DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3242

# GH4169 镍基合金板材高温拉伸性能研究

王梦真1,林 健1,呼 啸2,王大刚2,卫 强3

(1. 北京工业大学 材料与制造学部,北京 100124; 2. 首都航天机械有限公司,北京 100076; 3. 北京宇航系统工程研究 所,北京 100076)

摘 要:利用炉中高温拉伸设备对板厚为5mm的GH4169镍基合金在7种测试温度(450~1050℃),应变速率分别为0.01和0.001s<sup>-1</sup>时进行高温拉伸实验,获得材料在不同温度下的伸长率、屈服强度和抗拉强度,并对其高温拉伸变形行为进行分析,为该合金板材的高温拉伸成形制备和服役性能评估提供数据支持。结果表明,应变速率为0.001s<sup>-1</sup>,温度高于850℃时,GH4169镍基合金板材的伸长率随着温度的升高持续增大,在1050℃时,伸长率最高可达112%,抗拉强度随着温度的升高持续减小,强度减小至66MPa,仅为室温下的7.1%。应变速率为0.01s<sup>-1</sup>时,GH4169镍基合金板材的伸长率和抗拉强度变化具有相似的规律。温度低于800℃时,伸长率和抗拉强度随温度变化不大,保持了较高的强度;而随温度升高至850℃时,材料产生了明显软化现象,应变硬化指数(n)值随着温度的升高而减小,塑性变形量明显增大。

关键词:GH4169 镍基合金;高温拉伸;伸长率;抗拉强度;应变硬化指数;应变速率

中图分类号: TG132.3+3 文献标识码:A 文章编号:1000-8365(2023)12-1109-07

#### Study on the Tensile Properties of GH4169 Alloy Sheet at High Temperature

#### WANG Mengzhen<sup>1</sup>, LIN Jian<sup>1</sup>, HU Xiao<sup>2</sup>, WANG Dagang<sup>2</sup>, WEI Qiang<sup>3</sup>

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing 100076, China; 3. Beijing Aerospace Systems Engineering Institute, Beijing 100076, China)

**Abstract**: GH4169 nickel-based alloy material with a plate thickness of 5 mm was subjected to high-temperature tensile experiments at seven test temperatures (450~1 050 °C) and strain rates of 0.01 and 0.001 s<sup>-1</sup>, respectively, using high-temperature tensile equipment in a furnace. The elongation, yield strength and tensile strength of the material at different temperatures were obtained, and the high-temperature tensile deformation behavior was analysed, which provided data support for the preparation of high-temperature tensile forming and service performance evaluation of the alloy sheet. The results show that when the strain rate is 0.001 s<sup>-1</sup> and the temperature is higher than 850 °C, the elongation of the GH4169 nickel-based alloy plate continues to increase with increasing temperature and reaches up to 112% at 1 050 °C. The tensile strength decreases to 66 MPa with increasing temperature, which is only 7.1% at room temperature. When the strain rate is 0.001 s<sup>-1</sup>, the elongation and tensile strength changes of the GH4169 nickel-based alloy sheet have similar trends. When the temperature is lower than 800 °C, the elongation and tensile strength do not change much with temperature, and a high strength is maintained. However, when the temperature increases to 850 °C, the material has an obvious softening phenomenon, the strain hardening index *n* value decreases with increasing temperature, and the plastic deformation increases significantly.

Key words: GH4169 nickel-based alloy; high-temperature tensile; elongation; tensile strength; strain hardening index; strain rate

镍基合金作为高温合金中强度较高的一类合金,已得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。其主要原因为:①高温镍基

合金在溶解较多合金元素的同时又可以保持良好的 自身组织稳定性;②在较高的温度下能够形成有序

#### 收稿日期: 2023-10-08

- 基金项目:北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金(L212022);国家自然科学基金(51005004)
- 作者简介:王梦真,1998年生,硕士研究生.研究方向为增材制造过程物理模拟与数值仿真.Email:1060931720@qq.com

**通讯作者**:林 健,1979年生,教授.研究方向为汽车车身的轻量化、焊接过程物理模拟与数值仿真.Email:linjian@bjut.edu.cn 引用格式:王梦真,林健,呼啸,等.GH4169 镍基合金板材高温拉伸性能研究[J].铸造技术,2023,44(12):1109-1115.

