

DOI: 10.11973/jxgccl202311015

气雾化法制备 3D 打印金属粉末的工艺研究进展

汤鹏君,任哲峥,杨克勇,马 骞,张 静,杨晓艳,庄玉茹,霍文生

(兰州金川科技园有限公司,国家镍钴新材料工程技术研究中心,兰州 730101)

摘要: 气雾化法制备的金属粉末粒径小,成分均匀,球形度高,流动性好,该方法已成为 3D 打印球形金属粉末的主要制备方法。然而,气雾化是一个多相流相互耦合作用的复杂过程,细微因素的改变可能导致粉末特性的改变,而粉末特性对 3D 打印件性能具有决定性的影响。综述了气雾化过程中金属液过热度、气液流量、雾化介质种类、雾化气体压力和温度、雾化器喷嘴构型和导液管几何结构等对粉末特性的影响规律,并对 3D 打印金属粉末材料及制备技术的发展方向进行了展望。

关键词: 气雾化;3D 打印;金属液;雾化介质;导液管

中图分类号: TF123

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)11-0087-09

Research Progress on Preparation Process of 3D Printing Metal Powder by Gas Atomization

TANG Pengjun, REN Zhezheng, YANG Keyong, MA Qian, ZHANG Jing,

YANG Xiaoyan, ZHUANG Yuru, HUO Wensheng

(National Nickel and Cobalt Advanced Materials Engineering Research Center,

Lanzhou Jinchuan Technology Park Co., Ltd., Lanzhou 730101, China)

Abstract: The metal powder prepared by gas atomization has small particle size, uniform composition, high sphericity and good fluidity, and the method has become the main preparation method of 3D printing spherical metal powder. However, gas atomization is a complex process of multi-phase flow interaction, and the change of subtle factors may lead to the change of powder characteristics, which has a decisive impact on the performance of 3D printed parts. The effects of metal superheat, gas-liquid flow rate, atomizing medium type, atomizing gas pressure and temperature, atomizer nozzle configuration and delivery tube geometry in the process of gas atomization on powder characteristics are reviewed. The development direction of 3D printing metal powder materials and preparation technology is also prospected.

Key words: gas atomization; 3D printing; molten metal; atomization medium; delivery tube

0 引言

3D 打印又称增材制造,兴起于 20 世纪 30 年代^[1]。不同于传统的减材加工方法,3D 打印是基于计算机软件,通过设计、扫描等方式建立三维模型,以逐层叠加的方式将离散材料(粉末、丝材)加工成形的一种技术^[2-3]。3D 打印大多使用球形粉末作为原料,通过集中的热源选择地熔化粉末,并在随后的冷却中凝固形成打印件^[4]。金属打印件的质量和性能在很大程度上取决于金属粉末原料的特性。3D

打印球形金属粉末应具有高球形度、小粒径、高振实、少或无空心粉和卫星粉、低杂质含量等特征^[5-7]。

气雾化法(gas atomization, GA)制备的金属粉末能较好地满足 3D 打印对金属粉末的性能需求^[8]。该方法制备的金属粉末粒径小,成分均匀,球形度高,流动性好^[9],已实现规模化生产。采用气雾化法制备的球形金属粉末占 3D 打印金属粉末总产量的 30%~50%^[10],气雾化法已成为 3D 打印用球形金属粉末的主要制备方法^[11-12]。气雾化法起源于 20 世纪 20 年代,是利用高速气流作用于金属液,将气体动能转化为熔滴表面能,进而形成微小金属液滴并冷却凝固成球形金属粉末的工艺。气雾化过

收稿日期:2023-03-21;修订日期:2023-10-09

作者简介:汤鹏君(1991—),甘肃临洮人,工程师,硕士

程分为一次破碎、二次破碎及球化与凝固 3 个阶段。

气雾化制粉技术本身是一个气液两相流相互耦合作用的复杂过程。在气雾化法制备球形金属粉末过程中,金属液、雾化介质、雾化器结构等因素的改变均会对粉末特性产生一定的影响。近年来,我国的粉末冶金工业快速发展,但粉末冶金产品的技术水平距离发达国家仍然具有一些差距,特别是在过程质量控制方面。为了给从事 3D 打印用金属粉末研究的技术人员及生产研发人员提供参考,作者从金属液、雾化介质、雾化器结构对粉末特性影响方面综述了气雾化法制备球形金属粉末的工艺研究现状。

1 金属液对粉末特性的影响

1.1 过热度的影响

金属液过热度是指雾化前金属液温度与金属熔点的差值。刘再西等^[13]利用真空感应熔炼气雾化法制备 3D 打印用不锈钢粉末,研究了不同金属液过热度对粉末特性的影响,发现金属液过热度越大,金属粉末的细粉收得率越大,松装密度越高,流动性越好,确定最佳的金属液过热度为 245 K。欧阳鸿武等^[14]将金属液过热度由 150 K 分别提高至 300 K 后,制备粉末的平均粒径相应从 34.88 μm 下降至 19.74 μm ;若金属液过热度过小,则金属液可能在破碎前就已经完全凝固,这会导致严重的颗粒粗化,甚至可能会堵塞喷嘴。王铁等^[15]研究发现:当金属液过热度由 150 $^{\circ}\text{C}$ 逐渐增加至 300 $^{\circ}\text{C}$ 时,真空感应熔炼气雾化法制备的 Pd-Ag-Cu 粉末平均粒径由 101 μm 降低至 33 μm ,细粉收得率显著提高;但随着金属液过热度的持续增加,粉末平均粒径存在先降低后增大的趋势,且当粒径过热度超过一定值后,粉末球形度变差,卫星粉数量增加^[16]。LUBANSKA 用黏度和表面张力的变化解释了金属液过热度对颗粒尺寸的影响^[17]。根据 Eötvös 定律,金属液的表面张力一般随温度的升高而降低,较低的表面张力能使金属液破碎更充分,因此粉末粒径更小^[18]。金属液的动力学黏度通常随温度的升高而减小^[19],因此在一定温度范围内增加过热度后,金属液黏度降低,更易于被高速气流充分破碎,从而形成细小粒径的金属粉末;同时,适当增加过热度可使金属液滴在飞行过程中有足够时间进行冷却和凝固,更容易获得球形度较高的金属粉末。

