

气体雾化制备金属粉末研究进展

马佳俊 高 阳 张 朔 荣智峥 魏通达 孙德建

(郑州航空工业管理学院材料科学与工程学院)

摘 要 气体雾化技术制备的金属粉末具有粒度小、球形度高、流动性好、氧含量低等特点,可满足增材制造、粉末冶金等场景的应用需求,是当下最重要的制粉方法之一。近年来,得益于计算流体力学数值模拟的应用,气体雾化技术进入了新的发展阶段。综述了气体雾化技术的发展历程及雾化机理,探讨了气体雾化工艺对粉末性能的影响、粉末缺陷的形成与控制、仿真模拟的研究进展等,以期对未来气体雾化技术的研究开发与技术进步提供参考。

关键词 气体雾化;增材制造;雾化机理;雾化参数

中图分类号 TF123.1;G353.11

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in the Fabrication of Metal Powders by Gas Atomization

Ma Jiajun, Gao Yang, Zhang Shuo, Rong Zhizheng, Wei Tongda, Sun Dejian

(School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics)

Abstract: The metal powder fabricated by gas atomization is characterized by small particle size, high sphericity, well flowability and low oxygen content, which can meet the application needs of additive manufacturing, powder metallurgy and other scenarios and become one of the most important powder preparation methods at present. In recent years, benefiting from the application of computational fluid dynamics numerical simulation, gas atomization enters a new development stage. The development course and atomization mechanism of gas atomization were reviewed, and the influence of gas atomization process on powder performance, formation and control of powder defects and research progress in simulation was discussed, hoping to provide reference for the research, development and technical progress of gas atomization in the future.

Key Words: Gas Atomization, Additive Manufacturing, Atomization Mechanism, Atomization Parameters

增材制造技术具有不受传统加工工艺限制的优势^[1],无需经过切削等繁杂工序,为精度高、结构复杂的零部件制造提供了一种解决方案。增材制造作为新兴的制造技术,在航空航天、汽车、模具、医疗器械等领域应用广泛。相比于粉末冶金、热喷涂等传统制造工艺,增材制造所用金属粉末需要满足粒度小、球形度高、流动性好、氧含量低等特性要求。因此,制备与开发增材制造专用高性能金属粉末是增材制造技术发展的关键之一。

目前,增材制造用金属粉末的制备方法主要包括气体雾化、旋转电极雾化及等离子熔丝雾化。气体雾化技术制备的金属粉末细粉收得率高、球形度好、杂质含量低,已成为最重要的增材制造用金属粉末制备方法。气体雾化过程涉及气动力学、流体力学、传热学等,且雾化

环境苛刻,雾化过程迅速,破碎过程难以观测,研究难度较大。本研究重点针对气体雾化发展历程、雾化过程、冷却凝固机理、雾化工艺参数对粉末特性的影响、粉末缺陷的形成及工艺数值模拟等方面进行论述,并对气雾化制粉技术的发展前景进行展望,以期对未来气体雾化技术的优化提供参考。

1 气体雾化技术的发展历程

气体雾化技术早期以空气为介质,制备的粉末氧含量高,性能较差^[2]。此后惰性气体(Ar、He、N₂)逐渐取代空气,作为新的气体雾化介质。而今,高端制造业的发展对粉末性能的要求进一步提高,在融合了真空熔炼技术之后,气体雾化基本框架由此产生。

目前,气体雾化设备的发展主要集中于对雾化喷嘴

收稿日期:2023-03-10;**修改稿收到日期**:2023-04-15

基金项目:河南省科技攻关资助项目(202102210037);研究生教育创新计划基金资助项目(2022CX69)

第一作者简介:马佳俊,男,1998年出生,硕士研究生,郑州(450046),E-mail:majiajun8864@163.com

通信作者:高阳,男,1987年出生,讲师,郑州(450046),E-mail:gaoyang@zua.edu.cn

引用格式:马佳俊,高阳,张朔,等. 气体雾化制备金属粉末研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 463-1 471.

MA J J, GAO Y, ZHANG S, et al. Research progress in the fabrication of metal powders by gas atomization[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 463-1 471.

结构和布局的改进,图 1 为两种常见雾化喷嘴。早期使用的雾化喷嘴是非限制式雾化喷嘴(见图 1a),此种喷嘴在金属液流自由落体后可直接进行雾化,无复杂的中间过程,对于一些活泼性较强的金属(如钛合金)较为适用。为了进一步提高雾化效率,以限制式雾化喷嘴为代表的喷嘴产生(见图 1b)。限制式雾化喷嘴减小了熔融金属与气体接触的距离,更多的气体动能转化为金属液滴的表面能,一定程度上降低了气体动能损失,利于熔融金属的充分破碎^[3]。但是,此种喷嘴在导流管下方形成的气体回流区易导致导流管的堵塞,且喷嘴结构较为复杂。HOPKINS B 等^[4]研究限制式喷嘴时发现,气体动能提高可以明显提高雾化效率,据此原理,设计出了紧耦合气雾化喷嘴,此种喷嘴的结构使金属液流与雾化气体在出口处紧密耦合,进一步减小了气体动能损失,制得的金属粉末粒径范围进一步缩小。

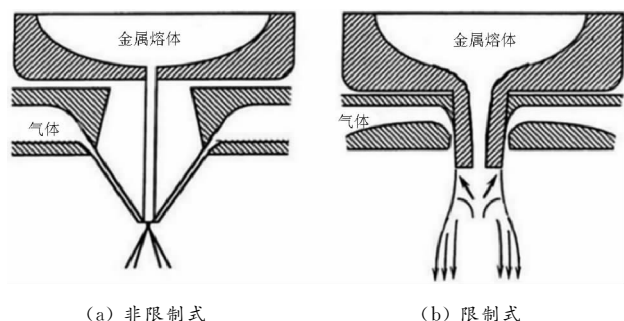


图 1 常用雾化喷嘴结构示意图^[3]

Fig.1 Structure diagram of common atomization nozzle^[3]

限制式喷嘴的气流出口结构见图 2。限制式环缝型喷嘴为一条环绕金属导液管的气缝结构,限制式环孔型喷嘴为等间距圆周分布的气孔结构。环缝型喷嘴出口面积大,气体消耗量大,但其雾化效率高于环孔型喷嘴,因此应用更为广泛。

