

引用格式: 任晓东, 侯成, 许琦鹏, 等. GH3230 合金蠕变变形及断裂机理研究[J]. 中国材料进展, 2025, 44(4): 395–401.

REN X D, HOU C, XU Q P, *et al.* Study on Creep Deformation and Fracture Mechanism of GH3230 Alloy[J]. Materials China, 2025, 44(4): 395–401.

## GH3230 合金蠕变变形及断裂机理研究

任晓东<sup>1</sup>, 侯 成<sup>1</sup>, 许琦鹏<sup>1</sup>, 周芳菁<sup>1</sup>, 曾嘉迅<sup>2</sup>, 杨思远<sup>2</sup>, 范学领<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学航天航空学院 西安市极端环境服役性能与防护技术重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

**摘 要:** 作为新一代火焰筒材料, GH3230 镍基高温合金在极端高温高压环境中服役时的蠕变性能尤其重要。开展了 GH3230 高温合金在不同应力、不同温度(800, 900 和 1000 °C)下的蠕变实验, 基于修正  $\theta$  参数法和复合时间硬化模型对 GH3230 合金的蠕变变形进行了预测分析, 并对其高温蠕变断裂机理进行了阐释。结果表明, GH3230 合金的蠕变寿命与温度和应力有关。温度越高、应力越大, 合金的蠕变寿命越短。修正  $\theta$  参数法在温度和应力均较高时能较好地预测蠕变变形, 而复合时间硬化模型在温度和应力均较低时能较好地预测蠕变变形。GH3230 合金的蠕变断裂为孔洞聚集型的解理断裂, 断裂路径表明主要由晶界迁移主导, 且蠕变温度越高断口韧窝尺寸越大。

**关键词:** GH3230; 镍基高温合金; 修正  $\theta$  参数法; 复合时间硬化模型; 蠕变变形

**中图分类号:** TG132.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)04-0395-07

## Study on Creep Deformation and Fracture Mechanism of GH3230 Alloy

REN Xiaodong<sup>1</sup>, HOU Cheng<sup>1</sup>, XU Qipeng<sup>1</sup>, ZHOU Fangjing<sup>1</sup>,  
ZENG Jiaxun<sup>2</sup>, YANG Siyuan<sup>2</sup>, FAN Xueling<sup>1</sup>

(1. Xi'an Key Laboratory of Extreme Environment and Protection Technology,

School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

**Abstract:** As a new generation burner inner liner material, the creep properties of GH3230 nickel-based superalloy are particularly important when serving in extreme high temperature and high pressure environments. In this paper, the creep experiments of GH3230 superalloy under different stresses and temperatures (800, 900 and 1000 °C) were conducted. The creep deformation of GH3230 alloy was predicted based on the modified  $\theta$  parameter method and composite time-hardening model, and the high temperature creep fracture mechanism was explained. The results show that the creep deformation of GH3230 alloy is closely related to temperature and stress. The higher the temperature and stress, the shorter the creep life. The modified  $\theta$  parameter method can predict the creep deformation better when the temperature and stress are high, while the composite time-hardening model can predict the creep deformation better when the temperature and stress are low. The creep fracture of GH3230 alloy is a cavity aggregation cleavage fracture, and the fracture path shows that it is mainly dominated by grain boundary migration, and the higher the creep temperature, the larger the fracture dimple size.

**Key words:** GH3230; nickel-based superalloy; modified  $\theta$  parameter method; composite time-hardening model; creep deformation

### 1 前 言

作为新一代镍基高温合金, GH3230 合金具有高强度、可焊接、抗氧化等特点<sup>[1, 2]</sup>。中国航发湖南动力机械研究所袁珂等<sup>[3]</sup>研究发现, GH3230 合金的拉伸强度、低周疲劳性能和持久寿命均明显优于 GH3536 合金, 故被广泛应用于航空发动机燃烧室火焰筒。在实际工作中, 火焰筒除

收稿日期: 2023-10-27 修回日期: 2023-11-29

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(J2019-IV-0003-0070)

