

# Ni基GH3617高温合金的拉伸行为研究

杨奋琪<sup>1,2</sup>, 肖旋<sup>1</sup>, 管现军<sup>2</sup>, 秦学智<sup>2</sup>, 周兰章<sup>2</sup>

(1. 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 沈阳 110159; 2. 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室, 沈阳 110016)

**摘要:** 通过无硼高温合金GH3617室温下的拉伸试验, 考察其基础力学性能及变形行为。研究表明: 固溶热处理(1 175 °C/1 h/WC)后合金组织主要由奥氏体等轴晶组成, 且存在大量的退火孪晶; 室温下合金的变形方式主要是位错的平面滑移和孪生, 表现出优越的加工硬化能力和较佳的强塑性匹配, 屈服强度为309.7 MPa、抗拉强度为762.3 MPa、延伸率为70.13%; 拉伸过程中, 裂纹优先在晶界和孤立的碳化物处形核, 断裂方式为沿晶-穿晶混合型断裂, 裂纹扩展过程中其尖端形成的二次裂纹可释放尖端应力, 提高材料塑性。

**关键词:** 镍基高温合金; 拉伸性能; 变形行为; 断裂方式

中图分类号: TG457.1 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2024.05.009

## Study on the Tensile Behaviors of Ni-based GH3617 Superalloy

YANG Fenqi<sup>1,2</sup>, XIAO Xuan<sup>1</sup>, GUAN Xianjun<sup>2</sup>, QIN Xuezhi<sup>2</sup>, ZHOU Lanzhang<sup>2</sup>

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Key Laboratory of Nuclear Materials and Safety Assessment, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** The tensile properties and deformation behavior of boron free superalloy GH3617 at room temperature are mainly studied. The results show that the alloy structure after solid solution heat treatment(1 175 °C/1 h/WC) is mainly composed of austenite equiaxed grains, and there are a large number of annealing twins. At room temperature, the deformation mode of this alloy is mainly plane slip and twinning of dislocations, resulting in superior work hardening ability and achieving better strength plasticity matching. Specifically, the alloy exhibits a yield strength of 309.7 MPa, a tensile strength of 762.3 MPa, and an elongation of 70.13%. During the stretching process, cracks preferentially nucleate at grain boundaries and isolated carbides, and the fracture mode is a mixed mode of intergranular transgranular fracture. During the crack propagation process, secondary cracks formed at the tip can release the stress at the tip and improve the plasticity of the material.

**Key words:** Ni-based superalloy; tensile property; deformation behavior; fracture mechanisms

发展高温气冷堆来取代传统化石能源, 对实现经济和生态环境协调发展具有举足轻重的作用<sup>[1-2]</sup>。为提高反应堆热效率, 第四代核反应堆的堆内设计温度较高, 尤其是高温气冷反应堆温度更高, 其对结构材料的高温性能要求也更高。

例如, 作为热量传递的中间热交换器(IHX)是先进高温气冷堆中服役环境最为苛刻的金属部件, 其工作温度高达950 °C, 一次冷却侧与二次冷却侧的压差约7 MPa。为此, 研究者开展大量工作以获得可应对该环境的合金材料。一种具有优良

的机械性能、耐高温腐蚀和抗氧化性能的 Ni 基变形高温合金 (IN617) 成为过热器、再热器和蒸汽发生器等重要部件的备选材料,但其在高温下存在晶界弱化问题,Kontis 等<sup>[3]</sup>采用添加微量元素硼(B)的方式解决上述问题,主要是由于 B 元素作为电子供体会影响材料的晶界能,提高材料晶界稳定性,B 元素还易于在晶界处偏聚,有助于减缓晶界的迁移,从而降低材料的蠕变速率。但 B 具有高的热中子横截面,在高温辐射条件下,可能会嬗变为其他元素,导致材料性能退化。例如,Li 引起的晶界脆化<sup>[4]</sup>和 He 辐照导致的应力腐蚀开裂行为<sup>[5]</sup>都是 B 与热中子发生嬗变反应( ${}_5\text{B}^{10} + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_3\text{Li}^7 + {}_2\text{He}^4$ )导致的。

