

引文格式: 韩志宇, 张平祥, 赖运金, 等. 超高转速旋转电极法与气雾化法对EP741NP镍基高温合金粉末特性的影响规律研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(6): 25020433.

HAN Zhiyu, ZHANG Pingxiang, LAI Yunjin, et al. Influences of SS-PREP and AA processes on powder properties of EP741NP Ni-based superalloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(6): 25020433.

超高转速旋转电极法与气雾化法对 EP741NP 镍基高温合金粉末特性的影响规律研究

韩志宇^{1,2}, 张平祥¹, 赖运金², 郑作赞², 王琦², 相敏², 王毅¹

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

2. 西安欧中材料科技股份有限公司, 西安 710018)

[摘要] 采用超高转速等离子旋转电极法 (Supreme-speed plasma rotating electrode process, SS-PREP) 和氩气雾化法 (Argon atomization, AA) 制备了球形 EP741NP 合金粉末, 对比研究了两种制粉方法对粉末特性的影响。结果表明, 采用 SS-PREP 法制备的 EP741NP 合金粉末形貌更加规则, 空心粉和异形粉含量更低, 在氧增量、球形度及流动性等物理性能方面具有明显优势, 但粉末粒径较大; AA 法制备粉末中不规则颗粒较多, 粉末颗粒表面有较多卫星粉, 部分粉末之间存在粘连。SS-PREP 法制备的 EP741NP 合金粉末颗粒表面为典型枝晶组织, 且呈放射状生长; AA 法制备的粉末颗粒表面组织不清晰, 局部可观察到少量枝晶, 粉末中存在较多空心粉颗粒以及个别组织异常粉末, 空心粉内部孔洞被完全封闭, 孔洞内部并非光滑表面, 呈棉絮状且形状不规则, 主要是由于雾化气体的冲击导致液膜破碎不完全, 雾化气体被裹入, 在袋状液膜闭合前, 内部雾化气体没有逸出, 进而形成空心粉。在室温、650 °C 和 750 °C 测试条件下, SS-PREP 和 AA 两种不同方法制备的 EP741NP 合金拉伸性能均表现出相同的规律, SS-PREP 法粉末的拉伸强度和屈服强度优于 AA 法粉末。

关键词: 超高转速等离子旋转电极法 (Supreme-speed plasma rotating electrode process, SS-PREP); 氩气雾化法 (Argon atomization, AA); EP741NP 合金; 粉末特性; 微观组织

中图分类号: V25

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020433

Influences of SS-PREP and AA Processes on Powder Properties of EP741NP Ni-Based Superalloy

HAN Zhiyu^{1,2}, ZHANG Pingxiang¹, LAI Yunjin², ZHENG Zuoyun², WANG Qi², XIANG Min², WANG Yi¹

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Sino-Euro Materials Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

[ABSTRACT] Spherical EP741NP alloy powders were prepared by the supreme-speed plasma rotating electrode process (SS-PREP) and argon atomization (AA) process. A comparative study was conducted to investigate the effects of the two powder preparation processes on the powder characteristics. The results show that the EP741NP alloy powders prepared by the SS-PREP process have a more regular morphology, lower contents of hollow powders and irregularly shaped powders, and obvious advantages in physical properties such as oxygen pickup, sphericity and fluidity, but with a larger powder particle size. The powders prepared by the AA process contain more irregular particles, with many satellite particles on the surface of the powder particles, and adhesion between some powders. The surface of the EP741NP alloy powder particles prepared by the SS-PREP process exhibits a typical dendritic structure that grows in a radial pattern. The surface structure

收稿日期: 2024-06-13; 退修日期: 2024-06-28; 录用日期: 2024-10-23

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB3712000); 陕西省重点研发计划 (2021LLRH-05)

通信作者: 赖运金, 教授级高工, 从事钛合金和高温合金材料的研发, 增材制造与粉末冶金等方面的研究及推广应用。

王毅, 教授, 博士生导师, 研究方向为极端条件材料基因工程和集成计算材料工程。

of the powders prepared by the AA process is unclear, a small amount of dendrites can be observed locally, and there are more hollow powder particles and individual powders with abnormal microstructures in the powders. The internal pores of the hollow powders are completely enclosed, and the inner surface of the pores is not smooth, showing a flocculent and irregular morphology. This phenomenon is mainly attributed to the incomplete breakup of the liquid film caused by the impact of the atomizing gas; The atomizing gas gets entrapped, and the internal atomizing gas does not escape before the pouch-shaped liquid film collapses, thereby forming hollow powders. At the test temperatures of room temperature, 650 °C and 750 °C, the tensile properties of the EP741NP alloys fabricated from the two types of powders exhibit consistent trends in tensile properties, with the tensile strength and yield strength of the powders prepared by the SS-PREP method higher than those prepared by the AA process.

