高性能球形金属粉末制备技术进展

高正江[1]，周香林[2]，李景昊[3*]，张国军[1]

1. 中航迈特粉冶科技 (北京) 有限公司，北京 100094
2. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室，北京 100083
3. 加拿大麦吉尔大学 机械工程系，蒙特利尔 QC H2A0C3

摘要：本文基于增材制造工艺对金属粉末的应用需求，概述了几种国际上高性能球形金属粉末制备技术，包括真空感应气体雾化（VIGA）、电极感应气体雾化（EIGA）、等离子雾化（PA）、等离子球化（PS）和等离子旋转电极（PREP），对比了气雾化粉末和旋转电极粉末用于增材制造零部件显微组织和力学性能差异。重点论述了粉末制备技术的发展趋势，为粉末制备技术的选择和增材制造选材、用材提供参考。

关键词：增材制造；球形粉末；雾化；显微组织；力学性能

中图分类号：TG174.4 文献标识码：A **文章编号**：1674-7127（2018）09-0001-09

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2018.03.001

A Review: High-Performance Spherical Metal Powder Preparation Methods

GAO Zhengjiang[1], ZHOU Xianglin[2], LI Jinghao[3*], ZHANG Guojun[1]

1.Beijing AMC Powder Metallurgy Technology Co Ltd. 100094, China

2.State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials at University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3.Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, QC H2A0C3, Canada

Abstract: Based on the rapid development of additive manufacturing, this paper summarizes several preparation techniques of high-performance spherical metal powder for 3D printing technology, including Vacuum Induced Gas Atomization (VIGA), Electrode Induced Gas Atomization (EIGA), Plasma Atomization (PA), Plasma Spheroidization (PS) and Plasma Rotating Electrode Process (PREP). The microstructural and mechanical properties of the final components using the gas atomized and plasma rotating electrode powders are compared. The aim of this work is to discuss the development tendency of gas atomization technologies, provide guidance for the selection of preparation methods and materials, and thus promote the industrialization of additive manufacturing.

Keywords: additive manufacturing; spherical powder; atomization; microstructure; mechanical properties

0 引 言

增材制造又称 3D 打印，是根据设计的三维模型，通过打印设备逐层增加材料来制造产品的技术，其属于快速成型技术范畴。与传统铸锻制造技术的“ 等材、减材 ”特点相比，增材制造无

作者简介：第一作者：高正江（1984-），男，硕士，高级工程师；**通讯作者** *：李景昊，jinghao.li@mail.mcgill.ca

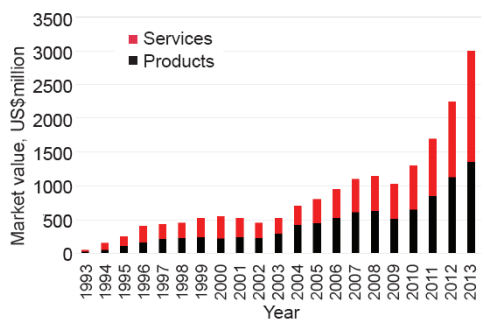
基金项目：国家重点研发计划（2017YFB0306100），国家自然科学基金（51271034）

需模具，在生产上可以实现结构优化、节约材料和快速制造，特别适合开发复杂结构、一体化、轻量化零部件。近年来，增材制造技术在全球航空航天、医疗、汽车、模具、文化创意等领域获得较快应用和发展。

金属增材制造是整个增材制造技术发展的重点。高性能金属粉末是金属增材制造工艺的直接性、关键性原材料，其品质性能和价格直接影响了增材制造零部件的冶金质量、综合性能和成本竞争力。增材制造工艺要求金属粉末原材料具有高球形度、良好流动性、较窄粒度分布、高纯净度和较低的气体杂质含量，对金属粉末材料制备技术提出了更高要求。高品质、低成本金属粉末材料作为增材制造的重要一环，已经成为美国通用电气公司、德国 EOS 等欧美知名增材制造公司技术产业布局的重点之一。

1 增材制造金属粉末市场

在过去 20 年，增材制造实现快速发展。1993 年增材制造产业份额不足 1 亿美元，到 2013 年，该市场份额已经达到 30 亿美元，市场份额持续增长。研究预测， 到 2021 年增材制造领域市场价值将继续扩大 5 倍。在这种趋势推动下，增材制造用原材料的需求量也持续增长。图 1 显示了增材制造用粉末的市场趋势，其中金属粉末的需求量在 2010 年后明显提升，但增材制造用金属粉末的市场也仅占整个市场的很小一部分 [1, 2]。数据显示，2014 年，增材制造用金属粉末的市场份额为 1.13 亿美元，占整个粉末冶金市场的 1%。随着增材制造应用爆发期的逐步到来，金属粉末的需求量将显著增长。