文献[6-7]指出,合金中 B、C 等非金属元素会显著提高合金层错能,进而改变合金的变形行为及基础力学性能。针对 IHX 的恶劣服役环境,鉴于 IN617 合金的成分,本文设计并制备了无 B 的 GH3617 合金。通过室温下的拉伸试验对无 B 镍基高温合金 GH3617 的基础力学性能进行考察。此外,利用附有电子背散射(EBSD)配件的扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)对合金拉伸变形行为进行系统的表征,探究 GH3617 合金的微观变形机制。本文研究结果可为核用高性能合金设计提供理论指导。

## 1 试验材料与方法

试验所用 GH3617 合金均采用真空感应冶炼方法直接熔炼并浇铸成锭,其主要化学成分如表 1 所示。首先铸锭经开坯、锻造得到截面为 35 mm × 35 mm 的棒材;然后对锻造棒材进行多道次热轧得到直径为 16 mm 的热轧棒材;最后对热轧棒材 GH3617 合金进行 1 175 °C/1 h/WC(水冷)的固溶热处理,得到组织均匀的再结晶态试验样品。

表 1 GH3617 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of GH3617 alloy wt%

| Cr   | Co   | Mo   | Al   | Ti   | C     | Ni     |
|------|------|------|------|------|-------|--------|
| 21.9 | 11.8 | 8.71 | 0.98 | 0.41 | 0.058 | 56.142 |

采用直径为 5 mm 的标准拉伸试样,按照标准 GB/T 228.1—2010 进行试验。温度为 23 °C 时,横梁位移速率屈服前为 0.15 mm/min,屈服后为 2.5 mm/min。为确保数据的准确性,分别对三个平行样品进行测试,并取平均值作为关键性能指标。拉伸试验完成后,利用配备有 EBSD 探头

的扫描电子显微镜(SEM, TESCAN MAIA3 型,泰思肯贸易(上海)有限公司)对拉伸试样断口形貌和纵剖面变形行为进行表征。样品纵剖面 SEM 形貌测试需先用 5 g 的  $\text{CuCl}_2$ 、100 mL 的  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  溶液和 100 mL 的盐酸溶液蚀刻。EBSD 观察样品需首先用 2000# SiC 砂纸磨光,然后进行机械抛光,最后利用振动抛光机(VIBROMET 2 型,上海金相机械设备有限公司)进行 12 h 振动抛光。EBSD 测试时,加速电压为 20 kV,工作距离为 15 ~ 20 mm,并利用 EBSD 专用样品台将样品倾斜 70°。EBSD 所得数据均通过软件 Channel 5 进行处理,以获得重构的组织图像。最后利用透射电子显微镜(TEM, JEOL2100Plus 型,捷欧路(北京)科贸有限公司)对断后样品的变形微观结构进行表征。TEM 样品均利用电火花切割加工,取自于与拉伸轴垂直的截面。初始 TEM 样品厚度为 0.5 mm,需采用机械磨光的方法将厚度减薄至 40 μm 左右,然后利用电解双喷仪(RL-2 型,睿灵创新(北京)科技有限公司)对样品进行减薄直至出孔。电解双喷所用溶液为 10% 高氯酸 + 90% 酒精溶液,双喷电压为 21 V,双喷温度控制在 -25 °C 左右。

