

DOI: 10.11973/jxgccl202111014

增材制造用球形金属粉末主要制备技术的研究进展

吴文恒, 王 涛, 范 玎

(上海材料研究所, 上海 3D 打印材料工程技术研究中心, 上海 200437)

摘要: 球形金属粉末作为金属增材制造的重要原材料, 其特性对增材制造制件性能具有重要的影响。高效制备高品质球形金属粉末成为促进增材制造技术升级和产业化应用的重要发展方向。介绍了主要的球形金属粉末制备技术, 包括气雾化法、等离子旋转电极雾化法和等离子雾化法, 重点论述了技术原理和重要工艺参数对粉末特性的影响规律, 并展望了 3 类技术的未来发展方向。

关键词: 增材制造; 球形金属粉末; 气雾化; 等离子旋转电极雾化; 等离子雾化

中图分类号: TF123.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2021)11-0076-08

Research Progress on Main Preparation Technologies of Spherical Metal Powder for Additive Manufacturing

WU Wenheng, WANG Tao, FANG Ding

(Shanghai Engineering Research Center of 3D Printing Materials, Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: As a main raw material for metal additive manufacturing, spherical metal powder characteristics play an important role in the performance of additive manufacturing parts. The efficient preparation of high-quality spherical metal powder has become an important development direction to promote the upgrading of additive manufacturing technologies and industrial applications. The main preparation methods of spherical metal powder including gas atomization, plasma rotating electrode atomization and plasma atomization are introduced. The technical principle and the influence of important process parameters on powder characteristics are discussed, and the future development direction of these three types of technologies is prospected.

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

0 引言

近年来, 增材制造技术的快速发展使增材制造行业规模得到迅速扩大, 也促使增材制造的产业格局逐步完善, 目前增材制造已成为智能制造和先进制造的关键模块。在此过程中, 金属增材制造技术完成了由最初的学术理念到工业化应用的蜕变, 并发展成为增材制造产业体系中最具潜力的重要技术分支, 更是增材制造技术更新迭代的显著标志。

金属增材制造使用的主要原材料为金属粉末, 制备金属粉末的主要方法有机械破碎法、雾化法、还原法、电解法、氢化脱氢法等。其中, 雾化法中的气

雾化法、等离子旋转电极雾化法和等离子雾化法可制备球形金属粉末, 并且粉末的化学成分均匀、氧含量低、球形度高, 尤其适用于金属增材制造, 而球形金属粉末特性也成为决定成形制件性能的先决条件。增材制造产业的快速发展带动了球形金属粉末的巨大市场需求^[1], 因此如何高效制备高品质球形金属粉末成为增材制造技术发展变革的关键^[2]。为了给增材制造技术研究及粉末原材料耗材生产领域的研发人员提供借鉴, 作者对增材制造用球形金属粉末的主要制备方法进行了介绍, 综述了制备原理、生产设备结构、重要工艺参数和未来发展方向。

1 气雾化法

1.1 技术原理

气雾化法(Gas Atomization, GA)起源于 19 世

收稿日期: 2021-08-21; 修订日期: 2021-10-19

基金项目: 上海材料研究所技术创新项目(20SG-14)

作者简介: 吴文恒(1971—), 男, 安徽枞阳人, 高级工程师, 学士

纪 20 年代,是利用高速气流冲击金属熔液,将气体动能转化为微小金属熔滴的表面能,最终冷却获得球形金属粉末的工艺^[3]。为解决活泼金属粉末制备的难题,用惰性气体作为雾化介质,进而形成了惰性气体雾化法(Inert Gas Atomization, IGA);随后为提升金属粉末的品质,将真空熔炼技术与惰性气体雾化技术相结合,发展出真空气雾化法(Vacuum Gas Atomization, VGA),可显著降低设备内部的氧含量,有效控制合金元素的氧化烧损和夹杂,提高粉末的纯净度,并逐渐成为气雾化制粉的主流方法^[4-5]。真空气雾化技术在控制合金元素成分偏析方面具备明显优势,结合工艺调整,可改善合金元素的固溶度、第二相尺寸形貌及分布等^[6]。理论上任何能够熔化形成互熔合金熔液的金属,都能够通过气雾化的方式制备成金属粉末,这也为扩展粉末材料种类和新材料开发提供了良好的技术手段。

通过气雾化法获得的金属粉末特性及目标粒度段的收得率主要决定于雾化器结构。早期的雾化器主要分为自由落体式(Free-fall Gas Atomization, FFGA)和限制式(Confined Gas Atomization, CGA)^[7-8]两种类型,其结构如图 1 所示。采用自由落体式喷嘴雾化时,金属熔液从陶瓷导流嘴流出至喷嘴气流汇聚点之间呈现自由落体状态,该喷嘴结构设计简单,不易发生堵塞,并且雾化工艺控制简单,适用于生产较大粒径($50\sim 300\ \mu\text{m}$)的粉末^[9]。为了提升小粒径金属粉末的收得率,研发出限制式喷嘴,在雾化时,陶瓷导流嘴将金属熔液直接引导进入雾化区,大大缩短了气流在破碎金属熔液前的飞行距离,显著提升了雾化效率,但限制式喷嘴结构设计紧凑,装配要求高,气体对导流嘴冷却作用强,易导致金属熔液“结瘤”和上翻引起导流嘴堵塞,因此雾化工艺控制较难^[10]。到 20 世纪 80 年代中期,限制式喷嘴结构得到优化,通过减小导流嘴直径缩短

