

高品质铝粉制备和应用行业进展

■ 文 / 丁夏利¹, 滕柳¹, 李勉¹, 左鹏军², 巨朝飞²

1 陕西科控技术产业研究院有限公司, 陕西西安

2 陕西省机械研究院有限公司, 陕西西安

一、背景

金属球形微粉是增材制造、粉末冶金工业、表面喷涂工艺、三维焊接技术、太阳能浆料、化工催化等制造领域的基础原材料, 高性能的球形金属微粉具有球形度高、粒度分布窄的特点, 使得其在应用于相关领域的制造技术时能够得到质量好、致密度高、尺度精度高、表面均匀且致密度好的金属零件。

金属粉末的制备方法主要包括还原法、电解法、羰基分解法、研磨法、雾化法等。其中雾化法生产的合金粉末被认为是生产高性能球形金属粉末的最佳方法。

1.1 铝粉制备方法概述

雾化法是指通过机械方法将熔融态金属粉碎成尺寸小于 150 μm 颗粒的方法。按照雾化介质和雾化原理的不同可将其分为四类: 水雾化法、气雾化法、等离子雾化法和超声雾化法。水雾化法制备的金属粉末成本低, 但是含氧量较高, 且对于化学性质较为活泼的金属无法进行雾化生产; 气雾化法生产的粉末粒径主要位于 20~150 μm 范围内, 粉末粒度分布范围宽且球形度较差, 如图 1a 所示, 同时粒径分布在 20~60 μm 的球形金属粉末的生产效率较低; 水气联合雾化法结合了水雾化和气雾化的优点, 但是

得到的球形粉末在凝固过程中容易发生粘连, 如图 1b 所示, 使得制粉的成功率下降, 制粉的效果并不理想; 等离子旋转雾化法 (PREP) 可以制备出 70~130 μm 的低含氧量、无粘连高球形度粉末, 但是由于对电极的转速要求较高, 导致无法大量制备粒径小于 45 μm 的高性能球形微粉; 等离子火炬雾化法 (PA) 可制备出高性能、窄粒径的微细球形金属粉末, 依据等离子火炬功率的不同可以得到粒径为 300 μm 左右、15~45 μm 、45~106 μm 的球形粉末。加拿大的 AP & C 公司基于速度 - 跳跃理论的气体分离装置甚至能够分离出更小粒径 (< 5 μm 、< 10 μm 、< 15 μm) 的球形粉末颗粒, 但是由于 PA 技术的细粉收得率仅为 40% 左右, 使得这种方法制备的高性能球形金属粉末价格昂贵, 仍然不足以支撑大规模的工业生产应用。

至今, 雾化制粉的难题主要是制备粉体粒径小于 20 μm 的高性能金属粉末。超声雾化法作为一种新型的雾化技术, 是一种利用超声能量将金属熔体破碎成细小液滴并凝固成粉的先进制造技术, 可以分为接触式和非接触式两类。该技术通过与超声工具头直接或间接接触的方式, 将超声波的能量传递给待雾化液体并进行破碎, 这种制粉技术能够得到球形度较好且粒度分布较窄的球形金属粉末, 同时还具有设备和工艺简单、可控性高、成本低的显著优势。

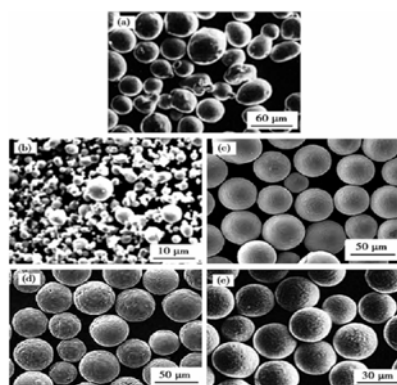


图1 不同方法制备的金属粉末形貌比较：(a) 气雾化法；(b) 水气雾化法；(c) PREP 法；(d) PA 法；(e) 接触式超声雾化法

表1 不同雾化方法制备球形粉特点

对比维度	水雾化 WA	气雾化 GA	等离子雾化 PA/PREP	超声雾化 UA
破碎介质	高压水 20 – 100 MPa	高压惰性气体 2 – 8 MPa	等离子射流 + 气体 / 离心力	20 – 35 kHz 机械振动
冷却速率	$10^5 - 10^6 \text{ K s}^{-1}$	$10^3 - 10^5 \text{ K s}^{-1}$	$10^4 - 10^5 \text{ K s}^{-1}$	$10^3 - 10^4 \text{ K s}^{-1}$
颗粒形貌	不规则、棱角多	高球形 0.8 – 0.95	极高球形 >0.95	高球形 >0.90
平均粒径 D50	30 – 100 μm (可调)	30 – 80 μm	30 – 60 μm (PA) 50 – 200 μm (PREP)	10 – 45 μm
氧 / 杂质	高, 易氧化需还原退火	中, <0.1 wt%	低, <0.05 wt%	低, <0.05 wt%
空心 / 卫星粉	少	常见 1 – 5 %	极少 <0.5 %	极少 <0.3 %
适用金属	钢铁、Ni、Cu 等低活性合金	全合金, 含钛、高温合金	Ti、Zr、Ta 等高活性 / 高熔点	Al、Sn、Zn、Cu 等低熔点
单台产能	100~1000 kg h^{-1}	10~200 kg h^{-1}	5~50 kg h^{-1}	0.5~15 kg h^{-1}
运行成本	最低	中	高 (等离子炬、高纯气)	低 (无高压水 / 气)
设备复杂度	低	中	高	低 - 中

1.2 技术发展背景与意义

近年来, 随着高端制造业的快速发展, 对高性能金属粉末材料的需求日益增长。传统雾化制粉技术在制备微球形铝粉方面存在诸多局限性, 而超声雾化技术的出现为解决这些问题提供了新的技术路径。超声雾化技术在国内的研究起步较晚, 二十世纪 90 年代初, 西北有色金属研究院与陕西师范大学声学研究所合作, 研制出恒载超声雾化制取超细金属粉末装置。经过多年发展, 中国作为最大生产国, 已建成年产 15 万吨雾化铝粉产能, 设备国产化率提升至 82%, 核心参数与德国 ECKA、美国 Valimet

对比各种不同雾化制粉工艺, 虽然超声雾化制备金属粉末粒度分布窄, D50 集中在 10~45 μm 范围内, 但其单台设备产量仅有气雾化 10%~20%, 这是制约超声雾化技术产业化应用的关键瓶颈。传统气雾化技术可通过大规模连续作业实现高效生产, 而超声雾化目前多采用分批作业模式, 且受限于超声波换能器的工作效率、热管理问题以及金属液流的连续供给能力。此外, 接触式超声工具头在长期接触高温熔体时易发生热疲劳和磨损, 限制了设备的连续运行时间与规模化放大, 因此通过对设备升级, 提升超声雾化设备产能是需要攻克的关键技术难点。

