

面向金属增材制造的气体雾化制粉技术研究进展*

黎兴刚^{1,2}, 刘畅³, 朱强²

(1. 南方科技大学前沿与交叉科学研究院, 深圳 518055;
2. 南方科技大学机械与能源工程系, 深圳 518055;
3. 南方科技大学创新创业学院, 深圳 518055)

[摘要] 微细球形金属粉末是金属增材制造(3D 打印)的主要原材料。气体雾化技术是制备微细球形金属粉末的重要方法。从提高粉末细粉收得率、改善粉体质量与开发新型粉末材料 3 个角度出发, 分析了面向金属增材制造的气体雾化制粉技术的研究现状与发展趋势。围绕优化雾化器结构与布局、提高雾化介质性能与优化熔体特征 3 个方面, 总结了提高粉末细粉收得率的方法, 分析了空心粉的形成机理, 提出了空心粉控制方法。分析了卫星粉形成过程中颗粒-熔滴的碰撞来源与碰撞机理, 提出了卫星粉控制方法。提出了金属基复合粉末作为 3D 打印金属基复合材料部件的原材料, 简述了金属雾化-颗粒共喷射方法制备金属基复合粉末材料的研究进展。

关键词: 金属增材制造; 金属粉末; 气体雾化; 粉末收得率; 空心粉; 卫星粉; 复合粉末

DOI:10.160080/j.issn1671-833x.2019.22.022



黎兴刚

副研究员, 研究方向为增材制造金属粉体材料制备技术及工艺性能、熔体分散凝固技术、多相流传热传质过程仿真模拟等, 入选北京市科技新星计划、北京市海外人才海聚工程等。

金属增材制造(3D 打印)技术作为整个增材制造体系中最为前沿和最有潜力的技术, 是增材制造技术发展的重要标志。目前, 金属增材制造技术主要发展为两类稳定的基于粉末原料的成形工艺:(1) 基于同步送粉技术的激光熔融沉积技术(Laser Melting Deposition, LMD) 或称激光立体成形技术(Laser Solid Forming, LSF)^[1-2]; (2) 基于粉床铺粉技术的选区激光熔化技术(Selective Laser Melting, SLM)^[3-5]和电子束选区熔化技术(Electron Beam Selective Melting, EBSM)^[6]。据 Wohlers Report 2018^[7] 统计, 全球增材制造金属粉末材料的销售额

由 2015 年 0.881 亿美元, 2016 年 1.268 亿美元, 上升至 2017 年 1.834 亿美元。

增材制造金属粉末要求纯净度高、球形度好、粒径分布窄、氧含量低^[8]。目前广泛应用的增材制造金属粉末材料主要集中为以 316L 为代表的 316 系不锈钢、IN718 和 IN625 为代表的镍基高温合金、18Ni300 为代表的模具钢、TC4 为代表的钛合金、CoCrMo 为代表的钴铬合金、CuSn10 为代表的青铜以及 AlSi10Mg 为代表的铝合金。以激光作为能量源的打印机, 因其聚焦光斑精细, 较易熔化细粉, 适合使用 15~53 μm 的粉末作为耗材, 粉末补给方式为逐层铺粉;

* 基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91860131); 深圳市技术攻关(JSGG20180508152608855)。

以电子束作为能量源的打印机,聚焦光斑略粗,更适于熔化粗粉,适合使用45~105 μm 的粉末作为耗材;部分场合下105~250 μm 的粉末作为耗材,粉末补给方式为同步送粉^[9-10]。

一般由金属气态或熔融液态转变成粉末时,粉末颗粒形状趋于球形;由固态转变为粉末时,粉末颗粒趋于不规则形状;由水溶液电解法制备的粉末多数呈树枝状;采用氢化脱氢法所得粉末外形普遍呈现棱角或锯齿状^[9,11-12]。一般而言,球形度越高,粉末颗粒的流动性越好,在金属3D打印时铺粉及送粉更容易进行。因此,金属熔体雾化法成为3D打印用金属粉末的主要制备方法。

在金属熔体雾化工艺中,具有一定过热度的金属熔体被输送到雾化区被雾化成粉末。不同的熔炼工艺与不同的雾化工艺结合形成多种制粉工艺,如美国Crucible公司开发的水冷铜坩埚熔炼-气体雾化工艺、德国ALD公司开发的电极感应熔炼-气体雾化工艺(Electrode Induction Melting Gas Atomization, EIGA)、加拿大AP&C公司开发的等离子雾化工艺(Plasma Atomization, PA)、等离子旋转电极雾化工艺(Plasma Rotating Electrode Process, PREP)等多用来制备高活性金属粉末,如钛及钛合金粉末等;传统的耐火材料坩埚熔炼-气体雾化工艺,真空工况下一般称作真空感应熔炼-气体雾化(Vacuum Induction Melting Gas Atomization, VIGA),则通常用来制备铝合金、铜合金、不锈钢、镍基高温合金等低活性金属粉末。上述制粉工艺均已被用于制备3D打印用金属粉末,并已实现批量化生产。文献[13-14]已对上述制粉工艺的原理、特征、适用范围等做了详细的介绍,本文不再赘述。

一般认为PREP制备的粉末球形度较高,能够很好地解决空心粉

和卫星粉等问题,但是细粉收得率较低,譬如旋转电极的转速可以达到 $3 \times 10^4 \text{r/min}$,但TC4合金粉末的细粉收得率($<53\mu\text{m}$)一般不高于20%。PREP工艺更适合制备粒度较粗、密度较大的金属粉末,如镍基高温合金粉末等。气体雾化工艺仍是主要的3D打印用金属粉末制备工艺。虽然在VIGA、EIGA、PA等工艺中采用了不同的母合金熔炼方式,但是熔体射流/熔滴均是通过高压高速气流或高温等离子流被雾化成金属粉末。与PREP工艺相比,气体雾化工艺的细粉收得率较高,但粉末中存在卫星粉、空心粉等问题。因此,本文重点讨论气体雾化制粉技术,主要围绕如何进一步提高粉末收得率、改善粉体质量、开发新型3D打印粉末材料等内容展开。

粉末收得率

粉末收得率是雾化制粉技术产业化关注的重要指标。在气体雾化制粉领域,大量的研究工作集中在如何提高雾化效率,进而提高细粉收得率,主要通过以下3种方式:(1)优化雾化器结构与布局;(2)提高雾化介质性能;(3)优化熔体特征。

1 雾化器设计

1.1 气体喷嘴结构

一般用无量纲化参数马赫数(Ma)表征气流的运动速度与可压缩性,其定义为流场中某点的速度(U)同该点的当地声速(c)之比,即

$$\text{Ma} = U / c \quad (1)$$

因为声速是温度的函数,所以马赫数是温度的函数。当 $\text{Ma} < 0.3$ 时,为亚声速不可压缩流;当 $0.3 \leq \text{Ma} < 0.8$ 时,为亚声速可压缩流;当 $0.8 \leq \text{Ma} < 1.2$ 时,为跨声速流;当 $\text{Ma} \geq 1.2$ 时,为超声速流。对于特定的气体喷嘴型腔结构,取决于雾化气体压强(p_0)、气体喷嘴出口压强(p_e)以及雾化室内环境压强(p_a),雾

化气体流出气体喷嘴后会形成不同特征的射流。下标“0”表示气体停滞状态或喷盘腔体内状态(Stagnant condition),下标“e”表示气体喷嘴出口状态(Exit condition),下标“a”表示雾化室内环境状态(Ambient condition)。一般雾化气体压强大于气体喷嘴出口压强($p_0 > p_e$)。当雾化气体压强与雾化室内环境压强之比(p_0/p_a)超过某一临界值时,会形成超音速气流。该临界值定义为^[15]:

$$\left(\frac{p_0}{p_a}\right)_{\text{crit}} = \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2)$$

式中, κ 为比热容比,下标“crit”表示临界状态(Critical state)。对于双原子气体,譬如氮气(N_2), $\kappa=1.40$,则该临界值 $(p_0/p_a)_{\text{crit}}=1.89$ 。气体喷嘴出口压强与雾化室内环境压强决定了超音速气体射流的特征:当 $p_e > p_a$ 时,为亚扩展气流;当 $p_e = p_a$ 时,为理想扩展气流;当 $p_e < p_a$ 时,为过扩展气流(图1)^[16]。

对于超音速亚扩展气流,由于气体喷嘴出口压强高于雾化室内环境压强($p_e > p_a$),气流在流出喷嘴后继续扩展,气流中形成一系列激波,气流扩展与压缩交替进行,如图1(a)所示。在靠近气体喷嘴出口处气流速度出现剧烈的上升-下降交替变化,直至气流中的压力势逐渐被激波分解,气流速度变平缓,如图2^[15]所示。当雾化气体压强与雾化室内环境压强之比(p_0/p_a)高于临界值时,雾化气体通过型腔为均匀或收缩直孔结构的喷嘴,一般会形成亚扩展气流,喷嘴出口处气流速度为声速。当雾化气体压强与雾化室内环境压强之比 $p_0/p_a < 3.85$ 时,气流中的激波一般为斜激波;当 $p_0/p_a > 3.85$ 时,可能会出现正激波(马赫盘)。

