引用格式：杨壬涛，杜鹏程，刘贻欧，等．增材制造领域等离子旋转电极雾化制粉技术研究及应用现状[J]．材料工程，2026，54(3)：95-112.
YANG Rentao，DU Pengcheng，LIU Yiou，et al.Research and application status of plasma rotating electrode process technology in additive manufacturing[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(3)：95-112.

增材制造领域等离子旋转电极雾化制粉技术研究及应用现状

杨壬涛[1]，杜鹏程[1]，刘贻欧[2]，范明祯[1]，刘　炼[1]，高名传[1]，陈同舟[1*]
（1 中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司 特种材料表面工程全国重点实验室，武汉 430030；
2 武汉第二船舶设计研究所，武汉 430030）

摘要：高性能金属粉末是增材制造中的关键材料，粉末性能直接影响增材制造零部件的微观组织与性能。等离子旋转电极雾化制粉技术（plasma rolating electrode process，PREP）利用高温等离子体对高速旋转的电极棒端面进行熔化，熔融液膜在离心力作用下破碎成液滴并凝固成粉末，其制备的粉末具有球形度高、粒度均匀、空心粉少等优点，是增材制造的理想粉末材料。本文阐述了PREP技术的发展历程、设备类型、粉末制备原理以及制备粉末的性能特点等研究进展，重点讨论了工艺参数对粉末性能的影响规律，探讨了数值模拟方法在粉末的形成机制以及粉末粒度控制中的应用。此外，阐述了PREP制备的粉末材料在增材制造航空航天、医疗器械、核电、轨道交通等装备制造中的应用进展。最后，指出了PREP制粉技术将以高纯、细化、窄粒度、少夹杂、高球形度以及高效率和低成本的方向发展。

关键词：增材制造；等离子旋转电极雾化；高性能粉末；工艺优化；应用技术
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000615　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000615
中图分类号：TF123　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)03-0095-18

Research and application status of plasma rotating electrode process technology in additive manufacturing

YANG Rentao[1]，DU Pengcheng[1]，LIU Yiou[2]，FAN Mingzhen[1]，LIU Lian[1]，
GAO Mingchuan[1]，CHEN Tongzhou[1*]
（1 State Key Laboratory of Special Materials Surface Engineering，China Academy of Machinery Wuhan Research Institute of Materials Protection Co.，Ltd.，Wuhan 430030，China；
2 Wuhan Second Ship Design & Research Institute，Wuhan 430030，China）

Abstract：Performance metal powder serves as a crucial material in 3D printing additive manufacturing，as the properties of the powder directly influence the microstructure and overall performance of 3D-printed components. The plasma rotating electrode process (PREP) employs high-temperature plasma to melt the end face of a rapidly rotating electrode rod. Subsequently，the molten liquid film is fragmented into droplets，which then solidify into powder under the action of centrifugal force. This paper provides a comprehensive review of the development history，equipment types，powder preparation principles，and performance characteristics of the PREP process. It also delves into the impact of process parameters on the powder's properties and discusses the application of numerical simulation methods in understanding the powder formation mechanism and controlling powder particle size. Furthermore，the paper reviews the progress made in applying PREP-prepared powder materials in the 3D printing manufacturing of aerospace，medical equipment，nuclear power，rail transit，and other equipment sectors. Finally，it is highlighted that the PREP milling process is poised to evolve towards higher purity，finer particle size，narrower particle size distribution，fewer inclusions，higher sphericity，greater efficiency，and lower costs.

Key words: additive manufacturing; plasma rotating electrode process (PREP); high performance powder; process optimization; applied technology

当前我国已进入由速度发展转向高质量发展的新阶段，党的十九届五中全会中明确指出，“十四五”时期经济社会发展要“以推动高质量发展为主题”。新的发展主题以及新的国际局势要求我国必须在航空航天、轨道交通、武器装备、工业母机等高端装备制造领域突破关键“卡脖子”技术，实现装备技术升级以及制造的完全自主可控。增材制造技术以近净成形的方式制备工件，是一种革命性的快速成型技术。与传统的加工方式相比，增材制造技术无需开模、材料利用率高，并且能够实现高性能复杂结构零件的无模具、快速、全致密成形，已成为高端装备实现高性能制造的首选制造技术[1-2]。

粉末材料是增材制造金属零部件制造的关键原材料，其性能直接影响增材制造件的组织结构与服役性能。在增材制造过程中，氧化物会降低熔池的润湿性和流动性，增加熔池的黏度[3]，导致打印工件内部孔隙等缺陷增多[4-5]。氧的引入也会导致打印合金的晶格畸变，降低材料的塑性[6]，在后续的加工过程中易发生局部硬化变脆，进而导致加工微裂纹的产生[7]。同时，氧化物团聚体会充当裂纹萌生位点，导致工件在较高应力的循环状态过早的发生疲劳断裂[8]。增材制造对粉末的粒径分布和球形度也有相应要求，以保证加工过程中的流动性[9-10]。粉末流动性的不足可能导致粉末的不充分熔化，工件内部存在未熔颗粒[5, 11]，进而导致增材制造过程的失败[12]。因此，获取高质量的粉末对于增材制造零部件的性能至关重要。

增材制造所用的金属粉末通常采用气雾化(gas atomization, GA)[13]、水雾化(water atomization, WA)[14]、等离子体雾化(plasma atomization, PA)[15]、离心雾化(centrifugal atomization, CA)[16]、等离子旋转电极雾化(plasma rotating electrode process, PREP)[17]、超声波雾化(ultrasonic atomization, UA)[18]等粉末制备技术。气雾化主要分为感应熔炼气体雾化(induction melting gas atomization, VIGA)和电极感应气雾化(electrode induced gas atomization, EIGA)两种技术。通常VIGA技术得到的粉末空心粉和异形粉末占比高，影响粉末的流动性，但粉末微观组织细小、元素偏析少、生产效率高，细粉(15～53 μm)球形度较高而粗粉(54～180 μm)中卫星粉和空心粉含量较高。水雾化制粉技术有细粉收得率高、生产成本低的优势，但粉末颗粒通常具有不规则的形状和不平整的表面，且粉末氧含量较高，特别是对于倾向氧化的金属及合金；EIGA技术制备的粉末粉体特征与VIGA技术相似，但氧含量较低、成本较高、效率低。等离子体雾化法制备的粉末粒径分布均匀，纯度较高，但线材成本高、粉末的生产率低。UA技术在制备粒径＜20 μm的球形金属粉末方面极具优势，但其效率低下，与电子束选区熔化(selective electron beam melting, SEBM)、定向能量沉积(directed energy deposition, DED)技术对于粉末粒径的要求并不相匹配。PREP技术制备的粉末具有高球形度[19]、低氧化程度和低空心粉含量，极大降低了增材制造件中的缺陷含量[20-23]，且PREP技术制备粉末的粒径范围可覆盖电子束熔化工艺及定向能量沉积工艺用较大粒径粉末的要求，因此，PREP技术被广泛应用于增材制造过程，然而该技术的细粉收得率低，仍需要进一步优化装备及工艺以满足选区激光熔融(selective laser melting, SLM)技术所需要的粉末粒径。本文综述了PREP技术的发展历程、设备类型、粉末制备原理、制备粉末的性能特点以及在航空航天、医疗器械、核电、轨道交通等装备制造中的应用的研究进展，重点讨论了工艺参数对粉末性能的影响规律，探讨了数值模拟方法在粉末的形成机制以及粉末粒度控制中的应用。在此基础上，对后续PREP技术制备技术的发展方向进行了总结和展望。

1 PREP制粉技术原理及发展

等离子旋转电极技术是把金属或合金作为自耗电极，采用等离子弧通过加热使金属和合金局部熔化，电极在惰性气体中高速旋转时，离心力将逐渐熔化的金属和合金破碎成细滴状飞出以制取球状金属和合金粉末的方法。这种方法制备的粉末因为采取的是自耗电极，粉末颗粒表面清洁，空心粉末数量少，球形度高，粒度分布集中[24-25]。

等离子体旋转电极技术是由旋转电极工艺制粉改进而来，采用等离子弧对高速旋转的电极进行加热，提高电极的温度和转速，从而得到更优质的粉末，其发展历程如图1[26-35]。按照等离子电弧的加热方式，装备可分为转移弧型及非转移弧型，转移弧和非转移弧等离子旋转电机具有各自的运行特点，转移弧型设备功率高、能量密度大，适用于更多金属粉末的生产，

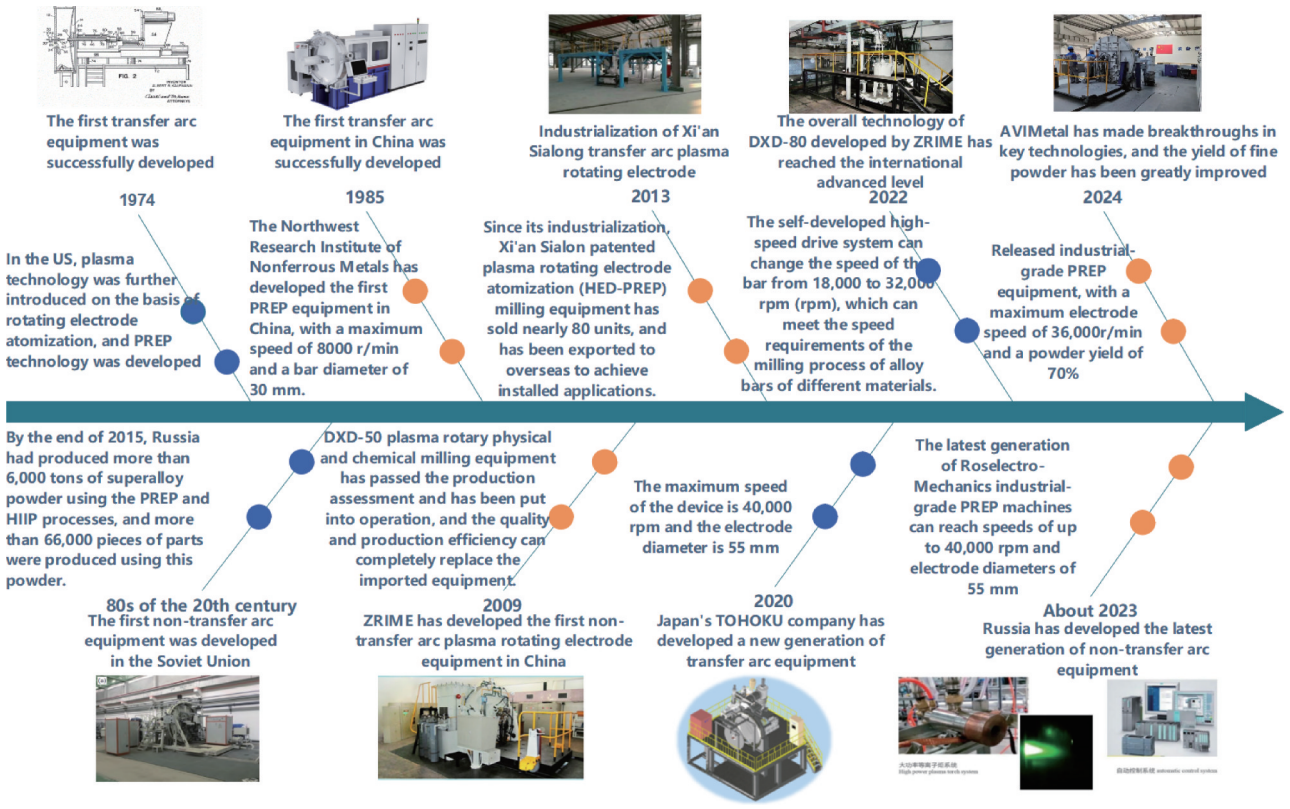


图 1　PREP 技术的发展历史[26-35]

