

DOI: 10.11973/jxgccl202011009

增材制造用金属粉末制备技术研究现状及展望

何杰^{1,2}, 马士洲², 张兴高², 盖希强², 陈厚和¹, 张开创²

(1. 南京理工大学化工学院, 南京 210094; 2. 军事科学院防化研究院, 北京 102205)

摘要: 增材制造是金属零件先进制造技术的重要发展方向, 然而增材制造用金属粉末材料存在研发不足、稳定性弱及标准不全等问题, 这严重制约了金属零件增材制造的发展。概述了离心雾化法、二流雾化法以及球化法等常用球形金属粉末制备技术的基本原理, 介绍了其优缺点和发展现状。提出国内增材制造粉体制备技术发展可以从两方面做起: 一是对传统方法进行工艺、设备改进及标准化研究, 建造自动化工厂; 二是加强制粉基础理论研究, 探索新工艺。

关键词: 增材制造; 球形粉末; 二流雾化法; 离心雾化法; 球化法

中图分类号: TF123

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)11-0046-07

Research Progress and Prospects of Metal Powder Preparation Technique for Additive Manufacturing

HE Jie^{1,2}, MA Shizhou², ZHANG Xinggao², GAI Xiqiang², CHEN Houhe¹, ZHANG Kaichuang²

(1. College of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Institute of Chemical Defense, Academy of Military Sciences, Beijing 102205, China)

Abstract: Additive manufacturing is an important development direction of advanced manufacturing technique for metal parts, but the metal powder for additive manufacturing has some problems such as insufficient research and development, weak stability and incomplete standards, which seriously restrict its development. The basic principles of common spherical metal powder preparation techniques including centrifugal atomization method, two-stream atomization method and spheroidization method are summarized, and their advantages, disadvantages and development status are introduced. It is proposed that the development of domestic additive manufacturing powder preparation technique can start from two aspects. One is to carry out process and equipment improvement and standardization research on traditional methods, and build automated factories; the other is to strengthen the research on basic theories of powdering and explore new processes.

Key words: additive manufacturing; spherical powder; two-stream atomization method; centrifugal atomization method; spheroidization method

0 引言

增材制造(又称 3D 打印)技术是通过 3D 打印设备逐层堆积原材料来制造零件的成形技术^[1-2], 被誉为“第三次工业革命”的核心, 其中金属零件成形在整个增材制造技术体系中最具前沿和最具潜力的。金属零件增材制造原材料通常为专门定制的, 尺寸、形状和形态都经过精确优化的金属粉末。例

如, 在金属零件的选择激光熔化(SLM)增材制造^[3-4]过程中, 通常首选尺寸小于 53 μm 的球形金属细粉, 同时还应避免空心颗粒和粉末团聚, 以确保良好的加工性能和最终产品性能。

目前, 国内外增材制造技术产业正处于高速发展时期, 在材料、工艺、装备、应用等方面, 欧美的发展较国内更为系统全面。我国金属增材制造技术规模应用的时间较短, 相关研究主要集中于打印成形工艺等方面, 而粉末材料、装备配套等均未形成成熟的体系, 其中以前者为甚。材料的研发投入较大、周期较长, 需经过理论积累、成分设计、材料试制、性能验证以及应用验证等过程。高强度铝合金粉末、特

收稿日期: 2020-08-06; 修订日期: 2020-10-05

作者简介: 何杰(1996—), 男, 江苏南通人, 硕士

通信作者: 马士洲

种铜合金和钛铝合金粉末、航空航天用耐高温合金粉末等都有巨大的需求缺口。当前,国内很多公司都加大了对高品质粉体材料的研发投入,增材制造服务商和各级研究院也在整合资源,从应用端上进行材料体系的研究,部分已经通过试验进入推广阶段,如长沙新材料研究院和苏州三峰激光的高强铝合金粉末以及威拉里新材料推出的高温合金粉末等。欧美企业如 SANDVIK、LPW、TLS、普莱克斯、Oerlikon、AP&C、泰科纳等材料生产商也在不断加强对高品质金属球形粉末尤其是微细(粒径小于 $45\ \mu\text{m}$)粉末材料的研发力度。德国 H. C. Starck、加拿大 PyroGenesis 亦在大力拓展增材制造金属粉末业务。鉴于国内外增材制造用金属粉末的强劲需求

和发展热点,作者综述了离心雾化法、二流雾化法和球化法等增材制造用球形金属粉末常用制备技术的原理,介绍了其各自的优缺点和发展现状,并对国内增材制造粉体制备技术的发展进行了展望。

1 传统球形粉末制备方法

由于应用及后续成形工艺要求不同,金属粉末的传统制备方法也各有差异,从制粉实质来说主要包括机械法和物理化学法。图 1 所示的制备方法中,有很多制得的粉末形貌并不佳。其中,离心雾化法、等离子雾化法(PA)和二流雾化法均可制备出球形或近球形的金属粉末,是当前增材制造用金属粉末的主要制备方法。