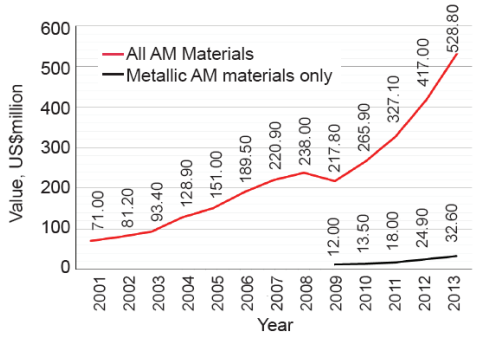


图 1 增材制造市场与金属粉末市场增长 [1]

Fig 1. Growth of Additive Manufacturing and Metal Powder Market[1]

2 增材制造用金属粉末制备方法

金属粉末的生产方法很多，其中包括固体破碎法、球磨法、雾化法、电解法和化学法等 [3]。对于增材制造来说，雾化法被认为是生产增材制造用金属粉末最理想的方法。其中真空感应气体雾化、电极感应气体雾化、等离子雾化被广泛采用，除此之外，等离子球化法和旋转电极法也逐渐用于增材制造粉体材料制备领域。

2.1 真空感应气体雾化

真空感应气体雾化（VIGA）法是全球应用最为广泛的一种制备先进金属粉末材料的技术，其基本原理是合金在真空室的坩埚中完成熔化、精炼和脱气过程，精炼完成的金属液倾倒进入预热中间包系统，金属液通过导流进入雾化器；随后金属液流被高压气体破碎、分散形成金属液滴进入雾化室，在飞行过程中球化、凝固形成金属粉末落入下方收集罐。气雾化的雾化介质为气体。为了减少雾化过程中粉末的氧化和杂质引入，通常采用惰性气体（氩气或氮气）作为雾化介质。

S.Ozbile 等 [4,5] 通过对气雾化过程中卫星粉的形成机理研究得出卫星粉颗粒一般表现为大颗粒粉体表面粘附有小颗粒。在气雾化过程中，由于雾化室内紊流的存在，不同粒度的液滴间的碰撞时有发生。当金属液滴在雾化气氛中飞行时，一方面，大颗粒比小颗粒需要更长的时间去凝固，于是在表面能的作用下，先凝固的小颗粒将倾向于粘附在未凝固的大液滴的表面；另一方面，大

颗粒比小颗粒飞行速度要慢，这种相对的速度差也造成了不同粒径颗粒之间的碰撞，导致颗粒之间的局部熔化和焊合。雾化过程中细粉颗粒越多，大颗粒形状越不规则，表面粗糙度越高，卫星粉形成的几率越大。

Isaac Chang 和 Yuyuan Zhao 等 [6, 7] 给出了碰撞过程中卫星颗粒和不规则颗粒形成条件和种类，对后续解决卫星颗粒和不规则颗粒形成具有借鉴意义。

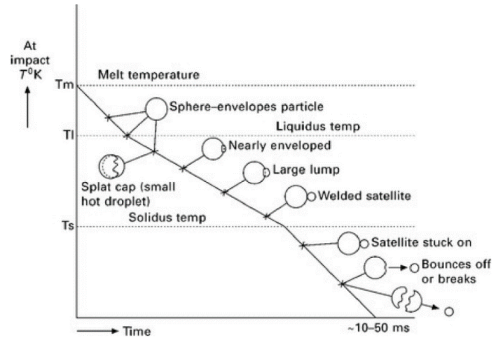
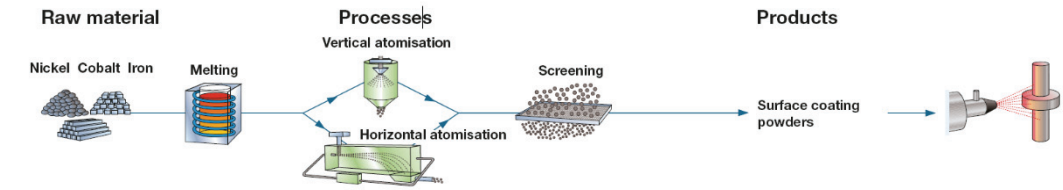


图 2 气雾化过程中卫星颗粒形成种类示意图 [6]

Fig 2. The formation of satellite particle during atomization[6]

真空感应气体雾化法制备金属粉末具有以下特点：（1）适用合金范围广。例如，高温合金、铝及铝合金、模具钢、工具钢、不锈钢、铜及铜合金等；（2）粉末粒度分布宽，可满足多种工艺用粉。例如，注射成型、增材制造、粉末冶金、喷涂、熔覆、焊接修复等；（3）粉末球形度好，细粉收得率高，粉末组织细化、均匀；（4）对原材料尺寸基本无要求，工作灵活性高；（5）坩埚容量 5-2000 公斤，批量生产效率高。

欧美真空感应气雾化技术研究起步较早，并最先进行工业化生产应用，在技术水平和全球市场占有率方面处于绝对领先地位。以瑞典金属粉末生产服务商赫格纳斯（Höganäs）、美国卡朋特科技（Carpenter）公司、德国世泰科（H.C.Starck）集团 [11] 为代表，采用感应熔炼气雾化技术生产球形金属粉末，产品种类涵盖镍基、铁基和钴基合金，粉末应用领域涉及注射成型、增材制造、表面沉积、超音速喷涂、等离子堆焊、激光熔覆等。



