DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.6033

GH4169 合金双道次热变形过程静态行为与定量描述模型

周子煜[1],邓　浩[2],杨靖雲[2],刘　浪[2],孙宗帅[2],吴天模[2],郭良刚[1]
(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室,陕西 西安 710072;2. 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限公司,四川 德阳 618099)

摘　要:针对 GH4169 合金双道次热变形过程中静态行为对后续加工的重要影响,通过双道次热压缩实验和静态晶粒长大实验,阐明了该合金的静态软化行为(包括静态再结晶与亚动态再结晶)及静态晶粒长大行为。结果表明,第一道次变形量较低(8%)时,静态再结晶为主导软化机制;变形量较高(30%)时,亚动态再结晶为主要机制。静态软化分数增大随着道次间歇保温时间的延长和保温温度的升高而增大,表明材料软化程度越大。道次间歇保温温度高于 1 000 ℃时,因 δ 相的溶解削弱了其对晶界的阻碍作用导致晶粒长大显著加速。基于实验数据,构建了静态/亚动态再结晶 Avrami 模型与静态晶粒长大模型,预测值与实验值吻合良好。

关键词:GH4169 合金;双道次热变形;静态/亚动态再结晶;晶粒长大;静态行为预测模型
中图分类号:TG132.3+2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2026)10-1168-07

Static Behavior and Quantitative Description Model of GH4169 Alloy During Two-pass Hot Deformation

ZHOU Ziyu[1], DENG Hao[2], YANG Jingyun[2], LIU Lang[2], SUN Zongshuai[2], WU Tianmo[2], GUO Lianggang[1]
(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Deyang Wanhang Die Forging Co., Ltd., China National Erzhong Group Co., Deyang 618099, China)

Abstract: To clarify the significant influence of static behavior during the double-pass hot deformation process of a GH4169 alloy on subsequent processing, through double-pass hot compression and static grain growth experiments, the static softening behavior (including static recrystallization and subdynamic recrystallization) and static grain growth behavior of this alloy were clarified. The results indicate that when the first-pass deformation is low (8%), static recrystallization dominates the softening mechanism, whereas at higher deformation (30%), metadynamic recrystallization becomes the primary mechanism. The static softening fraction increases with extended interval holding time and elevated holding temperature, indicating greater material softening. When the interval holding temperature exceeds 1 000 ℃, grain growth accelerates significantly because of the dissolution of the δ phase, which weakens its pinning effect on the grain boundaries. On the basis of the experimental data, Avrami models for static/metadynamic recrystallization and a static grain growth model were established, and good agreement between the predicted and experimental values is obtained.

Key words: GH4169 alloy; double-pass hot deformation; static/meta-dynamic recrystallization; grain growth; prediction model for static behavior

GH4169 合金作为一种典型的镍基高温合金,因其优异的高温强度、耐腐蚀性和抗疲劳性能,广泛应用于航空发动机、燃气轮机等关键热端部件[1-2]。该合金在热变形加工过程中,多道次变形是常见的工艺形式[3],而变形道次间的静态行为(静态软化行为和静态晶粒长大行为等)直接影响后续的加工过程

收稿日期:2026-03-09
基金项目:四川省中央引导地方科技发展专项(2024ZYD0326)
作者简介:周子煜,1999 年生,博士生.研究方向为材料加工工程.Email: zyzhou@mail.nwpu.edu.cn
通信作者:郭良刚,1974 年生,博士,教授.研究方向为材料加工工程.Email: glgglg66@nwpu.edu.cn
引用格式:周子煜,邓浩,杨靖雲,刘浪,孙宗帅,吴天模,郭良刚.GH4169 合金双道次热变形过程静态行为与定量描述模型[J].铸造技术,2026,47(10):1168-1174.
ZHOU Z Y, DENG H, YANG J Y, LIU L, SUN Z S, WU T M, GUO L G. Static behavior and quantitative description model of GH4169 alloy during two-pass hot deformation[J]. Foundry Technology, 2026, 47(10): 1168-1174.