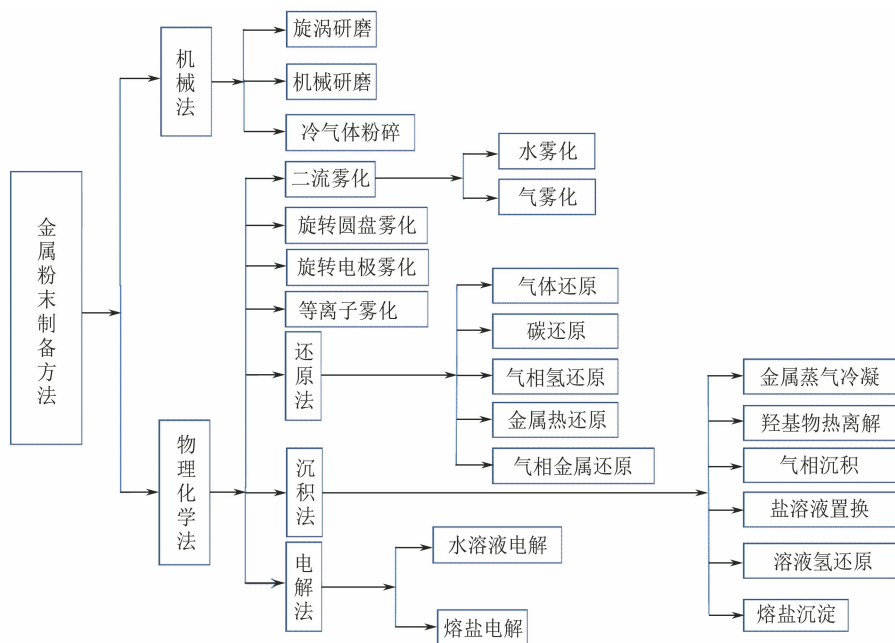


图 1 金属粉末传统制备方法归纳

Fig. 1 Summary of traditional preparation methods of metal powder

1.1 离心雾化法

离心雾化法包括旋转圆盘雾化(CA)和旋转电极雾化(PREP)。CA 法制粉机理是将熔融金属液流撞击到高速旋转的圆盘上,液流被圆盘击碎,然后在离心力作用下雾化成液滴并沿圆盘边缘甩出,紧接着与高速惰性气流相遇而冷却成球形粉末。试验时采用氩气作为雾化室的惰性气体,以增加冷却速率,减小设备雾化室尺寸。但由于氩气使用成本过高,大规模生产时一般选择氮气,并适当增加雾化室尺寸。CA 法在实施过程中容易出现旋转圆盘变形和坍塌漏嘴污染等问题,且其制备的粉末闭孔内夹杂气体较多,在生产钛合金等活性粉末时该问题更加突出。因此,国内鲜有企业使用该项技术。

PREP 法是将母材合金制成电极棒后装入传动装置中,使其在惰性保护气氛下高速旋转,同时由等离子体弧将其加热熔化,形成的液膜受离心力作用分散飞离电极棒断面,最终在表面张力作用下迅速凝固形成球形粉末的一种技术^[5-6]。该方法通过改变电极棒直径、转速以及等离子体弧电流的大小来调控粉末粒径,适用于航空航天零部件增材制造用钛合金及高温合金等粉末的制备,所得粉末球形度较好、粒度分布范围较窄、表面干净、夹杂少、无空心粉、流动性好,缺点则是粉末不易制取、材料利用率不高,且传统的 PREP 法由于电极棒直径小($\leq 50\ \text{mm}$)、转速低(极限转速为 $15\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$),制备的粉末较粗,不适用于 SLM 增材制造。提高电极棒直径与极限

转速、攻克高速动密封技术是 PREP 法获得较细粉末的技术关键^[7-11]。

1.2 二流雾化法

二流雾化法主要通过雾化喷嘴产生高速、高压的介质流(常用的为水或者气体)来粉碎熔融金属液流,使其变成细小的液滴,并快速冷却凝固成球形颗粒^[12],主要包括水雾化法和气雾化法(GA)。

据不完全统计,当今世界采用 GA 法制取的增材制造用金属粉末占总产量的 50%~60%。经过不断的创新和完善,GA 法已成为增材制造用高性能金属粉末的主要生产方法之一。工业上使用最广泛的两种气雾化系统为自由落体式 and 紧密耦合式,这两种系统中,熔融金属或合金液流均会被高压冷气体射流破碎成液滴,随后在高速雾化气流中经受高速冷却和深度过冷。在自由落体式结构中,熔融金属或合金液流在被雾化气体撞击之前会沿重力方向自由下落一定距离,产生的颗粒相对粗糙。在紧密耦合式结构中,熔融金属或合金液流从喷嘴中出来后就会立即被气体射流击中,生产的金属粉末质量中值直径(MMD)在 10~100 μm 之间。GA 法制备的粉末粒度往往分布范围较宽并且需要消耗大量特定气体;而粉末尺寸分布范围较宽时,通常需要对较大或较小粒度的粉末进行分离,这会大幅降低生产效率。对于 SLM 用 AlSi10Mg 合金粉末(其铸件广泛应用于航空、仪表及一般机械,如汽车发动机的缸盖、进气歧管、活塞、轮毂、转向助力器壳体等)来说,在常规气雾化工艺中,尺寸小于 53 μm 粉末的收得率仅为 30%(体积分数)左右。目前,GA 法的研究重点是开发 MMD 小以及生产效率高的球形粉末制备工艺。提高雾化效率或细粉收得率主要有 3 种途径:(1)优化气体喷嘴设计及气体喷嘴与熔体喷嘴的布置;(2)提高雾化气体性能;(3)控制熔体性能。当前大部分的研究工作集中在前两个方面。

