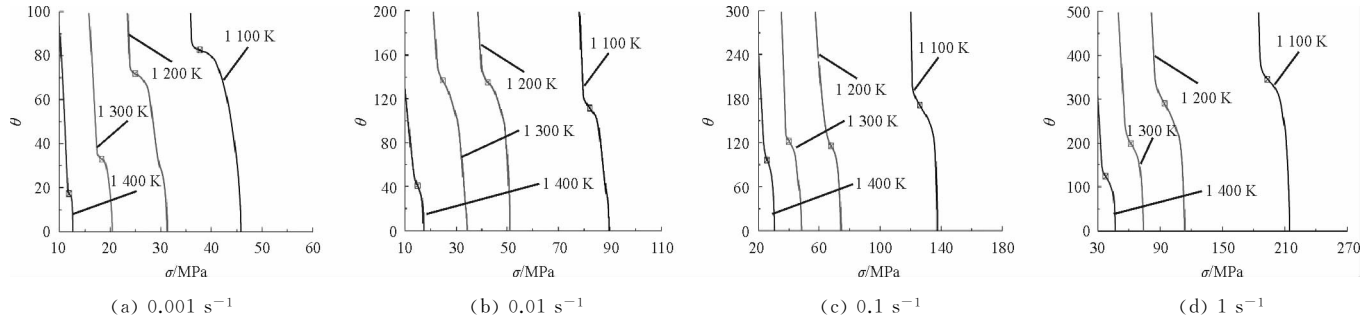


图 4 不同温度和应变速率条件下的 $\theta-\sigma$ 关系曲线

Fig.4 $\theta-\sigma$ relationship curves under different temperatures or strain rates

表 2 为不同应变速率和温度下的再结晶临界应变和峰值应变值。对临界应变-峰值应变数据点进行线性拟合,可获得 $\epsilon_c-\epsilon_p$ 峰值应变的线性关系,见图 5。这条拟合直线的斜率值被视为材料常数 a 的值,经计算, $a=0.378$ 。

表 2 不同变形条件下的 GH90 合金动态再结晶临界应变和峰值应变

Tab.2 Critical strains and peak strains for dynamic recrystallization under different temperatures or strain rates												
温度/ K	应变速率/s ⁻¹											
	0.001		0.01		0.1		1					
	ε _p	ε _c	ε _p	ε _c	ε _p	ε _c	ε _p	ε _c				
1 100	0.241	0.076	3	0.243	0.082	4	0.209	0.083	2	0.217	0.084	3
1 200	0.228	0.075	3	0.194	0.077	0	0.218	0.080	3	0.192	0.080	8
1 300	0.231	0.075	8	0.242	0.076	3	0.211	0.076	7	0.186	0.080	2
1 400	0.164	0.071	6	0.181	0.073	3	0.164	0.074	2	0.179	0.076	4

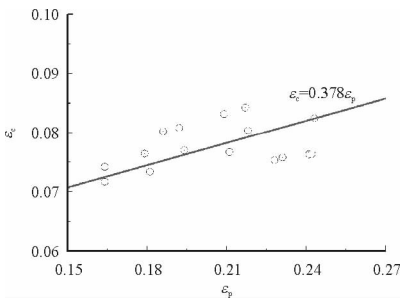


图 5 临界应变和峰值应变关系

Fig.5 Relationship between the critical strains and peak strains

在本研究中,忽略了初始晶粒尺寸对临界应变的影响,即 $n_1=0$,式(2)可简化为:

$$\epsilon_p = a_1 \dot{\epsilon}^{m_1} \exp[Q_1/(RT)] \tag{4}$$

式(4)两边取自然对数,可得:

$$\ln \epsilon_p = \ln a_1 + m_1 \ln \dot{\epsilon} + Q/(RT) \tag{5}$$

则在一定温度下,常数 m_1 可表示为:

$$m_1 = \left. \frac{\partial \ln \epsilon_p}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right|_T \quad (6)$$

通过表 2 中的数据,可获得不同温度下 $\ln \epsilon_p - \ln \dot{\epsilon}$ 的数据点,通过对 4 个不同温度下的数据点进行线性拟合,见图 6,将拟合直线的斜率作为不同温度下的常数值 m_1 ,其平均值可确定为最终的 m_1 值。通过实际计算可知, $m_1 = 0.01699$ 。