对于超音速理想扩展气流,由于气体喷嘴出口压强与雾化室内环境压强相等($p_e = p_a$),不存在压力差,气流中无激波形成,如图1(b)所示。

气流速度变化平缓,如图2所示。形成超音速理想扩展气流的喷嘴一般具有特定的收缩-扩展型腔结构。

对于超音速过扩展气流,其在喷嘴出口处具有最大速度,由于气体喷嘴出口压强低于雾化室内环境压强 ($p_e < p_a$),气流中形成一系列激波,气流压缩与扩展交替进行,如图1(c)所示。在靠近气体喷嘴出口处气流速度出现剧烈的下降-上升交替变化,直至气流中的压力势逐渐被激波分解,气流速度变平缓,如图2所示。形成超音速过扩展气流的喷嘴一般具有收缩-扩展型腔结构。

在超音速亚扩展与过扩展气流中,尤其是在较高的雾化气体压强下,激波的形成,尤其是正激波(马赫盘),会使雾化气体的势能以热能的形式消散掉,从而降低了用于击碎熔体的雾化气体的动能,进而降低了雾化效率。在超音速理想扩展气流中,无激波产生,气流在雾化区及喷射区具有较高的动能,有利于提高雾化效率,如图2所示。

优化气体喷嘴结构可以提高雾化气流撞击熔体射流的动能,进而提高细粉收得率。大量的研究工作致力于通过优化雾化器喷孔或者喷缝的腔体结构来抑制或减少超音速雾化气流中的激波,提高雾化气体压力势能向动能的转化率。譬如,基于拉瓦尔(Laval)喷管的型线结构,为了获得理想扩展气流,应选择喷管扩展部某一特定截面作为气体喷嘴的出口截面,从而使气体喷嘴出口压强与雾化室内环境压强相等 ($p_e = p_a$),如图3所示。假设雾化气流是超音速等熵气流,气体喷嘴出口压力与雾化压力的关系如下^[17],

$$p_e = p_0 \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \text{Ma}_e^2 \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \quad (3)$$

式中, Ma_e 代表气体喷嘴出口马赫数,其取决于喷嘴出口截面面积 (A_e) 与拉瓦尔(Laval)喷管喉部截面面

积 (A^*) 之比,即

$$\frac{A_e}{A^*} = \frac{1}{\text{Ma}_e} \left(\frac{2 + (\kappa - 1) \text{Ma}_e^2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \quad (4)$$

气体喷嘴出口马赫数是拉瓦尔喷管截面面积比 (A_e/A^*) 的隐函数,

给定截面面积比,根据式(4)求解气体喷嘴出口处马赫数难度较大。为了实现在工程应用中喷嘴的快速设计,已经建立了可压缩气流特征数据库^[17],根据该数据库可以快速地确定与给定截面面积比相对应的气体

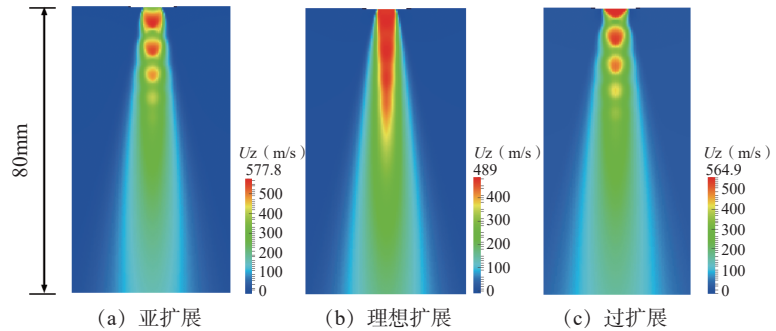


图1 不同特征的超音速气流(数值模拟)

Fig.1 Under-, ideally- and over-expanded supersonic gas jets (numerical simulation)

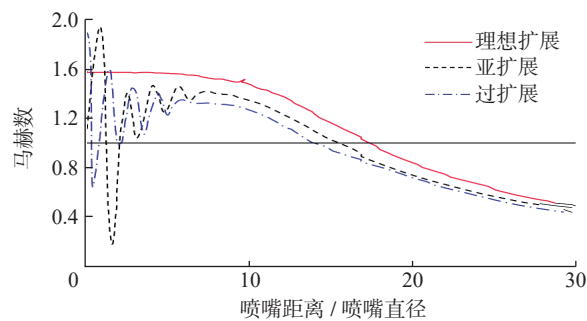


图2 雾化气体压强 $p_0=0.55\text{MPa}$ 、恒定气体流量下沿亚扩展、理想扩展、过扩展超音速气流中心线的轴向速度分布情况(数值模拟)

Fig.2 Velocity distribution at the centre-line of under-, ideally-, and over-expanded supersonic gas jets at atomization gas pressure $p_0 = 0.55\text{MPa}$ and constant gas mass flow rate (numerical simulation)

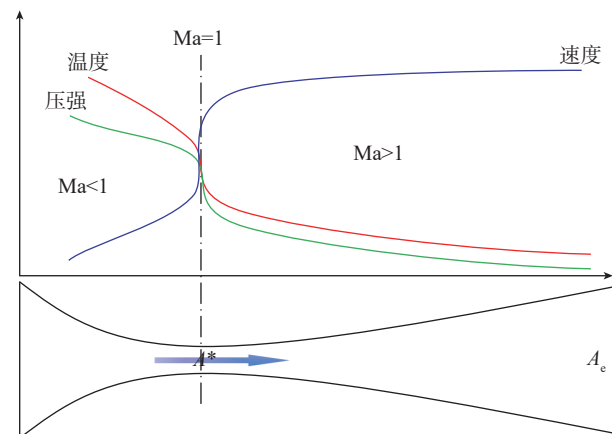


图3 拉瓦尔喷管的型腔结构示意图以及气体压强、速度、温度沿喷管中心线的变化趋势
Fig.3 Configuration of Laval nozzle and distribution of pressure, velocity, and temperature at the centre-line of Laval nozzle

喷嘴出口马赫数。

基于上述原理,公开号为US 6142382的美国专利设计了收缩-扩张型超音速气流喷嘴^[18],具有该类型腔结构的环孔喷嘴的雾化效率高于具有直孔型腔结构的环孔喷嘴,譬如前者在较低的气体/金属流量比(Gas to metal ratio, GMR)下获得的粉末粒度分布与后者相近^[19]。Schwenck等^[20]设计了具有收缩-扩张型腔结构的环缝喷嘴,与传统的具有收缩型腔结构的环缝喷嘴相比,制备的金属粉末具有更高的细粉收得率以及更窄的粒度分布宽度。为了保证气流的均匀一致,公开号为CN 102581291B的中国专利设计了稳定-收缩-喉部-扩张型的环缝喷嘴^[21]。原则上,具有上述型腔结构的气体喷嘴能够有效地抑制超音速气流中激波的形成,但由于加工技术的限制,尤其是环孔喷嘴,腔体中的型线多被加工成直线,导致气流中的紊流度增大,对激波的抑制效果降低。

Allimant等^[22]设计了一种新型雾化系统,在该系统中熔体导流嘴末端位于拉瓦尔喷管喉部的上方,熔体与从拉瓦尔喷管收缩部喷出的雾化气体混合,经过拉瓦尔喷管喉部(直径4mm),进入扩展部,然后进入雾化室,如图4^[22]所示。利用该系统对Al/10%(重量分数)Fe合金进行雾化,当雾化压力由0.4MPa增加到

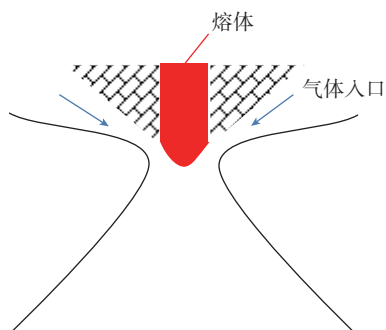


图4 基于拉瓦尔喷管型腔结构的雾化系统
Fig.4 Atomizer based on Laval nozzle configuration

1.4MPa时,粉末的平均中值粒径由59 μm 下降到44 μm ,表明该雾化系统具有较高的雾化效率。

1.2 雾化器布局

自由落体式气体雾化(Free Fall Gas Atomization, FFGA)与紧耦合式气体雾化(Close Coupled Gas Atomization, CCGA)是两种最常见的气体雾化制粉方式^[23]。在FFGA工艺中,金属熔体从导流嘴中流出形成柱状射流,该射流沿重力方向自由下落一段距离后与高速气流相遇并被雾化,如图5(a)所示。FFGA工艺制得的粉末颗粒一般较粗。在CCGA工艺中,气体喷嘴出口与熔体导流嘴出口距离较近,金属熔体流出导流嘴后立即与从气体喷嘴喷出的高速气流相遇。预膜式破碎是CCGA工艺的主要特征之一^[19,23-24],其形成原因是由于高速气流在导流嘴出口前端形成负压区,在吸动作用下金属熔体进入负压区,负压区内的上升循环气流迫使金属熔体在导流嘴出口端面沿径向扩展形成薄膜,该薄膜在导流嘴出口端面边缘处与高速气流相遇,如图5(b)所示。预膜式破碎过程中的液滴尺寸与液膜厚度相关,相较于FFGA工艺中的液柱式破碎,预膜式破碎在主雾化过程中能够产生更小尺寸的液滴,具有更高的雾化效率。深入理解CCGA工艺中的预膜式破碎机制并实现该过程的有效控制,是实现金属粉体性能稳