## 2 结果与讨论

### 2.1 “热轧 + 退火”态 GH3617 合金显微组织及其力学性能

“热轧 + 退火”态 GH3617 合金的显微组织及其碳化物分析如图 1 所示。图 1(a)为经 1 175 °C/1 h/WC 固溶退火处理后的金相组织,可见为标准的等轴晶组织,其奥氏体晶粒取向向基本呈随机分布,且存在大量的退火孪晶,见图 1(b)。据统计,“热轧 + 退火”态 GH3617 的平均晶粒(包括退火孪晶)尺寸约为 35 μm,退火孪晶界占晶界总长度超 50%。显然,此合金中高的退火孪晶占比与镍基高温合金较低的层错能有关<sup>[8]</sup>。此外,在其显微组织中未观察到明显的元素偏析带,说明固溶热处理有效消除了剧烈的元素偏析行为;但在个别晶界及晶内局部区域仍能观察到少量的碳化物存在,见图 1(c)。EDS 结果表明:晶界上的碳化物(如图 1(c)中 1 处所示)主要富含 Cr/Mo 元素(图 1(d)),应该是碳化物  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Mo}_6\text{C}$ ;晶内颗粒状碳化物(图 1(c)中 2 和 3 处所示)主要富含 Mo/Ti 元素(图 1(e)和图 1(f)),应为碳化物  $\text{Mo}_6\text{C}$  和 TiC。

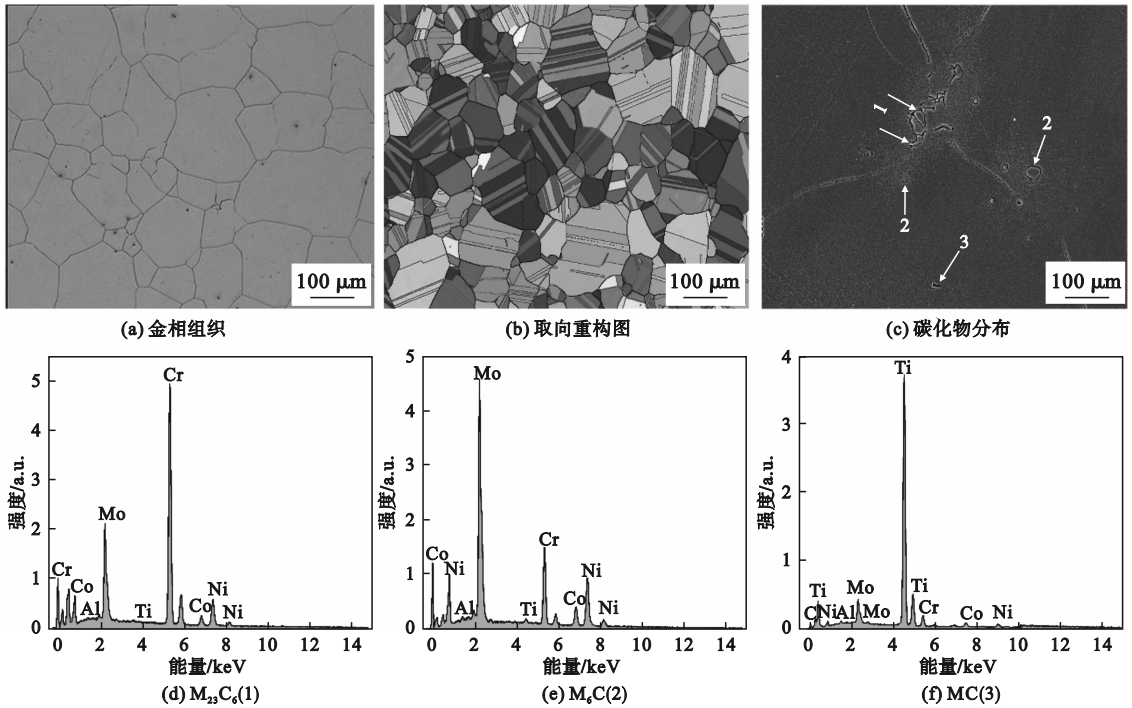


图 1 “热轧 + 退火”态 GH3617 合金的显微组织及其碳化物能谱分析图

Fig.1 The microstructures and carbide EDS of GH3617 alloy in the ‘hot rolled + annealed’ state