WANG M Z, LIN J, HU X, et al. Study on the tensile properties of GH4169 alloy sheet at high temperature[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1109-1115.

共格的金属间化合物作为晶体强化相,使高温镍基 合金能够保持较高的高温强度<sup>[3-6]</sup>。GH4169 合金是 一种沉淀强化镍基高温合金<sup>[7-9]</sup>,由于其具有优异的 机械性能和极高的可加工性,是制造航空发动机涡 轮盘和叶片中最常用的高温合金之一<sup>[10]</sup>。受益于基 体中弥散分布的γ′相,在温度低于 650 ℃时具有更高 的晶格错配及反向畴界能,使合金 GH4169 在 -253~ 650 ℃内具有良好的综合性能<sup>[11-13]</sup>,在温度低于 650 ℃ 时的屈服强度为变形高温合金之首,并具有良好的 抗疲劳、抗辐射及焊接性能<sup>[14-16]</sup>。

高天明等<sup>[17]</sup>对 900 ℃超温服役条件下 GH4169 合金进行时效处理,发现随着时效时间的延长,δ相 沿晶界的不断析出,适量 $\delta$ 相的析出可提高材料的 抗拉强度和高温塑性,大量析出导致合金抗拉强度 和高温塑性变差。李晨<sup>118</sup>利用不同固溶温度和应变 速率研究变形工艺参数和固溶处理对 GH4169 合金 高温变形行为的影响,实验发现,流动应力随变形 温度的降低和应变速率的提高而迅速增大。丁奔四 建立了 GH4169 稀土强化镍基高温合金的修正非线 性回归模型,引入相关系数和平均相对误差,结果 表明该模型能够较准确地描述 GH4169 稀土强化 镍基高温合金的高温流变行为。在实验基础上,李 帮松等<sup>[20]</sup>采用 Deform-3D 有限元软件模拟了锻造态 GH4169 合金试样中不同变形条件下的温度场及应 力场分布,发现在较低温度以较高应变速率变形时 合金中会产生较大的变形热,且随着变形温度的提 高和应变速率的降低,变形热逐渐减小。

许多学者也致力于研究 GH4169 合金在热变形 过程中的显微组织演变,Liu<sup>[21]</sup>和 Zhao<sup>[22]</sup>发现动态 再结晶(dynamic recrystallization, DRX)的发生有 利于细化晶粒。随着变形温度和应变的升高,再结 晶速率增加,晶粒细化越明显。此外,Ning<sup>[23]</sup>和 Wang<sup>[24]</sup>发现δ相对再结晶也有很大的影响,其可诱 导再结晶成核,同时还可通过钉扎晶界来阻碍再 结晶晶粒的长大,进而有利于再结晶过程中的晶粒 细化<sup>[25]</sup>。

镍基合金不但具有良好的高温抗氧化和抗腐 蚀能力,而且有较高的高温强度和持久强度,以及 良好的抗疲劳性能,目前对镍基合金的研究多集中 在挤压过程和热处理对显微组织和高温力学性能 (一般为 650 ℃以下)的影响。深入开展 GH4169 合 金高温力学性能变化规律的研究,预测 GH4169 合金 材料在高温条件下的寿命,对服役条件苛刻部件的使 用安全尤为重要。本文针对厚度为 5 mm 的GH4169 合金板材进行温度范围更大的高温拉伸力学性能测 试,获得不同温度和应变速率下GH4169 合金的拉伸 实验数据,对其高温拉伸变形行为进行分析,为该合 金板材的高温拉伸成形制备和服役性能评估提供数 据支持。

# 1 实验材料与方法

板材的高温拉伸实验采用炉中高温拉伸设备进 行,测量标准拉伸试样在高温下的载荷-位移曲线。 温度值选取 450、550、650、750、850、950 和 1 050 ℃, 以两种应变速率 0.01 和 0.001 s<sup>-1</sup>,分别进行拉伸实 验,共测量 7×2=14 种情况的高温拉伸曲线。假设高 温变形全部发生在拉伸试样的平行段(该段温度高, 横截面面积小且均匀),可得出材料在不同温度和应 变速率下的高温拉伸工程应力-应变曲线,在转变为 真应力-应变曲线后,取均匀塑性变形阶段的部分真 应力-应变曲线后,取均匀塑性变形阶段的部分真 向力-应变曲线,按 Hollomon 公式进行拟合,以获 取应变硬化指数 n,分析合金的高温拉伸变形行为。 同时开展室温拉伸实验,拉伸速率为 1 mm/min,以 进行对比。实验所用 GH4169 合金板材成分如表 1 所示。