定性的关键^[25]。

在导流嘴出口前端建立稳定的负压区并避免在导流嘴外侧表面发生气流分离是保证CCGA工艺稳定性的前提^[23-24,26-27]。负压区产生的吸动效果能够促进金属熔体流出导流嘴。对于环孔气体喷嘴,如果喷孔间距过大,会导致吸动效果减弱甚至消失;环缝气体喷嘴获得的吸动效果最大。取决于雾化气体压强和导流嘴的伸出长度,在导流嘴外侧表面处会发生气流分离现象,导致导流嘴外侧形成负压区,该负压区会拖曳导流嘴出口端面上的熔体液膜至导流嘴外侧表面,如图6所示。由于与冷气流接触,熔体液膜在导流嘴外侧凝固并不断积累,导致导流嘴形状改变,最终引起喷嘴堵塞从而中断雾化过程。随着雾化气体压强的增大,在导流嘴外侧的气流分离的程度往往会加剧。基于CFD模型的数值模拟能够较准确地预测导流嘴附近的气体流场结构,确定气流分离在导流嘴外侧表面的发生情况^[27-28]。因此,可以根据数值模拟与试验观测相结合的方法优化给定雾化压力下的导流嘴形状与布局,从而降低或避免导流嘴外侧气流分离带来的影响。

2 雾化介质性能

在真空气体雾化制粉工艺中,一般选择氮气、氩气、氦气等惰性气体作为雾化介质,雾化介质的压强、温度等决定了雾化介质的动能,进而影

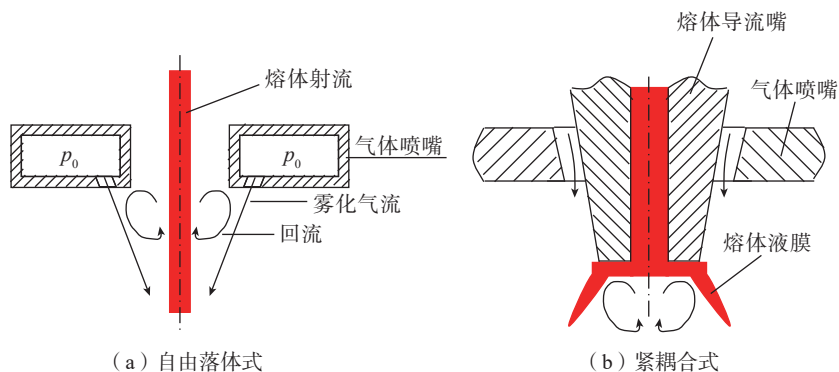


图5 气体雾化系统
Fig.5 Common gas atomization system

响雾化效率。

增加雾化气体压强,能够提高雾化气流撞击熔体射流的动能,有利于提高雾化效率。在超音速真空气体雾化工艺中,雾化气体压强可以增加至 6MPa 以上。一般随着雾化气体压强的升高,粉末的平均粒径减小,细粉收得率升高。但当雾化气体压强高于某一值以后,随着雾化气体压强的进一步升高,细粉收得率的增加幅度并不明显。例如,金莹等^[29]利用电极感应熔炼-气体雾化(EIGA)工艺制备 TC4 合金粉末,当雾化气体压力高于 4.5MPa 以后,随着雾化气体压力的提高,雾化气流对提高雾化效果的作用减弱,当雾化气体压力高于 6.0MPa 后,53μm 以下粉末的收得率反而降低,并且粉末中卫星粉现象较明显;Gao 等^[30]采用真空感应熔炼-气体雾化工艺制备 AlSi10Mg 合金粉末,其试验结果表明,当雾化气体压力高于 2.5MPa 以后,53μm 以下粉末的收得率增幅降低。数值模拟结果表明,随着雾化气体压力的升高,雾化气流最高速度的增加幅度远低于雾化压力的升高幅度^[27]。另外,随着雾化气体压力的升高,雾化气体与熔体的相互作用加强,有可能提高空心粉的形成几率。

提高雾化气体温度,也能够提高

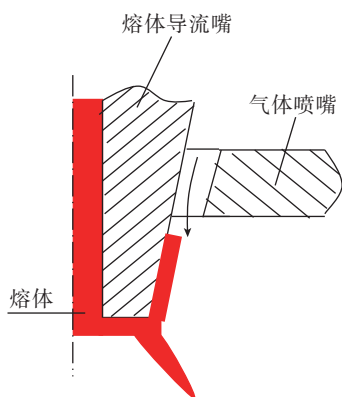


图6 导流嘴外侧气流分离引起的熔体积聚示意图

Fig.6 Schematic of the wetting of melt nozzle induced by gas flow separation

雾化气流撞击熔体射流的动能,有利于提高雾化效率。实现雾化气体的快速加热是热气体雾化技术的关键。目前,国产气体加热装置能够满足雾化气体 600°C 以下快速加热的需求。美国 HJE 公司的试验结果表明,将雾化气体分别预热至 200°C、400°C,虽然气体/金属流量比有所下降,但粉末的特征尺寸与粒度分布宽度相较于冷气体雾化均有明显下降^[31]。英国 PSI 公司的试验结果表明,在气体预热温度 500°C 条件下,气体/金属流量比 $GMR \approx 1.5$,雾化 316 不锈钢与金属铜,获得的粉末平均粒径降至 15μm^[32]。Gao 等^[30]将雾化气体预热至 100°C,雾化气体压力 2.0~4.0MPa,采用双喷嘴气体雾化工艺制备 AlSi10Mg 合金粉末,粉末的中值粒径为 25~33μm,50μm 以下粉末的收得率均在 60% 以上,远远优于传统的冷气流雾化工艺。

3 熔体特征

3.1 熔体过热度

熔体的过热度决定了熔体的物

理性能,尤其是熔体在导流嘴内的流动与传热过程。过热度过高,会造成合金元素挥发,使粉体成分偏离母合金成分;过热度过低,熔体易在导流嘴内凝固引起堵塞。一般对于纯金属雾化,为了提高细粉收得率,可以选择较高的熔体过热度。在极感应熔炼-气体雾化(EIGA)工艺中,熔滴的过热度可以通过调节电源的功率^[33]、频率等进行调控。

3.2 特征表面能

通过混合雾化工艺增加雾化前液体的表面积,进而增加液体的特征表面能(J/kg),有利于提高雾化效率^[34-35]。目前在金属熔体雾化领域,有 3 种混合雾化工艺能够实现该雾化原理^[35-36]:(1)压力旋流-气体雾化^[37-40],在该工艺中,金属熔体通过压力旋流喷嘴形成扩展的锥形液膜,该液膜具有较高的特征表能,进而提高了后续的气体雾化效率,如图 7(a)^[41]所示;(2)气体-旋转雾化^[42],在该工艺中,被雾化气流击碎的熔体射流在旋转盘上形成厚度均匀的液

