

引用格式: 付书红, 杨亚锟, 李青宇, 等. GH3230 高温合金单轴拉伸性能和持久性能预测 [J]. 航空材料学报, 2026, 46(9): 45-54.

FU Shuhong, YANG Yakun, LI Qingyu, et al. Prediction of uniaxial tensile properties and stress rupture properties for GH3230 superalloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(9): 45-54.

GH3230 高温合金单轴拉伸性能和持久性能预测

付书红^{1*}, 杨亚锟¹, 李青宇², 曹 胜³, 赵张龙³, 王 涛¹

(1. 中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095; 2. 中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213; 3. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

摘要: GH3230 高温合金在航空发动机和核工业领域应用广泛, 其构件的服役寿命评估高度依赖单轴拉伸性能与持久寿命预测的准确性。本工作重点研究该合金在不同温度下的单轴拉伸性能, 以及在不同温度与应力组合条件下的持久寿命, 并建立描述该合金拉伸行为的 Ramberg-Osgood (R-O) 本构模型与 Chaboche 本构模型, 以及用于预测持久寿命的等温线外推法和 Larson-Miller (L-M) 参数模型。结果表明: 在单轴拉伸性能预测方面, R-O 模型仅能较好预测合金在屈服点附近的应力, 但整体应力-应变曲线的预测趋势存在较大偏差; 而 Chaboche 模型则能更有效地描述 GH3230 高温合金不同温度下的单轴拉伸行为, 在多数试验温度下的拟合相关系数接近 0.9。在持久寿命预测方面, 等温线外推法和 L-M 法均表现出较高的预测精度, 能够对该合金在不同服役条件下的持久寿命进行合理预测。

关键词: GH3230 高温合金; 单轴拉伸性能; 持久寿命; 性能预测; 本构模型

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2026.000062

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2026.000062

中图分类号: V252.1; V250.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)09-0045-10

Prediction of uniaxial tensile properties and stress rupture properties for GH3230 superalloy

FU Shuhong^{1*}, YANG Yakun¹, LI Qingyu², CAO Sheng³, ZHAO Zhanglong³, WANG Tao¹

(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: GH3230 superalloy is widely used in the fields of aero-engine and nuclear industry. Due to its extensive application, the accurate assessment of service life of its components highly relies on the precise prediction of uniaxial tensile properties and stress rupture life. This paper focuses on investigating uniaxial tensile properties of this superalloy at different temperatures, as well as its stress rupture life under various combinations of temperature and stress. Correspondingly, the R-O constitutive model and the Chaboche constitutive model are established to describe the tensile behaviour of the alloy, while the isothermal line extrapolation method and the L-M parameter model are developed for predicting its stress rupture life. The results indicate that in terms of predicting uniaxial tensile properties, compared to the Chaboche constitutive model, the R-O model can only reasonably predict the stress near the yield point, showing a significant deviation in the overall prediction trend of the stress-strain curve. In contrast, the Chaboche constitutive model can more effectively describe the tensile behaviour of the GH3230 superalloy, with fitting correlation coefficients close to 0.9 at most test temperatures. Regarding the prediction of stress rupture life, both the isothermal line extrapolation method and the L-M method demonstrate high prediction accuracy. These models are capable of providing reasonable predictions for the stress rupture life of the superalloy under different service conditions.

Key words: GH3230 superalloy; uniaxial tensile property; stress rupture life; property prediction; constitutive model

GH3230 高温合金是一种高性能镍基高温合金,因其具有优异的抗氧化性、抗热腐蚀性以及高温下的高强度与良好韧性,已成为航空发动机燃烧室和核工业高温结构件的关键材料^[1-6]。随着现代航空发动机向着高推重比、高效率方向持续迈进,以及第四代核能系统对结构材料长寿命、高可靠性的要求日益严苛,高温结构部件承受的服役载荷日趋复杂化与极端化。极端服役工况材料的力学行为,特别是复杂载荷作用下的强度演变规律与持久寿命特征,直接决定构件在实际运行过程中的安全裕度与服役寿命。因此,精准描述 GH3230 高温合金在复杂工况下的力学行为,并在此基础上建立可靠的寿命预测方法,对于保障高端装备安全稳定运行具有不可替代的作用。

在工程实践中,单轴拉伸性能是材料基本力学行为表征和强度设计的基础。对于高温合金,其应力-应变关系往往呈现显著的非线性和温度依赖性。经典 Ramberg-Osgood(R-O)模型因形式简洁、参数易获取,被广泛用于描述金属材料的非线性弹塑性行为^[7-9]。然而,该模型难以完整描述高温合金在整个塑性变形阶段,特别是循环加载下的硬化行为。相比之下,Chaboche 黏塑性本构模型能更精细地刻画材料在单调及循环加载下的硬化/软化行为,在寿命预测中展现出更大潜力^[10-11]。系统评估两种模型对 GH3230 高温合金单轴拉伸行为的描述能力,是提升结构分析的关键。

对于高温长时服役构件,持久寿命是决定服役极限的核心指标。工程上常通过实验室加速试验测定材料在不同温度和应力下的断裂时间,再通过外推进行寿命预测。等温线外推法和 Larson-Miller(L-M)参数法是两种经典的持久数据外推方法^[12-13],但二者各有优劣,其预测精度高度依赖于材料特性和工况。因此,针对 GH3230 高温合金,系统研究其在宽温域、宽应力范围的持久性能,并对比两种经典模型的适用性与精度,对建立可靠的寿命预测体系具有重要意义。

尽管 GH3230 高温合金已在工程中得到广泛

应用,但现有研究多集中于微观组织或抗氧化腐蚀性^[14-18],而系统地将单轴拉伸本构行为与持久寿命预测综合研究较少,影响合金在重大装备长寿命构件上的进一步推广应用^[19-20]。基于此,本工作通过单轴拉伸性能测试、持久寿命测试与建模分析,获得合金较优的单轴拉伸本构关系模型与持久寿命预测模型,以期为该合金在装备长寿命构件上的应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