综上,适当提高金属液过热度可制备出粒径小、球形度高的金属粉末,有利于提高 3D 打印件的综合

性能,但是过大的金属液过热度会导致卫星粉增多,增加电力能源及设备负荷,从而大大增加生产成本。

1.2 气液流量的影响

气液质量流率比(gas-to-melt mass flow ratio, GMR)也是影响粉末粒径的主要参数之一。MOUSAVI 等^[20]通过调节雾化气体的质量流速,将 GMR 从 0.55% 增大到 2.6% 后,发现内部流场从复杂的气泡流变为环形流,从而降低了导液管出口处的金属液膜厚度。随着雾化气体流量的增加,喷嘴尖端的金属液膜变薄,一次破碎产生的液滴的平均尺寸减小^[21-22]。在一定条件下,粉末质量中值直径 D_{50} (表示累积质量分数达到 50% 时的粉末直径)与金属液流量的平方根成正相关^[23]。

金属液流量对气流速度的衰减模式有影响。RICOU 等^[24]研究发现,如果气流携带的流体密度大于其本身或流体流量较大时,气流速度均会快速衰减,致使最终粉末粗化。由 LUBANSKA 总结的粉末平均粒径的经验公式^[17]可知,随着 GMR 的减小,所得粉末粗化趋势变得更加明显;LI 等^[25]和 XU 等^[26]的研究也证明了这一点,同时还发现增大 GMR 不仅有利于获得小粒径粉末,还有利于提高目标细粉的收得率。ZHENG 等^[27]通过将直径 70 mm 左右的棒材替换为直径 2~5 mm 的丝材进行电极感应熔炼气雾化制粉,以此来降低进入雾化室的金属液流量,发现在雾化压力为 4.0 MPa 和金属液过热度为 350 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,制备的粉末 D_{50} 为 40.2 μm ,其中粒径为 0~53 μm 的细粉收得率达到了 78%,远高于同等雾化条件下的棒材感应熔炼气雾化工艺。

通过增加气体流量或降低金属液流量来提高 GMR 可制备出粒径较小的金属粉末;然而过高的气体流量或过低的金属液流量会导致粒径小于 15 μm 的超细粉占比增加,使得金属熔融后发生球化的程度增加,进而影响工件的表面质量;同时当金属液流量过低时,由于气体的过度冷却,金属液在导液管末端可能提前凝固,进而堵塞导液管。因此在实际生产过程中,需要根据金属液流量不断调整雾化气体的流量,使得 GMR 达到动态稳定,才能获得批次稳定性较高的 3D 打印金属粉末。

2 雾化介质对粉末特性的影响

2.1 雾化气体种类的影响

在气雾化法制备金属粉末的过程中,常用的雾

化介质有空气、氦气、氮气及氩气等,且以氩气为主。ÜNAL^[23]分别研究了以氦气、氮气、氩气为雾化气体制备铝合金粉末的工艺,发现在相同制备工艺下不同雾化介质在喷嘴出口产生的气流速度、气体流量存在较大差异,因此对粉末的粒径和形貌造成不同影响。采用一维绝热膨胀模型估算的氦气、氮气及氩气的物理特性及喷嘴出口的流动特性如表 1 所示^[23],可知氦气、氮气及氩气具有相似的黏度,但密度和导热系数相差较大,其中氦气的流速是氩气流速的 3.2 倍,其流量却仅是氩气流量的 1/3。由于

表 1 采用一维绝热膨胀模型估算雾化气体的物理特性和喷嘴出口的流动特性^[23]

Table 1 Physical properties of atomizing gases and flow properties at nozzle exit estimated by one dimensional adiabatic expansion model^[23]

雾化 气体	273 K 时的物理特性				喷嘴出口的流动特性			
	密度/ (kg·m ⁻³)	黏度/ (10 ⁶ Pa·s)	导热系数/ (10 ³ W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热比	气体常数/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	气体流速/ (m·s ⁻¹)	气体流量/ (kg·min ⁻¹)	气体冲量/ (N·s)
氦气	0.176	20.80	149.8	1.67	2 077	1 459	1.47	35.8
氩气	1.761	22.94	17.7	1.67	208	462	4.48	35.5
氮气	1.233	18.46	26.2	1.41	297	575	3.41	32.7

选用空气作为雾化气体所制备的粉末球形度差,氧含量高,导致 3D 打印件性能较差;氦气作为雾化气体虽然能获得粒径更为细小的粉末,但高昂的气体成本限制了其在工业领域的应用;氩气和氮气是较为常用的惰性保护气体,虽然氮气比氩气价格低,但在高温下(高于 1 000 ℃)容易与其他物质发生化学反应,因此在制备纯度较高的合金粉末时,最佳的雾化气体仍是氩气。氩气作为雾化气体制备的粉末具有球形度高、粒度分布可调控范围大等优势,因此在气雾化制粉技术上得到广泛应用;同时氩气雾化制备的粉末粒径小,氧含量低,空心粉少,夹杂物少,成本低,因此以氩气为雾化气体的气雾化法是未来镍基高温合金粉末制备技术的发展方向^[31]。