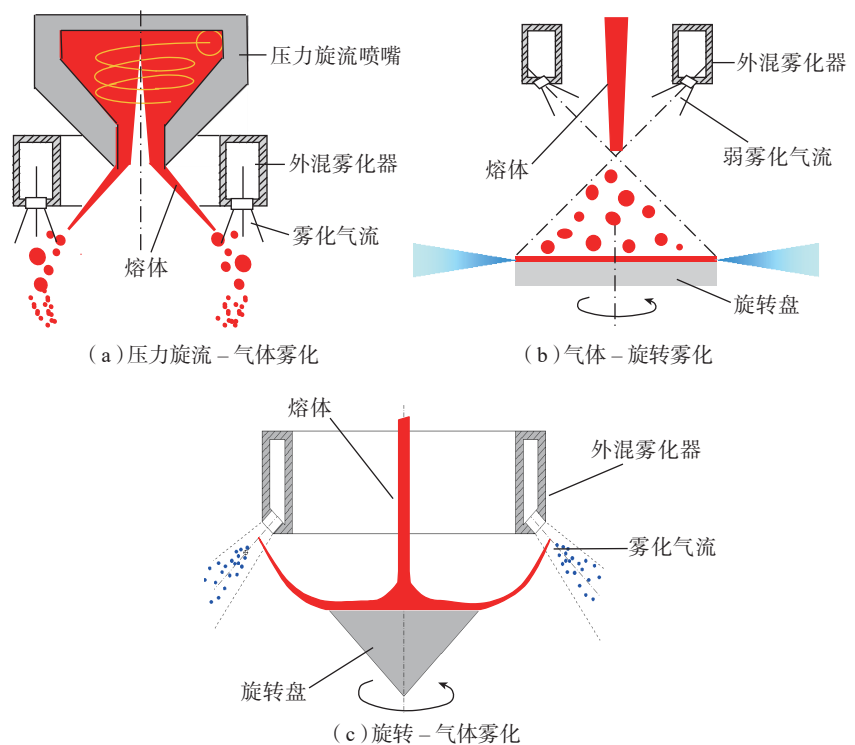


图7 混合雾化工艺示意图

Fig.7 Schematic of hybrid atomization methods

膜,该液膜具有较高的特征表能,进而提高了后续的离心雾化效率,如图7(b)^[41]所示;(3)旋转-气体雾化^[43],在该工艺中,熔体射流首先与旋转盘作用,在离心力作用下形成扩展的液膜,该液膜具有较高的特征表能,进而提高了后续的气体雾化效率,如图7(c)^[41]所示。

3.3 低维度熔体

低维度熔体在本文中是指在雾化前以较小尺寸存在的液体结构,如具有较低厚度的液膜以及具有较小直径的液柱、较小粒径的液滴等。关于低维度熔体的概念,是作者在总结此类雾化工艺的基础上第一次提出,并咨询雾化制粉领域的专家包括钢研集团董事长张少明教授、东方钽业何季麟院士、北京科技大学葛昌纯院士以后确定,在其他文献中并未出现。但是读者可以与作者就该概念进行开放性讨论,给予此类工艺更合适的概念。

已有大量的理论模型与经验公式表明,对具有较小尺寸的液体结构进行雾化可以获得更细的子液滴群。

在自由落体式雾化系统中,根据Lubanska经验公式^[44]:

$$d_{50,3} = d_0 K_{\text{lub}} \left(\frac{\nu_1}{\nu_g} \frac{1}{\text{We}_1} \left(1 + \frac{1}{\text{GMR}} \right) \right)^{0.5} \quad (5)$$

熔体射流的直径可以近似为导流嘴的出口孔径(d_0),熔体雾化后产生的液滴的体积中值粒径($d_{50,3}$)随着导流嘴的出口孔径的降低而降低, K_{lub} 为经验常数,中括号内各项从左至右依次代表了熔体运动黏度(ν_1)与气体运动黏度(ν_g)之比、熔体韦伯数(We_1)倒数以及气体/金属流量比(Gas to metal ratio, GMR)的倒数。下标“lub”为Lubanska缩写,下标“1”与“g”分别表示与熔体及气体相关的属性。由式(5)可知,采用出口孔径较小的导流嘴,形成低维度的熔体射流,可以提高金属粉末的细粉

收得率。但在传统的气体雾化工艺中,熔体主要在静压作用下克服毛细作用与摩擦阻力通过导流嘴形成射流。为使熔体顺利流出,一般选择出口孔径较大的导流嘴。否则,熔体会由于阻力过大而流动缓慢或不能流出导流嘴,进而凝固堵塞导流嘴。为实现低维度熔体射流雾化,公开号为CN 107262730B的中国专利设计开发了压力-气体雾化技术与装置^[45],通过在熔体上方施加稳定可控的正压驱动,促使熔体顺利通过出口孔径较小的导流嘴,形成全液态的微细射流^[36]。采用该技术制备AlSi10Mg合金粉末,由于正压驱动作用,熔体可以在较低过热度下通过出口孔径2mm的导流嘴,在较低的雾化气压下(<2.5MPa),53 μm 以下粉末收得率高于40%,粉末球形度高,雾化工艺与粉末性能稳定^[46]。

在液滴袋式破碎机制中,液滴破碎后产生的子液滴群的索特中值粒径(Sauter Mean Diameter, SMD, d_{32})可用如下经验公式^[47]表示:

$$d_{32} = 1.5d_0 \text{Oh}^{0.2} \text{We}_g^{-0.25} \quad (6)$$

式中, $\text{Oh} = \frac{\mu_1}{\sqrt{\rho_1 \sigma d_0}}$, $\text{We}_g = \frac{\rho_g U_{\text{rel}}^2 d_0}{\sigma}$, d_0 为破碎前液滴的粒径, Oh为奥内佐格数, We_g 为气动韦伯数, μ_1 为液体动力学黏度, ρ_1 为液体密度, σ 为表面张力, ρ_g 为气体密度, U_{rel} 为气体-液滴相对速度。

在基于液滴变形的液滴破碎理论模型中,譬如ETAB(Enhanced Taylor Analogy Breakup)模型^[48],液滴破碎后产生的子液滴群的平均粒径($d_{50,1}$)表示如下:

$$d_{50,1} = d_0 e^{-K_{\text{br}} t} \quad (7)$$

式中, d_0 为破碎前液滴的粒径, K_{br} 为与液滴破碎模式相关的常数, t 为液滴破碎时间。

由式(6)与式(7)可知,降低

雾化前熔滴的粒径,可以获得更细的子液滴群。基于该原理,在EIGA工艺中,可以通过降低电极合金棒的直径,从而在合金棒的前端形成较小尺寸的熔滴,提高后续的气体雾化效率,降低粉末的平均/中值粒径。在传统的EIGA工艺中,一般采用的母合金棒材的直径在 $10^1 \sim 10^2 \text{mm}$ 量级,熔体在母合金棒材末端形成尺寸较大的熔滴,熔滴脱落后被雾化气体击碎。为了进一步提高细粉收得率,公开号为CN 107900366A的中国专利提出可以在EIGA工艺中用丝材替换棒材,降低雾化前熔滴的尺寸,进而提高雾化效率^[49]。基于该工艺,Zheng等^[50]采用直径2~5mm的钛丝进行感应熔化,选择雾化气压4.0MPa,获得的粉末的体积中值粒径为40.2 μm ,53 μm 以下细粉收得率远高于同等雾化压力下的棒材感应熔炼雾化工艺。采用丝材的EIGA工艺,其送丝过程与等离子雾化(PA)工艺类似,两者生产效率相当。

空心粉形成机理及控制方法

空心粉是雾化粉末中常见的一类缺陷。在粉末的致密化过程中,如热等静压、热挤压等,被束缚在粉末内部的气体会在高压作用下收缩形成更细小的具有较高内压的孔洞,然而一旦将成形件置于高温无外压条件下,存留在粉末中的孔洞可能会继续膨胀长大,导致材料的致密度降低以及形成孔隙缺陷,降低材料的疲劳强度与断裂韧性。在增材制造工艺中,粉末被激光、电子束等快速熔化后又快速凝固,被束缚在粉末内部的气体能否逸出尚不明确,空心粉对3D打印工艺以及成形件的致密度、力学性能等的影响有待进一步研究。

空心粉中的孔洞/孔隙一般存在两种形态:一种是雾化气体被束

缚在粉末内部形成的闭孔,其尺寸一般为粉末尺寸的10%~90%,在粉末的中心区域以及靠近粉末表面的区域均有分布,一般在粒度较粗的粉末中常见;另一种是枝晶间凝固收缩形成的孔隙,其尺寸一般小于粉末尺寸的5%,在粉末内部与表面均有分布^[25]。试验表明,对于3类常见的雾化工艺制备的3D打印用金属粉末,气体雾化粉末一般具有最高的孔隙率和含气量,等离子旋转电极雾化粉末一般具有最低的孔隙率和含气量,等离子雾化粉末介于两者之间,气体雾化粉末与等离子雾化粉末中的孔洞的球形度高于等离子旋转电极雾化粉末^[51]。一般随着粉末粒径的增大,粉末中孔洞的数量、尺寸、孔隙率、含气量都会相应增大^[51-52]。

传统观点认为空心粉中闭孔的形成与液滴的袋式破碎机制有关^[52]。对于黏度较低的液滴,在袋式破碎过程中,液滴在气动力作用下首先形成袋状液膜,随后液膜破碎形成大量细小的液滴;对于金属熔滴而言,熔滴的变形破碎过程伴随着熔滴的快速冷却与凝固,在该过程中熔滴的黏度急速升高,袋状液膜的破碎过程可能被抑制,变形过程增大,袋状液膜开口处结合,导致袋内的雾化气体被包裹在熔滴内,如图8^[53]所示。基于上述原理,可以通过降低或提高雾化能量使液滴避开袋式破碎机制,从而降低粉末中闭孔的形成几率,但由于雾化过程中往往多种液滴破碎模式共存,过程控制难度较大^[26]。气体雾化试验结果表明,降低雾化气体动能可以在一定程度上抑制粉末内部孔隙的形成^[53]。液滴之间的碰撞合并也会导致气体被包裹在合并后的大液滴内^[54]。因此,为降低空心粉的形成几率,可以通过控制雾化过程中的液滴粒径分布宽度,使液滴具有相似的尺寸,从而使其具有相似的运动状态,进而