Keywords: Supreme-speed plasma rotating electrode process (SS-PREP); Argon atomization (AA); EP741NP alloy; Powder characteristics; Microstructure

耐热 EP741NP 镍基高温合金是一种在无序面心立方基体中通过 γ' 相沉淀强化的镍基高温合金。该合金兼具高温高强度、抗氧化性、抗蠕变性、抗疲劳性及耐磨性等优异的综合力学性能,因此成为航空发动机与航空航天器件的关键材料,被广泛用于制造涡轮、叶片、涡轮增压器、推力矢量喷口等高温部件^[1-3]。这些部件需承受高温、高压、高速运转的严苛工况,EP741NP 合金可凭借出色的耐高温性能与力学性能,保障发动机的稳定可靠运行^[4-5]。同时,EP741NP 合金在火电、水电、核电等能源领域应用广泛,可用于制造锅炉管、燃气轮机、燃烧器、燃料棒等核心部件,凭借优异的高温强度与抗腐蚀性能,能够良好地适应高温、高压、强腐蚀的严苛服役环境。EP741NP 镍基高温合金在化工领域也有广泛的应用,可制造反应釜、蒸馏塔、吸收塔、管道和阀门等装置,以抵御化学反应和高温、腐蚀环境。此外,EP741NP 镍基高温合金还在制造领域中获得广泛应用,用于生产高温合金切削刀片、上料机构、批料机械、高温存储设备等。尽管 EP741NP 合金具备众多的优异特性并获得广泛应用,但是合金中存在大量的 W、Mo、Cr、Co 等固溶强化元素,重合金化导致严重的偏析,增加了合金的热加工难度,导致其在航空航天等领域中的应用受到限制。粉末冶金 (Powder metallurgy, PM) 技术是解决高温合金偏析的一种有效方法。成分偏析仅限于单个粉末颗粒内,致密化的 PM 高温合金零件具有均匀的成分、微观组织和机械性能^[6-7]。然而,由于粉末冶金工艺的特殊性,合金中易存在夹杂物、原始颗粒边界 (Primary particle boundary, PPB) 和热诱导孔洞 (Thermally induced porosity, TIP) 等缺陷,在一定程度上制约着粉末高温合金的应用^[8-9]。因此,能否生产出小粒度、无夹杂、无空心粉、低气体含量的高品质高温合金粉末,是影响粉末高温合金发展和应用的关键。

粉末制备是粉末高温合金生产中最重要的一环,

粉末质量直接影响零件的性能^[10]。目前,制备金属粉末的方法有很多种,主要包括雾化法、机械粉碎法、旋转电极法、电化腐蚀法、还原法等^[11-12]。其中,氩气雾化法 (Argon atomization, AA)^[13] 和等离子旋转电极法 (Plasma rotating electrode process, PREP) 可以直接制得球形粉末^[14],而其他方法需要额外的处理才能获得近球形粉末^[15-16],因此,在实际生产中主要采用这两种生产工艺制备球形高温合金粉末。杨启云等^[17] 研究发现,通过降低气体雾化过程中的碳和氧含量,能够有效改善烧结合金的组织,减少粉末 PPB。尹燕等^[18] 利用等离子体球化技术制备了 GH4169 合金粉末,研究发现,气体流量对粉末球化效果影响显著,且氢气流量越大,粉末的球化效率越高,同时粉末的流动性等关键性能均会得到显著提升。Yang 等^[19] 利用电极感应熔炼氩气雾化制备了镍基高温合金粉末并统计了粉末中孔隙率的分布情况,发现气孔率主要分布在粉末的边缘和中心,且随着粉末粒度的增大而增大。Drokonov 等^[20] 采用 PREP 法制备了 EP648 镍基高温合金粉末,系统研究了粉末流动性随粒径变化的趋势,发现粉末的流动性随着颗粒尺寸的减小而增加。然而,以上研究主要集中于镍基高温合金粉末粒径对粉末流动性的影响,针对不同制粉方法对 EP741NP 合金粉末特性影响的研究不足。因此,本文以同批次 EP741NP 合金棒材为原材料,分别采用 AA 和超高转速等离子旋转电极法 (Supreme-speed plasma rotating electrode process, SS-PREP) 制备了金属球形粉末,并对比研究了粉末的组织 and 物理性能特性。研究结果对选择制粉方法及优化粉末冶金 EP741NP 合金的组织与性能具有重要指导意义。

1 制备工艺试验

选取同批次 EP741NP 合金棒材为原料。采用 VIGA 氩气雾化设备制备粉末,熔体温度 1600 °C、漏眼直径 5 mm、雾化压力 8 MPa,原理图见图 1 (a); 采用 PREP-

2000 等离子体旋转电极设备制备粉末,棒材直径为 55 mm,转速为 26000 r/min,原理图见图 1 (b)。将粉末进行筛分,选取 150 μm 以内粒度的粉末进行研究,依据 GB/T 1482、GB/T 1479.1 和 GB/T 5162 分别测量了粉末的流动性、松装密度和振实密度。对 EP741NP 合金棒材及合金粉末的化学成分进行分析。采用 DC3000 型倒立式光学显微镜 (Optical microscope, OM) 和 JSM-6701F 型扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 对粉末的表面形貌和微观组织进行详细分析。

2 结果与分析

2.1 不同制粉工艺对粉末物理性能的影响

表 1 为 EP741NP 合金棒材,以及 AA 法和 SS-PREP 法制得粉末的化学成分,可以看出,不论是 AA 法还是 SS-PREP 法,合金的主要金属元素含量没有发生明显变化,氧、氮、氢等气体元素含量增加。其中,氧含量变化有明显区别,与原始棒材氧含量相比较,AA 粉末增氧量为 0.0188%,而 SS-PREP 粉末增氧量仅为 0.0028%,与 AA 粉末相比降低了约 85%。