等国际巨头差距缩小至 15% 以内。

超声雾化法的核心技术意义在于攻克了传统制粉工艺难以解决的品质痛点, 建立了高端铝粉的全新品质基准。传统空气雾化法、水雾化法生产的铝粉普遍存在颗粒粗大、球形度低、粒度分布不均等问题, 且易因氧化导致氧含量偏高, 无法满足高端应用场景的严苛要求。而超声雾化技术通过高频超声振动引发的空化效应, 将熔融铝液精准撕裂为微米级液滴, 配合惰性气体保护下的快速冷却凝固, 可制备出球形度 $\geq 95\%$ 、氧含量 < 0.1% 的高品质铝粉, 且粒度分布窄 (如 D50 集中在 15~45 μm 范围),

流动性与振实密度显著优于传统产品。

更为关键的是，该工艺实现了铝粉粒径的精准可控，可稳定生产从亚微米级到微米级的全系列产品，甚至能突破传统工艺 $10\mu\text{m}$ 左右的粒径极限，为超细、高纯铝粉的规模化生产提供了技术支撑。这种技术突破不仅填补了国内高端铝粉制备的技术空白，更推动了全球铝粉制备工艺的迭代升级，使铝粉产品从“通用型”向“定制化、高精度”转型成为可能。

超声雾化技术的发展对于推动我国高端制造业具有重要意义。首先，该技术能够制备出高质量的球形铝粉，满足太阳能浆料、3D 打印、航空航天等高端应用领域的需求。其次，相比传统雾化技术，超声雾化具有能耗低、环保性好的优势，符合绿色制造发展趋势。最后，该技术在制备高粘度金属粉末方面具有独特优势，为新材料开发提供了重要技术支撑。

1.3 超声雾化技术关键解决问题

为了突破超声雾化产能瓶颈，推动超声雾化技术的产业化应用，通过对设备进行系统性升级是当前需要攻克的关键技术难点。主要的设备升级路径包括：

①开发大功率多换能器系统：通过集成多个超声波换能器协同工作，扩大雾化面积，提高单次处理量。例如，采用多级超声组件设计，使金属液滴经历多次破碎过程，从而在保证粉末质量的同时提升雾化效率。

②优化热管理与材料耐性：针对工具头热疲劳问题，采用主动冷却系统或耐高温合金材料，并探索等离子辅助加热等方式维持熔滴过热度，延缓凝固，为超声破碎争取更长时间窗口，从而提高细粉收得率。

③工艺耦合与系统集成：将超声雾化与其他雾化技术相结合，形成优势互补。例如，电极感应超声热气体雾化制粉装置将感应加热、超声波破碎与热气体雾化融为一体，通过协同作用显著提升了细粉收得率和生产效率。

综上所述，超声雾化制粉技术虽在粉末质量上优势明显，但其低产能问题严重制约了产业化应用。通过大功率超声系统开发、热管理优化以及多工艺耦合等设备升级路径，有望突破产能瓶颈，使该技术在高端金属粉末制备领域发挥更大价值。

二、超声雾化原理

2.1 接触式超声雾化原理与机制

接触式超声雾化基于 Kelvin 提出的表面张力波理论，该理论认为当外界给予液体能量时，能量集中在液—气表面并形成不稳定的张力波，当这种能量达到能够使液—气表面的振动振幅超出临界值时，液滴将会克服液体的表面张力，由波峰处分离形成雾化液滴。在实际雾化时，往往会在振动的过程中使液体产生强烈的空化效应，对表面张力波的幅值产生周期性的扰动；同时空化气泡形成时会产生很强的微激波，一旦两种机理的综合效应使液体达到雾化的临界值，液体便会被雾化。

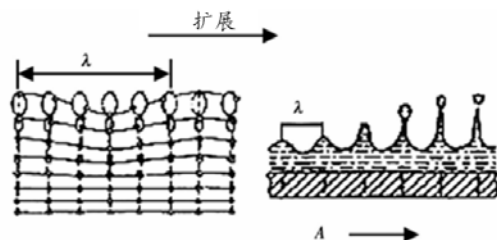


图2 液滴克服表面张力过程

接触式超声雾化装置将待雾化的液体直接输入至超声换能器的工具头表面，使其形成薄液层，薄液层在超声振动的作用下激起表面张力波，当液体表层液滴振幅超过工具头振幅时，液滴便会飞出，被雾化成小液滴。雾化过程中，薄液层厚度的大小对雾化效果的影响很大，这就限制了待雾化液体的质量流速，且限制了雾化速率的提高。

目前关于接触式超声的雾化机制仍存在争议，主要有3种观点：第1种观点认为是由于振头振动触发自由表面液体、薄膜与周围空气界面处形成毛细波波纹，在垂直振动的流体表面出现驻波，当毛细波达到临界振幅时，导致不稳定的波模式进一步分裂为一系列射流，从而发生雾化现象并产生液滴；第2种观点认为空化作用是超声雾化的诱因，当液体中局部压力降至蒸汽压以下时，会产生空化现象，导致气腔的形成和坍塌，液体中气腔内爆会破坏液气界面进而产生液滴；第3种观点认为液体中气泡破裂产生周期性的冲击波导致有限振幅毛细波的形成，进而破裂，产生液滴。

牛津大学 Priyadarshi 等利用原位观察方法揭示了超声雾化的复杂动力学过程，发现空化过程干扰了相边界毛细波，刺穿并破坏边界并发生雾化，强调了空化在接触式超声雾化过程中起到的关键性作用。研究团队通过

高速摄像和超快同步辐射 X 射线成像技术，首次观察并捕获了在雾化静止液滴、液膜和冲击液滴过程中发生的空化现象，发现惯性空化事件干扰了相间边界的毛细波，刺穿并破坏边界产生雾化雾。

