

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5220

GH4079 合金热等静压成形及其力学性能研究

肖 杨¹,王 琦²,张志刚²,孙 兵²,刘 栋³,宋嘉明²

(1. 贵州航空科技发展股份有限公司, 贵州 贵阳 550081 2. 西安欧中材料科技股份有限公司 陕西省金属球形粉末新材料工程研究中心 陕西 西安 710018 3. 中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵州 贵阳 550081)

摘 要:基于超高转速等离子体旋转电极雾化和热等静压技术,开发了GH4079合金的“超高转速等离子体旋转电极雾化+热等静压(HIP)成形+热处理调控”的成形路线,并针对小型试坯开展了微观组织及力学性能相关试验。实验结果表明,HIP及标准热处理后的GH4079合金中晶粒尺寸细小且均匀,基本上没有原始颗粒边界(PPB)的存在;其高向和径向的平均抗拉强度分别($1\,504\pm 2.6$)MPa和($1\,500\pm 2.5$)MPa,平均断后伸长率为(22.0 ± 0.3)%和(22.2 ± 0.4)%,其高向和径向的室温冲击韧性分别为(52.2 ± 2.3)J/cm²和(52.5 ± 1.2)J/cm²,GH4079合金粉末冶金件室温力学性能表现出高稳定性。

关键词:GH4079合金,热等静压,粉末冶金,拉伸性能

中图分类号: TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)08-0945-07

Study on the HIP Formation and Mechanical Properties of GH4079 Superalloy

XIAO Yang¹, WANG Qi², ZHANG Zhigang², SUN Bing², LIU Dong³, SONG Jiaming²

(1. Guizhou Aviation Technical Development Co., Ltd., Guiyang 550081, China; 2. New Materials Engineering Research Center for Spherical Metal Powder of Shaanxi, Xi'an Sino-Euro Materials Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 3. AECC Guiyang Engine Design Research Institute, Guiyang 550081, China)

Abstract: A near-net-shaped processing route for a GH4079 superalloy was established through super-speed plasma rotating electrode processing (SS-PREP), hot isostatic pressing (HIP), and heat treatment. Comprehensive microstructural characterization and mechanical property evaluation were performed on the samples. Experimental analysis reveal that HIPed GH4079 subjected to standard heat treatment develops a refined, homogeneous grain structure with complete elimination of prior particle boundaries (PPB). The material exhibits average tensile strengths of ($1\,504\pm 2.6$) MPa (vertical) and ($1\,500\pm 2.5$) MPa (radial), accompanied by elongations of (22.0 ± 0.3)% and (22.2 ± 0.4)%, respectively. Testing reveals average impact toughness values of (52.2 ± 2.3) J/cm² (vertical) and (52.5 ± 1.2) J/cm² (radial). These results demonstrate the exceptional directional stability of the powder-metallurgy GH4079 superalloy, with the mechanical properties showing minimal orientation dependence.

Key words: GH4079 superalloy; hot isostatic pressing; powder metallurgy; tensile properties

镍基高温合金因其优异的高温力学性能以及组织稳定性而被广泛地应用于航空航天、燃气轮机以及核电等工业领域的热端部件^[1-2]。其中,GH4079合金是在GH4742合金基础上发展的新型镍基高温合金,其 γ' 强化相的质量分数可以达到45%。在750~850℃温度区间内表现出优异的综合力学性能。GH4079合金主流成形工艺采用“双联/三联熔炼—

开坯—锻造成形—机械加工”技术路线。其关键技术难点集中于锻造工艺窗口的精确控制及变形方案设计。国内研究表明,GH4079合金在1 025~1 150℃具有显著应变速率敏感性,Zhang等^[3-4]确定其最优热加工参数为($1\,120\sim 1\,180$)℃/($10^{-5.5}\sim 10^{-2}$)s⁻¹,为后续研究奠定了基础。然而,该结论主要是基于锻造工艺下的组织演变分析,且未对变形态试样的力学性

收稿日期: 2025-10-11

作者简介: 肖 杨,1993年生,本科,助理工程师。主要从事金属材料锻造成形工作。Email: 907433769@qq.com

通信作者: 王 琦,1991年生,硕士,工程师。主要从事金属粉末及粉末冶金制备技术工作。Email: origin_77@163.com

引用格式: 肖杨,王琦,张志刚,孙兵,刘栋,宋嘉明. GH4079合金热等静压成形及其力学性能研究[J]. 铸造技术, 2026, 47(8): 945-951.

XIAO Y, WANG Q, ZHANG Z G, SUN B, LIU D, SONG J M. Study on the HIP formation and mechanical properties of GH4079 superalloy[J]. Foundry Technology, 2026, 47(8): 945-951.