降低液滴的碰撞频率。

气流与液体表面的剪切作用会导致大量的气体被液体表面捕获。试验观察表明,当气流与液体表面相互作用时,在液体表面会形成大量的扰动波,由于气流的剪切作用,产生大量脱落的液滴、液片、液线等离散的流体结构,当这些离散的流体结构回落并与液体表面发生碰撞时会在液体表面附近引入大量气泡;另外,液体表面扰动波之间的相互作用也会将气体束缚在液体表面内^[55]。这意味着液体在被雾化之前已经包含有大量气体,从而增加了雾化后液滴的含气量。因此,可以尝试优化雾化器布局,降低雾化气流与熔体射流的剪切作用,进而降低空心粉的形成几率。

卫星粉形成机理及控制方法

气体雾化粉末,尤其是轻合金粉末,普遍存在卫星粉现象,即小颗粒在大颗粒表面粘附的现象。图9为两种不同来源的气体雾化18Ni300粉末^[56]:粉末一含有较多比例的细小粉末($\leq 10\mu\text{m}$),卫星粉颗粒较多;粉末二的球形度优于粉末一,卫星粉颗粒较少,且表面较光滑。对粉末($\leq 53\mu\text{m}$)的球形度、流动性等特征参数进行了测量^[56]:粉末一的球形度指数为1.42,流动性指数为81.5;粉末二的球形度指数为1.17,流动性指数为73.0。卫星粉在粉体表面的粘附,降低了粉体的球形度、流动性、松装密度等,对粉体的打印工艺

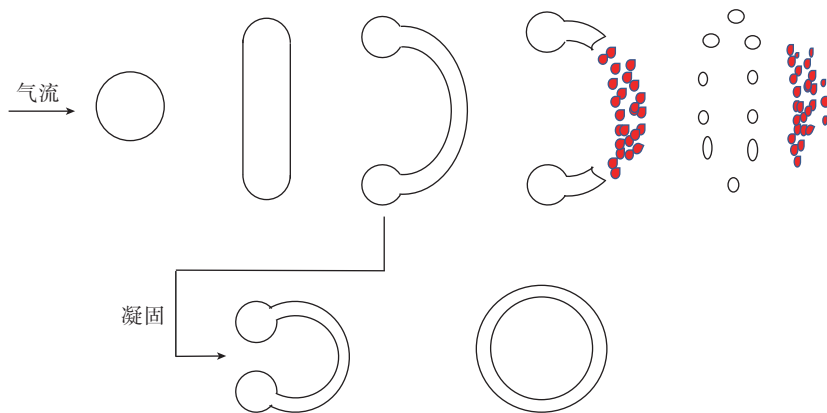
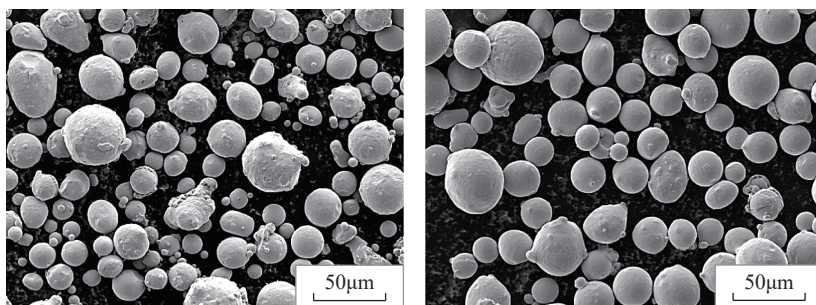


图8 液滴袋式破碎机制及空心粉形成机理

Fig.8 Droplet bag breakup mode and hollow particle formation mechanism



(a) 粉末一

(b) 粉末二

图9 气体雾化18Ni300粉末形貌

Fig.9 Morphology of gas atomized 18Ni300 steel powder

造成不利影响,也是造成打印件致密度低与机械性能差的重要因素之一。在激光熔融沉积工艺(Laser Melting Deposition, LMD)中,粉体通过送粉器的负载气流被输送到熔化区,粉体的流动性降低会引起粉体的输送流量降低,形成粉体稀薄区;在基于粉床铺粉技术的选区激光熔化工艺(Selective Laser Melting, SLM)与电子束选区熔化工艺(Electron Beam Selective Melting, EBSM)中,粉体通过铺粉辊或刮刀在粉床铺展,粉体的流动性降低,会导致粉末沉积层中形成分散的空隙聚集区。粉体稀薄区与空隙聚集区的存在均会促进金属增材制造构件中孔洞的形成^[25]。

作为原材料,气体雾化金属粉末在粉末冶金、热喷涂等领域已得到广泛应用,但是关于卫星粉的形成机理及控制方法的报道并不多,主要原因在于粉末冶金、热喷涂等工艺对粉末的粒形、表面质量、流动性等性能的要求没有增材制造工艺苛刻,以至于大量研究工作集中在如何提高雾化效率与细粉收得率。

Ozbilen^[57]研究了气体雾化制备Al-1Li合金粉末、纯铜粉末过程中卫星粉的形成机理,认为在气体雾化过程中雾化熔滴粒度分散,在湍流条件下,小熔滴运动速率与凝固速率较快,与液态/未完全凝固的大熔滴发生碰撞,随后熔滴之间发生熔结或烧结,大熔滴凝固后,形成小颗粒粘结在大颗粒表面的卫星粉现象。

Dunkley等^[58]在宏观尺度上揭示了卫星粉形成过程中部分颗粒-液滴碰撞的来源。通过数值模拟发现雾化室内的两相流场可以分为3部分,即中心气流-液滴两相喷射区、包围喷射区的气体射流区以及介于气体射流区和雾化室壁之间的回流区。回流区通常会夹带有大量回旋的小液滴(或粉尘),这些小液滴已经凝固或者在随涡流上升过程中冷却凝固成固体颗粒。这些小颗粒在

回旋过程中极有可能被拖曳到两相喷射区内,并与喷射区内的液态/半固态的液滴发生碰撞,最终以卫星粉的形式粘附在凝固的大液滴表面。Dunkley等^[58]认为可以将颗粒分离后的部分雾化尾气重新注入到雾化塔内,抑制回流区,减少粉尘回旋,从而减少卫星粉的形成。

Uhlenwinkel等^[59]研究了尾气回注工艺对CuSn10合金粉末表面质量的影响规律,雾化尾气在经过过滤后通过12根直径80mm的软管从雾化室顶端注入雾化室,分别采用自由落体气体雾化与紧耦合气体雾化,所制备的CuSn10合金粉末的表面质量有所改善,卫星粉粘附有所减少,其中对FFA工艺制备的合金粉末效果较明显。Anderson等^[25]指出将雾化室内径缩小至30cm以内,能够有效地抑制粉尘回旋,降低卫星粉的形成几率,但是随着雾化室内径的减小,雾化熔滴与雾化室壁的碰撞几率会增加。

Lampa等^[60-61]通过大涡仿真(Large Eddy Simulation, LES)与粒子图像测速法(Particle Image Velocimetry, PIV)发现在喷射边缘及内部存在介观尺度的涡流,此类流体结构能够卷吸颗粒/液滴,从而在涡流内部形成颗粒/液滴团簇。包含颗粒/液滴团簇的介观尺度流体结构可以在喷射边缘与内部转移,可能会引起颗粒/液滴团簇与大尺寸熔滴的碰撞,导致卫星粉的形成或粉末团聚。

在微观尺度上,颗粒与熔滴发生碰撞后,颗粒与熔滴表面发生相互作用,如果颗粒被熔滴表面捕捉,则导致卫星粉现象。基于力平衡理论模型,Hoven^[62]研究了喷雾干燥过程中球形颗粒与球形液滴的碰撞动力学,在固-液界面张力、液体黏滞力等作用力控制下,取决于颗粒与液滴的初始碰撞动能,颗粒可能会停留在液滴表面或钻入液滴内部。但是力