固溶热处理后, GH3617 合金的室温力学性能数据如表 2 所示。室温下, GH3617 合金的屈服强度 ( $\sigma_{0.2}$ ) 为 309.7 MPa, 抗拉强度 ( $\sigma_b$ ) 为 762.3 MPa, 屈强比为 0.41, 拉伸变形总伸长率 ( $\varphi$ ) 为 70.7%, 相应的断面收缩率 ( $\sigma_5$ ) 亦达到了 70.1%。GH3617 合金在室温下具有较高的塑性, 是典型的塑性材料, 与 IN617 合金相比, 其抗拉强度和屈服强度基本相同, 但延伸率却有一定程度的提升<sup>[9-10]</sup>。GH3617 合金的性能特征与其在室温下的塑性变形及断裂行为密不可分。

表 2 GH3617 合金的室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of GH3617 alloy at room temperature

|     | $\sigma_b$ /MPa | $\sigma_{0.2}$ /MPa | $\sigma_5$ /% | $\varphi$ /% |
|-----|-----------------|---------------------|---------------|--------------|
| 均值  | 762.3           | 309.7               | 70.1          | 70.7         |
| 标准差 | 4.16            | 2.08                | 1.36          | 1.04         |

## 2.2 GH3617 合金室温拉伸过程中的损伤形核及断裂行为

GH3617 合金在拉伸过程中的裂纹形核及断裂行为如图 2 所示。通过对断后样品纵剖面损伤特征的观察发现, 室温下 GH3617 合金的损伤主要形核于 Mo、Cr 和 Ti 的第二相碳化物和晶界处, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示。碳化物形成的损伤有沿拉伸轴方向伸长的趋势, 如图 2(a) 所示。晶界

处形成的损伤裂纹并未沿晶界扩展, 说明无硼 GH3617 合金在室温下不会发生沿晶的脆性开裂; 此外, 对纵剖面二次裂纹扩展特征的观察亦表明, GH3617 合金的裂纹扩展方式主要为穿晶扩展。GH3617 合金这一独特的损伤形核及开裂方式在其断口形貌中也有明确的体现, 在断口形貌 SEM 照片中可以看出, GH3617 合金在拉伸变形的最后阶段发生了一定的颈缩行为, 说明损伤形成到最终断裂存在一定的发展过程, 非瞬时完成。由图 2(c) 可见, GH3617 合金的断口形貌存在明显的纤维区和剪切唇区, 纤维区面积占比较大, 达 65.53%, 且断口有明显的二次裂纹存在, 其尺寸较长, 个别裂纹已贯穿整个纤维区。孔常静等<sup>[11]</sup>指出, 金属材料裂纹尖端形成的二次裂纹有利于释放尖端应力, 可缓解主裂纹扩展, 提高材料塑性。此外, GH3617 合金的纤维区特征并非常见塑性纯金属材料所表现出的微孔聚集型特征, 其主要由平滑的“类解理面”组成, 如图 2(d) 中黄色箭头所指区域, 但并未形成典型的“河流状”形貌, 且“类解理面”上可观察到较浅的韧窝存在; 在放大的个别区域还可观察到少量的“冰糖状”形貌存在, 如图 2(d) 中白色虚线所环绕区域。这一复杂的形貌特征说明 GH3617 合金在室温下的断裂方式为混合型断裂。

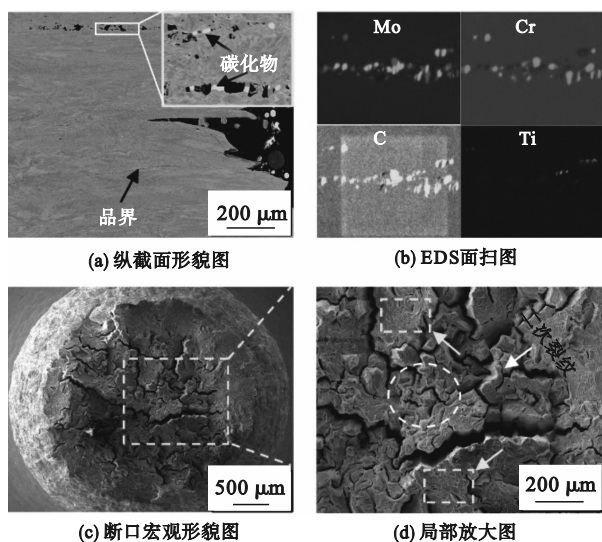


图2 GH3617合金在拉伸过程中的裂纹形核及断裂行为  
Fig. 2 Crack nucleation and fracture behavior of GH3617 alloy during tensile deformation