制粉过程中氧含量升高的原因,与不同工艺所用保护气体的氧含量直接相关。采用 AA 法制备粉末时,

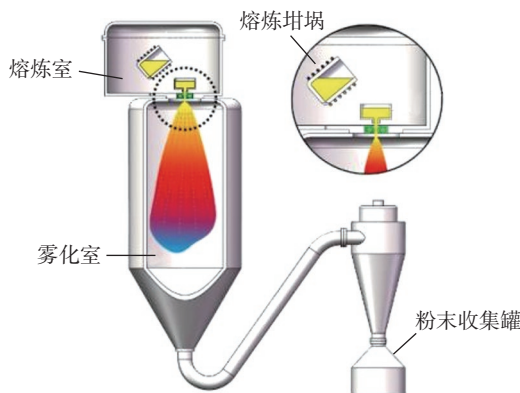
表 1 EP741NP 合金棒材和粉末的化学成分 (质量分数)
Table 1 Chemical composition of EP741NP alloy bar and powders (mass fraction) %

元素	EP741NP棒材	AA粉末	SS-PREP粉末	允许偏差值
Cr	9.42	9.46	9.47	0.05
Co	15.57	15.58	15.60	0.03
Ti	1.74	1.78	1.77	0.03
Al	5.02	5.03	5.00	0.03
Mo	3.8	3.84	3.88	0.08
W	5.54	5.56	5.56	0.02
Zr	<0.01	<0.01	<0.01	0
C	0.038	0.043	0.042	0.05
B	0.012	0.014	0.014	0.002
Nb	2.45	2.50	2.52	0.07
H	0.0001	<0.001	<0.001	0.0009
O	0.0002	0.019	0.003	0.0188
Ni	0.001	0.004	0.003	0.003
其他	余量	余量	余量	

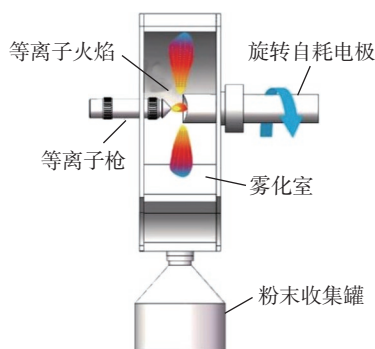
以高纯氩气作为雾化介质,尽管氩气纯度较高,仍含有微量氧,在制粉过程中,这些微量氧会与熔融状态下的粉末表面金属元素快速结合,形成氧化物;而采用 SS-PREP 法制备粉末时,同样使用高纯惰性气体,但该气体仅起保护作用,且在设备内部循环使用,随着制粉过程的进行,气体中的微量氧被逐步消耗,氧含量几乎降至 0,因此该工艺的粉末增氧量极低。低氧含量可有效抑制粉末表面的氧化反应,进而降低 PPB 的形成风险。

采用激光粒度仪分别测试了 SS-PREP 法与 AA 法制备粉末的粒度分布,结果如图 2 所示。两种工艺所得粉末的粒度均相对集中在 15~106 μm。其中 SS-PREP 法制备的粉末粒径分布更窄,15~53 μm 范围内的占比更高,这得益于该工艺更高的转速。SS-PREP 可获得大量超细粉,这对拓展粉末冶金领域中 PREP 细粉的应用研究具有积极意义。不过,SS-PREP 粉末的平均粒度为 40~50 μm,整体粒径大于 AA 粉末(平均粒径 30~40 μm),这一差异源于 AA 粉末中 15 μm 左右的细粉占比更高。

表 2 为不同制备方法的 EP741NP 合金粉末的物理特性。可以看出,SS-PREP 法制备的 EP741NP 合金粉末从流动性、松装密度、振实密度、非球形颗粒比例,性能都优于 AA 法,球形度高和表面无卫星粉是主要影响因素,其中非球形颗粒比例的显著降低有助于粉末流动性、松装密度、振实密度的改善。性能对比结果表明,SS-PREP 法制备的 EP741NP 合金粉末具有良好的物理



(a) 采用VIGA氩气雾化设备制备粉末



(b) 采用PREP-2000等离子体旋转电极设备制备粉末

图 1 两种设备制备粉末原理图

Fig.1 Schematic diagrams for powder preparation via two types of equipment

性能,更适用于粉末包套热等静压工艺。

2.2 不同制粉工艺对粉末形貌影响

图3为SS-PREP法和AA法制备的EP741NP合金粉末形貌。可以看出,SS-PREP法制备的EP741NP合金粉末基本为规则球形,粉末颗粒表面洁净光滑,存在极个别异形颗粒;而AA法制备的EP741NP合金粉末形貌不规则颗粒较多,粉末颗粒表面有较多卫星粉,超细粉末较多,部分粉末之间存在粘连。从两种方法制备的粉末对比来看,SS-PREP法制备EP741NP合金粉末形貌明显优于AA法制备的粉末,AA法制备的EP741NP合金粉末颗粒表面的卫星粉会显著增加粉末颗粒之间的摩擦力,

