DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5044

特邀论文

金属球形粉末制备技术研究进展

李少强,孙健豪,赖运金,左振博,董立阳,王永哲,唐洪奎,张艺丫,瞿宗宏
(西安欧中材料科技股份有限公司,陕西 西安 710018)

摘　要:粉末冶金及增材制造作为近净成形技术,与传统成形技术相比具有生产周期短、效率高、整体材料利用率高、迭代优化周期短等优势,在航空航天领域应用日益广泛。金属球形粉末作为其原材料,粉末性能和质量直接影响产品的性能及使用。文章主要介绍目前全球金属球形粉末主要生产商和商业化金属球形粉末制备技术的发展历程、制粉技术原理、粉末现状、面临的问题及发展趋势。

关键词:粉末冶金;增材制造;金属球形粉末;等离子旋转电极;气雾化

中图分类号:TF123.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)07-0626-19

Research Progress on the Preparation Technology of Spherical Metal Powder

LI Shaoqiang, SUN Jianhao, LAI Yunjin, ZUO Zhenbo, DONG Liyang, WANG Yongzhe, TANG Hongkui, ZHANG Yiya, QU Zonghong
(Xi'an Sino-Euro Materials Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Compared with traditional manufacturing technology, powder metallurgy and additive manufacturing have the advantages of a short production cycle, high efficiency, high overall material utilization and short iterative optimization cycle and are increasingly widely used in the aerospace field. As their raw material, the performance and quality of the powders directly affect the performance of the products. This article provides a comprehensive overview of the current major metal powder manufacturers worldwide, along with the historical evolution, fundamental principles of production technologies, current status, existing challenges, and future development trends in commercialized spherical metal powder preparation technologies.

Key words: powder metallurgy; additive manufacturing; spherical metal powders; plasma rotating electrode process; gas atomization

航空航天、军工、医疗、汽车等行业的飞速发展,对零件性能提出了更加严苛的要求,这一需求驱动直接促进了零件制造技术的快速革新。金属粉末热等静压(hot isostatic pressing, HIP)、增材制造(3D 打印)等先进制造技术凭借自身独有的优势,近年来已成为学术界的研究热点,并在实际生产中得到广泛应用,有力推动了高端装备工业的发展[1-7]。

HIP 是一种将金属球形粉末封装于包套内并振实、抽真空、封焊,随后利用氩气作为传压介质,在高温下通过氩气对包套施加压力,使包套内粉末实现致密化,随后去除外部包套和内部型芯,获得最终零件。该制造技术成形零件高度致密、组织均匀、各向同性,力学性能可以达到甚至超过传统锻件,该技术与传统锻造技术相比具有材料利用率高、周期短、效率高等优势,被广泛应用于航空航天、军工等领域[8-12]。增材制造是一种快速成形技术,是以金属球形粉末为原材料,利用计算机三维模型,通过打印设备将材料逐渐累加的方法制造零件或产品,在工业领域,其主要应用形式包括直接激光沉积(direct laser deposition, DLD)、选择性激光熔化(selective laser melting, SLM)和电子束熔化(electron beam melting, EBM)。与传统制造技术相比,增材制造具有可

收稿日期:2025-03-21
基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3712004);陕西省企业院所联合重点专项(2023-LL-QY-44)
作者简介:李少强,1979 年生,博士,教授级高级工程师. 主要从事金属粉末材料及粉末冶金方面的工作. Email: sqli_wst@163.com
通信作者:赖运金,1979 年生,博士,教授级高级工程师. 主要从事金属粉末材料及粉末冶金方面的工作. Email: 30149395@qq.com
引用格式:李少强,孙健豪,赖运金,左振博,董立阳,王永哲,唐洪奎,张艺丫,瞿宗宏. 金属球形粉末制备技术研究进展[J]. 铸造技术,2025, 46(7): 626-644.
LI S Q, SUN J H, LAI Y J, ZUO Z B, DONG L Y, WANG Y Z, TANG H K, ZHANG Y Y, QU Z H. Research progress on the preparation technology of spherical metal powder[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 626-644.

中国知网　https://www.cnki.net

以制造复杂内外部形状制件、生产周期短、效率高、迭代优化可以提高材料利用率等优势[13-19],近年来推动金属成形技术高速发展,掀起了全球范围内“3D打印”的热潮。

金属球形粉末作为关键原材料,其球形度、空心粉率、振实密度、粒度分布等性能指标直接决定了成形质量。在热等静压工艺中,粉末良好的流动性和较高的振实密度有助于装粉更加均匀,从而减少热等静压收缩不一致的问题。同时较低的空心粉率能够避免高压处理时残留气体形成封闭孔隙,保障材料在高温高压下实现充分致密化,进而提升材料的抗疲劳性能。在增材制造过程中,流动性好、粒度分布集中的球形粉末能够保证铺粉厚度的均匀性,减少熔池的波动,从而降低零件表面粗糙度和内部孔隙,这样既能提高尺寸精度,又能确保力学性能的稳定性,因此高品质金属球形粉末的制备成为近年来业内研究的重点[20-22]。根据粉末制备原理的不同,目前市场上已经广泛应用的金属球形粉末制备技术主要包括等离子旋转电极雾化(plasma rotating electrode process, PREP)、等离子丝材雾化(plasma wire atomization, PA)、气雾化(gas atomization, GA)、等离子球化 (plasma spheroidization, PS)等。本文系统论述了全球金属粉末主要生产商的发展现状,并针对上述4种粉末制备技术,从发展历程、雾化机理、工艺参数对粉末性能的影响等方面展开分析,同时根据市场需求对其发展前景进行展望。

1　全球金属球形粉末主要生产商

根据PMR公司的分析,在新能源汽车、光伏、储能及航空航天等领域的驱动下,金属粉末的需求预计将在2022~2032年间呈现快速增长态势。其中,增材制造技术有望成为未来最具市场潜力和增长速度最高的制造工艺。BCC Research的数据显示,全球增材制造粉末冶金市场规模在2022年预计为4.119亿美元,到2027年有望突破11亿美元,复合年增长率达到22.6%。随着市场需求的持续攀升,各类合金粉末的出货量不断增加,这促使增材制造用金属粉末供应商不断优化生产技术并实现技术突破。这一发展趋势对材料价值链产生了积极影响,推动了规模经济效应的提升,降低了成本,并促使产品质量持续改进。表1列出了2021年全球主要增材制造金属粉末生产商的相关信息[23],其供应的合金类别覆盖钛合金、镍基高温合金、钴基合金、钢等,制粉技术以GA和PREP为主。

2　金属球形粉末制备技术研究进展

2.1　等离子旋转电极雾化制粉技术研究进展

2.1.1　等离子旋转电极制粉技术原理

等离子旋转电极雾化制粉技术是一种利用离心雾化过程的金属球形粉末制备技术,由等离子枪对高速旋转原材料电极棒加热并熔化,在离心力的作用下破碎成小尺寸的金属液滴,在表面张力作用下球化,冷却后形成金属球形粉末[24-27],根据等离子弧

表1 2021年全球金属球形粉末主要生产商[23]

Tab.1 Major producers of metal spherical powders in the world in 2021[23]

Company	Country	Alloy	Powder preparation technology	Capacity (t/year)
Sandvik	Sweden	Superalloy, tool steel, stainless steel	GA	3000
Carpenter Technology	United States	Tool steel, stainless steel	GA	3000
GKN	Transnational	Iron-based alloys, titanium alloy	Water atomization (WA)、GA	2000
AP&C	Canada	Titanium alloy	PA	100
LPW Technology	United Kingdom	Nickel-based, cobalt-based, copper-based alloys, etc	GA	1000
BIAM	China	Superalloy, tool steel, stainless steel, etc	GA、PA	About 450
SMT(Sino-Euro)	China	Titanium alloy, superalloy, tool steel, stainless steel, refractory alloys, etc	PREP(SS-PREP)	400
VAM	China	Titanium alloy, superalloy	GA	About 300
FALCONTECH	China	Titanium alloy	GA	About 60
AVIMETALAM	China	Titanium alloy, superalloy, CoCrW alloy	GA、PA、PREP	800
SRIM	China	Titanium alloy, superalloy, tool steel, Stainless steel	GA	-
GRIPM	China	Titanium alloy, aluminium alloy, superalloy, copper-based alloys	GA、WA	500

中国知网 https://www.cnki.net

的形式，等离子旋转电极工艺可分为转移弧和非转移弧两种[28]。预合金棒在转移弧工艺中作为电极，在非转移弧中不作电极，其原理如图 1 所示[29-30]。

转移弧与非转移弧等离子旋转电极雾化均属于离心雾化，主要有 3 种雾化破碎模型，分别为直接液滴形成机制(direct drop formation, DDF)，液线分离机制(ligament disintegration, LD)和液膜破碎机制(film disintegration, FD)，如图 2 所示[31]。这 3 种雾化破碎机制的转变可由无量纲数 H_i 值判定。

$$H_i=\frac{\mu^{0.17}Q\rho^{0.71}\omega^{0.60}}{\gamma^{0.88}D^{0.68}} \tag{1}$$

式中，μ 为液态金属黏度，m^2/s；Q 为熔化速率，m^3/s；ρ 为金属密度，kg/m^3；ω 为电极旋转角速度，rad/s；γ 代表熔液表面张力，N/m；D 为电极棒直径，m；当 $H_i<0.07$ 时，其主要机制为 DDF，当 $1.33>H_i>0.07$ 时，主要为 LD 机制，当 $H_i>1.33$ 时，主要破碎机制为 FD。根据目前等离子旋转电极制粉技术工艺参数选用情况，主要雾化破碎机制为 DDF 或 LD 和 FD 的混合机制。

对于 DDF 机制，金属液滴直接从液膜中分离出，在惰性气体中冷却，由于表面张力的作用球化成金属球形粉末，仅考虑到表面张力与离心力的作用，该机制下粉末粒径可由式(2)表征，其中 η 为修正因数(约为 1)[32-33]。

$$d_{DDF}=\frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{12\eta\gamma}{\rho D}} \tag{2}$$

考虑到实际金属液自身黏度的作用，对于一般低黏度的金属液滴，其平均粒径可通过 Kamyia 和 Kayano 定律计算[34-35]：

$$d_{LD}=2.0D\sqrt{\frac{\gamma}{\rho\omega^2D^3}} \tag{3}$$

对于行业内使用较为广泛的钛合金，其雾化破碎模型主要以 DDF 为主，而对于高温合金和铁基合金，则主要以 LD 与 FD 混合机制为主。

PREP 是一种非坩埚制粉工艺，可有效减少金属与坩埚反应产生杂质。与 GA 相比，PREP 粉末表现出极少的气体流动缺陷，如气孔或内部孔。总体而言，PREP 制粉技术生产的粉末具有球形度高、氧增量小、夹杂物含量低、空心粉率低、粉末粒度可调节等优点[36]，可用于制备钛合金、高温合金、铁基合金等各类金属球形粉末，等离子旋转电极粉末典型性能如表 2 所示。

2.1.2 等离子旋转电极制粉设备发展历程

转移弧型等离子旋转电极雾化制粉技术最早发源于美国[37]，20 世纪 80 年代我国启动该技术的相关研究工作，同一时期，西北有色金属研究院成功开发出国内首台转移弧型等离子旋转电极制粉设备[30]。21 世纪初，受市场需求快速增长的驱动，宝鸡海宝、陕

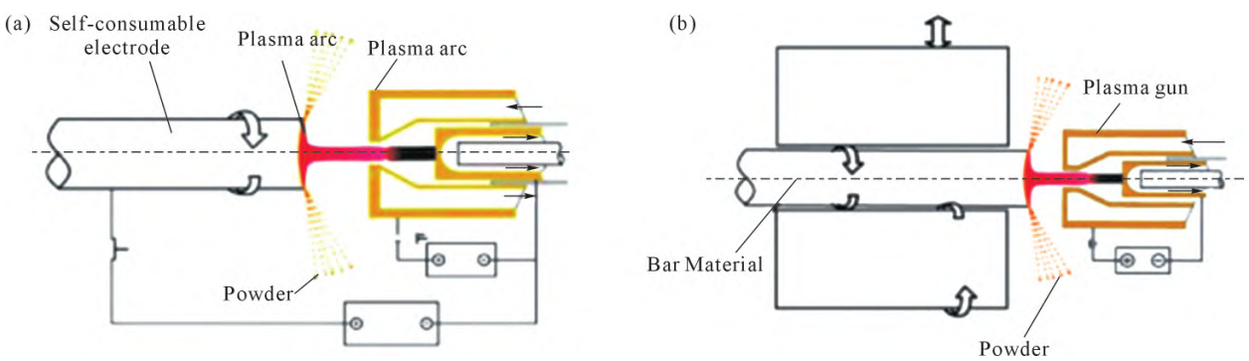

图 1 等离子旋转电极雾化制粉原理：(a) 转移弧；(b) 非转移弧[29-30]

Fig.1 PREP atomization principles: (a) transfer arcs; (b) nontransfer arcs[29-30]