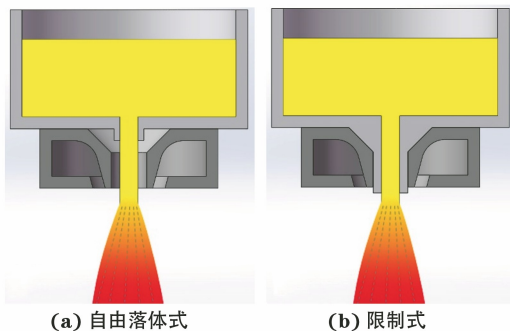


图 1 雾化器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of atomizers: (a) FFGA and (b) CGA

高压气流出口到金属液流的距离,使高速气流在短距离内达到破碎金属液流的效果,显著降低气流喷射的能量衰减,提高气体动能传输效率,从而提高雾化效率和细粉收得率,由此形成紧耦合结构喷嘴;采用这种结构喷嘴雾化制备的粉末粒径分布窄,并可明显提高粉末的冷却速率^[11]。

在增材制造用球形金属粉末的制备技术中,基于自由落体式 and 限制式/紧耦合式结构喷嘴与真空感应熔炼技术的应用,分别对应电极感应熔炼惰性气体雾化(Electrode Induction Melting Gas Atomization, EIGA)和真空感应熔炼惰性气体雾化(Vacuum Induction Melting Inert Gas Atomization, VIGA)两种技术路径,其设备原理如图 2 所示。其中,典型的 EIGA 设备熔炼雾化技术由德国 Leybold 公司发明^[12],后由德国 ALD 公司结合真空技术制造出 VIGA 设备。EIGA 设备以合金棒材为原料,棒材底部呈锥状,熔炼时伸入锥形感应线圈中,棒料底端熔化形成的熔滴经喷嘴中心孔时被惰性气体雾化后冷却得到球形金属粉末。由于 EIGA 技术采用无坩埚式熔炼,并且通常使用氩气雾化,更适用于活泼金属(如钛合金)或纯度要求高的合金(如医用 CoCrMo 合金、镍基高温合金等)粉末制备,此外相

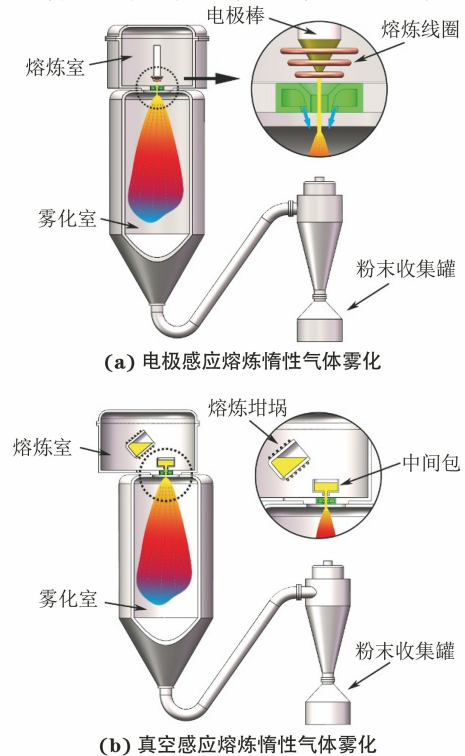


图 2 气雾化设备原理示意

Fig. 2 Schematic of gas atomization apparatus principle:

(a) EIGA and (b) VIGA

比传统的自由落体式雾化方法,由于棒料锥角熔化形成的金属液流较细,因此雾化后更容易得到粒径细小的金属粉末。VIGA 技术则是采用坩埚盛放金属熔液,金属熔液经中间包和导流嘴后直接进入雾化区,最终雾化获得球形金属粉末。

气雾化法可轻松实现规模化生产,是目前增材制造用球形金属粉末的主要生产方式。气雾化法制备的金属粉末冷却速率快、成分均匀、球形度高、粒度分布较宽,其中:15~53 μm 粒径范围的粉末收得率可达 35%~45%,可用于选区激光熔化技术;53~150 μm 粒径范围的粉末则可用于同轴送粉的激光立体成型技术。

1.2 重要工艺参数

在气雾化过程中,影响雾化效率和粉末特性的重要工艺参数有雾化介质、雾化压力、金属熔液过热度、金属液流直径和雾化喷射角度等。

常用的雾化介质为氮气、氩气。雾化介质主要与金属熔液进行能量交换和热量交换,进而对金属粉末的化学成分、粒径分布、颗粒形态等理化特性产生影响^[13]。雾化介质的温度越高,气流喷射速度越快,对金属熔液的冲击力越大,金属熔液破碎得越充分。同时,雾化介质的自身冷却速率也会影响金属熔滴的冷却效果及金属粉末形貌。