第一作者: 任晓东, 男, 1990 年生, 硕士研究生

通讯作者: 侯 成, 男, 1991 年生, 助理教授,

Email: houcheng@xjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202310026

了承受极端高温,还会受到热应力及周向压力的作用,因此研究 GH3230 合金的蠕变性能显得尤为重要。

当前,描述材料蠕变变形有 3 种方法,分别为持久强度外推法、基于蠕变曲线的预测方法和连续介质损伤力学模型预测法。基于蠕变曲线的预测方法中的  $\theta$  参数法和复合时间硬化模型由于预测精度高、操作方便,应用尤为广泛,目前已有学者做了大量的研究。 $\theta$  参数法是 20 世纪 80 年代由 Evans 和 Wilshire<sup>[4]</sup>首次提出,用以描述低合金耐热钢蠕变变形,其基本假设是把标准的蠕变曲线简化,将其用蠕变第一阶段和蠕变第三阶段之和表达出来。但由于蠕变规律较为复杂,且不是每种材料都与  $\theta$  参数法的基本假设相符,如有些材料不存在蠕变第一阶段,或是蠕变第一阶段很短可忽略不计。因此, Oikawa 和 Maruyama<sup>[5]</sup>采用修正  $\theta$  参数法对铁素体耐热钢蠕变行为进行了预测,且成功预测了 CrMoV 和 12Cr (H46) 钢的蠕变行为<sup>[6,7]</sup>;张爽等<sup>[8]</sup>采用修正  $\theta$  参数法对 GH4169 的蠕变寿命进行预测,均得到良好的结果。此外,作为一种通用的有限元分析软件, ANSYS 包含了多种蠕变模型,其中的复合时间硬化模型是根据 Zienkiewicz 和 Corneau<sup>[9]</sup>提出的塑性和蠕变的统一理论发展而来的,可以较好地描述蠕变变形的第一阶段和第二阶段。 Kodur 和 Dwaikat<sup>[10]</sup>根据 SM50A 钢以及 A36 钢材的高温蠕变试验数据,采用此模型拟合得到的蠕变应变与常应力和变应力下的蠕变试验数据吻合都较好;闫守海<sup>[11]</sup>采用此模型对 Q345 钢和 Q460 钢的蠕变曲线进行拟合,大部分情况下,复合时间硬化模型能很好地模拟蠕变变形的第一阶段和第二阶段,验证了采用此蠕变模型模拟这两种材料蠕变变形过程的正确性。由于修正  $\theta$  参数法和复合时间硬化模型描述蠕变变形已经在多种钢上得到了验证,因此本研究试图将其用于描述 GH3230 合金的蠕变变形。

蠕变断裂机理是研究蠕变变形的一个重要内容,与微观组织、成分、承受温度、应力和环境等因素有关。田素贵等<sup>[12]</sup>发现镍基单晶合金蠕变的变形机制是主、次滑移系的交替开动,从而形成多条裂纹,并且解理面具有四方形特征;高圣勇等<sup>[13]</sup>研究了温度对 GH4169 合金蠕变机制的影响,发现蠕变过程中存在  $\gamma'$  相长大聚集,并向  $\delta$  相转变的现象;张敏<sup>[14]</sup>研究了镍基高温合金 DD413 的蠕变损伤行为,发现应力是  $\gamma'$  相发生筏化的关键因素,随着温度的升高,会导致  $\gamma'$  出现连接现象;宋晓国<sup>[15]</sup>发现在 GH4169 合金蠕变过程中,针状  $\delta$  相的存在在一定程度上强化了晶界,缓解了应力集中,使材料呈现出塑性变形的滑移特征,提高了材料的蠕变延伸率。

1984 年美国国防部颁布的《发动机结构完整性大纲》(MIL-STD-1783)中明确提出把“防止蠕变屈曲”作为航空发动机燃烧室和加力燃烧室的重要设计准则之一。针对

目前 GH3230 合金的高温蠕变研究数据较少的现状,本文开展了 GH3230 合金的高温蠕变实验,基于修正  $\theta$  参数法和复合时间硬化模型对不同温度和应力条件下 GH3230 合金的蠕变变形进行了预测,研究更适合描述 GH3230 合金高温蠕变的蠕变本构模型,并对其高温蠕变断裂机理进行了详细分析,为后续研究火焰筒的蠕变屈曲变形及寿命提供依据。

2 实验

本实验采用长春科新 RD100 蠕变试验机(图 1a),实验材料选用 GH3230 镍基高温合金,将其加工成标准光滑平板试样,尺寸如图 1b 所示。蠕变实验温度分别选取为 800, 900 和 1000  $^{\circ}\text{C}$ , 每种工况取 3 个试样开展蠕变实验,具体的实验方案如表 1 所示。实验过程中,通过 2 支引伸计分别监测记录试样两侧的蠕变变形,并取其平均值作为试样的蠕变变形。