GH3617合金的损伤及断裂行为虽发生在整个拉伸过程的最后阶段,但其与前期变形行为之间的关联却不容忽视。因此,有必要对断后样品的变形行为进行系统观察,以明确GH3617合金变形行为影响其断裂特性的本质。

### 2.3 GH3617合金室温拉伸过程中的变形行为

拉伸变形过程中晶粒取向的变化对GH3617合金的性能有重要影响,如图3所示为断后样品纵剖面的取向分布及极密度分布图。由图3(a)可见,GH3617合金的奥氏体晶粒发生了明显的塑性变形,沿拉伸轴方向有所伸长,且许多晶粒的取向颜色向绿色转变(箭头处),说明GH3617合金的晶粒在拉伸变形过程中沿径向发生了向 $\langle 101 \rangle$ 方向的倾转,形成了一定的拉伸织构。晶粒取向极密度分布的统计结果显示,沿径向 $\langle 101 \rangle$ 取向的极密度有所升高。此外,断后样品的晶粒取向表现出了明显的 $\langle 111 \rangle //$ 拉伸轴(RD)的择优分布,如图3(b)所示,进一步说明GH3617合金棒材在拉伸过程中形成了典型的拉伸线织构<sup>[12]</sup>。

一般而言,金属材料的晶粒倾转会改变材料变形(尤其是晶界处)的均匀性,从而使得材料塑性受到影响。为直观展示GH3617合金在拉伸变形过程中的应变分布情况,图4(a)给出了断后样品纵剖面的平均取向差(KAM)分布图。显然,拉伸变形后GH3617合金的KAM分布相对均匀。具体而言,除个别晶粒因取向较“硬”而难以变形(如图4(a)中箭头处所示)外,多数晶粒的KAM值都相差不大,未发现晶界和晶粒内部存在明显

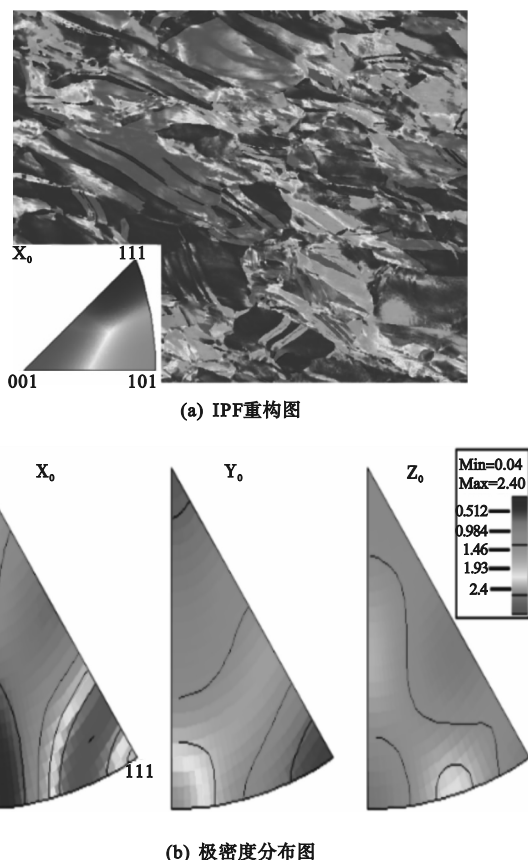


图3 GH3617合金拉伸变形过程中的晶粒取向变化  
Fig. 3 Variation of grain orientation during tensile deformation of GH3617 alloy