雾化压力是影响金属粉末特性的主要因素,也是雾化介质破碎金属熔液,将气体动能转化为金属熔滴表面能的重要能量来源,对金属粉末的粒径分布及表面形貌有直接影响。在一定压力范围内,金属粉末的粒径随雾化压力的增加而减小^[14]。当雾化压力持续增大时,气体流量增加,生产成本提高,气体的冷却能力加强,堵塞中断的风险加大;同时,雾化气流场中负压逐渐降低,对金属熔液的抽吸效果逐渐减弱,甚至产生向上的反冲力,导致金属熔液在雾化喷嘴或导流嘴处堵塞,进而降低气雾化的稳定性和雾化效率。

金属熔液过热度是指雾化前金属熔液温度与金属熔点的差值。过热度主要影响金属熔液的黏度^[15]。金属熔液的黏度通常随温度的升高而减小。在一定温度范围内增加过热度,金属熔液黏度降低,有利于被高压气体充分破碎,获得细小粒径的金属粉末,同时增加过热度也可使金属熔滴在飞行过程中的冷却和凝固时间延长,更容易获得高球形的金属粉末。

金属液流直径主要由导流嘴孔径控制。在相同

雾化压力条件下,金属液流直径减小,单位时间内金属液流被冲击破碎得更加充分,细粉收得率也会相应增加,但也会减少金属熔液的热量,在高压气体的冷却作用下,增加了发生堵塞中断的风险。

雾化喷射角度主要影响雾化区的抽吸力及气流的动能利用率。雾化喷射角度越小,雾化区的抽吸力越大,金属熔液流速越快,在相同雾化气体流量下金属熔液破碎得越不充分,并且导流嘴出口位置与雾化气体交汇点的距离越大,气流速度在喷射过程中衰减得愈加明显,导致高速气流动能利用率降低,因而不易获得细小的金属粉末;相反,雾化喷射角度越大,导流嘴出口处到气流交汇点处的距离越短,气流的动能利用率越高,金属粉末粒径较小,但雾化喷射角度过大会使雾化区内的抽吸力减小甚至转变成反向压力,导致金属熔液反喷,严重影响雾化生产的稳定性。

1.3 发展方向

(1) 基于 De Laval 超音速喷嘴的新型雾化器结构设计。将具有收缩-扩张形态的 De Laval 喷嘴应用于雾化器从而获得超音速的喷射气流,以提升雾化效率和细粉收得率,已经成为目前气雾化生产领域中较为成熟的技术,而具有复合效果的新型雾化器结构设计将会是今后气雾化技术的重要发展方向。对雾化器进行结构优化设计,使雾化器同时具备 De Laval 喷嘴形态和能形成共振效应的 Hartmann 振动管结构,可在雾化过程中获得超音速喷射气流的同时产生 80~100 kHz 脉冲频率的 Hartmann 共振,从而形成超声雾化,进而显著提升高速气流的破碎效果^[16-17]。此外,基于 De Laval 喷嘴的层流气体雾化技术(Laminar Flow Gas Atomization, LFGA),能克服常规气雾化过程中气流扰动以及能量损失大等问题,可更好地控制金属粉末的粒径分布,在雾化时喷嘴处气流和金属熔液均为层流状态,气流喷射方向平行于金属液流,在剪切力和气流挤压的作用下金属液流发生变形,液流直径不断减小,直至液流呈细丝状,并出现层流纤维化现象^[6],该技术可有效提升雾化效率,同时结合能产生超音速气流的 De Laval 喷嘴结构^[18],可使细粉收得率得到大幅提升;层流雾化气体消耗量相对较低,可大幅降低生产成本。

(2) 热气体雾化技术。热气体雾化技术是在传统气雾化技术的基础上,通过提高雾化介质温度,使气体在雾化器喷嘴出口处膨胀,达到提升喷射速度

的目的^[19]。在相同雾化压力和耗气量下,提高雾化介质温度可使雾化气体动能显著提高,从而提升雾化效率,有效降低粉末的平均粒径。

(3) 空心粉的控制技术。通常认为空心粉的形成与液滴的袋式破碎机制有关^[20]。空心是气雾化粉末中常见的一类缺陷,空心粉的存在会导致材料成型致密度降低,对材料的疲劳强度与断裂韧性有不利影响。在气雾化过程中往往通过降低雾化气体动能的方式抑制粉末内部孔隙的形成^[21],从而减少空心粉的形成^[22]。另外,可通过雾化器的结构优化设计,降低气流喷射与金属液流的剪切作用,从而降低空心粉的形成概率。

(4) “卫星球”控制技术。“卫星球”的形成源于气雾化过程中高压气体喷射引起的气流反向回流,在此过程中,粒径细小的金属粉末随气流旋流向上运动,粘在未完全凝固的粗粉末颗粒表面,形成不同程度的“卫星球”,导致粉末流动性降低,影响粉末的使用性能。在雾化设备上采用外加气流的方式对气体旋流产生干扰,可避免“卫星球”的形成。因此如何实现对设备结构的有效改造,并设计匹配的雾化工艺,成为避免出现“卫星球”并改善金属粉末性能的技术发展方向。