导致粉末流动性变差。

图4为SS-PREP法和AA法制备的EP741NP合金粉末表面显微组织。可以发现,SS-PREP法制备的EP741NP合金粉末颗粒表面为典型的枝晶组织,颗粒表面洁净光滑;AA法制备的EP741NP合金粉末颗粒表面组织模糊,且表面存在一些附着物,导致组织形态不规则,难以分辨,此外粉末中还存在一些异常颗粒。图5是AA合金粉末中异常颗粒的SEM形貌,其种类主要有包覆粉、卫星粉、粘连粉及破碎粉4种。包覆粉(图5(a))是在规则的球形粉末外包裹了一层熔融金属;卫星粉(图5(b))是较大的粉末颗粒表面黏附了多个小尺寸的粉末颗粒;粘连粉(图5(c))是尺寸接近的多个粉末颗粒黏结在一起;破碎粉(图5(d))是粉末颗粒破裂形成的半圆形颗粒。由此可见,AA法制备的金属球形粉末颗粒形貌存在非规则球形的异常现象普遍存在。

AA粉末中的异常颗粒,主要是由于在高压氩气气流的冲击作用下,没有完全凝固的粉末颗粒之间发生相互撞击,或者粉末颗粒与雾化室壁发生撞击导致的。为

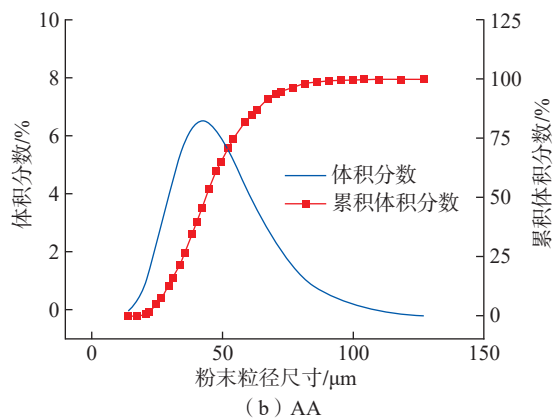
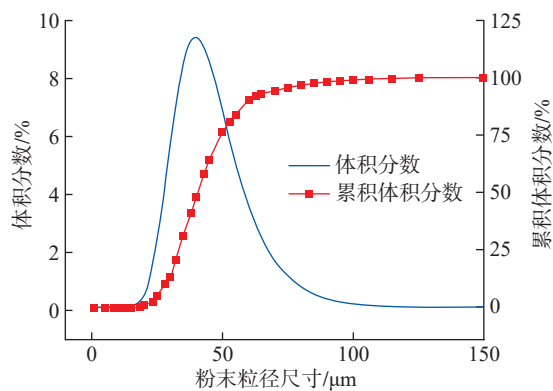


图2 两种方法制备EP741NP合金粉末粒径分布曲线

Fig.2 Particle size distribution curves of EP741NP alloy powders prepared by two processes

表2 AA与SS-PREP法制备的EP741NP合金粉末特性对比
Table 2 Comparison of characteristics of EP741NP alloy powders prepared by AA and SS-PREP processes

粉末性能	SS-PREP粉末	AA粉末
流动性/(s/50 g)	13.2	16.8
松装密度/(g/cm ³)	4.85	4.22
振实密度/(g/cm ³)	5.05	4.79
非球形颗粒比例/%	0.43	1.93

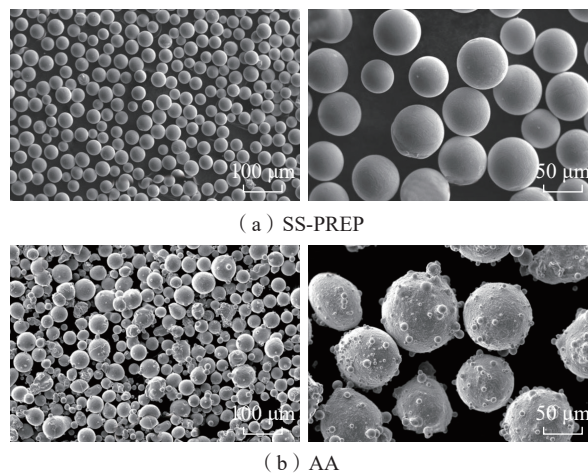


图3 SS-PREP与AA法制备的EP741NP合金粉末的SEM形貌
Fig.3 SEM morphologies of EP741NP alloy powders prepared by SS-PREP and AA processes

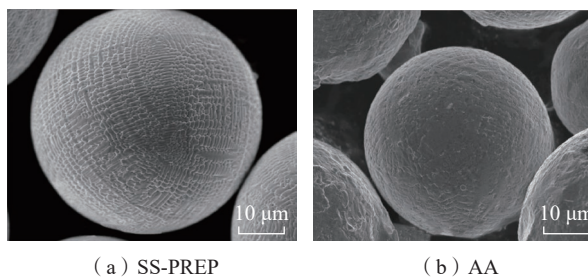


图4 SS-PREP与AA法制备的EP741NP合金粉末的表面显微组织
Fig.4 Surface microstructure of EP741NP alloy powders prepared by SS-PREP and AA processes

了减少卫星粉的形成,可以通过调整工艺参数来优化雾化过程。例如,降低雾化气体温度的同时提高其压力可以加快液滴的冷却速度,使得粉末在相互碰撞之前就已经冷却并凝固成具有一定强度的固态粉末颗粒,从而减少在碰撞过程中的变形和粘连,进而有效抑制卫星粉形成。通过这种方式,可以改善粉末的球形度、流动性和松装密度,提高粉末的整体质量。