差异。Wright等<sup>[13]</sup>指出,变形材料的KAM分布与几何必要位错的分布具有高度的一致性,而几何必要位错的分布则代表了金属材料的应变分布情况。由此可见,在室温拉伸过程中,GH3617合金表现出了较高的变形均匀性。

由图4(b)可见,断后GH3617合金的KAM分布为典型的“抛物线”状,未出现明显的双峰或多峰特征,即没有多极化特征存在,进一步佐证了GH3617合金室温变形均匀性较高的结论。

Han等<sup>[14]</sup>指出,金属材料的变形均匀性及加工硬化行为与其位错滑移方式之间存在密切联系。如图4(c)和图4(d)所示,GH3617合金的变形显微组织主要由变形孪晶和高密度位错组成,说明此合金的变形方式主要为位错滑移和变形孪生。其中,由位错组态可观察到大量代表平面滑移的平面滑移带结构,说明GH3617合金在拉伸变形过程中发生了明显的位错平面滑移现象。此外,变形显微组织中同样可观察到少量的位错胞分布于晶界附近(图4(d)中红色箭头处),说明除了位错的平面滑移外,GH3617合金晶界附近还会发生一定程度的波状滑移。据相关报道<sup>[15]</sup>,

GH3617 合金所表现出的强平面滑移性特征及孪生行为主要由于其较低的层错能和短程有序结构

导致。

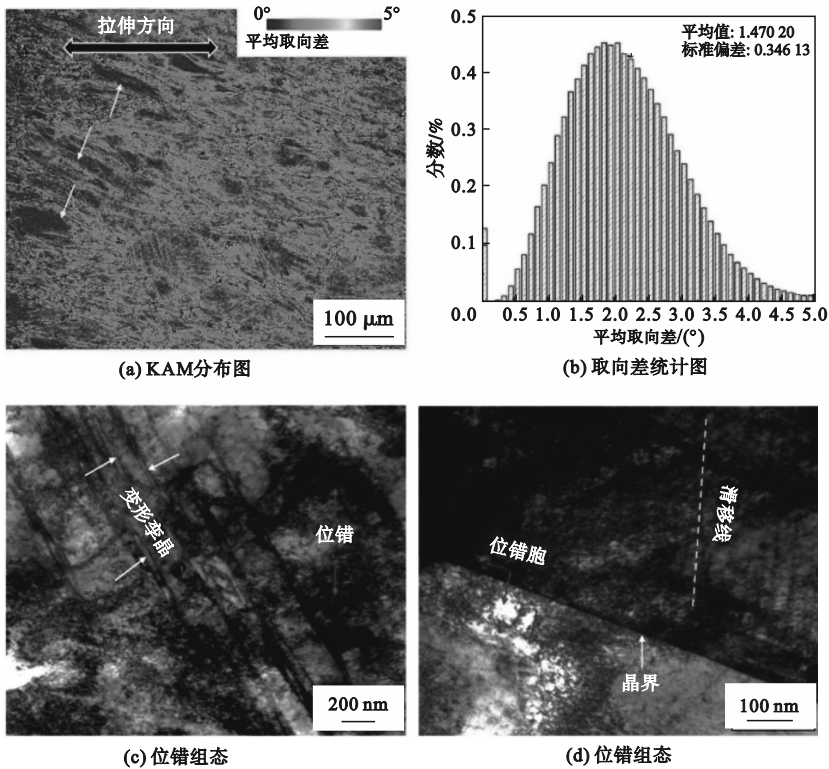


图4 GH3617 合金的室温拉伸变形行为及变形均匀性

Fig. 4 Tensile deformation behavior and deformation uniformity of GH3617 alloy at room temperature