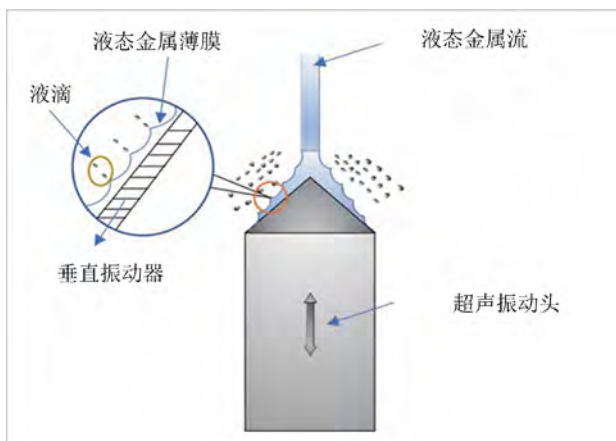


图 3 接触式超声雾化制粉工艺原理示意图

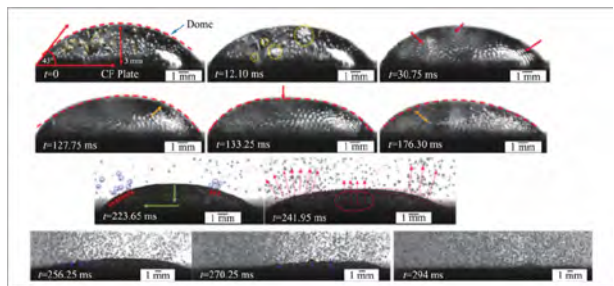


图 4 高速摄像机记录超声振头上静止液滴的破碎过程

2.2 非接触式超声雾化原理与机制

非接触式超声雾化主要是将待雾化液体输入至超声驻波场的声压节点处进行雾化，其原理基于入射波和在距其半波长整数倍处端面形成的反射波多次叠加而成的超声驻波场。非接触式的超声雾化装置主要分为聚焦式超声雾化和超声驻波雾化技术（USWA），前者通常用于农业生产的气雾栽培技术和超精密加工的纳米汽雾冷却系统，后者用于微米级高性能球形金属细粉的制备。

超声驻波雾化技术（USWA）是一种新的工艺，能够雾化高表面能液体和高粘度液体，雾化是通过作用于导入驻波场中心压力节点的液体射流的声学力实现的。该技术起源于超声驻波悬浮技术，这种非接触式雾化的优势在于能够将能量集中在小范围内，从而提高单位体积能量强度的利用率，例如生产微米级的锡粉所需能量只有 0.5kW 左右。

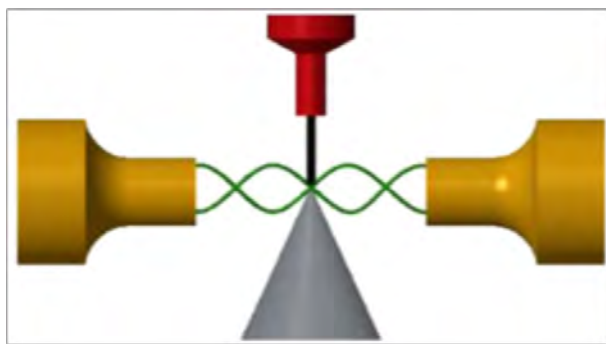


图 5 超声驻波技术示意图

当熔融金属液体以液柱的形式被持续输入至超声驻波声场的声压节点处时，液柱由于声压的作用开始变得扁平，并向气液界面处移动；熔融液体不断由输送管输入圆盘中部，中部的液体又不断向圆盘边缘移动，并在边缘处受到吸力的作用，在径向远离边缘的方向处被破碎成韧带和细小液滴。液体在声场中的破碎很大程度上决定于声场声压级和速度场的分布。此外，非接触式超声对熔体黏度并不敏感，对于一些黏度较大的熔体更为适合。



图 6 高速相机下非接触超声雾化制粉

驻波场的平均总能量密度 E 由公式 $E=1/4\rho_0u^2_{\max}=1/4p^2_{\max}/(\rho_0c^2_0)$ 确定，其中 ρ_0 表示静态气体密度， $u_{\max}$ 表示最大气体速度振幅， $p_{\max}$ 表示纯正弦形驻波的最大声压振幅。由于声学力的作用，液体进料最初以圆柱形射流的形式流动，呈现椭圆形或几乎圆形薄片的形状，液滴在薄片的外围形成并沿径向方向投射。

2.3 超声雾化技术对比

接触式和非接触式超声雾化技术各有其技术特点和适用范围。在制备能力方面，接触式超声雾化技术主要应用于生产低熔点金属粉末，较其他的雾化方法来说可以更高效地生产粒径位于 $20\mu\text{m}$ 左右的窄粒度球形粉末，但待雾化液体对超声工具头的腐蚀会缩短工具头的寿命。非接触式超声雾化技术（USWA）的待雾化液体与工具头无接触的特点使得该技术在熔融合金或其他液体的雾化时存在更多优点，同时在制备粒径位于 $10\mu\text{m}$ 左右的金属粉末时具有较高的粉末收得率和雾化效率。

从技术优势来看，接触式超声雾化的优势在于设备

结构相对简单,操作方便,成本较低,适合小批量、多品种的生产需求。该技术能够通过调节超声振动的频率和熔融金属的流量来精确高效地控制所制备的金属粉末的粒径分布。例如,当熔融金属以适当的速度输入时,20kHz的超声振动频率可以得到粒径分布为30~80 μm 的球形微粉;若将振动频率提高到100kHz,则所得粉末有不少于80%粒径位于 $(20\pm 10)\mu\text{m}$ 范围内。

非接触式超声雾化技术的优势在于能够避免熔融金属与工具头直接接触带来的污染问题,保证了粉末的高纯度和洁净度。这种超强聚集的性能使得USWA技术即使是从较高表面张力的金属溶液或者高粘度液体中,也可以高效率地雾化出粉末粒径小于10 μm 的超细粉末。研究表明,从高粘度熔融体制备金属粉末领域,非接触式雾化技术具备了其他雾化技术无法比拟的优势。

在技术局限性方面,接触式超声雾化技术在生产高熔点以及高腐蚀性金属粉末方面有很大的限制,其主要原因:一是待雾化熔融金属与超声工具头直接接触,会导致制备的金属粉末不纯净,抗污染性与抗氧化性较弱;二是熔融金属对超声工具头的腐蚀会影响超声装置的寿命;三是高性能金属粉末对熔融金属的雾化和凝固过程具有较高的条件限制,使得接触式超声雾化装置在雾化过程中需要对工具头加热以保持其温度稳定在可控范围,这就会在一定程度上导致声学特性的改变。

非接触式超声雾化技术的主要局限性在于技术控制难度大,雾化过程不稳定,产量小(金属质量流率小于1 kg/min),不利于工业化生产。此外,该技术对设备的精度要求较高,需要精确控制超声换能器之间的距离和角度,以确保形成稳定的驻波场。

三、国内外研究现状

与气雾化和等离子旋转电极雾化相比,超声雾化粉末制备既不需要大量高纯气体又不需要驱动棒材转动,若实现大批量制备,生产成本将明显降低。此外,超声雾化具备更强的工艺可控性,可制备的金属材料范围也更宽,具有广阔的发展前景。

3.1 超声雾化制粉设备研究进展

美国MTI公司开发了一种适用于低熔点Li、Al、Mg合金粉末制备的超声雾化装备,超声雾化设备示意图如图3所示。样品在金属容器中被加热熔化,后通过带加热功

能导流管传递到旋转雾化盘上。为了避免金属熔体过快凝固,雾化盘底部同样配有加热装置,在旋转雾化盘上,金属熔体经超声振动而破碎分散,最终落入样品收集托盘中。该设备质量仅150 kg,制备Sn粉末细粉收得率可达70%以上(细粉粒径<70 μm)。