表 1 GH4169 合金化学成分 Tab.1 Chemical composition of GH4169

					(mas	s fract	ion/%)
Element	Ni	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Fe
GH4169	54.10	19.39	5.50	3.05	1.02	0.53	Bal.
	横横向(1	」	<b>1.66 (RD</b> ) (R6) (TD) 平行面 轧向(1			7	



分别选取平行于试板厚度方向的试样和垂直于 试板厚度方向的试样进行金相组织分析,如图1所 示。由于板材制备过程中轧制方向的影响,晶粒组织 在轧制过程中被拉长,晶粒织构具有一定的取向性, 如图2a所示;横截面金相组织晶粒织构无明显取向 性,如图2b所示。

炉中高温拉伸试样及室温拉伸试样的形状及尺 寸如图 3 所示。







图 3 拉伸试样尺寸图 :(a) 高温拉伸,(b) 室温拉伸 Fig.3 Dimensions of tensile specimens: (a) high temperature, (b) room temperature

## 2 实验结果及讨论

#### 2.1 室温拉伸实验结果

室温下测量得到的应力-应变曲线如图 4 所示。室温拉伸的破坏试样照片如图 5 所示。断裂发 生在试样的直线段上,对多个试样取平均值,可得 到材料的各项性能指标,如表 2 所示。可以看到, GH4169合金板材的屈服极限与抗拉强度近似为 500 和 900 MPa,符合 GB/T 228.1-2021 标准。



图 4 室温拉伸应力-应变曲线 Fig.4 Stress-strain curve of tensile test at room temperature

### 2.2 高温力学性能测量结果

2.2.1 应变速率 0.001 s<sup>-1</sup>

炉中高温拉伸实验分别测量了 GH4169 合金 在两种应变速率(分别为 0.01 和 0.001 s<sup>-1</sup>),7 种温 度(450~1 050 ℃)下的高温拉伸曲线,以进行比较。



图 5 室温拉伸破坏试样照片 Fig.5 Photograph of damaged specimens drawn at room temperature

表2 GH4169合金室温拉伸力学性能 Tab.2 Mechanical properties of the GH4169 nickel-based alloy at room temperature

Materials	Elastic modulus	Yield strength	Tensile strength	Elongation	
	/GPa	/MPa	/MPa	/%	
GH4169	172.2	444.5	935.0	46.2	

应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup> 时,在不同温度下,GH4169 合 金板材的真应力-应变曲线如图 6 所示。由图 6 可 知,在温度低于 650 ℃时,真应力-应变曲线变化不 大,保持了较高的强度。根据 GB/T 228.1-2021 标 准,GH4169 合金在 -253~650 ℃的温度范围内组织 和力学性能稳定,图 6 中的实验结果与标准相符,表 明实验结果具有合理性。



图 6 GH4169 合金炉中高温拉伸真应力-应变曲线(应变速率 0.001 s<sup>-1</sup>)

Fig.6 High temperature tensile true stress-strain curve of the GH4169 nickel-based alloy in a furnace (strain rate 0.001 s<sup>-1</sup>)

由图 7 可知,拉伸温度为 650 ℃时,材料的强度 得到一定程度提升,其主要是由于GH4169 合金在该 温度范围内发生了 γ"相的粗化现象。随温度升高, 试样在 750 ℃下强度明显升高,这是由于该温度下 γ"相析出速率加快, 屈服强度较 650 ℃时有明显 提升。在 GH4169 合金中,γ′相和 γ"相为合金强化 相,δ 相为 γ"相在高温下的稳定相。由文献[26]可知, 840 ℃时,δ 相在晶界和晶内大量析出,形成交叉分 布的魏氏组织。这部分转变的魏氏组织容易导致合 金塑性变差,强度变高,因此,GH4169 合金不宜在 该温度范围内进行热拉伸成形。

当温度为 950 ℃时,强化相 γ′相、γ″相、δ 相和 各种碳化物都发生了溶解,从而造成了高温强度的大 幅度下降;且由于魏氏组织 δ 相发生溶解,提升了 GH4169 合金的塑性。温度进一步升高至 1050 ℃时, 强度进一步降低,这与 An 等<sup>[27]</sup>的实验结果一致。