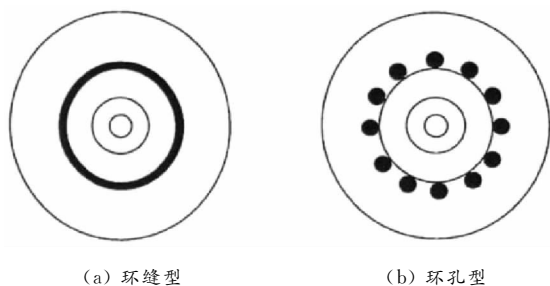


图 2 限制式喷嘴气流出口示意图^[5]

Fig.2 Schematic diagram of airflow outlet of restricted nozzle^[5]

20 世纪末,气雾化技术迎来了较大突破,随后迅速发展为主流制粉技术之一。为得到更优质的金属粉末,研究者将 Hartman 振动管与 Laval 喷管串联,发明出了超声气雾化方法^[6]。超声雾化过程气体流经 Hartman 振动管产生频率为 80~100 kHz 的超声波,加大了气液相对速度,便于金属液流进一步破碎,大幅提高

了细粉收得率。德国 Nanoval 公司制造了层流雾化设备,结构见图 3。层流雾化喷嘴喷出的气流方向几乎与金属熔体表面平行,利用气体的剪切与挤压作用破碎熔体,惰性气体的消耗量仅为紧耦合雾化喷嘴气体消耗量的 1/3^[7]。ANDERSON I E^[8]在限制式环孔型喷嘴的基础上提出了高压气雾化技术,高压超音速气体具有更大的动能,制得粉末平均粒径低于 20 μm ,但此种雾化喷嘴能量利用率低,成本较高。STRAUSS J T^[9]在紧耦合气雾化技术基础上提出了热气体雾化技术,在提高雾化效率的同时减少了气体用量。此后,许多雾化技术逐渐涌现,但由于发展时间较短,工艺不够成熟,还无法实现大规模应用。

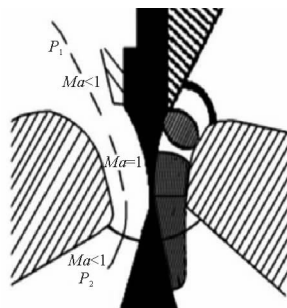


图 3 层流雾化喷嘴结构示意图^[7]

Fig.3 Structure diagram of laminar flow atomization nozzle^[7]

2 熔体雾化过程

气雾化过程主要包括熔体破碎以及金属液滴飞行、球化、凝固阶段^[10]。雾化过程中,高压气体经由喷嘴高速喷出并快速膨胀至雾化室内压力,气体在喷嘴出口处可能形成激波。当喷嘴出口处产生的激波相遇后会形成马赫碟,此时流场被称为闭涡流场;当雾化气体压力较低时,马赫碟无法形成,流场则为开涡流场^[11]。稳定的雾化流场可近似为两个顶部相接的锥体,在锥顶处有一速度为 0 但压力最大的点称为驻点。超音速气流在驻点处减速为亚音速气流并向上流动,直至遇到雾化喷嘴阻碍后变为径向流动,由于湍流边界层的阻碍与拖拽作用,气流随即向下流动形成气体再循环区。气体再循环区速度矢量图见图 4。

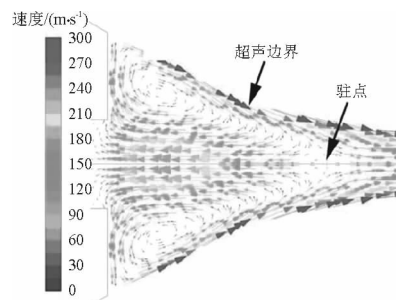


图 4 回流区速度矢量图^[12]

Fig.4 Speed vector diagram of reflux region^[12]

熔体破碎阶段充分进行是制备优质粉末的关键,因此对熔体破碎机理的研究至关重要。Johnson 模型将破碎阶段分为一次雾化和二次雾化^[12],当气流与熔体接触后熔体表面会产生扰动波,在气流的拖拽力作用下,表面扰动波逐渐加强,熔体随即破碎形成大液滴和韧带完成一次雾化;为进一步降低表面能,大液滴和韧带再次破碎形成小液滴完成二次雾化。随后液滴在飞行过程中球化、凝固,最终形成金属粉末。

2.1 一次雾化

一次雾化阶段气液相互接触,液流表面形成波动,随即破碎为大液滴和韧带。THOMPSON J S^[13]认为,金属液流自导液管流出后受两侧气流及向上的循环气体分量抑制,产生类似于倒置的喷泉状形貌,喷泉边缘处金属液流在气流速度差的作用下撕裂成为条带状。

目前广泛应用的一次雾化破碎模型是液膜破碎模型^[14],见图 5。液膜破碎模型中,金属液流受气体再循环区中心轴线向上气流及外侧向下气流共同作用,在导流管下方堆积,产生撑伞效应。由于气液相对速度等因素的影响,金属液膜的厚度逐渐下降至最小厚度,熔体表面受高速气体射流引起的正弦振荡波干扰,随后被分解成不稳定的韧带和大液滴。一次雾化阶段液膜的最小厚度 $W_{\min}$ 与气液接触角 θ 关系如下^[15]:

$$W_{\min} = (1 - \cos\theta)^{0.22} \tag{1}$$

破碎后的韧带直径 d_L 取决于液膜的厚度 W 以及最大不稳定波数 K_s 关系如下^[16]:

$$d_L = \sqrt{\frac{16W}{K_s}}; K_s = \frac{\rho_g U^2}{2\delta} \tag{2}$$

式中, ρ_g 为气体密度; U 为气液相对流速; δ 为熔体表面张力。

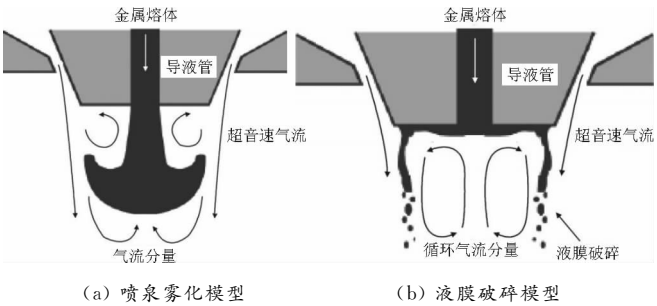


图 5 一次雾化破碎模型^[13]

Fig.5 Model of primary atomization fragmentation^[13]

