

钛合金球形粉末制备技术研究进展

Research Progress in Preparation Technology of Spherical Titanium Alloy Powder

供稿|曹磊, 赵文天, 张会华, 马国楠, 朱金玉 / CAO Lei, ZHAO Wentian, ZHANG Huihua, MA Guonan, ZHU Jinyu

内容导读

得益于金属增材制造技术(3D打印)的快速发展,用于航空航天及生物医疗领域的增材制造钛合金构件已成为世界各国关注的研究热点。作为金属增材制造的主要原料,球形钛合金粉末的制备方法与性能直接影响最终构件的质量。本文系统地综述了气雾化法(GA)、等离子旋转电极雾化法(PREP)、等离子体雾化法(PA)3种主流球形钛合金粉末制备工艺近年来的国内外最新研究成果,分析了其对未来行业发展的影响及现阶段的不足,并对钛合金球形粉末制备技术的未来发展前景进行了展望。

目前,增材制造技术(3D打印)发展势头迅猛,其具有的高纯净度、高精度的加工性能以及对复杂构件优良的一体成型性受到世界各国的青睐,是当下新兴且备受关注的研究重点^[1]。钛合金是一种具有高比强度、高耐腐蚀性和高耐热性的有色金属合金,具有良好的生物相容性,被广泛应用于航空航天和生物医疗领域^[2]。钛合金的加工性能较差,使用传统的铸、锻、焊成型方法存在加工成本高、良品率低等缺点,尤其在构件形状相对复杂的条件下很难进行高效率加工生产,这极大地制约了钛合金材料应用领域的进一步扩大。近年来,得益于增材制造技术的快速发展,采用高性能钛合金粉末为原料的增材制造技术为高精度钛合金构件生产提供了

一种全新的思路^[3]:由于钛合金具有良好的热塑性和可焊性,可通过激光或电子束熔化逐层堆积的钛合金粉末并将其凝固成型,在计算机的控制下逐层加工,最终获得一体化成型的钛合金构件,且不受构件形状结构的制约,可用于各种复杂形状构件的生产。作为该技术中的原材料,钛合金粉末的质量直接决定了最终成品的质量与性能。不同于传统的金属粉末,增材制造用钛合金粉末需具有一定的球形度、合适的粒度分布以及较低的氧氮含量^[4]。目前,应用于增材制造的球形钛合金粉末的制备技术^[5]主要有气雾化法(GA)及其衍生技术等离子旋转电极雾化法(PREP)、等离子体雾化法(PA)等。

得益于增材制造产业的飞速发展,球形金属粉

作者单位:中国兵器科学研究院宁波分院,浙江 宁波 315000

末制备技术也取得了阶段性突破。与此同时,随着计算机技术的发展与计算能力的不断提升,计算流体力学(CFD)技术在科研试验中发挥着越来越重要的作用,尤其对于粉末气雾化等常规实验手段难以表征或在线监测的实际过程,数值模拟技术可以再现这一过程^[6]。通过构建几何模型、设定求解模型和边界条件、运行计算并分析,从而实现对实验过程中各种物理量(如温度、速度、压力等)的预测与分析^[7]。近年来,研究人员借助CFD技术对制备技术的破碎机理及工艺优化等方向进行相关研究,推动高质量、低成本球形钛合金粉末制备技术的进一步发展。本文主要综述了近年来GA、PREP、PA 3种制备方法在数值模拟等先进研究方法支持下,关于破碎机理及工艺技术结构参数优化的研究进展,并介绍了基于3种制备方法开发试制的新型合金球形粉末工艺技术。

气雾化法研究进展

GA作为目前制备球形钛粉的主流技术,低廉的加工成本及相对成熟的制备工艺是其具有较高市场占有率的重要优势。GA制备的粉末拥有较宽的粒度分布范围,经筛分后可满足各类增材制造设备的使用需求,是目前金属增材制造产业原材料供应链的中坚力量。但受雾化机理的制约,GA制备的球形粉末空心率和卫星粉率较高,易产生空心粉及卫星粉等缺陷,限制了该工艺的进一步发展^[8-9]。

GA经过长期发展,衍生出电极感应熔炼气雾化法(EIGA)、真空感应熔炼气雾化法(VIGA)^[10]等多种衍生技术。EIGA解决了传统GA因使用加热坩埚造成的夹杂物污染问题,通过无坩埚加热方式减少了杂质的引入,保证了金属液的纯净度,是目前工艺成熟稳定的主流钛合金制粉技术。VIGA是在真空度 $<2.5\times 10^{-2}$ Pa的环境下对原料进行感应熔炼,通过真空熔炼在一定程度上避免了熔炼环境中杂质对金属熔液的污染;冷坩埚感应熔炼气体雾化(VIGA-CC)在真空熔炼基础上进一步改进,采用水冷铜坩埚防止了高温下坩埚对金属熔液的二次污染。VIGA设备具有高度柔性化特性,可制备钛合金、高温合金及各类铝合金等粉末。相较于EIGA,

VIGA所制备的粉末拥有更宽的粒径分布,并能完成大容量金属粉末的制备;目前VIGA在球形钛粉市场的占有率较低,未来有望成为工业化生产大容量金属粉末的主力设备^[11]。

GA几种衍生技术的雾化及熔滴破碎机理无明显差异,均由高速惰性雾化气流提供熔滴破碎的动能,主要区别在于金属原料的熔炼方式不同。EIGA以无坩埚熔炼方式保证了金属液的纯净度,且采用棒料供给方式,尤其适用于钛合金这类加工性能较差的金属。钛合金棒料具有加工成本低、供应充足稳定等优点,有利于批量大规模生产,因此EIGA是目前增材制造钛合金球形粉末生产的主要技术。增材制造用球形粉末的适宜粒度主要为15~53 μm ,EIGA制备的粉末具有较宽的粒度分布,粒度 $<53 \mu\text{m}$ 的细粉收得率占比可达60%~70%,是目前最适于钛合金粉末生产的制备技术。本章主要以EIGA为GA的代表衍生技术,介绍近年来EIGA在钛合金球形粉末制备方面的研究进展。

雾化工艺优化研究进展

熔炼功率与雾化压力是决定GA成品粉末质量的主要因素,目前EIGA技术主要通过改变熔炼功率和雾化压力的组合控制成品粉末的形貌,并提高雾化效率。杨启云等^[12]研究了不同雾化压力对EIGA制备的TC4合金粉末性能的影响,发现在有限的压力变化范围内,随着雾化压力升高,粉末的粒度分布逐渐变窄。蒋保林等^[13]研究了雾化压力和熔炼功率对粉末粒径分布及形貌的影响规律,发现当雾化压力增加至5.0 MPa时,粉末收得率开始降低。Chen等^[14]采用转速5.5 r/min、进料速率39.0 mm/min、伸管长度2.0 mm、功率60.0 kW、雾化压力5.5~7.0 MPa的优化工艺,制备了球形度达98%的球形TC4粉末,其相组成为 α - β 钛单相固溶体,粒径分布1~150 μm ,平均粒径49.5 μm ,其中适用于增材制造的粉末占比为72.9%,空心粉比例3.0%,氧质量分数0.106%。陈嘉璐等^[15]通过系统性协调实验,提出了一套优化的EIGA工艺参数:熔炼功率60 kW、旋转速度5.5 r/min、给进速率650 $\mu\text{m/s}$ 、喷嘴伸出长度2 mm、雾化气压6 MPa。该参数下制备的金属粉末可满足激光直接沉积增材制造的用料需求。