Fig.1　Development history of PREP technology

但存在碳粉污染、机械轴温升高和振动大等问题。非转移弧设备生产效率高，电极棒不带电，降低了设备结构的设计难度，然而，其等离子枪功率较小，无法用于制备难熔金属粉末且成本较高。其中，转移弧型等离子旋转电极雾化制粉方式起源于 1974 年的美国核金属股份有限公司[26]，20 世纪 80 年代，苏联开发出了非转移弧型等离子旋转电极技术及装备。我国在引进国外的非转移弧设备的同时，1985 年，西北有色金属研究院研制出了国内首台转移弧型等离子旋转电极装备，转速为 8000 r/m[27]。1990 年，日本就成功运用等离子旋转电极技术制备大粒径（几百微米）的钛合金粉末，用于制作人造骨和过滤器，并证明该方法是一种清洁的粉末制备方式，并预言该种方法将成为工业制备钛粉的主流技术[28-29]。20 世纪 90 年代，众多学者运用 PREP 技术制备了钛合金粉末，并发现了这种技术制得粉体有多种其他技术难以替代的优势，并在 20 世纪末得到了进一步的发展，因技术封锁，美国关于 PREP 装备的最新报道仅能追踪至 1998 年，设备根据电极棒料尺寸分为短棒料和长棒料模式，电极直径为 63.5～89 mm，短棒料最高转速为 25000 r/m，长棒料最高转速为 15000 r/m。21 世纪初，为适应不断扩大的市场需要，我国陕西宇光飞利、宝鸡海宝、陕西贵资丹、陕西英博金属、陕西维克德科技、西安赛隆金属等自主开发了转移弧型等离子旋转电极雾化制粉设备。我国开展非转移弧等离子旋转电极装备研发的单位主要为中国机械总院集团郑州机械研究所，2011 年，其研发的国内首台非转移弧等离子旋转电极雾化制粉设备 DXD-50 型通过生产考核，目前已交付多家客户，取得良好的使用效果[30]。2015 年左右，西安赛隆增材技术股份有限公司研发出一系列转移弧型等离子旋转电极雾化设备，其中工业级设备 SLPA-N 转速可达 30000 r/m，电极直径为 50～75 mm，球形度≥95%，熔化温度大于 2600 ℃，可生产高温合金、难熔合金等多种金属粉末[31]。国外 PREP 核心技术目前仍主要掌握在俄罗斯、乌克兰及美国手中，俄罗斯电机械公司的最新一代工业级 PREP 设备最大转速可达 40000 r/m，电极直径为 55 mm[32]。日本研究 PREP 技术的单位主要为东北大学，2020 年 Tohoku 公司在东北大学协助下开发了最新一代 PREP 设备，进一步提高了电极转速，其最高电极转速达到 40000 r/m，电极直径为 50～100 mm[33]。2022 年郑机所开发出 DXD-80 型非转移弧高速等离子旋转雾化制粉装备，自研出大功率非转移弧等离子炬热熔系统，弧温可调可控，可保护粉末中低熔点元素不受损耗。且棒料转速可实现 18000～32000 r/m 转速，电极直径为 50～80 mm，10～150 μm 粒度范围粉末收得率≥85%，流动性≤4.5～

13.5 s·50 g^{-1}，满足不同材质合金棒料的制粉工艺转速要求，单套设备钛合金日产能超过500 kg，高温合金日产能超过1000 kg[34]。2024年，中航迈特突破超高转速下电极驱动等关键技术，研发的新一代工业级AVI-PREP-4W型非转移弧等离子旋转电极设备将最高转速提升至36000 r/m，电极转速50～80 mm，细粉收得率达70%，日平均产量约1000 kg，球形度≥95%，制备的TA15粉末松装密度≥2.8 g/cm^3，流动性≤25 s·50 g^{-1})，面向科研的等离子旋转电极装备最高转速可达60000 r/m[35]。

目前国内外对PREP设备性能提升的方法报道较少，国内对于转移弧型PREP装备的优化，仍然通过降低运动机构不平衡引起的设备振动以提高设备的最大转速，如提高电极棒料加工精度、柔性联轴器、浮动辊动密封支撑单元等[36-37]。而对于非转移弧型PREP装备，在提高设备转速的同时关注等离子枪功率，提高焰流温度，解决难熔合金粉末的制备问题[38]。

2 PREP制备粉末特性研究

2.1 粉末组织及性能

PREP制粉过程中电极旋转速度快，液滴冷却速度高，因此PREP制得粉末的球形度更高。通过对比PREP[39-41]、UA[18]、EIGA[40]、VIGA[42]、PA[43]、WA[14]技术制备的粉末，如图2所示，发现PREP制粉技术得到的粉末颗粒直径分布范围较为集中，分布更加均匀，异形粉末占比极低，且粉末中几乎不存在空心粉末[44-46]，流动性更佳[47]，不仅如此，其球形度更高，氧含量和杂质含量更低。Wang等[48]分别采用PREP技术及GA技术制备了IN718合金粉末。经比较发现，GA技术制备的合金粉体中枝晶不连续且无序，而PREP技术制备粉体内部枝晶形态连续且更细[49]，且表面光滑，没有卫星球[39,50-51]，同时由成分分析表明，PREP制粉过程中，从电极到粉末没有任何明显的化学成分变化，可以制备出组织均匀、呈单一相组成且无宏观偏析的粉体[47,52]。

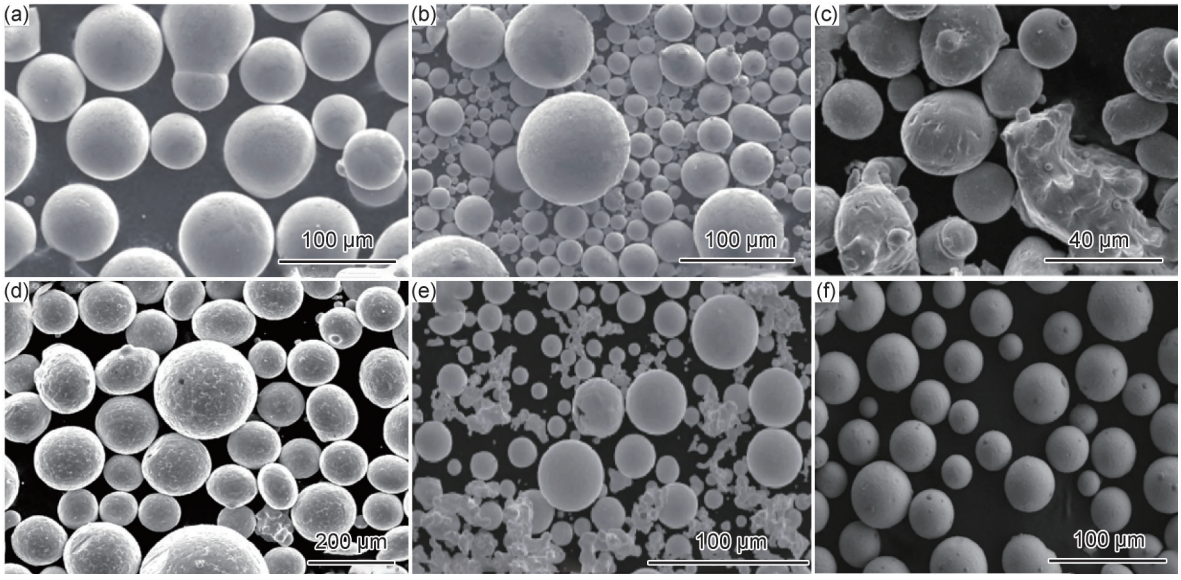


图2 不同方法制备粉末的扫描电镜照片

(a)等离子旋转电极雾化[40]；(b)电极感应气雾化[40]；(c)水雾化[14]；(d)感应熔炼气体雾化[42]；(e)等离子体雾化[43]；(f)超声波雾化[18]

Fig.2 SEM images of powders prepared by different methods

(a)PREP[40]；(b)EIGA[40]；(c)WA[14]；(d)VIGA[42]；(e)PA[43]；(f)UA[18]

通过扫描电镜观察PREP技术制备的不同粒径的粉末，由于不同尺寸液滴冷却速度存在差异，导致其表面形态和横截面微观结构有所不同[39,53]。大尺寸的粉末表面相对粗糙，其表面分布有半轴枝晶；而小尺寸粉末则表面更加光滑，内部含有更多的正交枝晶[41]。较小的颗粒由于较高的冷速倾向于得到更加光滑的表面[19]。除此以外，小粒径粉末凝固时产生的冷却收缩应力较小，不足以导致表皮的分离现象。北京科技大学陈焕铭等进一步研究了PREP技术制备的高温合金粉末的凝固组织特征，提出了二次枝晶臂间距和冷却速率之间的关系(式(1))，即随粉末局部凝固时间速度增大，没有充分时间发展二次枝晶，因此臂距减小[54]。进一步指出，随着粉末粒径减小，内部组织由树枝晶转变为胞状晶长大组织、微晶凝固组织为主、组织均匀化程度增加、二次枝晶臂间距(S)减小[55-57]，不同粒径的PREP内部凝固组织形貌如图3[41]。所示

$$S = 36.2\dot{T}^{-0.24} \tag{1}$$

式中：$\dot{T}$为合金粉末凝固冷却速度。

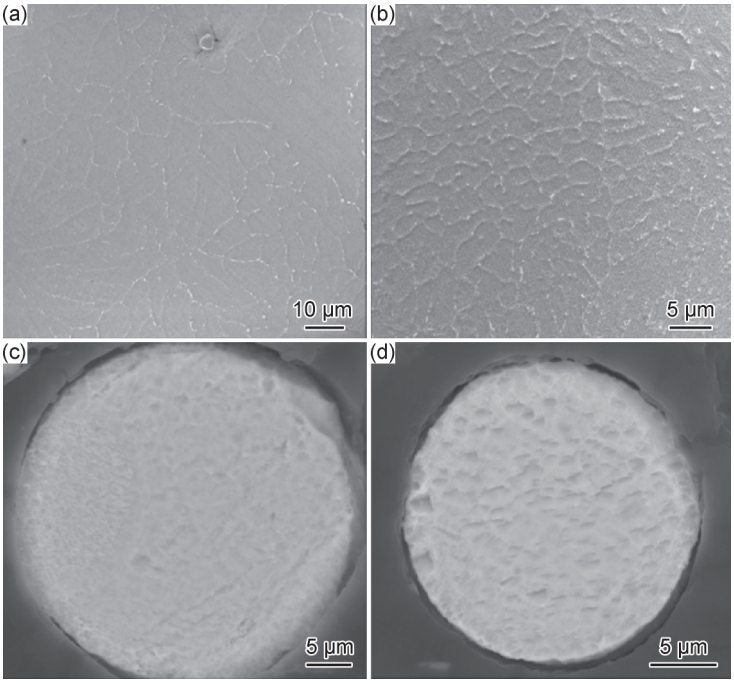


图3　不同粒径TiNi粉末内部凝固组织形貌[41]