采用真空感应熔炼和真空自耗重熔工艺制备直径为 320 mm 的自耗锭,经均匀化处理后,锻造开坯得到直径为 200 mm 的棒材,化学成分见表 1。经环轧后得到直径为 800 mm 的环锻件。沿环锻件弦向取样,进行拉伸性能、持久性能测试。

图 1 展示了 GH3230 高温合金初始显微组织。如图 1(a)所示,合金基体呈典型的单相奥氏体等轴晶,晶界完整清晰;图 1(b)为第二相的形貌与分布特征。可以看出,尺寸较大的不规则块状初生碳化物随机弥散分布于晶内及晶界处;而大量细小的颗粒状次生碳化物则主要沿晶界呈不连续链状析出。

1.2 方法

为全面评估 GH3230 高温合金在不同温度环境下的力学响应行为及长期服役性能,系统开展单轴拉伸试验与高温持久性能试验。单轴拉伸试验参照 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》^[21]及相关高温试验标准,在 CMT-5105GL 型高温拉伸试验机上完成。为探究合金力学性能随温度的演变规律,试验设置了 8 个温度点,分别为 25(RT)、650、700、750、800、850、900、950 °C。研究采用 Ramberg-Osgood(R-O)模型与 Chaboche 本构模型对试验获得的应力-应变曲线进行拟合与描述。

高温持久性能试验参照 GB/T 2039—2024《金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法》^[22],在 NC-12F

表 1 GH3230 高温合金的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of GH3230 superalloy (mass fraction/%)

Al	B	C	Cr	Co	Fe	Mo	Mn	S	Si	W	P	Ni
0.34	0.0045	0.076	21.42	3.0	0.13	1.22	0.49	<0.0005	0.37	14.04	<0.005	Bal.

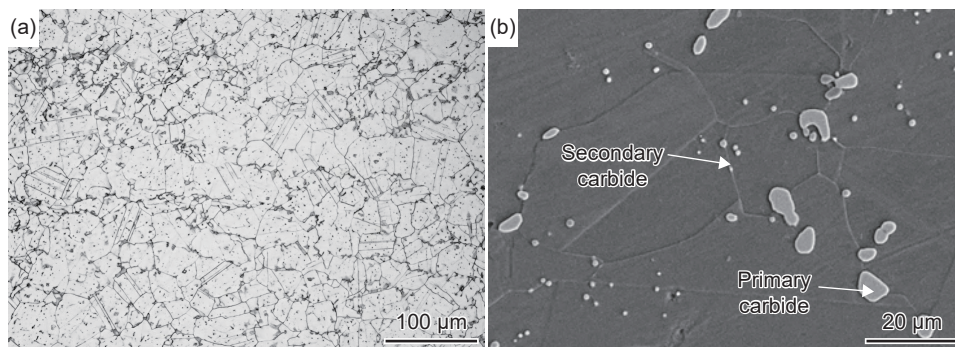


图1 GH3230 高温合金显微组织 (a)金相组织; (b)扫描电镜组织

Fig. 1 Microstructure of GH3230 superalloy (a) optical microstructure; (b) SEM microstructure

型金属蠕变持久试验机上进行。试验共设置 5 个温度点, 分别为 750、800、850、900、950 °C。在各试验温度下, 对试样施加不同等级的应力, 记录其断裂时间, 以此建立合金的应力-断裂寿命曲线, 为高温构件的寿命评估提供基础数据。研究采用等温线外推法与 Larson-Miller (L-M) 参数模型对合金的长时持久强度进行预测。

2 结果与分析

2.1 单轴拉伸与持久寿命测试

通过单轴拉伸试验获得了 GH3230 高温合金室温以及 650~950 °C 的高温拉伸曲线, 如图 2(a) 所示。可以看出, 不同温度下的拉伸曲线均不存在

明显的屈服段, 当拉伸温度在室温~800 °C 时, 曲线上不存在应力值下降段, 应力值随着应变的增加逐渐增大; 而当拉伸温度超过 800 °C 时, 应力值在一定应变值条件下达到最高值, 然后随着应变的继续增加, 应力值发生缓慢降低。对比合金强度与温度关系, 如图 2(b) 所示, 可以看出, 随测试温度的升高, 合金的抗拉强度 σ_b 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 均呈现出持续降低趋势, 尤其是抗拉强度, 从室温时的 807 MPa 降低至 950 °C 时的 197 MPa, 表明该合金的抗拉强度对温度变化比较敏感。而屈服强度随温度变化较小: 从室温升高至 650 °C, 其值降低不超过 100 MPa; 当拉伸温度处于 650~950 °C 范围内, 合金屈服强度变化很小; 当温度继续升高至 950 °C, 合金的屈服强度才发生显著降低。

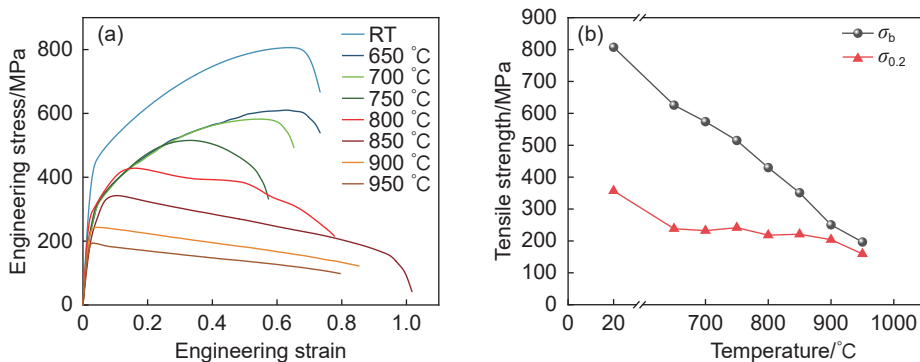


图2 GH3230 高温合金拉伸力学性能 (a)工程应力-应变曲线; (b)合金强度与温度的关系曲线

Fig. 2 Tensile properties of GH3230 superalloy (a) engineering stress-strain curves; (b) relationship between strength and temperature