能做评价。考虑到粉末冶金成形在构件的近净成形、组织的均匀性和性能调控方面的独特优势,以及构件的实际服役条件对力学性能的严苛要求。有必要在已有工作的基础上,系统研究粉末冶金态材料的热致密化行为、微观组织演化以及力学性能,并建立工艺-组织-性能的内在联系。

热等静压(hot isostatic pressing, HIP)通过粉末致密化实现复杂构件的成形,具有材料利用率高、残余应力低等优势^[5],不仅可以实现制件的近净成形^[6],也有利于提升合金的力学性能^[7]。国内外学者对变形高温合金的 HIP 成型开展了大量的相关研究,徐磊等^[8-9]证实:利用 HIP 结合 1 245 °C 高温热处理可有效消除 GH4169 合金的原始颗粒边界(prior particle boundaries, PPB),从而显著提升冲击韧性;王洪瑛等^[10]研究指出,HIP 成形 GH4720Li 合金的高温强度优于锻件,对 HIP 成形的 FGH4720Li 合金在近服役温度下的演化行为进行了研究^[11],指出三次 γ' 相含量和尺寸的变化是引起合金屈服强度变化的主要原因。上述结果表明,用 HIP 路线代替原有的锻造工艺具备可行性,为 GH4079 合金提供了可供选择的新技术路径。

本文提出单联熔炼+等离子旋转电极雾化制粉(plasma rotating electrode process, PREP)+热等静压成形+热处理的工艺路线,旨在探究 GH4079 合金 HIP 成形的可行性及其组织性能调控机制。研究成果将为该合金 HIP 工艺优化提供理论依据,并为相关材料近净成形技术发展提供参考。

1 实验材料及方法

本文研究的 GH4079 合金主要成分如表 1 所示。采用西安欧中材料科技股份有限公司的超高转速等离子旋转电极雾化(super-speed plasma rotating electrode process, SS-PREP)技术,制备 GH4079 合金的粉末,筛分选取粒度范围在 53~150 μm 的粉末,用于后续的热等静压成形。选取 200 g 筛分后的目标段粉末,用于粉末的性能表征,本文采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察 GH4079 合金粉末的形貌特征,利用 BT-9300S 型激

光粒度分布仪检测 GH4079 合金粉末的粒度分布特征,利用霍尔漏斗仪检测粉末的流动性和松装密度,采用 BT-300 振实密度仪检测粉末的振实密度,用于计算装粉过程的预估装粉量。

将 GH4079 合金的粉末装入 $\phi 90 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的圆柱形碳钢包套中,在装粉的同时不断敲击包套,使粉末之间的空隙填实,当装入的粉末质量与预估装粉量的偏差低于 0.5 kg 时,完成装粉过程。装好粉末的包套焊接好除气管,放入专用除气炉中进行加热除气 20 h,除气完成后将包套嘴封焊,转移至热等静压设备中加热至 1 200 °C,施加 150 MPa 的压力,保温保压 3 h 以实现 GH4079 合金粉末颗粒之间的冶金结合。待出炉冷却后车削去除碳钢包套,获得 HIP 态 GH4079 合金试坯。

对所得的 HIP 态 GH4079 合金试坯进行标准热处理,具体的工艺路线如图 1 所示。在上述 HIP 态以及 HIP+ 热处理态试样上分别切取 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm 的金相试样,经过机械打磨与抛光后,采用 $\text{CuCl}_2 + \text{HCl}$ 溶液腐蚀约 1 min,采用 Leica DMR 光学显微镜观察其晶粒尺寸、PPB 形貌等微观组织特征,采用扫描电子显微镜观察 γ' 相的形貌。

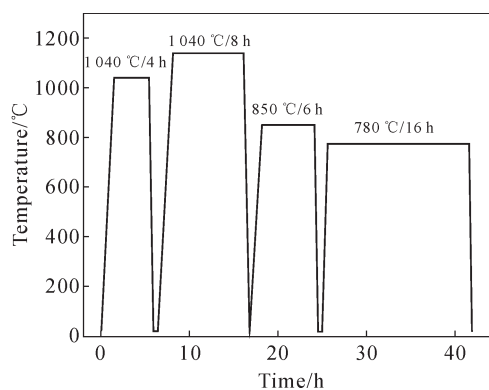


图 1 GH4079 合金标准热处理工艺曲线
Fig.1 The heat treatment route of GH4079

本文的试样切取位置如图 2a 所示,沿标准热处理后的 GH4079 合金试坯的高及径向分别切取 $\phi 13 \text{ mm} \times 73 \text{ mm}$ 的小圆棒,精加工成如图 2b₁ 所示的拉伸试样,根据 GB/T 228.2-2015 标准,在 GNT-100 万能试验机上进行室温拉伸性能测试,获取 GH4079 合金在室温下的屈服强度 $R_{p0.2}$ 、抗拉强度 R_m 、断后伸长率 A 以及断面收缩率 Z 。如图 2a 所示,在热处理后的试坯的径向和高向分别切取 10 mm $\times$ 12 mm $\times$ 57 mm 的试样,并按照 GB/T 229-2007 的要求加工成如图 2b₂ 所示的 U 型缺口冲击试样,在 PIT452D-4 型冲击试验机上测试 GH4079 合金的室温冲击性能。每组性能测 3 根试样,计算平均值作为最终性能。

表 1 GH4079 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of GH4079
(mass fraction/%)

Element	C	Co	Cr	W	Ti
Content	0.06	13.6	11.29	5.65	2.76
Element	Mo	Al	Nb	V	Ni
Content	4.46	2.89	2.67	0.5	Bal.