2.3 不同制粉工艺对空心粉含量及其组织的影响

图6为AA法制备的粉末样品经过镶样、磨样、抛光、腐蚀后的金相组织图。可以看出,AA粉末内部组织以长大的胞状晶组织为主,局部区域存在枝状晶组织,且粉末中不仅空心粉占比较高,还存在个别组织异常的颗粒。图7是AA法制备的EP741NP合金异常粉末颗粒的高倍SEM组织。可以看出,粉末颗粒组织以胞状晶为主,局部有少量枝晶,空心粉内部的孔洞为近球形,内部被完全封闭,孔洞内表面并非光滑表面,呈棉絮状且形状不规则。Zhong等^[21]通过Micro-CT对两种粉末进行检测,发现AA粉末的空心粉比例随着粉末粒度的减小而降低,并且AA粉末中空心粉的比例远高于PREP粉末。

在AA法制备的金属球形粉末之中,空心粉是很常见的一类缺陷粉末,其形成原因是气体在雾化破碎金属液流的过程中被液滴包裹所致^[22]。结合AA法工艺特点和空心粉的形貌特征,Rabin等^[23]提出了液滴的袋式破碎机制,并通过该机制解释了空心粉的产生机理,如图8所示。在AA法制粉过程中,由于高压气体会把熔融液流吹喷成大量细小的金属液滴,在此过程中如果袋状液膜没有完全破碎,气体就会被包裹进液滴之中,袋

状液膜完全闭合后,气体封闭在粉末内部,后续的粉末除气工艺也无法将气体抽出,从而在合金中形成TIP。由此可见,空心粉含量高是AA法制粉工艺的固有缺陷,只能通过调控熔体过热度、雾化气体压力等工艺参数,促使液膜尽可能充分破碎,从而在一定程度上降低

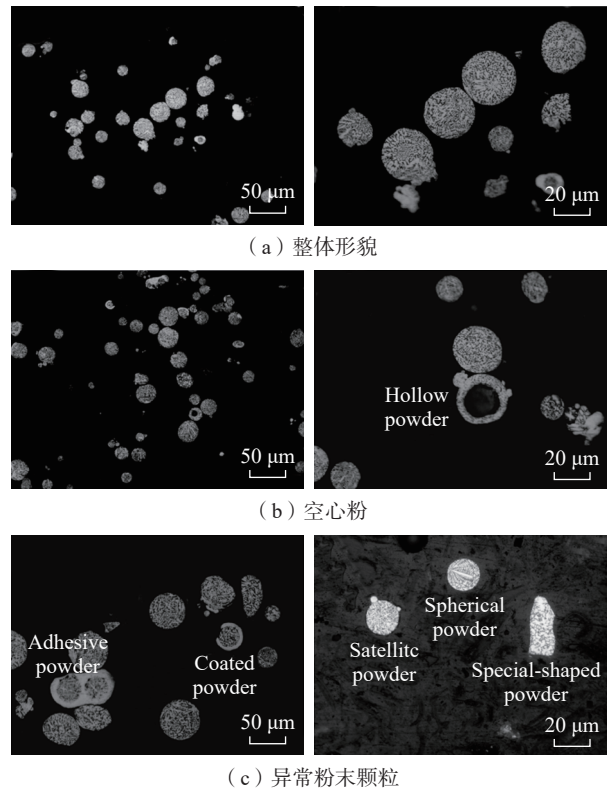


图6 AA法制备的EP741NP合金粉末的显微组织
Fig.6 Microstructures of EP741NP alloy powder prepared by AA process

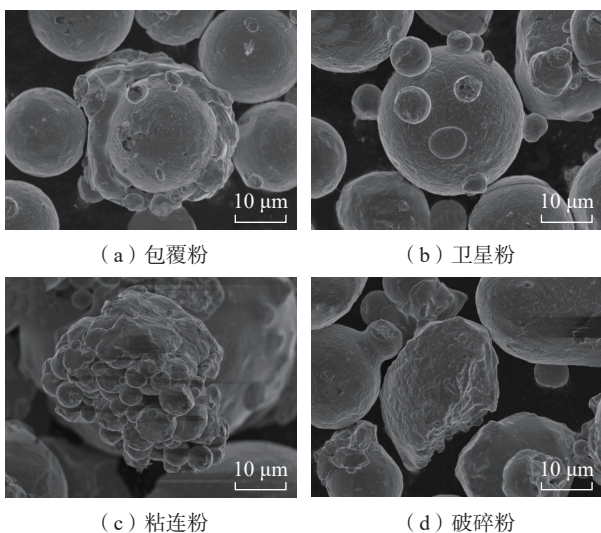


图5 AA法制备的EP741NP合金粉末中的异常颗粒及其SEM形貌
Fig.5 SEM morphologies of abnormal particles in EP741NP alloy powder prepared by AA process

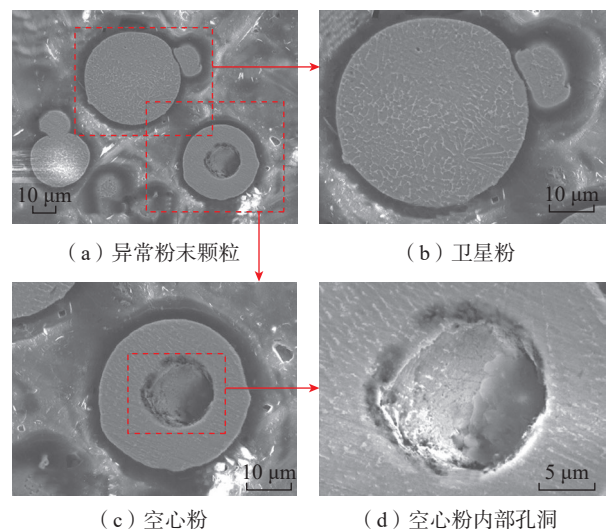


图7 AA法制备的EP741NP合金粉末内部孔洞的SEM形貌
Fig.7 SEM morphologies of internal pores in EP741NP alloy powder prepared by AA process