2 等离子旋转电极雾化法

2.1 技术原理

等离子旋转电极雾化法(Plasma Rotating Electrode Process, PREP)是利用等离子枪产生的等离子弧作为高温热源,熔化高速旋转的金属棒料端面形成熔融金属液膜,液膜在棒料高速旋转离心力的作用下形成微小液滴,最终在惰性气体(氩气或氦气)的冷却作用下快速凝固形成球形金属粉末的一种技术。PREP技术最初由KAUFMAN^[23]发明,后由美国Nuclear Metals公司实现工业化装备制造,开发出一种无坍塌高纯净金属粉末生产方法^[24]。PREP设备工作原理如图3所示,该技术通常采用氩气、氦气或氩气和氦气的混合惰性气体,在雾化过程中形成气氮保护并冷却金属粉末。

目前,美国、俄罗斯和乌克兰在PREP设备制造及技术应用方面仍处于世界领先地位。美国Starmet公司(原Nuclear Metals公司)在20世纪80年代初就开发出PREP设备,采用直径63.5 mm和89 mm两种规格的电极棒料,最高工作转速可达25 000 r·min⁻¹,该设备已成功应用于航空发动机涡轮盘的量产^[25]。美国应用的PREP技术采用转

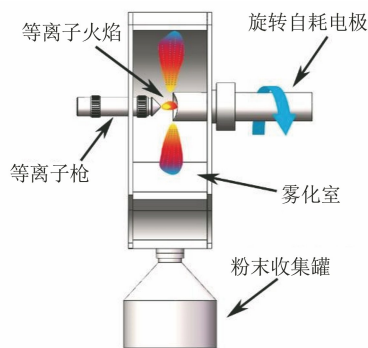


图3 PREP设备工作原理示意

Fig. 3 Schematic of PREP apparatus principle

移弧型等离子熔化系统,具有能量密度高、热效率高和电源匹配容易等优点,但由于工作过程要实现高速旋转阳极棒料供电,会带来滑动电刷碳粉污染、机械轴温升高、振动大等问题。俄罗斯和乌克兰制造的PREP设备多采用非转移弧模式^[26],即电弧产生于电极及喷嘴间,棒料驱动形式为三辊驱动式,并且可实现自动化更换棒料,该类设备具有结构紧凑、生产效率高等优点。此外,为强化冷却能力并保证粉末质量,俄罗斯制造的PREP设备的保护气通常采用氩气和氦气的混合惰性气体^[27]。俄罗斯早期制造的ПРР-1型PREP设备采用 $\phi 50$ mm的金属棒料,最高工作转速为15 000 r·min⁻¹,等离子枪功率可达100 kW,粒径50~100 μm 的高温合金粉末收得率可达50%以上。目前俄罗斯开发出ПРР-9型PREP设备,采用直径为50~80 mm的电极棒料,最高工作转速为30 000 r·min⁻¹,可实现长度为300~500 mm棒料的自动换料,等离子枪功率为180~200 kW,单炉产量约为400 kg。俄罗斯将PREP技术应用于镍基高温合金的粉末制备,已经成功用于批量生产军用粉末涡轮盘和压机盘,截至2000年,俄罗斯已生产超过5万件粉末盘和轴^[28]。

我国的PREP技术起步于20世纪80年代。西北有色金属研究院粉末冶金研究所于1983年自主设计研发了国内第一台转移弧型PREP设备,采用等离子转移弧加热系统,有效降低了钨阴极对粉末的污染^[29]。此后,西安赛隆金属材料有限责任公司、西安欧中材料科技有限公司、湖南顶立科技有限公司等也针对PERP技术及装备进行研发,并在电极棒料转速提升、等离子枪熔化功率提高等关键技术方面取得了跨越性的技术进步。西安赛隆金属材料有限责任公司开发出多个型号系列的PREP设备,等离子热源采用转移弧工作模式^[30],棒料的熔化速率和生产效率均得到有效提升;其中,该公司开

发出的 SLPA-II 型 PREP 设备采用直径 75 mm 的电极棒料,最高工作转速可达 $18\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,成功实现了钛合金、镍基和钴基合金粉末的批量制备;为克服传统 PREP 技术电极棒料卧式高速旋转时电极棒料质心和等离子枪中心难以完全重合,以及棒料前端熔化部分产生不平衡质量的问题,该公司自主研发了国际首台立式工业级 SLPA-V 型 PREP 设备,创新性地提出了电极棒立式高速旋转、等离子枪低速轴向进给距补偿的新一代制粉技术,将设备运行的最大噪声降低至 83 dB,电极棒直径由传统 75 mm 提高到了 100 mm,并且工作转速提高至 $22\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,生产能力提升至 $12\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$;该公司研发的 SLPA-D 型桌面级 PREP 设备,工作转速高达 $60\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,可用于小批量、多品种高品质球形金属粉末的研制和生产。西安欧中材料科技有限公司采用单独设计与等离子枪分离的惰性气体循环系统冷却通道的方法,对雾化室进行高效冷却,大幅提升了 PREP 设备的冷却效果^[31]。湖南顶立科技有限公司开发出可使用直径 70~100 mm 的棒料,最高转速可达 $18\,000\sim 30\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 PREP 设备。国内经过多年来对 PREP 技术和装备制造的不断探索和研究,在关键技术和规模化生产方面取得了显著的成绩,但与国外 PREP 技术相比,在装备长期运行稳定性、细粉收得率和设备生产效率等方面仍有提升的空间。