2.2 雾化气体压力的影响

在其他条件一定的情况下,增大雾化气体压力会形成超音速气流,强化对金属熔体的冲击破碎作用,因此所制备的粉末粒径较小。李响等^[32]研究发现,采用真空感应熔炼惰性气体雾化方法制备的 Inconel 625 合金粉末粒径随雾化气体压力的增大而减小,目标得粉率也随之升高,当雾化气体压力为 4.5 MPa 时,雾化效果最佳,粉末的 D_{50} 为 72.2 μm ,粒径在 45~105 μm 的粉末收得率达到 78.1%。郭快快等^[33]采用计算流体力学对气雾化制备 GH4169 合金粉末的过程进行了数值模拟,也得出类似的结论:当雾化气体压力由 3 MPa 增加至

在超音速流动条件下氦气能获得更大的气体流速,其作为雾化气体所制备的粉末比以氮气和氩气作为雾化气体所制备的粉末更加细小。许天早等^[28]采用空气、氦气、氮气及氩气作为雾化介质制备了 SnAgCu 合金粉末,发现以密度最低的氦气作为雾化气体所制备的粉末粒径最小。NCHIPORENKO 等^[29]使用空气雾化制备的粉末球形度差,改用氩气雾化后,球形粉末占比增至 85%。FANG 等^[30]研究发现,相比氮气,氩气作为雾化气体制备的粉末外观更规则,球形度也更高。

7 MPa 时, D_{50} 从 81.10 μm 减小到 41.80 μm ,粒径小于 53 μm 的细粉收得率由 1.72% 提高到 71.54%。然而,随着雾化气体压力的增大,金属液滴二次破碎^[21-22]程度变大,形成的细小金属液滴数量较多,其凝固速率比大尺寸液滴快,在高速气流作用下易黏附在未完全凝固的大尺寸液滴上,从而形成卫星粉^[34-36]。雾化气体压力越大,气流速度越大,气流与金属液滴的相互作用越强烈,引起不同颗粒间速度和凝固状态的差别越大,从而增大了金属液滴相互之间发生碰撞的可能性,导致卫星粉数量增多、流动性变差。表 2 所列为实际生产中在不同雾化气体压力下气雾化制备 GH4169 合金粉末的松装密度和流动性指标(50 g 粉末从标准的流速漏斗流出所需要的时间),发现较低或较高的雾化气体压力均会导致粉末松装密度和流动性降低。相关研究还表明,雾化气体压力越大,雾化气体分子与金属液滴接触越充分,在急速冷却时就会有更多的气体分子来

表 2 不同雾化气体压力下 GH4169 合金粉末的松装密度和流动性指标

Table 2 Apparent density and flowability index of GH4169 alloy powder under different atomization gas pressures		
雾化气体压力/MPa	松装密度/(g·cm ⁻³)	流动性指标
(3,5)	3.51~3.95	17~22
[5,6)	3.99~4.30	14~16
[6,8)	3.76~3.98	18~21

不及从金属液滴逸出而被包裹在液滴内部,从而形成更多的空心粉^[35-36]。

气流速度与雾化气体压力几乎呈线性关系^[35],较大的雾化气体压力能获得较高的气流速度,进而可实现小粒径粉末的制备,但较大的雾化气体压力也会导致卫星粉和空心粉产生的概率增大,因此仅通过增加雾化气体压力的方法来获取小粒径粉末是不可取的;同时,当雾化气体压力增加到一定程度时,气流速度便不再变化,因此过大的气体压力会导致气体浪费严重。在实际生产过程中,应综合考虑各方面的影响因素,选择并确定最优化的雾化气体压力。

2.3 雾化气体温度的影响

研究^[37]发现,随着雾化气体温度从 300 K 提高到 600 K,喷嘴出口气体射流的最大速度从 $490 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $690 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但其基本射流分布规律没有变化,而气流速度的提升导致更高效的金属破碎,特别是二次破碎,从而提升细粉收得率。王长军等^[38]采用计算流体力学数值模拟分析了雾化气体温度对雾化过程的影响,其研究结果也证明了这一点。由此可见,采用较高温度的雾化气体有利于制备粒径较小的粉末。同时,随着雾化气体温度的升高,二次破碎液滴的弥散角增大^[37,39];较大的弥散角有利于液滴充分分散,在一定程度上延长液滴的凝固时间,这有利于液滴的充分球形化,从而改善粉末的球形度。基于此,新出现了一种热气体雾化技术^[40],即通过提高雾化介质的温度来达到改善粉末特性的目的;在雾化气体压力不变的条件下,提高气体温度后,雾化所得粉末的平均粒径和标准偏差均降低,但由于热气体雾化技术受到气体加热系统和喷嘴的限制,仅有少数几家机构开展了相关研究。

综上,提高雾化气体的温度可以提升气流速度,从而有效提高雾化效率,所制备粉末粒径明显减小;同时较大的弥散角可以有效地降低金属液滴之间的碰撞概率,理论上能减少卫星粉的形成,但根据实际的生产结果来看,随着雾化气体温度的升高,气体的冷却作用削弱,加速效果得到提升,产生的超细粉较多且易与尚未完全凝固的金属液滴发生碰撞,形成较多卫星粉。因此,通过加热雾化气体降低粉末粒径的工艺,还需要进一步的研究与实践探索。

3 雾化器结构对粉末特性的影响

3.1 喷嘴构型的影响

喷嘴是气雾化设备的关键部件,对雾化效率的高低和雾化过程的稳定性起至关重要的作用。

最早出现的雾化喷嘴为自由落体式结构,如图 1(a)所示,该喷嘴结构设计简单,不易堵塞,常用于电极感应熔炼惰性气体雾化制粉系统。为了缩短气流与导液管出口的距离,发展出了结构紧凑的限制式喷嘴,如图 1(b)所示,因显著提高了雾化效率而得到广泛应用。