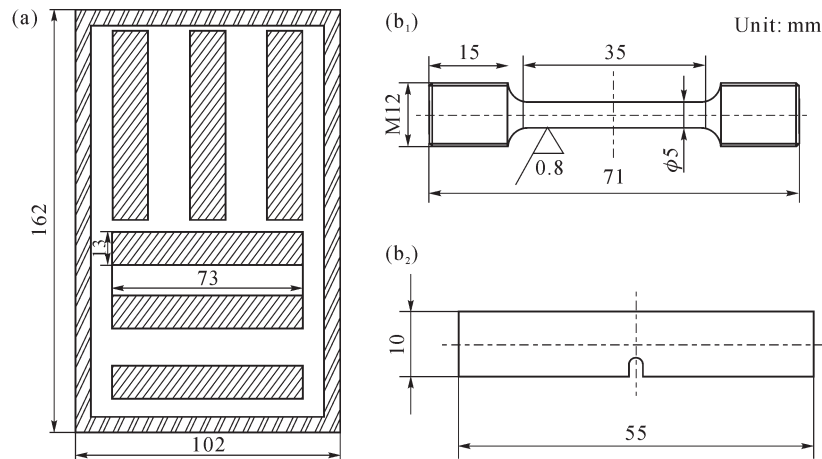


图2 GH4079 合金试坯力学性能测试取样图:(a) 取样位置示意图;(b₁) 拉伸试样尺寸示意图;(b₂) 夏比冲击试样尺寸示意图
Fig.2 Schematic diagram of the mechanical properties of the GH4079 billets: (a) schematic diagram of the sample position; (b₁) size of the tensile test sample; (b₂) size of the Charpy impact test sample

2 实验结果及讨论

2.1 GH4079 合金粉末的性能表征

现有研究表明^[12-13],金属粉末的形貌与粒度分布特征显著影响颗粒间的内聚力、桥连效应等相互作用机制,进而影响粉末的流动性、振实密度及装填孔隙率,最终对 HIP 制件的致密度产生不利影响。雾化过程中形成的空心粉末颗粒,其内部空腔在除气及 HIP 过程中难以完全消除,易在粉末冶金制件中形成封闭孔隙。此类孔隙在高温服役条件下可诱发热诱导孔洞,导致制件服役寿命降低。基于上述因素,GH4079 合金粉末的性能表征是 HIP 成形前的重要环节。

图3展示了所选粒度段 GH4079 合金粉末的形貌特征。由图3a可见,粉末具有高球形度,空心粉及卫星粉含量极低,表面形貌良好。这些特征有利于 HIP 过程中粉末颗粒间的冶金结合,从而降低最终制件的孔隙率。图3b的粒度分布分析表明,94.11%的粉末粒径分布于 50~150 μm 区间。小于 50 μm 及大于 150 μm 的粉末占比分别为 2.43%与 3.46%。细粉(<50 μm)的存在主要归因于筛分过程中振动强度

不足,导致部分亚筛网孔径颗粒残留于目标粒度段;而粗粉(>150 μm)的出现则源于筛网在振动过程中的微变形,致使少量超筛网孔径颗粒或非球形颗粒通过网孔。整体而言,非目标粒度段粉末含量较低,表明本研究采用的筛分条件具有较高的筛分效率。

所选粒度段 GH4079 合金粉末表征结果显示, GH4079 合金粉末的流动性为 11.80 s/50 g, 振实密度为 5.20 g/cm³, 查阅文献可知^[14], GH4079 合金的理论密度为 8.32g/cm³, 所选粒度段粉末的振实密度可以达到理论密度的 62.5%。对 HIP 成型而言,装粉完成后的粉末密度是重要的参数,显著地影响着 HIP 过程的形状收缩以及致密化程度,而较高的流动性以及振实密度有利于在装粉过程中获取更高的密度。粉末流动性和振实密度的影响因素可以分为两个方面:粉末内在的物理性能有球形度、粒径分布以及粉末表面形貌等;外界因素主要有敲击频率、敲击力度以及装粉速率等。在装粉过程中,粉末受到的作用力主要有重力、敲击力、摩擦力、吸附力以及静电力等,其中重力和敲击力有利于获得更高的振实密度,而摩擦、吸附以及静电等相互作用不利于振实过程。细粒径粉末的比表面积更高,因此更容易发生静电吸