GH3230 高温合金持久寿命与温度和应力关系如图 3 所示。可以看出, 在同一温度水平下, 随应力升高, 持久寿命逐渐下降, 整体趋势为大应力下寿命快速降低、较低应力下寿命降低速率比较缓慢, 甚至在曲线末端出现水平段, 此时应力值逐渐接近该温度条件下的持久极限强度, 且合金在较高

温度水平下能更快达到持久强度极限。在同一应力水平条件下, 合金持久寿命随测试温度升高不断降低, 且持久寿命差距逐渐增加。GH3230 高温合金的持久寿命随测试温度和应力的升高而逐渐减小, 在 950 °C/119 MPa 条件下的持久寿命仅为 0.75 h, 而合金在 750 °C/135 MPa 条件下的持久寿

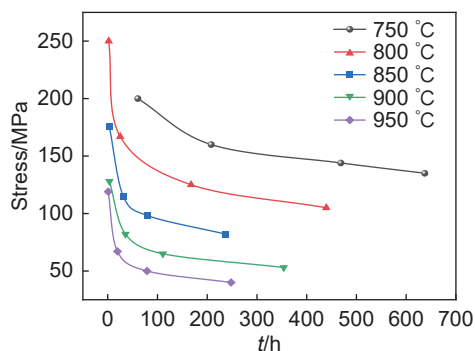


图3 GH3230 高温合金的持久寿命与应力和温度的关系
Fig. 3 Relationship of stress rupture life, stress and temperature for GH3230 superalloy

命可以达到 637 h。

2.2 单轴拉伸预测模型

2.2.1 R-O 本构模型

在固体力学领域,准确描述材料的应力-应变响应是进行结构强度分析与寿命评估的基础。Ramberg-Osgood(R-O)方程作为描述材料单轴拉伸力学行为应用最广泛的本构模型之一,适用于描述没有明显屈服平台的非线性材料拉伸应力-应变曲线^[23]。GH3230 高温合金作为一种典型的固溶强化型镍基高温合金,其在室温至高温的宽温域范围内表现出连续屈服的非线性力学行为,无明显屈服点,采用 R-O 本构模型对其拉伸行为进行预测具有一定的工程适用性。R-O 模型通过构建总应变为弹性应变与塑性应变之和的数学形式,以幂律关系描述材料进入塑性应变后的硬化行为,其具体表达形式如式(1)所示:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{e0}} \right)^n \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ε 为对应的应变; E 为材料的弹性模量; σ_{e0} 为常规弹性极限; ε_0 为 σ_{e0} 所对应的塑性应变,对于没有屈服平台的材料,一般取 $\varepsilon_0 = 0.2\%$, $\sigma_{e0} = \sigma_{0.2}$; n 为 R-O 模型的应变硬化指数, $n=1$ 时,合金材料的应力-应变关系是线弹性的, $n=\infty$ 时,材料的应力-应变关系是理想弹塑性的。

上述模型中需要确定 3 个基本参数:弹性模量 E 、常规弹性极限 σ_{e0} 和应变硬化指数 n 。弹性模量 E 的确定可通过拉伸应力-应变曲线的线性段来确定,常规弹性极限 σ_{e0} 在这里取 $\sigma_{0.2}$,采用 n 近似计算方法^[24], $n = 0.1\sigma_{0.2}$,代入式(1)中可以得到式(2):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^{0.1\sigma_{0.2}} \quad (2)$$

基于图 1(a)GH3230 高温合金在不同温度条

件下的单轴拉伸试验曲线,提取各温度所对应的弹性模量与屈服强度等关键力学参数。将相关参数代入式(2)的 R-O 本构模型表达式中,即可建立针对 GH3230 高温合金在不同温度条件单轴拉伸的 R-O 本构关系,实现对合金拉伸行为的理论预测。将 R-O 模型计算得到的理论应力-应变曲线与试验实测曲线进行对比,结果如图 4 所示。可以发现, R-O 模型对 GH3230 高温合金单轴拉伸行为的预测,仅在屈服点附近区域表现出较好的吻合度,能够较为准确地捕捉合金开始进入塑性变形阶段时的应力响应,但在应变远离屈服点区域,模型计算值与实测值之间均呈现明显偏差。这可能与 GH3230 高温合金塑性变形过程中涉及多滑系启动、动态应变时效或位错亚结构演变等复杂机制相关,而 R-O 模型固定的函数形式(即采用单一硬化指数描述全域塑性行为)难以捕捉这些微观机理所引发的宏观非线性响应。

2.2.2 Chaboche 本构模型

Chaboche 模型作为一种典型的统一黏塑性本构模型,在学术界与工程界得到了广泛认可与应用。该模型的理论框架基于运动强化、各向同性强化以及时间恢复效应的耦合机制,旨在系统描述材料在循环加载条件下的硬化、软化行为,以及高温环境下的热回复现象,起初主要是为了解决循环载荷作用下的非弹性响应分析问题,为结构的寿命评估与安全设计提供理论支撑^[25-27]。Chaboche 模型具备描述复杂循环加载的能力,但在应用于单轴拉伸行为时,其数学形式应进行合理简化。针对 GH3230 高温合金的单轴拉伸试验条件(单调加载至断裂,不考虑循环效应),模型中的某些复杂演化机制可予以简化处理,具体表达形式如式(3)所示。

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{true}} = \varepsilon_e + \varepsilon_p \\ \sigma_{\text{true}} = k + R_0 \varepsilon_p + R_\infty (1 - e^{-b \varepsilon_p}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε_e 和 ε_p 分别为弹性应变和塑性应变分量; k 为刚发生塑性应变的材料单轴应力; k 、 R_0 、 R_∞ 、 b 均为材料常数。

相较于前述 R-O 模型, Chaboche 模型在理论上具有更强的灵活性与物理机制关联性,其多分量背应力的引入,使得模型能够更精细地刻画材料从初始屈服到充分塑性流动全过程中的硬化速率变化。将合金不同温度拉伸下的工程应力-应变数据进行真应力-真应变转换,即可基于公式(3)进行非线性拟合,从而获得合金在不同温度下的 Chaboche 模型参数,在 25、650、750、850 °C 条件下, k 分别