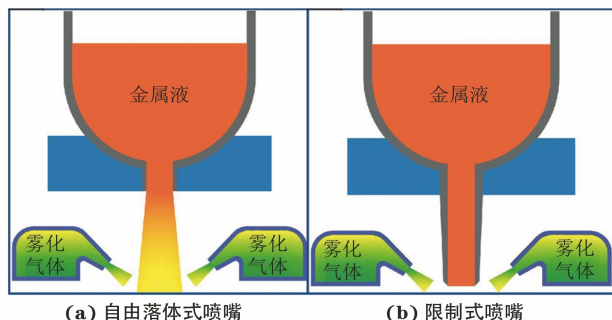


图 1 不同雾化喷嘴的结构示意

Fig. 1 Structure schematic of different atomizing nozzles:

(a) free-fall nozzle and (b) restricted nozzle

为了进一步提高雾化效率,限制式喷嘴逐渐演变为紧耦合式喷嘴。该喷嘴制备的粉末粒径小,球形度高,金属液滴冷却速率快,有利于非晶粉末的生产,目前已成为气雾化设备的首选喷嘴。尽管如此,该喷嘴仍存在一定的局限性:在高压雾化条件下,导液管出口处会产生较大负压,使金属液流速增大,不利于小粒径粉末的制备。金属液从导液管流出时,受到重力和导液管出口处与金属液面压力差的共同作用,其流速 v_1 与抽吸压力 ΔP (导液管出口处静态压力 P_s 与金属液面的环境压力 P_e 之差) 有关^[37-38]。当 $\Delta P < 0$ 时,金属液被加速吸入雾化器,有利于雾化过程的顺利进行;当 $\Delta P > 0$ 时,金属液流速放缓;当 $P_s = \rho_l g H + P_e$ (ρ_l 为金属液密度; g 为重力加速度; H 为坩埚内金属液面和导液管出口之间的高度差) 时, $v_1 = 0$, 金属液无法流动,雾化中断,若 P_s 持续增加,雾化气体会倒灌进坩埚,引起返喷。优化喷嘴结构,有利于降低导液管出口处的静态压力,提升流场速度,从而细化粉末粒径、提升雾化效率。因此,部分学者对紧耦合式喷嘴进行优化设计,将气流通道设计为 Laval 管结构。目前,国内市场的真空气雾化设备生产商大多采用 Laval 管喷嘴结构,如中航迈特、威拉里等^[41-42]。Laval 管是一种形似沙漏的收缩-扩张管,其通过将雾化气体加速形成超音速气流来对金属液进行雾化。Laval 管两端由 2 个锥形管构成,分别为收缩段和扩张段,对应的锥形夹角称为收缩角 ψ 和扩张角 β ,中间以喉口连接,具体结构如图 2 所示,图中 α 为雾化角, D_g 为

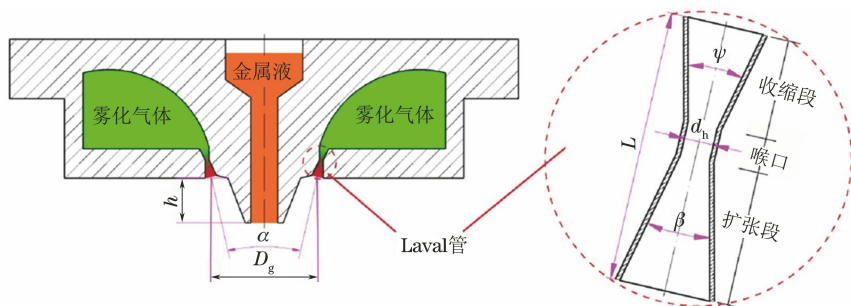


图 2 Laval 管雾化喷嘴结构示意图

Fig. 2 Schematic of atomizing nozzle structure with Laval tube

喷嘴进气口孔心距, h 为导液管突出长度。收缩角对喷嘴出口气流速度影响不明显, 较大的扩张角和较小直径 d_h 的喉口更有利于提高出口气流速度。

雾化角又称喷射角, 是雾化喷嘴的一个重要性能指标, 主要影响喷嘴特别是非限制式喷嘴雾化区的抽吸压力及气流的动能利用率^[11, 43-44]。喷射角越大, 导液管出口至气流交汇点处的距离越短, 气流的动能越大, 获得的金属粉末粒径越小; 但如果喷射角过大, 则高速气流在导液管下方相遇后的反射作用增强, 形成较强反射波, 造成回流区顶部过于靠近金属液入口, 雾化时易产生片状粉或出现反喷堵塞喷嘴的现象。喷射角越小, 雾化区的抽吸力越大, 金属液流速越快, 在相同雾化气流量下金属液破碎得越不充分, 同时还会导致金属液雾化前流动行程增加, 气流速度衰减明显, 金属液过热度不足, 进而导致粉末颗粒粗化、球形度变差。因此, 实际生产时应综合分析, 选定较为合适的喷射角。

喷嘴进气口孔心距也是影响气体流场结构的一个重要因素。随着孔心距的增加, 流场速度降低, 回流区域范围显著增大, 导液管出口处静态压力逐渐降低, 这有利于增大抽吸压力, 促进金属液流出。然而, 较低的流场速度和较大的回流区域均不利于金属液的雾化, 因此孔心距应控制在合理的范围内。