(a)190 μm;(b)90 μm;(c) 40 μm;(d)20 μm

Fig.3　Internal solidification microstructure morphology of TiNi powder with different particle sizes[41]

(a)190 μm;(b)90 μm;(c)40 μm;(d)20 μm

不仅如此,冷却速率会对粉末中物相组成产生影响[41]。表现为随着颗粒尺寸的减小,PREP制备技术的粉末表面变得更光滑,所有粉末都呈现出均一的相组成。而颗粒较大的粉末中会含有额外的二次相。这是由于不同尺寸的粉末冷却速度有所差异,导致颗粒中相含量的变化[58]。冷却速率除了从相组成的方面影响颗粒硬度外,同样会从粉末中位错密度来影响粉末力学性能,较高的冷却速率能够抑制晶粒的粗化和再结晶,导致颗粒内部晶粒更细并具有更高的位错密度,从而通过晶界强化和高密度的位错来弥补相变可能带来的软化效应。虽然更高的冷却速率使得PREP技术粉末相较其他工艺中制备的粉末相组成更加均匀,但仍有少量偏析现象存在,这可以通过雾化过程中产生的径向温度梯度来解释[59]。这种温度梯度在圆盘中形成,导致外围区域发生熔化,而靠近中心的电极部位保持固态。在旋转过程中,温度在凝固范围内的部分电极表面会首先喷出共晶或接近共晶的成分液体,从而导致成分偏析。要确保熔体在离心力作用下平稳流动,通过控制电极的熔化程度至关重要,特别是在熔融面处保持熔体具有相对于旋转轴线的浅熔化面;使用偏心熔化方法,即让等离子体中心与电极旋转轴的中心对称,这可以提高粉末的均匀性[60]。

粉末的流动性是影响增材制造过程的重要因素,流动性过大或过小都会导致构件质量下降或生产效率降低。根据GB/T 38970～GB/T 38975系列标准,不同增材制造工艺对不同粉末粒度及流动性的具体要求有差异,通常用于选区激光熔融技术的粉末粒度范围为≤63 μm,流动性≤25.0 (s·50 g^{-1});用于电子束熔化技术的粉末粒度在45～150 μm,流动性≤20.0 (s·50 g^{-1});用于定向能量沉积技术的粉末粒度范围为30～250 μm,流动性≤15.0 (s·50 g^{-1})。SLM成型技术一般要求粉末球形度达到98%以上,而LMD技术则要求粉末球形度大于85%[61]。而粉末的形状及粒径分布是影响流动性的关键因素,因此可以通过改变制粉技术来控制粉末的流动性。通常认为球形度高且粒径较大的粉末流动性较好,而粒径相对较小的粉末流动性则较差。粒径过小会使颗粒间范德华力增大,恶化粉体流动性,因此在合适范围内,应合理增大粉末粒径获得更优流动性的粉末。平均粒径相同时,应采用尽可能窄粒度分布(particle-size distribution, PSD)的粉体,大PSD粉体中存在更多细粉颗粒,填充在较大颗粒的间隙中,使粉体呈压实状态,颗粒间相互咬合增强。球形度较高的粉末一般流动性较好,这是由于球形度的升高会导致颗粒与颗粒之间的接触面积降低,摩擦力减小。然而当平均粒径大于150 μm时,球形颗粒中加入细长颗粒,其流动性反而会得到改善[62]。

PREP技术制备的粉末被广泛认为具有高纯度及近乎完美的球形，但其粒度通常较粗（例如50～350 μm），而更精细的粉末通常采用GA、PA等其他技术生产[63]。不仅如此，PREP技术生产的粉末由于其更高的凝固速度，氧元素含量较其他方式制得的粉末更低，同样有助于提高粉末的流动性。Zhao等[64]采用GA、PA和PREP技术制备了Inconel718合金粉末并通过崩角数值对流动性进行了实验评估，并通过数值模拟得到崩角数值，基于此分析了颗粒尺寸分布、颗粒形态和表面特征对粉体流动性的单独影响。结果表明，PREP技术制备粉末有较小的崩角，制备的粉体具有最优的流动性，这得益于其较高的球形度。在流动过程中，卫星粉和异形粉的存在会大大加剧粉末之间的摩擦，降低粉末流动性；而堆积过程中，上述粉末的存在也会使得粉末之间的孔隙增大，降低粉末的松装密度和振实密度[65-66]。通常评估粉末流动性的指标除崩角外，还包括松装密度及振实密度，PREP技术制备的粉末表面较其他方法更加光滑，因此松装密度相对较高；PERP技术制备粉末的粒径较为集中，几乎不存在较小颗粒的粉末，其他方法制备粉末中含有粒径更小的颗粒，振实过程中，细小的颗粒填满缝隙，使粉末的振实密度更高[40]。

2.2 PREP粉末及其增材制造件力学性能

粉末是增材制造金属零部件的基础原料，其微观组织及性能会对增材制造件的力学性能起到决定性作用。孙勇等[65]对不同粉末的硬度进行了检测，PREP技术制备的粉末多为枝晶组织结构，而GA技术制备的粉末多为胞晶组织，组织结构的差异导致了PREP制备的粉末硬度高于GA制备的粉末硬度。不同的粉末组织结构也是导致增材制造零部件硬度差异的原因[65,67]。

除了粉末本身的性能差异，学者们对不同制粉方法收得粉末增材制造件的性能进行了表征。Ahsan等[22]对使用GA和PREP技术制备的两种Ti-6Al-4V粉末的激光增材制造（LAM）特性进行了比较研究。PREP粉末具有较高的沉积速率，沉积物显示出较低的层内孔隙率和较低的表面粗糙度。然而，PREP粉末沉积物的显微硬度低于GA粉末沉积物。Kenevisi等[68]对比了GA、PA、PREP粉末的SEBM件的密度、表面形貌及力学性能，结果发现，PREP技术制备粉末由于较低的空心粉率而得到了孔隙率最低且表面粗糙度更高的增材制造件，应力分布均匀，没有明显的应力集中区域。Yim等[69]对比了PREP和GA的Ti-48Al-2Cr-2Nb粉末及其粉末床熔融（PBF-AM）件性能，PREP粉末的静态和动态流动性能均优于GA粉末，而堆积密度和表面粗糙度略差。研究发现PBF-AM件的表面粗糙主要由粉末的PSD决定而非粒径。GA粉末的PSD较宽导致了更高表面粗糙度，高流动性且宽PSD的球形粉末是PBF-AM的理想材料。PREP粉末激光熔覆增材制造得到的块体具有良好的极限拉伸强度和失效伸长率。这得益于PREP粉末内部的等轴多晶结构导致的良好内聚力。

一些学者比较了通过GA和PREP技术制备的铬镍合金718粉末及其增材制造件性能的差距[39]。对比二者XPS光谱，可以观察到，GA粉末中氧、氮、硫含量较高，会对增材制造件的质量产生负面影响，这是GA过程中的高温液滴与空气接触发生氧化导致的，PREP粉末更接近理想球形，有助于获得更精细的微观结构和更明显的增材制造件的优先取向。通过拉伸、压缩和显微硬度测试，结果表明，PREP粉末的拉伸屈服强度、压缩屈服强度和平均显微硬度均高于GA粉末。在适当的工艺参数下，PREP粉末表面光滑、球形度更高、表观密度更高、流动性更好，可以获得比GA粉末更大的加工窗口和更稳定的力学性能[21]。

关于不同制粉工艺参数对粉末性能进而对增材制造件性能的影响，目前的研究仍较为有限。学术界尚未建立针对不同工艺制备的增材制造件所要求的粉末制备参数标准，导致对于工艺参数的具体要求仍处于相对缺乏的状态。因此，未来亟需对PREP工艺参数对粉末粒径、增材制造件组织结构及其性能的影响展开更为系统的研究，进而探索工艺参数与增材制造件性能之间的对应关系。这将为优化增材制造件性能提供理论基础和技术支持。

3 PREP工艺参数对粉体的影响

相较传统的制粉工艺，PREP制得的粉末球形度高，缺陷含量少，然而众多学者对PERP粉末的研究发现，粉末中仍然存在少量异形粉末、夹杂物等缺陷，这些异形粉对增材制造件组织和性能有较大影响。为了进一步阐明异形粉末产生的原因并探讨其解决方法，并根据不同的工业要求生产不同特性的粉末，定量研究工艺参数对粉末性能的影响十分重要。基于此，学者们通过实验和数值模拟的方法，调整了PREP过程中的工艺参数，并对收得的粉末性能进行了表征，总结了不同工艺参数对粉末的影响，其中构建的数值模型与实际情况吻合较好，为工业生产中精确调控粉末性能给出参考，学者们对PREP过程中工艺参数产生的影响进行了研究。

3.1　电极转速

电极转速的变化会导致棒料熔化形成的液滴受到的离心力作用不同，电极转速的升高会导致相对质量较小的液滴受到的离心力显著增大，更倾向于被甩出破碎，形成粒径较小的粉末。

电极转速的变化会影响制粉过程中的雾化机制，根据电极表面液膜形状，PREP过程中液滴雾化模式主要可分为三种：直接液滴雾化（direct drop formation，DDF）、韧带崩解（ligament disintegration，LD）、膜崩解（film disintegration，FD）[70-72]，如图4所示[72]。

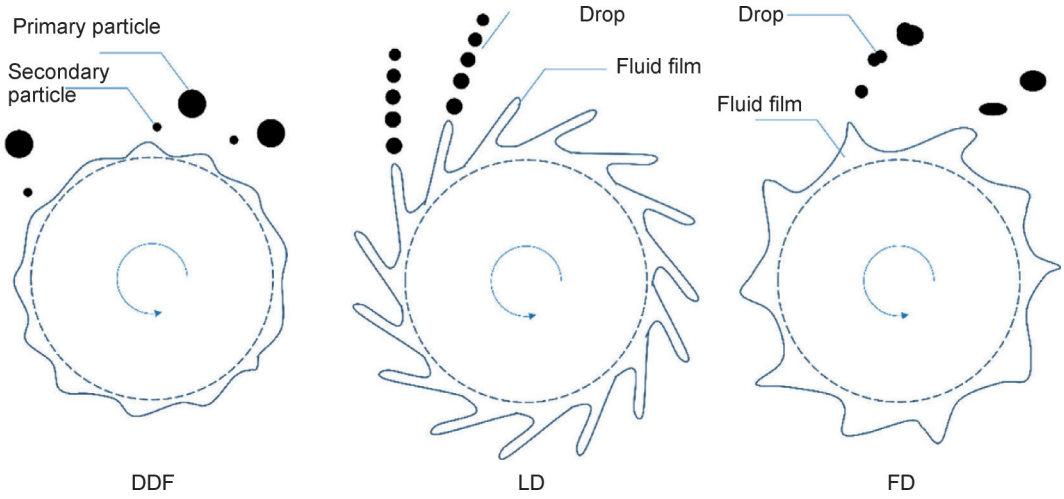


图4　DDF、LD和FD的典型离心雾化模型[72]

Fig.4　Typical centrifugal spray models for DDF，LD and FD [72]

DDF是电极表面液体较少时的雾化模式；LD是电极表面液体较多时的雾化模式；当液体量进一步增大，雾化模式转变为FD，液体的增多导致了不稳定的液流宽度增大，在电极表面形成了不稳定的液膜，被离心作用直接撕裂[70]。