根据气流场分布特征,一次雾化阶段可进一步细分为径向流动成膜和液膜撕裂破碎两个阶段。图 6 为一次雾化原理图。一次雾化结束时大部分液滴随气流进入二次雾化区,少量液滴会发生偏离,无法进入二次雾化区继续破碎,最终冷却凝固形成不规则片层状和不规则棒状粉末^[17]。

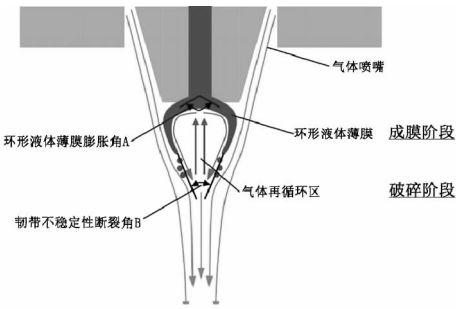


图 6 一次雾化原理图^[18]

Fig.6 Schematic diagram of primary atomization^[18]

2.2 二次雾化

二次雾化是指大液滴和条带状液滴进一步破碎为小液滴的阶段。研究表明,粒径小于 20 μm 的金属粉末主要产生于二次雾化阶段^[19]。图 7 为二次雾化模型。二次雾化机理主要包括包状破碎或袋状破碎 (bag break-up)、组合破碎或多模破碎 (multimode break-up)、剥离破碎或剪切破碎 (stripping break-up),这 3 种雾化机理所得液滴粒径依次减小^[20]。用于表征二次雾化破碎趋势的准数 We 数,其计算公式为^[21]:

$$We = \frac{\rho_g U^2 D}{\delta} \tag{3}$$

Ohnesorge 数 (Oh) 也是用于表示液滴破碎的准数:

$$Oh = \frac{\mu_d}{\sqrt{\rho_d D \delta}} \tag{4}$$

式中, ρ_g 为气体密度; U 为气液相对流速; δ 为熔体表面张力; D 为母液滴直径; ρ_d 为液滴密度; μ_d 为液滴粘度。韦伯数越大,液滴破碎倾向越强,雾化效率越高; Oh 数越大,表示液滴的破碎效果越差。为保证雾化过程顺利进行, We 数需大于 10.8。当 $12 < We < 20$ 时液滴发生包状破碎,此时液滴受其自身表面张力及高速气流挤压作用,由球状变为包状,包的薄壁处最终撕裂形成小液滴,包的开口处则形成环状条带并最终形成粒径稍大的液滴;当 $20 < We < 70$ 时液滴发生组合破碎;当 $We > 70$ 时液滴发生剥离破碎,液滴在高速气流冲击作用下首先被压扁变为盘状,盘的边缘逐渐拉长,最终破碎形成细小液滴^[14]。TAB 模型和 KHRT 模型是用于二次雾化模拟的两种常见模型,经过一系列模拟与验证^[22-23],发

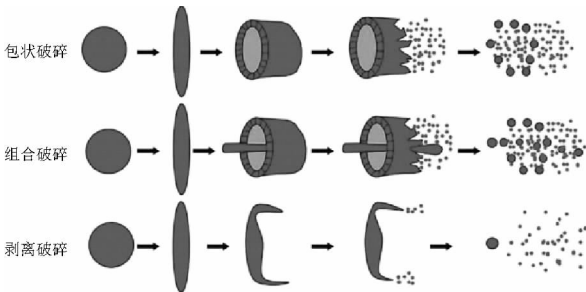


图 7 二次雾化模式^[20]

Fig.7 Secondary modes of atomization^[20]

现 TAB 模型用于袋式破碎模拟时效果更好, KHRT 模型与剥离破碎过程试验数据符合度更高。

金属液滴的二次雾化主要受液滴表面张力、粘度以及气动力的影响, 作用于二次雾化液滴上的力见图 8。在此过程中, 气动力使液滴发生变形, 随后进一步破碎。

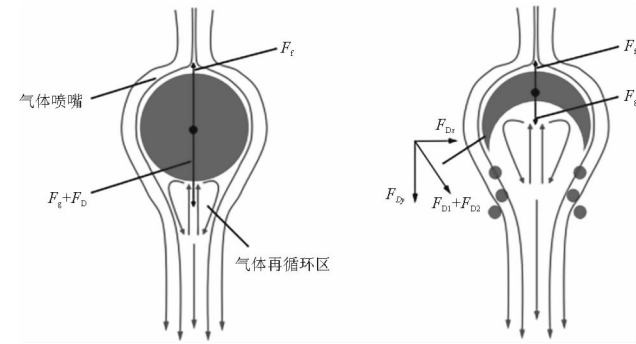


图 8 二次雾化液滴受力图^[18]

Fig.8 Force diagram of secondary atomization droplets^[18]

图 8 中 F_f 、 F_g 、 F_D 分别为浮力、重力、气体阻力, F_{D1} 、 F_{D2} 分别为气体射流阻力、气体再循环区阻力。液滴在 F_f 、 F_g 、 F_D 作用下变形, 液滴边缘在 F_{D1} 、 F_{D2} 阻力差作用下破裂, 随后在表面张力的作用下继续球化^[17]。

$$F_f = -\rho_g V_g \quad (5)$$

$$F_g = \rho_d V_g \quad (6)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho_g (u_g - u_d) |u_g - u_d| A_d \quad (7)$$

式中, C_d 为阻力系数; V_g 为液滴体积; u_g 和 u_d 为气体速度和液滴速度; A_d 为液滴的横截面积。

大液滴二次雾化过程模拟见图 9。徐金鑫等^[17]通

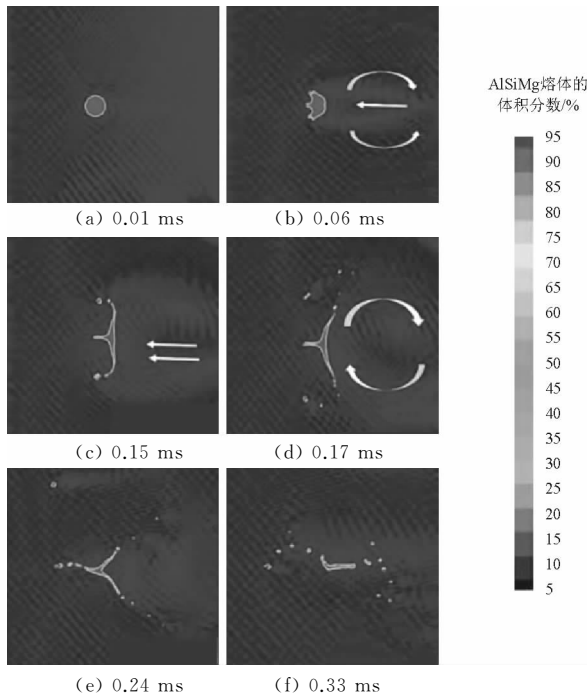


图 9 大液滴二次雾化的不同阶段^[17]