平衡理论模型无法描述颗粒-液滴碰撞引起的液滴变形对碰撞过程的影响,另外该模型中描述的液滴为纯液态。基于CFD数值模型,Li等^[63]研究了气体雾化-颗粒共喷射制备颗粒增强型金属基复合粉末过程中增强相颗粒与金属熔滴的碰撞行为,采用Volume of Fluid(VOF)方法描述液滴与气体界面的演化,采用Six Degrees of Freedom(6DOF)方法描述颗粒的空间运动,采用立方颗粒模拟形状不规则的增强相颗粒。该模型能够很好地描述颗粒-液滴碰撞引起的液滴变形行为,而且采用了先进的半固态熔体流变模型描述在熔滴冷却凝固过程中碰撞颗粒受到的熔体黏滞力的变化。基于数值模拟,建立了立方颗粒-球形液滴的碰撞制度图,推导出了立方颗粒在液态/半固态熔滴表面粘接以及钻入熔滴内部的临界动力学条件。

综上,可以基于减少颗粒-熔滴碰撞来源与抑制颗粒-熔滴碰撞粘接过程两条途径,建立多层次、多尺度的卫星粉控制机制,如图10所示。在宏观尺度上,通过向雾化室内引入辅助气流或优化雾化室结构,抑制雾化室内回流,减少粉尘回旋,进而降低颗粒/液滴之间的碰撞频率。在介观尺度上,通过雾化工艺及熔体特征控制,降低喷雾中雾滴的粒度分布宽度,即减小颗粒/液滴的尺寸差异,原则上可以减少颗粒/液滴的运动状态差异,进而降低颗粒/液滴之间的碰撞频率。在微观尺度上,可以在颗粒与液滴之间引入排斥力,譬如施加外电场,使雾滴荷电,雾滴带有同性电荷,库仑排斥阻止雾滴在飞行过程中的碰撞接触,从而抑制卫星粉的形成。目前,雾滴荷电技术在非金属流体雾化领域已得到广泛应用,譬如燃油喷雾燃烧^[64]、粉体制备与喷涂^[65]等;在金属雾化领域也有少量应用探索,但主要是与按需喷射(Droplet on Demand, DOD)技术相

结合^[66-67]。按需喷射技术所制备的金属熔滴粒径单一,释放频率可控且流量小,荷电过程较易控制;气体雾化熔滴的粒径分布较宽,喷射中熔滴的流量较大,荷电过程控制会比较复杂。

微细球形金属基复合粉末

利用3D打印技术制备复合材料,整个产品生产过程不受任何复杂结构和生产工艺限制,将极大地降低制造成本和缩短制造时间。目前,3D打印技术已用于试制纤维增强聚合物以及陶瓷基复合材料,但关于3D打印金属基复合材料的报道较少,该领域的发展主要受制于缺少与3D打印复合材料工艺相匹配的原材料。

美国加州大学通过静电组装技术将纳米 ZrH_2 颗粒与7075铝合金粉末复合,在打印过程中产生大量形核质点,使得柱状晶变成抗热裂性能高的等轴晶,实现了7075铝合金无裂纹SLM成形,但静电组装复合技术离实际的工程应用仍有较大的技术障碍^[68]。在目前的3D打印金属基复合材料尝试中,一般通过机械混合或合金化使金属粉体和第二相颗粒复合,制备出复合粉末,作为后续成形工艺的原材料^[69]。但在机械混合过程中往往会产生分层现象,导致

金属粉体与第二相颗粒混合不均匀;在机械合金化工艺中,第二相颗粒在高能球磨的作用下会固溶进金属粉末基体,在后续的热处理过程中原位析出,但该工艺耗能较大,成本较高。另外,在机械混合或合金化过程中可能降低粉体球形度与流动性,增加粉体氧含量,对增材制造成形工艺及产品性能带来不利影响。

既然微细球形金属粉末是3D打印金属材料的原材料,含有第二相颗粒的微细球形金属基复合粉末应该是3D打印金属基复合材料的一种理想原材料。该类金属基复合粉末可以通过气体雾化-颗粒共喷射工艺制备,其工作原理为:在气体雾化过程中,携带有第二相颗粒的高速雾化气流将金属熔体击碎,同时细小的第二相颗粒也会与金属熔体以及雾化产生的金属熔滴频繁碰撞,具有足够动能的第二相颗粒会嵌入甚至钻入金属熔滴形成复合熔滴,最终复合熔滴在高速气流中快速凝固形成颗粒增强型金属基复合粉末,如图11^[63]所示。在该工艺中,第二相颗粒能够与金属粉末基体以及表面建立紧密的连接。另外,该工艺属于短流程固-液混合工艺,耗能少;省去了雾化金属粉体与第二相颗粒的固态混合过程,降低了生产成本。

美国加州大学利用传统的气体

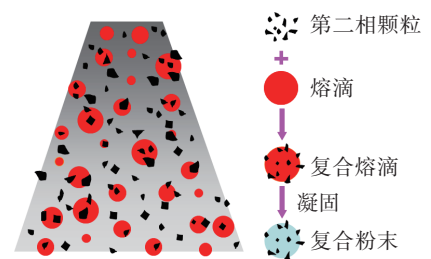


图11 金属雾化-颗粒共喷射工艺制备金属基复合粉末原理

Fig.11 Schematic of generation of metal-matrix-composite (MMC) particles in metal atomization and particle co-injection process

雾化工艺制备了Al-4Si/SiC复合粉末,SiC颗粒通过独立的送粉系统被输送到喷射熔滴中并发生相互作用,SiC颗粒在复合粉末中的体积分数可以达到12%^[70]。加拿大多伦多大学利用离心雾化工艺制备Al/SiC复合粉末,金属熔体流向一块高速旋转的盘体,第二相颗粒通过独立的送粉装置被喷射到旋转盘上与金属熔体混合,复合熔体随后被离心雾化,形成复合熔滴,SiC的平均融入率达到18%^[71](体积分数)。德国莱布尼兹材料工程技术研究所采用压力旋流-气体雾化工艺制备了颗粒增强锡基复合粉末,采用的第二相颗粒包括SiC、TiC、 Al_2O_3 等,金属熔体首先通过压力旋流喷嘴形成锥形旋转液膜,锥形液膜在气体雾化喷嘴附近被负载细小第二相颗粒的高速气流击碎,第二相颗粒与金属熔滴相互结合形成复合熔滴,并通过多尺度多相流模型研究了熔滴喷射与第二相颗粒流的宏观混合机制、熔滴与第二相颗粒的介观碰撞机制,以及颗粒-熔滴的微观融合机制,定量描述了气体-熔滴-颗粒3相流喷射过程中熔滴与颗粒的相互作用,建立了工艺参数(如雾化气体压强、过热度、颗粒/熔体流量比等)、材料性能与复合粉末性能(如粉末尺寸、颗粒融入率、颗粒粘接率等)的相互关系,证明了气体雾化-颗粒共喷射工艺能够高效地制备金属基复合粉末^[16,72]。图

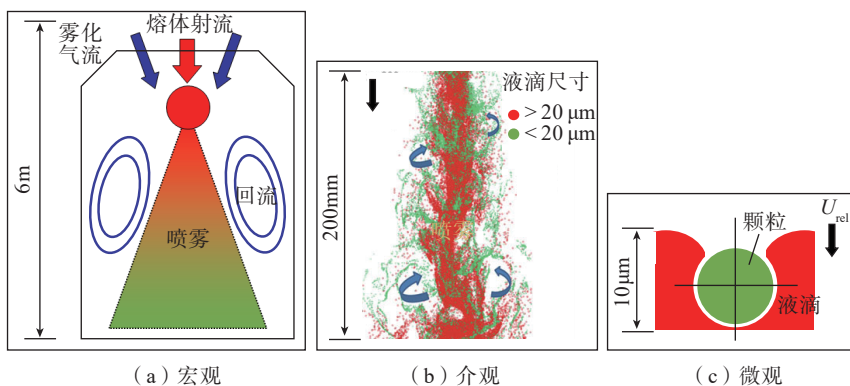


图10 气体雾化制粉过程中颗粒/熔滴与多尺度流体结构相互作用示意图

Fig.10 Interaction between multiscale fluid structures and particles/droplets during gas atomization process for metal powder production

12^[72] 为气体雾化-颗粒共喷射工艺制备的金属基复合粉末,可以看到第二相颗粒在金属粉体表面与内部的分布。目前,尚未有金属基复合粉末用于3D打印复合材料零部件的报道,金属基复合粉末的3D打印成形工艺有待进一步验证。

结论

气体雾化仍是3D打印用微细球形金属粉末的主要制备技术。为满足金属增材制造技术对低成本与高质量金属粉末材料的需求,需要从提高粉末细粉收得率、改善粉体质量与开发新型粉末材料3个方面进一步发展气体雾化制粉技术。基于拉瓦尔(Laval)喷管收缩-扩展型腔结构的环孔与环缝式喷嘴有利于提高雾化气体的利用效率。紧耦合式气体雾化是微细球形金属粉末的高效制备方法,对导流嘴末端的熔体预膜破碎过程以及导流嘴外侧的气流分离现象进行深入理解并对两者进行有效控制是实现紧耦合式