目前,气体流体动力学的研究已取得重大进展,气体喷嘴设计及其与熔体喷嘴之间的布置也取得巨大的进步。为降低所需供气压力,同时提高雾化效率和均匀性,气流通道中具有收敛-发散(Convergent-Divergent, C-D)^[13]或拉瓦尔(De Laval)喷嘴^[14]外形的气体喷嘴得到了广泛研究。基于紧密耦合式结构,ANDERSON 等^[13]开发了具有离散汇聚-发散射流的高压气体雾化(High Pressure Gas Atomization, HPGA)喷嘴;与直管射流喷嘴相比,该喷嘴展现出更高的雾化效率。并且其通过调节气体喷嘴与熔体

喷嘴之间的相对位置或匹配角度来消除或限制熔体尖端周围的局部流动分离,从而避免因熔体润湿(回弹)而导致的气体喷嘴故障^[15-16]。提升雾化介质的压力和温度等特性,可以很好地提高雾化效率。STRAUSS^[17]和 HOPKINS^[18]开发了热气雾化技术,由于气体分子的运动速度与气体绝对温度的平方根成正比,因此增加雾化气体温度可以产生大量的动能,使熔体流变为更细小的雾滴,从而提高雾化效率。

雾化效率还可通过增加雾化前的特定液体表面能来优化^[19]。在双流体雾化中,金属熔体碎裂需发生在雾化气体和液体之间速度差最大的区域,因此必须将金属熔化并输送到该区域。这可以在预成膜的混合雾化器中实现,主要分为两个步骤,即预成膜和气体雾化^[20]。在预成膜时,熔体产生较大的比表面积,以便通过气体雾化产生有效的二次破碎。CZISCH 等^[21]基于单流体旋转预成膜概念,开发了一种预成膜混合雾化器,进料首先由以一定模式运转的旋转圆盘展开成片状,形成自由流动的液体膜,然后通过局部气流输送到最有效的雾化区,由外部混合气体雾化器的高速气体流进行雾化。MINAGAWA 等^[22]将气体雾化与离心雾化有效结合,开发了一种用于粉末生产的混合雾化工艺:熔融喷雾从外部混合双流体喷嘴喷出,撞击到旋转盘上产生一个受控膜;该膜充当离心雾化器用于产生具有窄粒径分布的细液滴,以获得细小金属粉末。另一种预成膜混合雾化方法是以压力旋流雾化为预成膜步骤,并与气体雾化相结合的压力旋流气体雾化(Pressure Swirl Gas Atomization, PSGA)法^[23]。在 PSGA 过程中,加压熔体进入压力旋流喷嘴,并在旋涡和离心力作用下以圆锥形空心薄膜的形式离开喷嘴出口,并在外部混合气体喷嘴作用下破碎。PSGA 雾化器特别是压力旋流喷嘴设计精巧,已用于生产中值直径小且粒度分布窄的低熔点金属球形粉末^[24-25]以及金属基复合材料粉末^[26]。除了 PSGA 技术外,还可以在按需滴落(Drop on Demand, DOD)过程中对熔体施加周期性的超压进行加压雾化^[27-28],从而周期性地将熔体推入熔体喷嘴,形成不连续的液滴链,随后将其固化为粉末颗粒。

经过不断的研究发展,核心部件喷嘴的优化设计使得气雾化效率以及细粉收得率得到了很大的提升。但在气雾化技术中,气流在作用于液流前的飞行中不断膨胀,且速度减小,导致雾化气体能量损失

较大,从而影响了雾化效率;金属及合金液流靠气流的冲击和扰动破碎而后形成粉末,由于气流扰动的不稳定性,粉末的粒度分布较其他方法下的宽^[29]。此外,粉末批次稳定性差的问题也一直未得到解决,这一方面是由于增材制造技术发展迅速,材料的应用走在标准建立之前,粉末、工艺和设备的技术指标、规范、标准尚未贯通;另一方面则是由于在制备过程中粉末分级比较困难。目前国内外研究人员也一直关注着细粉分类设备的研发。