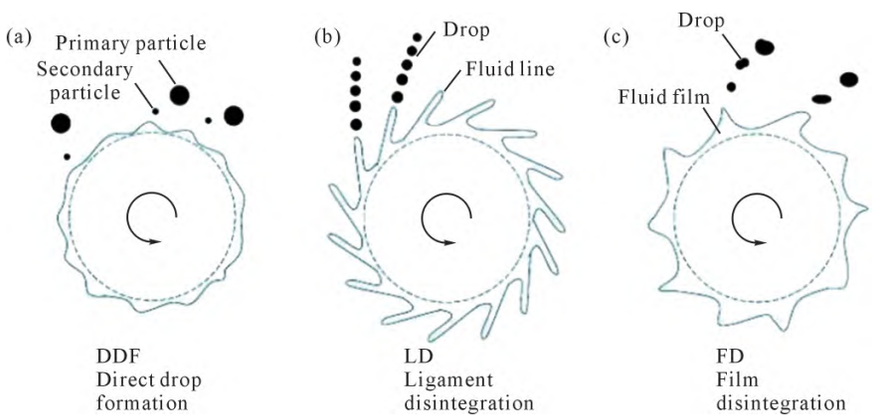

图 2 3 种典型离心雾化机制：(a) 直接液滴形成；(b) 液线分离；(c) 液膜破碎[31]

Fig.2 Three typical centrifugal atomization mechanisms: (a) direct drop formation; (b) ligament disintegration; (c) film disintegration[31]

中国知网 https://www.cnki.net

表 2 等离子旋转电极粉末典型性能
Tab.2 Typical properties of the PREP powders

Alloy	Powder size/μm	Flow ability /(s/50 g)	Tap density /(g·cm^{-3})	Laser particle size distribution/μm			Sieve particle size	Sphericity
				D10	D50	D90		
Ti6Al4V (TC4)	15~53	＜38	2.4~2.6	26~30	35~46	58~65	-53: 98% +53: 2%	≥0.95
	53~150	＜35	2.5~2.7	55~58	82~90	105~115	-53: 2% 53-106: 96% +106: 2%	≥0.95
Inconel 718 (GH4169)	15~53	＜13	4.6~4.8	18~25	30~40	≤55	-53: 98% +53: 2%	≥0.99
	53~106	＜12.6	4.7~4.9	55~58	86~92	105~130	-53: 2% 53-106: 96% +106: 2%	≥0.99
18Ni300	15~53	＜13	4.5~4.7	26~30	35~46	50~65	-53: 98% +53: 2%	≥0.99
	53~106	＜12.6	4.6~4.8	55~58	86~92	105~130	-53: 2% 53-106: 96% +106: 2%	≥0.99

西宇光飞利、陕西维克德公司相继引进转移弧型等离子旋转电极设备,开始生产金属球形粉末。

非转移弧型等离子旋转电极雾化制粉技术起源于俄罗斯和乌克兰,表现出强劲的发展势头,其主要研究单位包括全俄轻金属研究院、乌克兰巴顿焊接研究所等[38]。俄罗斯第 I 代等离子旋转电极制粉设备的等离子枪功率可达 100 kW,对于直径 50 mm 的预合金棒,其转速最高可达 15 000 r/min。20 世纪 90 年代,北京钢铁研究总院引进了俄罗斯非转移弧型等离子旋转电极制粉设备,主要用于生产高温合金盘件所用的原材料粉末,同期,郑州机械研究院与北京钢铁研究总院合作,对非转移弧型等离子旋转电极设备进行开发并改进[30,38]。由于转移弧工艺需要单根加料,而非转移弧工艺可以通过加料仓一次性添加数十根棒料,并在一次充入惰性气体后密闭连续生产,因此非转移弧工艺通常具有更低的氧增量和更高的生产效率。

2010 年后,西安欧中材料科技股份有限公司(简称欧中科技)通过“引进–消化吸收–再创新”,率先建立了国内首条超高转速等离子旋转电极(SS-PREP®)制粉生产线(非转移弧),如图 3 所示。该生产线实现了棒料工作转速 ~40 000 r/min 稳定生产,整体生产能力可以达到 20~100 kg/h。同时欧中科技已开发涵盖钛合金、高温合金、铁基合金、钴基合金、钛铝系金属间化合物、难熔金属等 100 多个牌号的球形金属粉末,在航空航天、医疗、汽车等领域得到广泛应用。

图 3 国产超高转速等离子旋转电极(SS-PREP®)制粉设备(SMT)
Fig.3 Domestic ultrahigh-speed plasma rotating electrode (SS-PREP®) equipment for the SMT

历经长期技术攻关与工程实践,欧中科技成功实现等离子旋转电极制粉设备核心零部件的全国产化研制,具有自主设计制造等离子旋转电极制粉设备能力。该团队研发的新一代制粉装备在关键技术指标上实现棒料旋转速度 40 000 r/min,雾化室直径拓展至 3 500 mm,配套电源功率 300 kW;通过加料仓扩容优化设计,单炉粉末产出量最高可达 2 t。目前该装备体系年产能 1 500 t,其技术参数与产业化能力均处于国内金属增材制造粉末领域的领先水平。

2.1.3 等离子旋转电极雾化粉末研究现状

随着等离子旋转电极制粉设备不断优化、能力快速提升,众多学者及相关研究单位对该技术的研

中国知网 https://www.cnki.net

究不断深入，促进等离子旋转电极制粉技术发展，成为商业化高品质金属球形粉末制备技术，该技术可以生产钛合金、高温合金、铁基合金、难熔金属等金属球形粉末。近年来，模拟仿真手段不断进步完善，被广泛应用于等离子旋转电极制粉过程的研究，对探究粉末快速凝固行为及特征并指导技术革新具有积极作用，如粉末粒度分布、粉末内缺陷的形成。Cui 等[39]利用流体动力学软件对等离子旋转电极制粉过程进行数值模拟，定量分析了制粉过程中温度场的变化，通过计算得到最高冷却速率下的转速，实际检测粉末验证了其模拟仿真的结果；同时将主成分分析法和蒙特卡罗方法结合分析了制粉过程中工艺参数与平均粉末粒度之间的关系，与实测粉末结果接近。Zhao 等[40]利用 Flow-3D 软件对等离子旋转电极的雾化过程进行模拟分析，熔炼过程中棒料熔化面凹陷越严重(弧坑越深)越有利于细粉的产生，同时研究了雾化过程中气流的变化对粉末粒径的影响：①气流影响熔体的流动促进粉末粒径的降低；②外部气流降低了熔体的温度，导致其粘度增加，不利于细粉的产生，主要取决于两者的主导作用。Nie 等[41]使用 Flow-3D 软件建立了 3D CTFD 模型，以Ti6Al4V 合金为研究对象，确定了不规则形状粉末是由于熔体雾化过程中液线或液带的产生导致，转速的提高增加了熔体的稳定性，降低液线、液带的产生速度，从而减小不规则粉末的产生。

根据雾化破碎理论和模拟仿真手段，等离子旋转电极制粉技术可以通过优化棒料转速、熔化速度等工艺参数实现降低生产过程中成本(提高目标段粉末收得率)、满足终端使用粉末技术要求(粒径、形貌等)的要求[42]。Nie 等[41]以 316 不锈钢、Co-Cr-Mo 和 Ti6Al4V 合金为研究对象，分析 3 种合金在不同转速下粉末粒径，结果表明，随转速的增加，粉末粒度明显减小，不同合金转速对其粒度的影响存在一定差异。Tang 等[43]研究了 Ti6Al4V 合金在不同转速下粉末的特性，结果显示，粉末的平均粒径随转速的增加而减小，粒度分布逐渐变小。Liu 等[44]研究了 Inconel 718 合金的等离子旋转电极制粉技术，随着熔化速率的提升，粉末的平均粒径减小，高的熔化速率导致更多的 LD 颗粒增加，使得粉末更细。Nie 等[41]通过 SEM、CT 三维重构检测技术对等离子旋转电极制备的粉末研究分析，明确了等离子旋转电极制粉技术的空心粉形成原因，一是熔化的金属液滴包裹等离子枪周围的冷却气体所致，二是分离出去的液滴在飞行过程中与冷却气体摩擦，在表面张力的作用下被拖入液滴所致；同时粒径较粗的粉末在表面张力下更容易形成空心粉。Chen 等[45]研究了气雾化法、等离子旋转电极法和等离子体雾化法制备的球形 Ti-6Al-4V 粉末的显微组织、孔隙率、氩气含量和孔隙结构，并进行了全面比较。结果表明，在 150 μm 以下，PREP 粉末的孔隙率和氩气含量最低，而 GA 粉末的孔隙率和氩气含量最高，且与 GA 粉末相比，PREP 粉末和 PA 粉末表现出相对较高的球形度，具体结果如图 4 和 5 所示[45]。

依托 SS-PREP® 工业化制备平台，相关团队针对金属球形粉末开展系统性研究。研究以俄系合金 EP741NP (FGH4097)工程化制备逐步拓展至Inconel 718、GH3536、GH4099、GH5188 等镍基高温合金，Ti6Al4V、Ti6Al4VELI、TA15、TiAl4822 等钛合金体系，17-4PH、18Ni300、316L 等铁基合金及部分难熔金属合金。典型粉末微观形貌如图 6 所示。Liu 等[44]研究了一种新的 PSD(粒度分布模型)，以 EP741NP 和 Inconel718 合金为研究对象，用于计算镍基高温合金粉末等离子旋转电极工艺的粉末产率，结果表明，等离子旋转电极生产的镍基高温合金粉末的网格划分数据与新型 PSD 模型的计算拟合较好，同时研究结果发现，旋转电极雾化过程中转速和熔速对细粉的产出率均有显著影响。Zuo 等[46]研究了 SS-PREP® Ti-48Al-3Nb-1.5Ta 粉末的特性和凝固行为，发现随着粒径的增加，粉末表面结构逐渐由无特征的光滑结构转变为树枝晶和胞枝晶形态；粉末颗粒表面碳化物厚度约为 5 nm，氧化层厚度约为 20 nm；粗粉颗粒由多个晶粒组成；不同粒度粉末均具有优异的球形度、流动性和低的空心粉率，采用 SS-PREP® 粉末通过热等静压成型制备的 Ti-48Al-3Nb-1.5Ta 合金表现出优异的力学性能和热暴露特性[47-49]。马宽等[50]通过对比 SS-PREP® 和气雾化两种制粉方法制备的 AISI 431 不锈钢粉末对高速熔覆层质量的影响，结果表明，SS-PREP® 粉末球形度优于气雾化粉末，相同成分、相同粒径范围的粉末，球形度越好，高速熔覆层表面平整度越好，厚度均匀性越好。

2.2 气雾化制粉技术

2.2.1 气雾化制粉技术原理

气雾化制粉技术是一种利用超高速气流将熔化的金属液破碎成不同尺寸的金属液滴，随后快速冷却形成金属粉末的制粉技术[51-53]。该技术是气体与金属液流之间的相互作用，雾化过程相对复杂，是一种二流雾化法，由金属液流剪切、一次雾化和二次雾化组成[54]。金属液流由导流管引出被高速气流剪切，形成金属液膜，经过一次雾化后呈现带状并碎化成液

