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 5 mm 的 GH4169 镍基合金在 7 种测试温度(450~1 050 ℃)，应变速率分别为 0.01 和 0.001 s^{-1} 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 0.001 s^{-1}，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 1 050 ℃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 66 MPa，仅为室温下的 7.1%。应变速率为 0.01 s^{-1} 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[1], LIN Jian[1], HU Xiao[2], WANG Dagang[2], WEI Qiang[3]

(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 ℃) and strain rates of 0.01 and 0.001 s^{-1}, 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^{-1} and the temperature is higher than 850 ℃, the elongation of the GH4169 nickel-based alloy plate continues to increase with increasing temperature and reaches up to 112% at 1 050 ℃. The tensile strength decreases to 66 MPa with increasing temperature, which is only 7.1% at room temperature. When the strain rate is 0.01 s^{-1}, the elongation and tensile strength changes of the GH4169 nickel-based alloy sheet have similar trends. When the temperature is lower than 800 ℃, the elongation and tensile strength do not change much with temperature, and a high strength is maintained. However, when the temperature increases to 850 ℃, 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[1-2]。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.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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[3-6]。GH4169 合金是一种沉淀强化镍基高温合金[7-9]，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[10]。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[11-13]，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[14-16]。

高天明等[17]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 δ 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[18]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[19]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[20]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[21]和 Zhao[22]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 [23]和 Wang[24]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[25]。

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^{-1}，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，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
(mass fraction/%)

Element	Ni	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Fe
GH4169	54.10	19.39	5.50	3.05	1.02	0.53	Bal.

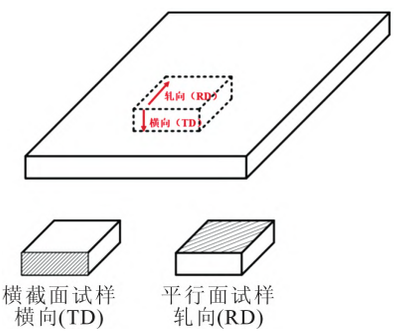

图 1 GH4169 合金金相试样的取样方式
Fig.1 Sampling method for metallographic samples of GH4169 alloys

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。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

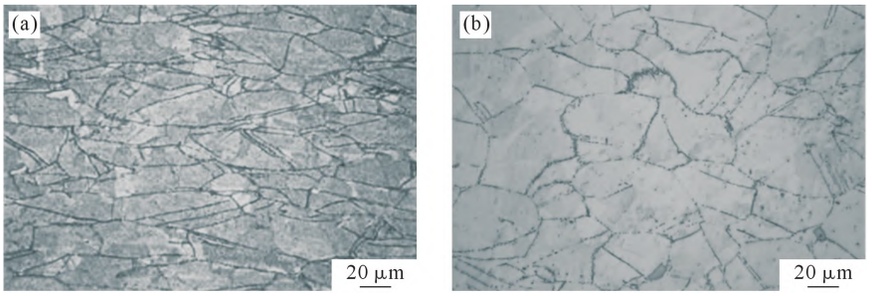

图 2 GH4169 合金金相试样的金相组织：(a) 轧制方向，(b) 横向

Fig.2 Microstructure of the GH4169 alloy metallographic sample: (a) rolling direction, (b) transverse direction

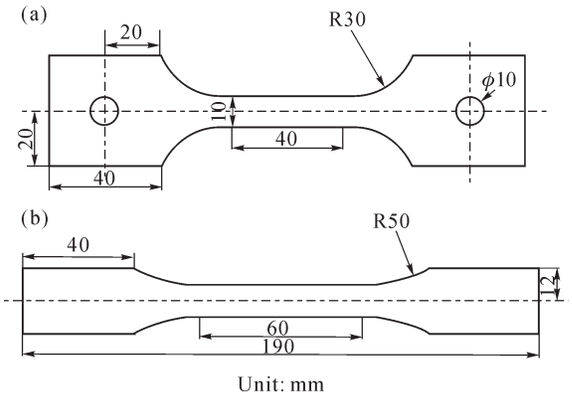

图 3 拉伸试样尺寸图：(a) 高温拉伸，(b) 室温拉伸

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。

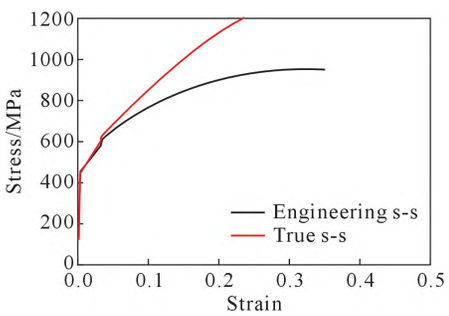

图 4 室温拉伸应力–应变曲线

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^{-1}

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^{-1})，7 种温度(450~1 050 ℃)下的高温拉伸曲线，以进行比较。