空心粉的占比。

SS-PREP 粉末样品经过镶样、磨样、抛光、腐蚀后,粉末颗粒显微组织如图 9 所示。从图 9 (a) 中可以发现,粉末中基本没有异形粉的存在。SS-PREP 法利用等离子电弧熔化金属电极,金属熔滴在离心力的作用下进入雾化塔,同时金属熔滴在表面能的作用下完成球化,快速凝固后形成球形粉末^[24-26]。快速凝固技术可使脱离熔池飞出的熔融金属液滴快速冷却,冷却速度达到 10^{-5} K/s 以上。快速凝固的优势:(1) 实现快速冷却,降低粉末颗粒微观偏析;(2) 改善颗粒内部组织,增加胞晶组织含量,减少枝晶组织;(3) 控制颗粒形貌,避免颗粒在未完全冷却情况下撞击炉壁产生塑性变形或缺陷。在 SS-PREP 制粉过程中,没有高压高速的气体直接与液流接触,粉末液滴受离心力飞出的速度基本相同,且与粒径大小无关,所以液滴在飞行过程中不会发生碰撞而形成黏结,因此粉末的球形度高。图 9 (b) 为粉末高倍 SEM 组织,粉末颗粒中主要为典型的枝晶组织。在球形粉末中,局部凝固组织具有一定的方向性,规则排列,通常由颗粒边缘向颗粒内部方向分布。

2.4 EP741NP 合金的拉伸性能

采用 SS-PREP 和 AA 两种不同方法制备的 EP741NP 合金粉末 HIP 及固溶 + 二级时效热处理后的多批次试样,在室温、650 °C、750 °C 条件下的拉伸性能结果如图 10 所示。采用 SS-PREP 粉末制备 EP741NP 合金的室

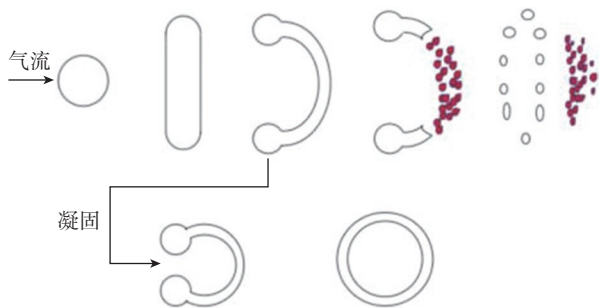
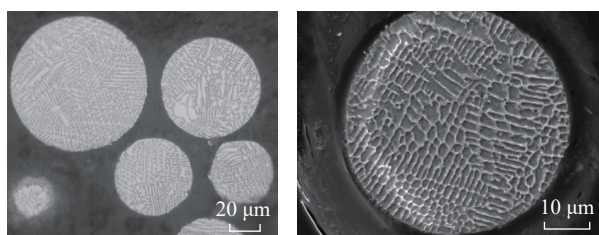


图 8 袋式破碎机制及空心粉形成机理^[23]

Fig.8 Mechanism of bag-type film breakup and formation of hollow powder^[23]



(a) 整体形貌

(b) 高倍组织

图 9 SS-PREP 粉末的微观组织

Fig.9 Microstructures of SS-PREP powder

温拉伸强度优于 AA 粉末,抗拉强度分别为 1472 MPa 和 1394 MPa,相差 78 MPa。AA 粉末制备的 EP741NP 合金在室温和 650 °C 下延伸率高于 SS-PREP 粉末合金。EP741NP 合金在 650 °C 和 750 °C 拉伸强度表现出相同的规律,SS-PREP 法粉末制备 EP741NP 合金室温强度均优于 AA 法粉末合金,750 °C 下两者的延伸率接近,表明合金室温强度与所选粉末制粉工艺之间具有一定相关性。

对比分析图 10 可发现,室温时,SS-PREP 粉末合金、AA 粉末合金的抗拉强度和屈服强度分别相差 78 MPa 和 110 MPa;高温 650 °C 时,两者的抗拉强度和屈服强度分别相差 72 MPa 和 128 MPa;高温 750 °C 时,