中国知网 https://www.cnki.net

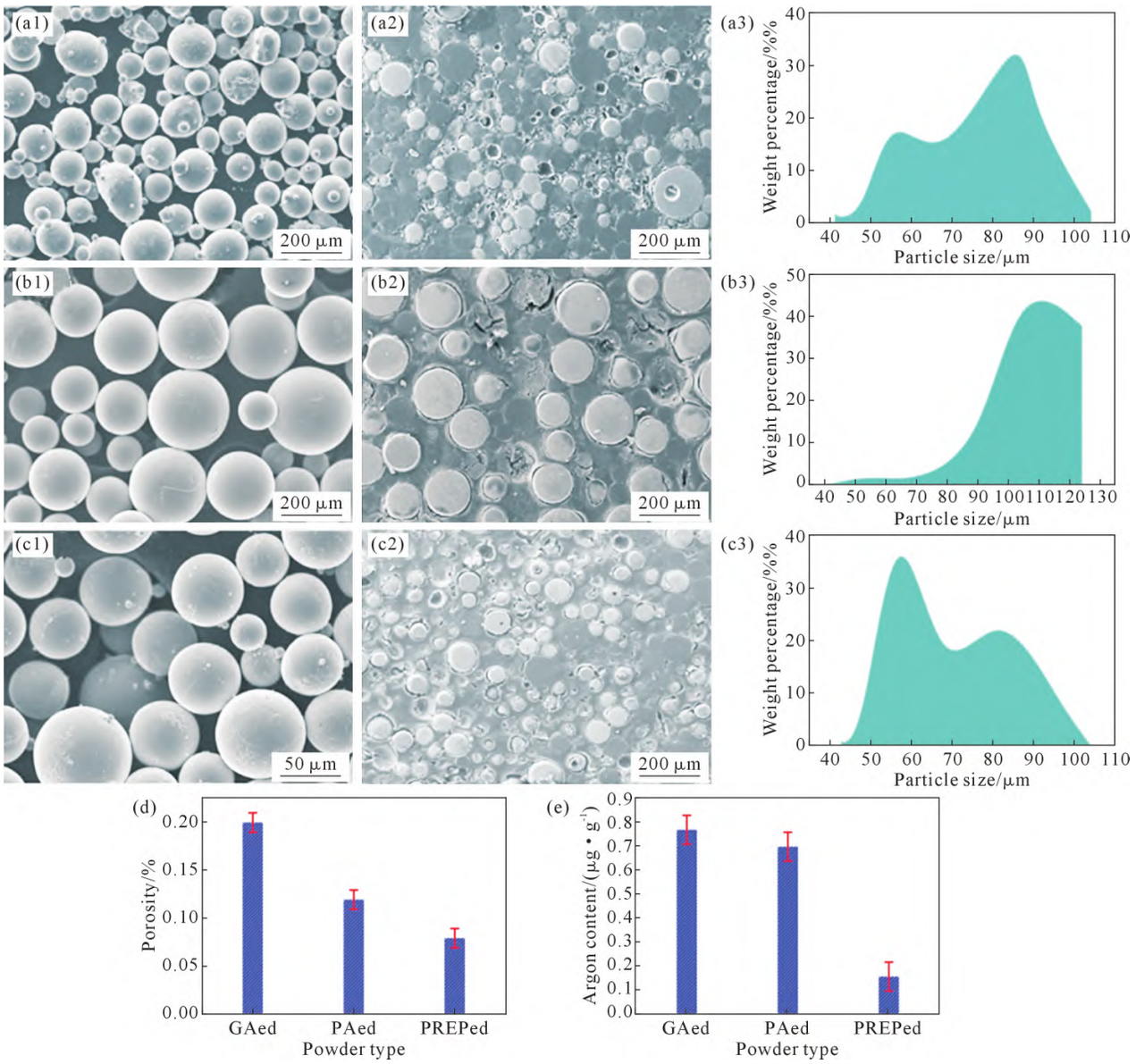

图 4　不同工艺制备 Ti6Al4V 粉末的微观组织与性能:(a1, b1, c1) GA、PREP 和 PA 制备的 Ti6Al4V 粉末表面微观组织;(a2, b2, c2) GA、PREP 和 PA 制备的 Ti6Al4V 粉末截面微观组织;(a3, b3, c3) GA、PREP 和 PA 制备的 Ti6Al4V 粉末粒度分布;(d, e) 粒径 150 μm 以下雾化粉末孔隙率和氩含量[45]

Fig.4　Microstructure and properties of Ti6Al4V powder prepared by different processes: (a1, b1, c1) microstructures of Ti6Al4V powders prepared by GA, PREP, and PA; (a2, b2, c2) cross-sectional microstructures of Ti6Al4V powders prepared by GA, PREP, and PA; (a3, b3, c3) particle size distributions of Ti6Al4V powders prepared by GA, PREP, and PA; (d, e) porosities and argon contents of atomized powders with particle sizes below 150 μm[45]

滴,其理论模型如图 7 所示[55]。一次雾化产生的液滴进入二次雾化区域进行二次雾化，分解出更细的粉末。二次雾化根据无量纲参数韦伯数 We 分为 3 种破碎模式,如图 8 所示[34]。随 We 数的增加,破碎模式依次为袋式破碎、袋式和蕊心式破碎、片式剥离式破碎。

由于气雾化过程的复杂性,目前针对全过程的系统性理论和计算模型较少。夏敏等[56]基于Fluent 软件,分别采用欧拉–欧拉 VOF 多相流方法与欧拉–拉格朗日 DPM 离散相方法实现了对自由落体式环缝喷嘴全雾化过程的模拟，并且设定与模拟一致的实验条件论证了模拟数据合理性，可指导实际生产过程中工艺参数的选择。

气雾化技术生产的粉末粒度较小，适合于激光选区熔化成形，目前已经成为 3D 打印用金属粉末最主要的制粉技术之一[57],气雾化粉末典型性能如表 3 所示。

2.2.2　气雾化制粉设备发展历程

气雾化制粉技术最早起源于 19 世纪 20 年代，最早被应用于制造有色金属粉末。直到 20 世纪 50年代，该技术才开始被广泛应用于金属及合金粉末的制备[58]。同期,制粉理论、制粉设备及工艺取得了一定

中国知网　https://www.cnki.net

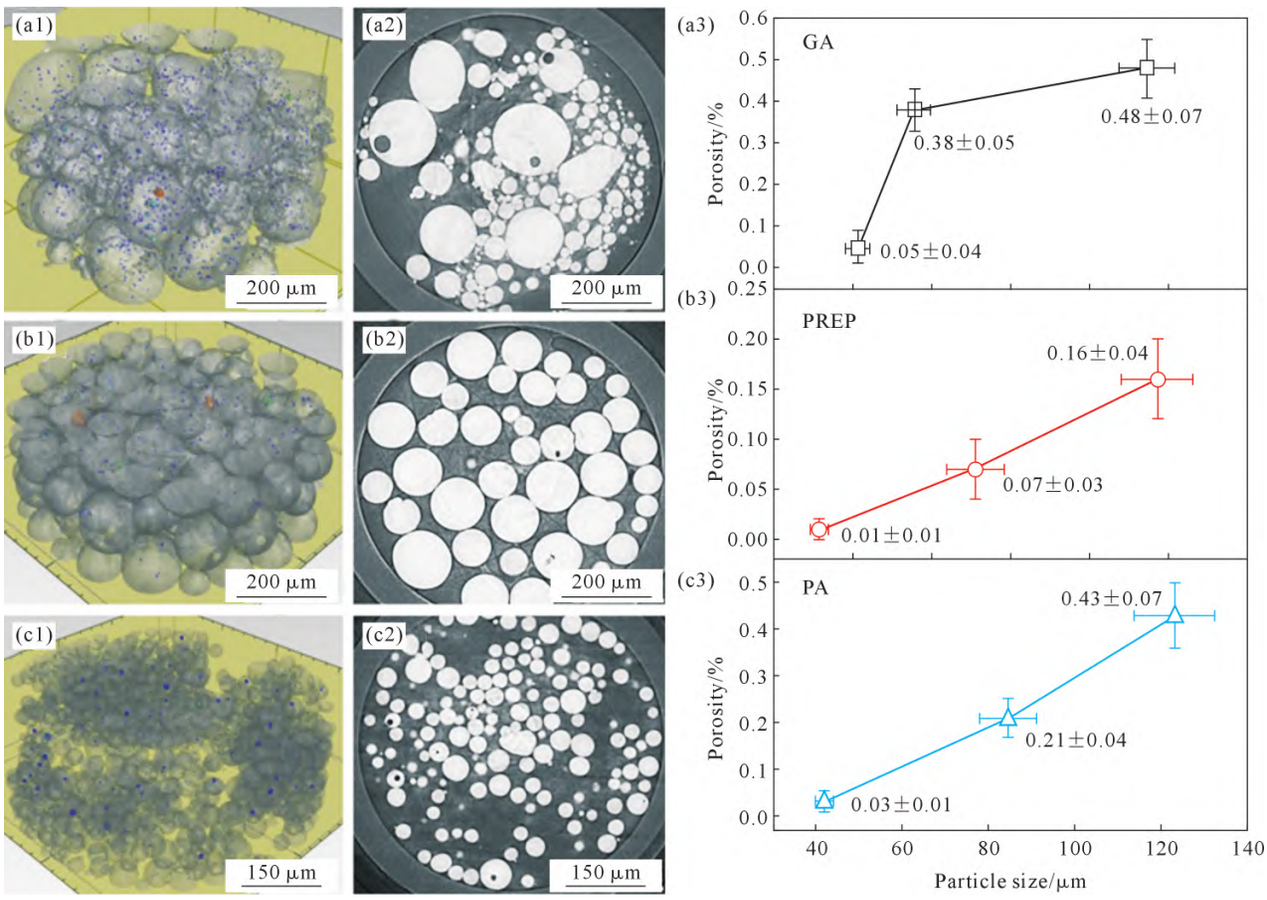

图 5 不同工艺制备 Ti6Al4V 粉末三维 CT 重建和截面形貌、粒径与孔隙率：(a1, a2) GA 制备粉末形貌；(b1, b2) PREP 制备粉末形貌；(c1, c2) PA 制备粉末形貌；(a3~c3) 粉末孔隙率与粒度关系[45]

Fig.5 Three-dimensional CT reconstruction and cross-sectional morphology, particle size and porosity of Ti6Al4V powders prepared via different processes: (a1, a2) morphology of powders prepared via GA, (b1, b2) morphology of powders prepared via PREP, (c1, c2) morphology of powders prepared via PA, (a3~c3) relationship between powder porosity and particle size on the basis of the data from the reconstructed CT scanning images[45]

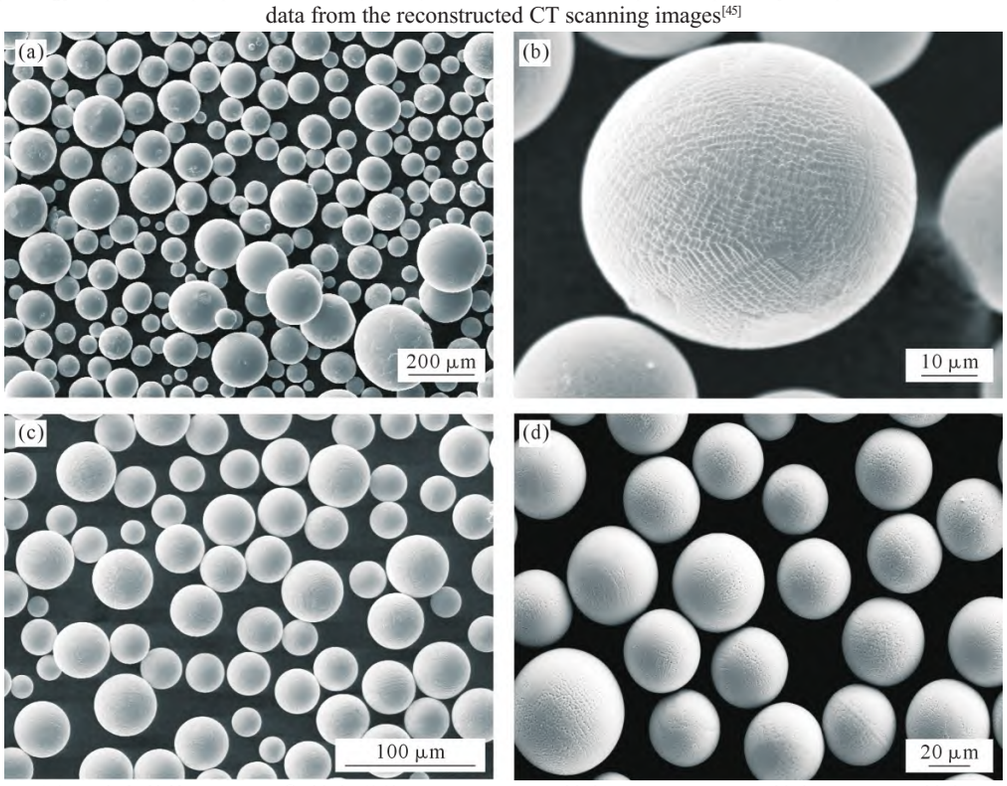

图 6 欧中科技 SS-PREP® 粉末形貌：(a, b) Ti6Al4V 粉末；(c) Inconel 718 粉末；(d) 316H 粉末

Fig.6 Morphology of SS-PREP® powder from Xi'an Sino-Euro Materials Technologies Co., Ltd.: (a, b) Ti6Al4V powder; (c) Inconel 718 powder; (d) 316H powder

中国知网 https://www.cnki.net

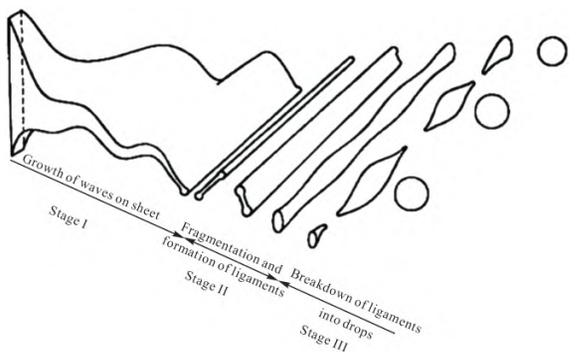

图 7 一次雾化金属液滴模型[55]
Fig.7 Model of a primary metal droplet[55]

的成果,促进了气雾化制粉技术的快速发展。气雾化制粉技术根据熔炼方式的不同可以分为真空感应气雾化(vacuum induction melting gas atomization, VIGA)和电极感应气雾化(electrode induction melting gas atomization, EIGA),原理如图 9 所示[58]。VIGA 技术因使用坩埚,在气雾化中,存在与坩埚和喷嘴材料相关的污染风险, 因为高熔点反应性材料会与陶瓷坩埚壁及喷嘴材料发生反应, 在所得粉末中可能会发现微量的非金属夹杂物[59],因此该技术不适用于纯净度较高合金粉末的生产。为避免坩埚对粉末质量的影响,主要由物理腐蚀和化学溶解引起,无坩埚的 EIGA 制粉应运而生, 该技术是将金属棒通过感应线圈进行熔化并雾化成粉末,避免了坩埚的影响,但生产成本相应增加。