当粉末雾化机制均为LD时，不同转速下制备的粉末粒径均呈现正态单峰分布，随转速增加粉末的平均粒径减小，而当电极转速增大到一定值后继续增大，粉末的平均粒径没有明显变化。电极转速除对粒径会产生影响外，其增大会降低制备粉体中空心粉的含量[73]。这是由于粒径较大的粉末中通常空心粉的含量更高。当电极转速更高时，液滴破碎飞出时线速度更高，液滴更小，在氩气被吸入液滴内部前液滴凝固，因此空心粉含量更低。电极转速的改变会导致液滴飞出时所受到的离心力和剪切力的变化从而影响粉末的球形度，这两个力即异形颗粒形成的主要因素[74]。

Nie等[75]利用SEM和CT等技术手段对不同工艺参数及合金成分PREP粉末的内部微观结构进行了表征。对8000、10000、12000、14000 $r\cdot min^{-1}$四种转速下制备的粉末进行筛选，分析其粒度分布。结果表明，随转速增大，粉体中小粒径粉末占比上升，各种转速下粉体中都含有少量卫星粉末和不规则粉末。观察粉体的横截面，发现较低转速下制备的粉体内部含有孔隙，较高转速下制备的粉末中则几乎不含孔隙。不同合金粉末采用同样的工艺参数制得的粉末微观结构仍有差异，316L与Co-Cr-Mo粉末中的孔隙直径都小于Ti-6Al-4V粉末[73]。而前者粉末内部含有多个这种小直径形状不规则的孔隙，后者粉末中则仅含有一个球形度较高的大直径孔隙。这是由于不同合金材料在同样的工艺参数下会得到不同比例和微观结构的空心粉末，这主要归因于合金的表面张力及密度不同。基于此，Nie等[73]对PREP技术制备金属粉末的颗粒缺陷的形成原因及相关性能进行了研究。空心粉占比与电极转速有高度相关性，这是由于粉末内部孔隙受液滴表面张力影响，而表面张力取决于材料种类及电极转速。当转速提高时，表面张力升高，由于增大的表面张力，细粉末不容易在内部形成孔隙，因此对于给定的合金，在低转速下中空粉末的数量分数在高转速下更大。实验对比了不同工艺制备粉末中氩的含量，以此推测合金对氩气的吸收程度，表征其与孔隙率的关系。150 μm以下的GA、PREP和PA粉末的氩含量分别为0.77±0.06、0.16±0.06、0.70±0.06 μg/g，孔隙率分别为0.20%±0.01%、0.08%±0.01%和0.12%±0.01%。同样采用PREP技术制备的粉末中，较粗的颗粒中更有可形成孔隙，孔隙的体积随颗粒尺寸而逐渐增加。粉末中具有孔隙的粉末的数量百分比随着转速的降低而逐渐增加。合金的表面张力（γ）

和密度(ρ)对孔隙特性起着关键作用。具有高γ/ρ的合金具有较大的平均粒径,这可能导致更多的粉末具有孔隙。同时,表面张力低的合金更有可能吸收氩气[76]。

Chen等同样研究了PREP设备转速与粉末粒径的关系,转速越高,得到的粉末粒径越小[72],粉体中卫星颗粒和不规则颗粒的占比越少[77-79]。Tang等[74]认为,PREP技术制粉中出现的不规则颗粒主要是由于雾化过程中,离心力和剪切力的作用导致液膜撕裂,形成扁平状或角状的不规则颗粒。但当转速超过一定值时,继续提高电极转速无法进一步降低平均粉体直径。

用PREP技术制备的FGH95高温合金粉末,随着自耗电极旋转速度的增加,粉末颗粒分布的分形维数呈线性增大,导致小颗粒粉末的比例增加[72];等离子枪与自耗电极间距的变化对粉末颗粒分布影响较小,相应地分形维数变化也较小。PREP技术制备的超合金粉末的颗粒分布的影响因素的研究表明,加工参数对超合金粉末的颗粒分布起着重要作用。这些参数包括旋转电极的旋转速度、自耗电极与等离子枪的间距等。通过对颗粒分布机制的研究,发现加工参数对颗粒形成过程中的断裂机制有很大影响。加工参数的变化对总分形维数的影响较小,而对颗粒分布的分形维数影响较大。

Zou等[80]表征了PREP技术制备的Ti-6Al-4V合金粉末常规性能及热等静压加工性能。不同转速得到了不同粒度分布的合金粉末。结果表明,小颗粒的比例随着转速增加而提升,尺寸分布在100～150 μm的粉末制备的合金具有最佳的力学性能。较高转速下粉末内部的细晶组织为成型件提供了伸长率[80-81]。

转速对粒径分布的影响不仅限于粒径分布的峰值向小粒径移动。随着转速增大,颗粒尺寸的分布范围也越来越窄[82-83]。由于PREP过程中冷却速率极大,在粉末中形成了亚稳相。而随着转速增大,颗粒直径减小,比表面积增大,使得颗粒在凝固过程中更易受到环境中元素的污染,杂质元素含量上升。

3.2 电流大小及气体流速

制粉过程中电流大小会影响电极的熔化速率,导致颗粒的形成方式改变。在较高熔速范围内喷涂时,细粉产率增加[84],然而尽管此时形成的粉末粒径更小,但在该模式下形成的液滴更易凝固为异形颗粒,这是由于韧带不稳定受到离心力作用所导致的,韧带断裂后甩出,液滴受到更大的离心力及剪切力。蒋保林等[85]的研究表明,电流大小对粉末的PSD没有显著影响,而随着电流强度增加,平均粒径增加,电流的增加使得合金自耗电极的熔化速度加快,影响了电极表面液膜厚度及粒子甩出过程,较厚的液膜诱导了飞行液滴粘连,导致粉末粗化。

在以氩气为介质的情况下,平均粒径随气体流量先减小,而当气体流速越过110 L·min^{-1}继续上升时,平均粒径随气体流量增大而增大[86]。在He介质情况下,平均粉末直径最初随着气体流速从0～70 L·min^{-1}而减小,然后随着气体流量从70～160 L·min^{-1}而增大。平均粉末尺寸的变化是由额外的Ar/He气体流动引起的不同冷却和扰动效应引起的,气流增加了对流传热,提高了熔融金属的冷却速度。结果表明,需要提高电极速度和尺寸才能获得精细粉末。

根据已有的研究,陶宇等[87-88]对PREP制粉的转速、电流、气体流量等技术参数进行优化,将FGH96合金粉末在50～100 μm的收得率提高了12%,在兼顾设备特性和生产效率情况下,棒料转速控制在14000 r·min^{-1}左右,等离子弧电流在1200 A左右,等离子工作气体流量为80 L·min^{-1},等离子枪与棒料端部距离控制在10 mm左右时,可获得较高的50～100 μm粉末收得率。

3.3 数值建模分析

为了给出粒径分布与PREP过程工艺参数的定量关系,学者们建立了PREP雾化制粉的数值模型。现有的PREP雾化模型基于离心模型建立,不同的雾化模式中采用的模型并不相同,平均直径采用的公式不同。在DDF模式下,粉末粒度呈现为典型的双峰分布[50,55,89-90],LD机制得到的粉末更细,呈单峰分布,而不同的工艺参数则会导致不同的雾化机制[91]。

不同雾化机制下形成的粉末颗粒尺寸有显著差异,因此可以从工艺参数对雾化机制的影响推测其对粉末性能有直接影响。现有学者用统计式(2)近似确定了不同工艺参数对粉末雾化机制影响的经验式[92]:

$$\mathrm{Hi}=\frac{\mu^{0.17}Q\rho^{0.71}\omega^{0.6}}{\gamma^{0.88}D^{0.68}} \tag{2}$$

式中:Hi为无量纲参数;μ为液态金属黏度;Q为熔化速率;ρ为密度;ω为转速;γ为液态金属的表面张力;D为旋转电极直径。当Hi＜0.07时,主雾化模型为DDF,0.07＜Hi＜1.33时,主雾化模型为LD,Hi＞1.33时,主模型为FD。

近年来,许多学者研究了不同工艺参数对粉末性能的影响[93],并得出了一般规律。调整制粉过程中的工艺参数,可以提高特定粒度粉末的收得率[94-95]。Cui等[96]将实验和数值模拟方法相结合,探讨了PREP过程中粉末形成的不同因素。通过调整电弧电压、电流大小、气体流量等工艺参数可以调控颗粒直径,针对

颗粒直径与工艺参数之间的关系给出了在LD雾化机制下，预测粉末平均粒径d。

$$d=\frac{k}{\omega}\sqrt{\frac{\gamma}{\rho D}} \tag{3}$$

式中：k为经验常数，与材料和雾化过程有关。

根据式(3)，减小粉末平均粒径的方法主要为增大电极转速或电极直径，目前采用的方法为增大电极转速，当电极转速过大时，粉末雾化形式会向FD发生转变，因此在设备运行良好的状况下应尽量减小电流强度、增大电极直径。截至目前，PREP设备提高细粉收得率的手段仍为提高电极转速，但电极转速过高时会增大PREP粉末形成时相邻液滴相互碰撞的可能性，这会导致粉末平均粒径的升高。为了减小这种负面影响，可以通过增大电极直径进一步增大细粉收得率[86]。

在DDF模式下，熔融金属形成一个沿着电极表面的连续薄膜。当这个薄膜因旋转而受到的离心力超过其表面张力时，膜就会破裂雾化成微小液滴。这种形式的雾化倾向于产生较为均匀且球形的粉末颗粒。DDF通常会产生较大尺寸的粉末颗粒，不适用于对粉末粒径尺寸要求严格的场景。LD形成的粉末通常颗粒更小，形状接近于球形，化学成分更加均匀，由于液滴在飞行过程中直接冷却，冷却速率相对较高，这有助于形成细小的晶粒结构，可能提高材料的力学性能。FD模式通常发生在电极旋转速度不够高或熔融池较大的情况下。此时产生的颗粒往往大小不一、形状不规则。此时电极棒表面液膜较厚，液体流动状态失稳，甩出后易形成不规则的片状粉末，应尽量避免。

通过控制粉末的直径，工艺参数可以进一步影响粉末的孔隙率。Liu等[92]研究了一种新的PSD模型，用于计算镍基高温合金粉末等离子体旋转电极过程中的粉末产率。在PREP工艺制备粉体的过程中，转速会对粉体粒径产生直接影响，进而影响粉体中内部含孔隙粉末的占比。此外，颗粒尺寸和合金类型也会影响粉体内部孔隙的特征。

除了电极的转速和直径外，控制等离子体电弧电流(即熔化速率)也是控制PREP粉末尺寸的有效方法[96]。在已有的操作条件下，PREP制粉工艺中可以保持电极熔化速率恒定并能精确控制其速率，电功率越高，电极熔化速率越大。除了不同类型金属电极的旋转角速度不同之外，研究者们还根据电极直径、熔化速率及接近金属熔点温度下的液体密度和表面张力提出了这种方法收得粉体粒径的实验公式。学者们基于计算热流体动力学的数值模型分析了颗粒化行为[97]，引入了气流和电极端面形态在流体造粒中的作用。不同材料在相同的电极参数下会得到不同大小的颗粒，这与合金的表面张力和密度有关。模拟表明，随着电极端面凹陷深度的增加，离心力和黏性阻力沿径向的合力增强，有利于破坏流体稳定性，从而促进细粉末的形成。