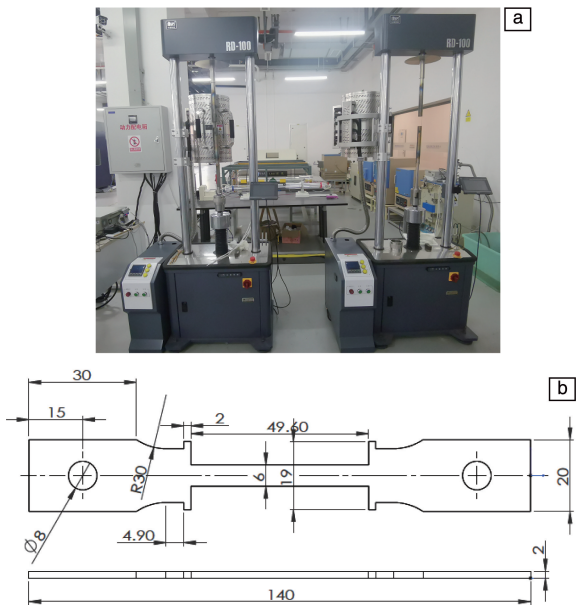


图 1 蠕变试验机照片(a)和试验件示意图(b)

Fig. 1 Photo of creep testing machine (a), schematic of specimen (b)

表 1 蠕变实验方案  
Table 1 Creep test scheme

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Stress/MPa	Specimen number
800	120	3
	100	
	85	
900	100	3
	85	
	70	
1000	70	3
	60	
	50	

### 3 结果与讨论

#### 3.1 实验结果

当蠕变温度为 800 ℃、应力为 120 MPa 时, 由于 GH3230 合金蠕变试验时长超过 350 h, 因此不再进行

800 ℃、100 MPa 和 800 ℃、85 MPa 条件下的蠕变试验; 900 和 1000 ℃ 下的蠕变试验正常进行。蠕变曲线如图 2 所示, 从图 2a 可以看出, 在 800 ℃、120 MPa 条件下, GH3230 合金的蠕变寿命为 342.84 h。

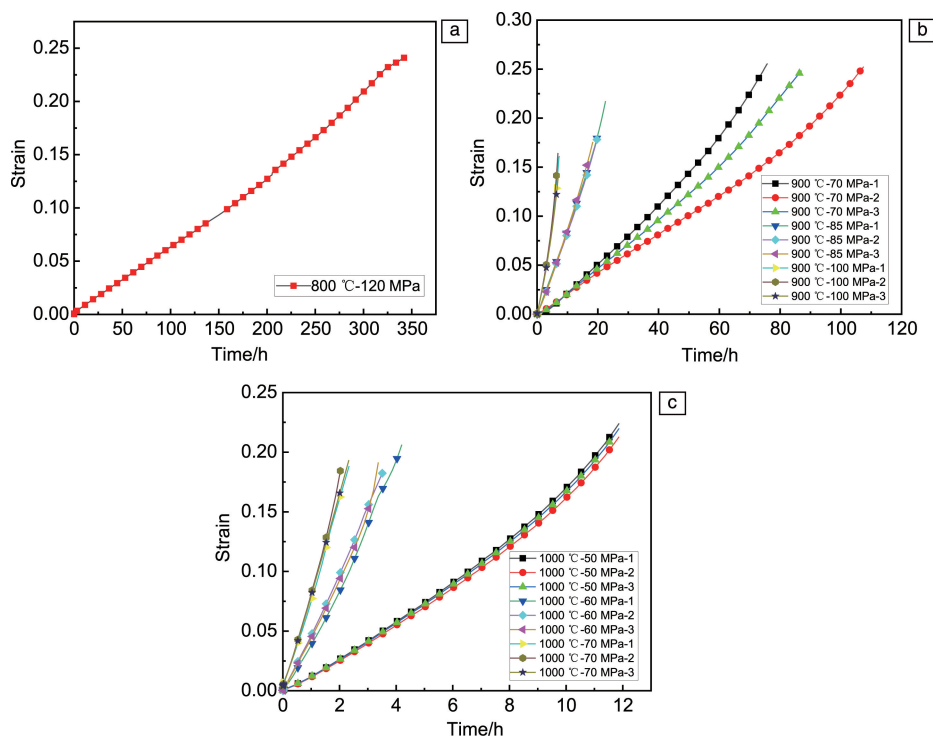


图 2 不同温度、应力条件下 GH3230 合金的蠕变曲线

Fig. 2 Creep curves of GH3230 alloy under different temperature and stress conditions