Fig.9 Different segments of secondary atomization of large droplets^[17]

过两相流模拟发现二次雾化大液滴在变形初期几乎保持对称, 当作用时间超过 0.2 ms 后, 熔滴的破碎形状由对称逐渐变为类似神经元状结构, 在气流的剪切作用下, 厚度较小的地方继续发生破碎, 形成细小液滴。韧带的二次雾化过程见图 10。二次雾化阶段, 韧带状液滴在表面扰动波作用下, 厚度逐渐下降并发生解体。若二次雾化韧带状液滴的破碎发生在曲张波波谷处, 则会产生一部分纺锤状粉末。

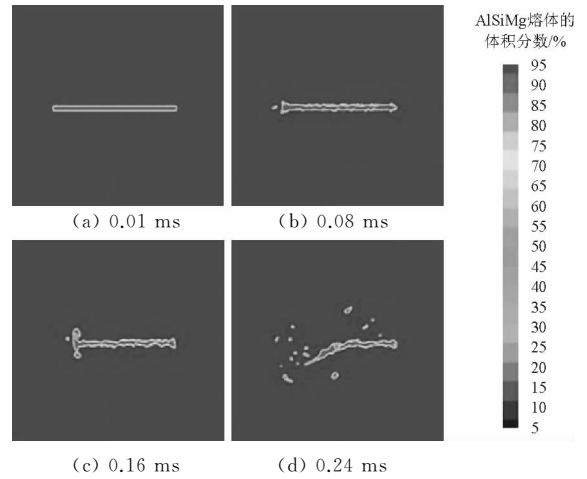


图 10 韧带二次雾化的不同阶段^[17]

Fig.10 Different segments of secondary atomization of ligaments^[17]

2.3 冷却凝固阶段

气雾化技术制备的金属粉末形貌取决于凝固时间与球化时间的大小, 因此对液滴冷却凝固阶段的研究, 是金属粉末微观组织及形貌调控的关键。当金属液滴离开加热区域温度即开始下降, 直至 We 数低于二次雾化临界值, 二次雾化结束, 金属液滴则继续冷却凝固。 Bi 数在冷却凝固阶段可用于表示液滴内部热阻与其表面换热阻之比:

$$Bi = \frac{hD}{k} \quad (8)$$

$$h = \frac{k_g (2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}})}{D} \quad (9)$$

$$Re = \rho_g D \frac{|u_d - u_g|}{\mu_g} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{\mu_g C_{pg}}{k_g} \quad (11)$$

$$|u_d - u_g| \approx u_0 \left[\frac{T_d - T_g}{T_0} \right]^2 \quad (12)$$

式中, h 为对流传热系数; k 为液滴导热系数; k_g 为气体导热系数; Re 和 Pr 分别为雷诺数和普朗特数; c_{pg} 为单位质量气体比热; μ_g 为气体动态黏度; u_0 是气体初速度; T_g 、 T_d 分别为气体和液滴的温度; T_0 为熔体初始温

度。

当 $D < 50\ \mu\text{m}$ 时,求得 $B_i < 0.01$,这意味着液滴表面的主要散热方式为对流散热,因此液滴内部可以看做恒温系统,传热公式^[24-25]:

$$c_{pd} \frac{dT_d}{dt} = \Delta H_d \frac{df_s}{dt} - \frac{6h}{\rho_d D} (T_d - T_g) \quad (13)$$

$$c_{pd} = c_L - (c_L - c_s) f_s \quad (14)$$

$$\Delta H_d = \Delta H_f - (c_L - c_s) (T_L - T_d) \quad (15)$$

式中, ΔH_d 为液滴单位质量的焓; ΔH_f 为凝固潜热; c_{pd} 、 c_s 、 c_L 分别是液固混合物比热容、固体颗粒比热容、液体比热容; f_s 为固相率; T_L 为液相线温度。

冷却凝固阶段可分为液相冷却阶段、形核与再辉阶段、凝固阶段、固相冷却阶段^[26]。

(1) 液相冷却 是指熔滴停止加热并冷却至发生相变之前这段时间,熔滴冷却过程符合牛顿冷却模型。CIFTCI N 等^[27] 探究了气雾化过程中金属熔滴冷却速率 $\dot{T}$ ($\dot{T} = \frac{dT_d}{dt}$) 的影响因素,发现熔滴的直径和气液比(GMR)对冷却速率影响很大,且气液比受气体初始温度的影响,并非独立因素。熔滴发生液相冷却时 f_s 为 0,传热方程为:

$$c_L \frac{dT_d}{dt} = \frac{6h}{\rho_d D} (T_g - T_d) \quad (16)$$

(2) 形核与再辉 根据冷却速率的不同,液滴可能发生晶化转变和非晶化转变。在此阶段液滴温度降低至固相线温度以下,开始发生形核。液滴表面形核示意图见图 11。

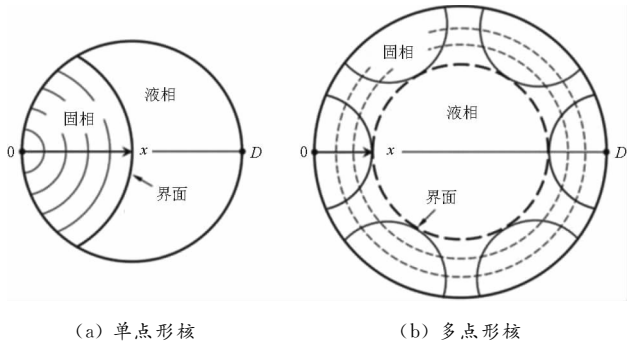


图 11 液滴形核示意图^[28]
Fig.11 Schematic diagram of droplet nucleation^[28]