Torch	Oxygen		Acetylene		Powder	Air		Particle size
	Bar	Flow	Bar	Flow	Flow	Bar	Flow	µm
Metco 5P/6P	1.7	34	1.0	34	17			45 - 125
Terodyn 2000		35		48				36 - 106 45 - 106
Castodyn 8000	4		0.7					36 - 106 45 - 106
Colmonoy J	2.0	50	1.0	30		1.7	55	36 - 106 45 - 106
Uni Spray Jet	4		0.5			0	0.5	36 - 106 45 - 106

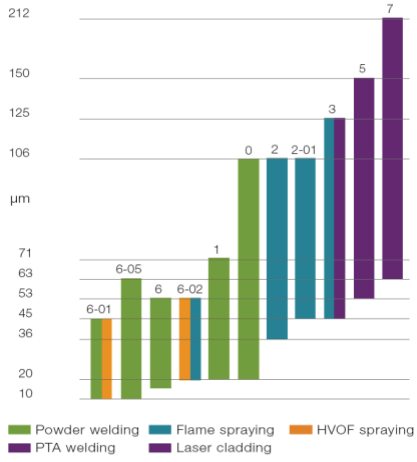


图 3 赫格纳斯粉末生产流程及工艺参数 [8]

Fig 3. Production process and patameters of Hergnas[8]

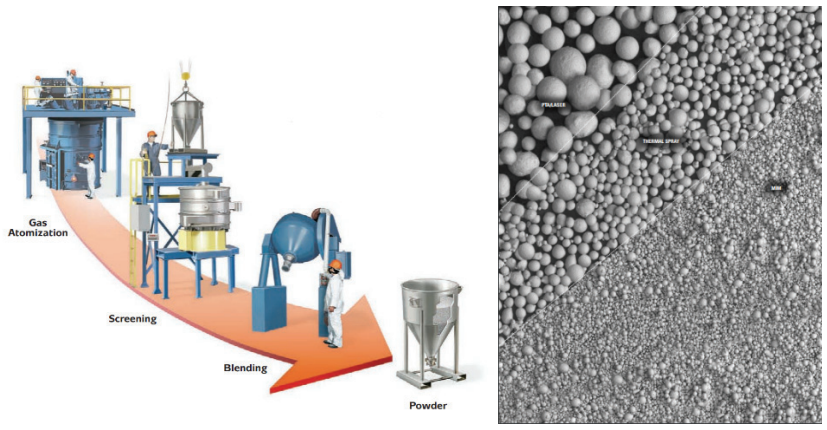


图 4 Carpenter 公司粉末生产工艺流程及粉末形貌 [9]

Fig 4. Production process and morphology of the powder of Carpenter[9]

我国北京航空材料研究院、北京钢铁研究总院、中国科学院金属所、北京矿冶研究总院、北京有色金属研究总院等单位先后自上世纪 70 年代末开展先进合金粉末真空熔炼气雾化技术研究，突破多项技术瓶颈，其中北京航空材料研究院开展大型真空感应气雾化制粉炉装置国产化研制和镍基高温合金粉末材料研究，并成功实现我国航空发动机用超高纯净镍基高温合金粉末材料的自主供给。面向金属粉末在增材制造领域应用的新需求，国内众多院所高校、企业正在研究开发先进真空感应气雾化制粉和粉末处理检测技术，致力于开发应用镍基、钴基、铁基、铝基、铜基等增材制造用金属粉末新材料。

2.2 电极感应气体雾化（EIGA）

活性金属及其合金在熔化条件下容易与陶瓷坩埚反应，造成粉末严重污染，甚至是安全事故，为此钛合金制粉的熔炼技术很有挑战。为了解决熔炼难题，欧美研究发展了一种电极感应纯净熔炼技术，即采用锥形铜感应线圈非接触式感应熔化钛合金棒尖，形成自由降落的液滴或液柱，再进一步的雾化制粉。其具体原理是将合金加工成棒料安装在送料装置上，对整个装置进行抽真空并充入惰性保护气，电极棒以一定的旋转速度和下降速度进入下方锥形线圈，棒料尖端在锥形线圈中受到感应加热作用而逐渐熔化形成熔体液流，在重力作用下熔体液流直接流入或滴入锥形线圈下方的非限制型雾化器，高压惰性气经气路管道进入雾化器，在气体出口下方与金属液流发生交互作用将金属液流破碎成小液滴。与真空感应气雾化方法相同，液滴在雾化室飞行过程中，通过自身表面张力球化并凝固形成金属粉末。

