

适用于金属增材制造的球形粉体制备技术

乐国敏, 李 强, 董鲜峰, 徐庆东, 胡 勇, 李 平

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 金属增材制造技术作为一项革命性的先进制造技术, 从 20 世纪 90 年代兴起并得到迅速发展, 受到各国家的高度关注。原料是影响和制约增材制造零部件性能的关键因素之一。球形粉体由于具有良好的流动性和铺展性、以及较高的松装密度与压实密度等优异性能, 是金属增材制造的理想原材料。本文针对球形粉体的雾化制备技术以及粉体的球化技术, 详细总结了雾化和球化技术的相关原理、方法和技术特点, 并针对金属增材制造对球形粉体制备技术的发展进行了展望。

关键词: 球形粉体; 雾化; 离心雾化; 粉体球化

中图分类号: TF121

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)04-1162-07

金属增材制造技术作为一项革命性的先进制造技术, 从 20 世纪 90 年代兴起并得到迅速发展, 受到美国等发达国家的高度关注, 我国也几乎同期进入该研究领域, 且已取得可喜的成果。目前, 国内增材制造的钛合金零件性能已能达到或超过锻件水平^[1,2]。金属材料的增材制造技术主要有 2 种: 激光/电子束选区熔化成型 (selective laser melting, SLM; electron beam selective melting, EBSM)^[3-9]和激光熔化成型 (该技术由于来源于不同的研究机构而有着不同的命名, 如 laser engineered net shaping, LENS; directed light fabrication, DLF; direct metal deposition, DMD; laser melting deposition, LMD; laser solid forming, LSF; laser direct manufacturing, LDM; laser rapid forming, LRF 等)^[1,2,10-16]。

对于金属材料的增材制造, 原料是影响和制约其制造零部件性能的关键因素之一。金属增材制造所需原材料一般为金属粉体, 采用 SLM 和 EBSM 方式成型时须将粉体在平面上均匀致密地铺展, 要求粉体具有良好的流动性以及较高的松装/压实密度; 采用 LENS 方式成型时须将粉体通过气流均匀稳定地输送到熔池内部, 要求粉体具有很好的流动性。球形粉体由于具有良好的流动性和铺展性、以及较高的松装密度与压实密度等优异性能, 而成为金属增材制造的理想原材料。

1 适用于增材制造球形粉体的质量要求

除了粉体的形状, 粉体的粒径也是一个重要的参数, 合适的粒径选择对于粉体的流动性、粉体的松装/

压实密度、成型成本、成型效率与成型件精度都有着一定影响。一般来说, 激光选区熔化成型所需粉末中粒径一般在 20~45 μm ^[3-5], 而激光熔覆成型所需粉末中粒径一般在 90~150 μm ^[10,11,13]。

为保证成型件的性能, 除了粉体的成分外, 粉体的氧含量也是一个重要的指标。对不同的材料体系, 氧含量的要求会稍有不同。总体来说, 利用氧含量较高的粉体有望成型含有较多弥散分布第二相的材料, 有利于材料强度的提升, 但一般会降低材料的塑性; 反之则强度降低而塑性增加。因此, 对于特定的材料, 一般来说有最佳的氧含量范围, 以实现材料性能的最优化。

2 球形粉体的雾化制备技术

目前工业上的制粉方法主要有破碎法、理化法以及雾化法, 前 2 种方法制备的粉末形状一般为多边形、角形、树枝形, 只有雾化法制备的粉体为球形。雾化法制粉时利用外力 (如高压水流冲击、高压气流冲击或离心力作用) 将金属液破碎, 碎化的金属液滴在表面张力作用下团聚为球状继而冷却凝固成为球形粉体。

雾化制粉主要分为熔炼、雾化和凝固 3 个步骤, 其中熔炼和雾化对制得粉体的质量起着决定性作用。熔炼是利用一定的热源获得合金熔体, 熔炼的方式直接影响合金粉体的成分与杂质含量; 雾化是将合金熔体分散为液滴的过程, 雾化直接决定了粉体的粒径及粒径分布; 而凝固过程决定着粉体的球形度, 当凝固