中国知网　https://www.cnki.net

的设计以及最终产品的微观组织与力学性能。静态再结晶、亚动态再结晶是静态软化的主要机制[4-6],静态晶粒尺寸的长大也对产品的力学性能产生重要影响。因此,明确 GH4169 合金双道次热变形过程中的静态行为,对于合理设计该工艺过程并调控最终产品性能具有重要意义。

目前,许多学者针对 GH4169 合金的单道次热变形行为开展了大量研究。丁奔等[7]开展了 GH4169 稀土强化镍基高温合金热模拟压缩实验,获得了该材料不同变形条件下的流变应力曲线。李帮松等[8]基于 Deform-3D 有限元软件模拟阐明了锻造态 GH4169 合金试样不同变形条件下的变形行为。刘光辉等[9]阐明了 GH4169 合金在锻造过程中的热变形行为和损伤演变规律。于森等[10]探明了 GH4169 合金动态再结晶行为和组织演变规律,明确了动态再结晶晶粒以在原奥氏体晶界处的非连续动态再结晶为主,连续动态再结晶以亚晶持续旋转机制形核。赵志伟等[11]阐明了铸态 GH4169 合金的热变形行为,结果表明动态再结晶对原始晶粒组织的细化会导致显微硬度的增加。然而,有关 GH4169 合金双道次或多道次变形过程中的静态行为及其定量描述模型的研究鲜见报道。

本文拟通过 GH4169 合金的双道次热压缩与静态晶粒长大实验,阐明 GH4169 合金双道次热变形过程静态行为,包括静态/亚动态再结晶软化行为和静态晶粒尺寸长大行为,并建立其相应的定量描述模型,从而为 GH4169 合金多道次热变形过程的设计与优化提供重要理论依据和技术支撑。

1　实验材料与方法

1.1　热模拟压缩实验

本研究使用的 GH4169 合金化学成分如表 1所示。从该合金的原始挤压棒料(ϕ90 mm×80 mm)上,沿着棒料轴向采用线切割取样,制成 ϕ8 mm×12 mm 规格的标准热压缩试样,用于高温热模拟压缩实验。该合金的轴向初始微观组织如图 1 所示。采用 Image-Pro Plus 软件测定其平均晶粒尺寸,测得其初始晶粒尺寸约为 43.7 μm。热模拟压缩实验在 Gleeble-3800 热模拟机上进行,在试样中部焊上 K 型热电偶来测量反馈温度信息,试样两端贴上石墨片减少压头与试样的摩擦,避免在压缩过程中出现较大的“鼓肚”。以 10 ℃/s 的升温速率将试样加热到指定变形温度并保温 3 min 使温度分布均匀,然后进行温度为 980 和 1 060 ℃,应变速率为 0.1 s^{-1},总变形量分别为 8%+52%和 30%+30%、间歇保温时间分别为 10、30、60、120 和 180 s 的双道次热压缩实验,压缩完成后立即通入氩气极冷保持试样在高温变形后的微观组织。本文还进行了相同温度和应变速率下变形量为 60%的单道次热压缩实验作为对比。

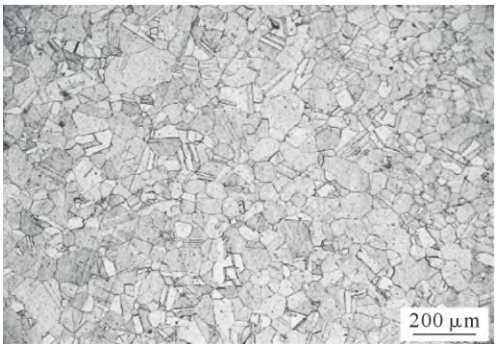


图 1　GH4169 合金初始微观组织

Fig.1　Initial microstructure of the GH4169 alloy

1.2　静态晶粒长大实验

实验用试样为圆柱压缩试样,将箱式电阻炉加热到实验温度后保温 10 min 以均匀炉温,然后将试样放入炉中保温不同时间后取出立即水冷以保留高温组织。实验的具体加热温度和保温时间为:加热温度为 950、1 000、1 050、1 100 和 1 150 ℃;保温时间为 5、15、30、60、120、180 和 210 min。依次用 400#、800#、1200#、2000# 砂纸机械研磨去除试样表面的氧化层,并用金刚石抛光膏抛光至镜面;抛光后试样经超声波清洗、干燥后用于用高锰酸钾–硫酸混合溶液煮沸腐蚀 15 min,再经草酸清洗、干燥后用于金相观察,使用显微镜对腐蚀后的试样进行金相组织观测,并采用截线法统计加热后的平均晶粒尺寸。

2　实验结果及讨论

2.1　双道次热压缩变形流动应力曲线变化规律与机制

图 2 为不同变形条件下的双道次热压缩变形流动应力曲线。图 2a 为不同保温时间,温度为 980 ℃、中断变形量为 8%下的 GH4169 合金双道次流动应力曲线。可以看出,在第一道次变形过程中,合金发

表1 GH4169合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of the GH4169 alloy

(mass fraction/%)

Element	C	AI	Ti	Cr	Mo	Nb	Ni
Content	0.08	0.2~0.8	0.6~1.1	17.0~21.0	2.8~3.3	4.7~5.5	Bal.