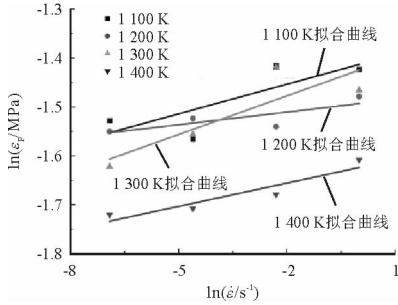


图 6 $\ln \epsilon_p$ 和 $\ln \dot{\epsilon}$ 的线性关系

Fig.6 Linear relationship between $\ln \epsilon_p$ and $\ln \dot{\epsilon}$

同理,在一定应变速率下,常数 Q_1 可表示为:

$$Q_1 = R \cdot \left. \frac{\partial \ln \epsilon_p}{\partial (1/T)} \right|_{\dot{\epsilon}} \quad (7)$$

图 7 为不同应变速率下的 $\ln \epsilon_p - 1/(RT)$ 数据点的线性拟合,将拟合直线的平均值作为 Q_1 的值。经计算, $Q_1 = 6898 \text{ J/mol}$ 。

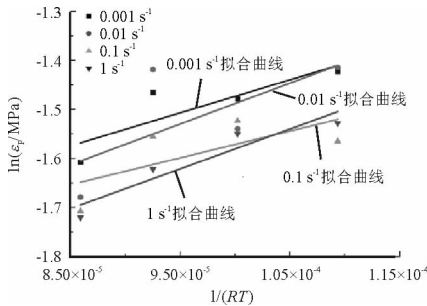


图 7 $\ln \epsilon_p$ 和 $1/(RT)$ 的线性关系

Fig.7 Linear relationship between $\ln \epsilon_p$ and $1/(RT)$

将计算得到的 m_1 和 Q_1 值代入式(4),可以得到 GH90 合金在 4 个不同应变速率和温度下的 16 个 a_1 的数值,并求得其平均值 0.0067 作为最终的 a_1 值。

经以上分析和计算,可得 GH90 合金动态再结晶临界应变模型如下:

$$\epsilon_c = 0.378 \epsilon_p \quad (8)$$

$$\epsilon_p = 0.0067 \dot{\epsilon}^{0.01699} \exp[6898/(RT)] \quad (9)$$

3.2 动态再结晶体积分模型

随着热塑性变形的进行,位错会不断增加,在某一应变量下,晶粒发生动态再结晶形核并在晶界、变形带和孪晶界附近长大。再结晶体积分和真应变之间的

关系,通常表示为^[13-15]:

$$X_{\text{DRX}} = 1 - \exp \left[-\beta_d \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}} \right)^{k_d} \right] \quad (10)$$

式中, X_{DRX} 为动态再结晶晶粒的体积分数; $\epsilon_{0.5}$ 为动态再结晶体积分数为 50% 时对应的真实应变; β_d 、 k_d 为模型常数。

$\epsilon_{0.5}$ 可表示为^[16]:

$$\epsilon_{0.5} = a_2 d_0^{n_2} \dot{\epsilon}^{m_2} \exp[Q_2/(RT)] \quad (11)$$

式中, a_2 、 n_2 、 m_2 为材料常数; Q_2 为动态再结晶激活能。

由于需要进行大量的复杂且定量的金相组织测量,根据微观组织通常难以确定不同变形条件下的动态再结晶体积分数。由前述分析结果可知,GH90 合金在热变形过程中的流动应力与其微观组织演变息息相关。因此,可以通过合金的真应力-真应变曲线包含的信息来分析合金的动态再结晶行为。通过下式计算不同变形条件下的动态再结晶体积分数^[17]。

$$X_{\text{DRX}} = \frac{(\sigma_{\text{drvx}})^2 - (\sigma_{\text{drxx}})^2}{(\sigma_{\text{drvss}})^2 - (\sigma_{\text{drxss}})^2} \quad (12)$$

式中, σ_{drxx} 和 σ_{drvx} 分别为合金发生动态再结晶和仅发生动态回复的过程中的真应力; σ_{drxss} 和 σ_{drvss} 分别为合金发生完全的动态再结晶和仅发生动态回复且达到稳定状态时的真应力。