3.2 导液管几何结构的影响

导液管主要通过影响金属液的质量流量来影响雾化性能, 在雾化气体压力和金属液过热度不变的情况下, 导液管内径增加会导致金属液质量流量增加, 造成金属液滴破碎不充分。LIU 等^[45] 基于欧拉-拉格朗日法的多相流模型和剪切应力运输 $k-\omega$ 湍流模型 (k 为湍动能; ω 为比耗散率), 研究了不同导液管内径与粉末粒径、细粉收得率的关系, 发现: 随着导液管内径的减小, 粒径累积体积分布曲线左

移, 粉末粒径变小, 细粉收得率显著提高; 当导液管内径由 4 mm 减小到 2 mm 时, 细粉 (粒径小于 150 μm) 的收得率由 54.7% 提高到 94.2%。上述数值模拟结论与张梦醒等^[46] 和 GAO 等^[47] 的试验结果一致。根据 LUBANSKA 经验公式^[19], 导液管内径越小, 雾化液滴越小。然而, 导液管内径越小, 金属液也越容易受导液管内表面粗糙度和毛细管效应的影响, 导致雾化液滴尺寸增大^[48], 严重时堵塞导液管。金属液流速在导液管中心处最大, 在管壁处为 0 (无滑移情况)^[48]。当导液管内径一定时, 最大速度随着金属液平均流速的增加而增大, 此时从中心线到管壁的径向速度梯度增加, 导致流动阻力增大; 当金属液流速固定时, 随着导液管内径的减小, 金属液流速的径向速度梯度增大, 金属液流动阻力增大^[48]。研究^[44] 表明, 随着导液管内径的减小, 铝液和铁液的流动阻力均增大, 当导液管内径不大于 1 mm 时, 金属液流动阻力达到 10^2 kPa 级。

导液管突出长度对气体流场有很大影响^[49], 会直接影响雾化的稳定性与雾化效率。增加导液管突出长度会缩小回流区的范围, 使驻点位置向下方移动, 导致导液管末端附近区域形成负压, 这将对坩埚内金属液产生较大的吸入作用, 同时气流速度也略有增加。ZHANG 等^[50] 采用计算流体动力学软件 Fluent 对旋涡环缝式雾化器喷嘴出口附近雾化室内气流场进行数值模拟, 发现导液管突出长度越大, 导液管前端抽吸压力越小。THOMPSON 等^[51] 采用离散相模型研究了导液管突出长度对二次破碎粉末粒径的影响, 发现粉末粒径随着导液管突出长度的增加而减小。XU 等^[26] 认为: 当导液管突出长度为 6~8 mm 时, 有利于获得较大的抽吸压力, 从而制备出粒径较小的粉末; 当导液管突出长度为 12 mm 时, D_{50} 及其标准差均急剧增大。若导液管突出长度过长, 则高速气流会直接喷射至导液管外

壁并发生反弹,导致气流能量损失严重,降低了对金属液的二次破碎作用力,改变了雾化区的流场结构,从而破坏了雾化稳定性^[26]。

导液管末端结构也会对粉末特性产生影响。王军峰等^[52]采用计算模拟流体体积界面跟踪方法,对一次破碎的两相流进行模拟,发现:导液管末端的小平台是导致喷嘴堵塞的关键因素;导液管末端的扩张角由 30°逐渐增加到 35°,40°,45°,缩短了小平台的宽度后,雾化连续性提高,粉末特性也得到改善;优化导液管末端的几何形状后,金属液滴在雾化过程中不会黏附在外壁和小平台上;随着扩张角的增加,金属液与导液管末端的接触面积减小,这会降低导液管尖端破裂的风险,从而延长导液管的使用寿命;一次破碎后的合金液滴和液带更接近超音速自由边界,其与气体的相互作用强度增加,最终细粉收得率提高。

综上,在一定范围内,减小导液管内径有利于获得粒径较小的粉末,但也产生较多的超细粉末颗粒,超细粉末在高速气流作用下于雾化腔室中充分弥散,增加了与金属液滴之间的碰撞概率,从而形成较多卫星粉;当导液管内径减小到一定尺寸后,受导液管壁阻力的影响以及末端过度冷却的作用,金属液容易在导液管末端凝固,进而堵塞导液管。同时,导液管的突出长度和末端结构也对粉末的粒径有较大的影响。因此,在实际生产过程中,需要针对不同设备系统、不同合金、不同工艺条件,不断优化导液管的工艺参数,同时匹配其他工艺以实现最佳目标粉(粒径 15~53 μm)的收得率。

优化雾化器结构以提升气流动能效率,是改善球形金属粉末品质及提高气雾化效率的有效手段。近年来,在传统的气雾化技术上逐渐发展起来了几种新技术,如超音速雾化技术、层流雾化技术、组合雾化技术等。超音速雾化技术^[53]是指在高速气流破碎液流的同时,借助超声波的方式显著提升雾化效率的一种技术;基于 Laval 喷嘴的层流雾化技术^[54]克服了常规气雾化过程中气流扰动以及能量损失等问题,可更好地控制金属粉末的粒径分布,大幅提升雾化效率;将气雾化和离心雾化相结合而形成的组合雾化技术^[55]制备的金属粉末粒径小且分布窄,球形度好。Laval 雾化技术目前已经成为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。

4 结束语

当前,国内 3D 打印金属粉末市场接近饱和,整体呈现供大于求的状态,但粉末品质普遍偏低,高品质金属打印粉末的市场需求依然旺盛。所谓的高品质指元素控制精确、批次稳定性好,其中前者取决于母合金厂家,后者取决于粉末生产厂家的技术水平和品质管理。气雾化制粉技术仍无法完全解决空心粉、卫星球及目标细粉收得率低等问题。增大过热速度、增加雾化气体压力和温度、采用小内径导液管等措施均有利于提高目标细粉收得率,然而同时也增加了产生空心粉、卫星粉的概率。因此,在实际粉末制备过程中,不能为提高细粉收得率而盲目改变工艺参数,需要结合目标粉末技术指标综合考虑,针对不同合金粉末匹配相应的工艺。