从20世纪80年代初开始,气雾化制粉技术逐步在我国得到关注和应用。中科院力学研究所、中南大学粉末冶金研究院和哈尔滨工业大学等单位进行了气雾化制粉工艺和机理的研究并取得了显著成果。但总体来看,气雾化工艺应用的研究居多,其机理的探讨和分析则不够深入,并且大部分高性能粉末和制粉设备仍需从国外进口。受技术所限,雾化法制备细粒径粉末较为困难,所得粉末存在氧及其他杂质含量较高、粒度分布不佳、球形度和成分均匀性差等问题,这在一定程度上限制了我国高端增材制造产业的进一步发展。

1.3 等离子雾化法

PA法的雾化机理为通过专用送料机构以一定速率送入金属原料,在炉体顶部多个对称安装的等离子火炬产生的聚焦等离子射流作用下原料迅速分散成超细液滴或气雾,并在沉积过程中与冷却用的惰性气体发生热交换,凝固得到近球形粉体^[12]。PA法制得的金属粉末整体粒径偏细。PA法在一定程度上也可归入二流雾化法;但与二流雾化法相比,该方法没有采用常用的水或者气体介质流粉碎液流,而是采用热等离子体,这可以避免熔融液滴因快速冷却而造成的球形度不高等问题。此外,PA法不需要使用传统陶瓷坩埚,适合所有能熔化的金属材料制粉,尤其是含钛的对坩埚造成污染的高活性金属材料。

2 球化法

球化法利用高能量密度热源使不规则粉体迅速熔化或气化,然后在极大的温度梯度下迅速冷却、固化、沉积得到球形粉末^[30-31]。与上述传统制备方法相比,球化法制备的粉体球形度相对较高,表面光滑,流动性好,纯度高。经过球化处理后,一些形貌、品质不佳的粉末也能够变成适合增材制造用的高品质球形粉末,这提供了一种高品质粉末制备的新思

路,使得研究人员不必拘泥于传统方法的一步到位,在初步制粉时可以选择最为经济、方便、合适的方法,从而拓宽制粉路径。目前,制备球形金属粉末的球化法主要有等离子球化(PS)法、激光球化(LS)法和高温火焰球化法。如果PA法取消雾化喷嘴,提高等离子炬功率至能够直接气化金属或合金原料,则从某种意义上而言也可归为球化法。

2.1 等离子球化法

感应等离子体由于体积大、纯度高以及放电过程中粒子停留时间长等特点,特别适合用于粉末球化。感应等离子粉末球化过程主要包括机内加热、单个颗粒的熔化和熔融球形液滴在自由落体过程中的冷却3部分。根据处理后粉末进料的粒度和表观密度来控制熔融液滴下落时间,使其在到达主反应器室底部之前有足够的时间完全凝固。等离子体气体中残留的较细颗粒,则通过旋风分离器和过滤器收集装置在主反应器室的下游进行回收。单个颗粒飞行中的加热涉及到从等离子体到颗粒表面的热传导、对流传热以及颗粒表面和周围金属蒸气云的辐射热损失。由于从颗粒表面到周围环境的辐射能量损失迅速增加,对于熔化温度较高的材料和尺寸较大的颗粒,其加热和熔化变得更加困难。对于钼和钨等非常难熔的金属来说,若要成功制备出尺寸在100 μm 或200 μm 的颗粒,等离子体温度需要大大高于材料的理论熔化温度^[31]。

目前国内外学者通过理论计算、数值模拟和试验对等离子球化技术进行了一系列研究,并取得了较大的进展。在感应等离子技术开发领域,Tekna等离子系统公司设计、开发和制造了可用于多种材料处理和表面处理的“turn-key”等离子系统。国外关于等离子体球化粉体的研究起步较早,BOULOS等^[32]在1978年就通过建立理论模型对粒径在10~250 μm 之间、处于感应耦合热等离子体中的铝颗粒加热历程和运动轨迹进行了研究,并建立了一系列公式条件^[33],发现当粉末粒径小于100 μm 时,粉末颗粒会紧随着流场线运动,并最终完全变成金属蒸气;当粉末粒径大于100 μm 时,颗粒的运动主要取决于送粉器的初始位置和注入速度,且粉末颗粒能够穿过等离子焰炬中心。CHEN等^[34]和PFENDER等^[35]研究了小颗粒在热等离子流体中的传热与传质行为,根据力平衡原理得到了无热效应作用下单颗粒的运动方程,推导了颗粒所受力的表达式,并以铝粉和钨粉为原始颗粒研究了颗粒的运动历程。