为了进一步提高粉末产率,细化粉末粒度分布范围,瑞士Active ultrasonics公司开发了一种新型振子系统双重超声雾化技术。该装置将超声雾化与张力波雾化有机结合,分两步击碎液态金属,解决了熔体流量不易过大的问题。熔体首先导向管状共振器内,通过张力波雾化被击碎,同时进入同一管的惰性气体中产生非稳态冲击波,进一步被击碎成熔滴,最终可获得粒径低于20 μm 的微细粉末。它的优势之一是开发出了“锤”型超声振子,比传统的两金属块“三明治”振子提高了频率、振幅与相位调制。只要选取适宜的超声参数,对于大多数液态金属都可进行高流速张力波雾化。它的另一大优势是采用了难熔合金管振子,一直到2000 $^{\circ}\text{C}$ 都能保持良好的声学特性,满足润湿要求,保持对熔态金属的耐蚀力。双重超声雾化器在结构上突破了常规超声张力波雾化器振子系统的结构模式,超声雾化器换能器上置,变幅杆与管状共振器采取独特的“T”型对接方式,使得辐射面声强显著增加,减小了液滴粒度,超声脉冲气流可以进一步破碎雾化的液滴,从而得到更加细小的粉末颗粒,在减小粉末粒度和粒度分布区间的同时雾化效率得以显著提高。但是,新型振子双重超声雾化技术目前仍处于封锁阶段,有关其设备组成及关键部件结构设计等具体内容尚未见公开报道,特别是振子系统的材料选择和结构设计是开发该技术的难点,而超声气雾化喷嘴与管状辐射器的在空间上的布置和组装方式也是成功开发该技术的关键。

根据张力波理论,液膜铺展厚度显著影响粉末颗粒尺寸,为促进金属熔体在振动面的铺展,研究人员采取了许多措施改善金属熔液方式,其中德国的Kharitonov等开发出了一种离心流嘴,用于金属超声雾化。熔体以一定流量流经流嘴时,通过涡流离心腔的导流作用,使流出的金属液体形成空心锥结构,螺旋形的流动轨迹加快了金属液体在振动面上的铺展,促进了液体沿四周铺展并促进薄膜的形成,提升了金属熔体在振动器表面铺展的均匀性,与此同时,该设备提升了压电换能器的频率与功率,明显降低了制得金属粉末的粒度,大大提升了粉末收得率。

针对高熔点、高活性金属粉末易氧化、污染的特点,德国 Lierke 等发展了一种非接触式超声雾化,即超声抓波雾化,最突出的优点是可以将动能聚焦到一个很小的体积内,大大提高了能量密度,因而可进行高效雾化,制备窄粒度分布的球形微细粉末,在制备窄粒度分布的微细金属粉末尤其是 10 μm 的粉末方面具有明显优势,并且液流与雾化器不接触,具有节能、低耗和纯净的优点。对于制备平均直径在 10 μm 的锡粉,每公斤约耗电仅 0.5KW.h (不含熔炼)。Endo 等开发了一种紧凑型非接触超声雾化装置,在较低的输入功率下就能获得较高的声压强度,实现熔滴雾化。Uwe 等将多个熔体入口分别放置在不同的超声驻点上,提高了超声驻波能量利用率,提升了超声雾化效率。

Kito Yukio 等人发明了一种等离子超声雾化装置。该装置特点在于把待制粉末的金属棒作为超声的变幅杆负载,连接在变幅杆的输出端,并作为氩弧等离子体发生器的阳极,在等离子体的轰击下,棒的顶端表面熔化,熔化的金属熔液在变幅杆的振动作用下雾化。采用这种方法所制备的 Fe 粉粒度主要分布在 30~100 μm , Cu 粉主要在 20~80 μm , Ti 粉主要在 50~150 μm 。

Sheikhaliev 提出了一种将超声雾化与离心流体雾化结合的复合雾化技术。他开发出了一种离心流嘴,当熔体以一定流量流经流嘴时,通过涡流离心腔的导流作用,使流出的金属液体形成空心锥结构,其螺旋形的流动轨迹加快了金属液体在振动面上的铺展,促进了液体沿周向的铺展和薄液膜的形成。通过与离心雾化技术的结合,超声雾化的雾化能力由 10~20kg/h 提高到了 100kg/h,雾化粉末的粒度由 50 μm 降至 10~30 μm 。该技术已在英国、美国、日本和中国等国家应用投产。

中国在超声雾化制备铝粉技术方面的研究起步于 20 世纪 90 年代初,经过 30 多年的发展,已取得了显著的技术进展。近年来,国内在超声雾化技术方面取得了多项重要突破。国内最早对超声雾化技术进行研究是在 1993 年,西北有色金属研究院与陕西师范大学声学研究所合作,研制出恒载超声雾化制取超细金属粉末装置,开创了国内超声雾化制粉技术的先河,该装置利用超声波能量强化雾化过程,粉末粒度可控制在 10~100 μm 范围内,雾化效率较传统技术提升 40% 以上。随后,1994 年王志刚等人提出超声雾化技术中雾化系统不需要处于稳态,可直接利用声能对流体雾化。研制了一种由阴极、气流环、喷嘴等部分组成的等离子超声雾化器。基于前期研究,吴

胜举等人优化了由阴极、气流环、喷嘴等部分组成的等离子超声雾化器的具体尺寸和参数。制备了平均直径 100 μm 左右的钛金属粉末且粉末球形度及粒度分布较好。2000 年起,北京有色金属研究院在超声雾化设备研制方面开展了大量工作。该院开发的超声雾化装置在制备铝粉等轻金属粉末方面表现出良好的性能,能够制备出球形度高、粒度分布窄的高质量粉末。2002 年张曙光等人利用超声雾化技术制备了 Sn-Pb 合金粉末,对粉末的形貌、粒子分布等进行了微观检测分析,粉末微观形貌图如图 8(a) 所示。清华大学材料学院团队研究表明,气雾化工艺中将雾化压力提高至 6 MPa 并配合超声振动装置,可使 10~45 μm 细粉收得率提升 22%。但目前和国际先进水平仍存在差距。相较于气体雾化 (GA) 和等离子旋转电极雾化 (PREP) 制粉设备,UA 装置体积较小,设计灵活性较高。2017 年哈工大高胜东课题组利用接触式超声雾化制备了纯锡粉末,粉末微观形貌如图 8(b) 所示,通过改变超声换能器布局,将 2 个主超声换能器周围设置多个辅助换能器提升了超声驻波雾化效率。哈工大王洪森对超声雾化设备发生部分、进料部分、粉末收集部分及雾化密封部分进行了设计并基于压磁比拟原理对磁致伸缩换能器供电线圈部分进行仿真分析,将超声驻波场用于非接触雾化的超声驻波雾化方法提高超声雾化制粉效率。