熔炼功率决定了单位时间内熔化的金属熔滴量及其过热度,进而影响了熔滴的球化时间;雾化压力决定了单位熔滴所受冲击能量的大小。研究表明,单位体积熔滴的过热度越高、受冲击能量越大,制备粉末的细粉收得率越高。但不同的参数组合对粉末的粒度分布与形貌等特征的影响并不相同:过高的熔炼功率易导致熔滴破碎不完全,过高的雾化压力则会导致空心粉、异形粉等缺陷的产生。因此,在实际生产中,需依据设备的实际情况,在满足较高的粉体质量与细粉收得率的前提下,通过优化各参数的组合以提高粉末产量。目前,EIGA已较为成熟,各主要粉末生产厂商均形成了各自成熟的工艺优化方案,进一步提升粉末性能及生产效率的优化空间已进入相对有限的阶段。

雾化机理研究进展

雾化过程是典型的瞬时发生且极不易观察的物理过程,自雾化法发明以来,一直缺少合适的基础理论支撑;雾化机理是雾化技术制备粉末的最本

质、最核心的物理现象,对于雾化法的长远发展具有重要意义。近年来,借助CFD和高速摄影技术,雾化机理的相关研究取得了突破性进展。

Qaddah等^[16]建立了基于雷诺兹-平均Navier-Stokes(RANS)方法的涡旋超音速惰性气体射流模型,研究了喷嘴出口狭缝尺寸和雾化室过压对旋流气流的影响,并描述了旋转气体流通过EIGA喷嘴及其下游的行为。仿真结果表明,喷嘴产生的气流形成了一个由多个马赫环组成的强不对称旋转射流。增大喷嘴出口狭缝尺寸会显著增加涡流数,导致雾化塔中气体喷射的不对称性加剧;同时,狭缝尺寸影响雾化区域的马赫环结构,如图1所示,当狭缝尺寸由0.6 mm增加到0.8 mm时,每个马赫环中最大马赫数增加约10%。该研究通过模拟旋转气体流经喷嘴及其下游的行为,预测雾化气体压力的增加、喷嘴出口狭缝尺寸的增大、熔化室中过压的减小等,均有利于产生更细的粉末。

Zou等^[17]采用数值模拟和实验相结合的方法,研究了雾化压力、补充气体压力和喷嘴通道扩散角

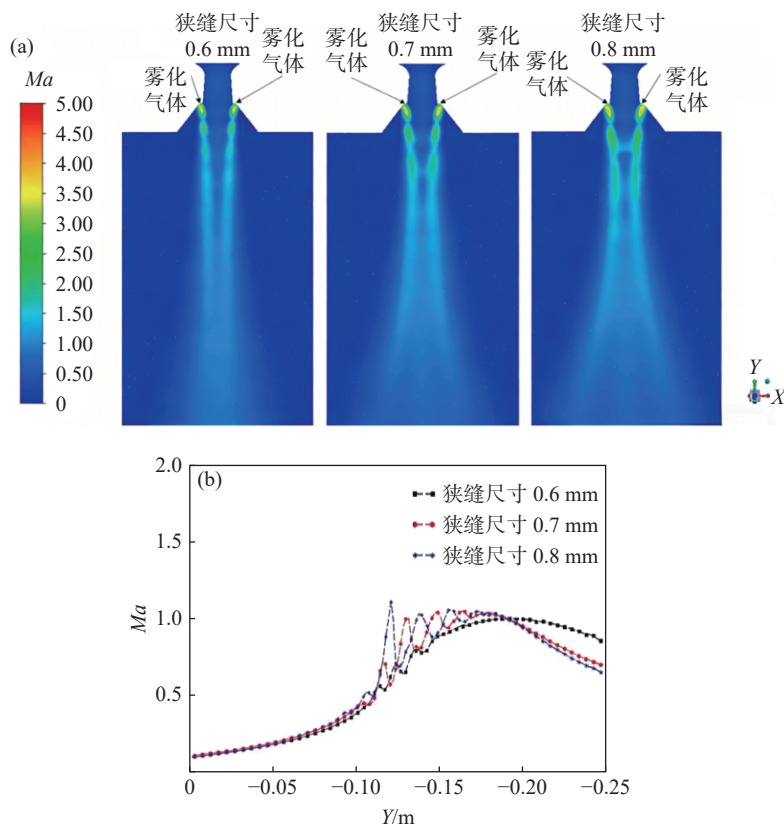


图1 3种不同狭缝尺寸在XY平面上流动马赫数的分布(a)和沿对称轴的流动马赫数(b)^[16]

对 TC4 不连续液滴预破裂行为的影响。研究结果显示,在滞止点之前的回流区,轴向速度分布总体呈先增加后减小再显著增加的趋势,回流区的压力随进气压力的增加而增加。随着补充压力(熔炼室向雾化室方向施加的压力)的增加,回流区域的速度和范围逐渐减小。同时,随着喷嘴通道的扩散角增大,滴液的预破裂效率逐渐降低。

Qaddah 等^[18]采用高速视频可视化技术,研究了不同雾化压力下 EIGA 制备 Ti64 粉末的破碎机理,其主要破碎过程与目前已知的雾化破碎机制基本一致。研究发现,当雾化气体压力较高时,液体穿过马赫盘导致液滴与气体之间的速度急剧增加,韦伯数增大,促进纤维破裂模式在破碎过程中占主导地位。次级破碎机制包括袋破碎(雾化压力较低时)、多袋破碎与剪切破碎机制。此外,Qaddah 等通过观测技术对非限制喷嘴雾化过程中因粉末回流导致的喷嘴堵塞现象进行了深入研究。结果表明,熔炼室压力降低或雾化压力增加,均会导致如图 2 所示液柱导流区域气体压力增加及气体动能下降。该区域压力的升高会导致熔滴破碎条件由袋式向片状剥离式恶化转变,大片熔滴液片与马赫环冲击波

作用破碎为细小纤维颗粒,这些纤维颗粒极易受回流气体作用从而导致喷嘴堵塞;同时,导致该区域与熔炼室的压力差减小,影响金属液流的引入效果,加剧粉末回流。

Qing 等^[19]应用 CFD 模拟了 VIGA 制备镍基高温合金粉末过程中液滴的断裂行为。结果表明,高温合金熔体雾化过程的破碎形态呈现伞形和倒蘑菇云形状的交替转变,气-液两相流的相互作用导致整个流场结构无序。在二次雾化过程中,随着雾化压力的增加,合金粉末的粒径分布趋于集中,中间粒径和平均粒径均相应减小。例如,当雾化压力从 2 MPa 增加到 5 MPa 时,每增加 1 MPa,合金粉末的平均粒径依次减小 2.4、7.0 和 14.0 μm 。

雾化机理的相关研究有助于科研人员了解熔滴雾化的全过程,并基于对雾化气流流场分布、回流气流形成原因、气流速度与能量等方面的认识,优化雾化器结构设计,进一步提高雾化效率,改进粉体质量。

新牌号及含稀土球形钛粉研究进展

目前,EIGA 技术主要应用于 TC4 和 TA15 钛合金粉末的生产。为满足日益增长的增材制产品使用需求,可用于增材制造的新牌号球形钛粉的制备成为近年研究的热点。

TA17 钛合金是核电领域潜在的重要结构材料。常见的钢、铜等结构材料在反应堆环境中极易被腐蚀,而 TA17 钛合金具有很强的抗腐蚀能力;但因其加工性能较差,目前在核电领域的实际应用较少。付超等^[20]使用 EIGA 制备了 10~61 μm 和 106~160 μm 2 种粒度规格的 TA17 合金粉末,该工作利用增材制造技术解决了 TA17 钛合金难加工的问题,为未来其在核电领域的大量应用奠定了基础。以铁为 β 稳定剂的钛基生物材料植入物具有优越的生物相容性和较低的价格,Careau 等^[21]使用 EIGA 法成功制备了低成本、高性能的低氧量 Ti-5Fe 粉末,该粉末拥有良好的球形度,且相较于 TC4 合金具有更好的生物相容性,在生物医疗领域展现出巨大的发展潜力。TiAl 合金具有很高的比强度、优异的高温稳定性和耐腐蚀性,目前主要应用于增材制造难变形耐火合金。Illarionov 等^[22]对