国内,万德成等^[36-37]亦研究了颗粒与感应热等离子体的相互作用,推导了颗粒的运动模型。在数值模拟技术逐渐成熟的基础上,许多研究人员开始进行试验探索。KOBAYASHI等^[31]利用射频等离子球化法制备了亚微米级铜粉,发现反应器压力、氢气流量和粉末进料速率都对铜粉球化效果有较大的影响,同时在射频等离子球化过程中,粉末颗粒的表面存在气化和蒸发现象,产生的大量金属蒸气会导致粉末颗粒尺寸变大。WANG等^[38]利用射频感应耦合等离子体制备了球形Nd-Fe-B合金粉体,并分析了进料速率和原始颗粒大小对试验结果的影响。毛瑞奇等^[39]利用氩气射频等离子体球化技术处理形状不规则的氢化钕铁硼粉末,得到了球形度高、粒度分布范围窄、分散性好、球化率接近100%的球形粉末,其脱氢分解和球化过程可在等离子体中一步完成;同时,利用FLUENT软件进行了数值模拟分析,发现载气流量的变化对等离子体焰炬的温度场有很大影响。其他研究人员^[40-42]亦发现等离子球化处理后,粉末表面变得光滑,其松装密度、振实密度和粉末流动性得到明显改善。在等离子球化过程中,载气流量、鞘气流量、反应室压力、送粉速率等因素对粉末球化效果有较大影响;随着送粉速率的增加,粉末的球化率会逐渐降低^[40,43]。古忠涛等^[44-45]利用等离子体炬产生的高温热将形状不规则的钨粉、钛粉快速熔化成液滴,随后急冷得到球形粉末,该过程无氧化发生和其他杂质介入,钛粉也没有发生物质结构和相的变化;粉末中碳、氧、氢和氮元素的含量有所降低,而钛含量相对增加,说明等离子球化处理有一定的纯化作用。

通过调整等离子球化工艺参数,能够得到高品质增材制造用球形粉末,同时还可带来一些其他优化效果。但该工艺仍存在一些不足,如:球化过程中容易引入外来杂质,对粉末造成污染;能量可控性不好,导致粉末发生烧损或变性;球化率不易控制。并且在等离子球化过程中,存在着大量不确定因素:粉末颗粒进入等离子体焰炬中后,其传热与传质涉及到气化和蒸发、颗粒运动的非连续行为、颗粒内部热量传导、颗粒表面能量辐射、颗粒形状及粒子带电等行为^[46-47];在等离子球化过程中,工艺参数的调整不仅影响等离子焰炬的内部温度,还影响着等离子焰炬流体形态和粉末颗粒的受力情况等;此外,在磁感线圈作用及带电粒子的碰撞下,粉末颗粒在等离子体焰炬内的运动轨迹也各不相同。因此,需要进

一步加强对等离子球化法过程中出现的一系列现象的理论与试验研究,探明其规律(如传热传质规律、受力运动规律等),以便利用等离子体达到更好的球化效果。

2.2 激光球化法

激光作为一种高能束流,与等离子体相比,其能量、方向性高度可控,并且与材料相互作用时不引入外来杂质,非常适合于非球形硬质合金粉末的球化。

在早期选区激光烧结(SLS)增材制造过程中普遍存在激光球化现象,当激光束扫过粉末表面时,粉末迅速升温熔化,随后在表面张力作用下收缩成球形颗粒。研究人员对金属粉末在激光作用下的复杂变化行为进行了诸多研究^[48-52],发现球化效应也有值得肯定的一面。利用激光束扫描物体表面,使其所吸附的微细粉末或薄膜在激光作用下迅速球化并弹起,可以达到清洁物体表面的目的^[53];通过激光束扫描金属薄膜可以得到球形熔滴,从而制备出由离散球形熔滴组成的规则图形^[54-57]。随后,研究人员利用激光球化效应开始进行高品质球形粉末的制备。欧阳鸿武等^[58-59]通过系统地改变激光功率、扫描速度以及选取合适的激光扫描间距,探讨了球化效应形成的工艺条件,通过对球化过程进行理论分析,得出了选区激光扫描制备球形钛粉的工艺参数,获得了较为理想的球形钛粉,并指出金属粉末的球化能力取决于其粒径、导热性、熔点和激光吸收率等因素。除了钛粉以外,欧阳鸿武等^[60]还对异形黄铜粉颗粒的熔化、熔滴铺展和收缩球化过程进行了理论分析,发现这3个过程非常短暂,分别在 10^{-5} , 10^{-2} , 10^{-4} s以内完成,且粉末粒径越小,历时越短;熔滴铺展与收缩的协调是成球的关键,理想的球化效果只有在激光工艺参数、粉末物性和球化环境相互协同的条件下才能实现。黄卫东等^[61]发明了一种激光球化稀有难熔金属及硬质合金非球形粉末的方法,即在氩气环境中,将不规则粉末颗粒由送粉器送至激光束下,经过激光高温辐照使其表面部分熔化,然后自然冷却获得球形或近球形粉末颗粒,所得粉末成分与球化处理之前的具有较好的一致性。目前对于激光扫描制备球形粉末的研究还相对较少,这是未来球形粉末制备极具潜力的研究方向之一。

3 结束语

在常用的增材制造用粉末制备方法中,二流雾

化法尤其是气雾化法是制备高性能球形金属粉末的主要方法,但其仍无法完全解决空心粉及卫星颗粒的问题,且现阶段细粉收得率不是很理想。离心雾化法制备的粉末球形度高、实心、无卫星颗粒、成分易于控制,但其对粉末颗粒的细化依赖于离心转速等,细粉收得率低、制备成本高,相关技术有待提高。球化法制备的粉末表面光滑、流动性好、内部孔隙少、纯度高,其与传统机械法或物理化学法的组合将是一种应用前景良好的球形粉体制备方法,但目前受限于设备及工艺的连续性,应用规模上劣于二流雾化与离心雾化法。