收稿日期: 2016-04-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51401189)

作者简介: 乐国敏, 女, 1985 年生, 博士, 特聘副研究员, 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900, 电话: 0816-3626990, E-mail: leguomin@126.com

时间小于液滴的团聚时间时, 则制得粉体的球形度不高, 反之, 则得到具有良好球形度的粉体。

以下主要介绍雾化制粉的两个关键步骤: 熔炼和雾化。

2.1 熔炼

熔炼是在热源作用下将合金材料从固态熔化为液态的过程, 在熔炼的过程中可实现合金的成分控制、精炼除气等功能。一般来说, 熔炼过程是在惰性气体保护或真空环境中进行, 以保证雾化粉体的成分与纯净度。熔炼可采用不同的热源对金属进行加热, 如感应加热、电弧加热、电子束加热和等离子体加热, 熔炼既可采用坩埚, 也可不采用坩埚。

2.1.1 有坩埚式熔炼

常见的雾化设备一般采用有坩埚的熔炼方式。在坩埚中熔炼得到合适的金属熔体后, 可通过倾转坩埚, 将熔体浇铸到中间漏斗落入雾化喷嘴进行雾化; 也可以采用底部浇注的方法, 将坩埚底部的塞杆移除, 使金属液体从坩埚下部(经中间漏斗)流入雾化喷嘴进行雾化。

(1) 普通坩埚

对于低熔点和低活性的金属和合金, 熔炼时可采用普通材质的坩埚, 例如 MgO 、 CaO 等陶瓷类材料或石墨材料。由于高温下材料的活性增强, 为避免坩埚对熔体的污染以及熔体对坩埚的浸蚀, 普通坩埚的适用温度一般在 $1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。

(2) 水冷坩埚

当熔炼一些高熔点或高活性材料(例如商业纯钛、 $Ti6Al4V$ 等合金)时, 可采用水冷坩埚进行熔炼。坩埚内的循环水冷系统使得冷坩埚能在远高于本身熔点的温度下使用, 因此适用于高熔点金属的熔炼; 同时由于坩埚的强冷使得在熔体与坩埚壁之间形成一层由熔体重新凝结而成的凝壳, 避免了坩埚与熔体的直接接触, 能保持原金属的高纯度及防止在熔炼过程中各种间隙元素的污染, 解决了普通坩埚熔炼过程中坩埚与熔体之间的污染问题^[17,18], 因此适用于高活性金属的熔炼。

根据加热方式的不同, 水冷坩埚可分为外热式冷坩埚和感应加热式冷坩埚 2 种形式。外热式冷坩埚采用外加热源如等离子体、电弧、电子束等对熔体进行加热; 感应加热式冷坩埚利用电磁感应进行加热, 由于坩埚中的熔体在电磁力的作用下可与坩埚壁保持软接触或者非接触状态, 此种方式又称电磁(悬浮)冷坩埚^[17,18]。感应加热式冷坩埚中强烈的电磁力搅拌作用可使熔体的组织成分更加均匀, 且感应加热适用范

围广, 理论上可以熔炼所有能被感应加热熔化的金属和合金材料。

图 1a 和 1b 分别为德国 ALD 公司研制的外热式冷坩埚设备(plasma melting induction guiding gas atomization, PIGA)和感应加热式冷坩埚设备(vacuum induction melting gas atomization based on cold wall crucible technology, VIGA-CC)的示意图^[19]。图 1a 中的设备采用等离子体枪对水冷铜坩埚中的熔体进行加热, 坩埚底部通过感应加热导流系统(cold wall induction guiding, CIG 组件)将熔体引入雾化喷嘴。图 1b 中的设备利用围绕着水冷铜坩埚的感应线圈对坩埚中的熔体进行加热, 坩埚底部通过 CIG 组件将熔体引入雾化喷嘴。