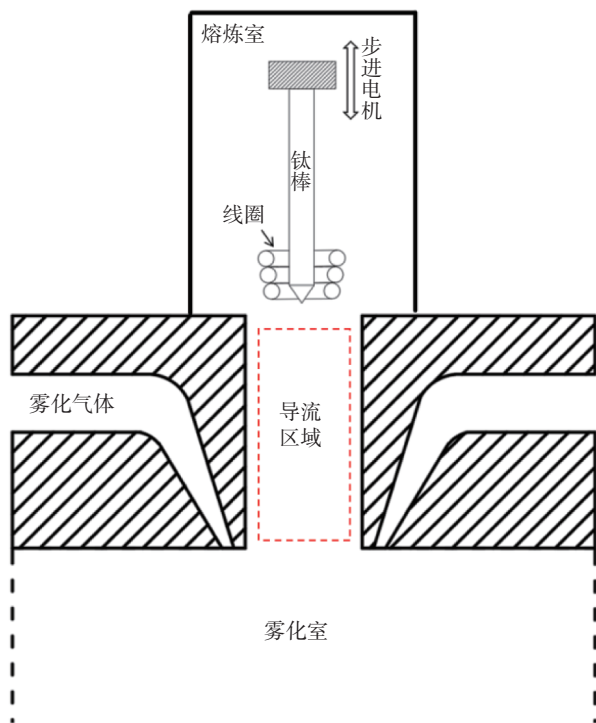


图 2 EIGA 雾化导流区域结构示意图^[18]

EIGA 制备的 Ti-48Al-2Cr-2Nb 粉末进行了物化分析及性能测试,并将其用于增材制造实验。结果表明,该球形粉末具有富含铌元素的树枝状结构,树枝间区域富含铝和铬;由于雾化过程的高速冷却,粉末形成了亚稳态 α 单相,其松弛弹性模量为 105~140 GPa,纳米硬度为 7.13~8.82 GPa。Ti-48Al-2Cr-2Nb 粉末的相组成并不稳定,在增材制造过程中粉末会发生氧化,温度达到 500 °C 时氧化过程开始发展,在 900 °C 以上时氧化速率显著加快。NiTi 合金具有良好的生物相容性、独特的形状记忆效应和超弹性,但其可加工较差且成分敏感性高^[23-24]。Xie 等^[25]使用 EIGA,通过促进不连续液滴破裂的方式制备了用于选择性激光熔化的 NiTi 球形粉末,并研究了气体压力和导管长度对 NiTi 粉末粒径分布和形貌的影响。结果表明,当雾化压力为 5 MPa、导管长度为 28 mm 时,粒度在 0~53 μm 的成品粉末产率为 51.65%。

近年来,VIGA 发展迅速,其基本雾化机理与 EIGA 相似,目前主要应用于新牌号难熔金属球形粉末的制备研究。侯维强等^[26]使用数值仿真技术研究 VIGA 在不同雾化压力下的金属熔滴雾化过程。结果表明,雾化点回流区的气体速度和滞止压力随雾化压力的增加而增大;粉末粒度随雾化气压的增加不断减小,增加雾化压力有助于提高细粉收得率。蒋

保林等^[27]采用 100~600 °C 不同温度的雾化气体,探究了气体温度对粉末特性的影响规律。结果表明,随气体温度升高,粉末的整体粒度分布明显变细,粒度分布图明显向左偏移;较高的气体温度有助于延长熔滴的冷却时间,使液滴有更充分的球化过程,从而减少卫星粉缺陷,提高球形度及流动性。

稀土元素因其独特的电子结构,能够显著提高原材料的力学性能。近年来,研究人员尝试制备含稀土元素的钛合金球形粉末。Kim 等^[28]采用 VIGA-CC 技术制备了商业纯钛(CP-Ti)粉末和添加稀土元素钇的 Ti-Y 合金粉末。如图 3 所示,能谱仪(EDS)分析图中绿色部分为钇元素。结果表明,钇元素的加入对粉末的微观结构、尺寸与显微硬度性能参数均有显著影响:钇元素通过增加 α -Ti 的成核位点抑制晶粒生长,使钛合金晶粒平均粒径减少约 35%;同时,由于原位形成氧化钇,Ti-Y 粉末的平均氧浓度较 CP-Ti 粉末降低约 46%,有利于进一步提高增材制造成品的力学性能,且该粉末经测试符合增材设备使用要求。由于稀土元素较为活泼,含稀土钛合金的增材制造技术目前仍处于实验阶段。其主要难点一方面在于稀土元素添加量的确定,另一方面在于增材制造工艺的适配改进。未来,作为原料的稀土钛合金粉末的发展仍依赖于增材制造技术的进一步突破。

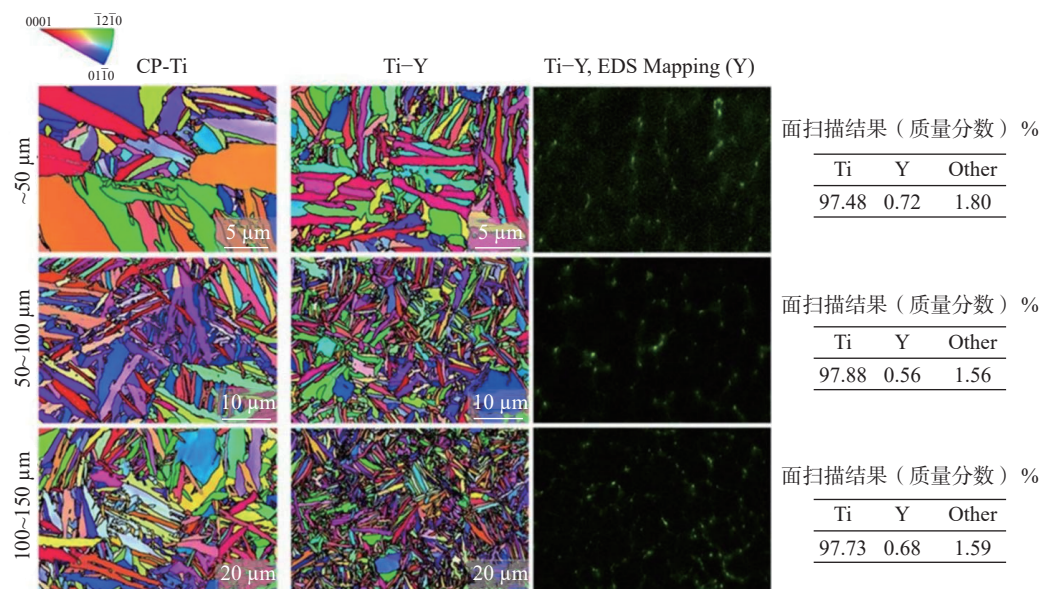


图3 不同粒径范围 CP-Ti 和 Ti-Y 粉末的背向散射电子衍射技术反极图分布与能谱仪分析结果^[28]

等离子旋转电极雾化法研究进展

PREP 将母合金原料制备成棒状的阳极自耗电电极，金属母棒通过转轴高速旋转，在惰性气体环境下受等离子电弧的作用熔化^[29-30]。目前等离子炬主

要分为如图 4 所示的非转移弧等离子炬和转移弧等离子炬 2 种结构^[31]。相较于 GA 的二次破碎过程，PREP 制粉过程中熔滴只需进行一次雾化。熔化的液滴在离心力作用下破碎为细小液滴，在惰性气氛中球化并凝固为球形粉末。