当液滴小于一定尺寸时发生单点形核,反之则发生多点形核^[29]。单点形核、多点形核过程中液滴固相率 f_s 分别用式(17)和式(18)表示:

$$f_s = \frac{3Dx^2 - x^3}{2D^3} \quad (17)$$

$$f_s = n \left[4 \left(\frac{x}{D} \right)^3 - 3 \left(\frac{x}{D} \right)^3 \right] \quad (18)$$

式中, x 为沿生长轴凝固距离; n 为初始形核数。

当液滴发生晶化转变时,形核过程中凝固潜热快速释放并大于液滴散热速率,液滴温度再次升高发生再辉现象。再辉过程中,凝固潜热释放速率逐渐下降,直至液滴散热速率等于凝固潜热的释放速率,此时液滴达到最高再辉温度,再辉结束。形核与再辉结束时,冷却速率 $\frac{dT_d}{dt} = 0$,传热方程为:

$$\Delta H_d \frac{Df_r}{dt} = \frac{6h}{\rho_d D} (T_r - T_g) \quad (19)$$

式中, T_r 、 f_r 分别为最高再辉温度及此时的固相率。

(3) 凝固阶段 再辉结束后,凝固潜热释放速率低于液滴散热速率,晶体继续长大。液滴固相率为:

$$f_s = (1 - f_r) \left(\frac{T_L - T_r}{T_L - T_d} \right)^{\frac{1}{1-k_0}} \quad (20)$$

式中, k_0 为平衡溶质分配系数。

(4) 固相冷却 当液滴凝固为金属粉末后,进入固相冷却阶段。此时固相率为 1,传热方程为:

$$c_s \frac{dT_d}{dt} = \frac{6h}{\rho_d D} (T_g - T_d) \quad (21)$$

液滴的冷却凝固阶段决定了粉末最终形貌及微观结构。YANG D Y 等^[30] 分析金属液滴形核过程的微观组织形貌变化,测量了不同尺寸粉末的胞晶、枝晶及胞状枝晶与粉末直径的关系,结果见图 12。当液滴尺寸增大时,其主要形态由胞晶结构转变为枝晶结构,微观结构为典型的胞晶和枝晶混合形态。JIANG Y 等^[31] 通过观察气雾化制备的不同粒径 2TiB₂/C 复合粉末,发现随着粉末粒径增大,其表面粗糙度逐渐上升,表面凝固组织由细晶及少量胞状晶转变为枝晶,这些凝固组织以不同比例同时出现在粉末表面。这是由于大尺寸液滴相对于小尺寸液滴比表面积小,冷却速率低,其表面凝固组织有足够的时间长大粗化。粉末内部凝固组织与表面凝固组织有同样的规律,小粒径粉末内部组织为胞晶结构,大粒径粉末主要表现为枝晶结构,并随着粉末粒径进一步增大,二次枝晶所占面积逐渐增

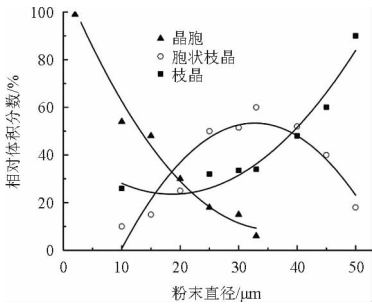


图 12 不同尺寸粉末中胞晶、枝晶及胞状枝晶的相对体积分数^[30]
Fig.12 Relative volume fraction of cell crystals, dendrites and cellular dendrites in powders with different sizes^[30]

加^[32],原因是大颗粒内部凝固潜热释放不及时,给内部组织长大粗化提供了条件^[33]。

3 气体雾化技术重要影响参数

过程参数可控是气雾化技术的优点之一,调节气体雾化参数是改善粉末性能最高效的方法。现如今,并没有一套完整的雾化参数体系表明雾化参数与金属粉末性能的关系,因此对气雾化参数影响机理的研究是气雾化最重要的部分之一。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压力、雾化气体温度、熔体过热度、金属液流直径等。

3.1 雾化压力的影响

雾化压力是粉末性能的重要影响参数,其大小决定熔体的破碎程度,并最终影响着粉末粒径及微观形貌。ARACHCHILAGE K H 等^[34]在保持其他雾化参数不变的条件下,探究雾化压力对雾化过程的影响,发现增大雾化压力可以提高雾化速率,明显改善雾化效果。SUPRIADI S 等^[35]探究了不同雾化压力下制备的不锈钢粉末球形度以及粉末粒径变化,发现增大雾化压力,更容易制备小粒径粉末,且粉末粒径范围随着压力增大而减小,但粉末球形度有所降低。刘文胜等^[36]指出,粉末粒径随雾化压力增大而减小,是因为雾化压力增大时雾化气体速度增大,更多的气体动能转化为金属液流的表面能,使金属液流的破碎更加充分,还认为雾化压力增大使粉末球形度降低,是因为更大的雾化压力使惰性气体冷却效果增加,液滴的冷却凝固时间缩短,甚至短于球形化时间,液滴未能充分球形化便已凝固,因此降低了粉末的球形度。XU L 等^[37]利用数值模拟探究气雾化破碎机理,得出了类似结论。金莹等^[38]在不同雾化压力下制备 TC4 合金粉末,发现雾化压力过高时,粉末平均粒径不降反增。杨启云等^[39]认为当雾化压力过高时,较多的微小粒径粉末(粒径 $<10\ \mu\text{m}$)会产生,这些粉末比表面积大,容易发生团聚现象,且过高的雾化压力会加强粉末之间的碰撞,更多凝固的细粉随回流气体再次进入雾化区域,与还未凝固的大液滴发生碰撞并附着在大液滴表面形成卫星粉,这些现象导致了粉末平均粒径增大。综上所述,适当增大雾化压力有利于减小粉末粒径,但雾化压力过高则会适得其反。

3.2 雾化气体温度的影响

加热雾化气体可以使气体在喷嘴出口处膨胀,达到提高喷射速度的目的,是提高雾化效率、减少气体用量的重要方法之一。CIFTCI N 等^[27]探究了雾化气体温度对粉末性能的影响,通过分析雾化过程发现,当雾化

气体温度升高时,雾化气体流速加快,气体动能增大,利于液滴更充分的破碎,且雾化温度升高时,液滴冷却速率有所下降,液滴在凝固前可以充分破碎,因此粉末粒径减小。WANG P 等^[18]通过模拟气雾化过程,研究了不同雾化温度对气雾化过程的影响,发现随着雾化气体温度升高,一次雾化的气液相对速度增大,降低了一次雾化液膜的厚度从而减小了一次雾化液滴直径。另一方面,温度升高会扩大二次雾化的弥散角,降低了粉末之间的碰撞几率,粉末球形度得到提高,且气体温度升高会使循环区以下的气体流速增加从而增大气液相对速度,有助于液滴细化。