2.1.2 无坩埚式熔炼

对于活性材料和高熔点材料, 除了采用水冷坩埚熔炼外, 也可采用无坩埚形式来进行熔炼。例如德国 ALD 公司研制的电极感应熔化气体雾化(electrode induction-melting inert gas atomization, EIGA)型制粉设备(见图 2)^[19]。该设备原料为电极棒, 电极棒低速旋转进入缠绕成圆锥形的线圈, 在感应电流的作用下电极棒被熔化, 液流持续落入放置于下面的雾化喷嘴从而被雾化。该方法由于合金在熔炼的过程中未与其他材料接触, 而能保持高纯净度。同时, 合金棒在感应电流的作用下被熔化, 理论上适用于任何可被感应加热熔化的合金材料的熔炼。

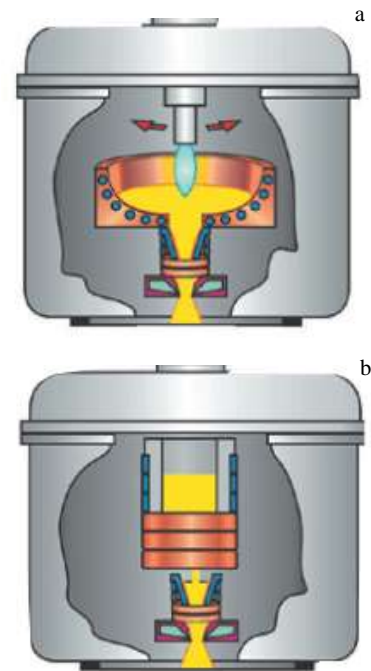


图 1 水冷坩埚的两种加热方式

Fig.1 Two heating methods for water-cooled crucible: (a) external heating and (b) induction heating^[19]

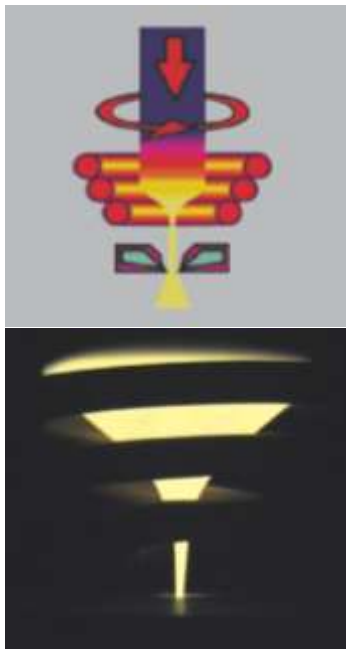


图 2 无坩埚式熔炼: 电极感应熔炼示意图

Fig.2 Schematic diagram of melting without crucible: electrode induction-melting^[19]

除了 EIGA 型设备, 旋转电极雾化制粉设备也采用无坩埚形式进行合金的熔炼, 详细介绍见 2.2.2 节。

综上所述, 采用水冷坩埚式和无坩埚式熔炼可避免高温下坩埚与熔体间的相互反应而引入杂质, 可适用于高熔点高活性合金的熔炼。采用水冷坩埚进行合金熔炼时对原料的形式无限制, 可投入粉料、丝料、锭料、泡沫料、屑状料等形式的原材料, 原料成本相对较低, 但水冷坩埚以及相应的导流系统结构和制造较为复杂。采用无坩埚形式熔炼合金时采用的原料较单一, 为特定直径和长度的电极棒, 且制粉后会有剩余料头, 因此无坩埚式熔炼的原料成本比有坩埚式的要高。

2.2 雾化

当金属或合金经过熔炼成为熔体后, 就进入雾化过程。雾化是采用外力作用将金属熔体破碎为小颗粒的过程, 雾化方式主要有水雾化、气(空气/氮气/氩气/氦气等)雾化和离心雾化。

2.2.1 水/气雾化

水/气雾化的原理基本一致, 如图 3 所示^[20]。水/气雾化采用具有较高速度的流体介质(水/气)撞击金属液流, 将水/气流动能转化为熔体表面能, 使得液流

破碎, 形成小液滴, 小液滴在表面张力作用下团聚为球形, 进而通过对流方式散热而快速冷凝得到微细球形金属粉末。

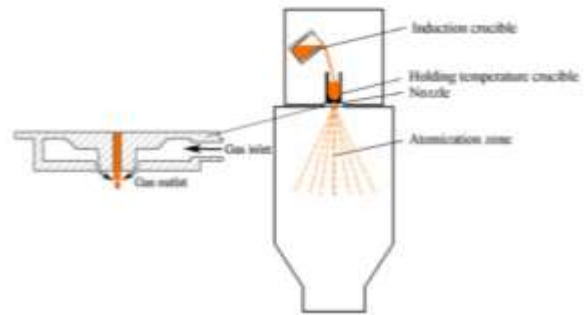


图 3 水/气雾化的原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of water/gas atomization^[20]