随着粉末制备基础理论研究的深入以及技术的发展,传统主流技术(气雾化法等)将不断得到完善和更新,新的制备技术及工艺也在不断涌现,高品质球形金属粉末制备将进一步产业化及标准化。随着新热源技术(等离子炬、电子束、激光)的应用,在以传统制备方法为基础进行工艺及设备改进研究的同时,可以按需进行智能设计,根据具体需求和制粉特点将制粉工艺进行个性化功能组合,从单独制粉工艺向组合工艺发展,进行增材制造用高性能球形粉末的制备。

增材制造用金属粉末产品工业化供应除了要求核心技术过硬之外,还需要有成体系的粉末管理方法(粉末品质管控、指标管控等)。国内的制粉企业大多发展时间不长,没有稳定的订单和销量,粉末管理体系建立不完备,难以保证产品质量稳定和批次稳定。而不稳定的粉末产品又会影响增材制造应用端的发展,导致无法形成正向促进。和当前全球高品质球形金属粉末生产与应用产业的迅猛发展相比,我国增材制造用球形金属粉末生产与应用领域仍然存在标准缺失、国际相关标准跟踪转化落后、各球形金属粉生产厂商及应用商对国内国际标准化工作的参与度不高等问题。这就需要研究人员及各厂商共同推进增材制造用金属粉末的标准制定工作,充分发挥标准对球形金属粉末生产与应用产业发展的规范和引领作用。

参考文献:

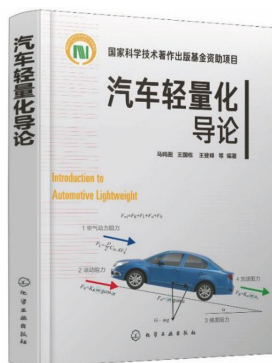
- [1] HUANG S H, LIU P, MOKASDAR A, et al. Additive manufacturing and its societal impact: A literature review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5/6/7/8): 1191-1203.
- [2] CAMPBELL I, BOURELL D, GIBSON I. Additive manufacturing: Rapid prototyping comes of age[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(4): 255-258.
- [3] SERCOMBE T, JONES N, DAY R, et al. Heat treatment of Ti-6Al-7Nb components produced by selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2008, 14(5): 300-304.
- [4] KRUTH J P, MERCELIS P, VAN VAERENBERGH J, et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(1): 26-36.
- [5] 王华,白瑞敏,周晓明,等. PREP法和AA法制取Inconel 718粉末对比分析[J]. 中国新技术新产品, 2019(19): 1-4.
- [6] 杨伟,张崇才,涂铭旌. 钛及钛合金粉末注射成型研究近况及应用前景[J]. 材料导报, 2015, 29(9): 123-128.
- [7] 陶宇,冯涤,张义文,等. PREP工艺参数对FGH95高温合金粉末特性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(5): 46-50.
- [8] 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.
- [9] 陶宇,冯涤,张义文,等. 优化等离子旋转电极工艺提高FGH95合金粉末的收得率[J]. 粉末冶金工业, 2003, 13(2): 33-36.
- [10] 国为民,赵明汉,董建新,等. FGH95镍基粉末高温合金的研究和展望[J]. 机械工程学报, 2013, 49(18): 38-45.
- [11] 杨鑫,奚正平,刘咏,等. 等离子旋转电极法制备钛铝粉末性能表征[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(12): 2251-2254.
- [12] 戴煜,李礼. 金属3D打印粉体材料制备技术的研究现状与进展[C]//第一届新型功能结构技术学术会议暨增材制造产业创新技术论坛论文集. 沈阳:[s.n.], 2016.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] STRAUSS J T. Lick back in close-coupled atomization: A phenomenological study[C]// Spray Deposition and Melt Atomization. Bremen, Germany: Universität Bremen, 2013.
- [16] SCHWENCK D, ELLENDT N, FISCHER-BÜHNER J, et al. A novel convergent-divergent annular nozzle design for close-coupled atomization[J]. Powder Metallurgy, 2017, 60(3): 198-207.
- [17] STRAUSS J T. Hotter gas increases atomization efficiency[J]. Metal Powder Report, 1999, 54(11): 24-28.
- [18] HOPKINS W G. Fine powders: The heat is on at PSI[J]. Metal Powder Report, 2001, 56(3): 20-24.
- [19] LEFEBVRE A H. Airblast atomization[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1980, 6(3): 233-261.
- [20] FRITSCHING U, UHLENWINKEL V. Hybrid gas atomization for powder production[M]. Powder Metallurgy. England: Maney Publishing, 2012.
- [21] CZISCH C, FRITSCHING U. Atomizer design for viscous-melt atomization[J]. Materials Science and Engineering: A,