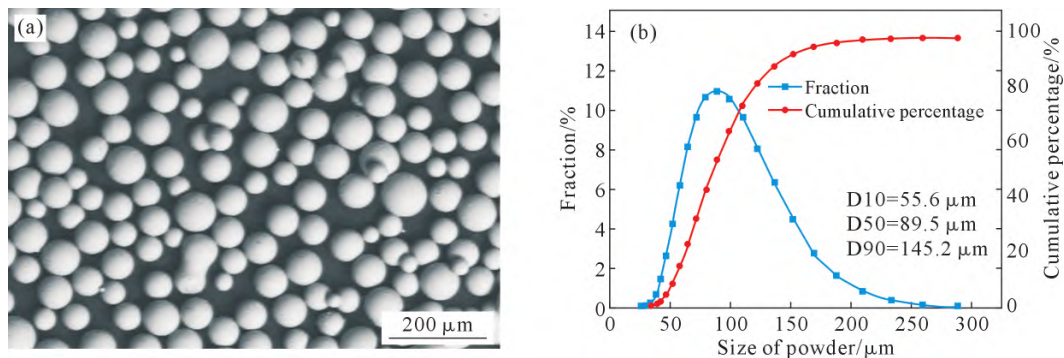


图3 GH4079 合金粉末的形貌及粒度占比:(a) 粉末形貌;(b) 粒度分布

Fig.3 Morphology and particle size distribution of the GH4079 powder: (a) powder morphology; (b) particle size distribution

附,进而形成粉末粘接和团聚,粉末形状的变化阻碍了自由流动,不利于粉末空隙的填充。因此,本试验中筛去粒径小于 53 μm 的粉末,以降低粉末之间的吸附作用,获取更高的振实密度,从而提升 HIP 过程的致密化效果。

上述分析结果表明,采用 SS-PREP 技术制备的 GH4079 合金粉末具有良好的球形度与粒度分布,敲击装粉过程能够达到理论密度的 62.5%,有利于后续 HIP 中的致密化过程。

2.2 HIP 及热处理态 GH4079 合金的微观组织

图 4 为 HIP 态 GH4079 合金的微观组织形貌。由图 4a 的抛光态组织可观察到,在所选 HIP 工艺参数下制备的 GH4079 合金试坯中,粉末间孔隙基本消除,表明其具有较高的致密度和良好的成形性能。同时,未检测到夹杂物、热诱导孔洞及 PPB 等粉末冶金常见缺陷。现有研究指出,金属粉末具有较大的比表面积和强吸附能力,易在室温下吸附氧气及水蒸气并形成表面氧化物^[15]。在 HIP 过程中,这些氧化物可作为 MC、 M_{23}C_6 等碳化物的形核核心,促使碳化物形成元素向粉末边界扩散,最终沿原始颗粒边界形成连续网状分布的碳化物及碳氧化物,即 PPB 缺陷^[16]。韦康等^[17]计算了不同碳含量下 GH4079 合金中碳化物平衡析出行为,表明 GH4079 合金中碳化物含量在 0.018%~0.051%(质量分数)的碳含量范围内呈现线性增加的趋势,结合表 1 所示的合金成分分析可知,本文试验样品中 GH4079 合金中的碳含量较低(0.05%),根据上述 PPB 形成机理^[18],C 含量的减少有利于降低 MC 等碳化物形成所需要的化学势,有效的抑制其 PPB 形成倾向。

此外,图 4b 的腐蚀态组织显示,HIP 成形后 GH4079 合金中 PPB 含量极少。组织中还观察到 γ 基体存在大量孪晶。这是由于 HIP 致密化过程中伴随的粉末颗粒塑性变形,在 HIP 初期,粉末之间的变形导致晶粒内部位错密度上升,其畸变能也逐渐升高;随着 HIP 过程的继续,粉末之间形成烧结颈,

不断的发生元素扩散,于此同时,粉末边界附近也是变形程度较高的位置,在晶界和碳化物的位置容易诱发动态再结晶形核,伴随着后续的原子扩散过程,这些再结晶晶粒也逐渐发生长大。镍基高温合金的再结晶过程常伴随退火孪晶的形成, γ 相基体具有面心立方结构,其 $\{111\}$ 晶面为密排面,在晶界迁移所主导的晶粒长大过程中, $\{111\}$ 密排面迁移时,个别原子容易沿着 $\langle 112 \rangle$ 方向发生位移为 $a/6\langle 112 \rangle$ 的错排,形成了堆垛层错。