式(12)中, σ_{drxx} 可通过真应力-真应变曲线数据直接读取该数值; σ_{drvx} 可通过 $(d\sigma/d\epsilon) - \sigma$ 曲线上拐点切线确定,见图 8。沿图 8 中的切线(BD), $\theta = d\sigma/d\epsilon$ 随着真应力值线性降低到 0。将 $(d\sigma/d\epsilon) - \sigma$ 曲线上拐点切线用数学形式可表示成 $\theta = k\sigma + b$, k 为直线斜率, b 为直线截距,通过将其转化为函数表达,可表示为:

$$\theta = d\sigma(\epsilon)/d\epsilon = \sigma'(\epsilon) = k\sigma(\epsilon) + b \quad (13)$$

通过图 4 不同变形条件下 $(d\sigma/d\epsilon) - \sigma$ 关系曲线中的拐点数据,可计算出不同变形条件下的斜率 k 和截距 b 。将计算得到的 k 和 b 值代入并求解式(13)所示的微分方程,即可得到 $\sigma(\epsilon)$ 的表达式,进而可计算出不同应变下的应力值,即 σ_{drvx} 。同时,通过 $\sigma(\epsilon)$ 表达式求极限,可得到动态回复达到稳定状态时的真应力,即 σ_{drxss} 。 σ_{drxss} 是合金发生完全再结晶时的稳态真应力值,即图 9 中的真应力-应变曲线的最终稳态值。

通过以上方法计算,得到不同变形条件下的 GH90 合金动态再结晶体积分数曲线见图 10。可以发现,在特定的应变速率下,达到相同的动态再结晶体积分数所需发生的应变随着变形温度的降低而增加,即温度降低将延缓 GH90 合金动态再结晶的发生。同时,在特定的温度下,达到相同的动态再结晶体积分数所需的应变随着应变速率的增加而增加。这种影响可以归因于晶界的流动性(生长动力)随着应变速率的增加和温度的

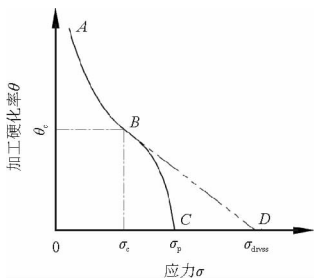


图 8 通过横坐标截距确定 σ_{drss} 的 θ - σ 图
Fig.8 θ - σ plot of σ_{drss} determined by horizontal intercept

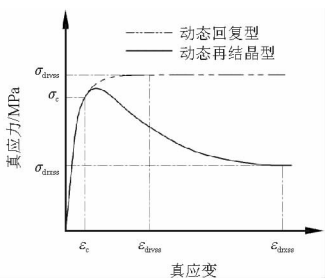
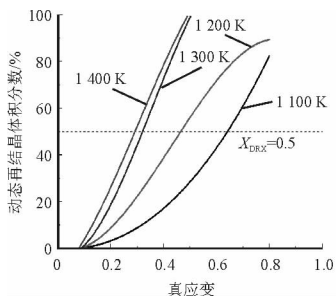
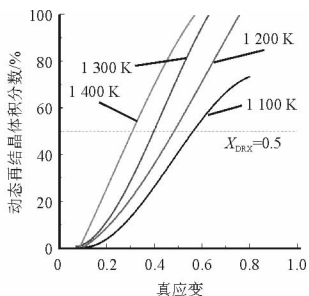


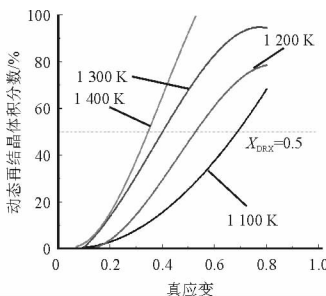
图 9 典型的动态再结晶和动态回复型真应力-真应变流动曲线
Fig.9 Typical dynamic recrystallization type and dynamic recovery type true stress-strain curves



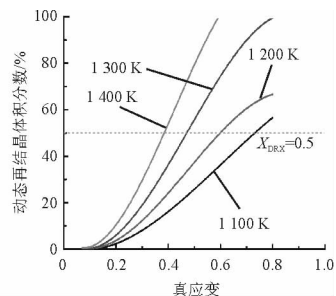
(a) 0.001 s⁻¹



(b) 0.01 s⁻¹



(c) 0.1 s⁻¹



(d) 1 s⁻¹

图 10 不同温度和应变速率条件下的动态再结晶体积分数

Fig.10 Dynamic recrystallization fractions under different temperatures or strain rates