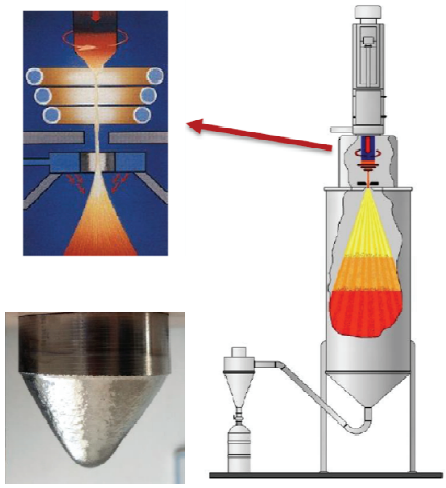


图 5 电极感应气雾化装置原理示意图

Fig 5. Schematic of Electrode-induction gas atomization device

电极感应气体雾化法制备金属粉末具有以下特点：（1）其熔化过程不与坩埚接触，也适合制备各种活性金属，例如钛、锆、铌等；（2）粒度分布宽，可满足多种工艺用粉。例如，注射成型、增材制造、粉末冶金、喷涂、熔覆、焊接修复等；(3)

粉末纯度高、球形度好、组织均匀；（4）相比于 PREP，细粉收得率高，粉末 D50 可以控制在 50-100 μm 左右。

德国 ALD 公司通过优化电极感应气雾化技术工艺，先后设计开发了多种型号电极感应气雾化制粉炉设备，用于钛及钛合金粉末材料的科研和生产，该类设备在全球范围内获得推广。日本 OSAKA 钛公司采用电极感应气雾化法制备的 Ti6Al4V 粉末中位粒径 D50 达到 40 微米左右，粉末球形度高，卫星颗粒少，非金属夹杂少，在增材制造领域获得应用 [13, 14]。

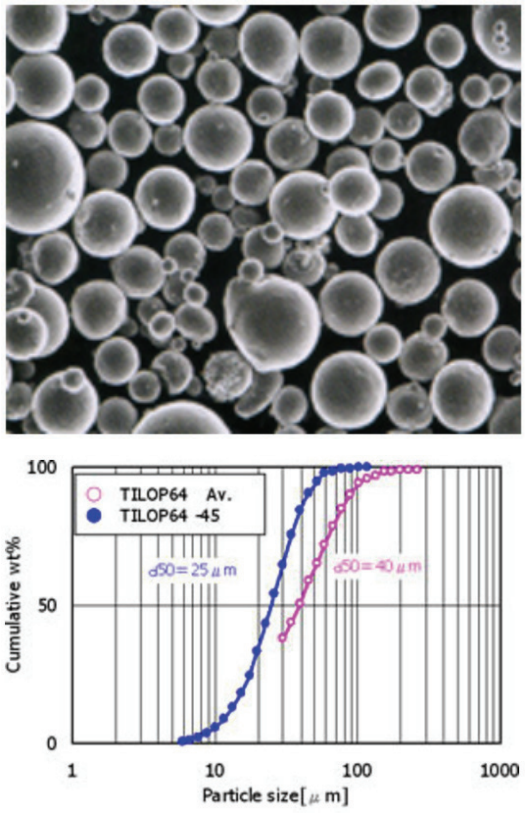


图 6 OSAKA 钛公司生产的球形 Ti6Al4V 粉末形貌及粒度分布图 [14]

Fig 6. SEM and Size distribution of Ti6Al4V powder produced by OSAKA[14]

我国中科院沈阳金属所、中航迈特、飞而康、宁波兵器科学研究院、上海材料研究所、北京工业大学、北京钢铁研究总院等先后引进或自主研制电极感应气雾化制粉炉设备，开展增材制造用钛合金粉末研究。其中中航迈特公司自主研制多套大容量钛合金电极感应气雾化制粉炉装置，实现钛合金粉末的批量生产，粉末粒径低于 53 μm 的 Ti6Al4V 粉末比重超过 40%，与进口设备技术水平相当。

2.3 等离子雾化（PA）

等离子雾化法实质也是一种气雾化制粉技术，其原理是在惰性气体保护下使用等离子矩熔化金属丝同步利用等离子体冲击金属液流使之破碎形成金属粉末。通过等离子枪结构优化、多项复杂工艺参数来控制粉末的粒度分布和形貌，粉末的化学成分由丝材的成分控制。

等离子雾化法制备金属粉末具有以下特点：（1）不与陶瓷坩埚接触，粉末纯净；（2）粉末球形度高，卫星球少，流动性好；（3）粉末粒度分布范围宽（0-250 μm），可满足多种工艺用粉。例如，注射成型、3D 打印、粉末冶金、喷涂、熔覆、焊接修复等；（4）适合制备各种活性金属和高熔点金属，例如，钛、锆、铌、钼、钽、钨及其合金；（5）对原材料尺寸要求苛刻。

加拿大 AP&C 公司是全球等离子雾化技术的领先者，该公司拥有成套技术专利。目前，该公司的等离子雾化设备装备有全自动监控系统和气体回收，保证产品质量稳定性同时降低生产成本。该项技术已经应用于大规模生产高品质球形金属粉末，粉末种类涉及纯钛及钛合金、镍基合金等。图为 AP&C 公司等离子雾化技术生产的 Ti6Al4V 金属粉末形貌及粒度分布，经测试，0-25 μm 粉末不具有流动性，15-45 μm 粉末小于 35s，45-106 μm 粉末小于 25s。