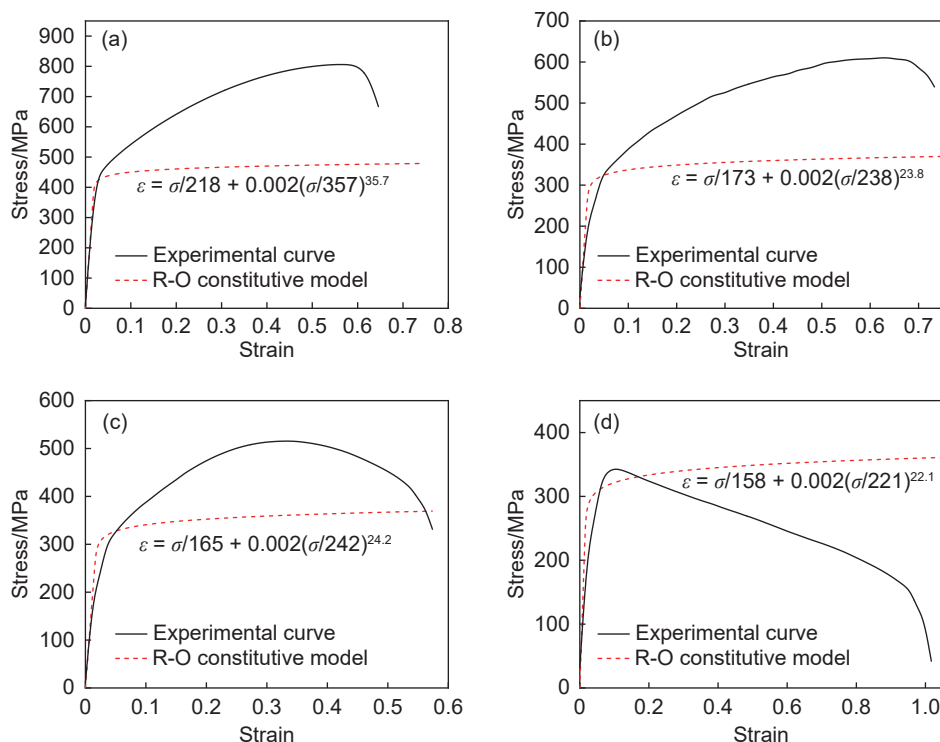


图4 GH3230 高温合金不同温度下的拉伸应力-应变曲线与 R-O 本构模型曲线对比
(a)室温; (b)650 °C; (c)750 °C; (d)850 °C

Fig. 4 Comparison of tensile stress-strain curves and R-O constitutive model curves of GH3230 superalloy at different temperatures (a) room temperature; (b) 650 °C; (c) 750 °C; (d) 850 °C

为 110、37、20.5、167, R_0 分别为 1847、1342、868、4, R_∞ 分别为 321、292、344、204, b 分别为 704、39、1013、2627。

以获得的 Chaboche 模型对合金进行典型温度下的拉伸行为预测, 如图 5 所示, 可以发现, Chaboche 本构模型的计算曲线与试验实测曲线在全应变范围内展现出较好的吻合度, 说明 Chaboche 模型参数变化能够在一定程度上反映合金由于晶界、位错、碳化物等微观组织特征运动而影响的拉伸行为变化。随着试验温度的升高, 模型拟合效果呈现一定的温度依赖性, 这可能与高温下材料微观机制的演变密切相关, 温度升高激活了晶界滑移、位错攀移以及空位扩散等蠕变相关机制, 使得材料在颈缩阶段表现出更为复杂的损伤演化过程, 同时也可能与测试正常偏差相关。由于 Chaboche 单轴拉伸本构模型本质上描述的是材料在均匀塑性变形阶段的应力-应变响应, 对颈缩发生后局部变形阶段的描述能力有限。尽管如此, 模型在均匀塑性变形范围内的预测能力依然保持稳定, 采用相关系数 R^2 对拟合精度进行定量表征, 发现 Chaboche 模型在多数试验温度下的拟合相关系数均接近 0.9, 模型的整体预测精度处于较高水平。

进一步观察图 5 可以发现, 合金在 750 °C 拉伸

时的模型预测曲线与试验结果存在一定偏离(图 5 (c)), 而 850 °C 又吻合较好, 850 °C 拉伸时应力随应变增加快速降低的变化趋势与室温和 650 °C 下应力增加的变化趋势完全不同, 说明合金在较高温度的拉伸行为不同于较低温度。从图 6 合金拉伸断口形貌也可以发现, 在室温至 650 °C 较低温度条件下, 断口纤维区和剪切唇区均分布有大量尺寸不一的韧窝, 韧窝底部可见第二相粒子; 而当温度升至 850 °C 时, 较多韧窝内的第二相粒子从基体剥落, 形成较大尺寸的孔洞分布, 这可能也是合金拉伸应力随应变增加快速降低的主因, 而 750 °C 拉伸时处于第二相粒子开始剥落初期, 因此拉伸应力呈现先增加再降低的变化, 这可能也是导致 Chaboche 模型难以精准预测的原因。