PREP技术常被用于制备Ti-6Al-4V球形粉末，其粒度符合对数正态分布[92]，通过实验对该模型的准确度进行预测，仿真模型方程拟合得到的对数正态特性与实际得到粉末的粒度分布十分相似，该工作的函数可以用于准确预测PREP方法得到的颗粒粒径分布式：

$$F(a,b)=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(-\frac{\ln b-\ln d_{\mathrm{average}}}{\sigma\sqrt{2}}\right)-\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(-\frac{\ln a-\ln d_{\mathrm{average}}}{\sigma\sqrt{2}}\right) \tag{4}$$

式中：erfc为互补误差函数；参数σ通过经验得到；d_{average}为平均粒径；随机尺寸范围(a,b)的分数可以通过参数σ模拟得到。

根据式(2)和式(3)，控制液滴雾化形式及粉末粒径的工艺参数主要有电极转速、电流大小、电极直径。电极转速及电极直径控制粉末平均粒径，而电流大小对平均粒径没有影响，主要用于控制粉末PSD宽窄。为了进一步细化粉末，常用的改变工艺参数的方法有增大电极转速和电极直径。而电极转速过大时会导致相邻液滴黏连，进一步引发粉末形态恶化、粒径变粗。根据目前的研究，较稳定且能形成PSD更小粉末的雾化模式为LD模式，而提高电极转速会导致Hi值的升高，为避免粉末雾化模式向FD模式转变，在提高电极转速的同时应当增大电极棒的直径，使雾化模式保持为LD。当固定电极转速不变，增大电极直径细化粉末时，需同时提高电流强度，在保证电极熔化均匀的同时避免雾化模式向DDF转变，粒径形成双峰分布，使粉末PSD变宽。通过调整PREP过程中的工艺参数，粉末可较好满足PBF-AM工艺对粉末的平均粒径及宽PSD要求。SEBM和DED工艺对于粉末不同的平均粒径要求，和较窄的PSD分布和内部组织为较细等轴晶的要求。PREP工艺制备的粉末因其极高的冷速得以满足内部等轴晶组织的要求，因此相对其他制粉方法更适合于多种增材制造工艺[98]。

在PREP过程中影响难熔合金细粉收得率的工艺参数较多，除电极转速、电流大小等，电极直径、冷却气体比例、进给速度及熔体自身性质均会对粉末收得质量产生影响，因此通过调整工艺参数精确控制

PREP 粉末粒径难度较大，仍是未来发展方向之一。而目前对于 PREP 工艺参数的研究较为局限，多数仅包括电极转速对粉末粒径分布的影响，但关于其他工艺参数（如电流大小、电极进给速度、冷却气体流速及气体类型）对粉末力学性能的影响鲜有报道。而目前所采用的数值模型仍只考虑了电极转速及金属熔体本身的流动性特征对粉末收得质量的影响。PREP 过程中粉末的雾化行为主要由电极表面的液膜形态决定，可以结合仿真及高速相机分析工艺过程中液滴的雾化行为，进一步解释不同工艺参数对收得粉末状态的影响机制，并通过粒子雾化过程中的行为（如维度、形貌、速度、飞行轨迹等）反馈指导工艺优化。提高最高转速的同时需适当提高雾化过程中的电流大小，使电极熔化速度与液滴冷却速度平衡，得到更为均一稳定的粉末。对粉末在等离子体旋转电极雾化处理过程中的飞行轨迹和吸热放热过程进行进一步分析，提高粉末的球形率。降低金属熔体的表面张力也是提高细粉收得率的途径之一，在设备参数不变的情况下，适当添加合金元素（如锌、铅、锡、铝等）或稀土氧化物改善金属的润湿性以降低熔体表面张力[99]，控制气氛。另外可以尝试叠加超声场的方式降低熔体的表面张力，对细粉收得率进一步提高。

4 PREP 粉末在增材制造领域的应用

PREP 技术制备的粉末粒径集中，空心粉占比少，球形度高。粉末内部几乎没有气孔，因此即使是增材制造件也具有与 HIP 处理的打印材料相同或更好的高疲劳特性。通过跳过热处理过程，还可以通过保持精细结构来保持高抗拉强度[100]。这种粉末的增材制造件缺陷少、力学性能优越，因此被广泛应用于航空航天、轨道交通、生物医疗等装备制造。

4.1 航空航天领域

PREP 技术被广泛应用于制备镍基、钛基高温合金粉末，这些材料具有优异的高温强度和抗氧化性能，适用于增材制造生产飞机、航天器和发动机的关键部件，如涡轮叶片、燃烧室衬垫等；同时，该技术制备的高性能铝合金及钛合金粉末因其轻质高强的特性，可用于飞机结构件的增材制造，以降低飞机质量，提升航天器的燃油效率和载重能力[101]，部分 PREP 粉末制备的航空航天用零件如图 5(a)所示。20 世纪末，PREP 技术制备的钛合金粉末已由于其粉末粒径均匀且尺寸小的优点，成功应用于航空涡轮发动机量产飞机发动机的壳体、环和叶片等非旋转的关键部件，这些部件在极高温度下运行，在保证其耐热性的同时对强度也有较高的要求。PREP 技术制备的镍基高温金属粉末已经成功应用于发动机轴类零部件，航空器发电机系统和辅助动力装置、定子和转子组等航空航天关键零件的生产[102]。高性能材料可以在不影响性能的情况下设计出更小、更轻的电机和仪表，实现功率密度更高、体积更小、质量更轻的发电机和辅助动力装置，从而增加航空器航程。贺等[97]用 PREP 技术制备了高铌 TiAl 粉末，这种粉末在高温下具有优异的抗蠕变性能和断裂韧性，因此常被用于制造飞机发动机的转子部件，作为涡轮叶片。据报道，采用 PREP 制备的总零件数已超过 4 万件，工作时长超过 100 万 h[103-104]。中航迈特采用高性能粉末通过增材制造技术生产了航空发动机燃油喷嘴，对传统生产工艺进行优化，对燃油喷嘴整体减重，提升了航空发动机的效率。NASA 使用金属增材制造技术制造了部分火箭引擎零部件，如燃烧室和喷嘴。SpaceX 使用金属增材制造技术制造超级重型火箭的一些关键零部件，包括推进器部件和发动机零部件。采用这种先进技术能够快速制造高度定制化的零部件，提高了火箭的性能和可靠性[79]。

航空航天热端部件服役工况严苛，常暴露在高温高压环境下，易产生力-热耦合导致的构件失效，而难熔金属粉末因其优秀的耐高温性能而被广泛用于航天航空。PREP 制备的粉末在航空航天应用中主要存在的问题仍为粉末粒度范围窄，应优化粉末制备工艺，拓宽粒度范围，提高材料利用率，降低部件制备成本。目前非转移弧型等离子虽然在细粉收得率上实现了重大突破，而在难熔合金制备方面仍然存在短板，其结构局限性导致了电极棒温度受限。通常难熔金属粉末的制备采用转移弧型 PREP 设备实现，而转移弧设备转速受限，通常收得粉末较粗。目前一些专利公开了 PREP 技术制备难熔金属粉末的参数及其对应粒径：2023 年，西安建筑科技大学[105]所采用的钽粉制备工艺参数：转速为 30000～42000 $r\cdot min^{-1}$，电流 800～1000 A，进给速度 1.2 mm/s，粒径为 10～100 μm；张衍诚[106]采用向钨内掺杂沸点较低的金属元素以降低合金沸点，获得粒度更细的钨金属粉末，且由于掺杂金属沸点较低，在制备粉末过程中气化，对钨粉末纯度影响不大，PREP 过程进料速度 1.0～1.4 mm/s，电流 3800～4000 A，转速 18000～20000 r/m，粒径 50～150 μm，可以看出采用目前的参数制备的 PREP 粉末细粉收得率仍然难以满足 SLM 工艺的要求。结合上文，颗粒中可能有较多枝晶结构而非胞晶，除对粉末流动性的影响外，还会使得制造件硬度下降。因此研发同时具备大功率、高转速的 PREP 设备至关重要。

在现有设备的基础上通过调控工艺参数同样是一种控制粉末粒径的可行方法。

4.2　生物医疗领域

PREP＋SEBM为临床治疗方面提供了新思路和新方法。这种工艺流程制备的打印件具有设计自由度高、批量生产成本低、制造精度高、零件内应力低、相容性好等优势，可以满足医疗领域标准化、个性化、精准化的医疗需求。

生物医疗方面，PREP制粉的优势在于该种粉末相组成均匀单一，不含由粉末引入的杂质元素，避免了最终增材制造件元素不均形成的脆性相进而引发构件力学性能不满足使役要求，且PREP粉末微观结构多为细晶组织，增材制造件力学性能对比其他粉末制件更优越，适用于生物医疗中的骨关节制造。

Kenevisi等[68]用PREP制备的镍钛记忆合金粉末已被证明可以用于生物医学设备，其球形度高表面光滑，无脆性相，且在体内实验中无细胞毒性且细胞相容性良好。杨广宇等[107]用PREP粉末采用增材制造制备了不同孔结构的医用合金，其性能与人造骨匹配良好，且为细胞提供了良好的生长环境。21世纪初，日本学者采用PREP工艺制得的粉末烧结成了用于生物医学应用的和人骨杨氏模量相同的多孔钛压坯，有利于骨细胞在人造骨的间隙中正常生长[108-109]。西安赛隆于2019年率先采用PREP技术制备出超低氧含量医疗级球形钽粉（氧含量小于50 mg/L），支持完成国际首例电子束增材制造钽植入物和临床应用[110]，植入物包括人造关节及垫块、髋臼杯、椎间融合器等如图5所示。其制备的构件零件内应力低、相容性好，可以满足生物医疗的需求。骨科植入体不仅需要具备优异的生物相容性，还需要在生物环境中表现出出色的力学性能和耐腐蚀性，并具有较长的使用寿命。PREP制备的钛合金粉末能够在各种制造方法中保持高强度和出色的耐磨性，从而在使用寿命内实现一致的性能。Carpenter Technology公司通过PREP制备了多种高性能金属粉末，如钛合金和镍基合金。这些粉末纯度高，且其他金属元素的含量可控，生物相容性良好，可用于牙科基台和螺钉等医疗器件，具备良好的耐腐蚀性和抗破裂性，特别适合对金属敏感的患者。该公司还采用增材制造技术进行组件和患者匹配植入物的生产，通过使用PREP技术制备的低氧含量粉末并优化增材制造参数，能够将植入体的力学性能提高15%～20%。用于医疗植入体的镍钛记忆合金粉末具有超弹性和形状记忆性能，更适合用作植入体材料[111]。

PREP技术制备的同批次粉末的性能一致性和稳定性好，可满足多种类型金属粉末的小批量的研制生产，现已被大规模应用于生物医疗方面的定制化需求。用PREP粉末制备的增材制造件孔隙率低，屈服强度与人类皮质骨相近，制备的多孔Ta表面上有蛋白质高度表达及细胞生长，表明PREP技术制备的金属粉末经增材制造后可作为人造骨的有效替代材料。钽金属由于其稳定的理化性质、优良的生物力学性质常被应用于生物医疗方面组织缺损的重建，而PREP制备的高性能钽粉纯度高，缺陷少，可以进一步提高增材制造件性能。广州赛隆增材制造有限公司近3年为国内20余家三甲医院提供了1000余例植入物，成功投入临床应用，包括增材制造个性化的骨骼修复肩胛带不定性骨重建，钽垫块辅助髋外科脱位入路下髋臼造盖术等[107]。骨科植入体不仅需要生物相容性，还需要在生物环境内具有出色的力学性能和耐腐蚀性，同时需要具有较长的使用寿命，因此需要极高耐磨性和抗疲劳性的材料[112]。PREP钛合金粉末制备的构件，无论采用何种制造方法都能保持更高的强度和出色的耐磨性从而在使用寿命内实现一致的性能。