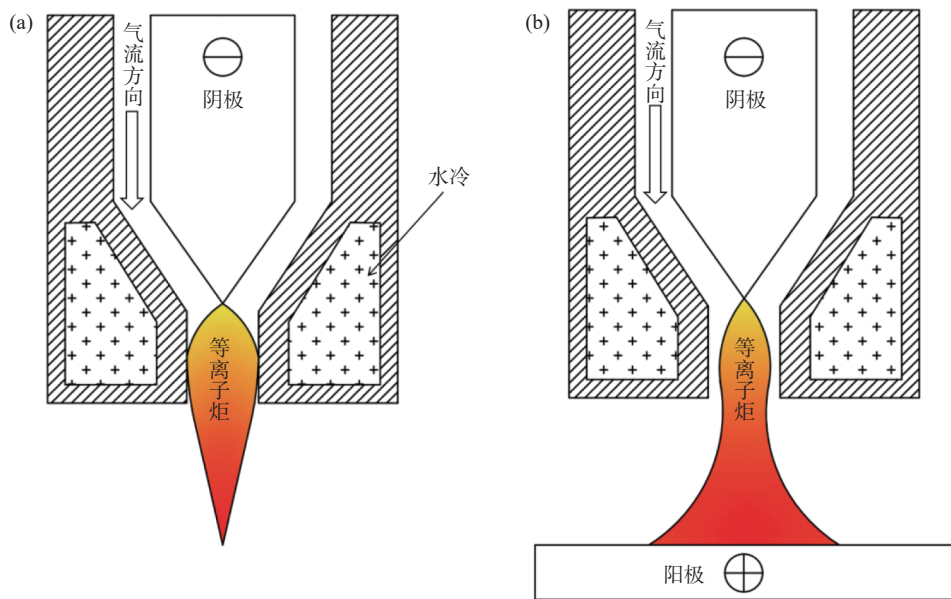


图 4 等离子炬结构示意图: (a) 非转移弧等离子炬; (b) 转移弧等离子炬

等离子旋转电极雾化法粉体优异性研究

采用 PREP 制备的钛合金粉末表面更光滑，球形度更高且卫星粉与空心粉率极低，粉体质量优异。但受电极转速的限制，粉末粒径偏大、细粉收得率低且粒度分布较窄^[32-33]；同时，该技术设备结构较为复杂、产能较低，导致现阶段生产成本较高^[34-35]。PREP 制备的粉末目前主要用于对产品致密度、均匀性等性能有较高需求的增材制造零件的原料生产，其制备的高品质粉末在金属增材领域具有独特优势。Zhao 等^[36]对比研究了分别采用 GA、PA、PREP 制备的金属粉末的流动性差异，并基于离散元法（DEM）数值模拟，分析了颗粒尺寸分布、颗粒形貌和颗粒表面特征对流动性的影响。实验采用由内径为 50 mm 的旋转铝滚筒组成的旋转粉末分析仪，以粉末在旋转气流中的雪崩角（粉末在转鼓中流动时，其表面发生周期性崩塌的斜面与水平面的夹角）表征流动性，雪崩角越小则流动性越好。结果如图 5 所示，GA、PA 和 PREP 制备粉末的平均雪

崩角分别为 38.5°、36.5°和 24.2°，表明 PREP 制备粉末流动性最好。该差异是粉末球形度、粒度分布及表面形貌共同作用的结果。DEM 数值模拟可以单独研究上述参数对粉末流动性的影响，仿真结果表明粒度分布对流动性影响较小，表面形貌是决定流动性的主要因素。PREP 粉末具有良好流动性的原因在于其高度的球形度和较薄的表面氧化层，表面氧化层会增加球体表面粗糙度，在粉末运动过程中易引发机械连锁，阻碍粒子之间滑动或滚动，从而降低宏观流动性。

Ruan 等^[37]分别对 GA 和 PREP 制备的 IN718 铬镍铁合金粉末在激光粉末床熔融（LPBF）工艺中的应用进行了比较研究。结果表明，在相同 LPBF 工艺参数下，2 种组分具有相似的熔池、枝晶间距、晶径和析出物，成形件具有相似的成形质量和力学性能；但 PREP 粉末具有更宽的加工窗口，成形质量比 GA 粉末更稳定，GA 粉末较差的粉体形貌和流动性可能导致构件性能波动较大。Li 等^[38]研

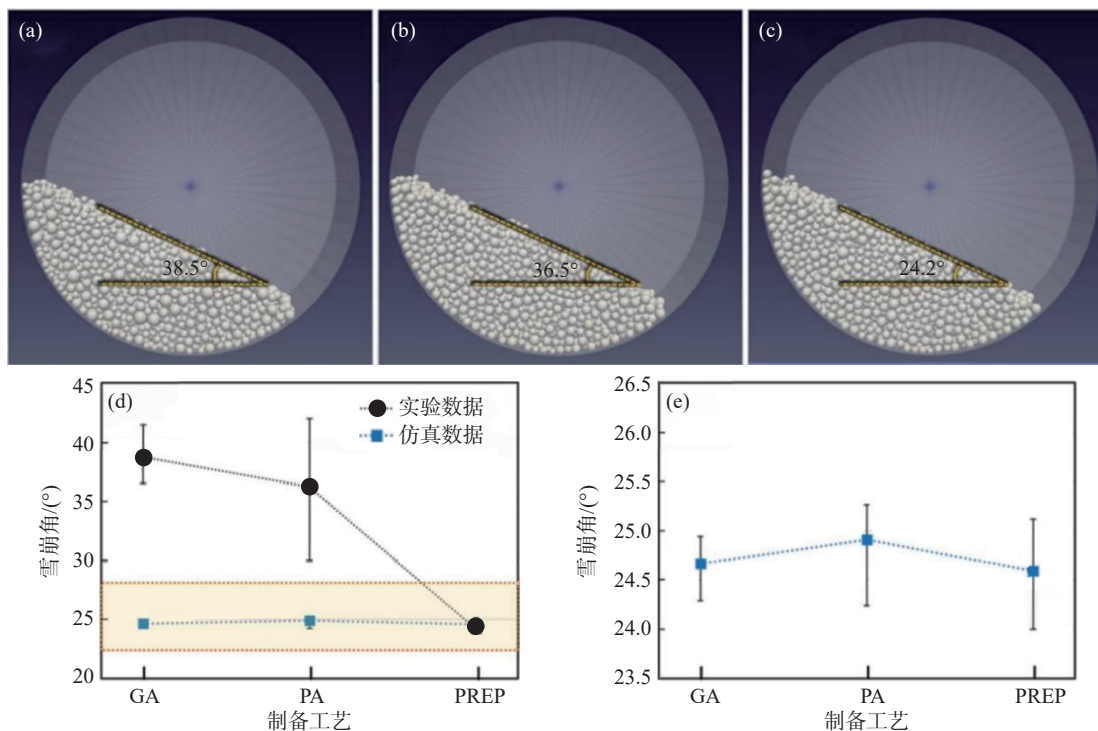


图5 不同制备工艺的粉末雪崩角仿真示意图及数据对比图^[36]: (a) GA; (b) PA; (c) PREP; (d)~(e) 雪崩角数据图及其局部放大图

究了 PREP 工艺对 TA1 及 TC4 钛合金粉末形貌的影响。结果表明, 电极转速对粉末的合金相没有影响: TA1 粉末的相结构主要为 α 相, TC4 粉末的相

结构主要为 α' 相。TC4 粉末粒径越大, 其 β 型晶体形貌越明显。粉末表面存在开裂和光滑 2 种形态, 如图 6 所示, 粒径越小、冷却速率越高, 表面越光