2.3 持久寿命预测模型

2.3.1 等温线外推法

合金的持久寿命受载荷、服役环境、服役时间等多因素共同作用^[28-30]。在恒定温度下对材料进行持久试验时, 试样的断裂时间与应力之间存在如式(4)的关系, 由于在进行寿命预测外推时, 不考虑温度因素, 因此该方法称为等温线法。

$$t_r = A\sigma^{-B} \quad (4)$$

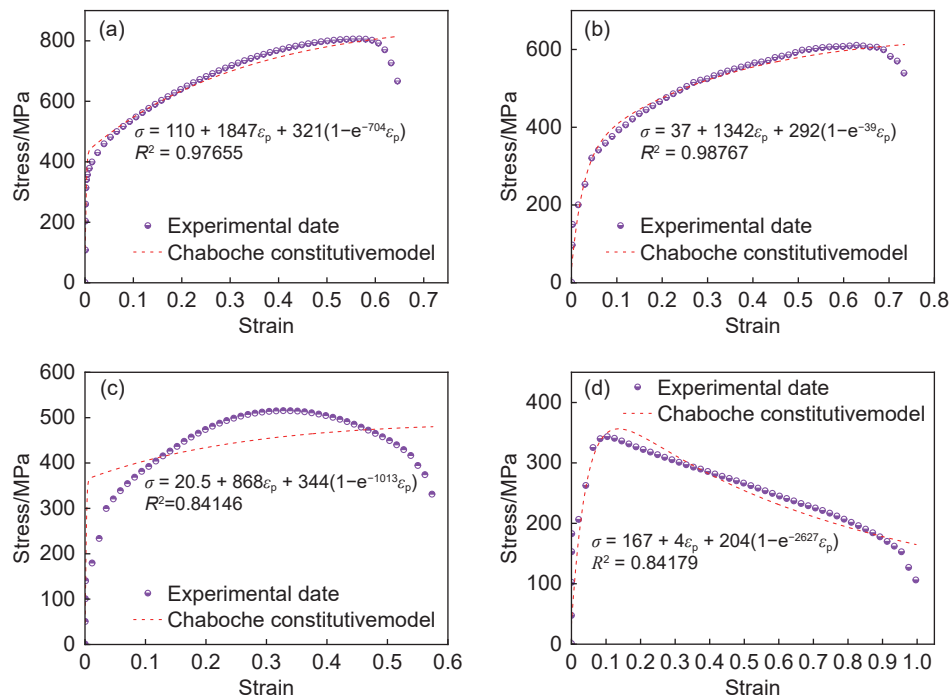


图5 GH3230 高温合金不同温度下的拉伸应力-应变曲线与 Chaboche 本构模型曲线对比
(a)室温; (b)650 °C; (c)750 °C; (d)850 °C

Fig. 5 Comparison of tensile stress-strain curves and Chaboche constitutive model curves of GH3230 superalloy at different temperatures (a) room temperature; (b) 650 °C; (c) 750 °C; (d) 850 °C

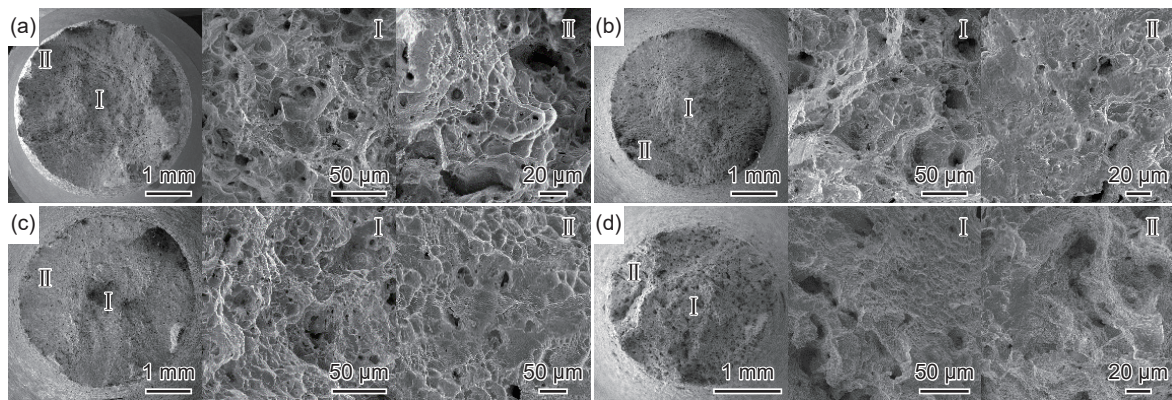


图6 GH3230 高温合金不同温度下的拉伸断口 (a)室温; (b)650 °C; (c)750 °C; (d)850 °C

Fig. 6 Tensile fracture surfaces of GH3230 alloy at different temperatures (a) room temperature; (b) 650 °C; (c) 750 °C; (d) 850 °C

式中: t_f 为断裂时间; σ 为加载应力; A 、 B 为与材料组织和试验温度有关的常数。

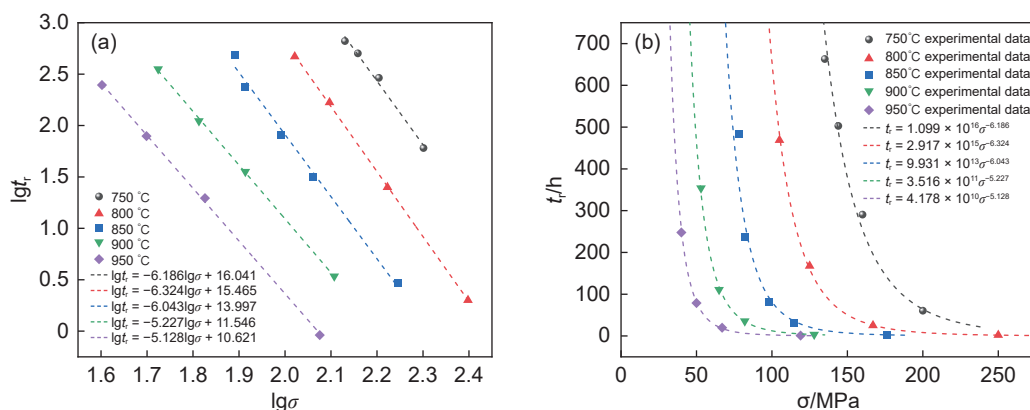
对式(4)两边分别取对数可得:

$$\lg t_f = \lg A - B \lg \sigma \quad (5)$$

式(5)表明在一定温度下, 材料所受应力 σ 与断裂时间 t_f 的双对数呈线性关系。通过一定的持久性能试验, 进行线性拟合后可求得式中的材料常数 A 和 B 值, 由此得到材料双对数外推模型。针对数万至数十万小时的长时服役条件, 可在上述模型基础上, 进一步考虑氧化、蠕变等损伤机制随温度的非线性演化特征, 通过引入相应的修正参数, 实