除了医疗植入体外，高性能粉末通过增材制造技术还可用于制造复杂的手术导向工具，如手术夹具、定位器、手术刀、镊子等。此外，这项技术还适用于制造腰椎或心脏支架，增材制造的产品相比传统成型件，更加贴合人体解剖结构，且加工工艺简单，为医疗行业提供了更具创新性和个性化的解决方案。

4.3　核工业及能源行业领域

钛合金粉末和镍基粉末在高性能电池的制造中扮演着重要角色，特别是在开发高能量密度和长寿命电池方面。PREP技术为这些电池的制造提供了稳定且可控的金属粉末来源，可用于生产燃料电池的关键组件，如催化剂和电极，PREP粉末优势在于成分稳定，杂质元素含量低，粉末内部由细小胞晶组成，较其他粉末能更好满足增材制造件力学性能要求。这些高质量的金属粉末能够显著提高燃料电池的性能和效率。此外，PREP技术还可用于生产太阳能领域所需的金属粉末，如光伏电池和热能储存系统。通过增材制造技术制造太阳能电池组件、支架结构和散热器，不仅可以提升太阳能设备的性能，还能降低生产成本，进一步推动太阳能技术的发展。

在核能领域，PREP制备的U-7Mo粉末已经被成功应用于弥散型核燃料板的批量生产。研究表明，使用PREP技术生产的粉末相比其他机械方法生产的粉末，具有更少的内部孔洞缺陷，从而提升了核燃料板的质量。2016年，中国核动力研究院与南方增材科技有限公司合作，通过增材制造技术成功制造了核反应

堆压力容器。该项目通过了国际核电规范RCC-M和ASME的严格要求，制造出了超低碳、超细晶且组织均匀的金属构件，其成品质量甚至超越了部分传统工艺产品[113]。2018年初，中广核公司与合作伙伴利用增材制造技术生产出核电站空气压缩机制冷机端盖，并成功应用于大亚湾核电站[114]。这一成就标志着我国在核能领域的自主研发和生产能力进一步提升，摆脱了对国外技术的依赖。增材制造技术已经在核能行业展现了巨大的潜力，为核电厂提供了更高效、更精准的制造方式，同时也为增材制造技术在高端制造领域的应用开辟了新的路径。2022年，在新冠疫情和俄乌冲突的背景下，捷克能源公司和斯柯达公司使用增材制造技术成功制造了上千个金属部件[115]，用于核电厂的非核关键部件，确保了在安全供电的同时缩短了停机维护时间，并增加了发电量，部分零件如图5所示。斯柯达公司还表示，未来有望利用增材制造技术生产核电厂的核关键部件，这为核能领域的制造技术创新带来了新的可能性。

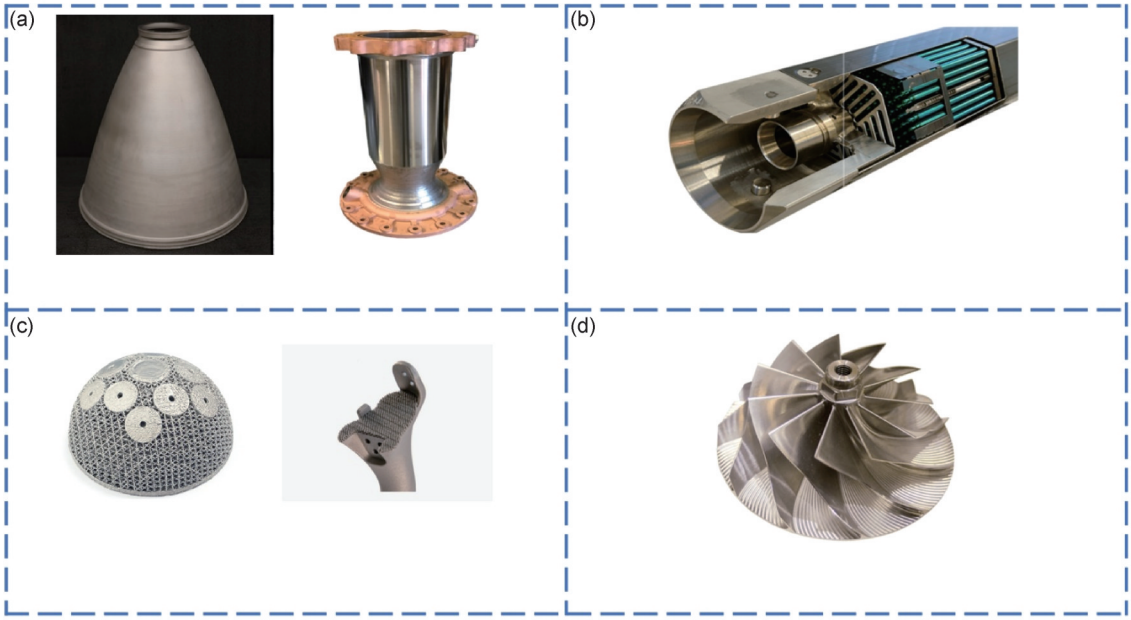


图5 使用PREP粉末制备的零件[101,107,111]

(a)火箭轻型推力室组件；(b)核能发电部件；(c)钛髋臼杯和膝关节；(d)涡轮叶轮

Fig.5 Parts prepared by PREP powders[101,107,111]

(a)light thrust chamber assembly for the rocket; (b)nuclear power generation components; (c)titanium acetabular cups and knee joints; (d)turbo impeller

与传统铸造方法相比，采用PREP粉末进行增材制造的叶轮不仅能够改善力学性能，还能够缩短制造交货时间，从而减少设备停机时间并提高整体生产效率。在能源行业，复杂的阀门内件通常用于调节阀门压力和降低声压，传统制造技术需要设计并焊接多块板材，工艺复杂且效率较低。增材制造技术通过简化零件装配并消除对焊接的需求，大大优化了生产流程。传统的阀门和配件生产方式限制了加工设施的效率，其微小的压力损失会在液压系统中逐渐累积，而增材制造则能够通过计算流体动力学优化复杂的流动几何形状，提高系统的整体效率。

除了在太阳能电池和核工业中的应用外，金属增材制造技术还在风能行业中展现出巨大的应用潜力。例如，风力涡轮机叶片、发电机部件和轴承等关键部件的制造，都可以通过增材制造技术实现。这不仅提升了风能设备的性能，还为风能行业提供了更高效的制造解决方案。

4.4 汽车民用领域

金属增材制造技术在汽车制造领域得到了广泛应用，尤其是在实现车体轻量化方面，如用于制造发动机零件、制动系统组件和底盘结构等。在汽车行业中，随着发动机峰值气缸温度和压力的不断增加，对发动机材料的耐热性和耐磨性提出了更高要求。采用等离子旋转电极工艺制备的铁、镍、钴基粉末因其优异的耐磨性和耐热性，成为汽车发动机气门制造的重要材料选择。PREP粉末相较其他方法制备的粉末孔隙率低、显微硬度高，更适用于严苛环境下零件的增材制造。

PREP技术不仅能够用于制造轻质高强度的汽车部件，从而提高燃油效率并减少排放，还可以为发动机部件和其他高磨损汽车部件生产耐磨涂层，从而延长其使用寿命。此外，通过PREP或REP技术生产的

金属粉末，还可用于制造印刷电路板、连接器和传感器等电子元件的导电材料[116]。这些工艺也适用于生产电子应用中的磁性材料，包括数据存储设备、电机和变压器等[116]，如图5所示[101,107,111]。

增材制造技术在汽车行业的应用不仅限于设计和制造阶段，还对维修与改装等方面产生了深远影响。传统模具开发通常伴随着高成本和长时间的问题，而增材制造技术的引入显著提高了维修效率，降低了成本，解决了维修过程中的瓶颈问题。例如，采用PREP粉末制备的铜制感应线圈和感应器被广泛应用于汽车传动、电器电极和热处理生产等领域。利用低孔隙率的PREP粉末和SEBM结合，成功克服了传统工艺中存在的零件熔化不良、致密度低和孔洞多的问题。通过PREP和SEBM技术制造的感应线圈，不仅成型质量优越、致密性好，而且其使用寿命是传统拼焊线圈的2～3倍[107]。

此外，PREP技术制备的钨、钼等难熔金属粉末，因其高熔点和良好的导电性，广泛应用于电子元器件的制造，如集成电路的引线框架和电极材料，对比GA、WA等制粉技术，PREP制粉技术适用范围广，可以用于难熔金属制备的电子元器件。这些应用展现了PREP技术在提升材料性能和扩大应用领域方面的巨大潜力。

5　结束语

经过多年的发展，我国PREP设备技术水平取得了长足的发展，转移弧及非转移弧方向的等离子旋转电极雾化制粉设备均在设备转速、等离子枪功率方面实现重大突破，设备在设备转速、生产效率和粉末质量方面表现优异，达到国际先进水平。制备的粉末在航空航天、电子材料、生物医疗、轨道交通等多个领域实现应用，并取得良好的效果。尽管我国的PREP装备及技术已得到了较大进展，但在53 μm以下的粉末收得率仍有上升空间，目前PREP制备的粉末粒径及细粉收得率仍然难以满足SLM技术对细粉的需求，因此进一步提高设备性能、优化工艺参数仍然是未来的发展方向，主要表现为以下几个方面：

(1)进一步提升非转移弧型设备等离子枪功率以扩大其适用范围，使之能够制备难熔金属粉末。优化转移弧型设备的动密封系统，降低因振动或滑动导致的粉末中电刷碳粉污染，改进等离子枪设计，实现更均匀的等离子体分布以减少雾化过程中电极表面形成的温度梯度导致的成分偏析，从而提高粉末的成分一致性和性能。

(2)优化PREP设备在处理多种材料时的工艺参数，掌握合金、复合材料和难熔金属的雾化机制和优化设备设计，使设备能够灵活应对各种复杂材料的加工需求。针对工艺调控方面，除电极转速外，对电流大小、气体流速、冷却气体类型、电极进给速度的系统研究也应同步开展；同时应通过仿真与实验手段相结合以掌握电极表面液膜行为，为优化工艺提供理论指导；此外可以掺杂合金或稀土氧化物改变熔体性质或外加超声场，提高细粉收得率。基于上述研究，建立成体系的工艺参数—粉末性能—增材制造件性能的对应关系，构建系统的数据库，指导增材制造件性能优化；推动粉末朝着高纯、细化、窄粒度、少夹杂、高球形度以及高效率和低成本的方向发展。

(3)随着设备和技术水平的提升，需加强等离子旋转电极雾化制粉领域的标准化建设，通过建立PREP设备、粉末制备工艺以及粉末应用相关的国际、国家以及行业标准，掌握行业的话语权。同时，随着产业链的完善和规模化生产能力的提高，国产设备在国内外市场中的竞争力得到提升，推动我国等离子旋转电极雾化技术的广泛应用和推广。

(4)随着增材制造技术的成熟以及相关市场的飞速增长，国内外市场对高性能金属粉末需求不断增加，进一步推动PREP技术领域的发展。PREP技术制备的高质量粉末技术已逐渐应用于航空航天、医疗器械和轨道交通等多个领域。随着国家“十四五”战略实施，以及战略性新兴产业发展的实际需求，应推动PREP技术在工业母机、民生高端装备等领域中落地应用。

参考文献

[1] 王磊，卢秉恒. 我国增材制造技术与产业发展研究[J]. 中国工程科学，2022，24(4)：202-211.
WANG L，LU B H. Development of additive manufacturing technology and industry in China[J]. Strategic Study of CAE，2022，24(4)：202-211.