根据扩展位错宽度和堆垛层错能的关系^[19]:

$$d = Gb^2 / 8\pi\gamma \quad (1)$$

式中, d 为扩展位错宽度,m; G 为剪切模量,MPa; b 为伯氏矢量大小,m; γ 为层错能,mJ/m²。

根据表 1 中的 GH4079 合金成分,采用 JMat Pro 软件计算得到 GH4079 合金在 700~1 200 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围的层错能约为 238~261 mJ/m²,由式(1)可知,较低的堆垛层错能有利于堆垛层错的扩展,随着堆垛层错扩展变宽及生长,逐渐在 $\{111\}$ 晶面形成了共格孪晶结构,孪晶界面将一直沿着 $\{111\}$ 晶面生长,直至与原始晶界相交,形成图 4b 中贯穿整个晶粒的形貌。

图 5 是经过标准热处理后的 GH4079 合金微观组织,相较于 HIP 态原始组织,热处理后的 GH4079 合金晶界形貌呈现显著改变。在 1 040/1 140 $^{\circ}\text{C}$ 的两级固溶处理过程中,合金原子获得充分的扩散激活能,促使初生碳化物及一次 γ' 相溶解;随后的时效处理诱发过饱和固溶体脱溶分解,致使大量二次 γ' 相形核并随着时效时间的延长而发生粗化^[20]。此类析出相不仅改变了晶界的化学组成,同时通过降低晶界表面能,使其在腐蚀后衬度显著增强。通过固溶处理,统计分析表明,合金平均晶粒尺寸增至 86 μm ,较 HIP 态组织(78 μm)呈现约 10.3% 的适度长大,此现象主要归因于高温固溶阶段晶界迁移驱动力的提升。

SEM 高倍成像结果(图 5b)进一步揭示热处理

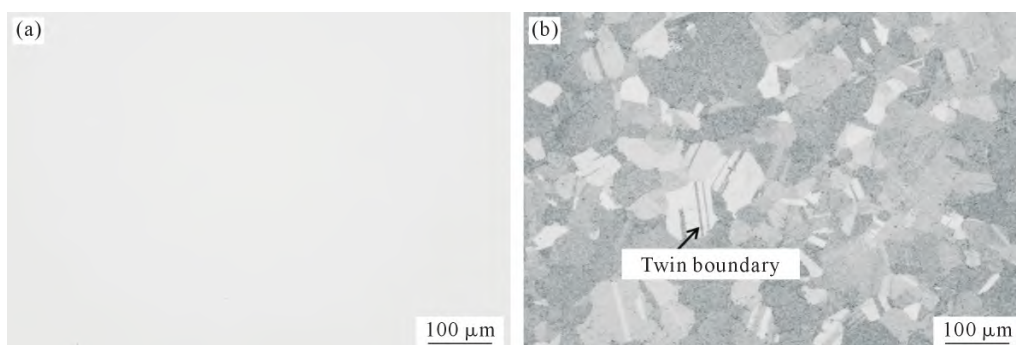


图 4 HIP 态 GH4079 合金的微观组织:(a) 抛光态;(b) 腐蚀态
Fig.4 Microstructure of HIPed GH4079: (a) polished; (b) etched

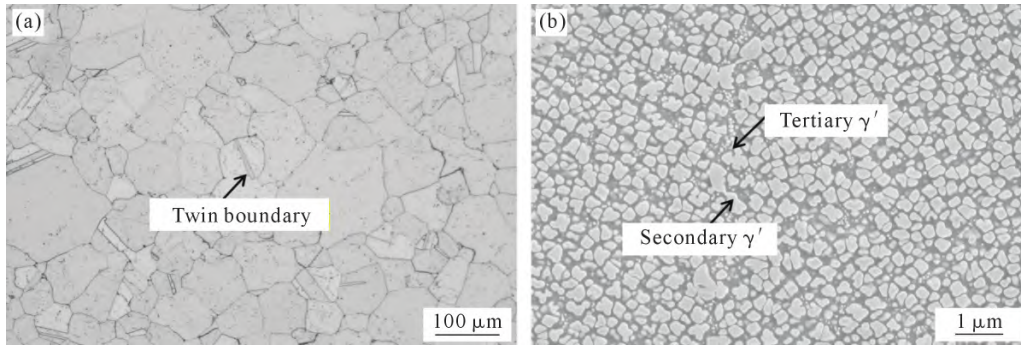


图 5 HIP+ 标准热处理后 GH4079 合金的微观组织:(a) OM 照片;(b) SEM 照片

Fig.5 Microstructure of GH4079 after HIP and standard heat treatment: (a) OM image; (b) SEM image

后微观组织的特征性纳米析出相分布。大量尺寸均匀的 γ' 强化相($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$)以弥散形态析出,其平均粒径约为 200 nm。粒径分布呈现较为理想的窄分布单峰特征(峰值位于 180~220 nm 区间),在此范围内的 γ' 相有利于诱发位错滑移时的强/弱耦合效应,提升合金的强度^[21],表明本文的热处理工艺实现了对 GH4079 合金析出相尺寸的精准调控。