气雾化粉末性能及收得率主要取决于气雾化设备的喷嘴结构,纵观整个气雾化技术的发展历程,喷嘴结构的优化始终是从未停止,主要分为两种(图 10):自由落体式喷嘴和限制式喷嘴[60-61]。早期普遍使用的是自由落体式喷嘴,该喷嘴设计、制造简单,不易堵塞,控制过程相对简单,但是整体雾化效率低,气体消耗大,粉末的收得率低。限制式喷嘴由于喷嘴与导管之间形成了紧耦合,减小了气体、金属熔体的飞行距离,极大提高了雾化效率,但设计复杂、制造难度较大,雾化过程控制困难,容易发生喷嘴堵塞现象,从而中断雾化[62]。

国内外研究学者及各生产厂商针对喷嘴结构均有不同的设计理念,Wang 等[63]基于传统圆柱形喷嘴(I 型)设计出两种新型喷嘴结构:半收敛–扩张型(II 型)和全收敛–扩张型(III 型)。实验表明,在气体流场中,II 型和 III 型喷嘴能够在显著降低气体压力的条件下,达到与 I 型喷嘴相当的流动性能。Li 等[64] 发现在气体雾化过程中, 提高熔体上的压力可抵消熔体喷嘴内径减小引起的粉末生产率降低, 从而提高细粉的产量。Zerwas 等[65]发现环形狭缝喷嘴在低气液比(GMR)时呈现摆动振荡,高 GMR 时出现超脉

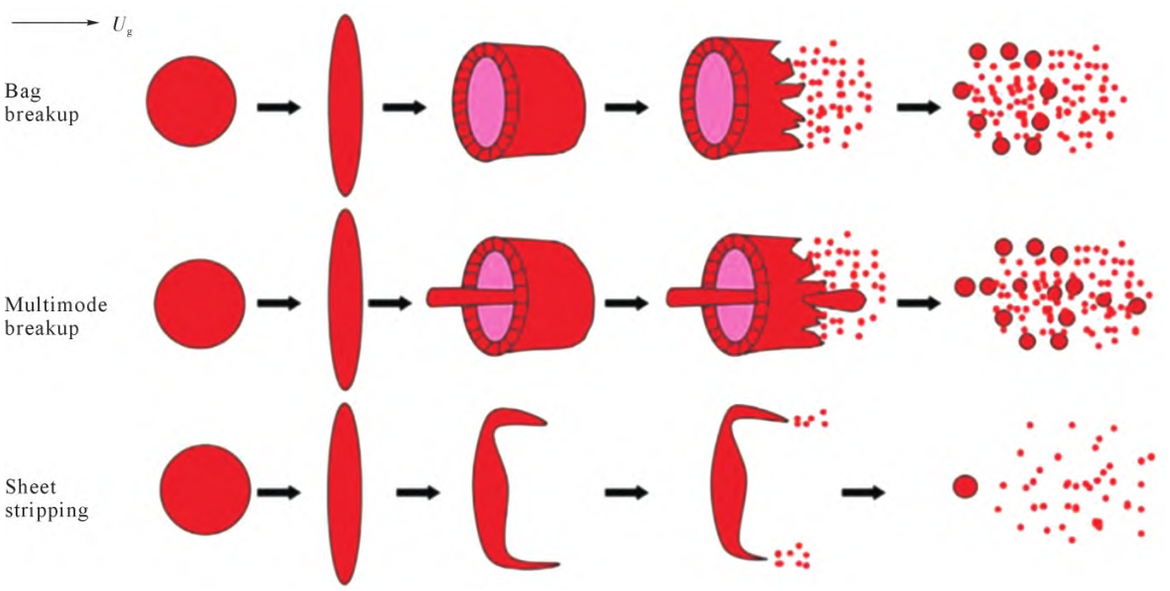

图 8 二次雾化典型破碎模式[34]
Fig.8 Typical crushing mode of secondary atomization[34]

表 3 气雾化粉末性能
Tab.3 Properties of GA powders

Alloy	Powder size/μm	Flow ability /(s/50 g)	Tap density /(g·cm^{-3})	Laser particle size distribution/μm			Sphericity
				D10	D50	D90	
Ti6Al4V	15~53	≤35	≥2.4	≥18	30~40	≤60	≥0.9
Inconel 718	15~45	≤18	≥4.4	≥15	30~40	≤58	≥0.9
18Ni300	15~45	≤20	≥4	≥15	30~40	≤56	≥0.9

中国知网 https://www.cnki.net

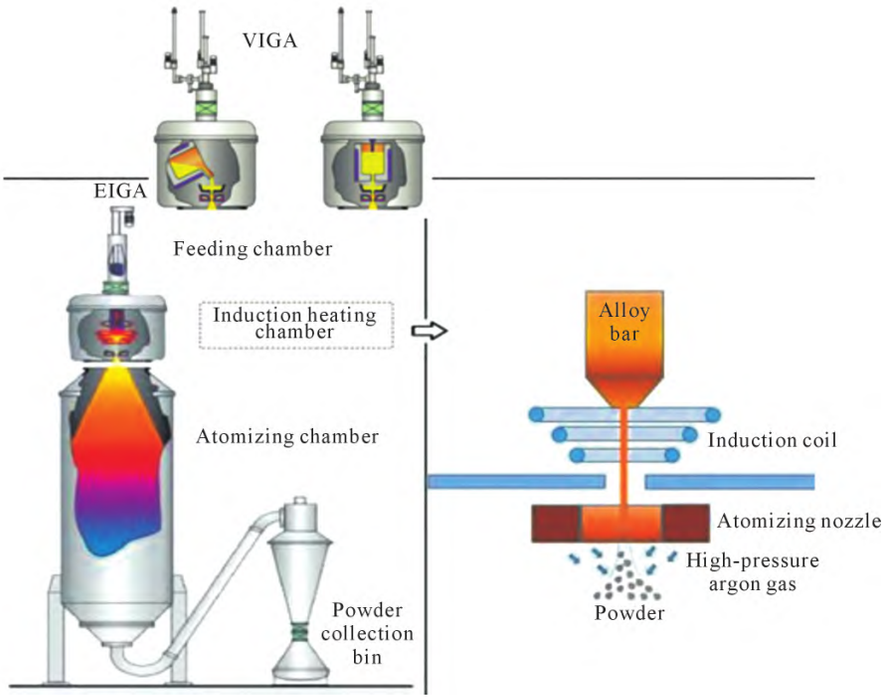

图 9 气雾化制粉技术原理[58]

Fig.9 Principle of gas atomization technology[58]

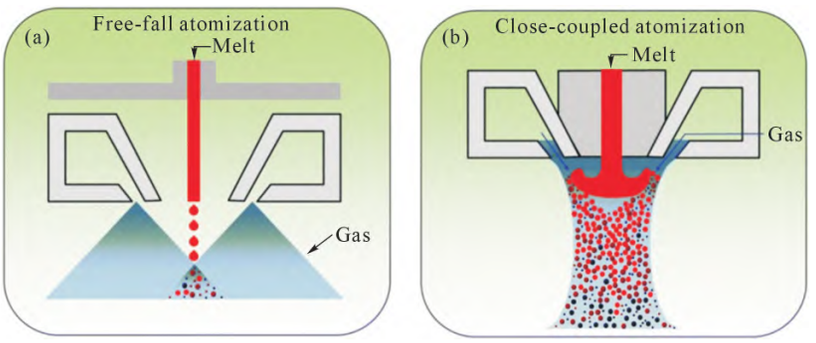

图 10 气雾化喷嘴结构：(a) 自由落体式；(b) 紧耦合式雾化喷嘴[60]

Fig.10 Gas atomization nozzle structures: (a) free fall nozzles ; (b) close-coupled nozzles[60]

动模式，而液体喷雾振荡产生的拍打效应会产生更多不合格片状颗粒。此外，环形喷嘴能提高细粉产量，但代价是卫星粉增加，这可能会导致打印期间粉末流动困难。单喷嘴结构会在喷嘴出口处形成强大的负压区造成回流，这往往会产生喷嘴堵塞并显著降低良率。因此研究者们设计了一种由上下环形气体喷嘴和中心的 1 个液体喷嘴组成的双喷嘴，通过单独调整每个喷嘴的气体射流来抑制雾化部分的回流[66]。李响等[67]以 Inconel 625 合金作为试验材料，利用实验室自主研发的超音速拉瓦尔(Laval)喷嘴雾化制粉，粉末收得率较高，粉末粒度分布范围宽，~53 μm 粉末的收得率可达到 50%以上。Ayodeji 等[68]开发了一种新型深度学习架构，可以同时优化气雾化金属粉末生产的产量和能耗，还能针对特定的喷嘴设置进行定制。

近年来，随着增材制造、粉末冶金行业的快速发展，制粉技术发展迅速，粉末生产厂商数量剧增，效率及成本成为各大厂商亟需重点解决的问题。因此，能够提升雾化效率、降低气体消耗、提高粉末收得率的喷嘴结构设计将成为各厂商和学者的切入点。结合气雾化自身技术特点——粉末较细、卫星粉较多，粉末形貌及后端 3D 打印过程必然受到影响，各设备厂商也着手于后处理设备的升级，如筛分过程中增加气流整形工序以优化粉末形貌等。另一方面从成本考虑，气雾化过程气体的消耗量较大，成本相对较高，目前国内较大的粉末生产厂商如中天上材、中航迈特、铂力特等已经研发且装备气体净化、回收系统，气体回收率可达 95%，在大批量生产的条件下极大地降低了生产成本。

2.2.3 气雾化粉末研究现状

粒度分布和球形度是粉末的关键技术指标，粉末收得率成为粉末生产厂家成本控制的重点，其高低主要由雾化过程的工艺参数决定。在雾化过程中，需控制的主要工艺参数有雾化气体压力、雾化气体

中国知网 https://www.cnki.net

温度、金属熔体过热度(电源功率)等[69-73]。

国内外针对工艺参数对粉末特性的影响研究较多,如刘艳等[58]利用正交试验方法,以马氏体铁基合金粉末为研究对象,开展了 EIGA 制粉工艺:雾化气体压力、雾化气体温度和熔炼功率对粉末粒度分布、流动性及收得率影响规律的研究。结果表明,粉末粒径主要随雾化气体压力的增加而减小;流动性受到雾化气体压力和气体温度的影响,雾化气体压力增加,流动性提升,雾化气体温度升高,流动性先提升再降低;工艺参数对粉末收得率的影响最大,雾化气体压力>雾化气体温度>熔炼功率。王长军等[74]结合数值模拟和实际工业生产数据,分析了 VIGA 雾化气体温度和压力对气体流场的影响及对粉末细粉收得率的综合作用,结果表明,随雾化气体温度的增加,雾化室平均温度增加,平均气体流速增加,更有利于细粉的产生;此外,雾化气体压力的增加,雾化气体温度对细粉收得率的促进作用逐渐降低,雾化气体压力的增加对提升细粉收得率起到决定性作用。黎兴刚等[75]整理了气雾化制粉过程中空心粉的形成原因,是在袋式破碎过程中液滴在气流作用下首先形成带状液膜,破碎后形成大量小液滴,带状液膜由于快速凝固的原因可能被抑制,变形过程增大,带状液膜开口处闭合,导致雾化气体被包裹至熔滴内,形成闭孔空心粉,如图 11 所示[75]。Wang 等[76]模拟气雾化过程时发现增加液滴的动能与粘性比时,增加球形粉末形成趋势,而当该比例减小时,预期的液滴破裂模式发生变化或仅发生液滴变形,而提高气体速度或液滴温度,可以获得更高的非平衡拉普拉斯压力或更低的粘性力,气泡与液滴内部分离,减少空心粉。Dunkley等[77]通过数值模拟的方法揭示了气雾化过程中卫星粉的来源是由于小颗粒冷却较快,被气体代入雾化室内的回流区与尺寸较大还未完全凝固的大颗粒碰撞形成,Luo 等[78]通过数值模拟得出了相似的结果。Zhang 等[79]根据卫星粉形成机理将其分为三类,并描述了不同种卫星粉的形貌特征。工艺参数对粉末缺陷形成机理的研究成果,为粉末质量的提升做出了重大贡献,促使气雾化粉末质量提升,极大地增加了产品的市场竞争力。气雾化制粉设备及制备得到的粉末图像如图 12 所示[45,80-82]。

2.3　等离子丝材雾化

2.3.1　等离子丝材雾化技术原理

等离子丝材雾化技术是以高纯度的金属丝为原料,通过矫直机和送丝设备将金属丝以一定的速度送入等离子炬产生的聚焦等离子射流中熔化、蒸发为饱和金属蒸汽,在惰性气体环境中雾化、冷凝,形成特定粒径分布的金属粉末[83],该技术将熔化和雾化步骤相结合,如图 13 所示[84]。因此也消除了活性金属在陶瓷坩埚熔化时受到陶瓷污染的风险,确保了最终粉末产品的高纯度[85]。