表 3 不同温度和应变速率下的 $\epsilon_{0.5}$ 值

Tab.3 Values of $\epsilon_{0.5}$ under different temperatures or strain rates

温度/ K	应变速率/s ⁻¹			
	0.001	0.01	0.1	1
1 100	0.645	0.598	0.693	0.733
1 200	0.464	0.482	0.527	0.598
1 300	0.321	0.398	0.401	0.472
1 400	0.292	0.309	0.345	0.384

线斜率可作为 k_d 的取值,经计算, $k_d = 1.902$ 。将 $k_d = 1.902$ 代入式(10),可计算出不同变形条件下的 β_d 值,计算取其平均值,经计算, $\beta_d = 0.997$ 。

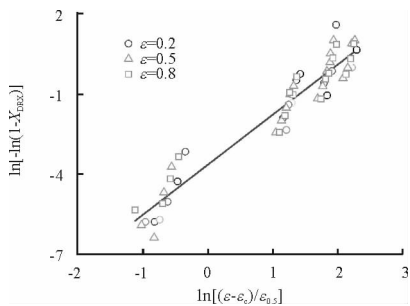


图 11 $\ln[-\ln(1 - X_{DRX})]$ 和 $\ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_{0.5}]$ 的关系

Fig.11 Relationship between $\ln[-\ln(1 - X_{DRX})]$ and $\ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_{0.5}]$

式(11)两边取自然对数,可得到式(15)。

$$\ln \epsilon_{0.5} = \ln a_2 + n_2 \ln \dot{\epsilon}_0 + m_2 \ln \dot{\epsilon} + Q_2/(RT) \quad (15)$$

研究过程中忽略了初始晶粒尺寸对 GH90 合金动态再结晶行为的影响,取 $n_2 = 0$ 。

降低而降低。

通过图 10 中的曲线数据,可获得 GH90 合金在不同条件下发生 50% 动态再结晶时的应变值 $\epsilon_{0.5}$,见表 3。

式(10)两边取自然对数可表示为:

$$\ln[-\ln(1 - X_{DRX})] \epsilon_{0.5} = \ln \beta_d + k_d \ln[(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_{0.5}] \quad (14)$$

根据图 10 的动态再结晶计算结果,可以计算出不同的温度和应变速率条件下应变为 0.2、0.5 和 0.8 时的动态再结晶体积分数。不同的温度和应变速率条件下应变为 0.2、0.5 和 0.8 时的 $\ln[-\ln(1 - X_{DRX})] - \ln \frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}}$

数据点见图 11。对这些数据点进行线性拟合,拟合直

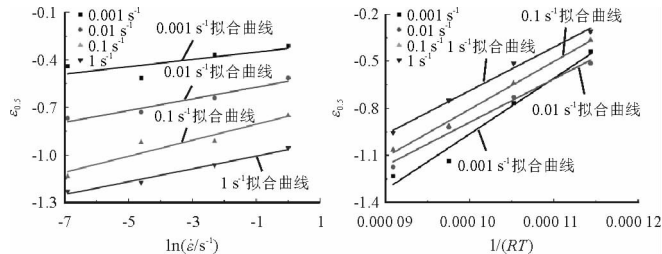
则在温度一定时,常数 m_2 可表示为:

$$m_2 = \left. \frac{\partial \ln \epsilon_{0.5}}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right|_T \quad (16)$$

在应变速率一定时,动态再结晶激活能 Q_2 可表示为:

$$Q_2 = R \cdot \left. \frac{\partial \ln \epsilon_{0.5}}{\partial (1/T)} \right|_{\dot{\epsilon}} \quad (17)$$

通过表 2 中的数据可以计算出不同变形温度下的 $\ln \epsilon_{0.5} - \ln \dot{\epsilon}$ 数据点,对这些数据点进行线性拟合,不同变形温度下拟合直线的斜率可作为该温度下的 m_2 值,计算其平均值为最终的 m_2 值。经计算, $m_2 = 0.038 05$ 。同理,可以得到不同应变速率下的 $\ln \epsilon_{0.5} - 1/(RT)$ 数据点并对其进行线性拟合,计算出拟合直线平均值作为最终的 Q_2 值,得到 $Q_2 = 29 768 \text{ J/mol}$,见图 12。将求解



(a) $\ln \epsilon_{0.5} - \ln \dot{\epsilon}$

(b) $\ln \epsilon_{0.5} - 1/(RT)$

图 12 $\ln \epsilon_{0.5} - \ln \dot{\epsilon}$ 及 $\ln \epsilon_{0.5} - 1/(RT)$ 间的关系