2.2 重要工艺参数

PREP 制备金属粉末时,影响粉末粒径的工艺参数主要有电极棒旋转速度、棒料直径、等离子枪功率、棒料进给速度、等离子枪与棒料间的距离和惰性气体流量等^[32-33]。其中,增大电极棒旋转速度和棒料直径可增加旋转时的离心力,使粉末粒径变小。在工艺调整时,等离子枪功率与棒料进给速度应匹配,以避免出现断弧、熔化不良和飞边等问题;等离子枪与棒料间的距离主要会影响熔融金属液膜的过热度,而惰性气体流量主要对金属粉末的冷却效果产生明显影响。

PREP 制备金属粉末的显著特点是纯净度高、氧含量低、球形度高、粉末流动性好、粒径分布窄^[34-36],并且从制备方法和雾化机理上可避免空心粉及卫星粉的形成,可用于多种材料,如不锈钢、镍基高温合金、钛合金及高熔点金属等金属粉末的制备,目前 PREP 技术生产的金属粉末已经广泛应用于航天航空、船舶制造、能源化工、高端装备制造和生物医疗等领域^[37-39]。

2.3 发展方向

(1) 中小粒径金属粉末的 PREP 制备。PREP 技术制备的金属粉末球形度高、流动性好、表面光洁,但粉末粒径较大,更适用于激光立体成形技术。随着增材制造产业的发展,对优质中小粒径金属粉末的需求量日趋增多^[40],如何通过装备硬件升级和雾化工艺的匹配和调控,实现粒度可控及中小粒径粉末收得率的大幅提升,以其自身技术优势匹配多种增材制造成形方式,成为 PREP 技术的重要发展方向。

(2) 难熔金属粉末的 PREP 制备。难熔金属铌、钼、钨、钽因优良的材料特性,其粉末制品及增材制造制件在重要的工业领域有巨大的市场需求,但由于熔点高(铌熔点 $2\,477\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、钼熔点 $2\,623\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、钨熔点 $3\,422\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、钽熔点 $2\,996\text{ }^{\circ}\text{C}$),采用气雾化方式获得金属粉末难度巨大,而 PREP 技术具有高的热源能量密度,可适用于高熔点金属的雾化制备。因此,应用 PREP 设备实现低氧含量、高球形度、高纯净度难熔金属粉末制备也成为 PREP 技术的重要发展方向。

3 等离子雾化法

3.1 技术原理

等离子雾化(Plasma Atomization, PA)技术以金属丝材为原材料,利用等离子火炬产生的聚焦等离子射流将金属丝材熔化,形成微小金属熔滴,下落过程中在表面张力的作用下,冷却凝固形成球形粉末^[41],金属丝材的雾化及冷凝过程均处于惰性气氛环境中,并且采用非接触式雾化过程,因此可减少氧化,获得高纯度的金属粉末^[42]。PA 技术最初由 TSANTRIZOS 等^[43]研发并申请专利,加拿大 AP&C 公司于 1998 年将 PA 技术实现了工业化^[44-45]。目前,AP&C 公司对 PA 技术的研究和工业化应用显著领先于其他公司,由于 AP&C 公司不对外出售 PA 设备,并对相关技术实施严格保密,因此对于 PA 设备及技术相关细节的报道较少。PA 设备结构如图 4 所示。PA 设备中送丝系统通过控制进给速度,以一定速度将金属丝材送入雾化炉内;雾化热源由 3 个等离子火炬组成,金属丝材进入雾化区内被聚焦等离子火焰加热熔化、蒸发成为饱和金属蒸气,随后通过气流实现淬火,金属蒸气发生快速团聚、形核、长大,最终获得特定粒径分布的金属粉末^[46]。

PA 技术雾化方式独特,具有显著的工艺优点。原材料金属丝材依据相关国家标准进行制造和检

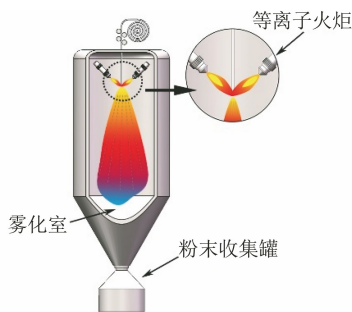


图4 PA设备结构示意图

Fig. 4 Schematic of PA apparatus structure

测,从而在原材料品质控制方面为确保金属粉末高品质提供了必要保证;采用无坩埚非接触式雾化方式,金属丝材的熔化和雾化同时进行,这种雾化方式不仅雾化效率高,也避免了粉末在制备过程中混入杂质造成污染,粉末纯净度高,氧含量较低^[47];在等离子火炬的作用下,惰性雾化气体被加热到高温状态,并具有较高的喷射速度,这样可使金属熔滴的凝固速率减慢,金属熔滴在表面张力的作用下充分球化从而获得高球形度的金属粉末^[48-49]。与其他雾化方法相比,PA技术制备的金属粉末粒径分布较窄,粒径不大于 $53\ \mu\text{m}$ 的粉末收得率极高,并且具有高球形度和低杂质含量的特性,金属粉末成形件微观组织均匀,力学性能优异^[50]。但是由于PA技术采用金属丝材雾化方法制备粉末,原材料的制造成本较高;PA技术雾化金属丝材的方式也限制了生产效率,难以实现单台设备的快速规模化量产;由于PA技术的热源为高功率等离子枪,能源消耗量较大,难以实现节能减排,同时会显著增加金属粉末的制备成本。