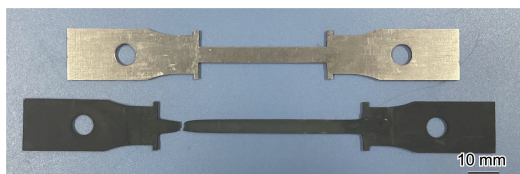


图 3 试验件蠕变试验前后的照片

Fig. 3 Photo of specimen before and after creep test

从图 2b 可以看出, 在 900 ℃、70 MPa 条件下, GH3230 合金的蠕变寿命分别为 78.2、90.2 和 109.87 h, 离散性为 15.99%; 在 900 ℃、85 MPa 条件下, 合金的蠕变寿命分别为 24.87、20.2 和 20.87 h, 离散性为 2.53%, 该条件下蠕变试验件明显伸长, 断口处颈缩现象也较为明显, 试验件表面由于氧化明显发黑 (图 3); 在 900 ℃、100 MPa 条件下, 合金的蠕变寿命分别为 7.37、6.87 和 7.7 h, 离散性为 0.42%。由此可以看出, 在 900 ℃ 时, 蠕变应力对 GH3230 合金的蠕变寿命影响较大, 且蠕变应力越大, 其蠕变寿命越短, 其离散性也越小。

从图 2c 可以看出, 在 1000 ℃、50 MPa 条件下, GH3230 合金的蠕变寿命分别为 12.88、12.89 和 12.81 h, 离散性为 0.04%; 在 1000 ℃、60 MPa 条件下, 蠕变寿命分别为 4.2、3.45 和 3.45 h, 离散性为 0.49%; 在 1000 ℃、70 MPa 条件下, 蠕变寿命分别为 2.34、2.37 和 2.33 h, 离散性为 0.02%。由此可以看出, 在 1000 ℃ 时, 蠕变应力越大, GH3230 合金的蠕变寿命越短, 其寿命离散性没有明显变化。

#### 3.2 蠕变寿命预测

##### 3.2.1 修正 $\theta$ 参数法

修正  $\theta$  参数法旨在描述蠕变过程的第二阶段和第三阶段。由于上述 GH3230 合金蠕变试验的蠕变第一阶段表现均不明显, 而第二阶段和第三阶段比较明显, 因此选用修正  $\theta$  参数法进行预测, 如式(1):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \theta_1 t + \theta_2 (\exp(\theta_3 t) - 1) \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon$  为蠕变应变,  $\varepsilon_0$  为初始蠕变应变,  $t$  为蠕变时间,  $\theta_i (i=1, 2 \text{ 或 } 3)$  为与蠕变温度和应力有关的参数, 且满足式(2):

$$\lg \theta_i = a_i + b_i T + c_i \sigma + d_i T \sigma \tag{2}$$

式中,  $T$  为蠕变温度,  $\sigma$  蠕变应力;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 、 $d_i$  ( $i = 1, 2$  或  $3$ ) 是与材料相关的系数, 可通过蠕变试验数据进行多元线性回归得到。

在同等试验条件下有 3 条蠕变曲线, 3 条曲线会拟

合出不同的参数, 因此拟合时选取蠕变寿命处于中间值的蠕变曲线。GH3230 合金蠕变曲线拟合结果如图 4 所示, 可以看出修正  $\theta$  参数法可以很好地描述 GH3230 合金的蠕变试验曲线, 不同温度和应力条件下得到的  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_3$  如表 2 所示。