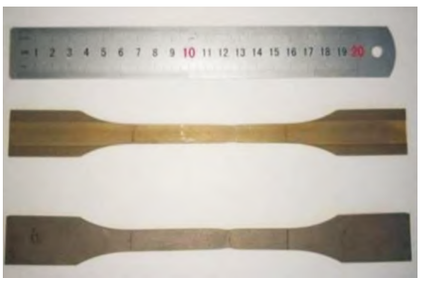

图 5 室温拉伸破坏试样照片

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

应变速率为 0.001 s^{-1} 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。

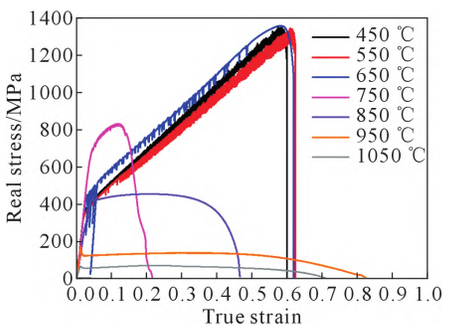

图 6 GH4169 合金炉中高温拉伸真应力–应变曲线(应变速率 0.001 s^{-1})

Fig.6 High temperature tensile true stress-strain curve of the GH4169 nickel-based alloy in a furnace (strain rate 0.001 s^{-1})

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

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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 1 050 ℃时，强度进一步降低，这与 An 等[27]的实验结果一致。

统计应变速率为 0.001 s^{-1} 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^{-1} 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。

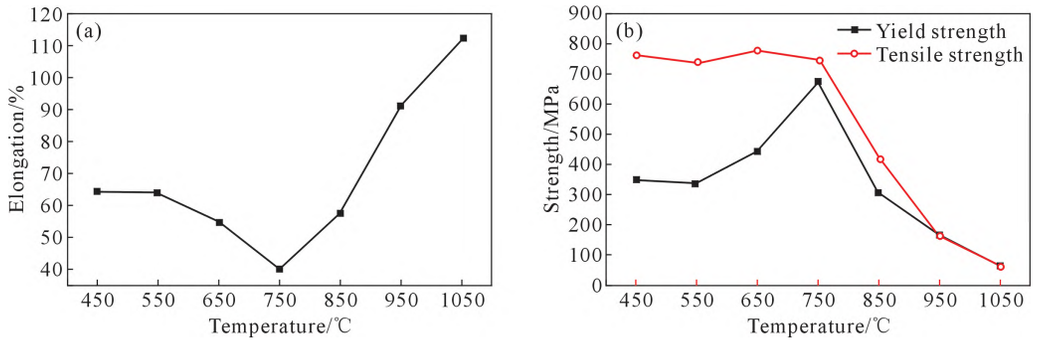

图 7 温度对 GH4169 伸长率、屈服强度和抗拉强度的影响(应变速率 0.001 s^{-1})：(a) 伸长率，(b) 屈服强度和抗拉强度

Fig.7 Influence of temperature on elongation, yield strength and tensile strength (strain rate 0.001 s^{-1}): (a) elongation, (b) yield strength and tensile strength

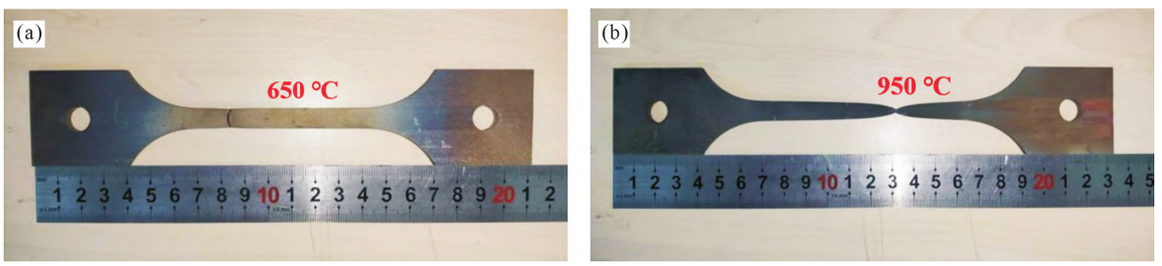

图 8 GH4169 镍基合金炉中高温拉伸实验的试样照片(应变速率 0.001 s^{-1})：(a) 650 ℃，(b) 950 ℃

Fig.8 GH4169 nickel-based alloy specimen photo of the high temperature tensile test in a furnace (strain rate 0.001 s^{-1}): (a) 650 ℃, (b) 950 ℃