未来增材制造技术的发展方向将呈现多样化、规模化和智能化的趋势,这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,应开发新型高效制备技术。针对现阶段常规雾化最佳目标粉末(粒径 15~53 μm)收得率仅在 30%~35%的情况,在现有增材制造粉末制备技术的基础上,结合各工艺技术的优势,研制复合型粉末制备技术。同时,不断优化改进设备结构,匹配最佳工艺参数,解决长限制 3D 打印金属粉末质量、产量的关键技术问题,提高粉末批次稳定性,提升目标粉末收得率。其次,开展新型专用金属粉末材料的研发工作。现阶段的金属粉末在现有增材制造技术下所获得的打印件在性能与功能上仍不能完全替代传统工艺制备的零部件,因此需要借助增材制造技术在材料设计、多材料及功能复合材料构件制造方面的优势,研发适用于金属增材制造全流程的合金材料,构建新材料创新体系,提升材料研发能力和新材料产业竞争力。最后,进行智能化制粉技术的开发。针对现阶段的金属粉末制备技术还远不能满足现代制造业的标准化、自动化生产模式的需求,将设备自动化与数字信息化相结合,基于数据、网络和软件,结合系统建模、人工智能等先进技术,将数字信息与物理过程有效联系起来,极大地提高增材制造粉末制备过程的自动化控制水平。

参考文献:

- [1] 李瑞锋,李客,周伟召. 激光金属 3D 打印技术的研究进展[J]. 粘接,2022,49(7):98-105.
LI R F, LI K, ZHOU W Z. Research progress of laser metal 3D

- printing technology[J]. Adhesion, 2022, 49(7): 98-105.
- [2] 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. 3D printing technology and its application trend analysis[J]. Technology Innovation and Application, 2021(11): 146-148.
- [3] 王超, 陈继飞, 冯韬, 等. 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, et al. Development of 3D printing technology and application progress of consumables[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2021, 56(6): 38-44.
- [4] LI N, HUANG S, ZHANG G D, et al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(2): 242-269.
- [5] 张国庆, 刘娜, 李周. 高性能金属材料雾化与成形技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2020, 40(3): 95-109.
ZHANG G Q, LIU N, LI Z. Research progress of atomisation and forming technology of high performance metallic materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(3): 95-109.
- [6] 许德, 高华兵, 董涛, 等. 增材制造用金属粉末研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 245-257.
XU D, GAO H B, DONG T, et al. Research progress of metal powder for additive manufacturing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 245-257.
- [7] YAO X X, LI J Y, WANG Y F, et al. Numerical simulation of powder effect on solidification in directed energy deposition additive manufacturing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(9): 2871-2884.
- [8] 张雪良, 陶宇, 贾建, 等. 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, et al. A review of research on powder prepared by gas atomization[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(3): 96-106.
- [9] 冯凯, 李丹明, 张凯锋, 等. 球形 TC4 合金粉末的制备、表征及雾化机理[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1594-1601.
FENG K, LI D M, ZHANG K F, et al. Preparation, characterization and atomization mechanism of spherical TC4 alloyed powder[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(7): 1594-1601.
- [10] 张艳红, 董兵斌. 气雾化法制备3D打印金属粉末的方法研究[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(2): 203-205.
ZHANG Y H, DONG B B. Study on the method of gas atomization for production of 3D printing metal powders[J]. Mechanical Research & Application, 2016, 29(2): 203-205.
- [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 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.
- [12] 关书文, 刘世昌, 时坚, 等. 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, et al. Research progress and prospect of metal powder preparation by gas atomization[J]. Foundry, 2022, 71(2): 136-142.
- [13] 刘再西, 卢德宏, 王长军, 等. 气雾化参数对SLM用1 720 MPa级马氏体时效钢粉末特性的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(9): 54-59.
LIU Z X, LU D H, WANG C J, et al. Effect of gas atomization parameters on powder characteristics of 1 720 MPa maraging steel for SLM[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(9): 54-59.
- [14] 欧阳鸿武, 陈欣, 余文焄, 等. 紧耦合气雾化制粉中熔体过热度对雾化模式和粉末粒度的影响[J]. 稀有金属, 2006, 30(增刊1): 84-88.
OUYANG H W, CHEN X, YU W T, et al. Effect of melt superheat on powder particle size in close-coupled gas atomization[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(S1): 84-88.
- [15] 王轶, 郑晶, 贾志华. 气雾化制备Pd-Ag-Cu粉末钎料的研究[J]. 贵金属, 2020, 41(增刊1): 64-67.
WANG Y, ZHENG J, JIA Z H. Preparation of Pd-Ag-Cu Powder solder by gas atomization[J]. Precious Metals, 2020, 41(S1): 64-67.
- [16] 谢波. EIGA雾化法制备激光3D打印用TC4合金粉末工艺研究[J]. 钢铁钨钛, 2019, 40(3): 7-12.
XIE B. Preparation of TC4 alloy powders used for laser 3D printing via EIGA method[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(3): 7-12.
- [17] DA SILVA F C, DE LIMA M L, COLOMBO G F. Evaluation of a mathematical model based on lubanska equation to predict particle size for close-coupled gas atomization of 316L stainless steel[J]. Materials Research, 2022, 25: 20210364.
- [18] GLASSER L. Volume-based thermodynamics of organic liquids: Surface tension and the Eötvös equation[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2021, 157: 106391.
- [19] GROSSE A V. The viscosity of liquid metals and an empirical relationship between their activation energy of viscosity and their melting points[J]. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 1961, 23(3/4): 333-339.
- [20] MOUSAVI M, DOLATABADI A. Numerical study of the effect of gas-to-liquid ratio on the internal and external flows of effervescent atomizers[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2018, 42(4): 444-456.
- [21] RIDOLFI M R, FOLGARAIT P. Numerical modeling of secondary breakup in molten metals gas-atomization using dimensionless analysis[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 132: 103431.
- [22] ZOU H P, XIAO Z Y. Pre-breakup mechanism of free-fall nozzle in electrode induction melting gas atomization[J]. Materials Today Communications, 2021, 29: 102778.
- [23] ÜNAL A. Effect of processing variables on particle size in gas atomization of rapidly solidified aluminium powders[J].