等离子丝材雾化粉末具有纯度高、球形度好、流动性好、卫星粉少等优势,被用于 3D 打印、粉末冶金和注射成形领域,等离子丝材雾化粉末典型性能如表 4。

2.3.2　等离子丝材雾化设备发展历程

等离子丝材雾化技术最早于 1995 年由加拿大 Pegasus Refractory Materials 公司提出,主要在北美

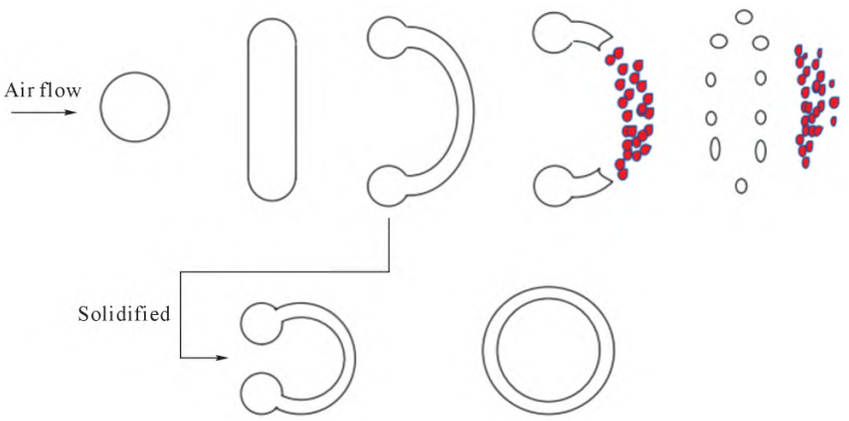

图 11　空心粉形成示意图[75]

Fig.11　Schematic diagram of hollow powder formation[75]

表4 等离子丝材雾化粉末性能

Tab.4 Properties of PA powders

Alloy	Powder size/μm	Flow ability /(s/50 g)	Tap density /(g·cm^{-3})	Laser particle size distribution/μm			Sphericity
				D10	D50	D90	
Ti6Al4V	15~53	<42	>2.4	19	34	54	≥0.9
Inconel 718	15~45	≤18	≥4.4	25	40	53	≥0.9

中国知网　https://www.cnki.net

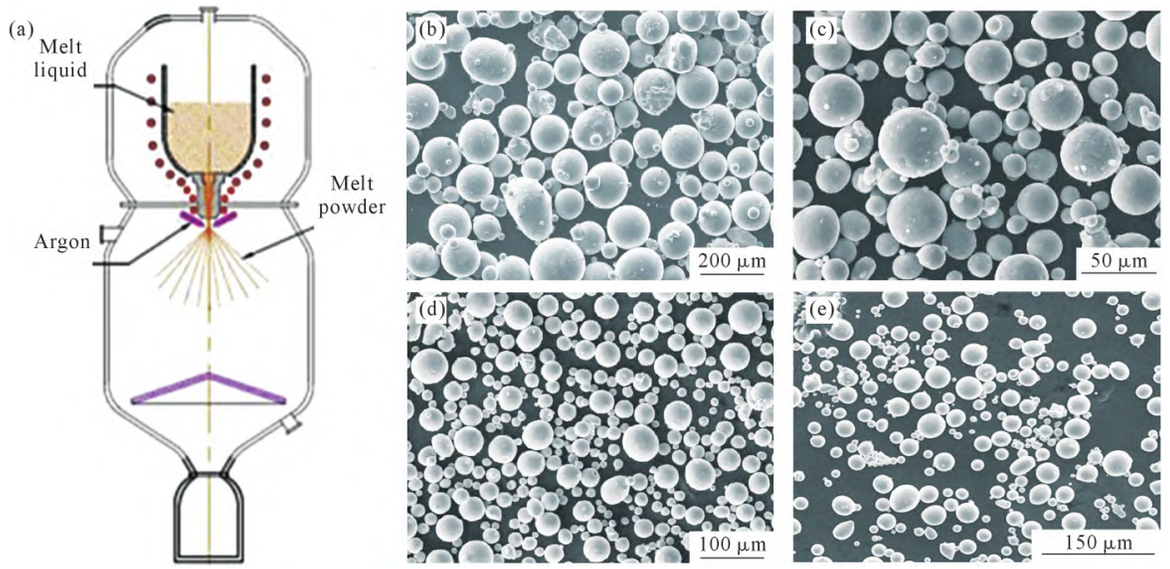

图 12 气雾化制粉设备及生产粉末形貌:(a) 气雾化制粉设备;(b) Ti6Al4V;(c) TC11;(d) Inconel 718;(e) TA15[45, 80-82]

Fig.12 Schematic of the gas atomization equipment and the morphologies of the powders: (a) gas atomization equipment; (b) Ti6Al4V; (c) TC11; (d) Inconel 718; (e) TA15[45, 80-82]

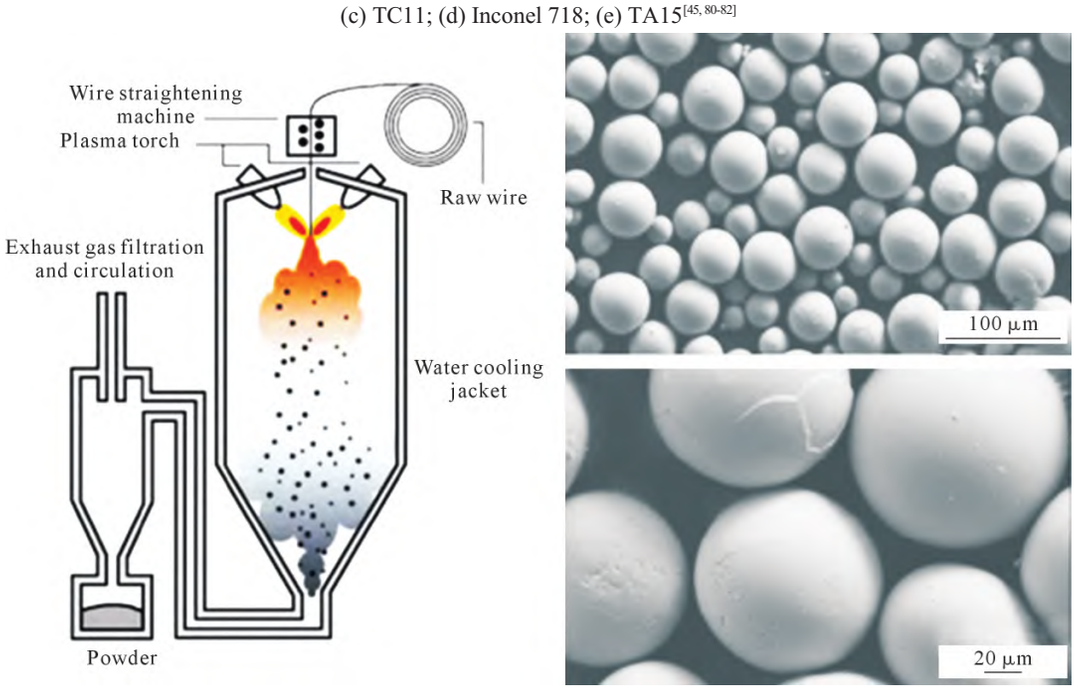

图 13 等离子丝材雾化设备及生产粉末形貌[84]

Fig.13 Schematic diagram of the plasma atomization equipment and the morphologies of the powders [84]

洲地区发展，如 AP&C 和 Pyro-Genesis 等公司自研并迭代优化,目前该技术已经非常成熟[86]。等离子丝材雾化设备的关键核心部件为等离子炬，其直接影响雾化过程中等离子射流的速度和温度分布，间接地保证粉末的性能。AP&C 和 Pyro-Genesis[87]采用管式阴极和空心阳极结构、小电流和高电压运行模式，有效降低电弧斑点的高温烧蚀,延长电极寿命,降低电极材料对粉末的污染。国内成都天齐机械五矿进口有限公司和成都优才科技有限公司均从 AP&C 引入该设备,但近年来对国内技术封锁较严格。2015 年湖南顶立科技股份有限公司[88]引入美国和俄罗斯技术,成功研发了第一代等离子丝材雾化设备,提升等离子炬制粉系统的整体焊接工艺和真空系统,提高了粉末的球形度及松装、振实密度。国内外学者对等离子发生器模拟研究也有一定进展，但对实际生产过程指导意义不大，还需进一步认识等离子体温度场和速度场,了解工艺参数对雾化过程的影响。

2.3.3 等离子丝材雾化粉末现状

PA 的关键工艺参数包括金属丝进给、等离子炬功率及惰性气体流速等[89-90]。金属丝的进给可调节粉末粒径分布;惰性气体流速影响其流动动能,可通过增加气体压力提高气体流动动能，从而提升细粉的收得率;增加等离子炬功率可使金属丝充分熔化,达到更高的熔化温度，给予合适的金属丝进给速度和

中国知网 https://www.cnki.net

气体压力,可以得到球形度高、氧含量低及粒径小的粉末[91];但工艺参数的匹配是制备高品质金属粉末的关键。

广东省科学院新材料所研制的 PA 设备[91],3 束等离子炬功率低于 150 kW,丝材和等离子炬轴向夹角为 25°~35°,金属进给速度为 0~10 m/min,气体压力为 10^4~10^5 Pa。随着气体压力的降低,等离子射流速度更高,获得粉末粒径越细,即细粉收得率越高。张庆磊等[92]通过数值模拟的方法对等离子丝材雾化设备的核心部件等离子体发生器和关键雾化过程重点研究,同时以钽粉为研究对象,获得了优化后的工艺参数范围:工作电流 80~200 A、进气流量60~150 L/min、雾化夹角为 30°,在此工艺下球形钽粉性能优异,平均粒径为 44.73 μm,细粉收得率为62.8%,球形度超过 99%。此外,Qiu 等[93]通过控制调节喷嘴流量成功制备了球形度接近 100%,完全没有空心粉,并且 D90 为 27.97 μm 的 Ti6Al4V 超细粉。

2.4 等离子球化

2.4.1 等离子球化技术原理

等离子球化原理及其粉末形貌如图 14 所示[94]。该技术以金属不规则粉体为原材料,利用射频磁场激励或者微波能量激发气体形成等离子体形成高温热源,通过载气送粉装置将不规则粉体原材料送入等离子体高温区熔融,熔融后金属液滴在表面张力作用下收缩成球形,高速气流冲刷后形成金属球形粉末。球化过程中边部气体主要起保护作用,中心气体被用作电离等离子体[29,95-96]。等离子球化没有接触坩埚,能够提高粉末纯度,同时可以制得从纳米级到微米级不同粒度范围的金属球形粉末,尤其适用于高熔点金属球形粉末的制备[89,97-99]。

2.4.2 等离子球化设备发展历程

等离子球化装置首次被报道于 1961 年麻省理工的 Reed,其指出该技术在材料领域具有极大的应用前景。随后英国原子能研究所 Hedger 在其基础上制备了钨、钼、铬等金属球形粉末。目前加拿大的 Tekna 公司开发的射频感应等离子球化系统处于世界领先地位;美国的材料厂商 6K 开发出 UniMelt 等离子体系统,将铣削、车削废料转化为金属球形粉末再次利用。国内北京科技大学率先研制出水冷射频等离子体粉体处理系统[94];西安赛隆推出了国内首台商用微波等离子球化装置,采用微波能量制备等离子体[100]。

2.4.3 等离子球化粉末现状

等离子球化粉末性能主要受到球化率的影响,如流动性、松装密度等。决定金属粉体球化率的工艺参数为送粉速率、送粉管位置、等离子体功率等[101-103]。

送粉速率决定了单个粉体进入到球化系统中吸收热量的大小,从而决定粉体的球化率;Wang 等[94]以钛粉为研究对象,发现送粉速率从 10 g/min 增加至 20 g/min 时,钛粉的球化率急剧下降,主要是由于单位时间内送入球化的钛粉量增加,整体热量一定,单个钛粉所能吸收的热量降低,导致钛粉的球化率降低。刘博文[104]通过射频感应等离子球化技术制备球形锆合金粉末,结果表明,锆合金粉末的平均球形度和球化率随着送粉速率的增加而显著降低,当送粉速率为 2 g/min 时,粉末的球形度>96%,颗粒表