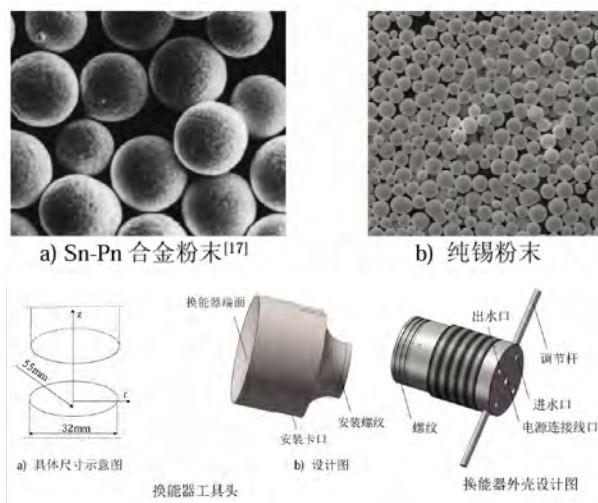


图 8 超声雾化制备金属粉末与设备改造设计图

3.2 超声雾化制粉工艺研究

超声雾化法制备的粉体平均粒径比气雾化法更细,粒径分布更窄,具有更高的球形度和更低的孔隙率。在粉末物性方面,堆积密度更高、流动性更好,且粉末氧含量更低。

对于接触式超声雾化法技术而言,Avvaru 等研究了

不同黏度的水溶液和显示牛顿行为和非牛顿行为的液体在超声雾化过程中的破碎行为,发现液滴尺寸最初随着黏度的增加而增大,直至达到某个阈值黏度后,液滴尺寸再次减小。随着雾化液体黏度增加,液滴分布更加紧凑。Wisutmethangoon 等利用超声波雾化器生产 SAC305 粉末,发现粉体中值粒径及粒度分布范围随着熔体温度升高而降低、而随着振动幅度、进料速率增加而增加,当腔室内氧含量降低时,粉末变得更圆。此外,随着振动频率的增加,雾化介质单位时间吸收的能量增加,导致表面张力波波长减小,产生更多波峰位置,能够减小粉末粒径,并增加超声雾化粉末产率。国内研究人员在接触式超声雾化工艺技术进行了深入研究。通过合理优化工具头形状,可大幅提升声压强度,提升液滴雾化破碎效果。与接触式超声类似,提高振头的振幅和频率能够提升驻波声场声压振幅和能量密度,有利于生产更加微细的粉末,但过高的频率可能导致驻波稳定性下降,导致声能衰减。

对于非接触式超声雾化法技术,液滴破碎主要动力是气动力与声压,如何设计超声振头间的声场是决定雾化效率的关键,影响振头间声场分布的参数主要包括振动频率、振幅大小、环境温度、环境气体压力及超声振头相对位置与形状。郭思琪建立了双发射端、球面端面工具头激励下的超声驻波场模型,发现通过合理优化工具头形状,可大幅提升声压强度,提升液滴雾化破碎效果。与接触式超声类似,提高振头的振幅和频率能够提升驻波声场声压振幅和能量密度,有利于生产更加微细的粉末,但过高的频率可能导致驻波稳定性下降,导致声能衰减。增加雾化室的气体压力能够提高声压作用与气动效应,加速熔融液滴破碎。此外,液流控制至关重要,当较多的熔体进入超声驻波场时,会导致液膜破碎不均匀而产生较大液滴,因此,通常需使用较细导液管配合熔炼室正压驱动以实现稳定供液。

3.3 超声雾化设备产业化研究

根据超声波雾化市场调研报告显示,2025 年全球超声波雾化喷雾设备市场价值将达到 4.87 亿美元,预计将以强劲态势增长,这一增长得益于各行业不断增长的需求。从 2025 年到 2033 年,该市场的复合年增长率将达到 4.5%,这表明其将有显著扩张,主要由纳米材料在各种应用中的日益普及所推动,特别是在新能源技术和生物医学领域。与传统喷雾方法相比,超声波雾化所提供的精度和效率是关键驱动因素。此外,半导体制造业的进步也推动

了市场的增长,该行业需要高度可控和精确的沉积过程。该市场按应用(纳米材料与新能源、生物医学、电子、半导体、其他)和设备类型(台式、落地式)进行细分。虽然每个细分市场的具体贡献未明确指出,但可以合理推测,纳米材料和新能源领域,以及半导体行业将是推动市场增长的主要因素,因为它们的技术上高度依赖于精确的雾化。预计其地理分布将会十分多样化,北美和亚太地区可能会占据领先地位,因为它们拥有强大的技术基础设施以及在相关领域进行了大量的研发投入。然而,其他地区的新兴经济体预计在未来几年内将会有更高的采用率,从而扩大市场的覆盖范围。

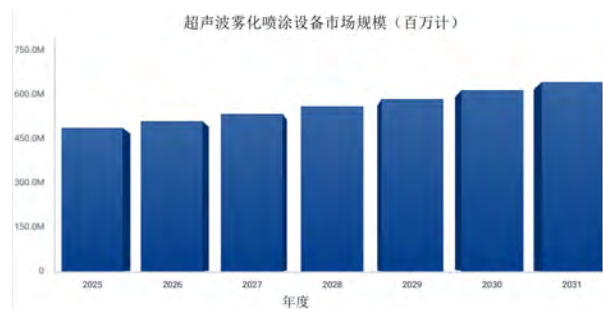


图9 超声波雾化喷涂设备市场规模

全球超声波雾化喷雾设备市场每年的产值达数百万台,呈现出集中但充满活力的格局。像森托克公司和超声系统公司这样的主要企业占据了较大的市场份额,尤其是在半导体制造和生物医学应用等高端领域。然而,国内已建成较为完整的超声雾化制粉装备产业链,包括杭州泛索能、北京金荣超声,和杭州驰飞、信为新材料等,正在迅速扩大其业务范围。

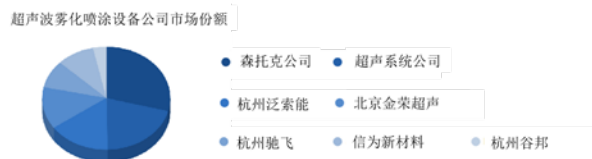


图10 全球超声雾化设备市场占比

杭州泛索能超声科技有限公司自2018年成立以来,已发展成为超声波雾化制备金属粉末技术领域的重要企业之一。该公司专注于将超声波技术应用于工业制造环节,其核心技术成果是一种高效、节能的金属粉末制备解决方案。该公司开发的核心设备,如FS-X403DL超声波锡雾化金属制粉系统,其创新点在于取消了传统工艺中金属熔液的输送和滴液步骤,通过将锡锅加热与超声波工具头直接结合,显著降低了能源消耗。同时,旋转升降机构实现了锡锅的连续替换,适应了工业化连续生产的需求。该技术已获得国家实用新型专利授权。