- 2008,477(1/2):21-25.
- [22] 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.
- [23] LAGUTKIN S, ACHELIS L, SHEIKHALIEV S, et al. Atomization process for metal powder[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 383(1): 1-6.
- [24] ACHELIS L, UHLENWINKEL V. Characterisation of metal powders generated by a pressure-gas-atomiser[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 477(1/2): 15-20.
- [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] 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.
- [27] XU Y, ELLENDT N, LI X G, et al. Characterization of cooling rate and microstructure of CuSn melt droplet in drop on demand process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(7): 1636-1644.
- [28] ZHONG S Y, QI L H, LUO J, et al. Effect of process parameters on copper droplet ejecting by pneumatic drop-on-demand technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 3089-3097.
- [29] 王琪, 李圣刚, 吕宏军, 等. 雾化法制备高品质钛合金粉末技术研究[J]. 钛工业进展, 2010, 27(5): 16-18.
- [30] BOULOS M. Plasma power can make better powders[J]. Metal Powder Report, 2004, 59(5): 16-21.
- [31] KOBAYASHI N, KAWAKAMI Y, KAMADA K, et al. Spherical submicron-size copper powders coagulated from a vapor phase in RF induction thermal plasma[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(13): 4402-4406.
- [32] BOULOS M I. Heating of powders in the fire ball of an induction plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1978, 6(2): 93-106.
- [33] BOULOS M I, FAUCHAIS P, VARDELLE A, et al. Fundamentals of plasma particle momentum and heat transfer [M] // Plasma Spraying: Theory and Applications. [S. l]: World Scientific, 1993: 3-57.
- [34] CHEN X, LEE Y C, PFENDER E. The importance of the knudsen and evaporation effects on modeling in thermal plasma processing [C] // Process of the 6th Internal Symposium on Plasma Chemistry. Montreal, Canada: McGill University, 1983.
- [35] PFENDER E, LEE Y C. Particle dynamics and particle heat and mass transfer in thermal plasmas. Part I. The motion of a single particle without thermal effects[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1985, 5(3): 211-237.
- [36] 万德成, 戴世强, 陈允明. 颗粒与高频感应热等离子体流相互作用数值研究[J]. 水动力学研究与进展, 1996, 11(2): 212-220.
- [37] 万德成, 戴世强, 陈允明. 颗粒与高频感应热等离子体流的迭代计算[J]. 计算物理, 1997, 14(1): 90-98.
- [38] WANG Y M, HAO J J, SHENG Y W. Spheroidization of Nd-Fe-B powders by RF induction plasma processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(9): 1810-1813.
- [39] 毛瑞奇, 郝俊杰, 郭志猛, 等. 射频等离子体球化处理氢化铍铁硼粉末[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016, 21(3): 475-481.
- [40] 高斌, 王全胜, 柳彦博, 等. 感应等离子球化 $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 粉末涂层性能研究[J]. 热喷涂技术, 2015, 7(4): 31-36.
- [41] 盛艳伟, 郭志猛, 郝俊杰, 等. 射频等离子体制备球形 Ti-6Al-4V 粉末性能表征[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(2): 164-168.
- [42] 王建军, 郝俊杰, 郭志猛, 等. 射频等离子体制备球形钨粉[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, 19(3): 361-366.
- [43] 胡凯, 邹黎明, 毛新华, 等. 射频等离子体制备球形钛粉及其在粉末注射成形中的应用[J]. 钢铁钨钛, 2020, 41(1): 36-42.
- [44] 古忠涛, 叶高英, 刘川东, 等. 射频等离子体制备球形钨粉研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2010, 30(2): 178-182.
- [45] 古忠涛, 叶高英, 金玉萍. 射频感应等离子体制备球形钛粉的成分分析[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1409-1413.
- [46] ANDERSON J D. Computational fluid dynamics: The basics with applications[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 1995.
- [47] BEEK W J, MUTTZALL K M K, VAN HEUVEN J W. Transport phenomena[M]. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [48] TOLOCHKO N K, MOZZHAROV S, LAOUI T, et al. Selective laser sintering of single- and two-component metal powders[J]. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(2): 68-78.
- [49] TOLOCHKO N K, ARSHINOV M K, GUSAROV A V, et al. Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder[J]. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(5): 314-326.
- [50] MAJUMDAR J D, PINKERTON A, LIU Z, et al. Microstructure characterisation and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1/2/3/4): 320-327.
- [51] BONN D, BERTRAND E, MEUNIER J, et al. Dynamics of wetting layer formation[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(20): 4661.
- [52] GIBSON I, SHI D P. Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process [J]. Rapid Prototyping Journal, 1997, 3(4): 129-136.
- [53] RYU D Y, SHIN K, DROCKENMULLER E, et al. A generalized approach to the modification of solid surfaces[J]. Science, 2005, 308(5719): 236-239.
- [54] HABENICHT A. Jumping nanodroplets[J]. Science, 2005, 309(5743): 2043-2045.

- parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens; A review[J]. Polymer Testing, 2018, 69: 157-166.
- [3] SUN B B, KULINSKY L. Fabrication of regular polystyrene foam structures with selective laser sintering[J]. Materials Today Communications, 2017, 13: 346-353.
- [4] 舒小平. 叠层制备结构热应力分析[M]. 南京: 南京大学出版社, 2015.
- [5] WANG J, DAS S, RAI R, et al. Data-driven simulation for fast prediction of pull-up process in bottom-up stereo-lithography[J]. Computer-Aided Design, 2018, 99: 29-42.
- [6] ZHAO X R, IYER A, PROMOPPATUM P, et al. Numerical modeling of the thermal behavior and residual stress in the direct metal laser sintering process of titanium alloy products[J]. Additive Manufacturing, 2017, 14: 126-136.
- [7] ZHANG X C, XU B S, WANG H D, et al. An analytical model for predicting thermal residual stresses in multilayer coating systems[J]. Thin Solid Films, 2005, 488(1/2): 274-282.
- [8] WANG L, WANG Y, SUN X G, et al. Finite element simulation of residual stress of double-ceramic-layer $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/8\text{YSZ}$ thermal barrier coatings using birth and death element technique[J]. Computational Materials Science, 2012, 53(1): 117-127.
- [9] EL MOUMEN A, TARFAOUI M, LAFDI K. Additive manufacturing of polymer composites: Processing and modeling approaches[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 171: 166-182.
- [10] ÖHMAN M, EKH M, LARSSON F, et al. Finite element simulations of thermal residual stresses in realistic 3D WC-Co microstructures[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 85: 105065.
- [11] ALMOTAIRI A, FARHAT Z, WARKENTIN A. Thermal damage of conventional hard chromium coatings on 416 stainless steel[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 1118-1130.
- [12] 曹师增, 宋发成, 刘元义, 等. 基于 FDM 的 3D 打印翘曲变形优化研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(10): 51-54.
- [13] SHU X P, WANG R L. Thermal residual solutions of beams, plates and shells due to laminated object manufacturing with gradient cooling[J]. Composite Structures, 2017, 174: 366-374.
- [14] 王荣亮, 舒小平. 基于梯度降温的叠层制备热残余解析解[J]. 现代制造工程, 2017(11): 65-69.
- [15] 舒小平, 张少林. 三维打印碳纤维增强聚合物复合材料热残余解析解[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5): 1151-1158.
- [55] LESHANSKY A M, RUBINSTEIN B Y. Nonlinear rupture of thin liquid films on solid surfaces[J]. Physical Review E, 2005, 71(4): 040601.
- [56] NAHAL A, MOSTAFAVI-AMJAD J, GHODS A, et al. Laser-induced dendritic microstructures on the surface of Ag^+ -doped glass[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(5): 053503.
- [57] TRICE J, THOMAS D, FAVAZZA C, et al. Pulsed-laser-induced dewetting in nanoscopic metal films: Theory and experiments[J]. Physical Review B, 2007, 75(23): 235439.
- [58] 欧阳鸿武, 余文焘, 陈欣, 等. 利用“球化效应”激光扫描制备球形 Ti 粉的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(9): 1608-1612.
- [59] 欧阳鸿武, 刘卓民, 黄誓成, 等. 激光扫描金属粉末的“球化效应”及其应用[J]. 激光技术, 2008, 32(6): 572.
- [60] 欧阳鸿武, 余文焘, 何世文, 等. 激光扫描法制备球形黄铜粉末[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(5): 716-721.
- [61] 黄卫东, 薛蕾, 陈静, 等. 一种激光球化稀有难熔金属及硬质合金非球形粉末的方法: 101602107[P]. 2009-12-16.

(上接第 52 页)

新书速递:《汽车轻量化导论》



作者简介: 马鸣图, 教授、博导、博士后导师, 中国机械工程学会材料分会副主任委员, 《机械工程材料》杂志编辑委员会副主任。发表学术论文 300 余篇, 出版学术专著 8 部, 主编热冲压成形会议文集 4 部。目前参与承担国家自然科学基金委重点基金项目 3 项, 国家重点研发计划 1 项。

共获国家、省部级各类科技奖励 30 余项, 曾被授予国家级有突出贡献的中、青年专家, 有突出贡献的中国博士学位获得者等称号。

由马鸣图教授主编的《汽车轻量化导论》于 2020 年 5 月

出版。该书对汽车轻量化及其国内外的新近进展进行了全面系统的论述, 不仅论述了轻量化的基础, 包括轻量化的重要意义, 轻量化的表征参量、评价方法, 材料性能和汽车零部件功能之间的关系, 计算机模拟以及材料在高应变速率下的响应特性; 还为汽车轻量化指明了实施路径和方法, 包括轻量化的优化设计、合理选材和先进的成形技术。该书可供从事汽车生产、设计、研发的技术人员阅读, 也可供相关专业的师生参考。

本书定价 298 元, 16 开, 精装, 需要购买的读者请与本刊发行部联系。

联系人: 王敏

电话/传真: 021-65527634

电子邮箱: wm@mat-test.com

地址: 上海市虹口区邯郸路 99 号, 200437