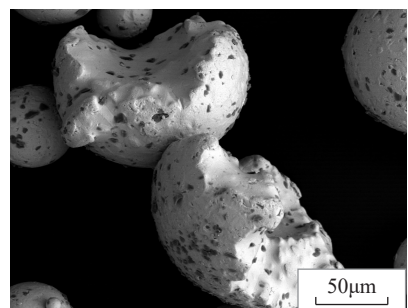
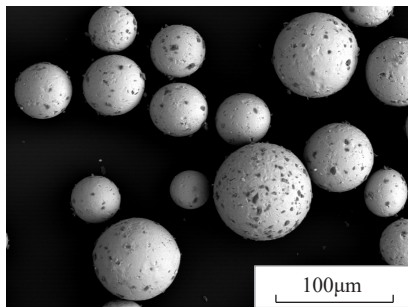


图12 金属基复合粉末: 基体Sn, 第二相颗粒SiC

Fig.12 Metal-matrix-composite particles: Sn-matrix and SiC particulates

气体雾化工艺稳定性以及产品性能稳定性的关键。热气体作为雾化介质能够极大地提高细粉收得率。通过混合雾化工艺提高熔体雾化前的特征表面能够提高雾化效率。基于压力-气体雾化工艺与丝材感应熔炼-气体雾化工艺的初步试验结果表明,低维度熔体雾化能够显著提高粉末细粉收得率。

空心粉形成过程中的气体捕捉机制包括液滴袋式破碎过程中的变形-凝固机制、液滴碰撞机制以及气流与液体表面的剪切作用机制,实现对熔滴破碎模式、熔滴粒度分布宽度以及雾化气流与熔体射流剪切作用的有效控制能够抑制空心粉的形成。卫星粉形成过程中颗粒/熔滴的碰撞来源,包括宏观尺度回流引起的粉尘回旋以及介观尺度涡流引起的颗粒/液滴团簇,基于控制颗粒/熔滴碰撞来源与抑制颗粒/熔滴碰撞过程两条途径,建立多层次、多尺度的卫星粉控制机制,能够有效地抑制卫星的形成。

微细球形金属基复合粉末是3D打印金属基复合材料与部件的理想原材料,气体雾化-颗粒共喷射技术是制备微细球形金属基复合粉末的一种有效方法。

参考文献

- [1] 黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(6): 12-27.
- [2] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战(邀请论文)[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3204-3209.
- [3] WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components (invited paper)[J]. Chinese

Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3204-3209.

[4] 史玉升, 鲁中良, 章文献, 等. 选择性激光熔化快速成形技术与装备[J]. 中国表面工程, 2006, 19(5+): 150-153.

SHI Yusheng, LU Zhongliang, ZHANG Wenxian, et al. The technology and equipment of selective laser melting[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(5+): 150-153.

[5] 宋长辉, 翁昌威, 杨永强, 等. 激光选区熔化设备发展现状与趋势[J]. 机电工程技术, 2017, 46(10): 1-5.

SONG Changhui, WENG Changwei, YANG Yongqiang, et al. Development status and trend for the equipment of selective laser melted[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2017, 46(10): 1-5.

[6] 戴京伟. 大型激光选区熔化成形工作台设计与研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

DAI Jingwei. Design and research of large selective laser melting forming worktable[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

[7] 郭超, 张平平, 林峰. 电子束选区熔化增材制造技术研究进展[J]. 工业技术创新, 2017, 4(4): 6-14.

GUO Chao, ZHANG Pingping, LIN Feng. Research advances of electron beam selective melting additive manufacturing technology[J]. Industrial Technology Innovation, 2017, 4(4): 6-14.

[8] Wohlers Associates, Inc. Wohlers report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry, annual worldwide progress report[R]. Colorado: Wohlers Associates, Inc., 2018.

[9] 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, 2017: 57-63.

LI Li, DAI Yu. Research status and development trend of production techniques of spherical metal powders for selective laser melting[C]//2017 Symposium of China Academic Meeting on Powder Metallurgy. Nanjing, 2017: 57-63.

[10] 韩寿波, 张义文, 田象军, 等. 航空航天用高品质3D打印金属粉末的研究与应用[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(6): 44-51.

HAN Shoubo, ZHANG Yiwen, TIAN Xiangjun, et al. Research and application of high quality 3D printing metal powders for aerospace

use[J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27(6): 44–51.

[10] 中国航空工业集团有限公司. 航空钛合金零件激光直接沉积增材制造粉末规范: HB 20450—2018[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2018.

Aviation Industry Corporation of China, Ltd. Specification for laser direct deposition additive manufacturing of aeronautical titanium alloy structural components—powders: HB 20450—2018[S]. Beijing: State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, PRC, 2018.

[11] 宁文涛. 含氮铁基粉末冶金材料制备的热力学分析及性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

NING Wentao. Study on preparation technology by thermodynamics and performance of iron-based powder metallurgy material containing nitrogen[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

[12] 于振涛, 余森, 程军, 等. 新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J]. 金属学报, 2017, 53(10): 1238–1264.

YU Zhentao, YU Sen, CHENG Jun, et al. Development and application of novel biomedical titanium alloy materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(10): 1238–1264.

[13] 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 Yingying, XIAO Zhiyu, LI Shangkui, et al. Research progress on the preparation methods of metal powder for 3D printing[J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28(4): 56–61.

[14] 李安, 刘世锋, 王伯健, 等. 3D打印用金属粉末制备技术研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(6): 419–426.

LI An, LIU Shifeng, WANG Bojian, et al. Research progress on preparation of metal powder for 3D printing[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(6): 419–426.

[15] FRITSCHING U. Spray simulation—modeling and numerical simulation of sprayforming metals[M]. New York: Cambridge University Press, 2004: 43–67.

[16] LI X G. Modeling and simulation of the gas-atomization process of metal melts

for metal-matrix-composite production[M]. Aachen: Shaker Verlag, 2014: 17–26.

[17] ELGER D F, WILLIAMS B C, CROWE C T, et al. Engineering fluid mechanics[M]. 10th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013: 445–471, 639–650.

[18] TING J, ANDERSON I, TERPSTRA R. Atomizing nozzle and method: US 6142382[P]. 2000–11–07.

[19] ANDERSON I E, TERPSTRA R L. Progress toward gas atomization processing with increased uniformity and control[J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 326(1): 101–109.

[20] SCHWENCK D, ELLENDT N, FISCHER-BÜHNER J, et al. A novel convergent-divergent annular nozzle design for close-coupled atomisation[J]. Powder Metallurgy, 2017, 60(3): 198–207.

[21] 赵新明, 徐骏, 朱学新, 等. 一种用于金属气体雾化的环缝型超音速喷嘴: CN 102581291B[P]. 2013–03–20.

ZHAO Xinming, XU Jun, ZHU Xuexin, et al. Supersonic slit nozzle for gas atomization of metal melts: CN 102581291B[P]. 2013–03–20.

[22] ALLIMANT A, PLANCHE M P, BAILLY Y, et al. Progress in gas atomization of liquid metals by means of a De Laval nozzle[J]. Powder Technology, 2009, 190(1/2): 79–83.

[23] ANDERSON I E, ACHELIS L. Chapter 3: two fluid atomization fundamentals[M]//HENEIN H, UHLENWINKEL V, FRITSCHING U. Metal sprays and spray deposition. Cham: Springer, 2017: 49–88.

[24] MULLIS A M, MCCARTHY I N, COCHRANE R F. High speed imaging of the flow during close-coupled gas atomisation: effect of melt delivery nozzle geometry[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(9): 1471–1477.

[25] ANDERSON I E, WHITE E M H, DEHOFF R. Feedstock powder processing research needs for additive manufacturing development[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2018, 22(1): 8–15.

[26] LI X G, FRITSCHING U. Chapter 4: spray transport fundamentals[M]//HENEIN H, UHLENWINKEL V, FRITSCHING U. Metal

sprays and spray deposition. Cham: Springer, 2017: 89–176.

[27] AYDIN O, UNAL R. Experimental and numerical modeling of the gas atomization nozzle for gas flow behavior[J]. Computers & Fluids, 2011, 42(1): 37–43.

[28] MULLIS A M, KUMAR A P A, BORMAN D J. Chapter 8: CFD modelling of high pressure gas atomization of liquid metals[M]//NASTAC L, KOULIS P, ADRIAN S, et al. CFD modeling and simulation in materials processing. Cham: Springer, 2018: 77–84.

[29] 金莹, 刘平, 史金光, 等. 雾化压力对电极感应熔炼气体雾化 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.

JIN Ying, LIU Ping, SHI Jinguang, et al. Effects of gas-atomized pressure on morphology and properties of TC4 powder prepared by electrode-induced gas atomization[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2018, 23(3): 312–317.

[30] GAO C F, XIAO Z Y, ZOU H P. 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.