Fig.12 Relationship between $\ln \epsilon_{0.5}$ and $\ln \dot{\epsilon}$ as well as $\ln \epsilon_{0.5}$ and $1/(RT)$

得到的 m_2 和 Q_2 值及 $n_2=0$ 代入式(11),可计算出不同变形条件下的 a_2 值,将 a_2 的平均值作为其最后取值,经计算, $a_2=0.030\ 54$ 。

经以上推导及计算,得到 GH90 合金动态再结晶体积分数数学模型如下:

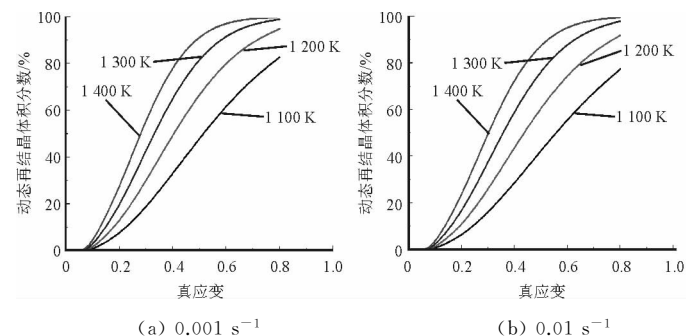


图 13 动态再结晶模型预测的不同温度和应变速率条件下的动态再结晶体积分数

Fig.13 Dynamic recrystallization fractions predicted by dynamic recrystallization models under different temperatures or strain rates

4 微观组织观察及模型验证

1 100~1 400 K 及 0.001~1 s⁻¹ 试验条件范围内等温压缩试样心部微观组织见图 14。可以看出,经历较大程度的热塑性变形后,相较于 GH90 合金原始晶粒,试样晶粒尺寸均有不同程度的降低。这种晶粒细化是由在变形过程中发生的动态再结晶行为引起的。

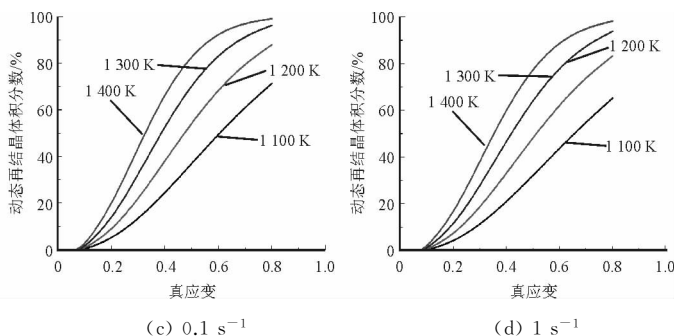
当应变速率一定时,尤其是在较高应变速率(0.1、1 s⁻¹)下,GH90 合金的微观组织在形态和尺寸上具有明显差异。在 1 100 和 1 200 K 下,GH90 合金试样并未发生完全的动态再结晶,微观组织以较多的大尺寸晶粒为主。未发生动态再结晶的大尺寸晶粒由于单向压缩作用呈现出一定的方向性:晶粒沿压缩方向被挤压变窄,沿着径向被拉长。在大尺寸晶粒周围发生动态再结晶的区域出现等轴的细小动态再结晶晶粒并分布于大尺寸晶粒附近,形成“项链晶”组织^[18]。随着温度进一步升高至 1 300 K 和 1 400 K 时,大尺寸晶粒数量越来越少,细小的动态再结晶晶粒越来越多,平均晶粒尺寸越来越小,动态再结晶体积分数越来越高。当达到 1 400 K 时,已经发生接近 100% 的动态再结晶。由以上分析可知,随着温度升高,GH90 合金动态再结晶体积分数增加直至 100%。动态再结晶的驱动力来自于变形过程中储存的能量,变形温度的升高能够提高动态再结晶的驱动力,在更高的温度下也更容易激活动态再结晶形核过程,因此,提高温度能促进动态再结晶^[19]。

由以上分析可知,在 GH90 合金未充分发生动态再结晶时,微观组织呈“项链晶”形式。此时,在相同温度下,应变速率较低时大尺寸晶粒相对较少,更多的大尺寸晶粒发生了动态再结晶并被细小的动态再结晶晶

$$X_{\text{DRX}} = 1 - \exp \left[-0.997 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}} \right) 1.902 \right] \quad (18)$$

$$\epsilon_{0.5} = 0.030\ 54 \epsilon^{0.038\ 05} \exp[29\ 768/(RT)] \quad (19)$$