2.2.2 应变速率 0.01 s^{-1}

改变炉中高温拉伸实验的应变速率为 0.01 s^{-1}，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^{-1} 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

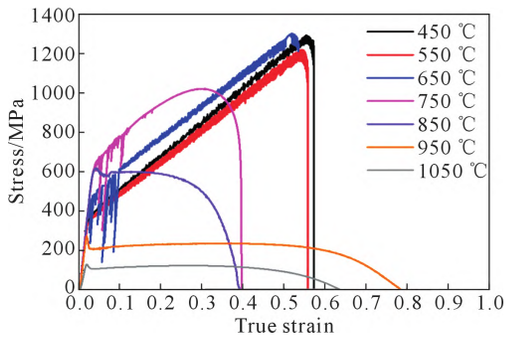

图 9 GH4169 合金炉中高温拉伸真应力–应变曲线(应变速率 0.01 s^{-1})

Fig.9 High temperature tensile true stress-strain curve of the GH4169 nickel-based alloy in a furnace (strain rate 0.01 s^{-1})

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

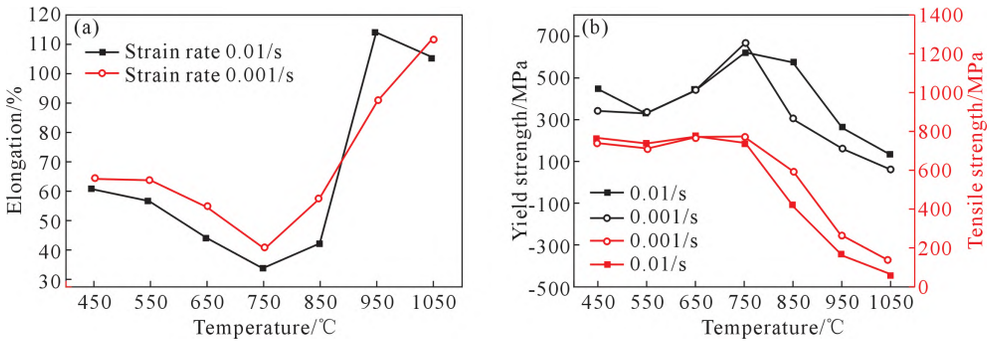

图 10 不同应变速率下温度对材料伸长率、屈服强度和抗拉强度的影响：(a) 伸长率，(b) 屈服强度和抗拉强度

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 1 150 ℃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 1 150 ℃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^{-1} 和 0.001 s^{-1} 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^{-1})，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：

$$S=ke^{n} \tag{1}$$

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^{-1}，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。

3 结论

(1)GH4169 合金板材室温弹性模量为1 72.2 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^{-1} 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

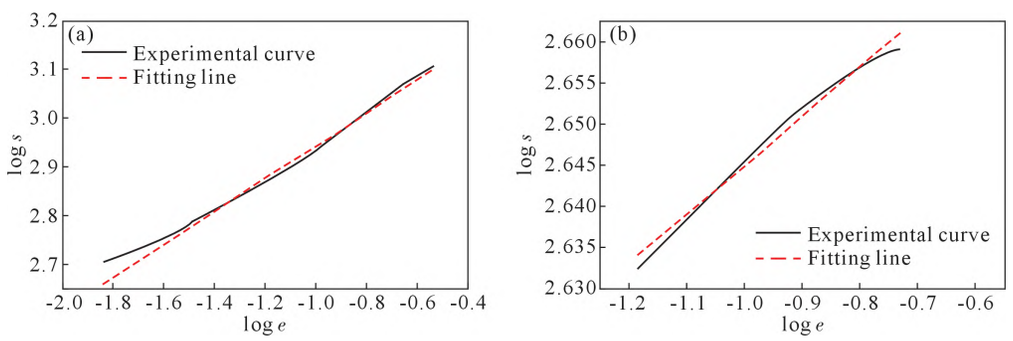

图 11 均匀塑性变形阶段的真应力-应变曲线拟合结果(获取应变硬化指数 n)：(a) 室温，(b) 850 ℃(应变速率 0.001 s^{-1})

Fig.11 Fitting results of true stress-strain curves during uniform plastic deformation at room temperature (obtaining strain hardening index n): (a) room temperature, (b) 850 ℃(strain 0.001 s^{-1})

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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^{-1} 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. δ 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，李淼泉，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-

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

dle δ 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.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net