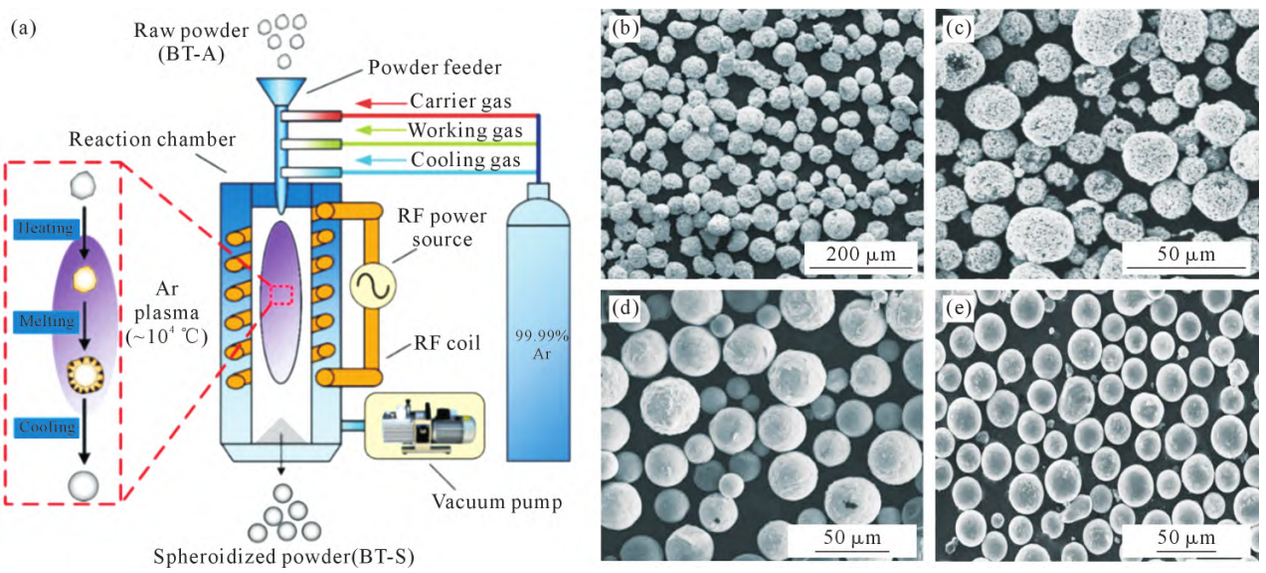

图 14 等离子球化制粉设备及生产粉末形貌:(a) 等离子球化制粉设备;(b) 造粒钨粉(球化前);(c) 造粒 W-ZrC 粉(球化前);(d) 造粒钨粉(球化后);(e) 造粒 W-ZrC 粉(球化后)[94]

Fig.14 Schematic of the plasma spheroidization equipment and the morphologies of the powders: (a) plasma spheroidization equipment; (b) granulated W powder (before spheroidization); (c) granulated W-ZrC powder (before spheroidization); (d) granulated W powder (after spheroidization); (e) granulated W-ZrC powder (after spheroidization)[94]

中国知网 https://www.cnki.net

面致密光滑,粉末的球化率约为 98%。等离子球化制粉设备及其制备得到的粉末。

等离子体功率决定了球化过程中的总热量,最优的功率有利于粉末表面形貌的改善,同时减小内部缺陷。许贞元等[105]采用 5 和 8 kW 型两套不同功率的 TEKNA 感应等离子球化设备进行钽粉球化研究,结果表明,80 kW 型设备的钽粉处理的效率更高,球化效果和成品率相应提升。而功率过高会导致部分元素挥发加剧,如 Hao 等[106]将等离子体功率从 19 kW 增加至 35 kW 时,钼粉中细小的颗粒挥发严重,一部分随气流排出,另一部分以纳米颗粒的形式附着于球化粉末表面,影响表面质量,导致松装密度降低。

近年来等离子球化技术虽已被证实是一种有效的球形粉末制备方式,但粉末仍然存在一定缺陷,且缺陷的形成机理与其球化过程存在某些必然联系,仍然需要证实并解决。为提升等离子球化粉末的性能,仅靠球化过程工艺参数优化远远不够,前期粉体原材料的预处理和球化后粉末的后处理手段依旧是关键控制点,须深入研究。

2.5 不同制粉技术优劣势及发展趋势

等离子旋转电极雾化、气雾化、等离子丝材雾化、等离子球化制粉技术是目前商业化制备金属球形粉末的主要技术,4 种制备技术各有优势和劣势,相互补充,优劣势对比如表 5 和 6 所示。

等离子旋转电极制粉技术的优势在于可通过转速的调控制备出不同粒度分布的粉末,同时能保证粉末空心粉率低、氧增量小、球形度高等优异特性,可以满足不同增材制造工艺的粉末需求[107]。在热等静压粉末冶金领域,低的空心粉率(尤其是闭孔空心粉)可以极大地降低冶金缺陷,高球形度使粉末具有优异的流动性,振实密度更高,有利于产品尺寸的精准控制[24,108-109]。等离子旋转电极工艺的劣势在于设备价格高,同时是离心雾化,对于轻质金属,如制备钛合金粉末,细粉的成品率低,因此,粉末制造成本相对较高。等离子旋转电极雾化制粉技术仍需优化

表 5 不同制粉技术特点及优劣势比较

Tab.5 Comparison of the characteristics, advantages and disadvantages of different powder preparation technologies

Preparation technology	Alloy	Main powder size/μm	Oxygen increment/$\times10^{-4}$%	Yield /%	Sphericity /%	Advantages	Disadvantages
PREP	Titanium alloy	53~250	50~100	75~95	>95	High purity, high production efficiency, low hollow powder rate, no satellite powder, narrow particle size distribution, adjustable particle size distribution	High raw material costs, limited by equipment speed
	Superalloy/ iron-based alloys	15~53 /15~45	10~50	>80	>99		
GA	Titanium alloy	15~53 /15~45	<400	40	>90	Low raw material cost, high fine powder yield, recoverable working gas	Poor powder morphology, multi-satellite powder, high hollow powder rate, wide particle size distribution
	Superalloy/ iron-based alloys		<400	70	>90		
PA	Titanium alloy	15~45 /15~53	＜300	60	90	High fine powder yield, low hollow powder rate	Low production efficiency and high raw material production costs
PS	Refractory alloys	15~53 /15~45	500~2 000	50	85	Capable of producing refractory alloy powder with good surface quality	Low production efficiency, raw materials in powdered form, volatile elements

表 6 不同制粉技术重点信息对比

Tab.6 Comparison of key information on different powder preparation technologies

Preparation technology	Energy consumption in powder preparation	Yield of fine powder	Raw materials and the costs
PREP	Medium-high	Low	Specific process bars, high cost
VIGA	Low-medium	Little high	Ingredient or master alloy, low cost
EIGA	Low-medium	Medium	Standard bars, low cost
PA	Medium-high	Medium	Filament, high cost
PS	Medium-high	Medium	Special-shaped powder

中国知网 https://www.cnki.net

设备,提升粉末成品率,降低粉末成本。

气雾化技术主要的优势是原材料生产成本低,3D 打印主要使用的细粉收得率高,适合制备激光选区熔化成形技术用粉末。近年来气体回收系统的出现,使气体使用成本更低,市场竞争力更强。同时由于工艺技术的持续优化和后处理整形设备的出现,粉末品质有所提升,在 3D 打印行业的市场占有率可达 70%。该技术制备的粉末空心粉率比较高,后处理整形设备虽可改善粉末形貌,但其关键部件(分级轮)的磨损引入异质夹杂的风险较高[110-111]。

等离子丝材雾化针对钛合金生产,细粉收得率有明显优势,粉末性能相比气雾化较好,如空心粉率、粉末形貌等,但其原材料对该技术的应用限制明显,且成本高,部分合金粉末目前还无法使用该技术进行生产,整体生产效率低。

等离子球化由于其原理的特殊性,在难熔金属粉末制备方面具有得天独厚的优势[25],且粉末球形度高、流动性好,过程中引入杂质的风险低,粉末纯净度与原材料粉体关联性极强,对合金元素复杂、易挥发的合金存在一定缺陷,工艺参数控制困难,易发生元素挥发影响粉末成分。

PREP 与 PS 偏向高质量、高附加值领域,需以技术迭代降低成本;GA 凭借规模化优势主导中低端市场;PA 与 PS 分别在轻质金属和难熔金属细分赛道具备差异化竞争力,但需突破原料与工艺瓶颈。技术选择需结合材料特性、成本约束与终端性能需求进行权衡。

等离子旋转电极和等离子球化技术适用于高质量、高附加值领域,但需通过技术升级降低生产成本;气雾化技术凭借其低成本生产优势,在中低端市场占据主导地位;此外,等离子丝材雾化和等离子球化分别在轻质金属、难熔金属等特定领域展现出独特竞争力,但仍需解决原材料适配性及工艺稳定性问题。在实际应用中,需根据材料特性、生产成本限制以及终端性能需求,综合评估不同技术的适用性。

3　结语与挑战

由于产品应用市场和工况的特殊性,对产品性能和质量提出更加严苛的要求。作为最基础的原材料,金属球形粉末性能和质量尤为重要,随着市场供需关系的快速变化,粉末价格竞争激烈,为此,各粉末原材料生产厂家需对成本进行不断优化。粉末冶金及增材制造需求的粉末具有特定的粒度范围要求,剩余的粉末利用困难,导致成本升高,开发剩余粉末的利用从而降低成本,是金属球形粉末健康持续发展的趋势。“高品质、低成本”将成为金属球形粉末制造行业新的代名词。

与国外相比,国内制粉设备起步较晚,技术水平还存在一定差距。为满足高品质合金粉末的生产需求,提升设备的精度和效率,确保金属粉末的粒度分布均匀、球形度好、杂质含量低是国内的发展方向。同时,当前粉末生产中很多环节需要人为判断和决策,操作人员的技术水平和熟练度对粉末质量有重要影响,随着两化融合的政策导向和人工智能技术的快速发展,如何提高设备自动化和生产智能化亦是行业发展的重要方向。

参考文献:

[1] MOSALLANEJAD M H, ABDI A., KARPASAND F, NASSIRI N, IULIANO L, SABOORI A. Additive manufacturing of titanium alloys: Processability, properties, and applications [J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(24): 2301122.

[2] REN Y M, LIN X, HUANG W D. Research progress of microstructure and fatigue behavior in additive manufacturing Ti-6A1-4V alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(10): 3160-3168.

[3] AGBEDOR S O, WU H, REN Y J, LIANG L X, YANG D H, LIU B, LIU Y, BAKER I. A two-decade odyssey in fusion-based additive manufacturing of titanium alloys and composites [J]. Applied Materials Today, 2024, 39: 102242.

[4] WEN S F, GAN J, LI F, ZHOU Y, YAN C Z, SHI Y S. Research status and prospect of additive manufactured nickel-titanium shape memory alloys[J]. Materials, 2021, 14(16): 4496.

[5] ZHOU B, WU D, DING Y, CHEN R S. The potential application of hot isostatic pressing for magnesium alloys to reduce shrinkage porosity [J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(1): 447-454.

[6] CHANG S H, CHEN S H, HUANG K T, LIANG C. Improvement in sintering characteristics and electrical properties of Cr60Cu40 alloy targets by hot isostatic pressing treatment [J]. Powder Metallurgy, 2013, 56(1): 77-82.

[7] 王佳睿,张翔,何春年,赵乃勤. 高导电高耐热铜合金及铜基复合材料的研究现状与展望[J]. 铸造技术,2024, 45(1): 1-26.
WANG J R, ZHANG X, HE C N, ZHAO N Q. Research status and prospects for high-conductivity and high heat-resistance copper alloys and copper matrix composites[J]. Foundry Technology, 2024, 45(1): 1-26.

[8] GALECH U, ARISTIZABAL M, SAINZ S, ITURRIZA I. Influence of astroloy gas-atomized powder particle size on powder properties and HIPped impact toughness [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1025: 180396.

[9] MACDONALD J E, KHAN R H U, ARISTIZABAL M, ESSA K E A, LUNT M J, ATTALLAH M M. Influence of powder characteristics on the microstructure and mechanical properties of HIPped CM247LC Ni superalloy [J]. Materials & Design, 2019, 174: 107796.

中国知网 https://www.cnki.net

[10] GUO R P, XU L, ZONG B Y, YANG R. Preparation and ring rolling processing of large size Ti-6Al-4V powder compact [J]. Materials & Design, 2016, 99: 341-348.

[11] WEI Q S, XUE P J, LIU G C, LU H, HUANG J, SHI Y S. Simulation and verification of near-net shaping a complex-shaped turbine disc by hot isostatic pressing process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74: 1667-1677.

[12] GUO R P, XU L, CHEN Z Y, WANG Q J, ZONG B Y, YANG R. Effect of powder surface state on microstructure and tensile properties of a novel near α-Ti alloy using hot isostatic pressing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 706: 57-63.

[13] ALAMI A H, MDALLAL A, AYOUB M, ALASHKAR A, YASIN A. Additive manufacturing technologies [M]//ALAMI A H. Sustainable additive technologies and innovative manufacturing techniques. Cham: Springer Nature, 2024: 35-47.

[14] CHUA C K, LEONG K F, AN J. 1 - Introduction to rapid prototyping of biomaterials[M]// NARAYAN R. Rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing, Second edition. Cambridge: Woodhead Publishing, 2020: 1-15.

[15] 曹遴,陈彪,贾振东,高江霖,李金山. 铝基复合材料研究进展及其航空航天应用[J]. 铸造技术,2023, 44(8): 685-705.
CAO L, CHEN B, JIA Z D, GAO J L, LI J S. Research progress and aerospace applications of aluminum matrix composite [J]. Foundry Technology, 2023,44(8): 685-705.

[16] 李杰,万杰,李金山,王军. 金属激光粉末床熔融成形缺陷及其原位表征研究进展[J]. 铸造技术,2024, 45(3): 228-248.
LI J, WAN J, LI J S, WANG J. Research progress on defects in metals fabricated via laser powder bed fusion and their in situ characterization[J]. Foundry Technology, 2024, 45(3): 228-248.

[17] 孟伟. 3D 打印技术及应用趋势分析[J]. 科技创新与应用,2021, (11): 146-148.
MENG W. Analysis of 3D printing technology and application trends[J]. Technology Innovation and Application, 2021(11): 146-148.