中国知网　https://www.cnki.net

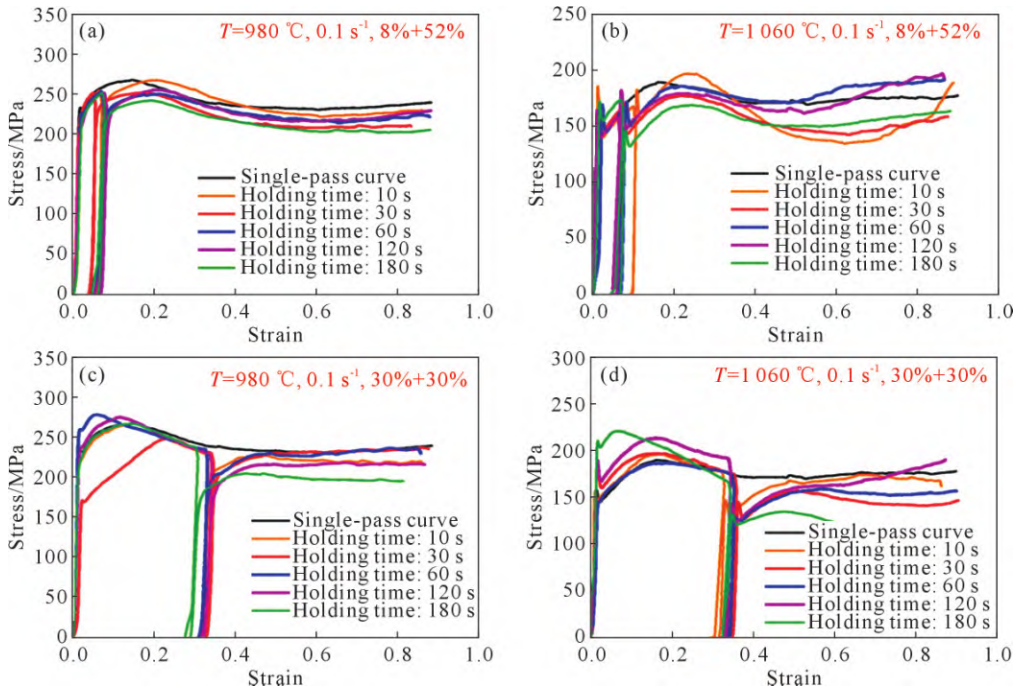


图 2 GH4169 合金不同变形条件下双道次流动应力曲线:(a) 温度为 980 ℃,中断变形量为 8%;(b) 温度为 1 060 ℃,中断变形量为 8%;(c) 温度为 980 ℃,中断变形量为 30%;(d) 温度为 1 060 ℃,中断变形量为 30%

Fig.2 Double-pass flow stress curves of the GH4169 alloy under different deformation conditions: (a) temperature of 980 ℃, interrupted deformation amount of 8%; (b) temperature of 1 060 ℃, interrupted deformation amount of 8%; (c) temperature of 980 ℃, interrupted deformation amount of 30%; (d) temperature of 1 060 ℃, interrupted deformation amount of 30%

生了明显的应变硬化,流动应力逐步增大,直到变形量达到中断变形量。相较于单道次流动应力曲线,变形中断时的流动应力尚未达到峰值应力,表明第一道次变形量达到 8%时,合金没有发生显著的动态再结晶现象。随后在道次间保温过程,合金会发生静态软化行为。由于中断变形前合金没有发生明显的动态再结晶,因此合金在道次间保温时会发生静态再结晶和静态晶粒长大。当保温时间达到预设的时间后,重新以相同的温度和应变速率变形加载,直到变形达到总变形量。可以明显发现,合金第二道次的屈服应力小于第一道次结束时的中断应力。并且随着保温时间的延长,第二道次屈服应力下降更为明显。当中断变形量增加到 30%时,如图 2c 所示,此时合金的中断应力明显小于峰值应力,表明动态再结晶行为对合金的软化作用大于应变硬化。因此,当第一道次变形中断时,合金会立即发生亚动态再结晶,这是因为亚动态再结晶是动态再结晶的延续,无需形核孕育期[12]。