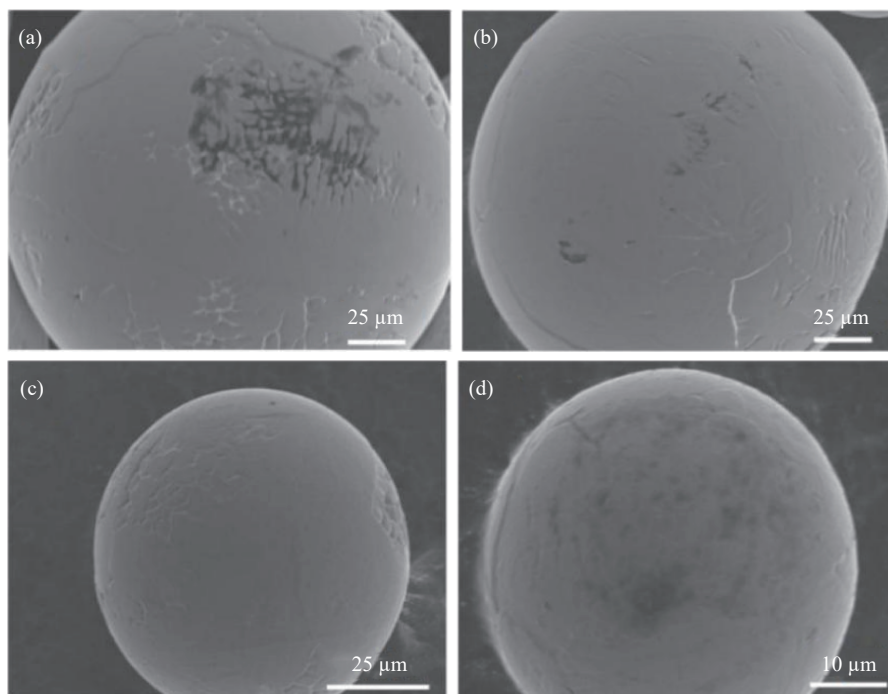


图6 不同粒径 TC4 合金粉末的表面形貌^[38]: (a) $>180\ \mu\text{m}$; (b) $75\sim180\ \mu\text{m}$; (c) $45\sim75\ \mu\text{m}$; (d) $<45\ \mu\text{m}$

滑；随着粒径增加， β 型钛合金在快速冷却过程中体心立方结构的典型结晶行为，导致粉体表面逐渐出现裂纹。以上研究表明，相较于其他制粉技术，PREP 粉末高品质的关键点在于其成分均匀、形貌极佳的微观特征，由此体现了宏观上极佳的性能。未来，PREP 技术仍需以降低成本为主要攻关目标，进一步拓宽粒度分布范围。低成本 PREP 制粉技术的应用，将为金属增材制造产业带来极具突破性的技术飞跃。

工艺改进及新种类合金制备

孙浩智^[39] 针对旋转驱动机构成本过高及驱动力不足的缺点，采用中空电机转子通过静摩擦力带动中心加工锥柄旋转的方式，设计了新型低成本、高效率的驱动机构，并通过数值模拟验证了该机构的运行稳定性。近年来，驱动电机的转速不断取得新突破，设计低成本、高转速的驱动装置是 PREP 工艺降本增效关键途径，对于扩大 PREP 制粉的粒度分布范围也具有积极影响。

目前可应用于 PREP 制粉的合金种类较少，钛合金类以 TC4、TA15 牌号为主。邝泉波等^[40] 采用 PREP 成功制备了 Ti-6.5Al-1.4Si-2Zr-0.5Mo-2Sn 钛合金粉末，通过真空自耗电弧熔炼技术制备阳极母棒，得到了球形度高且无卫星粉、空心粉的高品质成品粉末；陈光润等^[41] 制备了 TC4 球形钛合金粉末，并研究了电流和电极转速对粉末粒度分布及特性的影响。常规牌号的 PREP 钛粉制备技术已较为成熟，目前具有一定的市场占有率。

此外，基于 PREP 良好的制粉特性，非增材类原料粉的需求也在逐年增加。钛基体复合材料（TMCs）是通过将少量高熔点、高硬度的陶瓷增强相加入钛或钛合金基体中制成的钛合金材料，具有高比刚度和比强度，并克服了高温软化和低耐磨性的问题。Liu 等^[42] 采用 PREP 制备纳米级硼化钛晶须（Ti-TiBw）复合粉末作为原料粉，解决了使用传统 Ti-TiBw 生产工艺因高温导致的 TiBw 粗化问题，防止了材料出现严重应力集中，对提高 TMCs 性能具有重要意义。高品质的 PREP 制粉技术为粉末冶金、陶瓷烧结等相关材料的开发提供了一套崭新的技术支持方式。

等离子体雾化法研究进展

PA 采用丝材原料供给方式。丝材经校直后，以恒定速度送入等离子体射流中被熔化，随后被雾化气流破碎冲击为超细液滴，冷却凝固后形成细小粉末^[43-44]。为保证丝材熔化的均匀性，冲击丝材的等离子体射流构型经历了单射到三射流的发展过程。PA 最大的优点在于熔化后的金属液滴具有很高的过热度，使其在雾化塔内有充分的冷却时间进行球化，因此 PA 制备的粉末球形度极佳，且卫星粉缺陷较少^[45]。受丝材原材料制约，目前可用于丝材加工的钛合金种类较少，研发更多种类的钛合金丝材是推动 PA 未来应用发展的关键。

机理研究与工艺优化进展

Zhang 等^[46] 使用数值仿真技术对 PA 过程中预破碎熔滴（PbMD）进行了研究，建立了适用于该过程表征的现象学模型，阐明了预破碎熔滴生成过程中熔融金属状态的变化并推导出计算其尺寸的理论方程，同时借助高速摄像机进行辅助验证。如图 7 所示，PA 过程中预裂熔滴的形状呈典型对称的泪滴形或椭圆形，其最小平均尺寸为 0.417 mm，最大平均尺寸为 0.537 mm，中值平均尺寸为 0.493 mm，中值平均尺寸约为 EIGA 所制粉末典型尺寸的 10 倍。研究还发现，增加雾化气体流量可以减小粉末的粒径尺寸与分布宽度，但会降低球形度；增加电弧电流则可以增大粉末粒径并改善球形度。该研究对 PA 工艺的进一步优化具有重要指导意义。

张清波^[47] 针对雾化过程的传热传质行为及其对粉末质量影响规律展开研究，并通过实验观测、数值模拟和理论推导等手段，总结了传热传质行为对粉末球形度、平均粒度及粒度分布的影响规律。Dharmanto 等^[48] 创新性地使用石墨材质的等离子体管道，延长了熔融金属和热等离子体射流的相互作用时间，使熔融金属能够获得足够过热度，从而形成完全球形的颗粒，减少了卫星粉缺陷。通过对导管等离子体雾化过程中最佳电流和压力参数的研究，Dharmanto 等成功制备了无卫星粉的球形钛基合金粉末。结果表明，在电流 45 A、气压 2.5×10^5 Pa、送丝速度 $2 \text{ mm}^3/\text{s}$ 的工艺参数下，可以得到如图 8 所示的粒径分布最窄的粉末。该技术对提高粉末