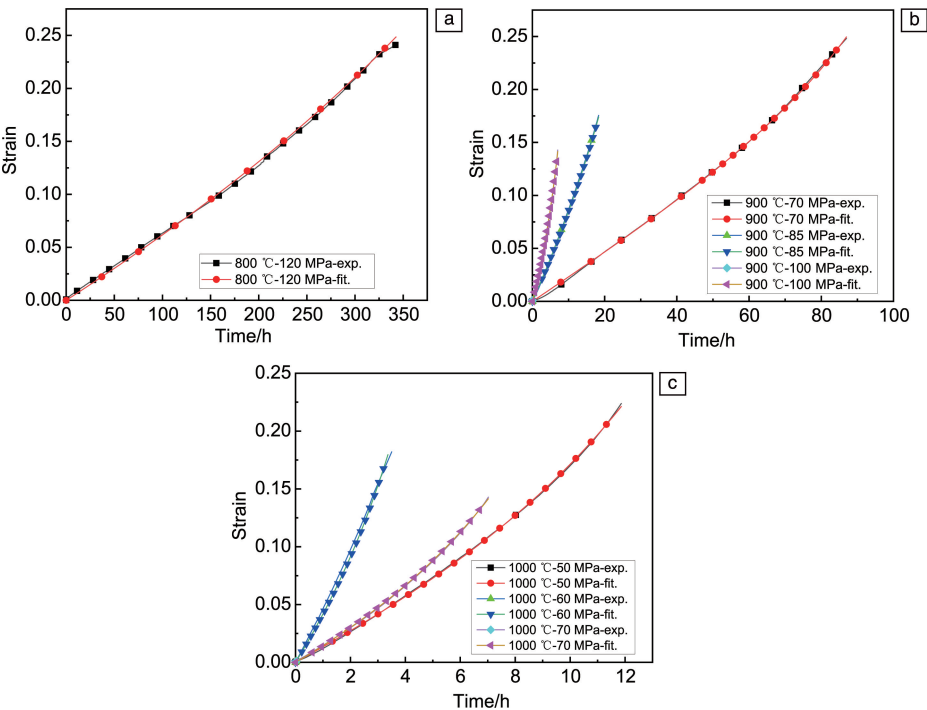


图 4 不同温度、应力条件下基于修正  $\theta$  参数法的 GH3230 合金蠕变拟合曲线

Fig. 4 Fitting creep curves of GH3230 alloy based on the modified  $\theta$  parameter method under different temperature and stress conditions

表 2 修正  $\theta$  参数法拟合得到的  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_3$  值

Table 2 The values of  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  and  $\theta_3$  obtained by the modified  $\theta$  parameter method

Temperature/ °C	Stress/ MPa	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
800	120	0.000 45	0.038 44	0.003 62
	70	0.002 26	0.001 19	0.044 3
900	85	0.006 75	0.012 63	0.087 33
	100	0.009 26	0.021 69	0.214 89
1000	50	0.011 25	0.010 68	0.187 23
	60	0.028 1	0.024 52	0.444 77
	70	0.044	0.037	0.63

采用 Origin 软件对表 2 的数据进行多项式线性拟合, 得到不同  $\theta_i$  值对应的  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  和  $d_i$ , 如表 3 所示。利用表 3 中的数据, 依据式 (2) 计算得到: 当温度为 850 °C、应力为 100 MPa 时,  $\theta_1$  为 0.001 723,  $\theta_2$  为 0.009 315,  $\theta_3$  为 0.024 150; 当温度为 950 °C、应力为 100 MPa 时,

$\theta_1$  为 0.063 697,  $\theta_2$  为 0.089 17,  $\theta_3$  为 1.257 529。开展这两种条件下的蠕变试验, 并与修正  $\theta$  参数法预测蠕变曲线进行对比, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 当蠕变条件为 850 °C、100 MPa 时, 由于忽略了第一阶段的变形, 在小变形情况下, 修正  $\theta$  参数法预测蠕变寿命曲线的精度还有待提高, 当应变从 0 增加到 0.05 时, 绝对误差逐渐增大, 在最大应变处, 相对误差达到了 19.07%。而当蠕变条件为 950 °C、100 MPa 时, 修正  $\theta$  参数法预测蠕变寿命曲线精度较高。因此, 修正  $\theta$  参数法只有在大变形 (即温度和应力均比较高) 时, 能较好地预测蠕变寿命。

表 3 利用多项式线性拟合得到的  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  和  $d_i$

Table 3  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  and  $d_i$  ( $i = 1, 2$  or  $3$ ) obtained by polynomial linear fitting

$\theta$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$
$\theta_1$	-10.729 2	0.005 74	-0.096 42	0.000 10
$\theta_2$	-33.419 01	0.023 63	0.203 71	-0.000 14
$\theta_3$	-4.557 5	0.001 64	-0.163 37	0.000 16