图 2b 和 d 分别为 1 060 ℃下不同中断变形量和保温时间下的流动应力曲线,对比 980 ℃下的流动应力曲线,可以看出流动曲线对温度有相当强的依赖性。随着变形温度的升高,双道次变形过程中流动应力明显减小。值得注意的是,随着温度升高,第二道次的屈服应力下降更为明显。根据流动应力的叠加原理,流动应力受到位错密度和晶粒尺寸的影响。在双道次变形间歇,静态或者亚动态再结晶的进行会消减合金内部的位错密度,同时也会细化原始晶粒,使得第二道次屈服应力数值会回到第一道次屈服应力的附近。然而,第二道次屈服应力显著小于第一道次变形时的屈服应力,说明在静态软化过程中合金还发生了明显的静态晶粒长大行为。

2.2 双道次变形过程静态软化行为与定量描述

根据 2.1 节分析,第一道次的中断变形量决定了保温阶段静态软化机制。当第一道次的中断变形量为 8%时,该变形量未能使得合金充分的发生动态再结晶,因此双道次间歇保温过程中静态再结晶为主要的静态软化机制;当第一道次的中断变形量为 30%时,此时动态再结晶对流动应力的软化效果大于应变硬化,因此间歇保温过程中亚动态再结晶则为主要的静态软化机制。

为了能定量描述双道次变形间歇保温过程中静态软化行为,本文采用静态软化分数作为量化指标,来描述间歇保温阶段各种软化行为对随后变形行为的影响、以及第一道次与第二道次流动应力之间的定量关系。静态软化分数(fraction of static softening, FS)可以由屈服应力补偿法确定[13-14]:

$$FS=\frac{\sigma_m-\sigma_{y2}}{\sigma_m-\sigma_{y1}} \quad (1)$$

式中,σ_m 为中断应变时所对应的应力值;σ_{y1} 和 σ_{y2} 分别为第一道次变形和第二道次变形时的屈服应

中国知网 https://www.cnki.net

力。当第一道次与第二道次变形时的屈服应力相等时,静态软化分数 FS 为 1,表明静态或亚动态再结晶对变形组织的软化作用已使其恢复到初始状态。从图 2 可以看出,流动曲线呈现不连续屈服现象,第一道次变形时的屈服应力取为下屈服应力。然而,随着保温时间的延长,第二道次加载时的屈服应力会低于第一道次变形时的屈服应力,导致静态软化分数大于 1。其原因可能在于,第一道次变形时需要更高的流动应力以破坏原始挤压态纤维组织,因此即便静态或亚动态再结晶已完全消除变形组织,第二道次变形时的屈服应力仍可能低于第一道次。为保证静态软化分数在物理意义和逻辑上的一致性,需对屈服应力补偿方法进行改进。

图 3 为 980 ℃,0.1 s^{-1} 下合金第一道次变形时加工硬化率与流动应力之间的关系。可以看出,随着流动应力的增大,加工硬化率会发生突变减小,这可能是由于挤压纤维组织被破坏而导致的流动软化效果。分别对突变前后加工硬化率进行线性拟合,如图 3 中的 L1 和 L2。L1 和 L2 延长线的交点即为突变点,以该位置的流动应力作为参考应力来代替下屈服应力,可以保证静态软化分数归一化。因此,本文取不同温度下的参考应力作为第一道次变形时的屈服应力,980 ℃下的参考应力为 200 MPa,1 060 ℃下的参考应力为 120 MPa。

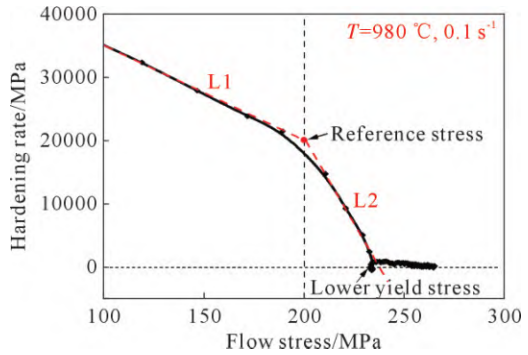


图 3 GH4169 合金加工硬化率与流动应力之间的关系以及参考应力的确定方法

Fig.3 Relationship between the work hardening rate and the flow stress of the GH4169 alloy and the determination method of the reference stress

根据式(1)和图 2 的流动应力数据,计算可得到不同变形条件下的静态软化分数,计算结果如表 2 所示。从表中可以看出,静态软化分数随着间歇保温时间的延长而增大,并且温度对静态软化分数的促进作用明显。随着间歇保温时间的延长,位错攀移、滑移及再结晶过程更加充分,使位错密度持续降低,静态软化分数随之增大;保温温度的升高则显著加速了原子扩散和晶界迁移速率,使得位错湮灭和再结晶更为迅速,从而进一步促进软化进程。因此,时间和温度对静态软化分数的正向影响,反映了热激活过程对位错结构演变的控制作用,即高温和长时间保温有利于位错密度的快速降低,增强材料的静态软化程度。