水雾化由于采用水做介质, 相比气雾化要价格低廉, 同时能量更高、淬冷效果更好(一般冷却速率可达 $10^2 \sim 10^4$ K/s^[21]), 更有利于生产细小的粉末, 但粉末的形状大多不规则, 且具有粗糙的氧化表面(如图 4a 所示^[22]), 粉体的氧含量一般高达 $1000 \sim 4000$ $\mu\text{g/g}$, 因此这种方法只适用于不会过度氧化的金属粉末(如低合金和高合金钢粉)的制备, 而不适用于高活性金属粉的制备, 如钛合金、高温合金等。

在制备高温合金、钛合金和其他活性金属粉末时, 为减少雾化过程中粉末的氧化程度以提高制品的综合性能, 常采用气体雾化。根据材料的性质不同, 可采用不同的气体(例如空气、氮气、氩气、氦气等)冲击金属液滴使之分散。在气雾化条件下, 粉末的平均冷却速率相比水雾化要较低, 在 $10^2 \sim 10^3$ K/s^[21,23]。气雾化法制备的粉体一般为球形(如图 4b 所示^[24]), 且可将氧含量控制在较低水平。但由于气体能量较低, 相比水雾化粉末粒度不易细化。同时气雾化过程中气体的消耗较大, 制粉成本明显高于水雾化。采用惰性气体回收净化的方式可以实现气体的重复利用, 从而降低生产成本。

水/气雾化的关键和核心部件是雾化喷嘴, 喷嘴通过控制雾化介质的流动和流型使雾化介质获得高能量和高速度。雾化喷嘴的结构决定着雾化效率的高低和雾化过程的稳定性。从本质上来说, 喷嘴的结构基本上分为自由下落式喷嘴和限制式(或紧耦合式)喷嘴 2 种类型^[25,26]。

自由下落式喷嘴的结构如图 5a^[27]所示, 在此结构中, 金属液流靠重力作用从漏包出口落至雾化水/气流焦点处, 受到水/气流的冲击而破碎。限制式喷嘴的结构如图 5b^[27]所示, 在此结构中, 金属液流自导液管中刚一流出即被水/气流粉碎。一般来说, 限制式喷嘴相比自由下落式喷嘴能更有效地将水/气流动能传递给

金属, 能生产更细的金属粉末, 但金属液易于在导液管末端冻结或反喷从而堵塞导液管, 导致雾化过程不能正常进行^[28]。

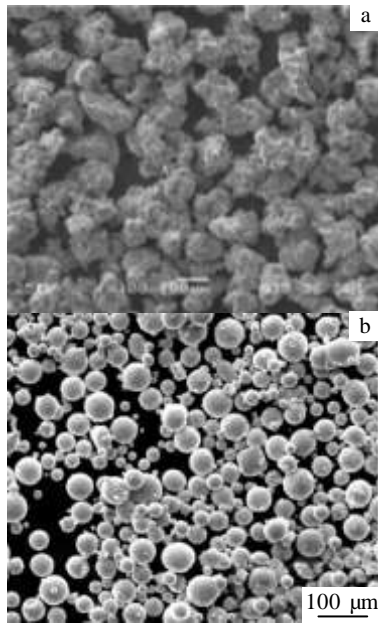


图 4 水雾化铁粉和气雾化不锈钢粉形貌图

Fig.4 SEM images of water-atomized iron powder (a)^[22] and gas-atomized stainless steel powder (b)^[24]