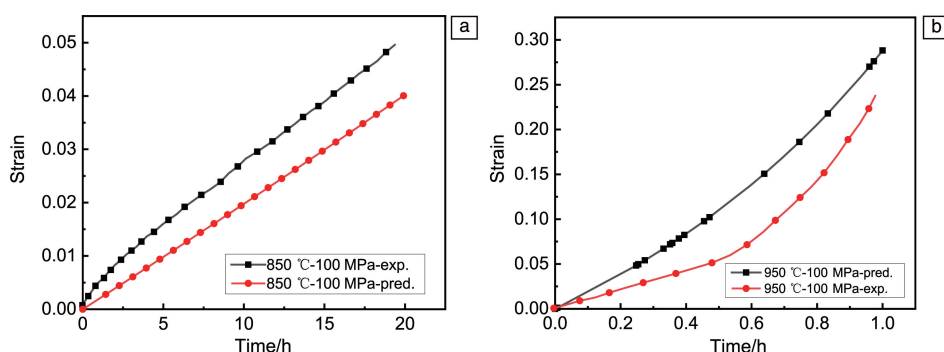
图5 基于修正 $\theta$ 参数法预测的GH3230合金蠕变曲线和实验蠕变曲线对比

Fig. 5 Comparison of the creep curves of GH3230 alloy predicted by the modified  $\theta$  parameter method with the experimental creep curves

### 3.2.2 复合时间硬化模型

通用有限元分析软件 ANSYS 包含了多种蠕变模型, 其中复合时间硬化模型能较好地描述蠕变变形的第一阶段和第二阶段, 如式(3):

$$\varepsilon = \frac{c_1 \sigma^{c_2} t^{c_3+1} e^{-\frac{c_4}{T}}}{c_3 + 1} + c_5 \sigma^{c_6} t e^{-\frac{c_7}{T}} \quad (3)$$

式中,  $c_1 \sim c_7$  为拟合参数,  $c_1 > 0$ ,  $c_5 > 0$ <sup>[11]</sup>。采用复合时间硬化模型对 GH3230 合金的蠕变曲线进行拟合, 结果如图6所示。

采用复合时间硬化模型拟合后蠕变曲线的决定系数  $R^2$  为 0.957 12, 拟合后得到的参数如表4所示。

对应的复合时间硬化模型见式(4):

$$\varepsilon = \frac{93.441 \sigma^{-9.514} t^{-11.334} e^{-\frac{37.059.359}{T}}}{-11.334} + (1.1167) \sigma^{5.713} t e^{-\frac{54.516.337}{T}} \quad (4)$$

并用此参数对 850 °C、100 MPa 和 950 °C、100 MPa 条件下 GH3230 合金的蠕变曲线进行预测, 结果如图7所示。从图中可以看出, 当蠕变条件为 850 °C、100 MPa 时,

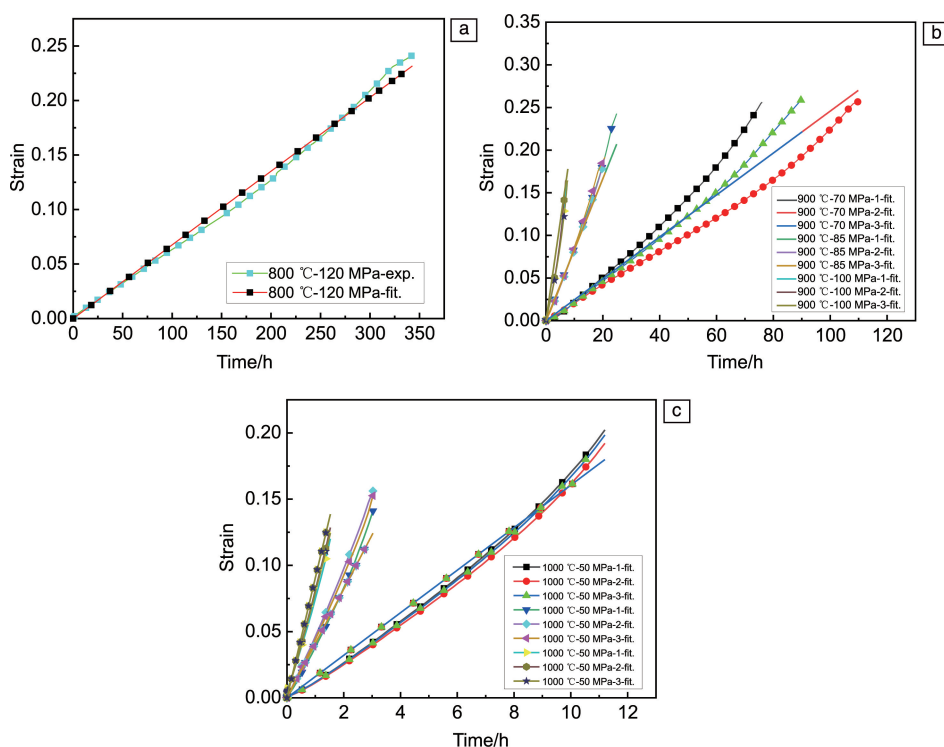


图6 不同温度、应力条件下基于复合时间硬化模型的GH3230合金蠕变拟合曲线

Fig. 6 Fitting creep curves of GH3230 alloy based on the composite time-hardening model under different temperature and stress conditions