2.3 静态晶粒长大行为与机制

图 4 为 1 050 ℃下 GH4169 合金保温 15、30、60 和 180 min 的金相组织。相较于初始组织的平均晶粒尺寸(43.7 um),保温 15、30 min 后平均晶粒尺寸增大到 62.3 和 75.5 μm。当保温时间达到 60 和180 min 时平均晶粒尺寸增大到 90.2 和 107.9 μm,晶粒静态长大幅度不断减小,这是由于晶粒长大驱动力会随着晶粒的长大而不断降低。除此以外,GH4169 合金的 MC 碳化物也会钉扎大角度晶界,限制大角度晶界的迁移[3]。

表 3 为合金试样在不同加热温度和不同保温时间下的平均晶粒度大小。由表可以看出,在同一保温时间条件下,合金的晶粒度总体随温度的升高而增大,在低温区(950~1 000 ℃)增大不是很明显,但超过 1 000 ℃后晶粒迅速长大,这是因为合金中 δ 相的完全溶解温度约为 1 000 ℃,当温度超过 1 000 ℃时,δ 相对合金晶粒长大的阻碍作用逐渐消失,所以合金晶粒迅速长大。

3 GH4169 合金双道次变形静态行为定量描述建模

3.1 静态/亚动态再结晶模型建立

亚动态/静态再结晶过程用 Avrami 方程进行描述[15]:

表 2 应变速率为 0.1 s^{-1}、不同变形温度、保温时间和变形量下的静态软化分数

Tab.2 Static softening fraction at a strain rate of 0.1 s^{-1} under various temperatures, holding times and deformation degrees

Deformation degree	Temperature/℃	Holding time/s				
		10	30	60	120	180
8%+52%	980	0.192	0.346	0.442	0.538	0.671
	1 060	0.267	0.417	0.511	0.663	0.803
30%+30%	980	0.493	0.765	0.871	0.926	0.951
	1 060	0.615	0.872	0.949	0.995	0.998

中国知网 https://www.cnki.net

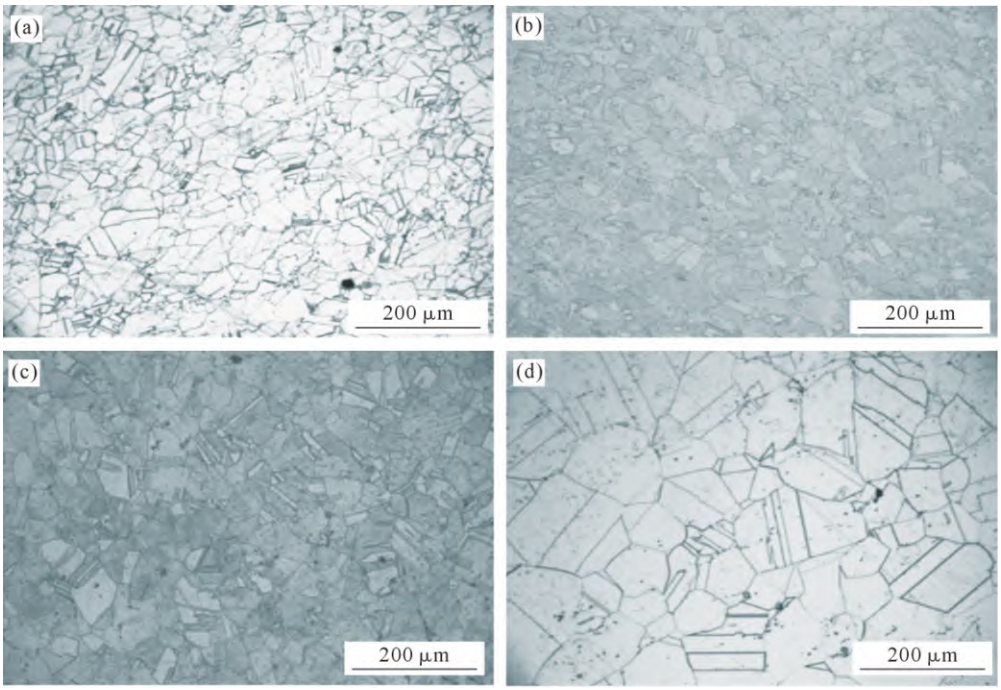


图 4 GH4169 **合金在** 1 050 ℃**下保温不同时间的微观组织**:(a) 15 min; (b) 30 min; (c) 60 min; (d) 180 min
Fig.4 Microstructure of the GH4169 alloy held at 1 050 ℃ for different holding times: (a) 15 min; (b) 30 min; (c) 60 min; (d) 180 min