现对长时持久寿命的合理预测。

为建立 GH3230 高温合金在不同温度条件下的持久寿命预测模型, 本工作首先对试验获得的持久性能数据进行系统处理。以断裂寿命的对数值为纵坐标, 以应力的对数值为横坐标, 绘制不同试验温度下的 $\lg t_f - \lg \sigma$ 散点图, 并采用线性回归方法对各温度下的数据点进行拟合, 结果如图 7(a) 所示。由图可见, 在各试验温度下 $\lg t_f$ 与 $\lg \sigma$ 之间均呈现显著的线性相关性。将拟合获得的不同温度下的模型参数代入式(5), 绘制出合金在各试验温度下的寿命-应力关系曲线, 结果如图 7(b) 所示。可以观察到, 不同温度下的试验数据点基本分布于

图 7 GH3230 高温合金不同温度下的 $\lg t_r$ - $\lg \sigma$ 拟合图 (a) 及 t_r - σ 图 (b)Fig. 7 $\lg t_r$ - $\lg \sigma$ fitting curves (a) and t_r - σ plots (b) of GH3230 superalloy at different temperatures

各自对应的等温预测曲线上, 部分数据点虽存在微小偏离, 但整体吻合程度较高。对比结果表明, 采用等温线外推法建立的 GH3230 高温合金持久寿命预测方程具有较高的拟合精度与预测可靠性。

2.3.2 L-M 预测模型

在高温材料持久寿命预测的研究中, 等温线法因其数学形式简洁、参数物理意义明确而得到广泛应用。但是由于该模型仅针对单一温度建立寿命与应力的关系, 无法直接描述温度变化对持久寿命的耦合影响。为克服等温线法在温度维度上的不足, 本工作引入 Larson-Miller (L-M) 参数法对 GH3230 合金的持久寿命进行综合建模。L-M 参数法是一种基于时间-温度等效原理的经典寿命预测模型, 通过引入包含温度与时间综合效应的归一化参数, 可表述为材料在不同温度与应力水平下达到断裂的时间 t_r 与试验温度 T 之间存在特定的函数关系^[31], 通常定义为:

$$P_{L-M}(\sigma) = T(\lg t_r + C) \quad (6)$$

式中: $P_{L-M}(\sigma)$ 为 Larson-Miller 参数, 是与应力相关的函数; T 为绝对温度; C 为材料常数。该方法以不同试验温度下的持久数据曲线簇为基础, 通过引入温度因子对时间坐标进行修正, 建立应力与修正时间函数之间的主曲线关系, 从而实现利用有限温度下的试验数据预测材料在其他温度条件下的长时持久行为。

在应用 L-M 参数法进行数据拟合时, 合理选取应力参数的表达形式是决定模型精度的关键。本工作在构建 L-M 主曲线时, 采用多项式函数对 L-M 参数与应力之间的非线性关系进行描述。具体而言, 以 L-M 参数 $P(\sigma)$ 为因变量, 以应力的对数形式或应力本身为自变量, 建立如下的多项式回归方程:

$$T(\lg t_r + C) = a + b \lg \sigma + c \lg^2 \sigma \quad (7)$$

采用多项式进行应力修正的优势在于其数学形式灵活, 能够通过增加高阶项的方式逐步逼近 L-M 参数与应力之间的真实函数关系, 从而显著提升模型在不同应力区间的拟合精度与预测可靠性。分别取参数 $C=10, 15, 20, 25, 30$, 分析不同参数下 L-M 参数法对持久寿命数据二次多项式拟合的准确性, 结果如图 8(a) 所示, 当材料参数 C 从 10 增加到 15 时, 预测结果精准性有明显的提升, 伴随着参数值增加, 预测的准确度在 $C=20$ 时出现了降低, 而后随着材料参数值继续增大, 相关性系数持续下降。因此, 对于 GH3230 高温合金, C 取值为 15, 由此得到 GH3230 高温合金 L-M 预测方程如下:

$$T(\lg t_r + 15) = 27763.36646 - 2796.69209 \lg \sigma - 797.20706 \lg^2 \sigma \quad (8)$$

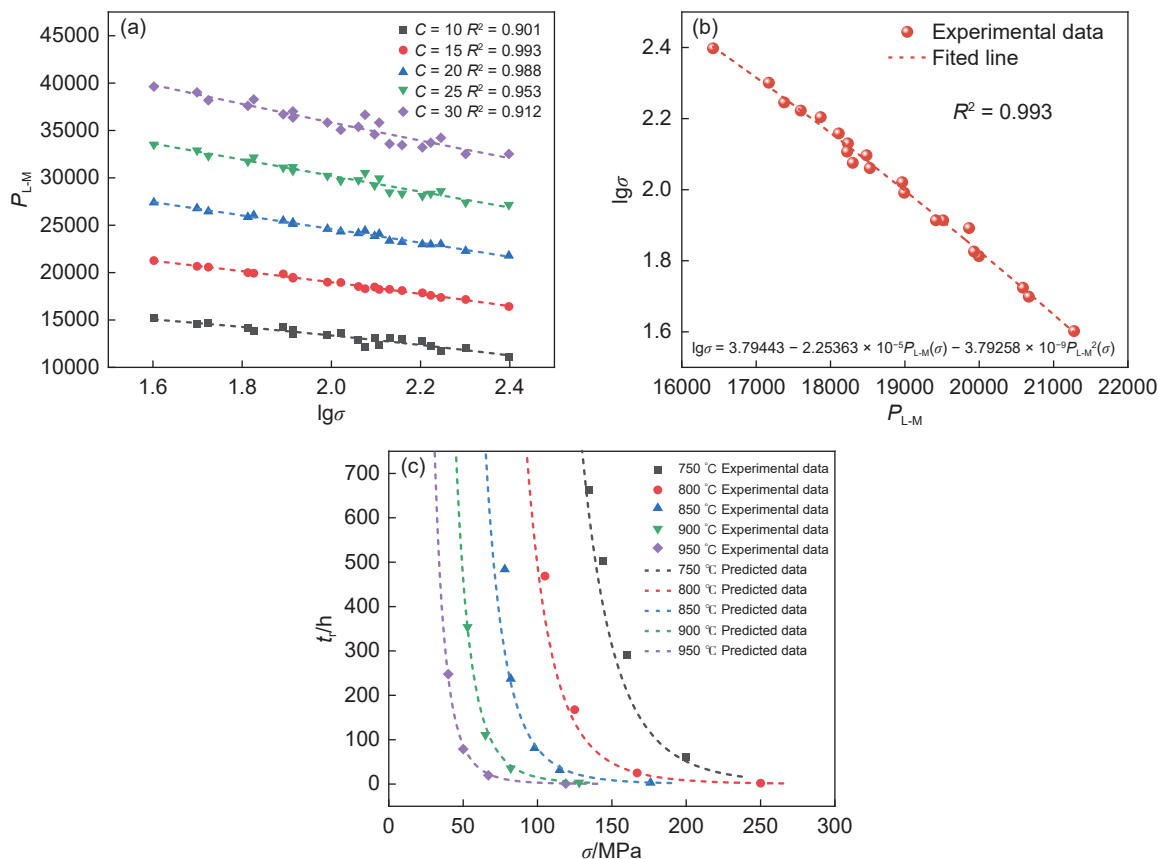
但是这对于预测合金在不同条件下的持久强度比较繁琐, 需要求解一元二次方程。因此, 为方便预测材料的持久强度, 将应力对数 $\lg \sigma$ 用应力函数 $P_{L-M}(\sigma)$ 的多项式表示, 一般取多项式的前两项已具有足够精度, 即:

$$\lg \sigma = C_0 + C_1 P_{L-M}(\sigma) + C_2 P_{L-M}^2(\sigma) \quad (9)$$

式中: C_0, C_1, C_2 为多项式待定系数。

通过不同温度和应力下的持久寿命数据, 代入计算 $\lg \sigma$ 和 $P_{L-M}(\sigma)$, 并进行二次多项式拟合, 预测结果如图 8(b) 所示, 试验数据点均匀分布在热强参数综合曲线周围, 相关系数为 $R^2=0.993$, 相应的预测模型如下:

$$\lg \sigma = 3.79443 - 2.25363 \times 10^{-5} P_{L-M}(\sigma) - 3.79258 \times 10^{-9} P_{L-M}^2(\sigma) \quad (10)$$

图8 $P_{L-M}(\sigma)$ - $\lg\sigma$ (a)、 $\lg\sigma$ - $P_{L-M}(\sigma)$ (b) 及 t_r - σ (c) 关系曲线图Fig. 8 Plots of $P_{L-M}(\sigma)$ - $\lg\sigma$ (a), $\lg\sigma$ - $P_{L-M}(\sigma)$ (b) and t_r - σ (c)

对式(10)两端进行推导, 便可得到最终预测模型, 如式(11)所示:

$$\sigma = 10^{3.79443 - 2.25363 \times 10^{-5} P_{L-M}(\sigma) - 3.79258 \times 10^{-9} P_{L-M}^2(\sigma)} \quad (11)$$

利用式(11), 代入不同条件下的数据, 便可得到材料在不同条件下的持久寿命, 预测结果如图8(c)所示。

等温线法通过在恒定温度下建立断裂寿命与应力之间的幂律关系, 能够较为准确地描述材料在特定温度条件下的应力-寿命响应, 并可基于短时试验数据, 对典型应力水平下的长时寿命进行合理外推, 但外推有效性依然受限于合金损伤机制随时间和应力变化的潜在影响, 因此, 在长时持久寿命外推预测时, 同样需进一步修正系数因子。

3 结论

(1) GH3230 高温合金的单轴拉伸与持久性能表现出显著的温度与应力依赖性, 合金在不同温度下的拉伸应力-应变曲线均无明显屈服段, 抗拉强度和屈服强度均随温度升高而降低, 抗拉强度对温度尤为敏感; 在同一温度下, 合金持久寿命随应力

升高而快速减少, 在低应力区合金应力值趋近持久强度极限。

(2) 基于 GH3230 高温合金不同温度条件下的拉伸试验数据, 分别建立了 R-O 本构模型和 Chaboche 本构模型; R-O 模型能较好预测合金在屈服点附近的应力, 对整体应力-应变曲线的预测趋势较差; Chaboche 模型在多数试验温度下的拟合相关系数接近 0.9, 能够较好地描述该合金的拉伸行为。

(3) 基于 GH3230 高温合金不同测试温度和应力下的持久寿命, 分别建立了等温线法和 L-M 预测法持久寿命模型, 两种模型在试验范围内均表现出相关系数 $R^2 > 0.99$ 的预测精度, 能够有效描述合金的持久寿命。

参考文献:

- [1] Veverkova J, Strang A, Marchant G R, et al. High temperature microstructural degradation of Haynes alloy 230[C]//Superalloys 2008 (Eleventh International Symposium). Warrendale, PA: TMS, 2008: 479-488.
- [2] Pataky G J, Sehitoglu H, Maier H J. High temperature fatigue crack growth of Haynes 230[J]. *Materials Char-*