[18] 王超,陈继飞,冯韬,陈文刚. 3D 打印技术发展及其耗材应用进展[J]. 中国铸造装备与技术,2021, 56(6): 38-44.
WANG C, CHEN J F, FENG T, CHEN W G. The development of 3D printing technology and the progress of its consumables application[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2021, 56 (6): 38-44.

[19] 朱金岭,程军,陈靓瑜. 激光粉床熔融 Ti-6Al-4V 热处理的研究现状:微观组织演变和耐腐蚀性能[J]. 工程科学学报,2024, 46 (8): 1393-1402.
ZHU J L, CHENG J, CHEN L Y. Current research status on Ti-6Al-4V heat treatment through laser powder bed fusion: microstructure evolution and corrosion resistance [J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(8): 1393-1402.

[20] QIAN J, DONG D S, WEI G, SHI M, TANG S L. A method for the preparation of spherical titanium powder for additive manufacturing [J]. Powder Technology, 2022, 411: 117927.

[21] SUN P, FANG Z G Z, ZHANG Y, XIA Y. Review of the methods for production of spherical Ti and Ti alloy powder[J]. JOM, 2017, 69: 1853-1860.

[22] LIU B W, HE G M, LIU Y, YUE M F, LIAN L X. High-quality spherical zirconium alloy powders prepared by thermal plasma treatment for additive manufacturing [J]. Materials Letters, 2021, 288: 129360.

[23] 娄永刚,黄礼恒. 金属粉末:高端材料,千亿市场[R/OL]. (2022-12-7). [2025-6-3]. https://data.eastmoney.com/report/zw_industry.jshtml?infocode=AP202212071580887808.
LOU Y G, HUANG L H. Metal powder: High-end materials, trillion dollar market[R/OL]. (2022-12-7). [2025-6-3]. https://data.eastmoney.com/report/zw_industry.jshtml?infocode=AP202212071580887808.

[24] LIU W S, DUAN Y T, MA Y Z, CAI Q S, LI J, WEN Z L. Surface characterization of plasma rotating electrode atomized 30CrMnSiNi2A steel powder [J]. Applied Surface Science, 2020, 528: 147004.

[25] LI Q J, ZHANG L, CHEN X W, WEI D B, ZHANG P, CHEN Y, QU X H. Characterization of plasma rotating electrode atomize d Nb-Ti based alloy powder [J]. Metal Powder Report, 2020, 75(2): 82-91.

[26] CHEN G, ZHAO S Y, TAN P, YIN J O, ZHOU Q, GE Y, LI Z F, WANG J, TANG H P, CAO P. Shape memory TiNi powders produced by plasma rotating electrode process for additive manufacturing [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(12): 2647-2655.

[27] 刘军,许宁辉,于建宁. 用等离子旋转电极雾化法制备 TC4 合金粉末的研究[J]. 宁夏工程技术,2016, 15(4): 340-342.
LIU J, XU N H, YU J N. Preparation of TC4 alloy powder by plasma rotating electrode atomization [J]. Ningxia Engineering Technology, 2016, 15(4): 340-342.

[28] 杨洪涛,卢志辉,孙志杨,张磊乐,游广飞,陈超. 等离子旋转电极雾化制粉设备国内研究现状 [J]. 粉末冶金工业,2021, 31(4): 88-93.
YANG H T, LU Z H, SUN Z Y, ZHANG L L, YOU G F, CHEN C. Domestic research status of plasma rotation electrode process equipment[J]. Powder Metallurgy Industry, 2021, 31(4): 88-93.

[29] 张康,杨博文,秦立东,李柯函,左振博,赵霄昊,赖运金,梁书锦. 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 K, YANG B W, QIN L D, LI K H, ZUO Z B, ZHAO X H, LAI Y J, LIANG S J. Research progress on powder preparation technology for metal additive manufacturing [J]. MW Metal Forming, 2023(3): 24-31.

[30] 杨星波,朱纪磊,陈斌科,凤治华,李晓辉. 等离子旋转电极雾化技术及粉末粒度控制研究现状[J]. 粉末冶金工业,2022, 32(2): 90-95.
YANG X B, ZHU J L, CHEN B K, FENG Z H, LI X H. Research status of plasma rotating electrode atomization technology and powder particle size control[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(2): 90-95.

[31] KURVYAKOVA L M, ZHIRKOVA Y N, POMOSOV A V. The properties of aluminum-nickel powders[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1995, 33: 240-243.

[32] LIU J X, YU Q B, GUO Q. Experimental investigation of liquid disintegration by rotary cups [J]. Chemical Engineering Science,

中国知网 https://www.cnki.net

2012, 73: 44-50.

[33] ZDUJIĆ M, USKOKOVIĆ D. Production of atomized metal and alloy powders by the rotating electrode process [J]. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1990, 29(9): 673-683.

[34] FROST A R. Rotary atomization in the ligament formation mode [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1981, 26(1): 63-78.

[35] KAMIYA T, KAYANO A. Disintegration of viscous fluid in the ligament state purged from a rotating disk[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1971, 4(4): 364-369.

[36] REN P Y, OUYANG Y, MU J R, LUO S, TANG Z J, WU Y, LEUNG C L A, OLIVEIRA J P, ZOU Y, WANG H W, WANG H Z. Metal powder atomization preparation, modification, and reuse for additive manufacturing: A review[J]. Progress in Materials Science, 2025, 152: 101449.

[37] 李茜. 等离子体旋转电极雾化法制备难熔合金球形粉末工艺及微观组织特性研究[D]. 太原:中北大学,2024.
LI X. Preparation of refractory alloy spherical powder by plasma rotary electrode process and microstructure characteristics [D]. Taiyuan: North University of China, 2024.

[38] 汤慧萍. 等离子旋转电极制粉技术研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(1): 2-11, 54.
TANG H P. Progress of plasma rotating electrode processing technology[J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(1): 2-11, 54.

[39] CUI Y J, ZHAO Y F, NUMATA H, BIAN H K, WAKO K, YAMANAKA K, AOYAGI K, ZHANG C, CHIBA A. Effects of plasma rotating electrode process parameters on the particle size distribution and microstructure of Ti-6Al-4V alloy powder [J]. Powder Technology, 2020, 376: 363-372.

[40] ZHAO Y F, CUI Y J, NUMATA H, BIAN H K, WAKO K, YAMANAKA K, AOYAGI CHIBA A. Centrifugal granulation behavior in metallic powder fabrication by plasma rotating electrode process[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 18446.

[41] NIE Y, TANG J J, TENG J W, YE X J, YANG B B, HUANG J F, YU S, LI Y P. Particle defects and related properties of metallic powders produced by plasma rotating electrode process[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(7): 2912-2920.

[42] ZHANG Y, SONG M H, LI Y, LI Y C, GONG S L, ZHANG B. Effect of preparation process on the microstructure and characteristics of TiAl pre-alloyed powder fabricated by plasma rotating electrode process[J]. Crystals, 2024, 14(6): 562.

[43] TANG J J, NIE Y, LEI Q, LI Y P. Characteristics and atomization behavior of Ti-6Al-4V powder produced by plasma rotating electrode process[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(10): 2330-2337.

[44] LIU Y, LIANG S J, HAN Z Y, SONG J M, WANG Q X. A novel model of calculating particle sizes in plasma rotating electrode process for superalloys [J]. Powder Technology, 2018, 336: 406-414.

[45] CHEN G, ZHAO S Y, TAN P, WANG J, XIANG C S, TANG H P. A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization[J]. Powder Technology, 2018, 333: 38-46.

[46] ZUO Z B, HU R, LUO X, WANG Q X, LI C X, ZHU Z, LAN J, LIANG S J, TANG H K, ZHANG K. Solidification behavior and microstructures characteristics of Ti-48Al-3Nb-1.5Ta powder produced by supreme-speed plasma rotating electrode process [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2023, 36(8): 1221-1234.

[47] ZUO Z B, HU R, LI S Q, LAI Y J, WANG Q X, LUO X, QU Z H, CHANG T, SONG J M, HAN Z Y, MA K, LI X. A novel Ta-contained TiAl alloy with excellent high temperature performance designed for powder hot isostatic pressing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1008: 176706.

[48] ZUO Z B, HU R, WANG Q X, GAO Z T, LUO X, LAI Y J, XUE S, XIANG M, ZHAO X H, LI S Q. Effects of thermal exposure on the microstructure and mechanical properties of a Ti-48Al-3Nb-1.5Ta alloy via powder Hot Isostatic Pressing[J]. Materials, 2024, 17(4): 794.

[49] ZUO Z B, HU R, LUO X, TANG H K, ZHU Z, GAO Z T, LI J G, ZOU H, LI A, ZHAO X H, LAI Y J, LI S Q. Evolution behavior of rapidly solidified microstructure of a Ti-48Al-3Nb-1.5Ta alloy powder during hot isostatic pressing[J]. Metals, 2023, 13(7): 1243.

[50] 马宽,唐洪奎,卓君,李安,赖运金,梁书锦,王庆相. 粉末球形度对高速激光熔覆层质量的影响[J]. 铸造,2022, 71(5): 586-591.
MA K, TANG H K, ZHOU J, LI A, LAI Y J, LIANG S J, WANG Q X. Effect of powder sphericity on quality of coatings prepared by high speed laser cladding[J]. Foundry, 2022, 71(5): 586-591.

[51] 朱盼星,石生荷,杨剑,张超,赵新明. 气体雾化技术制备金属粉末研究综述[J]. 粉末冶金工业,2021, 31(4): 82-87.
ZHU P X, SHI S H, YANG J, ZHANG C, ZHAO X M. Research progress on the gas atomization for producing metal powders [J]. Powder Metallurgy Industry 2021, 31(4): 82-87.

[52] 关书文,刘世昌,时坚,高鹏,魏彦鹏,成京昌,于波. 气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 S W, LIU S C, SHI J, GAO P, WEI Y P, CHENG J C, YU B. Research progress and prospect of metal powder preparation by gas atomization[J]. Foundry, 2022, 71(2): 136-142.

[53] 张雪良,陶宇,贾建,曲敬龙. 气体雾化制粉技术研究综述[J]. 粉末冶金工业,2022, 32(3): 96-106.
ZHANG X L, TAO Y, JIA J, QU J L. A review of research on powder prepared by gas atomization[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(3): 96-106.

[54] LUO S, OUYANG Y, WEI Q L, LASI S Y, WU Y, WANG H W, WANG H Z. Understanding the breakup behaviors of liquid jet in gas atomization for powder production [J]. Materials & Design, 2023, 227: 111793.

[55] 杨乐彪,任晓娜,夏敏,孙海涛,吕晓安,葛昌纯. 电极感应熔化气雾化粉末特性及液滴尺寸影响因素的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2020, 49(6): 2017-2023.
YANG L B, REN X N, XIA M, SUN H T, LYU X A, GE C C. Study on powder characteristics and effect factors of droplets size during electrode induction melting gas atomization [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(6): 2017-2023.

[56] 夏敏,汪鹏,张晓虎,葛昌纯. 电极感应熔化气雾化制粉技术中非限制式喷嘴雾化过程模拟[J]. 物理学报,2018, 67(17): 41-51.
XIA M, WANG P, ZHANG X H, GE C C. Computational fluid

中国知网 https://www.cnki.net

dynamic investigation of the primary and secondary atomization of the free-fall atomizer in electrode induction melting gas atomization process[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(17): 41-51.

[57] 吴嘉伦. EIGA 高温合金细粉收得率与粉体流动性优化及机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2023.
WU J L. Study on the optimization and mechanism of EIGA superalloy fine powder yield and Powder fluidity [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.

[58] 刘艳,尤齐桑,朱红梅,张林杰,张建勋. 电极感应气雾化法制备新型高硬度马氏体铁基合金粉末[J]. 粉末冶金技术,2021, 39(6): 537-544.
LIU Y, YOU Q Y, ZHU H M, ZHANG L J, ZHANG J X. Preparation of new high hardness martensitic iron-based alloy powders by electrode induction gas atomization[J]. Powder Metallurgy Technology, 2021, 39(6): 537-544.

[59] FASHU S, LOTOTSKYY M, DAVIDS M W, PICKERING L, LINKOV V, TAI S, TANG R H, XIAO F M, FURSIKOV P V, TARASOV B P. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys[J]. Materials & Design, 2020, 186: 108295.

[60] CIFTCI N, ELLENDT N, COULTHARD G, SOARES BARRETO E, MÄDLER L, UHLENWINKEL V. Novel cooling rate correlations in molten metal gas atomization [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50: 666-677.

[61] 刘顺利. 镍基合金粉末气雾化制备工艺数值模拟研究[D]. 大庆:东北石油大学,2024.
LIU S L. Numerical simulation study on preparation process of Ni-based alloy powder by gas atomization [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2024.

[62] 冯骏骁,左野,王勇,张增海,滕龙,沈子惟,金贺,宋静思,张哲魁. 真空雾化制粉技术研究进展及展望[J]. 真空,2022, 59(6): 87-92.
FENG J X, ZUO Y, WANG Y, ZHANG Z H, TENG L, SHEN Z W, JIN H, SONG J S, ZHANG Z K. Research and development prospect of vacuum atomization powdering technology[J]. Vacuum, 2022, 59(6): 87-92.