[2] MANYIKA J，CHUI M，BUGHIN J，et al. Disruptive technologies：advances that will transform life，business，and the global economy[R]. San Francisco：McKinsey Global Institute，2013.

[3] SOUNDARAPANDIYAN G，LEUNG C L A，JOHNSTON C，et al. *In situ* monitoring the effects of Ti_6Al_4V powder oxidation during laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture，2023，190：104049.

[4] HOJJATZADEH S M H，PARAB N D，YAN W，et al. Pore elimination mechanisms during 3D printing of metals[J]. Nature Communications，2019，10：3088.

[5] SON J Y，LEE K Y，LEE S H，et al. Effects of oxidized metal powders on pore defects in powder-fed direct energy deposition[J].

Micromachines, 2024, 15(2): 243.

[6] 吴伟辉, 杨永强, 毛星, 等. 激光选区熔化增材制造金属零件精度优化工艺分析[J]. 铸造技术, 2016, 37(12): 2636-2640.
WU W H, YANG Y Q, MAO X, et al. Precision optimization process for metal part manufactured by selective laser melting[J]. Foundry Technology, 2016, 37(12): 2636-2640.

[7] YAN M, DARGUSCH M S, EBEL T, et al. A transmission electron microscopy and three-dimensional atom probe study of the oxygen-induced fine microstructural features in as-sintered Ti-6Al-4V and their impacts on ductility[J]. Acta Materialia, 2014, 68: 196-206.

[8] GRUBER H, KARIMI P, HRYHA E, et al. Effect of powder recycling on the fracture behavior of electron beam melted alloy 718 [J]. Powder Metallurgy Progress, 2018, 18(1): 40-48.

[9] 尹燕, 刘鹏宇, 路超, 等. 选区激光熔化GH4169粉体特性及成型件组织结构的研究[J]. 热喷涂技术, 2017, 9(3): 56-62.
YIN Y, LIU P Y, LU C, et al. Study on the characteristics of GH4169 powder and the microstructure of molded parts[J]. Thermal Spray Technology, 2017, 9(3): 56-62.

[10] MATHIAS L E T, PINOTTI V E, BATISTÃO B F, et al. Metal powder as feedstock for laser-based additive manufacturing: from production to powder modification[J]. Journal of Materials Research, 2024, 39(1): 19-47.

[11] 程爽爽, 王帅, 顾晓春, 等. 激光选区熔化成形TA15材料缺陷类型研究[J]. 金属加工(热加工), 2023(12): 31-38.
CHENG S S, WANG S, GU X C, et al. Study on defect types of TA15 material by laser selective melting forming[J]. MW Metal Forming, 2023(12): 31-38.

[12] ZHAO Y, AOYAGI K, DAINO Y, et al. Significance of powder feedstock characteristics in defect suppression of additively manufactured Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101277.

[13] 蒋保林, 蒋崴, 许荣玉, 等. 真空气雾化法制备$AlSi_{10}Mg$粉末参数优化及打印态组织性能研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(2): 96-103.
JIANG B L, JIANG W, XU R Y, et al. Optimization of parameters and printed microstructure and properties of $AlSi_{10}Mg$ Powder prepared by vacuum atomization method[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2024, 16(2): 96-103.

[14] PERSSON F, HULME C N, JÖNSSON P G. Particle morphology of water atomised iron-carbon powders[J]. Powder Technology, 2022, 397: 116993.

[15] DE MORAIS W A, FALCÃO R B, BOCCALINI M Jr, et al. Fatigue behaviour of additive manufactured Nb-48Ti alloy parts from powders produced by plasma atomization (PA) and hydride-dehydride (HDH) process[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 156: 107762.

[16] 熊孝经, 杨季鑫. 离心雾化制备纯Ag粉末特性及3D打印性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(10): 1357-1361.
XIONG X J, YANG J X. Powder characteristics and 3D printing performance of pure Ag fabricated by centrifugal atomization[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(10): 1357-1361.

[17] FAN X, TIAN Q, CHU X, et al. Microstructure and mechanical properties of $Co_{31.5}Cr_7Fe_{30}Ni_{31.5}$ high-entropy alloy powder produced by plasma rotating electrode process and its applications in additive manufacturing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 31: 1924-1938.

[18] ŻRODOWSKI Ł, WRÓBLEWSKI R, CHOMA T, et al. Novel cold crucible ultrasonic atomization powder production method for 3D printing[J]. Materials, 2021, 14(10): 2541.

[19] 邹黎明, 毛新华, 胡可, 等. 采用图像分析技术对球形Ti-6Al-4V粉末粒形的定量分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(3): 950-955.
ZOU L M, MAO X H, HU K, et al. Quantitative analysis for the shape indicator of spherical Ti-6Al-4V powder by image analysis method [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(3): 950-955.

[20] AVERYANOVA M, BERTRAND P, VERQUIN B. Studying the influence of initial powder characteristics on the properties of final parts manufactured by the selective laser melting technology [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2011, 6(4): 215-223.

[21] RUAN G, LIU C, QU H, et al. A comparative study on laser powder bed fusion of IN718 powders produced by gas atomization and plasma rotating electrode process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 850: 143589.

[22] AHSAN M N, PINKERTON A J, ALI L. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6A1-4V powders[C]//Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping. Leiria: CRC Press, 2012: 625-633.

[23] JIA Q, WANG Q, LIANG S. Effect of powders on microstructure and performance of inconel 718 alloy prepared by SPS[J]. Materials Research Express, 2022, 9(9): 096501

[24] LI Y C, SONG M H, ZHANG X C, et al. Preparation of titanium alloy powder by plasma rotating electrode process[J]. Materials Science Forum, 2020, 993: 79-85.

[25] 李晓辉, 陈斌科, 凤治华, 等. 等离子旋转电极雾化制备钨粉及性能表征[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(1): 15-19.
LI X H, CHEN B K, FENG Z H, et al. Preparation and properties of spherical tungsten powders by plasma rotating electrode process for additive manufacturing[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(1): 15-19.

[26] A K. Production of pure, spherical powders: United States [M/OL]. 1974. https://www.freepatentsonline.com/3802816.html.

[27] 赵风琴, 王长京. 等离子旋转电极制粉设备中的等离子发生器装置的设计与制造[J]. 稀有金属材料与工程, 1988, 17(6): 66-70.
ZHAO F Q, WANG C J. Design and manufacture of plasma generator device in plasma rotating electrode pulverizing equipment [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1988, 17(6): 66-70.

[28] ISONISHI K, KOBAYASHI M, TOKIZANE M. Production of Ti-6Al-4V alloy powders by plasma rotating electrode process [J]. Tetsu-to-Hagane, 1989, 75(10): 1913-1920.

[29] TOKIZANE M, FUKAMI T, INABA T. Structure and mechanical properties of the hot pressed compact of Ti-rich TiAl

Powder produced by the plasma rotating electrode process[J]. ISIJ International, 1991, 31(10): 1088-1092.

[30] 国务院国有资产监督管理委员会. 国内首台大型等离子旋转雾化制粉设备研制成功[EB/OL]. http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c3906715/content.html.
State owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. The first large-scale plasma rotary atomization powder production equipment in China has been successfully developed [EB/OL]. http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c3906715/content.html.

[31] 西安赛隆增材技术股份有限公司. SLPA-N[EB/OL]. https://www.slmetal.com/index.php/product/show/150.html
Xi'an Sailong AM. SLPA-N[EB/OL]. https://www.slmetal.com/index.php/product/show/150.html.

[32] ARKON. PREP powder production unit for additive manufacturing [EB/OL]. https://arkon3d.ru/en/equipment_category/prep-powder-production-unit-for-additive-manufacturing/

[33] Tohoku Prep Technology, Inc. PREP powder[EB/OL].https://www.jampt.jp/en/technology/item_04.php

[34] 南极熊.3D打印动态[EB/OL]. https://www.nanjixiong.com/thread-168567-1-1.html.
Antarctic Bear. 3D Printing Dynamics [EB/OL]. https://www.nanjixiong.com/thread-168567-1-1.html.

[35] 国际科技创新中心. 北京亦庄企业重磅发布航空航天等高端材料"制造机"[EB/OL]. https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/scyq/bjjjjskfq/jkdt/202405/t20240513_156094.html.
International Science and Technology Innovation Center. Beijing Yizhuang Enterprise releases a heavyweight "manufacturing machine" for high-end materials such as aerospace [EB/OL]. https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/scyq/bjjjjskfq/jkdt/202405/t20240513_156094.html.

[36] 高峰, 陈斌科, 赵培, 等. 基于PREP设备粉末粒径细化的研究[J]. 机械工程与自动化, 2020(5): 119-120.
GAO F, CHEN B K, ZHAO P, et al. Research on powder particle size refinement based on PREP equipment[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020(5): 119-120.

[37] 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[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(2): 35-37.
SUN H Z. Design and analysis of high speed rotary driving mechanism for milling by plasma rotary electrode[J]. Mechanical Research & Application, 2022, 35(2): 35-37.

[38] 中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司. 等离子旋转电极雾化制粉设备[EB/OL]http://zrime.com.cn/ZZJX/channels/2336.html.
China Academy of Machinery Science & Technology Group Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd. Plasma rotating electrode atomization powder equipment [EB/OL]. http://zrime.com.cn/ZZJX/channels/2336.html.

[39] DROKONOV D A, ZADYKYAN G G, KORSMIK R S. Investigation of the influence of nickel-based alloy powder EP648, obtained by plasma rotating electrode process, on powder utilization rate, structure and chemical composition, applied to direct laser deposition[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1109(1): 012058.

[40] 祁进坤, 岳永文, 胡剑, 等. EIGA和PREP制备M62轴承钢粉末[J]. 粉末冶金技术, 2024, 42(2): 144-152.
QI J K, YUE Y W, HU J, et al. Preparation of M62 bearing steel powder by EIGA and PREP[J]. Powder Metallurgy Technology, 2024, 42(2): 144-152.

[41] CHEN G, ZHAO S Y, TAN P, et al. Shape memory TiNi powders produced by plasma rotating electrode process for additive manufacturing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(12): 2647-2655.

[42] 吕威闫, 杨番, 韩国峰, 等. VIGA和EIGA气雾化法制备增材制造用低合金钢粉末[J]. 中国表面工程, 2020, 33(5): 115-122.
LYU W Y, YANG F, HAN G F, et al. Preparation of low-alloy steel powders for additive manufacturing by VIGA and EIGA gas atomization[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(5): 115-122.

[43] 许贞元, 原慷, 彭浩然, 等. 感应等离子球化钽粉制造研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(6): 29-35.
XU Z Y, YUAN K, PENG H R, et al. Study on the process of sphero tantalum powders by inductive plasma process[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(6): 29-35.