统计应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup> 条件下, GH4169 合金 的炉中高温拉伸实验结果, 获得了伸长率、屈服强度

和抗拉强度随温度的变化曲线,如图7所示。

由图 7 可见,温度低于 650 ℃时,GH4169 合金 的伸长率和屈服强度随温度变化不大,与室温下的伸 长率相当,保持了较高的高温强度;温度为 750 ℃时, 材料的屈服强度最大,伸长率最小。当温度高于 850 ℃ 时,伸长率随着温度升高持续增大,屈服强度和抗拉 强度显著降低,材料发生了明显的软化。在 1 050 ℃ 时,伸长率达到 112%,抗拉强度减小至 66 MPa,仅 为室温下的 7.4%。由此可见,在高温拉伸成形过程 中,GH4169 合金要获得较高的伸长率和较低的屈 服强度,需要将加热温度提升至 950 ℃以上。

0.001 s<sup>-1</sup> 应变速率下,拉伸破坏后的对比照片如图 8 所示。相比较而言,实验温度 950 ℃时,试样发生 均匀塑性变形的区域更大,具有更大的伸长率。



图 7 温度对 GH4169 伸长率、屈服强度和抗拉强度的影响(应变速率 0.001 s<sup>-1</sup>):(a) 伸长率,(b) 屈服强度和抗拉强度 Fig.7 Influence of temperature on elongation, yield strength and tensile strength (strain rate 0.001 s<sup>-1</sup>): (a) elongation, (b) yield strength and tensile strength



图 8 GH4169 镍基合金炉中高温拉伸实验的试样照片(应变速率 0.001 s<sup>-1</sup>):(a) 650 ℃,(b) 950 ℃ Fig.8 GH4169 nickel-based alloy specimen photo of the high temperature tensile test in a furnace (strain rate 0.001 s<sup>-1</sup>): (a) 650 ℃, (b) 950 ℃

#### 2.2.2 应变速率 0.01 s<sup>-1</sup>

改变炉中高温拉伸实验的应变速率为 0.01 s<sup>-1</sup>, 其应力-应变曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,当应变速率为 0.01 s<sup>-1</sup>时,随着温度的升高,GH4169 合金的伸长率大致遵循先减小后增加的规律,屈服强度和抗拉强度在增加到一定数值后持续减小。针对不同应变速率对材料伸长率、屈服强度和抗拉强度的影响,将它们绘制到图 10 中进行对比。随着温度的升高,两种不同应变速率下材料的伸长率都是先减小后增大,而屈服强度和抗拉强度则相反,对应的特征点都出现于750~800℃。温度低于 650 ℃时,GH4169 镍基合金的伸



图 9 GH4109 古 並 所 中 同 血 拉 仲 具 应 力 一 应 文 田 线 (应 文 医 年 0.01 s<sup>-1</sup>)

Fig.9 High temperature tensile true stress-strain curve of the GH4169 nickel-based alloy in a furnace (strain rate 0.01 s<sup>-1</sup>)



Tensile strength



图 10 不同应变速率下温度对材料伸长率、屈服强度和抗拉强度的影响:(a)伸长率,(b)屈服强度和抗拉强度 Fig.10 Effect of strain rate and temperature on elongation, yield strength and tensile strength of materials: (a) elongation, (b) yield strength and tensile strength

长率和抗拉强度随温度变化不大,与室温下的伸长 率相当,保持了较高的强度;而当温度高于850℃ 时,材料的伸长率随着温度的升高有显著增大的趋 势,强度快速降低,材料产生软化现象。在1150 ℃ 左右时,伸长率达到130.5%,抗拉强度随着温度 的升高持续减小,且在1150℃左右,抗拉强度减小至 73 MPa, 仅为室温下的 7.8%。由此可见, 在高温成形 时,需要将加热温度至少提升至850℃以上,以获得 较大的伸长率。