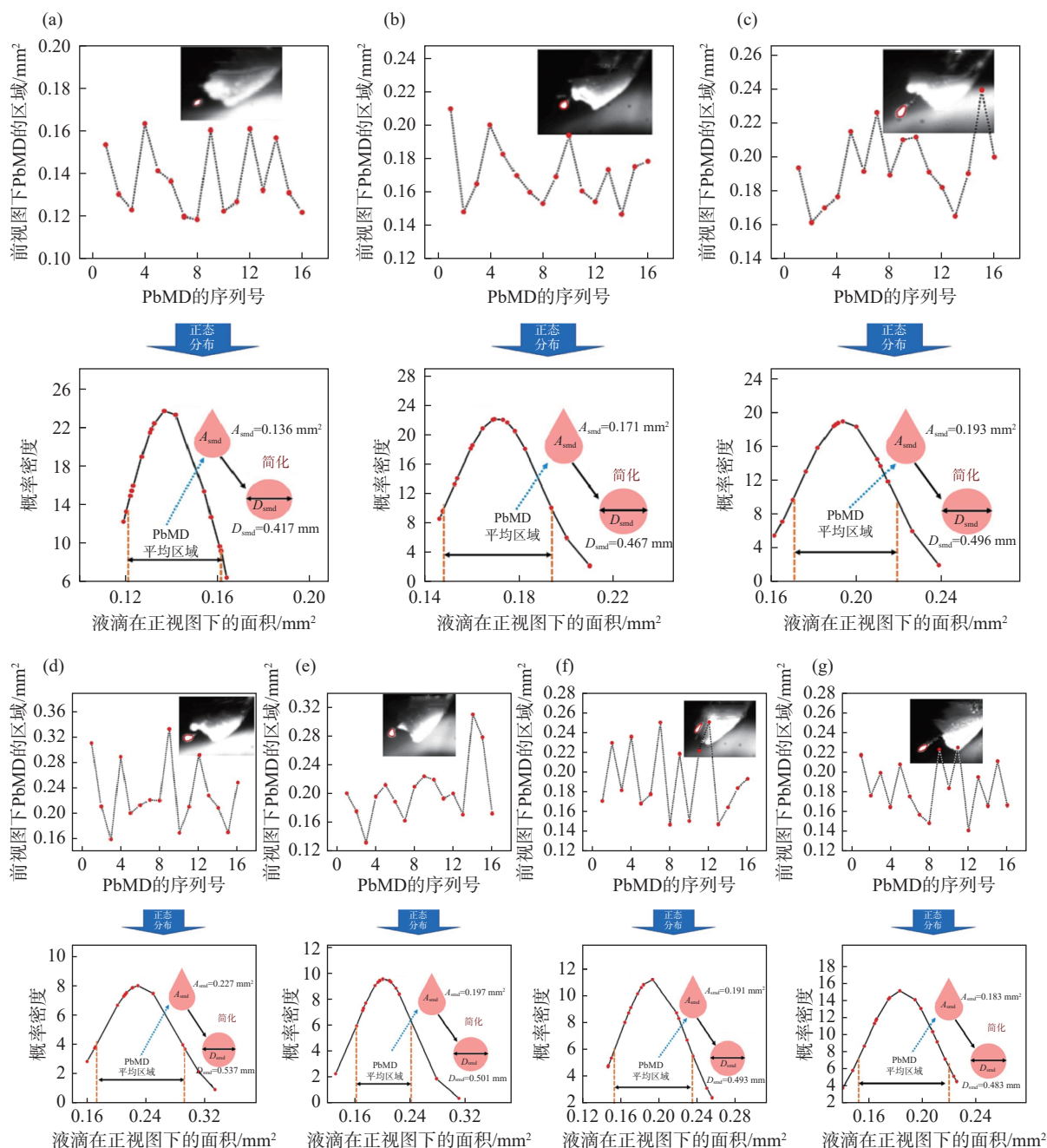


图7 不同电弧电流和气体流速下预破碎熔滴的形状和尺寸^[46]: (a) 80 A, 100 L/min; (b) 100 A, 100 L/min; (c) 120 A, 100 L/min; (d) 140 A, 100 L/min; (e) 140 A, 115 L/min; (f) 140 A, 130 L/min; (g) 140 A, 145 L/min (注: A_{smd} 和 D_{smd} 分别代表平均面积尺寸和平均直径尺寸, SLM 代表气体流速, L/min)

流动性、增强增材制造产品的力学性能具有重要意义。肖瑜等^[49]将PA和丝材电弧喷涂技术相结合,开发出新型电弧熔融等离子体雾化装置,并通过实验验证表明,采用该技术可将粉末出粉速率提高2~7倍。

制备粉末研究进展

PA 受益于其独特的熔融雾化机理,相较于其他制备工艺更容易获得小粒径粉末。de Morais 等^[44]采用PA制备了小粒径Nb-48Ti合金粉末; Habibnejad-Korayem 等^[50]使用PA成功制备了粒度范围在15~

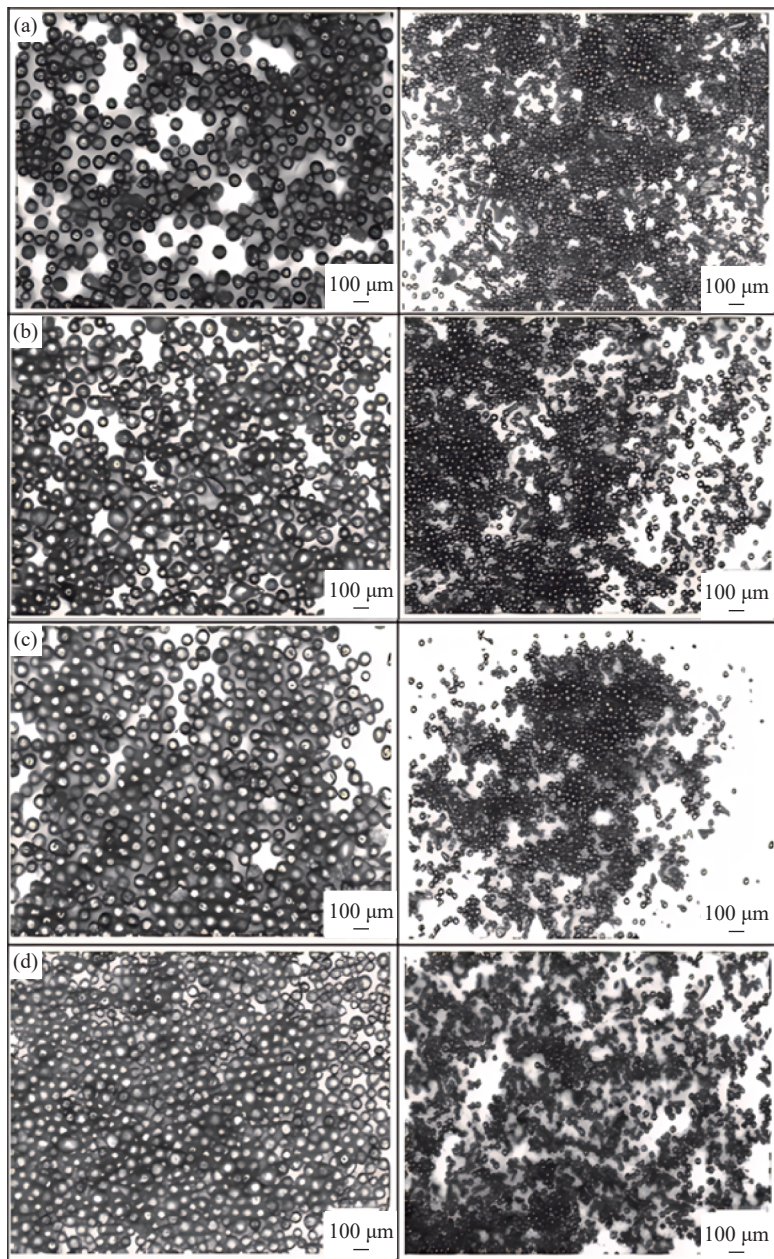


图8 在不同电流和气压下制备的钛基合金粉未经200目和325目筛分后的粉末观察结果^[48]: (a) 40 A, 1.5×10^5 Pa; (b) 40 A, 2.5×10^5 Pa; (c) 45 A, 1.5×10^5 Pa; (d) 45 A, 2.5×10^5 Pa