表 3 不同加热温度和保温时间下的平均晶粒尺寸(μm)
Tab.3 Average grain size (μm) at different heating temperatures and holding times

Holding time/min	Temperature/℃				
	950	1 000	1 050	1 100	1 150
0	43.7	43.7	43.7	43.7	43.7
5	44.9	45.4	57.1	68.9	106.9
15	47.7	49.8	62.3	96.6	147.3
30	53.3	58.5	75.5	122.7	175.4
60	58.5	66	90.2	160.8	221.5
120	66.4	72.1	99.8	190.5	245.6
180	69.3	75.6	107.9	201.6	259.8
210	69.8	76.1	112.1	203.3	262.5

$$\begin{cases} F_i=1-\exp\left[-0.693\left(\dfrac{t}{\tau_i}\right)^n\right] \\ \tau_i=a[\dot{\varepsilon}\exp(Q/RT)]^m \end{cases} \tag{2}$$

式中,t 为间歇保温时间;τ 为再结晶进行了 50%时经过的间歇保温时间;F_i 为再结晶分数;i=srx(静态再结晶,static recrystallization)或者 mdrx(亚动态再结晶,meta-dynamic recrystallization),代表静态再结晶和亚动态再结晶;R 为气体常数;T 为温度;n、m、a 为材料常数;Q 为 GH4169 再结晶的热激活能。

由于亚动态/静态再结晶为静态过程中主要的软化机制,因此静态软化分数可以近似为亚动态/静态再结晶百分数。根据表 2 的静态软化分数数据对式(2)进行拟合,可以分别得到静态再结晶和亚动态再结晶模型分别如式(3)和(4)所示。

$$\begin{cases} F_{srx}=1-\exp\left[-0.693\left(\dfrac{t}{\tau_{srx}}\right)^{0.587}\right] \\ \tau_{srx}=16.038[\dot{\varepsilon}\exp(31\ 103/RT)]^{2.616} \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} F_{mdrx}=1-\exp\left[-0.693\left(\dfrac{t}{\tau_{mdrx}}\right)^{0.727}\right] \\ \tau_{mdrx}=3.773[\dot{\varepsilon}\exp(31\ 103/RT)]^{1.894} \end{cases} \tag{4}$$

图 5 为 GH4169 合金不同静态软化机制下静态软化分数的预测值与实验值对比,从图中可以看出本文所建立的模型可以较好的预测不同中断变形量、温度以及保温时间下的静态软化分数,模型预测值和实验值的平均相对误差分别为 9.3%和6.5%。

3.2 静态晶粒长大模型建立

在 2.3 节中,相同温度条件下,合金的晶粒度随保温时间的延长明显增大,但当晶粒度长大到一定程度后趋于稳定。目前,最常用的静态晶粒长大模型是[16-19]:

$$d^n=d_0^n+A\,t'\exp(-Q'/RT) \tag{5}$$

式中,d 为材料在保温过程中的平均晶粒尺寸;d_0 为合金的初始晶粒尺寸;t'为保温时间;Q'为晶粒长大激活能;n 和 A 则为材料常数。

然而,该模型不能描述保温时间很长后晶粒尺寸趋于稳定的情况。因此,选用式(6)模型来描述晶粒静态长大行为[20]。

$$\begin{cases} d=d_0+(d_s-d_0)[1-\exp(-R_1t')] \\ d_s=R_2\exp(R_3T) \end{cases} \tag{6}$$

式中,R_1、R_2、R_3 为与材料相关的常数;d_s 为材料在某

中国知网 https://www.cnki.net

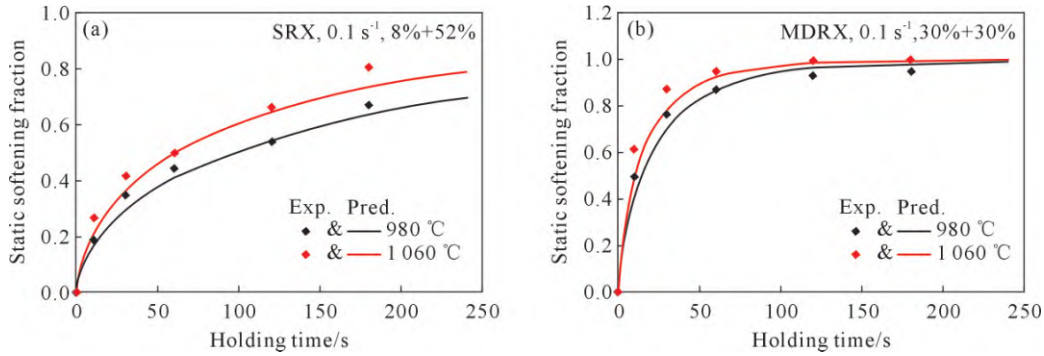


图 5 GH4169 合金不同静态软化机制下静态软化分数的预测值与实验值对比:(a) 静态再结晶;(b) 亚动态再结晶

Fig.5 Comparison between the predicted and experimental values of the static softening fraction of the GH4169 alloy under different static softening mechanisms: (a) static recrystallization; (b) metadynamic recrystallization