- acterization, 2013, 75: 69-78.
- [3] 高佩, 程晓农, 罗锐. 超高温气冷堆中间换热器用 Haynes 230 合金的热拉伸行为研究[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(10): 83-91.
- Gao P, Cheng X N, Luo R. Study on hot tensile behavior of Haynes 230 alloy for intermediate heat exchanger of ultrahigh temperature gas-cooled reactor[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27(10): 83-91.
- [4] Mishra A, Chakravarthy P, Murty S V S N. Investigations on phase stability of Haynes-230 processed by wire arc additive manufacturing[J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2025, 14(3): 511-516.
- [5] Zhang Y J, Hou C, Jin X C, et al. Thermal fatigue crack initiation and propagation behaviors of GH3230 nickel-based superalloy[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2024, 47(1): 6-19.
- [6] Ren R, Yao Y X, Han D S, et al. Effects of post-treatment on the microstructure evolution and high-temperature oxidation properties of nickel-based superalloys fabricated by selective laser melting[J]. *Metals*, 2025, 15(7): 708.
- [7] 赵君文, 韩靖, 黄兴民, 等. 材料力学性能[M]. 北京: 化学工业出版社, 2025.
- Zhao J W, Han J, Huang X M, et al. Mechanical properties of materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2025.
- [8] Anatolyevich B P, Yakovlevna G N. Generalization of the Ramberg-Osgood model for elastoplastic materials[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(12): 7342-7346.
- [9] Subasic M, Alfredsson B, Dahlberg C F O, et al. Mechanical characterization of fatigue and cyclic plasticity of 304L stainless steel at elevated temperature[J]. *Experimental Mechanics*, 2023, 63(8): 1391-1407.
- [10] Yue X W, Zhou J X. Implementation of abaqus user subroutines for viscoplasticity of 316 stainless steel and zircaloy-4[J]. *Metals*, 2023, 13(9): 1554.
- [11] Santus C, Grossi T, Romanelli L, et al. A computationally fast and accurate procedure for the identification of the Chaboche isotropic-kinematic hardening model parameters based on strain-controlled cycles and asymptotic ratcheting rate[J]. *International Journal of Plasticity*, 2023, 160: 103503.
- [12] Fan G C, Yuan G Z, Wang W X, et al. Study on creep characteristics and the isochronous stress-strain curve of Ni-Cr-Mo superalloy[J]. *Materials at High Temperatures*, 2023, 40(6): 469-478.
- [13] Terada Y, Murata Y, Sato T, et al. Analysis of creep rupture life of Mg-Al-Mn alloy produced by die-casting[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 128(1/2): 32-34.
- [14] Katcher M, Klarstrom D L. A review of Haynes® 230® and 617 alloys for high temperature gas cooled reactors[J]. *Materials Science Forum*, 2008, 595/596/597/598: 511-517.
- [15] 张天昊, 鞠泉, 蒙肇斌, 等. GH3230 高温合金焊接板材长期热暴露后组织和性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(7): 2573-2581.
- Zhang T H, Ju Q, Meng Z B, et al. Study on microstructure and properties of GH3230 welded plates after long-term heat exposure treatment[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(7): 2573-2581.
- [16] 丁佐军, 郭亮, 徐晓懿, 等. 固溶温度对 Haynes 230 合金热轧棒材显微组织演变和拉伸性能的影响[J]. *特殊钢*, 2025, 46(2): 103-108.
- Ding Z J, Guo L, Xu X Y, et al. Effect of solution temperature on microstructural evolution and tensile properties of hot-rolled Haynes 230 alloy bar[J]. *Special Steel*, 2025, 46(2): 103-108.
- [17] 高佩. Haynes 230 镍基合金的变形行为及组织性能变化规律研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- Gao P. Research on deformation behavior and change rule of microstructure and properties for haynes 230 nickel-based alloy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [18] Cabot C, Girardin G, Rouillard F, et al. Comparison of the high temperature surface reactivity in impure helium of two materials for gas cooled reactors[J]. *Materials Science Forum*, 2008, 595/596/597/598: 439-448.
- [19] 王弘昶, 侯鑫阳, 王煦嘉, 等. 230 合金高温蠕变变形行为与本构模型研究[J]. *压力容器*, 2025, 42(1): 10-18.
- Wang H C, Hou X Y, Wang X J, et al. Study on creep deformation behavior and constitutive model of alloy 230 at elevated temperature[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2025, 42(1): 10-18.
- [20] 任晓东, 侯成, 许琦鹏, 等. GH3230 高温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 superalloy[J]. *Materials China*, 2025, 44(4): 395-401.
- [21] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第一部分: 室温试验方法[S].
- [22] GB/T 2039—2024 金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法[S].
- [23] 窦志家, 祝喆, 孙巍, 等. 2024-O 铝合金型材 Ramberg-Osgood 本构模型构建与方法研究[J]. *有色金属加工*, 2020, 49(4): 51-54.
- Dou Z J, Zhu X, Sun W, et al. Research on construction and method of Ramberg-Osgood constitutive model of 2024-O aluminum alloy profile[J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2020, 49(4): 51-54.

- [24] Steinhardt P J, Nelson D R, Ronchetti M. Bond-orientational order in liquids and glasses[J]. *Physical Review B*, 1983, 28(2): 784-805.
- [25] Chen W F, Wang F H, Kitamura T, et al. A modified unified viscoplasticity model considering time-dependent kinematic hardening for stress relaxation with effect of loading history[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 133: 883-892.
- [26] Bartošák M, Španiel M, Doubrava K. Unified viscoplasticity modelling for a SiMo4.06 cast iron under isothermal low-cycle fatigue-creep and thermo-mechanical fatigue loading conditions[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 136: 105566.
- [27] Ahmed R, Barrett P R, Hassan T. Unified viscoplasticity modeling for isothermal low-cycle fatigue and fatigue-creep stress-strain responses of Haynes 230[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, 88/89: 131-145.
- [28] Wu X J, Liu R, Khelifaoui F. Creep phenomena, mechanisms, and modeling of complex engineering alloys[J]. *Modelling*, 2024, 5(3): 819-840.
- [29] Huo M C, Yu Y, Xia R, et al. A new creep constitutive relationship for high temperature alloys[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 194: 106207.
- [30] Jiang R J, Yang X G, Huang J, et al. A novel creep life prediction model for variable loads considering the sequence effect[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, 206: 105062.
- [31] Dong C L, Li Y, Yu H C. Statistical analysis and reliability prediction of creep rupture strength and life for DZ125 superalloy[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 750: 133-138.

收稿日期: 2026-03-17; 录用日期: 2026-04-27

通讯作者: 付书红(1979—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为变形高温合金, 联系地址: 北京市 81 信箱 1 分箱 (100095), E-mail: fshdora@163.com

(本文责编: 张 琴)