表 4 复合时间硬化模型拟合后的参数

Table 4 Parameter values after fitting the composite time-hardening model

Parameter	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
Value	93.441	-9 514.142	-12.334	37 059.359
Parameter	$c_5$	$c_6$	$c_7$	
Value	1.116E7	5.713	54 516.337	

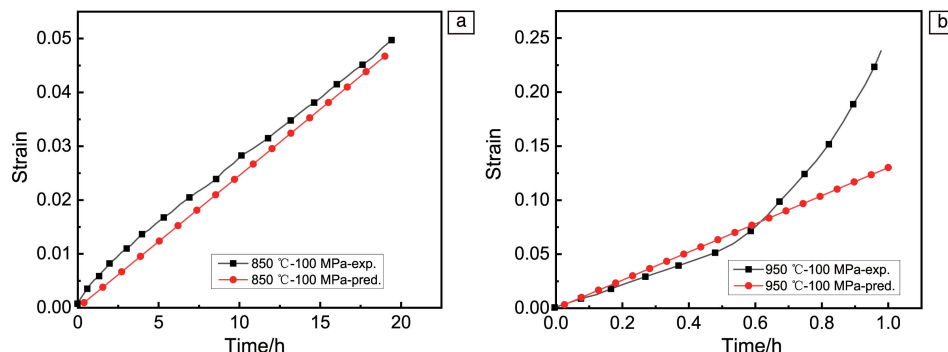


图 7 基于复合时间硬化模型预测的蠕变曲线和实验蠕变曲线对比

Fig. 7 Comparison of the creep curves predicted by the composite time-hardening model with the experimental creep curves

### 3.3 蠕变断裂机理分析

将 GH3230 合金蠕变试验件的断口经丙酮和酒精清洗后,在蔡司 Gemini 扫描电镜下观察断口。从图 8a 中形貌推断, GH3230 合金在 1000 °C、70 MPa 时的蠕变断裂形式为孔洞聚集型的塑性断裂;对比 1000 °C、70 MPa (图 8b) 和 900 °C、70 MPa (图 8c) 条件下合金蠕变试验件的韧窝形貌,发现韧窝孔洞的大小随着温度的升高而增大。从图 8d 中形貌推断, GH3230 合金在 900 °C、70 MPa 下蠕变断裂时有重熔现象,这可能是蠕变温度过

高所致;在 900 °C、85 MPa 蠕变条件下(图 8e),从断裂路径看,合金试验件属于沿晶断裂,由于内无滑移线,因此是晶界迁移主导的塑性变形。

综上,在高温及应力条件下, GH3230 合金的蠕变断裂机制具体为:各晶粒在晶界中发生迁移,从而导致塑性失稳,并形成了韧窝孔洞,随着时间的延长,孔洞不断长大、聚合,从而形成微裂纹,并不断聚合形成主裂纹,直至断裂。