[63] WANG K, ZHOU Z L, SUN W H, ZHANG Y H, ZHANG S D, WANG J Q. Impact of novel nozzles on atomization flow field and particle features: simulation and experimental validation[J]. Metals, 2025, 15(3): 313.

[64] LI X G, ZHU Q, SHU S, FAN J Z, ZHANG S M. Fine spherical powder production during gas atomization of pressurized melts through melt nozzles with a small inner diameter [J]. Powder Technology, 2019, 356: 759-768.

[65] ZERWAS A A, DA SILVA F C, GUARDANI R, ACHELIS L, FRITSCHING U. Impact of the gas atomizer nozzle configuration on metal powder production for additive manufacturing[J]. Powder Technology, 2024, 443: 119974.

[66] CHOI D, BYUN J, PARK H. Analysis of liquid column atomization by annular dual-nozzle gas jet flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 943.

[67] 李响,曾克里,何鹏江,罗浩,朱杰,宋信强. 紧耦合气雾化参数对 3D 打印用金属粉末性能的影响[J]. 粉末冶金技术,2021, 39 (2): 172-176.
LI X, ZENG K L, HE P J, LUO H, ZHU J, SONG X Q. Effect of tightly coupled gas atomization parameters on the properties of metal powders used for 3D printing[J]. Powder Metallurgy Technology, 2021, 39(2): 172-176.

[68] AYO DEJI A, EL MASRI E, WILLIAMSON T, ABBA M A A, GAN T H. State-enhanced attention network for optimisation of energy and yield in gas atomised metal powder production [J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2025, 43: 101874.

[69] WANG P, LIU J Q, DONG Y N, ZHAO H, PANG J, ZHANG J Q. Investigation on close-coupled gas atomization for Fe-based amorphous powder production via simulation and industrial trials: Part II. Particle flight and cooling during secondary atomization[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 9480-9498.

[70] MATHIAS L E T, ANDREOLI A F, GARGARELLA P. Gas atomization of A2 tool steel: Effect of process parameters on powders' physical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 960: 170696.

[71] QADDAH B, CHAPELLE P, BELLOT J P, JOURDAN J, RIMBERT N, DEBORDE A, HAMMES R, FRANCESCHINI A. Swirling supersonic gas flow in an EIGA atomizer for metal powder production: Numerical investigation and experimental validation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 311: 117814.

[72] SHI Y T, LU W Y, SUN W H, ZHANG S D, YANG B J, WANG J Q. Pressure-dependent microstructure evolution of Fe-based amorphous alloy powders via high-pressure gas atomization [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 920: 166038.

[73] 向润方. 气雾化温度及雾化器结构对镍基合金雾化过程与粉末粒度的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
XIANG R F. The effects of gas temperature and atomizer structure parameters on the atomization process and particle size of nickel-based alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[74] 王长军,刘雨,曹呈祥,郎童,马聪慧,谢琰军. 增材制造用气雾化制粉工艺数值模拟及机理分析[J]. 粉末冶金工业,2021, 31(4): 22-28.
WANG C J, LIU Y, CAO C X, LANG T, MA C H, XIE Y J. Numerical simulation and mechanism analysis of gas atomized pulverizing process for additive manufacturing[J]. Powder Metallurgy Industry, 2021, 31(4): 22-28.

[75] 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 X G, LIU C, ZHU Q. 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.

[76] WANG P, LI X G, ZHOU X L, CHEN Z P, WANG M H, GANG P, REN X N, YU Z Y. Numerical simulation on metallic droplet deformation and breakup concerning particle morphology and hollow particle formation during gas atomization[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(7): 2074-2094.

[77] DUNKLEY J, TELFORD B. Control of 'satellite' particles in gas atomization [J]. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 2002, 3: 103-110.

中国知网 https://www.cnki.net

[78] LUO S, WANG H Z, GAO Z Y, WU Y, WANG H W. Interaction between high-velocity gas and liquid in gas atomization revealed by a new coupled simulation model[J]. Materials & Design, 2021, 212: 110264.

[79] ZHANG L C, XU W Y, LI Z, ZHENG L, LIU Y F, ZHANG G Q. Mechanism of rapidly solidified satellites formation in gas atomized powders: Simulation and characterization[J]. Powder Technology, 2023, 418: 118162.

[80] 张昌春. TC11 钛合金激光粉末床熔融成形质量与组织性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2023.
ZHANG C C. Research on forming qualities, microstructure and properties of TC11 titanium alloy fabricated by laser powder bed fusion [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.

[81] 杨启云,许炯恺,吴凯琦,吴文恒,张亮,何贝贝. 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 Q Y, XU J K, WU K Q, WU W H, ZHANG L, HE B B. Characteristic of GH4169 alloy powder used in selective laser melting[J]. Powder Metallurgy Industry, 2020, 30(3): 9-13.

[82] 蒋保林,管晓颖,叶国晨,蒋陈. 压力和功率对 EIGA 制备 TA15 粉末的影响[J]. 装备制造技术,2024(2): 21-24.
JIANG B L, GUAN X Y, YE G C, JIANG C. Effects of pressure and power on the preparation of TA15 powder by EIGA [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2024(2): 21-24.

[83] ZHANG Q B, YU D P, LIU F Y, MIAO X Q, QIU J E, FAN Y. Modeling on the size of the pre-breaking molten droplet in plasma atomization for controlling the size of the produced powders [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 232: 121031.

[84] YURTKURAN E, ÜNAL R. Theoretical and experimental investigation of Ti alloy powder production using low-power plasma torches [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(1): 175-191.

[85] MOGHIMIAN P, POIRIÉ T, HABIBNEJAD-KORAYEM M, ZAVALA J A, KROEGER J, MARION F, LAROUCHE F. Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys[J]. Additive Manufacturing, 2021, 43: 102017.

[86] RAO L, RIVARD F, CARABIN P. Thermal plasma torches for metallurgical applications[M]//JIANG T, HWANG J Y, MACKEY P J, YUCEL O, ZHOU G. 4th international symposium on high-temperature metallurgical processing. Hoboken: Wiley, 2013: 57-65.

[87] 张玮,尚青亮,刘捷,刁微之,包崇军,王应武. 气体雾化法制备粉体方法概述[J]. 云南冶金,2018, 47(6): 59-63.
ZHANG W, SHANG Q L, LIU J, DIAO W Z, BAO C J, WANG Y W. Summary on powder preparation by gas atomization [J]. Yunnan Metallurgy, 2018, 47(6): 59-63.

[88] 吴文恒,王涛,范玎. 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 W H, WANG T, FAN D. Research progress on main preparation technologies of spherical metal powder for additive manufacturing[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45 (11): 76-83.

[89] 齐正鹏. 等离子同轴送丝雾化制粉设备设计及工艺研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2022.
QI Z P. Design and process research of plasma coaxial wire feeding atomization pulverizing equipment[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.

[90] 张清波. 等离子体雾化制粉过程建模及粉末质量控制研究[D]. 成都: 四川大学,2023.
ZHANG Q B. Modeling on the powder production process and powder quality control in plasma atomization [D]. Chengdu: Sichuan University, 2023.

[91] 曾克里,罗浩,朱杰,符乃科,陆向玲,潘超梅,陈珊珊,何鹏江. 丝材等离子雾化钛合金粉末研究进展[J]. 粉末冶金工业,2021, 31(6): 1-12.
ZENG K L, LUO H, ZHU J, FU N K, LU X L, PAN C M, CHEN S S, HE P L. The development of titanium alloy powder fabricated by wire plasma atomization process[J]. Powder Metallurgy Industry, 2021, 31(6): 1-12.

[92] 张庆磊,郝振华,李静,宋建勋,朱锦鹏,车玉思,舒永春,何季麟. 感应等离子体球化法制备球形金属粉体的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程,2020, 49(8): 2895-2903.
ZHANG Q L, HAO Z H, LI J, SONG J X, ZHU J P, CHE Y S, SHU Y C, HE J L. Research progress on preparation of spherical metal powders by induction plasma spheroidization[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(8): 2895-2903.

[93] QIU J E, YU D P, QU Y, XIAO Y, ZHANG F, ZHANG J, GAO Z J. In-flight droplet plasma atomization: A novel method f or preparing ultrafine spherical powders [J]. Advanced Powder Technology, 2025, 36(1): 104757.

[94] 侯旭初. 射频感应等离子球化制备球形 W 及 W-ZrC 粉的研究[D]. 郑州:郑州大学,2022.
HOU X C. Research on preparation of spherical W and W-ZrC powders by RF induction plasma spheroidization[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.

[95] GONCHAROV I S, RAZUMOV N G, SILIN A O, OZERSKOI N E, SHAMSHURIN A I, KIM A, WANG Q S, POPOVICH A A. Synthesis of Nb-based powder alloy by mechanical alloying ad plasma spheroidization processes for additive manufacturing [J]. Materials Letters, 2019, 245: 188-191.

[96] WANG J J, HAO J J, GUO Z M, WANG Y M. Preparation of spherical tungsten and titanium powders by RF induction plasma processing[J]. Rare Metals, 2015, 34(6): 431-435.

[97] 刘晓平,王快社,胡平,陈强. 感应等离子体制备高纯致密球形钼粉研究[J]. 稀有金属材料与工程,2016, 45(5): 1325-1329.
LIU X P, WANG K S, HU P, CHEN Q. Preparation of dense spherical molybdenum powder with high purity via induction plasma [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45 (5): 1325-1329.

[98] HAO Z H, CHEN Y H, FU Z H, GUO S, ZHU X Y, ZHOU F, SHU Y C, HE J L. A comparative study on spheroidization of sodium reduced and hydrogenation-dehydrogenation tantalum powder by RF plasma [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2021, 100: 105624.

[99] 邱振涛. 难熔金属(钨、铬)粉末的等离子球化处理及多孔材料制备[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.

中国知网 https://www.cnki.net

QIU Z T. Plasma spheroidization of refractory metal (W、Cr) powders and preparation of porous materials [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[100] 孙念光,向长淑,陈斌科,王强,王浩,任建强,康鑫,王超. 一种微米级粉末的微波等离子球化装置及方法: CN116921670 A [P]. 2023-10-24.
SUN N G, XIANG C S, CHEN B K, WANG Q, WANG H, REN J Q,KANG X, WANG C. A microwave plasma spheroidization device and method for micron-sized powders: CN116921670 A[P]. 2023-10-24.

[101] 张庆磊,郝振华,李静,宋建勋,朱锦鹏,车玉思,舒永春,何季麟. 感应等离子体球化法制备球形金属粉体的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程,2020, 49(8): 2895-2903.
ZHANG Q L, HAO Z H, LI J, SONG J X, ZHU J P, CHE Y S, SHU Y C, HE J L. Research progress on preparation of spherical metal powders by induction plasma spheroidization[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(8): 2895-2903.

[102] SEHHAT M H, CHANDLER J, YATES Z. A review on ICP powder plasma spheroidization process parameters[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2022, 103: 105764.

[103] 张茂原. 射频等离子球化装置设计改进研究[D]. 成都:电子科技大学,2024.
ZHANG M Y. Research on design improvement of radio-frequency plasma spheroidization device[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024,

[104] 刘博文. 射频等离子球化技术制备锆合金粉末的研究[D]. 成都:四川大学,2021.
LIU B W. Study on preparation of zirconium alloy powders by radio-frequency plasma spheroidization[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.

[105] 许贞元,原慷,彭浩然,陈星宇, 张鑫. 感应等离子球化钽粉制造研究[J]. 有色金属工程,2021, 11(6): 29-35, 117.
XU Z Y, YUAN K, PENG H R, CHEN X Y, ZHANG X. Study on the process of sphero tantalum powders by inductive plasma process[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(6): 29-35, 117.

[106] HAO Z H, FU Z H, LIU J T, ZHU X Y, ZHOU F, SHU Y C, YI J H, HE J L. Spheroidization of a granulated molybdenum powder by radio frequency inductively coupled plasma [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 82: 15-22.

[107] CHEN Y, ZHANG J Y, WANG B, YAO C G. Comparative study of IN600 superalloy produced by two powder metallurgy technologies: Argon atomizing and plasma rotating electrode process[J]. Vacuum, 2018, 156: 302-309.

[108] NIEY, TANG J J, HUANG J F, YU S, LI Y P. A study on internal defects of prep metallic powders by using X-ray computed tomography[J]. Materials, 2021, 14(5): 1177.

[109] KNYAZEV A E, MIN P G. Comparison of characteristics of VZHL718 alloy metal powder compositions produced by prep and viga methods after selective laser melting [J]. Metallurgist, 2024, 68(4): 537-551.

[110] ZHANG M, ZHANG Z M, LIU Q S. Research advances in close-coupled atomizer flow and atomizing mechanisms [J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2024, 62(7-8): 400-426.

[111] HUANG Y J, WANG Y, FAN H B, SHEN J. A TiAl based alloy with excellent mechanical performance prepared by gas atomization and spark plasma sintering[J]. Intermetallics, 2012, 31: 202-207.

(责任编辑:宫文婧)

中国知网 https://www.cnki.net