2.3 HIP+热处理态 GH4079 合金的力学性能

图 6 是本文制备的 GH4079 合金在不同方向上的室温力学性能对比图,在拉伸性能方面,其高向抗拉强度($1\,504 \pm 2.6$) MPa,径向抗拉强度为($1\,500 \pm 2.5$) MPa,两者差值仅 4 MPa,差异率不足 0.3%。相较于传统铸造工艺制备的高温合金,其存在成分偏析、晶粒取向不一致等问题,往往呈现显著的各向异性。在本文的工艺方案中,由于 SS-PREP 制粉工艺获

得的均匀细小粉末,从原料层面减少成分不均匀性;HIP 成形过程中,在高温高压条件下,粉末颗粒充分扩散焊合,消除内部缺陷,促使晶粒均匀生长,最终实现了高向与径向抗拉强度的高度一致性,体现出良好的工艺稳定性与材料性能可靠性,完全满足航空航天等高端领域对高温合金高强度的严苛技术指标要求。

平均断后伸长率同样是衡量材料拉伸性能的重要参数。GH4079 合金高向平均断后伸长率为(22.0 ± 0.3)%,径向为(22.2 ± 0.4)%,数值极为接近,表明材料在两个方向上均具备良好的塑性变形能力。一般而言,高温合金在追求高强度的同时,容易牺牲部分塑性,但本工艺通过精确控制热处理过程中 γ' 相的析出与长大,在保证高强度的基础上,实现了优异的塑性。 γ' 相作为主要强化相,其均匀析出和合理尺寸分

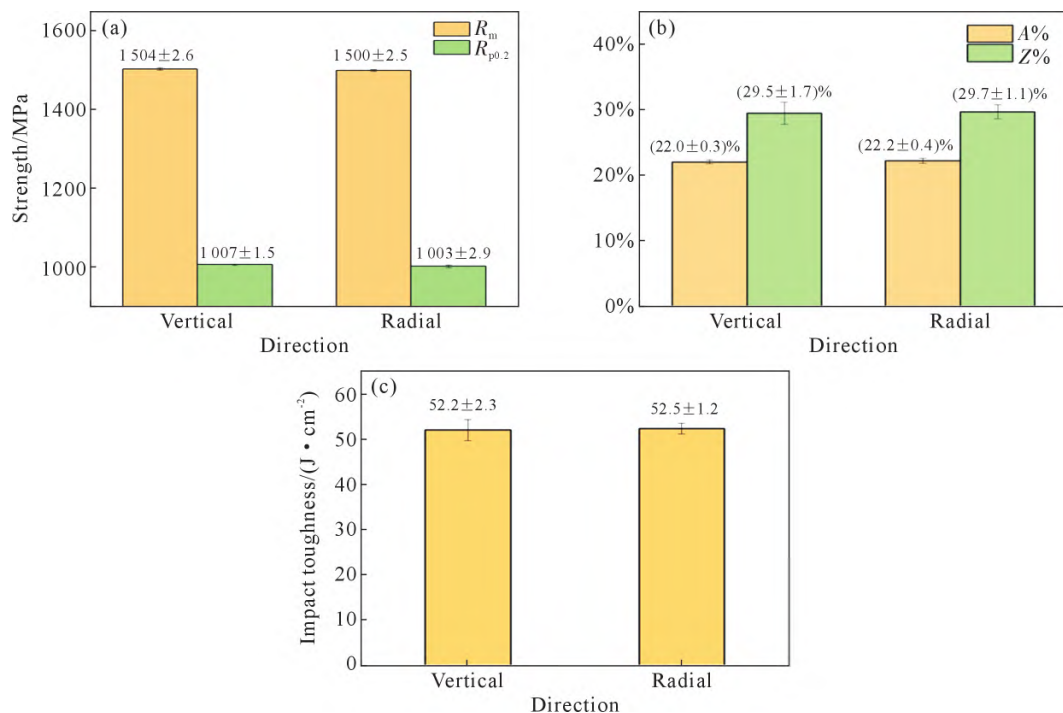


图 6 GH4079 合金的高、径向性能对比:(a) 抗拉强度和屈服强度;(b) 断后伸长率和断面收缩率;(c) 冲击韧性

Fig.6 Comparison of the vertical and radial properties of GH4079: (a) tensile strength and yield strength; (b) elongation and reduction; (c) impact toughness

布,既为位错运动提供阻碍以提升强度,又避免因 γ' 相过度粗大而降低塑性^[22]。高向与径向相近的断后伸长率,进一步证明了材料微观组织的均匀性,保证了在复杂受力环境下,材料各方向均能有效承受塑性变形而不发生过早断裂。