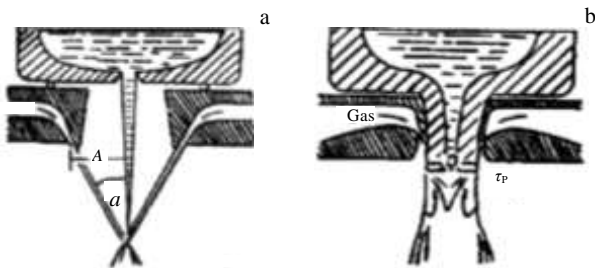


图 5 自由下落式和限制式喷嘴结构示意图

Fig.5 Schematic diagrams of two nozzles: (a) free-fall nozzle and (b) close-coupled nozzle^[27]

通过控制水/气雾化过程中的熔体温度、水/气流压力等参数, 可制备的粉体粒度范围一般在 10~300 μm 之间, 且同批粉体的粒度分布范围一般较宽。对于粒度小于 10 μm 的细粉的制备可采用超声雾化技术和热气雾化技术来实现。

2.2.2 离心雾化

离心雾化是使金属熔体在离心力的作用下破碎为小液滴, 液滴凝固前在表面张力作用下团聚为球形, 从而获得光滑的球形粉末。常见的离心雾化方式主要

有旋转电极法和旋转盘法。

(1) 旋转电极雾化法

图 6 为旋转电极雾化装置示意图^[29]。该方法以金属或合金制成圆棒自耗电极, 电极棒沿长轴方向高速

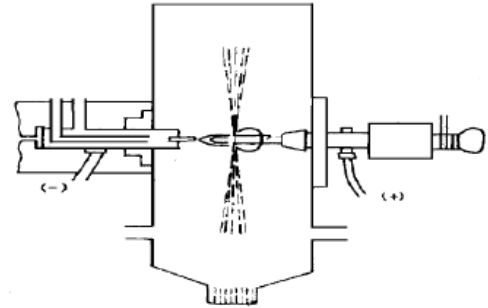


图 6 旋转电极雾化装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of plasma rotating electrode process^[29]

旋转, 电极棒末端伸入雾化室, 其端面受热源 (例如电弧、等离子体、电子束等) 加热而熔化成液体, 熔融金属液在离心力作用下沿电极棒端面切线方向发散成小液滴进入雾化室而凝固为球形粉末。

旋转电极法制取的粉末, 平均粒度可近似地认为与自耗电极旋转速度和电极棒直径的平方根成反比, 见公式 (1)^[30]:

$$d = \frac{\sqrt{12}}{\omega} \left(\frac{\sigma}{\rho \cdot D} \right)^{1/2} \quad (1)$$

其中 d 为所得粉末的理论粒度, ω 为电极棒转速, ρ 为电极棒材料的密度, D 为电极棒直径, σ 为电极棒熔化液滴的表面张力。

一般来说, 旋转电极雾化的冷却速率约为 $10^3 \sim 10^4$ K/s^[31], 电极的旋转速度可高达 15 000~25 000 r/min, 制备的粉体粒度范围为 50~500 μm, 同批粉末的粒度分布范围较窄, 平均粒径一般在 200 μm 左右^[32,33]。

旋转电极雾化的过程一般是在高纯氩气的保护气氛中进行, 同时由于金属的熔化不在坩埚内进行, 熔炼和雾化过程中完全避免了造渣和与耐火材料接触, 消除了氧化和夹杂物的污染源, 可生产低氧含量高洁净度的粉末, 因此可用来生产高熔点金属和活性金属的高纯粉末, 如钛、锆、铌、镍、钽、钒、钨等金属和合金粉末^[30,31,34-37]。

(2) 旋转盘雾化法

图 7 为旋转盘雾化装置的示意图^[21]。该方法将熔融金属液从坩埚或浇包浇注到高速旋转的圆盘中 (圆盘转速可达 35 000 r/min^[21]), 在旋转离心力的作用下金属液被破碎成小液滴, 随后凝固成金属粉末。旋转盘雾化时冷却速率一般在 $10^4 \sim 10^6$ K/s 数量级^[24]。