3.2 关键工艺参数

PA技术的关键工艺参数包括金属丝材的进给速度、惰性气体流速、等离子枪功率以及等离子枪与金属丝材的相对位置等,实现工艺参数的匹配是PA技术制备高品质金属粉末的关键。其中,通过调节金属丝材的进给速度可调控金属粉末的粒径分布和雾化产生悬浮颗粒的数量,使金属粉末具备良好的流动性和粉末品质稳定性;惰性气流的有效动能主要由惰性气体流速决定,增加惰性气体的压力和使用超音速雾化喷嘴(如De Laval喷嘴)可提高气流有效动能,将惰性气体流速提升到超音速,获得颗粒细小的金属粉末;等离子枪的作用是将电能和气体动能转化成熔化金属丝材的热能和金属粉末的表面能,增大等离子枪的功率可使金属丝材熔化得更加充分,并达到更高的熔化温度,如果控制好金属

丝材的进给速度和惰性气体压力,同时结合冷却速率的合理控制,可得到球形度高、氧含量低及粒径小的粉末;等离子枪与金属丝材端部的间距越小,金属丝材获得的等离子束有效热功率越大,熔化越充分,粉末细化趋势越明显,因此减小等离子枪与金属丝材间距可以有效提高细粉收得率。

3.3 发展方向

随着市场对细粉末需求的日益增长,等离子雾化技术应朝着提升生产效率的方向发展,对金属丝材预热可有效地提升雾化效率,因此基于金属丝材预热的等离子雾化技术将成为未来的主要发展方向之一。由于很多金属并不适合制备成金属丝材,这直接影响了等离子雾化技术的应用范围,因此等离子雾化技术需进一步突破对金属丝材的依赖,研发更高能量的等离子枪成为拓展等离子雾化技术适用金属范围的必经之路。

4 结论与展望

增材制造用球形金属粉末的主要制备方法包括气雾化法、等离子旋转电极雾化法及等离子雾化法。雾化机理和设备结构的差异决定了金属粉末的特性。对于气雾化法,优化雾化器结构以提升雾化气流动能效率,是改善金属粉末品质及提高气雾化生产效率的最有效手段;提高电极棒料的旋转速度并匹配合理的等离子热源及功率是等离子旋转电极雾化法制备球形金属粉末的装备技术关键;实现工艺窗口精准控制,实现等离子束流与惰性气体流速的合理匹配是等离子雾化技术的关键。

近年来金属增材制造的快速发展使球形金属粉末的市场需求显著增长,也给增材制造专用材料研发、粉末制备技术及装备应用等领域的研究带来了诸多挑战与机遇。首先,在研发增材制造专用材料时,不仅要关注制件的成形和服役性能,还需考虑金属粉末匹配的合理制备工艺;其次,从设备角度考虑,对高端制粉装备进行自主研发,是打破国外技术封锁,增加生产技术领域核心竞争力的唯一手段,而如何实现工艺窗口扩展、设备长期稳定运行、制品批次间质量稳定性提升是突破高端装备制造技术瓶颈的关键;最后,应重视专业人才团队的组建和培养,高品质球形金属粉末的制备是涵盖冶金学、机械制造、空气动力学、传热学的交叉学科,需要具有多学科背景的复合型生产技术人才共同参与研发和应用,组建强有力的技术团队为技术突破提供强大支撑。

参考文献:

- [1] Wohlers Associates Inc. Wohlers report 2021: 3D printing and additive manufacturing state of the industry [R]. Wohlers Associates, Inc., [s. n.], 2021.
- [2] 李礼, 戴煜. 激光选区熔化专用球形金属粉末制备技术的研究现状及发展趋势 [C]//2017 全国粉末冶金学术会议论文集. 南京: [出版者不详], 2017: 57-63.
- [3] LAWLEY A. Atomization: The production of metal powders [M]. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1992.
- [4] 李清泉, 韩延良. 真空熔炼高压气体雾化制粉技术及设备[J]. 粉末冶金工业, 1996, 6(2): 27-31.
LI Q Q, HAN Y L. The technology and equipments for manufacturing metal powders using vacuum melting - high pressure gas atomization [J]. Powder Metallurgy Industry, 1996, 6(2): 27-31.
- [5] ANTIPAS G S E. Review of gas atomisation and spray forming phenomenology [J]. Powder Metallurgy, 2013, 56(4): 317-330.
- [6] 柳戌昊. 浅谈雾化法制取金属粉末技术[J]. 技术与市场, 2008, 15(5): 56-58.
LIU X H. Discussion on the technology of metal powder preparation by atomization [J]. Technology & Market, 2008, 15(5): 56-58.
- [7] YOLTON C F, FROES F H S. Conventional titanium powder production [M]//Titanium Powder Metallurgy. Amsterdam: Elsevier, 2015: 21-32.
- [8] 李代颖, 刘济宽, 陈学通. 超细球形铜粉研究进展[J]. 船电技术, 2013, 33(3): 42-44.
LI D Y, LIU J K, CHEN X T. Progress in preparation of ultrafine spherical copper powder [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2013, 33(3): 42-44.
- [9] 张晗亮, 李增峰, 张健, 等. 超细金属粉末的制备方法[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(5): 9-12.
ZHANG H L, LI Z F, ZHANG J, et al. Preparation of super fine metal powder [J]. Rare Metals Letters, 2006, 25(5): 9-12.
- [10] 姚妮娜, 彭雄厚. 3D 打印金属粉末的制备方法[J]. 四川有色金属, 2013(4): 48-51.
YAO N N, PENG X H. The preparation method of metal powder for 3D printing [J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2013 (4): 48-51.
- [11] 李清泉, 欧阳通, 麻润海, 等. 气雾化微细金属粉末的生产工艺研究[J]. 粉末冶金技术, 1996, 14(3): 181-188.
LI Q Q, OUYANG T, MA R H, et al. Research of producing procedure of fine metal powder by gas atomization [J]. Powder Metallurgy Technology, 1996, 14(3): 181-188.
- [12] HOHMANN M, JÖNSSON S. Modern systems for production of high quality metal alloy powder [J]. Vacuum, 1990, 41(7/8/9): 2173-2176.
- [13] 李鑫, 王永祥. 气雾化工艺参数对金属粉末粒度影响的研究 [J]. 江西有色金属, 2002(3): 27-29.
LI X, WANG Y X. Study on the effect of atomization parameters on the granularity of metal powder [J]. Jiangxi Nonferrous Metals, 2002(3): 27-29.
- [14] SMALL S, BRUCE T J. The comparison of characteristics of water and inert gas atomized powders [J]. International Journal of Powder Metallurgy, 1968, 4(3): 7-17.
- [15] 吕海波, 母育锋, 李新军. 熔体过热度对雾化过程的影响[J]. 中南工业大学学报, 1997, 28(2): 149-151.
LU H B, MU Y F, LI X J. Influences of melt superheat on atomization procedure [J]. Journal of Central South University, 1997, 28(2): 149-151.
- [16] RAI G, LAVERNIA E, GRANT N J. Powder size and distribution in ultrasonic gas atomization [J]. JOM, 1985, 37(8): 22-26.
- [17] WANG W, LIU D, GRANT N J. Simulation of heat transfer in the ultrasonic gas atomization process [J]. Scripta Metallurgica, 1987, 21(10): 1279-1283.
- [18] NANOVAL GmbH. NANOVAL process offers fine powder benefits [J]. Metal Powder Report, 1996, 51(11): 30-33.
- [19] STRAUSS J T. Hotter gas increases atomization efficiency [J]. Metal Powder Report, 1999, 54(11): 24-28.
- [20] 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.
- [21] ANDERSON I E, WHITE E M H, TIARKS J A, et al. Fundamental progress toward increased powder yields from gas atomization for additive manufacturing [C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials. Las Vegas, [s. n.], 2017: 136-146.
- [22] LI X G, FRITSCHING U. Spray transport fundamentals [M]//Metal Sprays and Spray Deposition. Cham: Springer International Publishing, 2017: 89-176.
- [23] KAUFMAN A R. Production of pure spherical powders: US3802816 [P]. 1974-04-09.
- [24] 高超峰, 余伟泳, 朱权利, 等. 3D 打印用金属粉末的性能特征及研究进展 [J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(5): 53-58.
GAO C F, YU W Y, ZHU Q L, et al. Performance characteristics and research progress of metal powders for 3D printing [J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27(5): 53-58.
- [25] OZOLS A, SIRKIN H R, VICENTE E E. Segregation in stellite powders produced by the plasma rotating electrode process [J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 262(1/2): 64-69.
- [26] 陶宇, 张义文, 张莹, 等. 用等离子旋转电极法生产球形金属粉末的工艺研究 [J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(增刊 1): 537-540.
TAO Y, ZHANG W Y, ZHANG Y, et al. Study on technology of producing spherical metal powder by plasma rotating electrode process [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15(S1): 537-540.
- [27] 陶宇, 冯涛, 张义文, 等. 特殊用途球形镍基高温合金粉末生产工艺研究 [J]. 粉末冶金工业, 2003, 13(5): 12-15.
TAO Y, FENG D, ZHANG Y W, et al. Study on the production process of spherical Ni-based superalloy powder for special applications [J]. Powder Metallurgy Industry, 2003, 13(5): 12-15.