首先,本文设计的 GH3617 合金去除了晶界强化元素 B,显著降低了该材料的层错能,促进了位错的平面滑移<sup>[16]</sup>。其次,该合金中含有高比例的 Co、Cr、Mo 等固溶强化元素,容易与合金中的 C 原子形成 Cr—C、Mo—C 等短程有序结构,运动位错会切割短程有序结构并产生一定的反向畴界能,促使后续位错沿领先位错的滑移痕迹运动,使得合金中位错的平面滑移性得到进一步促进。此外,因低层错能和短程有序结构的影响,GH3617 合金中还容易发生肖克莱不全位错的平面滑移,导致合金变形微观结构中出现了有一定数量的变形孪晶结构,如图 4(c) 所示。当然,变形孪晶的出现不仅能够协调(通过改变滑移方向)合金晶粒的变形,而且能够起到切割晶粒阻碍位错滑移的作用,非常有利于材料加工硬化和变形均匀性的改善。总之,在以上几方面因素的影响下,GH3617 合金的变形行为表现出了明显的平面滑移特征,有效改善了此合金的加工硬化行为。根据金属材料拉伸变形的失稳准则(Coissière 准则)

$$\frac{dS}{de} = S \quad (1)$$

式中: $S$  为材料拉伸过程中的真应力; $e$  为真应变。可知,材料发生失稳或颈缩的临界点出现在材料加工硬化率与材料真应力相等的时刻。超过临界点,材料的加工硬化率将低于材料的真应力而发生颈缩。由此可见,GH3617 合金较高的加工硬化行为有效推迟了其颈缩点的出现,进而获得了较高的塑性。

对晶界附近和晶粒内部变形微观结构进行对比发现,GH3617 合金晶界附近和晶粒内部的位错密度基本相当,如图 4(c) 和图 4(d) 所示。进一步说明 GH3617 合金在拉伸变形过程中表现出优越的变形均匀性,这得益于高比例的退火孪晶界。Guan 等<sup>[17-18]</sup> 研究指出,面心立方(FCC)金属材料中的退火孪晶界可有效疏导位错的滑移,进而起到改善材料变形均匀性的作用。综上,GH3617 合金具有较佳的强塑性匹配主要得益于成分主导的位错滑移方式及高比例退火孪晶界两方面因素。其中,平面型的位错滑移和孪生保证了合金的加工硬化,高比例的退火孪晶界提高了合金的变形均匀性。

### 3 结论

本文通过拉伸性能测试及变形显微组织表征,对无硼高温合金 GH3617 的室温力学性能及变形行为进行研究,得出如下结论。

1) 固溶热处理 (1 175 °C/1 h/WC) 后无硼 GH3617 合金的组织主要由奥氏体等轴晶组成,含有大量退火孪晶,其平均晶粒尺寸约为 35 μm。室温下,无硼 GH3617 合金的屈服强度为 309.7 MPa,抗拉强度达 762.3 MPa,且具有 70.13% 延伸率,强塑性匹配较佳。

2) 无硼 GH3617 合金在拉伸变形过程中形成了典型的拉伸线织构,其较高的变形均匀性主要源自于平面型的位错滑移行为及退火孪晶界对位错滑移的疏导作用,较低的层错能使其在拉伸过程中发生变形孪生现象,提高了加工硬化能力,推迟了颈缩行为的发生。

3) 室温下,无硼 GH3617 合金的断裂方式以穿晶断裂为主导,混有部分沿晶断裂行为。裂纹优先在晶界和孤立的碳化物处形核,裂纹尖端形成的二次裂纹有利于释放尖端应力,提高材料的塑性。

#### 参考文献 (References):

[1] 李德波,刘鹏宇,刘彦丰,等. 新型电力系统规划下燃煤电厂锅炉机组的发展[J]. 广东电力,2022,35(7):3-13.  
LI D B, LIU P Y, LIU Y F, et al. Development of coal-fired power plant boiler units under new power system planning [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35 (7): 3 - 13. (in Chinese)

[2] 郑明辉,宋民航,王金星. “双碳”目标下燃煤机组转型目标与技术分析[J]. 广东电力,2022,35(7):14-22.  
ZHENG M H, SONG M H, WANG J X. Objective and technical analysis of coal-fired unit transformation under dual carbon goals [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35 (7): 14 - 22. (in Chinese)

[3] KONTIS P, MOHD YUSOF H A, PEDRAZZINI S, et al. On the effect of boron on grain boundary character in a new polycrystalline superalloy [J]. Acta Materialia, 2016, 103: 688 - 699.