图 11 杭州泛索能设备图像

信为（深圳）新材料有限公司推出了实验室超声雾化制粉设备，该设备利用超声波的高频振动，使金属熔液在惰性气体保护下迅速凝固成球形粉末，这种工艺不仅能够精确控制粉末的粒度分布，还能有效降低粉末中的氧含量，提高粉末的球形度和流动性。

上述超声雾化喷雾设备市场使用场景不仅局限与球形粉末制造，如杭州驰飞还涉及涂层喷涂、前驱体喷雾合成等应用领域。但所生产的可以用与制备金属粉末的设备大部分仍停留在实验室用设备上，未实现产业化。

中国已形成了以长三角、珠三角、环渤海为核心的雾化铝粉产业集群。这些地区集聚了大量的生产企业、科研机构及配套服务企业，形成了完整的产业生态系统。特别是在新能源汽车、航空航天、3D 打印等高端应用领域，国产超声雾化铝粉已开始逐步替代进口产品。中国超声雾化铝粉产品的技术水平和质量已接近国际先进水平。核心参数与德国 ECKA、美国 Valimet 等国际巨头的差距不断缩小。

四、铝粉材料市场发展与应用

超声雾化法制备的高品质铝粉，为下游高端产业的发展提供了核心材料保障，成为连接基础材料与高端制造的关键纽带。在增材制造领域，传统铝粉因球形度差、流动性不足，难以满足激光选区熔化、电子束熔融等精密成型工艺的要求，而超声雾化铝粉凭借优异的成型性能，成功破解了 3D 打印铝基部件的材料瓶颈，广泛应用于航空航天精密结构件、汽车轻量化定制部件等领域，推动增材制造产业从原型制造向规模化量产升级。在新能源领域，超声雾化制备的高纯铝粉作为锂电池负极导电剂、储氢材料的核心原料，可显著提升电池能量密度与循环稳定性，助力新能源汽车产业的技术突破；在航空航天领域，其低氧、高球形度的特性使其成为火箭推进剂燃料添加剂、航空发动机热喷涂涂层的理想材料，为国防装备升级与民用航空产业化（如 C919 大飞机量产）提供了材料支撑。

此外，在电子工业导电浆料、生物医疗植入物等新兴领域，超声雾化铝粉的应用也正在不断拓展，激活了多个千亿级市场的发展潜力。

受益于下游高端制造业的快速发展，全球雾化铝粉市场规模持续扩大，2019~2025 年复合年增长率约为 8%，预计 2030 年将达到 45 亿美元。其中，超声气雾化制铝粉作为高端雾化铝粉的核心细分品类，占整体雾化铝粉市场份额逐步提升，2023 年约占气雾化铝粉市场的 25%，对应市场规模约 13.75 亿元（基于 2023 年中国雾化铝粉市场规模 55 亿元、气雾化工艺占比 58% 测算）。

中国在超声雾化制备铝粉技术的产业化应用方面已取得显著成就。根据中国有色金属工业协会 2024 年发布的《中国粉末冶金技术发展白皮书》显示，平均粒径控制在 5~15μm 的高球形度雾化铝粉产品占比从 2021 年的 43% 提升至 2023 年的 58%，氮气雾化法制备工艺渗透率突破 72%，推动产品附加价值增长。这一数据表明，国内在微细球形铝粉制备技术方面已取得了实质性进展，产品质量和生产效率都有了显著提升。在市场规模方面，预计到 2025 年，中国雾化铝粉市场总规模将达到 110 万吨左右，而至 2030 年，这一数字有望达到近 145 万吨，在全球市场份额中的占比将进一步提升。从应用领域来看，铝粉在锂电池负极材料、光伏导电浆料、军工复合材料等领域的渗透率逐年提升，其中新能源领域的需求占比预计将从 2025 年的 35% 提升至 2030 年的 45% 以上。

4.1 铝粉材料市场发展概况

目前，我国微细球形铝粉生产企业主要有有研粉材、河远洋粉体、长沙族兴、中体新材、鞍钢实业等企业。

(1) 有研粉材

有研粉材专注有色金属粉体材料领域，是国内铜基金属粉体材料和锡基焊粉材料领域的龙头企业，先进铜基金属粉体材料产品的国内市场占有率约 35%，排名国内第一，2019 年总销量排名全球第二，公司高端微电子锡基焊粉材料的国内市场占有率在 15% 以上，排名国内第一。公司积极拓展产品应用领域，推进国内外产业布局，先后整合了康普锡威、有研重冶、英国 Makin 等公司，积极构建重庆、安徽、山东等国内区域性产业基地以及英国、泰国等国际产业基地。公司及全资子公司康普锡威与钢研投资有限公司合作，整合 3D 增材制造及高温特种粉体材料业务板块相关资源，新设立控股公司有研增材，打开新

成长空间。

公司及全资子公司康普锡威与钢研投资有限公司合作设立有研增材布局 3D 增材制造及高温特种粉体材料业务，3D 增材粉体材料布局产能 500 吨，主要包括铝合金粉末（200 吨）、高温合金粉体材料（200 吨）、钛合金粉末（75 吨）以及铜合金粉末（25 吨），高温特种粉体材料产能规划 2000 吨，主要包括软磁粉末、MIM 粉末、真空钎焊粉末等。3D 增材产线目前产能已建成，跟随市场需求逐步放量。3D 打印市场发展迅速，全球 3D 打印市场规模 2021 年约 150 亿美元，预计 2025 年将达到近 300 亿美元，2021-2025 年 GAGR 为 18.2%；2021 年国内 3D 打印市场规模约 260 亿元，预计到 2024 年达到 500 亿元，2021-2024 年 CAGR 为 24.4%。3D 打印材料在整体 3D 打印市场中份额占比约两成，将受益整体行业成长。

康普锡威从成立以来始终坚持自主研发和技术创新，参与多项与焊料相关的国家和行业标准的制 / 修订。该公司创新开发的领先技术材料和产品主要包括系列微电子互连用精细合金焊粉、LF143 系列低温无铅焊料、LF516 系列高可靠无铅焊料等。其中，获批国家第七批制造业单项冠军产品的“微电子互连用精细合金焊粉”，是以公司先进的球形金属粉末雾化制备技术为支撑，凭借球形度高、粒度分布窄、氧含量低、产品质量稳定等特点，广泛应用于消费电子、智能终端、Mini-led 等领域，可批量供应 T6、T7、T8、T9 等规格的超细焊粉。