3.3 过热度的影响

不同雾化材料的熔点及冷却速率有所差异,根据雾化材料的特性合理设定熔体过热度,是雾化过程顺利进行的前提。吕海波等^[40]发现随着过热度增加,粉末形貌由不规则的哑铃状、棒状变为球状,说明增大过热度可以提高粉末的成球率。这是由于熔体过热度增大延长了液滴凝固时间,同时使金属液流的黏度降低,缩短了液滴球形化所需时间,液滴在凝固前可以充分球形化。但过热度一旦超出合理区间,就会造成粉体的变形。过热度过低时,液态金属的黏度增加,球形化时间延长;过热度过高时,液滴表面氧化物增加,液滴球形化受到阻碍。不同过热度条件下制备的粉末性能,随着过热度增大,粉末的粒度变细,细颗粒呈增加趋势,粉末平均粒径降低^[36]。这是因为熔体过热度增大使熔体液流黏度和表面张力下降,气体破碎熔体所需的力减小,因此更容易被破碎。欧阳洪武等^[41]在保持其他雾化条件不变的情况下,研究了过热度分别为 150、200、250 和 300 $^{\circ}\text{C}$ 下制备的铜粉,得出了同样的结论。LUBANSKA H^[42]总结了计算粉末中值粒径的经验公式为:

$$d_{50} = K \left[\frac{\eta_m \delta A^2 \rho_g^2 d_t}{\eta_g G^2 \rho_d} + \left(1 + \frac{M}{G} \right) \right]^2 \quad (22)$$

式中, d_{50} 为粉末中值粒径; K 为特定雾化气体压力和金属液流条件下为经验常数; η_m 和 η_g 分别为金属液流与雾化气体的运动黏度; M 和 G 分别为金属液流和雾化气体的质量流量; A 为雾化器环缝或环孔喷嘴的面积; d_t 为导液管内径。由经验公式可知熔体液流黏度、表面张力等因素对粉末中值粒径产生影响。

当熔体达到一定温度后,通过调节熔体过热度来改善粉末粒径,效果不再明显。郭快快等^[43]探究了不同熔炼功率下制备的金属粉末性能,发现雾化功率增大会导致空心粉变多,可能原因是熔体温度升高后,原子间距增大,液态金属原子也比较活跃,因此这种空隙使得气体原子更容易在熔体中溶解。

3.4 粉末缺陷的形成

3.4.1 卫星粉的形成

卫星粉是小粒径粉末附着在大粒径粉末上造成的一种粉末缺陷,形貌见图 13。卫星粉的存在会影响粉末的流动性、粒径和松装密度等。卫星粉缺陷主要形成于二次雾化阶段,小尺寸液滴由于比表面积大、冷却速率高,首先发生凝固并与还未完全凝固的大尺寸液滴发生碰撞,最终附着在大尺寸颗粒表面,形成卫星粉。通过改变气体入射角度,使液滴充分弥散是减少卫星粉的有效途径。

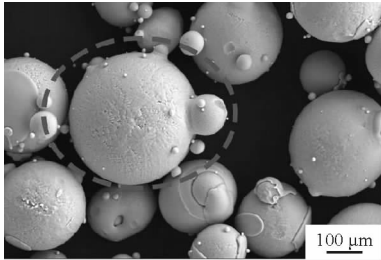


图 13 卫星粉形貌^[18]

Fig.13 Morphology of satellite powder^[18]

陈珊珊等^[44]在保持其他条件不变的情况下,通过对雾化率和雾化室压力的控制,改变粉末的凝固时间和各种状态颗粒的浓度,从而达到减少颗粒物之间的碰撞和细微粉末附着的问题。随着雾化率降低,GMR 增大,粉末的凝固时间缩短,可以有效减少粉末附着现象;随着雾化室内压力降低,雾化室内的细微粉末浓度逐渐下降,因此粉末之间撞击几率也会下降,提高了粉末的球形度。ANDERSON I E 等^[8]通过对气雾化过程的观察,发现一部分小颗粒粉末会随回流气体向上流动,重新进入雾化区域并与还未凝固的液滴发生碰撞形成卫星粉。通过对回流气体的抑制,可以避免细粉回流现象从而减少卫星粉。

3.4.2 空心粉的形成

使用空心粉进行 3D 打印会使打印件产生气孔,进而产生裂纹,因此空心粉率的控制至关重要。LUO S 等^[45]通过对雾化过程的模拟发现,一次雾化阶段气液剧烈接触,液流表面形成的波快速移动,将气体混入液流中产生泡沫,这些含有气泡的液滴凝固后形成了空心粉。WANG P 等^[46]发现二次雾化主要以袋式破碎为主,袋式破碎的特殊机制致使大液滴破碎时液膜闭合,容易产生空心粉,增大气体流速可以减少因袋式破碎产生的空心粉。金莹等^[38]发现当雾化压力较大时,惰性气体分子与液滴接触几率增大,且雾化压力增大导致液滴冷却速度加快,惰性气体分子未能在液滴凝固前逃逸,从而产生了空心粉。近年来在常规气雾化技术上改

进的组合雾化系统,利用一级雾化器将液柱分解为均匀的液滴,二级雾化器进一步将液滴分解成更小的液滴,可以在一定程度上减少空心粉率。

4 气体雾化数值模拟

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟为复杂的气雾化过程提供了一种研究方案,一定程度上解决了雾化过程反应迅速、难以观测等问题,是当下气雾化技术与今后一段时期技术发展的关键环节。研究者通过数值模拟对气雾化试验进行了初步设计,对试验结果近似值进行了求解,降低了气雾化试验的成本,提高了试验效率。