从图6的统计数据可得,高向与径向的平均冲击韧性数值分别为 $(52.2 \pm 2.3) \text{ J/cm}^2$ 和 $(52.5 \pm 1.2) \text{ J/cm}^2$,这一结果充分表明材料在不同方向上展现出优异的各向一致性。SS-PREP制粉工艺所制备的粉末具有细小且均匀的特性,将偏析现象控制在约 $100 \mu\text{m}$ 的尺度范围内,有效降低了材料内部不同位置出现显著成分差异的概率。结合图4和图5所呈现的微观组织图像分析可知,在本文所设定的HIP成形工艺参数下,GH4079合金粉末颗粒之间实现了良好的冶金结合。这使得制件内部原本可能存在的气孔、缩松等潜在裂纹源缺陷得以消除,有利于提升冲击过程中裂纹扩展所需要克服的功,提升冲击韧性。此外,经热处理后的显微组织中未观察到PPB,这一现象避免了常规粉末冶金制件在变形过程中,由于PPB上存在的大量碳化物与基体变形不协调而诱发裂纹萌生^[23],从而有效防止了拉伸性能可能出现的恶化问题。

γ' 相的面心立方有序结构与 γ 基体保持高度共格关系是沉淀强化型高温合金具备优异性能的关键所在。 γ' 相($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$)与 γ 基体的晶格常数差异极小,形成的共格界面使得两相之间存在弹性应力场。当位错运动至 γ/γ' 相界面时,需克服界面能垒。如图7为变形后GH4079合金的透射电子显微形貌,从图中可以观察到位错塞积在 γ' 相周围,这表明合金中弥散分布的 γ' 相有效的阻碍了位错在变形过程中的滑移,当位错滑移经过 γ' 相时,必须选择切割或绕过的方式克服障碍,该过程伴随着额外的能量消耗,从而有利于提高材料的强度。在本文工作的基础上,通过优化热处理工艺,精确调控 γ'

相的析出特征,可以最大限度地发挥这一强化效应,有利于获取优异室温综合力学性能。

3 结论与展望

(1)本文的GH4079合金粉末经过HIP成形后,不存在PPB缺陷。HIP态试坯经过标准热处理后,其晶粒尺寸均匀,晶内析出细小均匀的 γ' 相。

(2)粉末冶金GH4079合金制件高向和径向的平均抗拉强度分别1504和1500 MPa,平均断后伸长率为22.0%和22.2%,高向和径向的冲击韧性分别为52.2和52.5 J,径向和高向的室温力学性能相当,各方向力学性能一致性高。

采用SS-PREP制粉+HIP成形+热处理调控技术路线来制备GH4079合金构件具备可行性。而面对该合金服役温度范围内的大尺寸复杂构件而言,可基于HIP及热处理工艺参数的调控,后续深入开展粉末冶金制备工艺与高温持久、低周疲劳等其他重要性能的研究。

参考文献:

- [1] ZINKLE S J, WAS G S. Materials challenges in nuclear energy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 735-758.
- [2] SREENU B, SARKAR R, SATHEESH KUMAR S S, CHATTERJEE S, RAO G A. Microstructure and mechanical behaviour of an advanced powder metallurgy nickel base superalloy processed through hot isostatic pressing route for aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 797: 140254.
- [3] ZHANG W W, LIU X G, LU T G, LIU Y L, GUO Y, QIN H Y, TIAN Q. Microstructural evolution of GH4079 superalloy during hot deformation and heat treatment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 298-317.
- [4] 张文文,王帅杰,刘云龙,田强,秦鹤勇. GH4079高温合金的热变形行为及热加工图[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(3): 186-199.
ZHANG W W, WANG S J, LIU Y L, TIAN Q, QIN H Y. Hot deformation behavior and hot processing map of GH4079 superalloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32(3): 186-199.
- [5] VILANOVA M, GARCIA D I A, SAINZ S, JORGE-BADIOLA D, GURAYA T, SAN SEBASTIAN M. The limit of hot isostatic pressing for healing cracks present in an additively manufactured nickel superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 300: 117398.
- [6] RAISSON G, GUÉDOU J Y, GUICHARD D, RONGVAUX J M. Production of net-shape static parts by direct HIPing of nickel base superalloy prealloyed powders[J]. Advanced Materials Research, 2011, 278: 277-282.
- [7] TENG Q, WEI Q S, XUE P J, CAI C, CHEN H, CHEN H X, SHI Y S. Effects of processing temperatures on FGH4097 superalloy fabricated by hot isostatic pressing: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 739: 118-131.