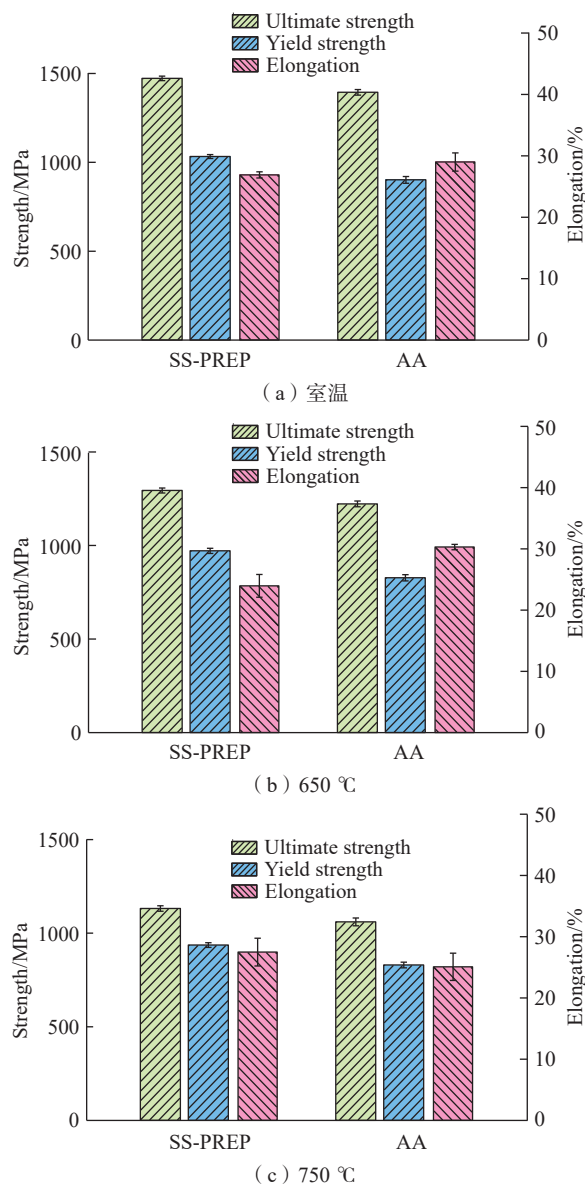


图 10 SS-PREP 粉末和 AA 粉末制备的 EP741NP 合金在不同温度下的拉伸性能

Fig.10 Tensile properties of EP741NP alloy powders prepared by SS-PREP and AA at different temperatures

两者的抗拉强度和屈服强度分别相差 71 MPa 和 106 MPa。综上所述, SS-PREP 和 AA 两种不同方法制备的 EP741NP 合金拉伸性能均表现出相同的规律, 即 SS-PREP 粉末拉伸强度优于 AA 粉末, 但是对 EP741NP 合金拉伸塑性性能影响不大。

3 结论

EP741NP 合金中存在大量的固溶强化元素, 为避免重合金化导致严重的偏析并降低其热加工难度, 本文基于快速凝固的技术原理和优势, 通过快速冷却方法降低粉末颗粒微观偏析, 改善颗粒内部组织, 增加胞晶组织含量并减少枝晶组织, 控制颗粒形貌, 避免颗粒在未完全冷却情况下撞击炉壁产生塑性变形或缺陷。对比研究 SS-PREP 和 AA 两种粉体制备工艺, 主要结论如下。

(1) 与 AA 法制备的 EP741NP 合金粉末相比, SS-PREP 合金粉末具有更优的物理性能, 粉末颗粒形貌更加规则, 空心粉和异形粉含量更低。

(2) SS-PREP 法制备的 EP741NP 合金粉末颗粒表面为典型的枝晶组织颗粒表面光洁。AA 法制备的 EP741NP 合金粉末颗粒表面组织不清晰, 且表面存在黏附物, 组织形态不规则。

(3) 相比于 SS-PREP 法制备的粉末, AA 法制备的 EP741NP 合金粉末中存在较多空心粉颗粒以及个别组织异常粉末, 其空心粉的孔洞在粉末内部被完全封闭, 孔洞内部并非光滑表面, 呈棉絮状且形状不规则。

(4) SS-PREP 粉末制备的 EP741NP 合金拉伸性能普遍优于 AA 粉末合金。在室温、650 °C 和 750 °C 测试温度条件下, SS-PREP 和 AA 两种不同方法制备的 EP741NP 合金拉伸性能均表现出相同的规律, 即 SS-PREP 粉末合金的拉伸强度和屈服强度均优于 AA 粉末合金。

参考文献

[1] SHARMA A D, SHARMA A K, THAKUR N. Crystallographic, microstructural, and mechanical characterization of dynamically processed EP741NP superalloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(4): 2479–2486.

[2] BEHERA S, DASH M K, KUMAR N K, et al. Microstructure and high-temperature tensile behavior of Ni-based superalloy EP741NP for aerospace applications[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(8): 5834–5844.

[3] BASKOV F A, SENTRYURINA Z A, LOGACHEV I A, et al. Structure and properties of EP741NP heat-resistant nickel alloy produced by selective laser melting[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2021, 62(3): 302–310.

[4] BASKOV F A, SENTRYURINA Z A, KAPLANSKII Y Y, et al. The influence of post heat treatments on the evolution of microstructure and mechanical properties of EP741NP nickel alloy produced by laser

powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 817: 141340.

[5] SENTRYURINA Z A, BASKOV F A, LOGINOV P A, et al. The effect of hot isostatic pressing and heat treatment on the microstructure and properties of EP741NP nickel alloy manufactured by laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101629.

[6] QU Z H, ZHANG P X, LIANG S J, et al. Flow behavior and dynamic recrystallization of hot isostatically pressed EP741NP superalloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 2112–2124.

[7] WU H Y, ZHUANG X L, NIE Y, et al. Effect of heat treatment on mechanical property and microstructure of a powder metallurgy nickel-based superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 754: 29–37.