2.4 等离子球化制备球形金属粉末（PS）

等离子球化制粉，其基本原理是将不规则的金属粉末经过热等离子气体，使金属颗粒被重新熔化成液滴并自由落下，通过表面张力使金属液滴重新团聚成球形金属粉末。该工艺适用于高熔点金属及其合金的球化过程，例如钽、钨、钛、钼、铌及其合金，对于低熔点金属，容易造成成分烧损；粉末的球化效率和送粉率有关。

目前，英国 LPW 公司使用等离子球化设备生产钽、钨、钛球形金属粉末。除此之外，LPW 公司也逐渐将该技术用于旧粉末的再循环处理，

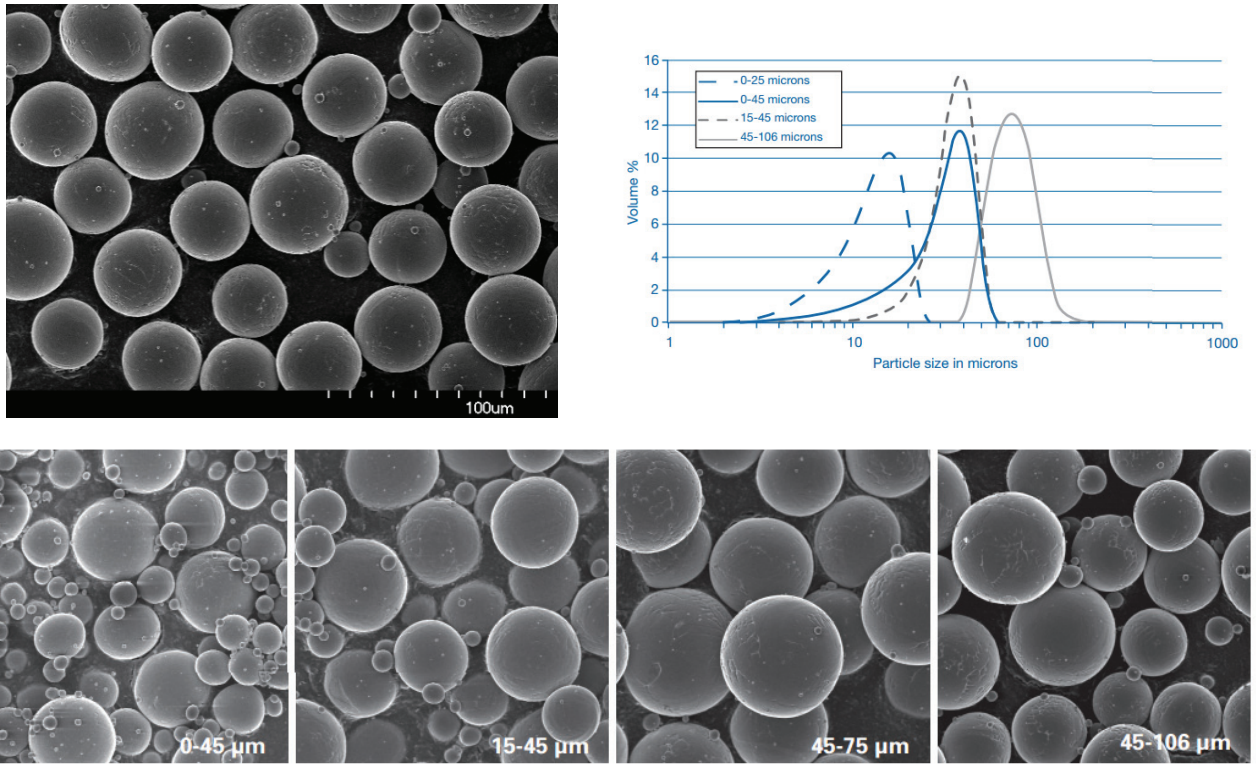


图 7 等离子雾化球形粉末形貌及粒度分布图 [15,16]

Fig 7. SEM and Size distribution of metal powder produced with plasma atomization [15,16]

通过该技术改变粉末的尺寸，减少粉末中的氧含量。经测试，处理后的粉末的使用性能与原始粉末性能相当。

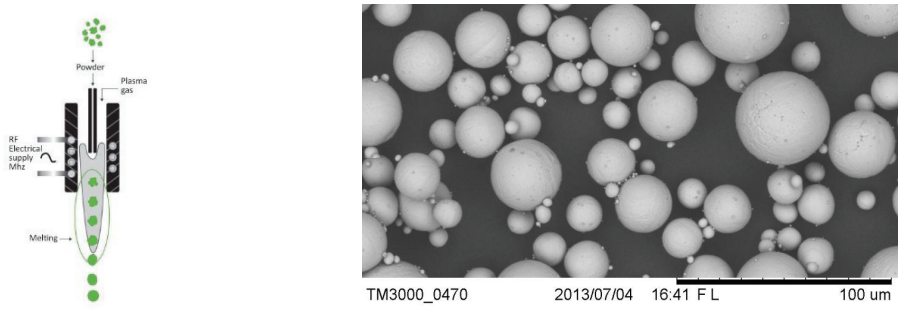


图 8 LPW 公司等离子球化装置原理图及粉末形貌 [17]