雾化过程的模拟最关键的是气液界面的跟踪。界面跟踪方法大致有两类,分别是欧拉界面捕捉法和拉格朗日界面追踪法。流体体积(VOF)模型基于欧拉法,适用于非稳定的多相流模型,是常见的界面跟踪方法。离散相(DPM)模型基于拉格朗日法对离散相进行追踪。CHANG L 等^[47]基于流体体积(VOF)模型和剪切应力传输(SST) $k-\epsilon$ 湍流模型,模拟了熔融态金属在导流管中的流动,发现当导流管内径从 4 mm 减小至 2 mm,粒径小于 150 μm 的粉末产率从 54% 提高到了 94%,经验证所建立的模型较准确地模拟了熔融态金属在导流管中的流动。MOTAMAN S 等^[48]利用数值模拟研究了熔体回流现象。ZEOLI N^[49]采用 VOF 多相流和雷诺应力模型(RSM)研究了一次雾化过程。THOMPSON J S 等^[50]使用欧拉-拉格朗日方法,准确预测了由紧耦合喷嘴雾化制备的金属粉末粒径。

为简化计算,雾化模拟常常会忽略一些影响因素。MARKUS S 等^[51]开发了一种数值模拟方法,将一次和二次雾化机制与其他凝固过程中的传热相结合,但该方法假设雾化气体不可压缩,因此模拟结果与实际雾化结果有一定差异。FIRMANSYAH D A 等^[52]采用双向液滴-气体耦合实现雾化过程中的质量加载效应,证明液滴的流动会导致气流分布状态发生显著变化,但绝大部分雾化模拟不会考虑金属液流对雾化气体的影响。许多研究者采用 VOF 模型对雾化破碎阶段进行模拟^[53-56],在探究高压气体对液体的破碎机理时,模拟所用网格较大,甚至超过了粉末的尺寸,降低了模拟的准确度,但降低网格大小,又会增加求解时间。动态自适应网格可以在反应剧烈的部分减小网格尺寸以提高模拟准确性,而在其他地方使用粗网格进行计算以提高计算效率。因此,具有动态自适应网格的 VOF 能够较好地模拟气雾化气液相互作用过程,特别是对小液滴形成过程的预测。基于二次破碎模型理论,采用 DPM 对二

次雾化进行模拟最为合适^[57-59]。综上所述,数值模拟能够对气雾化过程进行仿真,且随着数值模拟方法的不断优化,雾化过程的模拟及雾化结果的计算将会不断趋近试验值,但数值模拟无法完全取代试验研究。将模拟结果与试验更好地结合,才是数值模拟的最终目的。

5 结语与展望

增材制造是实现复杂构件、精密设备制造的重要技术之一,金属粉末的特性是影响打印件性能的重要因素。提高金属粉末的球形度、细粉收得率、减少粉末缺陷的形成、降低粉末的制备成本,对产生发展十分重要。在气雾化技术发展历程的基础上,简要综述了近几年国内外相关技术的发展现状及研究成果,并针对气雾化技术存在的几点问题总结如下。

(1)相较于国外,我国在气雾化领域的研究起步较晚,雾化设备的设计、制造仍然存在较多问题。进一步加强雾化喷嘴结构及布局的优化设计、改进熔炼技术、制定气雾化制粉行业标准对于提高粉末性能,加快我国在气雾化领域的发展十分重要。

(2)目前针对雾化参数的研究基本都是单一的考虑某一个雾化参数,鲜有考虑多个雾化参数之间的相互影响,对雾化参数之间的相互影响规律认识不充分,降低了雾化机理及凝固机理相关研究的准确度。

(3)粉末缺陷的形成受多个雾化参数影响,现阶段关于雾化参数、雾化条件对粉末缺陷形成机理的影响研究较少,亟需探索消除粉末缺陷的方法,以达到满足粉末性能要求的同时减少粉末缺陷。

(4)由于当前技术条件的限制,气雾化破碎过程难以观测,而受限于计算机技术与运算方法的发展,现在大部分的相关模拟不够准确,为便于计算甚至忽略了对雾化过程影响较大的因素。进一步探究计算机仿真模拟在金属熔融阶段、熔体雾化阶段的应用是气雾化技术未来发展的重要课题。

参 考 文 献

- [1] 何垚垚,张航,陈子豪,等.多材料增材制造技术进展[J].特种铸造及有色合金,2020,40(10):1 092-1 098.
- [2] HALL E J. Metal-disintegrating apparatus; US, US1501449 A [P]. 1924-07-15.
- [3] 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.
- [4] HOPKINS B. Close-coupled gas atomisation comes of age[J]. Metal Powder Report, 1994, 49(3):34-38.
- [5] 陆亮亮. 3D打印用球形钛粉气雾化制备技术及机理研究[D].北京:北京科技大学,2019.
- [6] GRANT N J. Rapid solidification of metallic particulates[J]. JOM, 1983, 35(1):20-27.
- [7] SCHULZ G. Nanoval process offers fine powder benefits[J]. Metal Powder Report, 1996, 11(51):30-33.
- [8] ANDERSON I E. Boost in atomizer pressure shaves powder-particle size[J]. Advanced Materials & Processes, 1991, 140(1):30-32.
- [9] STRAUSS J T. Hotter gas increases atomization efficiency[J]. Metal Powder Report(UK), 1999, 54(11):24-28.
- [10] KAISER R, LI C, YANG S, et al. A numerical simulation study of the path-resolved breakup behaviors of molten metal in high-pressure gas atomization: With emphasis on the role of shock waves in the gas/molten metal interaction[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(3):623-630.
- [11] 夏敏,汪鹏,张晓虎,等.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.
- [12] 祁航,周香林,徐良辉,等.超音速气雾化喷嘴的水流模拟试验研究[J].热喷涂技术,2020,12(3):54-59.
- [13] THOMPSON J S. A study of process variables in the production of aluminium powder by atomization[J]. J. Inst. Metal, 1948, 74:101-132.
- [14] 朱盼星,石生荷,杨剑,等.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.
- [15] EI-GENK M S, SABER H H. Minimum thickness of a flowing down liquid film on a vertical surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(15):2 809-2 825.
- [16] SENECAI P K, SCHMIDT D P, NOUAR I, et al. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(6-7):1 073-1 097.
- [17] 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.
- [18] WANG P, LI J, WANG X, et al. Impact mechanism of gas temperature in metal powder production via gas atomization[J]. Chinese Physics, 2021, B30(5):329-343.
- [19] MATES S P, SETTLES G S. High-speed imaging of liquid metal atomization by two different close-coupled nozzles[J]. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1996, 1(1):67-80.
- [20] MI J, GRANT P S, FRITSCHING U, et al. Multiphysics modeling of the spray forming process[J]. Materials Science and Engineering, 2008, A477(1-2):2-8.
- [21] 程会川,张建超,李育隆.韦伯数对紧耦合雾化喷嘴初始破碎模式的影响[J].科学技术与工程,2020,20(17):6 806-6 811.
- [22] ZEOLI N, GU S. Numerical modelling of droplet break-up for gas atomisation[J]. Computational Materials Science, 2006, 38(2):282-292.
- [23] 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.
- [24] GRANT P S. Spray forming[J]. Progress in Materials Science, 1995, 39(4-5):497-545.
- [25] SU Y H, TSAO C Y A. Modeling of solidification of molten metal droplet during atomization[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1997, B28:1 249-1 255.