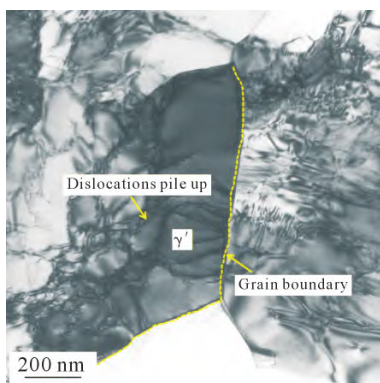


图7 拉伸变形后GH4079合金的位错组态形貌

Fig.7 Dislocation configurations of GH4079 after tensile testing

- [8] 徐磊,田晓生,吴杰,卢政冠,杨锐. 热等静压成形 Inconel 718 粉末合金的显微组织和力学性能[J]. 金属学报, 2023, 59(5): 693-702.
- XU L, TIAN X S, WU J, LU Z G, YANG R. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 powder alloy prepared by hot isostatic pressing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(5): 693-702.
- [9] 田晓生,卢正冠,徐磊,吴杰,杨锐. 粉末冶金 Inconel 718 合金的热等静压成形和原始颗粒边界的消除[J]. 金属学报, 2024, 60(11): 1487-1498.
- TIAN X S, LU Z G, XU L, WU J, YANG R. Hot isostatic densification of Inconel 718 powder alloy and elimination of prior particle boundaries[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2024, 60(11): 1487-1498.
- [10] 王洪瑛,姚志浩,李大禹,郭婧,姚凯俊,董建新. 高 γ' 相含量粉末及变形高温合金组织和力学性能的异同性[J]. 金属学报, 2025, 61(9): 1364-1374.
- WANG H Y, YAO Z H, LI D Y, GUO J, YAO K J, DONG J X. Similarities and differences of microstructure and mechanical properties between high γ' content powder and wrought superalloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2025, 61(9): 1364-1374.
- [11] 李大禹,姚志浩,赵杰,董建新,郭婧,赵宇. FGH4720Li 粉末高温合金在近服役条件下的组织与力学性能演变规律[J]. 金属学报, 2025, 61(6): 826-836.
- LI D Y, YAO Z H, ZHAO J, DONG J X, GUO J, ZHAO Y. Evolution of microstructure and mechanical properties of FGH4720Li P/M superalloy under near-service conditions[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2025, 61(6): 826-836.
- [12] MA Y F, MATTHEW EVANS T, PHILIPS N, CUNNINGHAM N. Numerical simulation of the effect of fine fraction on the flowability of powders in additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2020, 360: 608-621.
- [13] HE Y, HASSANPOUR A, BAYLY A E. Combined effect of particle size and surface cohesiveness on powder spreadability for additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2021, 392: 191-203.
- [14] 中国金属学会高温材料分会编. 中国高温合金手册[M]. 中国标准出版社, 2012.
- Academic committee of the superalloys of the chinese society for metals. China Superalloys Handbook[M]. Beijing: China Standard Press; 2012.
- [15] APPA RAO G, SRINIVAS M, SARMA D S. Effect of oxygen content of powder on microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed superalloy Inconel 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 435-436: 84-99.
- [16] TAN L M, HE G A, LIU F, LI Y P, JIANG L. Effects of temperature and pressure of hot isostatic pressing on the grain structure of powder metallurgy superalloy[J]. Materials, 2018, 11(2): 328.
- [17] 韦康,何佳讯,尹健伟,王涛,李钊,万志鹏. C 含量对 GH4079 合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2025, 54(24): 132-138.
- WEI K, HE J X, YIN J W, WANG T, LI Z, WAN Z P. Effect of C content on microstructure and mechanical properties of GH4079 alloy[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(24): 132-138.
- [18] ZHANG B Y, NING Y Q, WANG Z T, LIU Q M. PPB structure elimination, DRX nucleation mechanisms and grain growth behavior of the 3rd-generation PM superalloy for manufacturing aviation components[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(1): 325-344.
- [19] REED R C. The superalloys: Fundamentals and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [20] SUN B, BAI J M, LUO C, KANGL, QU Z H, ZHAN Z G, SONG J M, WANG Q X, ZHANG T B, LAI Y J, LI S Q. Mechanical properties and fracture characteristics of a typical hard-to-deform superalloy GH4079 prepared by powder metallurgy technology[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 39: 6254-6262.
- [21] KOZAR R W, SUZUKI A, MILLIGAN W W, SCHIRRA J J, SAVAGE M F, POLLOCK T M. Strengthening mechanisms in polycrystalline multimodal nickel-base superalloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40, 1588-1603.
- [22] XIE C B, JIAN Y, WUT, CHANG L T. Processing of Ni-based alloy GH3535 with homogeneous and grain boundary engineered microstructure via powder metallurgy-hot isostatic pressing[J]. Materials Science & Engineering: A, 2026, 953: 149738.
- [23] LU T G, LIU X G, ZHANG W W, TIAN Q. Microstructure evolution and fracture characteristics of GH4079 superalloy during high-temperature tensile process[J]. Materials Science & Engineering: A, 2024, 918: 147450.

(责任编辑:宫文婧)