温度下的极限晶粒度，本文将保温 210 min 的晶粒度视为材料在该温度下的极限尺寸。根据表 3 的晶粒长大实验数据,对上式进行拟合,则得到 GH4169 高温合金晶粒长大模型:

$$\begin{cases} d=43.7+(d_s-43.7)[1-\exp(-0.028t')] \\ d_s=0.00\ 845\exp(0.00\ 726T) \end{cases} \tag{7}$$

图 6 为静态晶粒长大的预测值和实验值对比,图中实线表示模型计算值，相对应的点表示实验值。从图中可以看出,本文所建立的模型很好地描述了 GH4169 合金动态再结晶行为和静态晶粒长大行为,平均相对误差约为 7.9%。

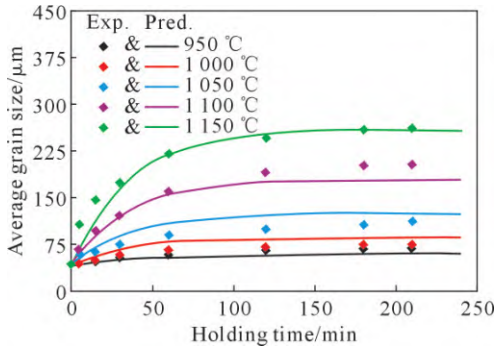


图 6 GH4169 合金晶粒尺寸模型验证

Fig.6 Validation of the grain size model for the GH4169 alloy

4 结论

(1)GH4169 合金在双道次热变形过程中的静态软化机制受第一道次变形量的显著影响,当中断变形量为 8%时,以静态再结晶为主导;当中断变形量为 30%时,亚动态再结晶为主要软化机制。

(2)在相同温度下静态软化分数随保温时间延长而增大，表明保温时间越长越促进材料软化过程。在相同保温时间下,1 060 ℃的静态软化分数明显高于 980 ℃,表明高温有助于加速静态/亚动态再结晶软化行为。

(3)建立了静态/亚动态再结晶 Avrami 模型与静态晶粒长大模型,模型预测值与实验值吻合良好,平均相对误差分别为 9.3%(静态再结晶)、6.5%(亚动态再结晶)与 7.9%(晶粒长大)。

参考文献:

[1] 任永海,程治,王龙祥,王超,崔文语,赵飞,谭元标. 锻态GH4169 合金热变形本构方程及热加工图[J]. 精密成形工程,2023, 15(5): 148-155.
REN Y H, CHENG Z, WANG L X,WANG C, CUI W Y, ZHAO F, TAN Y B. Constitutive equation for hot deformation and hot processingmap of wrought GH4169 superalloy[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2023, 15(5): 148-155.

[2] 张海燕,程明,胡如夫,张士宏,赵忠. DP-GH4169 合金在 Delta 工艺中的热变形行为及机制[J]. 稀有金属,2024, 48(5): 651-659.
ZHANG H Y, CHENG M, HU R F, ZHANG S H, ZHAO Z. Hot deformation behavior and mechanism of DP-GH4169 alloy during delta process [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48 (5): 651-659.

[3] 李凯,林莺莺,陈由红,王轶博,赵张龙. GH4080A 合金双道次等温压缩致热处理晶粒异常长大研究[J]. 热加工工艺,2022, 51(24): 30-33, 40.
LI K, LIN Y Y, CHEN Y H, WANG Y B, ZHAO Z L. Research on abnormal grain growth of GH4080A alloy during heat-treatment after double-pass isothermal compression [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(24): 30-33, 40.

[4] DING S, ZHANG J W, KHAN S A, SATO Y, YANAGIMOTO J. Metadynamic recrystallization in A5083 aluminum alloy with homogenized and as-extruded initial microstructures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 838: 142789.

[5] LIU J, LIU Y G, LIN H, LI M Q. The metadynamic recrystallization in the two-stage isothermal compression of 300M steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 565: 126-131.