[4] BYUN T S, FARRELL K. Tensile properties of Inconel 718 after low temperature neutron irradiation [J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, 318: 292 - 299.

[5] BAJAJ R, MILLS W J, KAMMENZIND B F, et al. Effects of neutron irradiation on deformation behavior of nickel-base fastener alloys [C]// 9th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-

Water Reactors. Newport Beach; Minerals/Met, 1999: 1069 - 1076.

- [6] MEDVEDEVA N I, PARK M S, VAN AKEN D C, et al. First-principles study of Mn, Al and C distribution and their effect on stacking fault energies in fcc Fe [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 582: 475 - 482.
- [7] HEMKER K J, MILLS M J. Measurements of antiphase boundary and complex stacking fault energies in binary and B-doped Ni<sub>3</sub>Al using TEM [J]. Philosophical Magazine A, 1993, 68(2): 305 - 324.
- [8] 师瑀,张莹莹,刘峰,等. 面心立方金属晶界工程技术的研究进展[J]. 热加工工艺,2020,49(16):32-36.  
SHI Y, ZHANG Y Y, LIU F, et al. Research progress of grain boundary engineering technology for face-centered cubic metals [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (16): 32 - 36. (in Chinese)
- [9] Special Metals Corporation. INCONEL alloy 617 [R]. USA: Special Metals Corporation, 2005.
- [10] SHAM T L, ENO D R, JENSEN K P. Treatment of high temperature tensile data for alloy 617 and alloy 230 [C]// Proceedings of ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference. Chicago, USA: ASME press, 2009: 767 - 776.
- [11] 孔常静,尚嘉兰. 铸态 SiCp/Al 复合材料原位拉伸微观损伤的研究 [J]. 材料科学与工程, 1998, 16(2): 4.  
KONG C J, SHANG J L. A study on the micro damage of cast SiCp/Al composition under in situ tension [J]. Material Science and Engineering, 1998, 16(2): 4. (in Chinese)
- [12] 许峰,肖颖,陈前,等. 冷轧压下率对 IF 钢微观结构、织构及深冲性能的影响 [J]. 金属热处理, 2022, 47(1): 250 - 255.  
XU F, XIAO Y, CHEN Q, et al. Effect of cold rolling reduction rate on microstructure, texture and deep drawing properties of IF steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47 (1): 250 - 255. (in Chinese)
- [13] WRIGHT S I, NOWELL M M, FIELD D P. A review of strain analysis using electron backscatter diffraction [J]. Microscopy and Microanalysis, 2011, 17(3): 316 - 329.
- [14] HAN D, HE J X, GUAN X J, et al. Impact of short-range clustering on the multistage work-hardening behavior in Cu - Ni alloys [J]. Metals, 2019, 9(2): 151.
- [15] HAN D, WANG Z Y, YAN Y, et al. A good strength-ductility match in Cu-Mn alloys with high stacking fault energies; determinant effect of short range ordering [J]. Scripta Materialia, 2017, 133: 59 - 64.
- [16] GUAN X J, SHI F, JIA Z P, et al. Grain boundary engineering of AL6XN super-austenitic stainless steel: distinctive effects of planar-slip dislocations and deformation twins [J]. Materials Characterization, 2020, 170: 110689.
- [17] GUAN X J, JIA Z P, LIANG S M, et al. A pathway to improve low-cycle fatigue life of face-centered cubic metals via grain boundary engineering [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 113: 82 - 89.
- [18] GUAN X J, JIA Z P, NOZZARI VARKANI M A, et al. Effect of grain boundary engineering on the work hardening behavior of AL6XN super-austenitic stainless steel [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2023, 36(4): 681 - 693.

(责任编辑:徐淑姣)