利用计算的临界应变模型和动态再结晶运动学模型可以预测不同温度、应变速率和应变下的动态再结晶体积分数见图 13。



粒取代,说明低应变速率对动态再结晶具有积极的促进作用,动态再结晶体积分数随着应变速率的升高而降低。在较高的应变速率下,位错密度显著快速增加,动态再结晶所需能量储存加快,在一定程度上有利于动态再结晶发生,但变形时间短,动态再结晶形核和长大时间有限,因此,动态再结晶体积分数反而有一定程度下降。

由图 2 中 GH90 合金原始晶粒尺寸分布可知,原始晶粒尺寸小于 16 μm 的仅占约 12%。在发生动态再结晶的过程中,晶粒尺寸将进一步减小,而未发生动态再结晶的晶粒则可能在高温条件下发生晶粒长大。因此,假定试样等温压缩后晶粒尺寸小于 16 μm 的晶粒均为动态再结晶晶粒,大于等于 16 μm 的晶粒为未发生动态再结晶的大尺寸晶粒。按照此假设,对图 14 中的微观组织进行统计,获得不同温度和应变速率下动态再结晶体积分数见表 4,动态再结晶体积分数和温度、应变速率的关系见图 15。由图 15 可知,GH90 合金的动态再结晶体积分数遵循随着温度升高和应变速率降低而升高的趋势,这与式(16)和式(17)中动态再结晶体积分数与变形温度呈正相关关系,与应变速率呈反相关关系相符。说明所构建的 GH90 合金动态再结晶数学模型能够抓住 GH90 合金动态再结晶规律。动态再结晶模型预测的动态再结晶体积分数相对于由微观组织统计的不同条件下的动态再结晶体积分数的相对误差见表 4。可以知道,最大相对误差为 15.03%,平均相对误差为 5.19%。较小的相对误差说明构建的模型具有较高的预测精度。通过对比图 14 中的微观组织、表 4 中的动态再结晶体积分数和图 13 中的体积分数预测曲线可知,在 0.001~0.1 s⁻¹ 和 1 300~1 400 K、0.1 s⁻¹ 和