由图 10 中的结果可以看到:①当应变速率分别 为 0.01 s<sup>-1</sup> 和 0.001 s<sup>-1</sup> 时,伸长率、屈服强度和抗拉 强度随温度变化遵循相同的规律:伸长率随着温度 的升高先减小后增大,屈服强度和抗拉强度随着温 度的升高先增加后降低。750℃时强度最高,但是塑 性相对最差。②在温度相同的情况下,应变速率较低 时(0.001 s<sup>-1</sup>),伸长率较大,强度相对较低,这符合应 变速率对材料强度和塑性影响的一般规律。分析认 为,相同温度下,较大的应变速率导致了流变应力的 增大其主要原因为在材料变形初期的位错塞积与位 错之间的钉扎作用使得位错难以移动,从而导致加 工硬化占主导作用,导致了流变应力的增加。

#### 2.3 讨论

应变硬化指数 n 表示金属发生缩颈前依靠自身 硬化使材料均匀变形的能力。根据 Hollomon 公式,

采用式(1)拟合均匀塑性变形阶段的真应力 S 与应 变 e 的关系:

$$S = ke^n$$
 (1)

不同实验温度和不同应变速率下的应变硬化指 数n如图 11 所示。室温下的应变硬化指数n为0.338, 硬化系数 k 为 1 866.4 MPa,这表明材料在室温下具 有较强的应变硬化能力。当应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup>,温 度为850℃时,应变硬化指数n降低至0.06,几乎没 有应变硬化能力,在实际工程应用中,会在均匀变形 量很小时因发生局部变形而出现颈缩。因此高强度 的材料为了避免发生软化或者过早形成疲劳裂纹, 应避免加热到此温度进行力学测试。

#### 结论 3

(1)GH4169 合金板材室温弹性模量为172.2 GPa, 屈服强度为 444.5 MPa, 抗拉强度为 935.0 MPa,应 变硬化指数 n 为 0.338。

(2)在 0.01 和 0.001 s<sup>-1</sup> 应变速率下,伸长率、屈 服强度和抗拉强度随温度变化遵循大致相同的规 律:随着温度的升高,伸长率逐渐增加,屈服强度和 抗拉强度随之降低。在温度为 750~850 ℃范围内, 伸长率有降低倾向,应避免在该温度区间内进行高 温拉伸成形制造。

(3)温度低于 650 ℃时,GH4169 合金的伸长率和





抗拉强度随温度变化不大,与室温下的伸长率相当, 保持了较高的强度。当温度超过 850 ℃时,在应变 速率为 0.001 s<sup>-1</sup>条件下,材料发生了明显软化,抗拉 强度下降至 415 MPa,为室温下的 46.6%,应变硬 化指数 n 为 0.06,几乎没有应变硬化能力。温度为 1 050 ℃时,伸长率达到 112%,抗拉强度减小至 66 MPa,仅为室温下的 7.4%。

#### 参考文献:

- [1] 熊强,连利仙,胡旺,等. 增材制造用新型镍基高温合金的设计 与开发[J]. 铸造技术,2023,44(8):748-755.
  XIONG Q, LIAN L X, HU W, et al. Design and development of new nickel-based superalloys for additive manufacturing [J]. Foundry Technology, 2023, 44(8): 748-755.
- [2] 王建国,刘东,杨艳慧. GH4169 合金非均匀组织在加热过程中的演化机理[J]. 金属学报,2016,52(6):707-716.
  WANG J G, LIU D, YANG Y H. Mechanisms of non-uniform microstructure evolution in GH4169 alloy during heating process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(6):707-716.
- [3] WANG Y, SHAO W Z, ZHEN L, et al. Hot deformation behavior of delta-processed superalloy 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(7-8): 3218-3227.
- [4] HU X T, YE W M, ZHANG L C, et al. Investigation on creep properties and microstructure evolution of GH4169 alloy at different temperatures and stresses[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 800: 140338.
- [5] DU J H, LU X D, DENG Q, et al. Progress in the research and manufacture of GH4169 alloy [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, 22(8): 657-663.
- [6] LU X D, DU J H, DENG Q, et al. Stress rupture properties of GH4169 superalloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2014, 3(2): 107-113.
- [7] LV N, LIU D, YANG Y H, et al. Studying the residual stress homogenization and relief in aerospace rolling ring of GH4169 alloy using ageing treatment [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(11): 3415-3429.
- [8] 马军,申佳林,李茂明,等. 化学成分对 GH4169 合金组织与力学 性能的影响[J]. 金属热处理,2020,45(12),197-204.
  MA J, SHEN J L, LI M M, et al. Effect of chemical composition on microstructure and mechanical properties of GH4169 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(12): 197-204.
- [9] DONG J X, XIE X S, XU Z C, et al. TEM study on microstructure behavior of Alloy 718 after long time exposure at high temperatures [M]/LORIA E A. Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials Society, 1994: 649-658.
- [10] DEVAUX A, NAZÉ L, MOLINS R, et al. Gamma double prime precipitation kinetic in Alloy 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 486(1-2): 117-122.
- [11] 袁兆静. GH4169 合金 δ 相析出规律及其对高温拉伸性能的影响[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2010.
   YUAN Z J. δ phase precipitation and its effect on high temperature