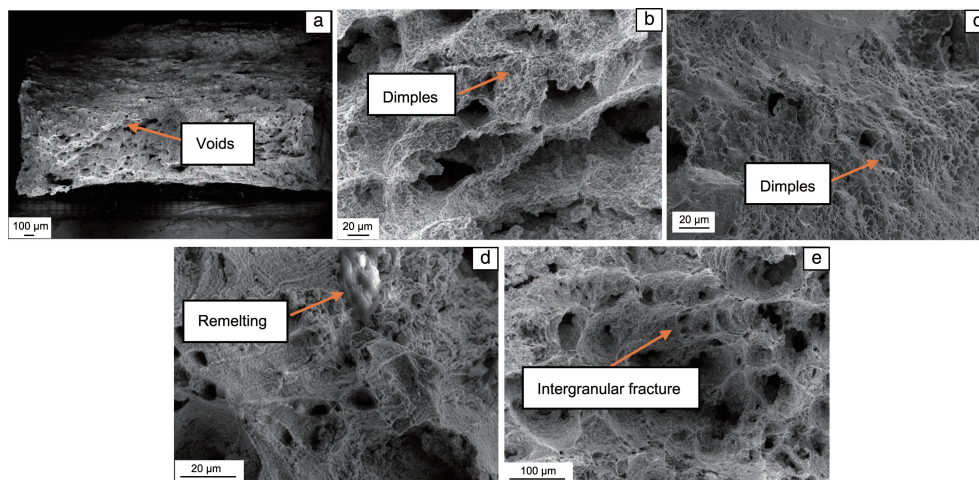


图 8 GH3230 合金蠕变试验件断口 SEM 照片: (a, b) 1000 °C、70 MPa; (c, d) 900 °C、70 MPa; (e) 900 °C、85 MPa

Fig. 8 SEM images of the fracture surface of GH3230 alloy creep specimen: (a, b) 1000 °C, 70 MPa; (c, d) 900 °C, 70 MPa; (e) 900 °C, 85 MPa

## 4 结 论

(1) GH3230 合金的蠕变寿命与温度和应力息息相关。温度越高、应力越大, 合金蠕变寿命越短, 同时蠕变寿命的离散性也会减小。

(2) 修正  $\theta$  参数法在大变形时(即温度和应力均比较高), 能较好地预测蠕变变形; 而复合时间硬化模型在小变形时(即温度和应力均比较低), 能较好地预测蠕变变形。

(3) GH3230 合金的蠕变断裂为孔洞聚集型的解理断裂, 断裂路径表明主要由晶界迁移主导。蠕变温度越高, 断口的韧窝尺寸越大。

## 参考文献 References

- [1] 陈石富, 马惠萍, 鞠泉, 等. 材料导报[J], 2009, 23(Z1): 436-439.  
CHEN S F, MA H P, JU Q, *et al.* Materials Reports[J], 2009, 23(Z1): 436-439.
- [2] 张亚玮, 沈宇, 鞠泉, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2023, 52(9): 3221-3229.  
ZHANG Y W, SHEN Y, JU Q, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2023, 52(9): 3221-3229.
- [3] 袁珂, 李钊, 王强, 等. 塑性工程学报[J], 2023, 30(5): 172-179.  
YUAN K, LI Z, WANG Q, *et al.* Journal of Plasticity Engineering[J], 2023, 30(5): 172-179.
- [4] EVANS R W, WILSHIRE B. Creep of Metals and Alloys[M]. London: The Institute of Metals, 1985.
- [5] OIKAWA H, MARUYAMA K. Fusion Engineering and Design[J], 1992, 19(4): 321-328.
- [6] MARUYAMA K, OIKAWA H. Transactions of the Japan Institute of Metals[J], 1987, 28(4): 291-298.
- [7] MARUYAMA K, HARADA C, OIKAWA H. Journal of the Society of Materials Science, Japan[J], 1985, 34(386): 1289-1295.
- [8] 张爽, 刘峰, 李荣华, 等. 辽宁石油化工大学学报[J], 2020, 40(3): 69-73.  
ZHANG S, LIU F, LI R H, *et al.* Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology[J], 2020, 40(3): 69-73.
- [9] ZIENKIEWICZ O C, CORMEAU I C. International Journal for Numerical Methods in Engineering[J], 1974, 8: 821-845.
- [10] KODUR V K R, DWAIKAT M M S. Materials and Structures[J], 2010, 43: 1327-1341.
- [11] 闫守海. 钢材高温蠕变性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
YAN S H. Experimental Study on Creep Behavior in Steel at Elevated Temperature[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [12] 田素贵, 薛永超, 曾征, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2014, 43(5): 1092-1098.  
TIAN S G, XUE Y C, ZENG Z, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2014, 43(5): 1092-1098.
- [13] 高圣勇, 葛树欣, 杨选宏, 等. 工程科学学报[J], 2023, 45(2): 301-309.  
GAO S Y, GE S X, YANG X H, *et al.* Chinese Journal of Engineering[J], 2023, 45(2): 301-309.
- [14] 张敏. 一种镍基单晶高温合金蠕变损伤行为研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.  
ZHANG M. Study on Creep Damage Behavior of Nickel-Based Single Crystal Superalloy[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [15] 宋晓国. GH4169 合金高温低周疲劳及蠕变性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
SONG X G. The Study on High Temperature Low Cycle Fatigue Properties and High Temperature Creep Properties of GH4169 Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.