[6] ZHANG H, LIN G Y, PENG D S, YANG L B, LIN Q Q. Dynamic and static softening behaviors of aluminum alloys during multi-stage hot deformation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(2): 245-249.

[7] 丁奔,蔡军,张兵,陈琳,赵谦. GH4169 稀土强化镍基高温合金热变形行为[J]. 塑性工程学报,2023, 30(9): 131-141.
DING B, CAI J, ZHANG B, CHEN L, ZHAO Q. Hot deformation behavior of GH4169 rare earth reinforced Ni-base superalloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(9): 131-141.

中国知网 https://www.cnki.net

[8] 李帮松，曾祥帅，曾梦婷，班明杰，覃昌丽，杨雷，汪继康，赵飞，谭元标. 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, BAN M J, QIN C L, YANG L, WANG J K, ZHAO F, TAN Y B. Finite element simulation of hot deformation behavior of forged GH4169 superalloy[J]. Heat Treatment, 2023, 38(3): 18-24.

[9] 刘光辉，孙红星，郑晓磊，王龙飞，蔡宗超，康根发，秦单单，刘华. GH4169 合金压缩热变形行为及临界损伤值[J]. 锻压技术，2025, 50(2): 227-234.
LIU G H, SUN H X, ZHENG X L, WANG L F, CAI Z C, KANG G F, QIN D D, LIU H. Hot deformation behavior and critical damage value of GH4169 alloy during compression [J]. Forging & Stamping Technology, 2025, 50(2): 227-234.

[10] 于森，陈乐利，罗锐，袁志钟，王爽，高佩，程晓农. 高温合金 GH4169 的动态再结晶和组织演化机制[J]. 材料研究学报，2023, 37(3): 211-218.
YU S, CHEN L L, LUO R, YUAN Z Z, WANG S, GAO P, CHENG X N. Dynamic recrystallization and microstructure evolution mechanism of GH4169 alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2023, 37(3): 211-218.

[11] 赵志伟，李九霄，董安平，王旭彤，王迪，范敏灏，李子怿. 铸态 GH4169 高温合金的热变形行为及显微硬度变化[J]. 塑性工程学报，2024, 31(10): 176-183.
ZHAO Z W, LI J X, DONG A P, WANG X T, WANG D, FAN M H, LI Z Y. Thermal deformation behavior and microhardness variation of as-cast GH4169 high temperature alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(10): 176-183.

[12] HUANG K, LOGÉ R E. A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials [J]. Materials & Design, 2016, 111: 548-574.

[13] LIN Y C, FANG X, WANG Y P. Prediction of metadynamic softening in a multi-pass hot deformed low alloy steel using artificial neural network [J]. Journal of Materials Science, 2008, 43 (16): 5508-5515.

[14] BO G W, JIANG F L, SU H G, WU L Y, TENG J, FU D F, ZHANG H. Static softening behavior and modeling of an Al-Cu-Mg-Zr alloy with various pre-precipitation microstructures during multistage hot deformation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 778: 139094.

[15] SELLARS C M, WHITEMAN J A. Recrystallization and grain growth in hot rolling[J]. Metal Science, 1979, 13(3-4): 187-194.

[16] 甄兴敏，寇金凤，白亚冠，聂义宏，商书铭，张冰冰，张鑫. 镍基高温合金 GH3230 晶粒长大行为[J]. 特殊钢, 2026, 47(1): 120-127.
ZHEN X M, KOU J F, BAI Y G, NIE Y H, SHANG S M, ZHANG B B, ZHANG X. Grain growth behavior of nickel-based superalloy GH3230[J]. Special Steel, 2026, 47(1): 120-127.

[17] ANDERSEN I, GRONG Ø. Analytical modelling of grain growth in metals and alloys in the presence of growing and dissolving precipitates-I. Normal grain growth[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(7): 2673-2688.

[18] AZARBARMAS M, AGHAIE-KHAFRI M, CABRERA J M, CALVO J. Dynamic recrystallization mechanisms and twining evolution during hot deformation of Inconel 718 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 678: 137-152.

[19] COLLINS D M, CONDUIT B D, STONE H J, HARDY M C, CONDUIT G J, MITCHELL R J. Grain growth behaviour during near-γ′ solvus thermal exposures in a polycrystalline nickel-base superalloy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(9): 3378-3391.

[20] 吴桂芳. GH4169 高温合金热加工微观组织仿真预测研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2014.
WU G F. Simulation and prediction of microstructure for superalloy GH4169 in thermal deformation [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.

(责任编辑：杨浩雪)

中国知网 https://www.cnki.net