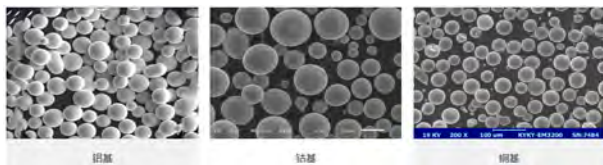


图 12 有研粉材 3D 打印粉末 SEM 图

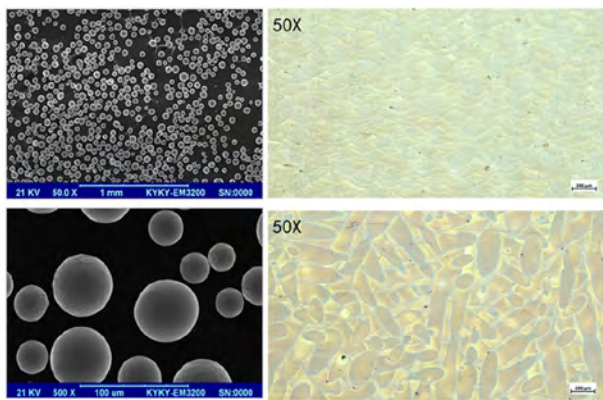


图 13 康普锡威高品质球形铝粉与 3D 打印样件表面形貌

(2) 中体新材

中体新材完成增材制造用铝合金粉全智能化产线集群建设，新增 6 条产线调试后 9 月初将正式投产，公司增材制造 LPBF 段（20-63 μ m）高球形铝合金粉年总产能将达 1500 吨，居行业前列，中体新材在 3D 打印金属粉末领域实现规模化、智能化、绿色化生产升级。

中体新材自主研发的新型雾化工艺 AMP（先进气雾化）生产线，通过优化工艺与产线布局，粉末品质和生产效率较传统气雾化工艺均实现了大幅提升。

中体新材粉末关键指标性能优异：高球形度 $\geq 92\%$ 、低氧含量 ≤ 350 ppm、松装密度 $\geq 1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ；卫星粉少、流动性好，适配各主流 3D 打印设备，受海内外增材制造客户广泛认可和推崇。

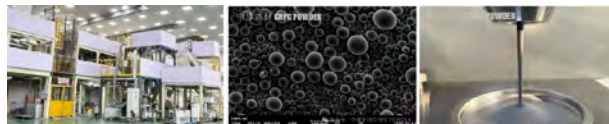


图 14 中体新材设备与粉末图像

(3) 长沙族兴新材料股份有限公司

长沙族兴新材料股份有限公司成立于 2007 年，总部位于长沙市宁乡高新区，是一家专注于有色金属功能粉体材料研发、生产与销售的高新技术企业，2025 年 12 月成功通过北交所 IPO 审核。公司核心产品为微细球形铝粉与铝颜料，年产能达 25,000 吨，主要用于铝颜料、太阳能电子浆料、军工航天、半导体氮化铝等战略新兴领域。

公司核心技术为微细球形铝粉制备技术，通过氮气雾化制备技术，形成封闭系统，确保高效安全，并自主研制高精度超音速雾化器及喷嘴，攻克了氮气雾化铝粉系统粘结难题细粉收率（D50 小于 7.5 微米）大于 65%，已实现规模化生产。产品具有球形度高、粒径分布窄、振实密度高、氧化程度低等特点，品质达到国际先进水平。公司还拥有 46 项发明专利，主持制定多项行业标准，产品已替代德国、日本等进口品牌并出口至 60 多个国家和地区。

公司子公司曲靖华益兴掌握全面的微细球形铝粉制备领域核心技术并具备规模化生产能力，能够满足包含新兴应用领域在内的产品需求。公司主要采用铝纯度 $\geq 99.85\%$ 铝水作为原材料，通过氮气雾化法和多联精细分级技术生产的微细球形铝粉球形度更好、粒度分布更

集中，粒径误差较小，符合行业发展趋势。相较于部分同行业公司可比公司，公司掌握了应用于电容器积层电极箔、半导体氮化铝行业的高纯铝粉制备技术，以及用于核废料处理产品的表层氧化铝晶型结构转化技术。公司掌握的铝粉包覆技术路径和材料体系较同行业公司可比公司更加全面，包括干包和湿包两种技术路径，以及有机包覆、无机包覆等多种材料体系的包覆方法，应用领域已拓展至热传递、稀贵金属还原剂和军工等应用领域，符合行业发展趋势。根据中国有色金属工业协会铝业分会统计数据，2024 年中国和全球微细球形铝粉产量分别为 10.3 万吨和 15.5 万吨，按产量测算，公司子公司曲靖华益兴国内外的市场占有率分别为 21.47% 和 14.27%。

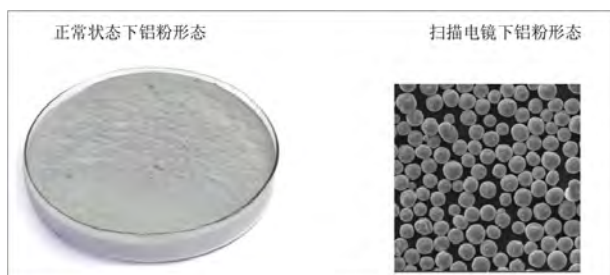


图 15 长沙族兴雾化制备铝粉光学图像与微观形貌

(4) 远洋粉体

河南省远洋粉体科技股份有限公司（以下简称“远洋粉体”）是国内专注于铝合金及其他有色金属粉体研发与生产的专业化企业。公司以雾化法制粉技术为核心，尤其在气雾化及超声雾化制备高性能球形铝合金粉末领域形成了显著特色，是国内该细分市场的重要供应商之一。其产品广泛应用于增材制造（3D 打印）、粉末冶金、热喷涂等先进制造领域。公司持续投入研发资源，优化气雾化与超声雾化工艺，致力于提升铝合金粉末的球形度、降低氧含量、控制粒度分布，以满足航空航天、新能源汽车等领域对高端粉体的苛刻要求。围绕市场需求，有序规划并建设高端铝合金粉末（如 AlSi10Mg、AlSi12、高强铝合金等系列）的专用生产线，旨在提升高品质粉体的稳定供应能力。同时公司紧密对接下游产业升级需求，特别是将 3D 打印与粉末冶金作为核心应用方向进行拓展，为客户提供定制化的粉末解决方案。

公司积极把握增材制造产业机遇，将高端 3D 打印用铝合金粉末的研发与生产作为核心增长点。通过自主研发，其铝合金粉末产品在流动性、松装密度、低氧含量等关键指标上实现突破，能够适配激光选区熔化（SLM）等