106 μm 的 TC4 钛合金粉末, 并已成功应用于激光粉末床熔覆设备。激光粉末床熔覆技术首选的原料为 15~45 μm 粒度范围钛合金粉末。GA 等制备工艺在此范围内的粉末收得率较低, 而 PA 能够以相对低的成本获得该粒径范围的粉末, 随着激光粉末床熔覆技术的不断发展, 相关粉末的需求会逐渐增长。Smirnov 等^[51] 以商业纯度 VT1-00 钛制成的导线为原料, 采用 PA 进行了钛粉试制, 所制备的成品粉末具

有 0.99 的高球度形, 其流动性及振实密度可满足大多数增材制造工艺的要求, 但纯钛的力学性能相对不佳, 在钛合金粉制备成本相对低廉的现阶段, 该技术的优势体有限。

结束语

(1) 随着钛合金增材制造产业的快速发展, 国内以 EIGA 为代表的主流球形钛粉制备技术已较为成熟。

EIGA 具有较宽的粒度分布和较高的细粉收得率，能够在较低成本下规模化生产适用于增材制造的钛合金粉末，是目前增材制造粉末市场的主要供应技术。EIGA、PREP、PA 3 种钛粉制备技术的对比如表 1 所示。PREP 最大的优势在于采用离心力作为熔滴破碎的能量来源，所制备的粉末球形度好、粉体质量高，但缺点在于生产成本较高且粒度分布范围较窄。目前，PREP

在钛合金增材制造市场占有一定份额，在对粉体质量有特殊要求的应用场景中具有明显优势。PA 能够使金属液滴获得很高的过热度，相比于 EIGA，PA 有着更长的熔滴球化时间，故其粉末球形度明显高于 EIGA 制备的粉末。PA 法目前在钛合金增材制造粉末市场的占有率较低，主要原因是其采用金属丝材作为原料，而钛丝加工难度较大且成本较高。

表 1 3 种钛粉制备技术对比

制备技术	球形度	细粉收得率	缺陷粉数量	粒度分布范围	成本
EIGA	较好	高	多	宽	低
PREP	优	低	极少	窄	很高
PA	优	较低	较少	窄	高

(2) 目前，TC4 和 TA15 仍是增材制造用钛合金球形粉末的主要牌号，可用于大规模生产的 TA1、TiAl 等新牌号的球形粉末制备技术研究，对钛金属增材制造产业的长远发展具有重要的推动作用。同时，添加稀土元素的钛合金球形粉末开发对提高增材成品件的力学性能具有显著影响，但受制于稀土元素活泼性的制约，亟需配套增材制造技术的进一步发展，未来有望成为新兴的研究热点。

(3) 针对雾化机理及喷嘴优化的研究是进一步提高气雾化粉体质量的关键。同时，由于封闭雾化塔结构易导致卫星粉缺陷，未来也需进行流场优化、粉体筛分及新型后处理技术的研究开发，以减少卫星粉缺陷，提高粉末的流动性和振实密度。PREP、PA 制备的球形粉末具有极佳的形貌与性能，降低生产成本是关系二者长远发展的关键。近年来，PREP 的核心驱动电极转速不断取得突破，多种新牌号原料的合格球形粉末通过 PREP 和 PA 成功制备，未来可能代替 GA 成为主流的球形钛粉制备技术。

(4) 数值仿真和高速摄影技术相结合的方法，为气雾化熔滴破碎机理及喷嘴的改良设计提供了新思路。通过该技术可直观还原熔滴破碎冷却的全过程，对 GA 机理研究与工艺技术参数调整具有重要意义；建立并完善更适用于 GA 研究的仿真模型是未来的研究重点。借助数值仿真技术提前对新牌号钛合金粉末制备过程中熔炼功率等工艺参数进行优

化，能够大幅缩短新材料制备最佳工艺参数的方案开发时间并降低成本。

(5) 钛合金粉末制备技术将朝着多元化、精益化、智能化发展。工艺方面，许多新的制备技术已初现端倪，如紧耦合气雾化、层流超声雾化等先进制粉技术势必带动行业实现更大飞跃。智能化方面，在人工智能技术与数值仿真技术支持下，使用机器学习算法分析工艺参数数据库并建立可靠的人工智能工艺系统，将使未来的参数优化调整更为快速、便捷。

目前球形钛合金粉末年产量已基本满足行业需求，市场结构正由供方市场逐渐转向需方市场。具备更高粉体质量、更低能耗和更多元化的钛粉制备工艺技术将是下一步球形钛粉产业发展的重点。然而，我国球形钛粉制备技术与世界先进水平仍有一定差距。在已有制备技术的工艺优化、雾化机理的深入研究、新型粉末制备技术的设计研发等方面，仍有很大的研究空间和发展前景。

参考文献

- [1] 张村新. 增材制造用钛合金粉末的制备现状. 有色冶金设计与研究, 2023, 44(4): 15
- [2] 侯维强, 孟杰, 梁静静, 等. 增材制造用高温合金粉末制备技术及研究进展. 粉末冶金技术, 2022, 40(2): 131
- [3] 韩海波, 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. 粉末冶金工业, 2017, 27(6): 44
- [4] 陆亮亮, 张少明, 徐骏, 等. 球形钛粉先进制备技术研究进展. 稀有金属, 2017, 41(1): 94