tensile properties of GH4169 alloy[D]. Shenyang: Shenyang Polytechnic University, 2010.

- [12] 张海燕,张士宏,程明.δ相对 GH4169 合金高温拉伸变形行为 的影响[J].金属学报,2013,49(4),483-488.
  ZHANG H Y, ZHANG S H, CHENG M. Effect of δ phase on the tensile deformation behavior of GH4169 alloy at high temperature
  [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(04): 483-488.
- [13] 王蓬书,李琴敏,韦贤毅,等. 固溶对 GH4169 合金晶粒尺寸与力 学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(4), 245-249.
  WANG P S, LI Q M, WEI X Y, et al. Effect of solid solution on grain size and mechanical properties of GH4169 alloy[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(4): 245-249.
- [14] 陈前,王岩. 8 相时效态 GH4169 合金的热加工行为[J]. 中国有 色金属学报,2015,25(10): 2727-2737.
  CHEN Q, WANG Y. Hot working behavior of delta-processed GH4169 alloy[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25 (10): 2727-2737.
- [15] CAI D Y, ZHANG W H, NIE P L et al. Dissolution kinetics of δ phase and its influence on the notch sensitivity of Inconel 718[J]. Materials Characterization, 2007, 58(3): 220-225.
- [16] AZADIAN S, WEI L Y, WARREN R. Materials delta phase precipitation in Inconel 718[J]. Materials Characterization, 2004, 53 (1): 7-16.
- [17] 高天明,程晓农,罗锐,等. 时效处理对 GH4169 合金显微组织及高温拉伸变形行为的影响 [J]. 金属热处理,2020,45(8): 119-123.

GAO T M, CHENG X N, LUO R, et al. Effects of aging treatment on microstructure and high temperature tensile deformation behavior of GH4169 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(8): 119-123.

- [18] 李晨,李森泉,王柯. 固溶处理 GH4169 合金的高温变形行为[J]. 航空学报,2010,31(2): 368-376.
  LI C, LI M Q, WANG K. Deformation behavior of nickel based superalloy GH4169 through solution treatment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(2): 368-376.
- [19] 丁奔,蔡军,张兵,等. 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, et al. Hot deformation behavior of GH4169 rare earth reinforced Ni-base superalloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(9):131-141.
  [20] 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, 2023, 38(3): 18-24.
- [21] LIN Y X, LIN Y C, LI H B, et al. Study of dynamic recrystallization in a Ni-based superalloy by experiments and cellular automaton model[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 626: 432-440.
- [22] ZHAO P Y, WANG Y Z, NIEZGODA S R. Microstructural and micromechanical evolution during dynamic recrystallization [J]. International Journal of Plasticity, 2018, 100: 52-68.
- [23] NING Y Q, HUANG S B, FU M W, et al. Microstructural characterization, formation mechanism and fracture behavior of the nee-

dle  $\delta$  phase in Fe-Ni-Cr type superalloys with high Nb content[J]. Materials Characterization, 2015, 109: 36-42.

- [24] WANG Y, SHAO W Z, ZHEN L, et al. Hot deformation behavior of delta-processed superalloy 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(7-8): 3218-3227.
- [25] WANG G Q, CHEN M S, LI H B, et al. Methods and mechanisms for uniformly refining deformed mixed and coarse grains inside a solution-treated Ni-based superalloy by two-stage heat treatment [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 77: 47-57.
- [26] 韩蕊蕊. GH4169 高温合金的成型性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2013.

HAN R R. Research on deformation properties of superalloy GH4169[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.

[27] AN X L, ZHANG B, CHU C L, et al. Evolution of microstructures and properties of the GH4169 superalloy during short-term and high-temperature processing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 744: 255-266.