[8] CHANG L T, SUN W R, CUI Y Y, et al. Preparation of hot-isostatic-pressed powder metallurgy superalloy Inconel 718 free of prior particle boundaries[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 682: 341–344.

[9] LIN J B Q. Review and analysis of powder prior boundary (PPB) formation in powder metallurgy processes for nickel-based super alloys[J]. Journal of Powder Metallurgy & Mining, 2015, 4(1): 129–136.

[10] 陈喜, 王小宇, 刘奇, 等. 镍基高温合金球形粉末制备发展现状[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(2): 96–100.

CHEN Xi, WANG Xiaoyu, LIU Qi, et al. Development status of the preparation of nickel-based superalloy spherical powder[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(2): 96–100.

[11] 吴文恒, 王涛, 范珂. 增材制造用球形金属粉末主要制备技术的研究进展[J]. 机械工程材料, 2021, 45(11): 76–83.

WU Wenheng, WANG Tao, FAN Ding. Research progress on main preparation technologies of spherical metal powder for additive manufacturing[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(11): 76–83.

[12] 张康, 杨博文, 秦立东, 等. 金属增材制造用粉末制备技术研究进展[J]. 金属加工(热加工), 2023(3): 24–31.

ZHANG Kang, YANG Bowen, QIN Lidong, et al. Research progress of powder preparation technology for metal additive manufacturing[J]. MW Metal Forming, 2023(3): 24–31.

[13] 王庆相, 朱振, 李鑫, 等. 制粉方法对Inconel718合金粉末组织和性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2023, 33(1): 31–38.

WANG Qingxiang, ZHU Zhen, LI Xin, et al. Effect of powder preparing method on microstructure and performance of Inconel718 alloy powder[J]. Powder Metallurgy Industry, 2023, 33(1): 31–38.

[14] 王华, 白瑞敏, 周晓明, 等. PREP法和AA法制取Inconel 718粉末对比分析[J]. 中国新技术新产品, 2019(19): 1–4.

WANG Hua, BAI Ruimin, ZHOU Xiaoming, et al. Comparative analysis of Inconel 718 powder prepared by PREP method and AA method[J]. New Technology & New Products of China, 2019(19): 1–4.

[15] 关书文, 刘世昌, 时坚, 等. 雾化制备金属粉末的研究进展及展望[J]. 铸造, 2022, 71(2): 136–142.

GUAN Shuwen, LIU Shichang, SHI Jian, et al. Research progress and prospect of metal powder preparation by gas atomization[J]. Foundry, 2022, 71(2): 136–142.

[16] 侯维强, 孟杰, 梁静静, 等. 增材制造用高温合金粉末制备技术及研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(2): 131–138, 144.

HOU Weiqiang, MENG Jie, LIANG Jingjing, et al. Preparation technology and research progress of superalloy powders used for additive

manufacturing[J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(2): 131–138, 144.

[17] 杨启云, 许炯恺, 吴凯琦, 等. 选区激光熔化成形用GH4169合金粉末的性能[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(3): 9–13.

YANG Qiyun, XU Jiongkai, WU Kaiqi, et al. Characteristic of GH4169 alloy powder used in selective laser melting[J]. Powder Metallurgy Industry, 2020, 30(3): 9–13.

[18] 尹燕, 赵超, 潘存良, 等. 气体流量对射频等离子体球化GH4169合金粉末的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(11): 100–105, 165.

YIN Yan, ZHAO Chao, PAN Cunliang, et al. Effect of gas flow rate on the characteristics of RF plasma spheroidized GH4169 alloy powder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(11): 100–105, 165.

[19] YANG L B, REN X N, XIA M, et al. Analysis of porosities in nickel-based superalloys powders[J]. Materials Science Forum, 2020, 993: 327–332.

[20] DROKONOV D A, ZADYKYAN G G, KORSMIK R S. Investigation of the influence of nickel-based alloy powder EP648, obtained by plasma rotating electrode process, on powder utilization rate, structure and chemical composition, applied to direct laser deposition[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1109(1): 012058.

[21] ZHONG C L, CHEN J, LINNENBRINK S, et al. A comparative study of Inconel 718 formed by high deposition rate laser metal deposition

with GA powder and PREP powder[J]. Materials & Design, 2016, 107: 386–392.

[22] 黎兴刚, 刘畅, 朱强. 面向金属增材制造的气体雾化制粉技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(22): 22–34.

LI Xinggang, LIU Chang, ZHU Qiang. Research progress on gas atomization technology for preparation of feedstock powder used in metal additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(22): 22–34.

[23] RABIN B H, SMOLIK G R, KORTH G E. Characterization of entrapped gases in rapidly solidified powders[J]. Materials Science and Engineering: A, 1990, 124(1): 1–7.

[24] GUO R P, XU L, ZONG B Y, et al. Characterization of prealloyed Ti–6Al–4V powders from EIGA and PREP process and mechanical properties of HIPed powder compacts[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017, 30(8): 735–744.

[25] LIU Y, ZHAO X H, LAI Y J, et al. A brief introduction to the selective laser melting of Ti6Al4V powders by supreme-speed plasma rotating electrode process[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2020, 30(1): 94–99.

[26] LIU Y, LIANG S J, HAN Z Y, et al. A novel model of calculating particle sizes in plasma rotating electrode process for superalloys[J]. Powder Technology, 2018, 336: 406–414.

(责编 七七)