- [28] 张义文,上官永恒. 粉末高温合金的研究与发展[J]. 粉末冶金工业, 2004, 14(6): 30-43.
ZHANG Y W, SHANGGUAN Y H. Research and development in p/m superalloy [J]. Powder Metallurgy Industry, 2004, 14(6): 30-43.
- [29] 赵风琴,王长京. 等离子旋转电极制粉设备中的等离子发生器装置的设计与制造[J]. 稀有金属材料与工程, 1988, 17(6): 66-70.
ZHAO F Q, WANG C J. Design and manufacture of plasma generator in plasma rotating electrode powder making equipment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1988, 17(6): 66-70.
- [30] 张建利. 等离子旋转电极制粉机组及工艺: 101327519A[P]. 2008-12-24.
ZHANG J L. Plasma rotating electrode milling machine group and technique: 101327519A[P]. 2008-12-24.
- [31] 陈小林, 徐伟, 梁书锦, 等. 等离子旋转电极制粉冷却系统: 105618774A [P]. 2016-06-01.
CHEN X L, XU W, LIANG S J, et al. Plasma rotating electrode powder making cooling system: 105618774A [P]. 2016-06-01.
- [32] BASAK C B, KRISHNAN M, KUMAR R, et al. Characterization and process evaluation of Ni-Ti-Fe shape memory alloy macro-spheres directly fabricated via rotating electrode process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 597: 15-20.
- [33] WOSCH E. Rapid solidification of steel droplets in plasma rotating electrode process[J]. Metal Powder Report, 1997, 51(1): 35-35.
- [34] 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.
- [35] ALLER A, LOSADA A. Rotating atomization processes of reactive and refractory alloys [J]. Metal Powder Report, 1990, 45(1): 51-55.
- [36] 国为民, 陈生大, 冯涤. 等离子旋转电极法制取镍基高温合金粉末工世的研究[J]. 航空工程与维修, 1999(5): 44-46.
GUO W M, CHEN S D, FENG D. Study on fabrication of Nickel base superalloy powder by plasma rotating electrode method[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 1999(5): 44-46.
- [37] CAFFREY T. Additive manufacturing and 3D printing state of the industry annual worldwide progress report [J]. Engineering management research, 2013, 2(1): 209-222.
- [38] 汤鑫, 李爱红, 李博. 球形钛及钛合金粉制备工艺研究现状[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(2): 58-64.
TANG X, LI A H, LI B. Research status of preparation technology of spherical titanium and titanium alloy powders [J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28(2): 58-64.
- [39] 赵霄昊, 王晨, 潘霏霏, 等. 球形钛合金粉末制备技术及增材制造应用研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2019, 29(6): 71-76.
ZHAO X H, WANG C, PAN F F, et al. A review on the methods and additive manufacturing application of spherical titanium alloy powder[J]. Powder Metallurgy Industry, 2019, 29(6): 71-76.
- [40] 贺卫卫, 汤慧萍, 刘咏, 等. PREP 法制备高温 TiAl 预合金粉末及其致密化坯体组织研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(11): 2768-2773.
HE W W, TANG H P, LIU Y, et al. Preparation of high-temperature TiAl pre-alloyed powder by PREP and its densification microstructure research [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(11): 2768-2773.
- [41] 戴煜, 李礼. 等离子火炬雾化制备金属 3D 打印专用钛合金粉体技术分析[J]. 新材料产业, 2018(11): 55-60.
DAI Y, LI L. Analysis of plasma torch atomization for preparation of titanium alloy powder for metal 3D printing [J]. Advanced Materials Industry, 2018(11): 55-60.
- [42] 李保强, 金化成, 张延昌, 等. 3D 打印用球形钛粉制备技术研究进展[J]. 过程工程学报, 2017, 17(5): 911-917.
LI B Q, JIN H C, ZHANG Y C, et al. Research progress of preparation methods of spherical titanium powders for 3D printing [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(5): 911-917.
- [43] TSANTRIZOS P G, ALLAIRE F C O, ENTEZARIAN M. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization: US5707419[P]. 1998-01-13.
- [44] ENTEZARIAN M, ALLAIRE F, TSANTRIZOS P, et al. Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders[J]. JOM, 1996, 48(6): 53-55.
- [45] PIMI Group. Titanium MIM moves into the mainstream with plasma atomized powders from AP&C [J]. Powder Injection Moulding International, 2017, 11(2): 65-70.
- [46] KROEGER J, MARION F. Raymor AP&C: Leading the way with plasma atomised Ti spherical powders for MIM [EB/OL]. 2011.
- [47] 陆亮亮, 张少明, 徐骏, 等. 球形钛粉先进制备技术研究进展[J]. 稀有金属, 2017, 41(1): 94-101.
LU L L, ZHANG S M, XU J, et al. Review on advanced preparation technology of spherical titanium powders [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(1): 94-101.
- [48] SU G H, CAO Z Y, LIU Y B, et al. Effects of semi-solid isothermal process parameters on microstructure of Mg-Gd alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 402-406.
- [49] FENG J, SUN H F, LI X W, et al. Microstructures and mechanical properties of the ultrafine-grained Mg-3Al-Zn alloys fabricated by powder metallurgy[J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27(2): 550-556.
- [50] KIM Y, KIM E P, SONG Y B, et al. Microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 603: 207-212.