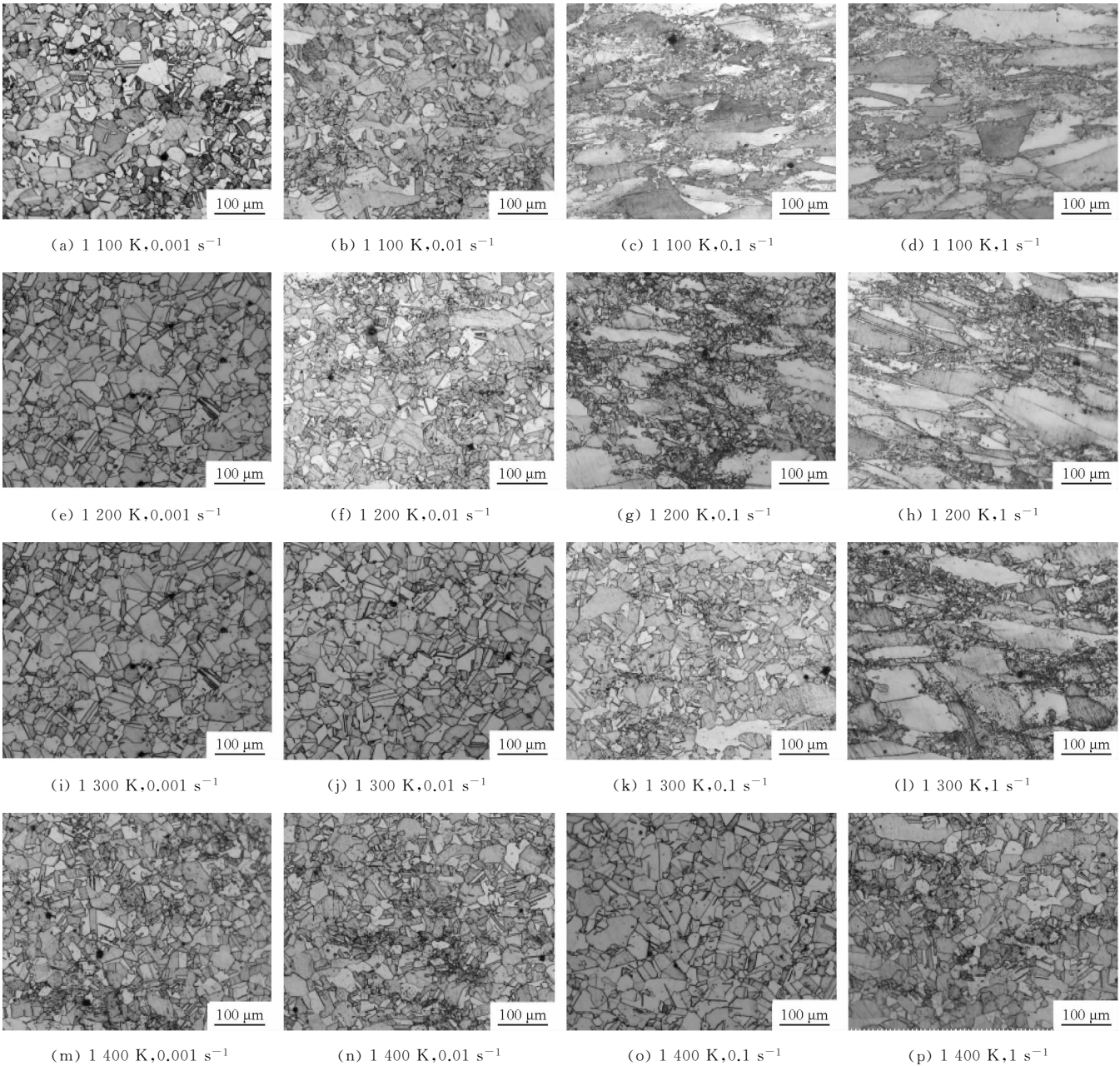


图 14 不同变形温度和应变速率下 GH90 合金的微观组织

Fig.14 Microstructure of GH90 alloy at different deformation temperatures or strain rates

表 4 不同温度和应变速率下的动态再结晶体积分数及相对误差

Tab.4 Dynamic recrystallization fractions and relative errors under different temperatures or strain rates

温度/ K	应变速率/ s^{-1}			
	0.001	0.01	0.1	1
1 100	0.848 (-2.36%)	0.793 (-2.42%)	0.675 (5.93%)	0.584 (11.82%)
1 200	0.936 (1.39%)	0.881 (4.35%)	0.813 (8.36%)	0.725 (15.03%)
1 300	0.981 (0.92%)	0.961 (2.01%)	0.894 (7.83%)	0.824 (13.96%)
1 400	1 (-0.11%)	0.984 (1.30%)	0.976 (1.66%)	0.949 (3.64%)

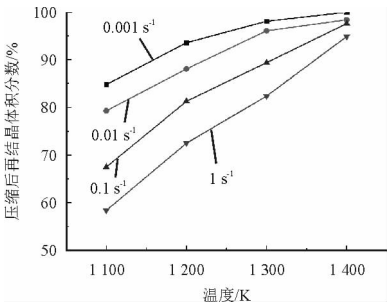


图 15 不同温度和应变速率条件下的动态再结晶体积分数

Fig.15 Dynamic recrystallization fractions under different temperatures or strain rates

1 400 K 条件下,模型预测和统计的动态再结晶体积分数已经达到或者非常接近 100%,而对应条件下的微观

组织中大尺寸晶粒完全消失,动态再结晶完全。在其他条件下,未发生动态再结晶的大尺寸晶粒占比随着温度降低和应变速率升高而升高,这与模型预测和统计的动态再结晶体积分数相吻合。模型预测的动态再结晶体积分数、统计的动态再结晶分数和微观组织相互匹配,表明构建的 GH90 高温合金动态再结晶模型可靠,能够对 GH90 合金动态再结晶行为进行准确描述和预测。

5 结 论

(1)动态再结晶是 GH90 高温合金的主要动态软化机制。

(2)通过对真应力-真应变数据的分析和处理,计算了 GH90 高温合金动态再结晶临界应变模型,作为其在高温状态下开始发生动态再结晶的临界条件。GH90 高温合金的临界应变随着应变速率升高和温度降低而升高。

(3)通过对真应力-真应变数据的分析和处理,计算了 GH90 高温合金动态再结晶体积分数模型。GH90 高温合金的动态再结晶体积分数随着应变速率升高和温度降低而降低。