- Materials Science and Technology, 1987, 3(12): 1029-1039.
- [24] RICOU F P, SPALDING D B. Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1961, 11(1): 21-32.
- [25] LI X G, FRITSCHING U. Process modeling pressure-swirl-gas-atomization for metal powder production [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 1-17.
- [26] XU L H, ZHOU X L, LI J H, et al. Numerical simulations of molten breakup behaviors of a de laval-type nozzle, and the effects of atomization parameters on particle size distribution [J]. Processes, 2020, 8(9): 1027.
- [27] ZHENG M Y, ZHANG S M, HU Q A, et al. A novel crucible-less inert gas atomisation method of producing titanium powder for additive manufacturing [J]. Powder Metallurgy, 2019, 62(1): 15-21.
- [28] 许天早, 王宇, 黄敏. 雾化介质对 SnAgCu 系无铅焊锡雾化粉末特性的影响 [J]. 材料导报, 2006, 20(增刊 2): 351-353.
- XU T H, WANG Y, HUANG M. Influences of atomizing medium on the properties of free-lead solder powders of Sn-Ag-Cu system [J]. Materials Review, 2006, 20(S2): 351-353.
- [29] NICHIPORENKO O S, NAIDA Y I. Fashioning the shape of sprayed powder particles [J]. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1968, 7(10): 753-755.
- [30] FANG P J, XU Y, LI X G, et al. Influence of atomizing gas and cooling rate on solidification characterization of nickel-based superalloy powders [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(2): 423-430.
- [31] 张强, 郑亮, 许文勇, 等. 氩气雾化镍基粉末高温合金及粉末特性研究进展 [J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(5): 387-400.
- ZHANG Q, ZHENG L, XU W Y, et al. Research progress of Ni-based powder superalloy atomized by argon and its powder characteristics [J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(5): 387-400.
- [32] 李响, 曾克里, 何鹏江, 等. 雾化压力对选区激光熔化用 Inconel 625 合金粉末粒度与形貌的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24(4): 374-378.
- LI X, ZENG K L, HE P J, et al. Effect of atomization pressure on particle size and morphology of Inconel 625 alloy powder for selective laser melting [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2019, 24(4): 374-378.
- [33] 郭快快, 商硕, 陈进, 等. 数值模拟雾化气压对 GH4169 合金粉末粒径的影响 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 807-811.
- GUO K K, SHANG S, CHEN J, et al. Numerical simulation of influence of atomization pressure on particle size of GH4169 alloy powders [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(6): 807-811.
- [34] 关书文, 刘世昌, 时坚, 等. 气雾化压力对粉末粒径的影响 [J]. 铸造, 2022, 71(7): 814-820.
- GUAN S W, LIU S C, SHI J, et al. Effect of gas pressure on powder particle size [J]. Foundry, 2022, 71(7): 814-820.
- [35] 赫新宇, 黎兴刚, 黄禹赫, 等. 气体雾化制粉工艺中基于气体整流的卫星粉控制技术 [J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(4): 302-317.
- HE X Y, LI X G, HUANG Y H, et al. Satellite-particle control technique based on gas-flow-regulation during gas atomization process [J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(4): 302-317.
- [36] 刘杨, 王悦, 许文勇, 等. 基于 CFD 技术的气雾化卫星粉末形成和抑制的模拟分析方法: 112199902B [P]. 2022-11-22.
- LIU Y, WANG Y, XU W Y, et al. CFD technology-based simulation analysis method for formation and inhibition of gas atomization satellite powder: 112199902B [P]. 2022-11-22.
- [37] WANG P, LI J, WANG X, et al. Impact mechanism of gas temperature in metal powder production via gas atomization [J]. Chinese Physics B, 2021, 30(5): 054702.
- [38] 王长军, 刘雨, 曹呈祥, 等. 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, et al. Numerical simulation and mechanism analysis of gas atomized pulverizing process for additive manufacturing [J]. Powder Metallurgy Industry, 2021, 31(4): 22-28.
- [39] 王博亚. 增材制造用 18Ni300 粉末的紧耦合气雾化制备技术研究 [D]. 北京: 机械科学研究总院, 2019.
- WANG B Y. Study on preparation technology of 18Ni300 powder for additive manufacturing by close coupling gas atomization [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2019.
- [40] 陈莹莹, 肖志瑜, 李上奎, 等. 3D 打印用金属粉末的制备技术及其研究进展 [J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(4): 56-61.
- CHEN Y Y, XIAO Z Y, LI S K, et al. Research progress on the preparation methods of metal powder for 3D printing [J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28(4): 56-61.
- [41] 王来稳, 于建宾, 马渭奎, 等. 气雾化制粉用小尺寸氧化锆质喷嘴的制备和性能研究 [J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(3): 63-67.
- WANG L W, YU J B, MA W K, et al. Study on preparation and performance of small-size ZrO₂ nozzle for powder production by gas atomization [J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(3): 63-67.
- [42] 徐良辉, 周香林, 李景昊, 等. 基于回流区特性的气雾化喷嘴设计及流场结构模拟 [J]. 热喷涂技术, 2019, 11(3): 30-37.
- XU L H, ZHOU X L, LI J H, et al. Design of atomizing nozzle and simulation of its flow field structure [J]. Thermal Spray Technology, 2019, 11(3): 30-37.
- [43] 夏敏, 汪鹏, 张晓虎, 等. 电极感应熔化气雾化法制备高温合金粉末中非限制式喷嘴的结构优化设计 [J]. 粉末冶金技术, 2019, 37(4): 288-297.
- XIA M, WANG P, ZHANG X H, et al. Optimum structure design of free-fall nozzle in preparation process of superalloy powders by electrode induction gas atomization technology [J]. Powder Metallurgy Technology, 2019, 37(4): 288-297.
- [44] LI X G, ZHU Q, SHU S, et al. 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.