Fig 8. Schematic of Plasm spheroidization device of PYROGENESIS and the morphology of its product[17]

我国中科院过程所、北京科技大学、苏州英纳特公司等先后开展射频等离子球化技术研究，实现了非球形难熔金属粉体的整形处理，用于增材制造工艺试验研究，但目前国内非球形粉体原材料质量参差不齐，尤其是钛及钛合金非球形粉体普遍氧含量超标，达不到技术质量要求，急需提升工艺技术水平。

2.5 等离子旋转电极法（PREP）

等离子旋转电极法属于离心雾化的一种，其主要原理是将合金制成自耗电极，在高速旋转的

状态下接收电子或离子流，使自耗电极端部熔化。熔融液态金属在离心力的作用下形成小液滴飞射，由于表面张力作用，液滴凝固成球形的粉末颗粒。该技术起源于 Starmet 公司（核材料公司），并在 1972 年申请美国专利。

该技术的核心是等离子枪技术、传动机构设计和金属棒材转速控制，转速越高，棒料前端液膜所受的离心力越大，同等材料和工艺参数下制备的粉末越细小，细粉收得率越高。等离子旋转电极法具有以下特点：（1）其熔化过程不与坩埚接触，有效避免了杂质引入，适合制备各种活性金属，例如钛、锆等；（2）制备出的粉末球形度高，有利于提高粉末的流动性和堆积密度；（3）粉末的粒度分布区间窄，粉末较粗；（4）粉末的成分均匀性不可控；（5）电极棒旋转速度较高，对设备电极及传动要求比较高，制备工艺不易控制。（6）粉末生产效率一般，需要首先制备合金棒料，制粉成本较高。

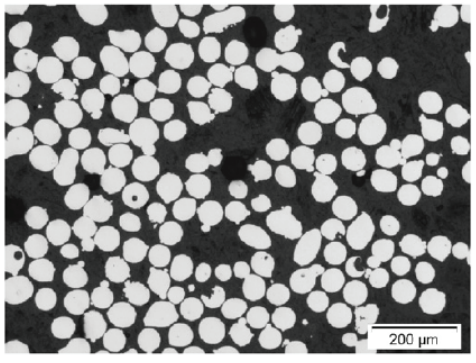
目前等离子旋转电极技术主要在俄罗斯、乌克兰、中国应用较多，在欧美使用较少，俄罗斯一直采用该技术生产航空发动机涡轮盘用镍基高温合金粉末。我国自主研发的等离子旋转电极装置整体转速偏低，粉末粒度偏粗大，与进口装备相比仍有较大差距。北京钢铁研究总院在等离子旋转电极成套装备国产化方面进步显著。西北有色院、中航迈特先后从俄罗斯、乌克兰引进高转速等离子旋转电极设备。

3 金属粉末对增材制造用零部件显微组织及力学性能影响

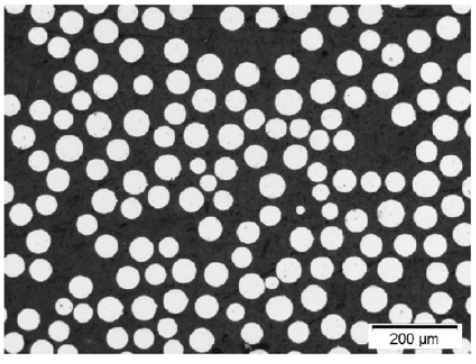
选区激光熔化（SLM）工艺一般使用 15-45 μm 或 15-53 μm 粒度范围微细球形粉末产品。目前，该类产品往往采用气雾化工艺制备，具体包括钛基、镍基、钴基、铁基、铝基、铜基等粉末材料，这主要是由于该工艺细粉收得率较高，15-45 μm 或 15-53 μm 粒度范围粉末球形度良好，卫星球少，粉末组织均匀细化，化学成分无偏析或微偏析，零件打印性能满足设计使用要求。

电子束选区熔化（EBSM）工艺一般选用 45-105 μm 粒度范围粉末，激光沉积成形工艺则选用 53-150 μm 或 75-250 μm 粒度范围粉末。该类粉末的制备方法包括气雾化（GA）和等离子旋转电极法。