(4)通过对比和验证可知所构建的 GH90 高温合金动态再结晶数学模型能够准确描述 GH90 合金动态再结晶行为。

参 考 文 献

- [1] 文新理,章清泉,蒋波,等.合金元素含量对镍基高温合金 GH90 平衡相图的影响[J].金属材料研究,2019,45(1): 18-25.
- [2] 何龙,张冉阳,赵刚要,等.基于 BP 神经网络的 GH5188 高温合金本构模型[J].特种铸造及有色合金,2021,41(2): 223-226.
- [3] PU E, ZHENG W, SONG Z, et al. Hot deformation characterization of nickel-based superalloy UNS10276 through processing map and microstructural studies[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 694: 617-631.
- [4] YU Q Y, YAO Z H, DONG J X. Deformation and recrystallization behavior of a coarse-grain, nickel-base superalloy udimet 720Li ingot material[J]. Materials Characterization, 2015, 107: 398-410.
- [5] 何文武,杨春鹏,闫霄霞,等.GH4169 高温合金的动态再结晶行为及微观组织演变研究[J].塑性工程学报,2020,27(9): 174-180.
- [6] 陈曦,亓耀国,史晓楠,等.IN718Plus 高温合金的动态再结晶行为及模型研究[J].稀有金属,2019,43(12): 1 260-1 268.
- [7] 胡鹏飞,李开勇,尹国杰.基于神经网络预测的 TC23 合金高温流动行为精确仿真[J].塑性工程学报,2021,28(12): 132-139.
- [8] 马艺霖,樊文欣,贾岩峰,等.Cu-Ni-Sn 合金高温本构模型及动态再结晶行为[J].特种铸造及有色合金,2022,42(3): 376-379.

- [9] 赵红运,朱宝辉,刘彦昌,等.低密度 Nb-Ti-Al-Mo-W-Zr 钎合金的热变形行为及组织[J].特种铸造及有色合金,2021,41(12): 1 488-1 493.
- [10] TAN Y B. Hot deformation behavior and constitutive modeling of fine grained Inconel 718 superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 741: 85-96.
- [11] HAMADA A S, KHOSRAVIFARD A, KISKO A P, et al. High temperature deformation behavior of a stainless steel fiber-reinforced copper matrix composite[J]. Materials Science & Engineering, 2018, A717: 61-67.
- [12] HUANG K, LOGÉ R E. A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials[J]. Materials & Design, 2016, 111: 548-574.
- [13] 冯瑞,王克鲁,鲁世强,等.BT25 钛合金动态再结晶行为的元胞自动机模拟[J].机械工程学报,2020,56(20): 66-73.
- [14] 李凡波,周海涛,秦径为,等.AZ80 镁合金流变应力预测及动态再结晶动力学[J].塑性工程学报,2016,23(1): 104-111.
- [15] 郭幼节,李劲风,刘丹阳,等.铝锂合金动态再结晶行为的研究进展[J].航空材料学报,2022,42(5): 15-31.
- [16] 吾志岗,李德富,郭胜利,等.GH625 镍基高温合金动态再结晶模型研究[J].稀有金属材料与工程,2012,41(2): 235-240.
- [17] BANDYOPADHYAY K, LEE J, SHIM J H, et al. Modeling and experiment on microstructure evolutions and mechanical properties in grade 600 MPa reinforcing steel rebar subjected to TempCore process[J]. Materials Science & Engineering, 2019, A745: 39-52.
- [18] 何文武,刘俊伟,赵晓东,等.高温合金 800H 的动态再结晶及其模型的建立[J].钢铁研究学报,2014,26(10): 55-59.
- [19] 齐永杰,余新平,吕航鹰,等.6061 铝合金热变形动态再结晶行为研究[J].特种铸造及有色合金,2018,38(11): 1 185-1 188.

(编辑:刘晨辉)

小鹏汽车 G6 车型同时采用一体化压铸前机舱和后地板

近日,小鹏汽车发布其“扶摇”架构下的首款战略车型超智驾轿跑 SUV 小鹏 G6。据介绍,“扶摇”架构采用国内目前唯一量产的前、后一体式铝压铸车身(前机舱、后地板),车身结构一次压铸成形。其中,一体式铝压铸前机舱零件数量减少 95 个,一体式铝压铸后地板零件数量减少 64 个。

该一体式压铸前机舱、后地板,分别采用两套 70 000 kN 超大型压铸岛生产而成。凭借该一体式压铸工艺,其整车扭转刚度比传统车身提升 50%,更大程度提升车身安全性。在电池方面,“扶摇”架构采用了 CIB 电池车身一体化技术。

(摘自压铸周刊)