- [26] 王利卿,赵少阳,谈萍,等.气雾化球形金属粉末形成机理的研究进展[J].钛工业进展, 2020, 37(5): 36-42.
- [27] CIFTCI N, ELLENDT N, COULTHARD G, et al. Novel cooling rate correlations in molten metal gas atomization[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, B50(2): 666-677.
- [28] HU Y, ZHOU X L, XU L H, et al. Motion and solidification behavior analysis of Fe-based alloy droplets during gas atomization[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2020, B51(6): 1-11.
- [29] XU Q, LAVERNIA E J. Influence of nucleation and growth phenomena on microstructural evolution during droplet-based deposition[J]. Acta Materialia, 2001, 49(18): 3 849-3 861.
- [30] YANG D Y, PENG H X, FU Y Q, et al. Nucleation on thermal history and microstructural evolution of atomized Ti-48Al nano and micro-powders[J]. Nanoscience and Nanotechnology Letters, 2015, 7(7): 603-610.
- [31] JIANG Y, ZHANG M, LI Y, et al. Solidification behavior of in situ TiB₂/Cu composite powders during reactive gas atomization[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2021, 36(2): 203-208.
- [32] 崔小杰,苏新磊,刘岩,等.气雾化工艺对高熵合金粉体粒径的影响[J].特种铸造及有色合金, 2022, 42(4): 441-445.
- [33] 杨乐彪,任晓娜,夏敏,等.电极感应熔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): 2 017-2 023.
- [34] ARACHCHILAGE K H, HAGHSHENAS M, PARK S, et al. Numerical simulation of high-pressure gas atomization of two-phase flow; Effect of gas pressure on droplet size distribution[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(11): 2 726-2 732.
- [35] SUPRIADI S, SUSIMAH T I, AKBAR M H S, et al. Effect of pressure on the gas atomizer to fabricate stainless steel metal powder[J]. Key Engineering Materials, 2020, 833: 54-58.
- [36] 刘文胜,彭芳,马运柱,等.工艺条件对气雾化制备 SnAgCu 合金粉末特性的影响[J].中国有色金属学报, 2009, 19(6): 1 074-1 079.
- [37] XU L, ZHOU X, LI J, 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): 1 027-1 045.
- [38] 金莹,刘平,史金光,等.雾化压力对电极感应熔炼气雾化 TC4 粉末形貌与性能的影响[J].粉末冶金材料科学与工程, 2018, 23(3): 312-317.
- [39] 杨启云,吴文恒,张亮,等.EIGA 雾化法制备 3D 打印用 Ti-6Al-4V 合金粉末[J].粉末冶金工业, 2018, 28(3): 8-12.
- [40] 吕海波,母育锋.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.
- [41] 欧阳鸿武,陈欣,余文煮,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(1): 84-88.
- [42] LUBANSKA H. Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals[J]. JOM, 1970, 22(2): 45-49.
- [43] 郭快快,刘常升,陈岁元,等.功率对 EIGA 制备 3D 打印用 TC4 合金粉末特性的影响[J].材料科学与工艺, 2017, 25(1): 16-22.
- [44] 陈珊珊,曾克里,宋信强,等.真空气雾化金属粉末“卫星球”形成机理的研究[J].材料研究与应用, 2019, 13(1): 44-47.
- [45] LUO S, WANG H, GAO Z, et al. Interaction between high-velocity gas and liquid in gas atomization revealed by a new coupled simulation model[J]. Materials & Design, 2021, 212: 110 264.
- [46] WANG P, LI J, LIU H S, et al. Process modeling gas atomization of close-coupled ring-hole nozzle for 316L stainless steel powder production[J]. Chinese Physics, 2021, B30(5): 628-640.
- [47] CHANG L, XIN L, SHI 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): 3 192-3 204.
- [48] MOTAMAN S, MULLIS A M, COCHRANE R F, et al. Numerical and experimental modelling of back stream flow during close-coupled gas atomization[J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 1-10.
- [49] ZEOLI N. Multiphase Modelling of the Characteristics of Close Coupled Gas Atomization [D]. Birmingham: Aston University, 2011.
- [50] THOMPSON J S, HASSAN O, ROLLAND S, 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.
- [51] MARKUS S, FRITSCHING U. Discrete break-up modeling of melt sprays[J]. International Journal of Powder Metallurgy, 2006, 42(4): 23-32.
- [52] FIRMANSYAH D A, KAISER R, ZAHAF R, et al. Numerical simulations of supersonic gas atomization of liquid metal droplets[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53: 1-7.
- [53] ZEOLI N, TABBARA H, GU S. CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(24): 6 498-6 504.
- [54] TIAN X S, ZHAO H, LIU H F, et al. Three-dimensional large eddy simulation of round liquid jet primary breakup in coaxial gas flow using the VOF method[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 131: 396-402.
- [55] MÈNARD T, TANGUY S, BERLEMONT A. Coupling level set/VOF/ghost fluid methods: Validation and application to 3D simulation of the primary break-up of a liquid jet[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(5): 510-524.
- [56] NAMBU T, MIZOBUCHI Y. Detailed numerical simulation of primary atomization by crossflow under gas turbine engine combustor conditions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(2): 3 213-3 221.
- [57] WEI M, CHEN S, SUN M, et al. Atomization simulation and preparation of 24CrNiMoY alloy steel powder using VIGA technology at high gas pressure[J]. Powder Technology, 2020, 367: 724-739.
- [58] GUILDENBECHER D R, LÓPEZ-RIVERA C, SOJKA P E. Secondary atomization[J]. Experiments in Fluids, 2009, 46(3): 371-402.
- [59] JADIDI M, MOGHADERNEJAD S, DOLATABADI A. A comprehensive review on fluid dynamics and transport of suspension/liquid droplets and particles in high-velocity oxygen-fuel (HVOF) thermal spray[J]. Coatings, 2015, 5(4): 576-645.

(编辑:彭瑾)