根据材料的不同，旋转盘雾化法制备的粉体材料粒径可在 10~800 μm 范围内^[38,39]。由于旋转盘雾化法制粉时金属熔液与坩埚和旋转盘有着接触，容易引入杂质，不适用于生产高熔点和高活性的合金。

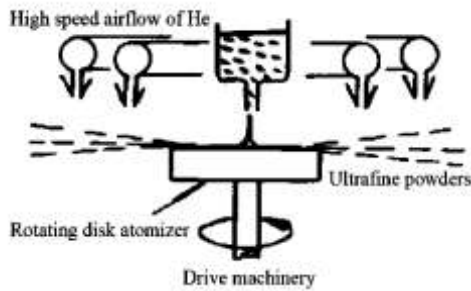


图 7 旋转盘雾化装置的示意图

Fig.7 Schematic diagram of rotating disk centrifugal atomization^[21]

3 粉体的球化制备技术

除了雾化制粉，对破碎法和理化法生产的不规则粉体进行球化处理，也可以生产球形粉体，图 8 为粉体球化过程的示意图^[40]。

粉体的球化技术一般依靠高能量的射频/高频/热等离子体提供的高温（一般 5000~10 000 K）产生的能量使粉末在穿越等离子体时迅速吸热、熔融，在表面张力作用下缩聚为球形，在穿过等离子体后迅速凝固，从而形成球形粉末，完成粉体的球化^[41]。一般来说，球化法制备的粉体相比于初始粉体有长大的现象，原因主要有 2 种：一是由于初始粉体有一定的团聚现象，在球化过程中未充分分散，会使其整体熔融，形成大颗粒的球形粉；其次在球化过程中，由于部分粉末运行轨迹重合，熔融的粉末在穿越等离子体时相互碰撞，形成大颗粒的粉体^[41]。

目前，国外的等离子体粉体处理技术已具备较好的生产能力。加拿大的泰克纳（TEKNA）公司开发的射频等离子体粉体处理系统，在世界范围内处于领先地位。TEKNA 公司应用射频等离子体技术已实现 W、Mo、Ta、Ni、Cu、Ti、Ti-6Al-4V、Re-Mo 等金属和

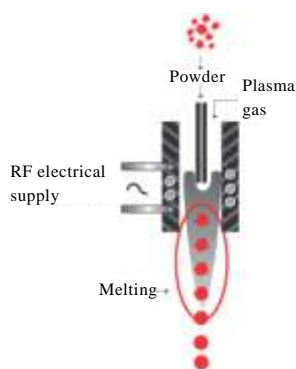


图 8 粉体球化过程的示意图

Fig.8 Schematic diagram of spheroidization of powders^[40]
合金粉末以及 WC、TiN、CaF₂、SiO₂、ZrO₂、TiO₂、SnO₂、Al₂O₃ 等陶瓷粉末的球化处理^[40]。

北京科技大学研制了国内首台水冷石英等离子体炬射频等离子体粉体处理系统，实现了 W、Mo、Ti 等粉体的球化处理。同时，北京科技大学将氢化—脱氢技术与射频等离子体球化技术相结合，以氢化钛粉末（粒度为 150 μm）为原料，将射频等离子体球化处理与“氢爆”技术相结合，制备出了微细球形钛粉（粒度为 20~50 μm）^[42]。

采用等离子体球化技术制粉，对同一种粉体材料来说，具备一定的粒度适用范围。例如对纯 W 来说，可处理粉体粒度范围一般在 5~150 μm 之间。粉体的粒度太小，在穿越等离子体时易被气化；粉体粒度太大，则在有限的时间内不能被完全球化。等离子体球化技术是一种有效的球形粉体制备技术，但制备低氧含量粉体时，球化粉体的氧含量与初始粉体十分相关，而低氧含量初始粉体的价格一般较为昂贵。同时，等离子体球化技术一般适用于单质元素粉体的球化，制备合金球形粉体时需要预合金好的初始粉体，而此种初始粉体一般较难制得。