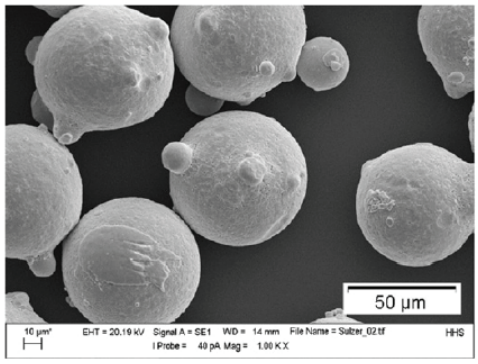
国内外学者对上述几种工艺制备的金属粉末打印工件的组织性能进行了大量研究。有研究者对比了气雾化和 PREP 粉末用于激光沉积增材制造零部件的性能，在同一工艺条件下，使用气雾化法制备的镍基高温合金粉末成型零部件的孔隙率是 PREP 法的 25 倍，这主要是由于金属粉末流动性以及空心粉等因素造成零部件成型过程中的微裂纹和孔洞[18]。另外，在微观组织方面，Zhong 等使用气雾化法和 PREP 法制备的 Inconel 718 粉末，利用激光金属沉积技术研究了不同工艺制备的金属粉末对零部件显微组织和力学性能的影响。结果表明，相比于 PREP 粉末，使用气雾化粉末成型的零部件具有更高的孔隙率和更大的稀释区，但气雾化粉末成型的零部件显微组织结构优于 PREP 粉末，表现为显微组织更细小，铌元素偏析降低，Laves 相含量减少，这主要是由于气雾化制备粉末的冷却速率高于 PREP 法所造成的[19, 20]。



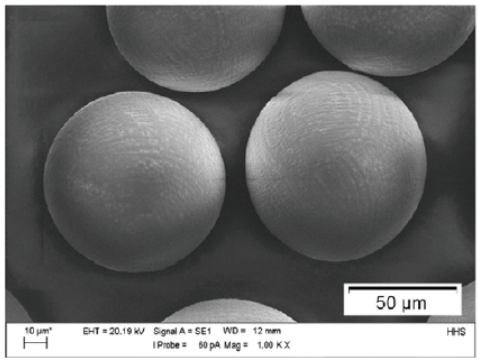
(a) GA powder



(b) PREP powder



(c) GA powder



(d) PREP powder

图 9 气雾化和 PREP 制备金属球形粉末形貌对比 [19]

Fig 9. SEM of Gas Atomization (GA) powder and Plasma Rotating Electrode Process (PREP) powder[19]

Arash 等人[21] 利用激光沉积技术将气雾化和 PREP 工艺制备的 Ti6Al4V 粉末成型为 50mm*50mm*10mm 的零部件，对比结果表明，使用气雾化粉末成型的零部件孔隙数量是相同工艺下 PREP 粉末成型零部件的 3 倍。但于此同时，气雾化粉末成型零部件的平均晶粒尺寸更细小。

目前气雾化粉末用于增材制造零部件的优势在于工艺成熟稳定，细粉收得率高，组织细小、元素偏析少，有利于提高零部件力学性能，降低选区激光熔化工艺用粉成本；但空心粉和卫星粉等因素增加了零部件内孔隙含量和微裂纹增多的风险；PREP 粉末用于增材制造零部件的优势在于空心粉和卫星球极少，零部件成型致密，表面粗糙度小，对断裂及疲劳性能有利，但同时也存在细粉收得率较低，用于 SLM 工艺比较困难，同时粉末由于冷速不足引起零部件显微组织粗大、元素偏析明显，处理不当将降低零部件力学性能。

4 制粉技术发展趋势

增材制造工艺对于金属粉末材料的要求越来越高，往高纯、球形、低成本制造方向发展。气雾化粉末技术发展有两大方向：一是进一步提高 15-45 μm 或 15-53 μm 粒度范围粉末收得率，大幅降低选区激光熔化工艺用粉成本，建立和完善 SLM 专用制粉工艺技术体系；二是通过工艺优化解决或减轻粗颗粒粉末（53-150 μm）空心粉、卫星粉、非金属夹杂缺陷，如基于超高纯净熔炼工艺、新型雾化喷嘴设计和热气体雾化技术，制备出卫星粉极少、空心粉可控的粉末材料，以满足激光沉积成形、熔敷修复等应用需求。PREP 粉末技术发展的重点是：研究开发高转速或超高转速等离子旋转电极制粉设备，如 30000-50000 r/min 工业级 PREP 设备，进一步提高 15-45 μm 或 15-53 μm 粒度范围粉末收得率，提高材料利用率，降低细粉成本；同时提升原材料棒材纯净冶炼水平，减轻元素偏析，有效控制大尺寸非金属夹杂物和高熔点偏析相的产生。射频等离子球化技术目前存在电源及加热体易损、非球形原材料质量差、生产效率低等问题，需要进一步提升工艺技术稳定性和批量处理能力。另外，我国急需开发具有自主知识产权的等离子雾化技术，填补国内技术空白，实现国产化。

总体上讲，任何一项制粉技术均有其自身的优势和劣势，技术上都有提升空间。仅靠一种制粉技术无法实现增材制造用全部合金系粉末材料的高品质、低成本制造。制粉技术工艺的选择应充分考虑某一目标合金系材料的工艺适应性和粉末的成形工艺特征，以最低成本、最可靠工艺方案为核心目标。未来，单一制粉技术在发挥极限优势、补强自身短板的同时，仍须多工艺、多学科交叉互鉴，取长补短，走多工艺复合低成本制造之路。