[31] STRAUSS J T. Hotter gas increases atomization efficiency[J]. Metal Powder Report, 1999, 54: 24–28.

[32] HOPKINS W G. Fine powders: the heat is on at PSI[J]. Metal Powder Report, 2001, 56: 20–24.

[33] 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.

GUO Kuaikuai, LIU Changsheng, CHEN Suiyuan, et al. Effect of EIGA power parameter on the characteristics of TC4 alloy powder for 3D printing[J]. Materials Science and Technology, 2017, 25(1): 16–22.

[34] LEFEBVRE A H. Airblast atomization[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1980, 6(3): 233–261.

[35] FRITSCHING U, UHLENWINKEL V. Hybrid gas atomization for powder production[M]//KONDOH K. Powder metallurgy. Rijeka: InTech Publishing, 2012:

99-124.

[36] 舒适. 耦合压力-气体雾化制粉工艺及制备粉末性能的研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2018.

SHU Shi. Research on coupled pressure-gas atomization technique and as-prepared metal powder properties[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2018.

[37] UHLENWINKEL V, ACHELIS L, LAGUTKIN S, et al. Verfahren und vorrichtung zum herstellen von metallpulvern und keramischen pulvern: DE 10237213.6[P]. 2002-08-14.

[38] LAGUTKIN S, ACHELIS L, SHEIKHALIEV S, et al. Atomization process for metal powder[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 383(1): 1-6.

[39] ACHELIS L, UHLENWINKEL V. Characterisation of metal powders generated by a pressure-gas-atomizer[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 477(1/2): 15-20.

[40] 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.

[41] FRITSCHING U, LI X G. Chapter 19: spray systems[M]//MICHAELIDES E E, SCHWARZKOPF J D, CROWE C. Multiphase flow handbook. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016: 1091-1249.

[42] MINAGAWA K, KAKISAWA H, OSAWA Y, et al. Production of fine spherical lead-free solder powders by hybrid atomization[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2005, 6(3/4): 325-329.

[43] CZISCH C, FRITSCHING U. Atomizer design for viscous-melt atomization[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 477(1/2): 21-25.

[44] LUBANSKA H. Correction of spray ring data for gas atomization of liquid metals[J]. Journal of Metals, 1970, 22: 45-49.

[45] 黎兴刚, 张少明, 樊建中, 等. 一种微细球形金属粉末的气体雾化制备方法及其设备: CN 107262730B[P]. 2019-04-23.

LI Xinggang, ZHANG Shaoming, FAN Jianzhong, et al. Method and equipment of gas atomization for spherical metal powder production: CN 107262730B[P]. 2019-04-23.

[46] 舒适, 黎兴刚, 刘锡魁, 等. 耦合压力-气体雾化工艺制备微细球形金属粉末[J]. 稀有金属, 2018, 43(8): 808-815.

SHU Shi, LI Xinggang, LIU Xikui, et al. Coupled pressure-gas atomization process for fine spherical aluminium alloy powder production[J]. Chinese Journal of Rare Metal, 2018, 43(8): 808-815.

[47] PILCH M, ERDMANN C A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1987, 13: 741-757.

[48] TANNER F X. Liquid jet atomization and droplet breakup modeling of non-evaporating diesel fuel sprays[J]. SAE Technical paper, 1997: 970050.

[49] 张少明, 贺会军, 胡强, 等. 气体雾化连续制备 3D 打印用钛或钛合金粉末的装置及方法: CN 107900366A[P]. 2018-04-13.

ZHANG Shaoming, HE Huijun, HU Qiang, et al. Device and method for continuous preparation of titanium or titanium alloy powder for 3D printing by gas atomization: CN 107900366A[P]. 2018-04-13.

[50] ZHENG M Y, ZHANG S M, HU Q, 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.

[51] CHEN G, ZHAO S Y, TAN P, et al. 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.

[52] 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.

[53] 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 & Particulate Materials. Las Vegas, 2017: 136-146.

[54] LI X G, FRITSCHING U. Numerical investigation of binary droplet

collisions in all relevant collision regimes[J]. Journal of Computational Multiphase Flows, 2011, 3(4): 207-224.

[55] HANNA D B, CHERDANTSEV A V, AZZOPARDI B J. Study of bubbles entrapped into a gas-sheared liquid film[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 108: 181-201.

[56] 郭文锋. 选区激光熔融(SLM) 18Ni300 模具钢成型性能及热处理制度的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

GUO Wenfeng. Study of mechanical properties and heat treatment of the 18Ni300 maraging steel manufactured by selective laser melting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[57] OZBILEN S. Satellite formation mechanisms in gas atomized powders[J]. Powder Metallurgy, 1999, 42(1): 71-78.

[58] DUNKLEY J J, TELFORD B. Control of satellite particles in gas atomization[C]//Proceedings of World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Materials (PM 2002). Orlando, 2002.

[59] UHLENWINKEL V, BECKERS D, ELLENDT N. Gas recirculation affects powder quality[C]//Proceedings of World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Materials (PM 2014). Orlando, 2014.

[60] LAMPA A, FRITSCHING U. Spray structure analysis in atomization processes in enclosures for powder production[J]. Atomization and Sprays, 2011, 21(9): 737-752.

[61] LAMPA A, FRITSCHING U. Large eddy simulation of the spray formation in confinements[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2013, 43: 26-34.

[62] HOVEN M J. Particle-droplet collisions in spray drying[D]. Queensland: University of Queensland, 2008.

[63] LI X G, FRITSCHING U. Numerical investigation of solid particle penetration into liquid droplet[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2014, 45(8): 666-682.

[64] 霍元平. 荷电液滴雾化机理及变形破碎特性的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.

HUO Yuanping. Investigation on electrostatic atomization mechanisms and

deformation and breakup characteristics of charged droplets[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012.

[65] JAWOREK A, SOBCZYK A T, KRUPA A. Electro spray application to powder production and surface coating[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 125: 57–92.

[66] 魏正英, 杜军, 陈祯, 等. 一种金属液滴电子约束成形装置: CN 103990801B[P]. 2016–04–27.

WEI Zhengying, DU Jun, CHEN Zhen, et al. Electronically constrained forming device for metal droplets: CN 103990801B[P]. 2016–04–27.

[67] 王海波, 孔令鸿, 高玉来. 一种适用于 3D 打印的金属粉末制备设备及方法:

CN 106735270A[P]. 2017–05–31.

WANG Haibo, KONG Linghong, GAO Yulai. Fabrication equipment and method of metal powder for 3D printing: CN 106735270A[P]. 2017–05–31.

[68] MARTIN J H, YAHATA B D, HUNDLEY J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. Nature, 2017, 549: 365–369.

[69] GU D D, ZHANG H M, DAI D H, et al. Laser additive manufacturing of nano-TiC reinforced Ni-based nanocomposites with tailored microstructure and performance[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 163: 585–597.

[70] WU Y, LAVERNIA E J. Interaction

mechanisms between ceramic particles and atomized metallic droplets[J]. Metallurgical Transactions A, 1992, 23(10): 2923–2937.

[71] ESLAMIAN M, RAK J, ASHGRIZ N. Preparation of aluminum/silicon carbide metal matrix composites using centrifugal atomization[J]. Powder Technology, 2008, 184(1): 11–20.

[72] LI X G, HEISTERÜBER L, ACHELIS L, et al. Multiscale descriptions of particle–droplet interactions in multiphase spray processing[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 80: 15–28.

通讯作者: 黎兴刚, E-mail: xing-gangli@163.com。

Research Progress on Gas Atomization Technology for Preparation of Feedstock Powder Used in Metal Additive Manufacturing

LI Xinggang^{1,2}, LIU Chang³, ZHU Qiang²

(1. Academy for Advanced Interdisciplinary Studies, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;

2. Department of Mechanical and Energy Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;

3. School of Innovation and Entrepreneurship, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

[ABSTRACT] Fine spherical metal powders are the main raw materials for metal additive manufacturing (3D printing). Gas atomization technology is an important method to produce fine spherical metal powders. From the perspectives of increasing fine powder yield, improving powder quality and developing new powder materials, the research status and development trend of gas atomization technology for preparation of feedstock powder used in metal additive manufacturing were analyzed. Those methods used for increasing fine powder yield during gas atomization were summarized, which were developed based on optimizing atomizer design, enhancing atomizing medium properties or improving melt characteristics. The formation mechanism of hollow particles during gas atomization was analyzed, and the control methods of hollow particles were proposed. The formation mechanism of satellite particles during gas atomization was analyzed, and the control methods of satellite particles were proposed. Metal-matrix-composite (MMC) particles were proposed for additive manufacturing of composite parts. The research progress on metal atomization methods coupled with particle co-injection for the preparation of MMC particles was briefly introduced.

Keywords: Metal additive manufacturing; Metal powder; Gas atomization; Powder yield; Hollow particle; Satellite particle; Composite particle

(责编 李丹)