4 结 语

1) 由于球形粉体的优异性能，国内外都对其制备技术与装备进行了广泛的研究。针对本文介绍的球形粉体制备技术，国内实现一定规模工业生产的主要有配备普通坩埚的气雾化技术和旋转电极雾化技术^[43]，其他例如无坩埚式和水冷坩埚式气雾化技术、以及等离子球化技术还处于研发阶段，未达到规模化生产能力。总体来说，对于金属增材制造中 LENS 工艺需求的平均粒度较大（90~150 μm）的粉体来说，国内具备了一定的研制与生产能力；而对于 SLM 工艺需求的较细球形粉体（20~45 μm）来说，国内研制的粉体在球形度、成分、氧含量和夹杂物等的控制上还落后于国外，目前该类粉体主要依赖进口，价格非常昂贵。为了促进国内在增材制造方向（尤其是 SLM 技术）的发展，需投入更多的资源进行较细球形粉体的研制装备与工艺的开发。

2) 在增材制造引起广泛关注之前，球形粉体一般用于电弧喷涂、热等静压、注射成型等工艺。相信随着增材制造技术的发展对粉体提出的特殊形状、粒度、粒度分布、合金成分等需求，必将促进球形粉体制备

技术的改进, 制粉装备及工艺将会朝着更低成本、更 高效率的方向发展, 且更多的合金体系将会被设计与 开发。

参考文献 References

- [1] Huang Weidong(黄卫东), Lin Xin(林鑫), Chen Jing(陈静) *et al.* *Laser Solid Forming*(激光立体成形)[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 10
- [2] Wang Huaming(王华明), Zhang Shuquan(张述泉), Wang Xiangming(王向明). *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2009, 36(12): 3204
- [3] Thijs L, Kempen K, Kruth J P *et al.* *Acta Materialia*[J], 2013, 61(5): 1809
- [4] Brandl E, Heckenberger U, Holzinger V *et al.* *Materials and Design*[J], 2012, 34: 159
- [5] Bartkowiak K, Ullrich S, Frick T *et al.* *Physics Procedia*[J], 2011, 12: 393
- [6] Murr L E, Gaytan S M, Medina F *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2010, 527(7-8): 1861
- [7] Gu Dongdong(顾冬冬), Shen Yifu(沈以赴). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2012, 40(8): 32
- [8] Zhang Dongyun(张冬云), Feng Qinghua(冯青华), Li Zhibo(李志波) *et al.* *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2011, 38(9): 30
- [9] Zhang D Q, Cai Q Z, Liu J H *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2011, 20(6): 1049
- [10] Dinda G P, Dasgupta A K, Mazumder J. *Surface & Coatings Technology*[J], 2012, 206(8-9): 2152
- [11] Tan Hua(谭华), Zhang Fengying(张凤英), Chen Jing(陈静) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(8): 1372
- [12] Schwendner K I, Banerjee R, Collins P C *et al.* *Scripta Mater*[J], 2001, 45(10): 1123
- [13] Zhang X D, Brice C, Mahaffey D W *et al.* *Scripta Mater*[J], 2001, 44(10): 2419
- [14] Yu J, Rombouts M, Maes G. *Materials and Design*[J], 2013, 45: 228
- [15] Zhang Yongzhong(张永忠), Shi Likai(石力开), Zhang Pingzhi(章萍芝) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2000, 29(6): 361
- [16] Xie Hang(解航), Zhang Anfeng(张安峰), Li Dichen(李涤尘) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2013, 40(11): 89
- [17] Huang Feng(黄锋), Chen Ruirun(陈瑞润), Guo Jingjie(郭景杰) *et al.* *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2011(7): 90
- [18] Chen Ruirun(陈瑞润), Ding Hongsheng(丁宏升), Bi Weisheng(毕维生) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(4): 510
- [19] ALD Vacuum Technologies GmbH. *Ceramic-Free Metal Powder Production for Reactive and Refractory Metals*[R]. Germany: ALD Vacuum Technologies GmbH, 2011: 2
- [20] Yang M, Dai Y X, Song C J *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(2): 351
- [21] Xiang Qingchun(向青春), Zhou Bide(周彼德), Li Rongde(李荣德). *Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2000, 18(4): 283
- [22] Yang Qiumin(羊求民), Li Songlin(李松林), Yu Yongliang(于永亮) *et al.* *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2011, 21(3): 29
- [23] Dai Yu(戴煜). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Changsha: Central South University, 2008
- [24] Xu Wenyong(许文勇), Li Zhou(李周), Yuan Hua(袁华) *et al.* *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2014, 19(2): 235
- [25] Ouyang Hongwu(欧阳鸿武), Chen Xin(陈欣), Yu Wentao(余文焘) *et al.* *Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2007, 25(1): 53
- [26] Anderson I E, Terpstra R L. *Materials Science & Engineering A*[J], 2002, 326(1): 101
- [27] Beddow J K. *Production of Metal Powders by Atomization*(雾化法生产金属粉末)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 59
- [28] Huang Peiyun(黄培云). *Powder Metallurgy Principles*(粉末冶金原理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 87
- [29] Chang Jian(常健), Lv Hongjun(吕宏军), Yao Caogen(姚草根) *et al.* *Aerospace Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2008(4): 13
- [30] Zdujic M, Uskokovic D. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*[J], 1990, 29(9): 673
- [31] Trybus C L, Verhoeven J D, Schmidt F A *et al.* *Journal of Materials Science Letters*[J], 1988, 7(5): 532
- [32] Savage S J, Froes F H. *Journal of Metals*[J], 1984, 36(4): 20
- [33] Champagne B, Anyers R. *International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology*[J], 1980, 16(4): 359
- [34] Ozols A, Sirkin H R, Vicente E E. *Materials Science & Engineering A*[J], 1999, 262(1): 64
- [35] Hata S, Oki K, Hashimoto T *et al.* *Journal of Phase*