- [45] LIU C, LI X, SHU S, et al. Numerical investigation on flow process of liquid metals in melt delivery nozzle during gas atomization process for fine metal powder production[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(10): 3192-3204.
- [46] 张梦醒, 王长军, 陈清明, 等. 雾化参数对 PH13-8Mo 钢粉末特性的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(12): 112-115.
ZHANG M X, WANG C J, CHEN Q M, et al. Effects of processing parameters of gas atomization on characteristics of PH13-8Mo steel powders[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(12): 112-115.
- [47] GAO C F, XIAO Z Y, ZOU H P, et al. Characterization of spherical AlSi10Mg Powder produced by double-nozzle gas atomization using different parameters[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(2): 374-384.
- [48] LI X Y, DU J J, WANG L C, et al. Effects of different nozzle materials on atomization results via CFD simulation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(2): 362-368.
- [49] 郭快快, 刘常升, 董欢欢, 等. 导管伸出长度对雾化制备 TC4 粉末特性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 797-802.
GUO K K, LIU C S, DONG H H, et al. Effect of extension length of catheter on properties of TC4 powder prepared by electrode induction melting gas atomization[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(6): 797-802.
- [50] ZHANG M, ZHANG Z M, ZHANG Y Q, et al. Effects of gas flow field on clogging phenomenon in close-coupled vortical loop slit gas atomization[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(6): 1003-1019.
- [51] THOMPSON J S, HASSAN O, ROLLAND S A, et al. The identification of an accurate simulation approach to predict the effect of operational parameters on the particle size distribution (PSD) of powders produced by an industrial close-coupled gas atomiser[J]. Powder Technology, 2016, 291: 75-85.
- [52] 王军峰, 夏敏, 吴嘉伦, 等. 真空感应熔炼气体雾化过程中钢包喷嘴堵塞: 导流管几何形状的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(9): 3214-3222.
WANG J F, XIA M, WU J L, et al. Ladle nozzle clogging in vacuum induction melting gas atomization: Influence of delivery-tube geometry[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(9): 3214-3222.
- [53] 李洪喜. 超声激振喷嘴雾化数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
LI H X. Numerical simulation of atomization of ultrasonic excited nozzle[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [54] 徐金鑫, 陈超越, 沈鹭宇, 等. 层流气体雾化制粉工艺粉末形貌及雾化机理[J]. 物理学报, 2021, 70(14): 134-148.
XU J X, CHEN C Y, SHEN L Y, et al. Atomization mechanism and powder morphology in laminar flow gas atomization[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(14): 134-148.
- [55] 杨军, 王晓峰, 葛正浩. 雾化法制备 3D 打印金属粉末的技术研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(1): 69-77.
YANG J, WANG X F, GE Z H. Study on the technology of gas atomization for production of 3D printing metal powders[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(1): 69-77.

(上接第 86 页)

- [27] CHU S, GUO C W, ZHANG T X, et al. Phase-field simulation of microstructure evolution in electron beam additive manufacturing[J]. The European Physical Journal E, 2020, 43(6): 35.
- [28] GENG S N, JIANG P, SHAO X Y, et al. Effects of back-diffusion on solidification cracking susceptibility of Al-Mg alloys during welding: A phase-field study[J]. Acta Materialia, 2018, 160: 85-96.
- [29] YU F Y, JI Y Z, WEI Y H, et al. Effect of the misorientation angle and anisotropy strength on the initial planar instability dynamics during solidification in a molten pool[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 204-214.
- [30] XIONG L D, WANG C M, WANG Z M, et al. The interaction between grains during columnar-to-equiaxed transition in laser welding: A phase-field study[J]. Metals, 2020, 10(12): 1647.
- [31] GENG S N, JIANG P, GUO L Y, et al. Multi-scale simulation of grain/sub-grain structure evolution during solidification in laser welding of aluminum alloys[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: 119252.
- [32] XIONG L D, ZHU G L, MI G Y, et al. A phase-field simulation of columnar-to-equiaxed transition in the entire laser welding molten pool[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 858: 157669.
- [33] BAILEY N S, HONG K M, SHIN Y C. Comparative assessment of dendrite growth and microstructure predictions during laser welding of Al6061 via 2D and 3D phase field models[J]. Computational Materials Science, 2020, 172: 109291.
- [34] TAKAKI T, ROJAS R, SAKANE S, et al. Phase-field-lattice Boltzmann studies for dendritic growth with natural convection[J]. Journal of Crystal Growth, 2017, 474: 146-153.
- [35] CAO L C, LIU D H, JIANG P, et al. Multi-physics simulation of dendritic growth in magnetic field assisted solidification[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 144: 118673.