- [5] Withers J C, Shapovalov V, Storm R, et al. The production of titanium alloy powder. *Key Eng Mater*, 2013, 551: 32
- [6] 胡家齐, 程宗辉, 白兵. 雾化制粉过程模拟仿真研究进展. 粉末冶金工业, 2022, 32(5): 103
- [7] 张哲轩, 赵文天, 张会华, 等. EIGA 雾化喷嘴对氩气-钛粉两相流模拟研究. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(2): 78
- [8] 王博亚, 卢林, 吴文恒, 等. 雾化制粉技术研究进展. 粉末冶金工业, 2019, 29(5): 74
- [9] 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. 钛工业进展, 2010, 27(5): 16
- [10] 赵少阳, 王利卿, 谈萍, 等. VIGA-CC 法制备球形 Ti-35.8Al-18.4Nb 合金粉末及其性能研究. 粉末冶金技术, 2020, 38(6): 443
- [11] 冯骏骁, 左野, 王勇, 等. 真空雾化制粉技术研究进展及展望. 真空, 2022, 59(6): 87
- [12] 杨启云, 吴文恒, 张亮, 等. EIGA 雾化法制备 3D 打印用 Ti6Al4V 合金粉末. 粉末冶金工业, 2018, 28(3): 8
- [13] 蒋保林, 管晓颖, 叶国晨, 等. 压力和功率对 EIGA 制备 TA15 粉末的影响. 装备制造技术, 2024(2): 21
- [14] Chen J L, Zhang L, An R. Characterization of TC4 alloy powder prepared by EIGA for laser 3D printing. *J Phys Conf Ser*, 2023, 2468(1): Art No. 012054
- [15] 陈嘉璐, 安然, 董欢欢, 等. EIGA 工艺参数对制备激光 3D 打印用 TC4 合金粉末特性的影响. 粉末冶金工业, 2023, 33(6): 38
- [16] Qaddah B, Chapelle P, Bellot J P, et al. Swirling supersonic gas flow in an EIGA atomizer for metal powder production: Numerical investigation and experimental validation. *J Mater Process Tech*, 2023, 311: Art No. 117814
- [17] Zou H P, Li F L, Ngai T, et al. Effect of free-fall nozzle channel dispersion angle on TC4 discontinuous droplets pre-breakup in EIGA. *J Wuhan Univ Technol-Mater Sci Ed*, 2023, 38(1): 171
- [18] Qaddah B, Chapelle P, Bellot J P, et al. Primary and secondary breakup of molten Ti64 in an EIGA atomizer for metal powder production. *Powder Technol*, 2024, 438: Art No. 119665
- [19] Qing Y Q, Guo K K, Liu C, et al. Impact of atomization pressure on the particle size of nickel-based superalloy powders by numerical simulation. *Materials*, 2022, 15(9): 3020
- [20] 付超, 叶义海, 陶涛, 等. EIGA 法制备 TA17 合金粉末的激光增材适应性研究. 材料科学与工艺, 2021, 29(5): 91
- [21] Careau S G, Ulate-Kolitsky E, Bois-Brochu A. Ti-5Fe spherical powder alloy prepared by electrode induction gas atomization processes (EIGA) for additive manufacturing of biomedical implants. *Mater Lett*, 2023, 352: Art No. 135238
- [22] Illarionov A G, Karabanov M S, Shabanov M A, et al. Structure and properties of the powder for additive synthesis of alloys based on titanium aluminide TiAl. *Met Sci Heat Treat*, 2024, 66(3/4): 137
- [23] Mohd Jani J, Leary M, Subic A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Mater Des*, 2024, 56: 1078
- [24] Gan J, Duan L C, Li F, et al. Effect of laser energy density on the evolution of Ni_4Ti_3 precipitate and property of NiTi shape memory alloys prepared by selective laser melting. *J Alloys Compd*, 2021, 869: Art No. 159338
- [25] Xie B, Li W, Liu X Y, et al. Effects of gas pressure and catheter length on the breakup of discontinuous NiTi droplets in electrode induction melting gas atomization. *Mater Res Express*, 2024, 11(2): Art No. 026511
- [26] 侯维强, 吴佳欣, 孟杰, 等. 不同雾化压力下 GH3536 合金粉末制备和雾化过程模拟. 粉末冶金技术, 2023, 41(5): 410
- [27] 蒋保林, 魏放, 陆雪雯, 等. 气体温度对 VIGA 制备 GH4169 合金粉末的影响. 现代制造技术与装备, 2024, 60(5): 148
- [28] Kim D K, Kim Y I, Kim Y D. Comparative study for microstructural characterisations and properties of Ti-Y powders produced by vacuum induction gas atomization cold crucible process. *Powder Metall*, 2021, 64(5): 396
- [29] 李晶, 闫峰, 王锦, 等. 航天领域 3D 打印材料及工艺技术研究现状. 粉末冶金工业, 2024, 34(2): 116
- [30] 乔振兴, 刘增林, 张德金, 等. 等离子旋转电极雾化制备 H13 合金特种粉的特性表征. 粉末冶金工业, 2024, 34(3): 101
- [31] Zhang Y, Song M H, Li Y, et al. Effect of preparation process on the microstructure and characteristics of TiAl pre-alloyed powder fabricated by plasma rotating electrode process. *Crystals*, 2024, 14(6): Art No. 562
- [32] Fan X P, Tian Q X, Chu X, et al. Microstructure and mechanical properties of $\text{Co}_{31.5}\text{Cr}_7\text{Fe}_{30}\text{Ni}_{31.5}$ high-entropy alloy powder produced by plasma rotating electrode process and its applications in additive manufacturing. *J Mater Res Technol*, 2024, 31: 1924
- [33] 宋美慧, 李艳春, 张晓臣, 等. 高转速 PREP 法制备钛合金粉末工艺研究. 化学工程师, 2022, 36(11): 1
- [34] 汤鑫, 李爱红, 李博. 球形钛及钛合金粉制备工艺研究现状. 粉末冶金工业, 2018, 28(2): 58
- [35] 吴文恒, 王涛, 范珂. 增材制造用球形金属粉末主要制备技术的研究进展. 机械工程材料, 2021, 45(11): 76
- [36] Zhao Y F, Cui Y J, Hasebe Y, et al. Controlling factors determining flowability of powders for additive manufacturing: A combined experimental and simulation study. *Powder Technol*, 2021, 393: 482
- [37] Ruan G, Liu C, Qu H Q, et al. A comparative study on laser powder bed fusion of IN718 powders produced by gas atomization and plasma rotating electrode process. *Mater Sci Eng: A*, 2022, 850: Art No. 143589
- [38] Li C Y, Song M H, Zhang X C, et al. Preparation of titanium alloy powder by plasma rotating electrode process // *Proceedings of 20th Chinese Materials Conference*. Chengdu, 2019: 79
- [39] 孙浩智. 等离子旋转电极雾化制粉高速旋转驱动机构的设计与分析. 机械研究与应用, 2022, 35(2): 35
- [40] 邝泉波, 邹黎明, 蔡一湘, 等. 等离子旋转电极雾化法制备高品质 Ti-6.5Al-1.4Si-2Zr-0.5Mo-2Sn 合金粉末. 材料工程, 2017, 45(10): 39

- [41] 陈光润, 马兰, 杨绍利, 等. TC4 ELI 钛合金高品质球形粉末的制备. 钢铁钒钛, 2024, 45(4): 23
- [42] Liu H Y, Li S F, Li L, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-TiBw-x%Cu composites by powder metallurgy using atomized Ti-TiBw powder as raw materials. *Vacuum*, 2023, 217: Art No. 112521
- [43] 唐超兰, 张伟祥, 陈志茹, 等. 3D 打印用钛合金粉末制备技术分析. 广东工业大学学报, 2019, 36(3): 91
- [44] de Moraes W A, Falcão R B, Jr M B, et al. Fatigue behaviour of additive manufactured Nb-48Ti alloy parts from powders produced by plasma atomization (PA) and hydride-dehydride (HDH) process. *Eng Fail Anal*, 2024, 156: Art No. 107762
- [45] 王保怀. 等离子体激励强化航空燃料雾化的方法研究 [学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2023
- [46] Zhang Q B, Yu D P, Liu F Y, et al. Modeling on the size of the pre-breaking molten droplet in plasma atomization for controlling the size of the produced powders. *Appl Therm Eng*, 2023, 232: Art No. 121031
- [47] 张清波. 等离子体雾化制粉过程建模及粉末质量控制研究 [学位论文]. 成都: 四川大学, 2023
- [48] Dharmanto, Ario Sunar B, Sugeng S, et al. New design of conduit plasma atomization for fabricating spherical metal powder and its optimization using design of experiments method. *Powder Metall Met Ceram*, 2022, 60(9/10): 531
- [49] 肖瑜, 余德平, 范颖, 等. 面向球形金属粉末制备的电弧熔融等离子体雾化装置的设计. 机械, 2024, 51(3): 25
- [50] Habibnejad-Korayem M, Lalh M, Schunk C, et al. Offsize particle size utilization for laser powder bed fusion processing of plasma atomized Ti-6Al-4V powders: Impacts on part properties and powder safety. *J Manuf Process*, 2023, 107: 559
- [51] Smirnov S A, Kirsankin A A, Kalaida T A. Properties of the spherical titanium VT1-00 powder fabricated by plasma atomization of a wire. *Russ Metall*, 2022(7): 741

作者简介: 曹磊 (1994—), 男, 内蒙古呼和浩特人。2025 年毕业于内蒙金属材料研究所材料学专业, 主要研究方向: 气雾化制粉。通信地址: 浙江省宁波市鄞州区聚贤街道凌云路 199 号兵科院; E-mail: 15628302715@163.com。