- Equilibria*[J], 2001, 22(4): 386
- [36] Yang Xin(杨鑫), Xi Zhengping(奚正平), Liu Yong(刘咏) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(12): 2251
- [37] Zhang Ying(张莹), Li Shikui(李世魁), Chen Shengda(陈生大). *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 1998, 8(6): 17
- [38] Ye Rongchang(叶荣昌), Long Yi(龙毅), Luo Jun(骆俊) *et al. Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报)[J], 2002, 20(S1): 83
- [39] Du Yanhua(杜艳华), Tian Chunyu(田春雨), Kang Taifeng(康泰峰) *et al. Progress Report on China Nuclear Science & Technology*(中国核科学技术进展报告)[C]. Beijing: Atomic Energy Press, 2009: 232
- [40] Tekna Plasma Systems Inc. *TekSphero Product Line*[R]. Canada: Tekna Plasma Systems Inc, 2014: 1
- [41] Sheng Yanwei(盛艳伟), Hao Junjie(郝俊杰), Guo Zhimeng(郭志猛) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(11): 2033
- [42] Qu Xuanhui(曲选辉), Sheng Yanwei(盛艳伟), Guo Zhimeng(郭志猛) *et al. Materials China*(中国材料进展)[J], 2011, 30(7): 10
- [43] Yuan Jianpeng(袁建鹏). *Advanced Materials Industry*(新材料产业)[J], 2013(12): 19

Fabrication Techniques of Spherical-Shaped Metal Powders Suitable for Additive Manufacturing

Le Guomin, Li Qiang, Dong Xianfeng, Xu Qingdong, Hu Yong, Li Ping
(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Additive manufacturing (AM) process has been a major concern in most countries since 1990s. Powders are the main raw materials for AM, and qualities of powders affect the parts fabricated by AM significantly. Spherical-shaped metal powders are ideal raw materials for AM due to their excellent fluidity, spreadability, and high bulk density. In the present paper, atomization of spherical-shaped powders and spheroidization of powders were presented. The methods such as conventional water/gas atomization, electrode induction-melting inert gas atomization, and plasma rotating electrode process were specified and compared. According to the requirement of metal AM, the trends of spherical powder fabrication technology were also proposed.

Key words: spherical-shaped powders; gas atomization; centrifugal atomization; spheroidization

Corresponding author: Le Guomin, Ph. D., Associate Researcher, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, P. R. China, Tel: 0086-816-3626990, E-mail: leguomin@126.com