从增材制造金属粉末材料国产化角度看，国产粉末与进口粉末相比，仍存在批次不稳定、打印参数包不匹配、制粉技术短板造成成本居高不下等问题，我国应在以下几方面开展工作：（1）加强对大容量成套制粉装备及工艺技术攻关和国产化建设，掌握核心装备工艺技术，形成自主知

识产权；（2）加强国产粉末应用技术研究，重点开展国产粉末与欧美知名品牌打印设备相匹配的工艺参数开发，开展应用验证研究，做大出口，提升国产粉末技术质量标准；（3）开展低成本粉末制备技术储备研究，嫁接开发颠覆性低成本粉末制备技术。

参考文献

[1]WOHLERS A. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry[R]. Inc: Fort Collins, CO, USA, Wohlers Report, 2014.

[2]DAWES J, BOWERMAN R, TREPLETON R, et al. Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain[J]. Technology Review, 2015, 59(3): 243-256.

[3] 尹春雷 , 冀国娟 . 水热氢还原制粉技术及其在热喷涂领域的应用 [J]. 热喷涂技术 , 2009(2): 68-70.

[4]OZBILEN S. Satellite formation mechanism in gas atomised powders[J]. Powder Metallurgy, 1999, 42(1): 70.

[5] 马尧 , 鲍君峰 , 胡宇 , 等 . 真空气雾化参数对粉末粒度及形貌的影响研究 [J]. 热喷涂技术 , 2014(1): 45-48.

[6]CHANG I, ZHAO Y. Advances in powder metallurgy: Properties[J]. processing and applications. 2013.

[7] 李会谦 , 田玉亮 . 雾化合金粉末形状及合金组元变化规律 [J]. 热喷涂技术 , 2013(2): 48-51.

[8]PULVERMETALL M D, et al., POWDERS & OTHER ES SUPPLIERS[J].(参考文献补充完整)

[9]A World of Capabilities[EB/OL]. Carpenter Technology Corporation.2018 www.cartech.com,

[10]Thermal Spray Powders. AMPERIT, Technology Metals[EB/OL]. H.C.Starck,2017 www.hcstarck.com.

[11]Atomized Metal Powders & Alloys. AMPERIT, Technology Metals[EB/OL]. H.C.Starck, 2017 www.hcstarck.com.

[12]Atomized Powder Program for additive manufacturing. AMPERIT, Technology Metals[EB/OL]. H.C.Starck, 2017. www.hcstarck.com.

[13]OSAKA Titanium technologies Co., L., Establishment of Titanium Powder Technology for Additive Manufacturing[R]. 2016.

[14]L. Gas Atomized Titanium Powder for Additive Manufacturing and Metal Injection Molding Applications[EB/OL]. OSAKA Titanium technologies Co., 2018. http://www.osaka-ti.co.jp.

[15]COATINGS, A.P. Titanium alloy powder: Ti-6AI-4V[R]. 2018.

[16]PYROGENESIS. Plasma Atomized Metal Powders[R]. 2018

[17]Power Production[EB/OL]. LPW,2018. www.lpwtechnology.com.

[18]Bai, Q Lin J. Review and analysis of powder prior boundary (ppb) formation in powder metallurgy processes for nickel-based super alloys. [J] Powder Metall Min, 2015, 4: 127.

[19]Zhong C, 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.

[20]Segerstark A. Additive Manufacturing using Alloy 718 Powder Influence of Laser Metal Deposition Process Parameters on Microstructural Characteristics[J]. Klinische Wochenschrift, 2015, 10(4):149-153.

[21] Hatefi ,Arash.Direct laser fabrication of Ti-5553[D]. University of Birmingham. 2013.

（上接 37 页）

[11] Gong T, Yao P, Zuo X, et al. Influence of WC carbide particle size on the microstructure and abrasive wear behavior of WC-10Co-4Cr coatings for aircraft landing gear[J]. Wear, 2016, 362-363: 135-145.

[12] Stewart D A, Shipway P H, Mccartney D G. Microstructural evolution in thermally sprayed WC-Co coatings: comparison between nanocomposite and conventional starting powders[J]. Acta Materialia, 2000, 48(7): 1593-1604.

[13] Coulson W, Harris S J. The microstructure of WC-Co coatings produced by HVOF spraying with liquid fuel[J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 1997, 75: 108-112.

[14] 姬寿长，李争显，杜继红，等．Ti6Al4V 合金表面超音速火焰喷涂 WC-12Co 涂层组织及相分析 [J]．稀有金属材料与工程，2012，41(11)：2005-2009.

[15] Hong S, Wu Y P, Gao W W, et al. Microstructural characterisation and microhardness distribution of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating[J]. Surface Engineering, 2014, 30(1): 53-58.

[16] Moreau C, Cielo P, Lamontagne M, et al. Temperature evolution of plasma-sprayed niobium particles impacting on a substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 1991, 46(2): 173-187.