技术，满足复杂精密零部件的制造要求。规划与建设中的相关产能，旨在服务于快速增长的工业级 3D 打印市场，成为国内该领域材料供应链的重要一环。全球及国内 3D 打印市场持续高速增长，作为 3D 打印产业链上游的关键材料，金属粉末特别是铝合金粉末的需求旺盛。铝合金因其轻质、高比强度等优点，在航空、航天、医疗、汽车等领域的增材制造应用中前景广阔。远洋粉体聚焦于此赛道，有望直接受益于下游行业的规模扩张与技术迭代。

远洋粉体在雾化法制备铝合金粉末方面积累了扎实的工艺技术。公司通过工艺控制，掌握了从熔炼净化、雾化介质控制、粒度分级到后处理的全流程关键技术，能够稳定生产高球形度、低含氧量、低空心粉率的铝合金粉末。并且已开发出适用于不同性能需求（如高强度、高导热、高延伸率等）的多种铝合金粉末牌号，实现产品系列化。同时积极与高校及科研院所合作，参与相关材料标准的研讨与测试，推动技术创新与成果转化。

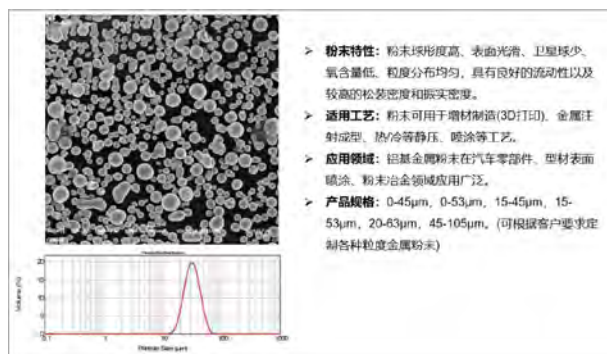


图 16 远洋粉体球形粉形貌与特性

(5) 鞍钢实业

鞍钢实业微细铝粉有限公司为鞍钢集团旗下专业铝粉生产企业，是国内较早从事微细球形铝粉工业化生产的企业之一，在雾化法铝粉制备领域具有深厚的技术积累。公司依托鞍钢集团的资源优势与技术平台，专注于微细球形铝粉及铝合金粉末的研发与生产，产品主要应用于铝颜料、太阳能电子浆料、3D 打印增材制造、军工航天及半导体氮化铝等高端领域。

公司积极布局 3D 打印增材制造领域，其生产的球形铝合金粉末 3D 打印材料已实现稳定供货。目前微细球形铝粉年产能约 5000~10000 吨，其中铝合金粉末（含 3D 打印用铝基金属粉）产能占比逐步提升。3D 打印市场正处于高速增长期，全球市场规模预计 2025 年将达到近 300 亿美元，国内市场规模 2024 年有望突破 500 亿元，

2021~2024 年复合增长率达 24.4%，公司铝基 3D 打印粉末材料将直接受益于这一行业增长。

公司掌握先进的氮气雾化与空气雾化制备技术，产品具有球形度高、氧含量低、粒度分布窄、流动性好等特点。其开发的 3D 打印专用铝基合金粉末（如 AlSi10Mg 等牌号）已成功应用于航空航天零部件制造、汽车零部件轻量化及电子产品散热结构件等领域，可稳定供应 15~53 μm 、53~150 μm 等粒径区间的专用粉末，产品质量达到进口替代水平。公司持续进行技术升级，在雾化喷嘴设计、熔体温度控制、分级收集等关键工艺环节拥有自主知识产权，产品性能与进口品牌相当，部分指标优于市场同类产品。

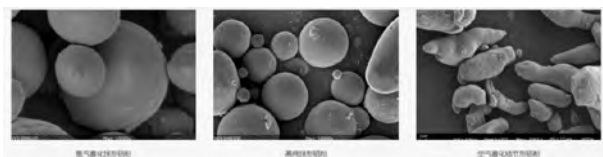


图 19 鞍钢实业不同铝粉微观形貌

4.2 铝粉材料市场应用概况

应用领域是驱动市场规模增长的核心维度，其中航空航天、汽车制造是两大核心应用领域。2022 年数据显示，航空航天领域占比最高达 45%，对应全球市场规模约 1.26 亿元人民币（按 2022 年全球铝合金粉末市场规模 45 亿美元推算，其中增材制造用铝合金粉末约占 6.2%），主要用于飞机发动机支架、舱内结构件等关键部件制造，波音 787 Dreamliner 飞机超 50% 的铝合金部件采用增材制

造技术；汽车制造领域占比 35%，对应规模约 0.98 亿元，新能源汽车的快速发展推动电池托盘、电机壳体等铝合金部件需求增长，2022 年全球新能源汽车产量中约 40% 的车型采用增材制造铝合金部件；医疗器械领域占比约 12%，对应规模约 0.34 亿元，主要用于骨科植入体等定制化产品；工业机械及其他领域占比约 8%，对应规模约 0.23 亿元。

综合来看不难发现，目前国内生产球形金属粉体的企业大多用的还是气雾化工艺，主要用于增材制造领域。这是由于气雾化的产量大且其在 40~75 μm 粒径的收粉率可以达到 $\geq 50\%$ ，恰好满足增材制造所用粉末粒径要求范围，且增材制造所用球形粉体往往需要不同粒径级配以减少缺陷产生，因此对小粒径收分率需求不高。然而，针对高端涂料、电池负极材料、光伏导电浆料这些领域，往往需要使用小粒径球形粉，但受制于产量影响，目前主要产业化生产小粒径球形金属粉体的厂商不多。

未来，受益于金属增材制造产业的持续成熟与应用领域拓展，增材制造铝合金粉末市场将保持高速增长态势。据预测，全球增材制造铝合金市场规模将以 9.08% 的年复合增速增长，2030 年达到 4.01 亿元人民币；若按金属粉末整体市场占比推算，2030 年全球 3D 打印铝合金市场规模将突破 50 亿美元，其中高性能铝合金粉末占比将达到 65% 以上，对应规模超 32.5 亿美元。长期来看，2032 年全球市场规模有望进一步增长至 5.26 亿元人民币，年复合增长率维持在 9.37%。

作者简介：

丁夏利，高级工程师，2021 年博士毕业于西安交通大学材料科学与工程专业。曾任职于中国航天科技四院，现任职于陕西科控技术产业研究院，主要从事光电磁功能性复合材料应用开发。现为中国增材制造产业发展联盟专委会青年委员，陕西省青年科技新星，西安市地方级领军人才，兼任西安交通大学研究生校外导师，陕西省丝路创客协会科技创新导师等。获陕西省卓越工程师大赛二等奖和中国化学创新奖等。