[44] 王庆相, 朱振, 李鑫, 等. 制粉方法对Inconel718合金粉末组织和性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2023, 33(1): 31-38.
WANG Q X, ZHU Z, LI X, et al. Effect of powder preparing method on microstructure and performance of Inconel718 alloy powder[J]. Powder Metallurgy Industry, 2023, 33(1): 31-38.

[45] HAN K, VASQUEZ A A, XIN Y, et al. Microstructure and tensile properties of nanostructured Cu-25wt%Ag[J]. Acta Materialia, 2003, 51(3): 767-780.

[46] LIU W, DUAN Y, MA Y, et al. Surface characterization of plasma rotating electrode atomized 30CrMnSiNi2A steel powder [J]. Applied Surface Science, 2020, 528: 147004.

[47] 杨星波, 朱纪磊, 陈斌科, 等. 等离子旋转电极雾化技术及粉末粒度控制研究现状[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(2): 90-95.
YANG X B, ZHU J L, CHEN B K, et al. Research status of plasma rotating electrode atomization technology and powder particle size control[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(2): 90-95.

[48] WANG Z, WANG J, XU S, et al. Influence of powder characteristics on microstructure and mechanical properties of Inconel 718 superalloy manufactured by direct energy deposition[J]. Applied Surface Science, 2022, 583: 152545.

[49] HATA S, OKI K, HASHIMOTO T, et al. Microstructures of $Ti_{50}Al_{45}Mo_5$ alloy powders produced by plasma rotating electrode process[J]. Journal of Phase Equilibria, 2001, 22(4): 386-393.

[50] KAPLANSKII Y Y, ZAITSEV A A, SENTYURINA Z A, et al. The structure and properties of pre-alloyed NiAl-Cr (Co, Hf) spherical powders produced by plasma rotating electrode processing for additive manufacturing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2018, 7(4): 461-468.

[51] HAN Z Y, ZHANG P X, LEI L M, et al. Morphology and particle analysis of the Ni_3Al-based spherical powders manufactured

by supreme-speed plasma rotating electrode process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 13937-13944.

[52] ZHONG C, CHEN J, LINNENBRINK S, et al. A comparative study of Inconel 718 formed by high deposition rate laser metal deposition with GA powder and PREP powder[J]. Materials & Design, 2016, 107: 386-392.

[53] CHEN Y, ZHANG J, WANG B, et al. Comparative study of IN600 superalloy produced by two powder metallurgy technologies: argon atomizing and plasma rotating electrode process[J]. Vacuum, 2018, 156: 302-309.

[54] 陈焕铭, 胡本芙, 李慧英, 等. 等离子旋转电极雾化FGH95高温合金粉末颗粒凝固组织特征[J]. 金属学报, 2003, 39(1): 30-34.
CHEN H M, HU B F, LI H Y, et al. Microstructure characteristics of FGH95 superalloy powders prepared by prep[J]. Acta Metallrugica Sinica, 2003, 39(1): 30-34.

[55] CHEN H, HU B, et al. Surface characteristics of rapidly solidified nickel-based superalloy pow-ders prepared by PREP[J]. Rare Metals, 2003, 22(4): 309-314.

[56] 贺卫卫, 汤慧萍, 刘咏, 等. PREP法制备高温TiAl预合金粉末及其致密化坯体组织研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(11): 2768-2773.
HE W W, TANG H P, LIU Y, et al. Preparation of high-temperature TiAl pre-alloyed powder by PREP and its densification microstructure research[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(11): 2768-2773.

[57] 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.
YANG X, XI Z P, LIU Y, et al. Characterization of TiAl powders prepared by plasma rotating electrode processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(12): 2251-2254.

[58] YIN J O, CHEN G, ZHAO S Y, et al. Microstructural characterization and properties of Ti-28Ta at.% powders produced by plasma rotating electrode process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 713: 222-228.

[59] OZOLS A, SIRKIN H R, VICENTE E E. Segregation in stellite powders produced by the plasma rotating electrode process[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 262(1/2): 64-69.

[60] KUMAGAE R, YOSHITAKE M, IWATSU O, et al. Study on the operation practice of plasma rotating electrode process (PREP). operating parameter of particle size[J]. Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1996, 43(11): 1279-1282.

[61] 许德, 高华兵, 董涛, 等. 增材制造用金属粉末研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 245-257.
XU D, GAO H B, DONG T, et al. Research progress of metal powder for additive manufacturing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 245-257.

[62] 沈宏武. 粉煤流动性及其影响因素探究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
SHEN H W. Study on flowability of coal powders and their influencing factors[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.

[63] SUN P, FANG Z Z, ZHANG Y, et al. Review of the methods for production of spherical Ti and Ti alloy powder[J]. JOM, 2017, 69(10): 1853-1860.

[64] ZHAO Y, CUI Y, HASEBE Y, et al. Controlling factors determining flowability of powders for additive manufacturing: a combined experimental and simulation study[J]. Powder Technology, 2021, 393: 482-493.

[65] 孙勇, 孙健豪, 唐洪奎, 等. 热喷涂用Inconel718粉末制备及涂层性能研究[J]. 金属加工(热加工), 2022(7): 58-61.
SUN Y, SUN J H, TANG H K, et al. Preparation and coating properties of Inconel 718 powder for thermal spraying[J]. MW Metal Forming, 2022(7): 58-61.

[66] QIU S, CHEN B K, XIANG C S. Preparation and properties of spherical Mo powders by plasma rotating electrode process for additive manufacturing[J]. Materials Science Forum, 2020, 993: 391-397.

[67] 戴晓琴, 陈瀚宁, 剑波, 等. 激光增材制造FeCrSiAlC合金结构与性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(14): 78-81.
DAI X Q, CHEN H N, JIAN B, et al. Study on structure and properties of FeCrSiAlC alloys produced by laser additive manufacturing[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(14): 78-81.

[68] KENEVISI M S, LIN F. Effect of powder characteristics on relative density and porosity formation during electron beam selective melting of Al2024 aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2023, 145(5): 054501.

[69] YIM S, BIAN H, AOYAGI K, et al. Spreading behavior of $Ti_{48}Al_2Cr_2Nb$ powders in powder bed fusion additive manufacturing process: experimental and discrete element method study[J]. Additive Manufacturing, 2022, 49: 102489.

[70] ZDUJIĆ M, USKOKOVIĆ D. Production of atomized metal and alloy powders by the rotating electrode process[J]. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1990, 29(9): 673-683.

[71] LIU J, YU Q, GUO Q. Experimental investigation of liquid disintegration by rotary cups[J]. Chemical Engineering Science, 2012, 73: 44-50.

[72] LIU Y, LIANG S, HAN Z, et al. A novel model of calculating particle sizes in plasma rotating electrode process for superalloys[J]. Powder Technology, 2018, 336: 406-414.

[73] NIE Y, TANG J, TENG J, et al. Particle defects and related properties of metallic powders produced by plasma rotating electrode process[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(7): 2912-2920.

[74] TANG J, NIE Y, LEI Q, et al. Characteristics and atomization behavior of Ti-6Al-4V powder produced by plasma rotating electrode process[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(10): 2330-2337.

[75] NIE Y, TANG J, HUANG J, et al. A study on internal defects of PREP metallic powders by using X-ray computed tomography[J]. Materials, 2021, 14(5): 1177.

[76] CHEN H, HU B, ZHANG Y, et al. Influence of processing parameters on granularity distribution of superalloy powders during

PREP[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2003, 77(6): 587-590.

[77] 雷囡芝. 等离子旋转电极雾化法制备球形金属粉末的工艺及性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
LEI N Z. Study on processing and properties of spherical metal powder prepared by plasma rotating electrode process[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

[78] NIE Y, TANG J, YANG B, et al. Comparison in characteristic and atomization behavior of metallic powders produced by plasma rotating electrode process[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(5): 2152-2160.

[79] ZUO Z, HU R, LUO X, et al. Solidification behavior and microstructures characteristics of Ti-48Al-3Nb-1.5Ta Powder produced by supreme-speed plasma rotating electrode process[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2023, 36(8): 1221-1234.

[80] ZOU L, LIU X, XIE H, et al. High-quality Ti-6Al-4V alloy powder prepared by plasma rotating electrode process and its processibility in hot isostatic pressing[C]// High Performance Structural Materials. Singapore: Springer, 2018: 61-67.

[81] YAMANOGLU R, GERMAN R M, KARAGOZ S, et al. Microstructural investigation of as cast and PREP atomised Ti-6Al-4V alloy[J]. Powder Metallurgy, 2011, 54(5): 604-607.

[82] HE W, LV X, PAN F, et al. Granulation of ferrosilicon alloy by rotary multi-nozzles cup atomizer: granulation behavior and model formation[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(5): 895-902.

[83] HE W C, LV X W, YAN Z M, et al. Ferrosilicon alloy granules prepared through centrifugal granulation process[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(11): 1247-1258.

[84] HSU T I, WEI C M, WU L D, et al. Nitinol powders generate from plasma rotation electrode process provide clean powder for biomedical devices used with suitable size, spheroid surface and pure composition[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 13776.

[85] 蒋保林, 管晓颖, 魏放, 等. PREP工艺参数对GH3536高温合金粉末性能的影响[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(1): 132-134.
JIANG B L, GUAN X Y, WEI F, et al. Effect of PREP process parameters on properties of GH3536 superalloy powder[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(1): 132-134.

[86] CUI Y, ZHAO Y, NUMATA H, et al. Effects of process parameters and cooling gas on powder formation during the plasma rotating electrode process[J]. Powder Technology, 2021, 393: 301-311.

[87] 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.
TAO Y, ZHANG Y W, ZHANG Y, et al. Study on PREP process for producing snherical alloy powder[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15(Suppl 1): 537-540.

[88] 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.
TAO Y, FENG D, ZHANG Y W, et al. Effect of PREP process parameters on powder properties for FGH95 superalloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15(5): 46-50.

[89] DOMBROWSKI N, LLOYD T L. Atomisation of liquids by spinning cups[J]. The Chemical Engineering Journal, 1974, 8(1): 63-81.

[90] XIANG C, WANG X, YANG J, et al. Preparation of high-quality 316H austenitic stainless-steel powder by electroslag remelting and plasma-rotating electrode process[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2022, 60(11): 653-661.

[91] FROST A R. Rotary atomization in the ligament formation mode[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1981, 26(1): 63-78.

[92] LIU Y, ZHAO X H, LAI Y J, et al. A brief introduction to the selective laser melting of Ti6Al4V powders by supreme-speed plasma rotating electrode process[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2020, 30(1): 94-99.

[93] 李礼, 戴煜, 吕攀. 等离子旋转电极法制取AlSi10Mg铝合金粉末工艺的研究[J]. 新材料产业, 2018(12): 23-28.
LI L, DAI Y, LYU P. Study on the process of preparing AlSi10Mg aluminum alloy powder by plasma rotating electrode method[J]. Advanced Materials Industry, 2018(12): 23-28.

[94] 张义文, 张莹, 陈生大, 等. PREP制取高温合金粉末的特点[J]. 粉末冶金技术, 2001, 19(1): 12-15.
ZHANG Y W, ZHANG Y, CHEN S D, et al. Characteristics of prep in preparing superalloy powder[J]. Powder Metallurgy Technology, 2001, 19(1): 12-15.

[95] 贺卫卫, 汤慧萍, 陈斌科, 等. PREP法制备高铌TiAl粉末工艺研究及粒度预测[J]. 钛工业进展, 2019, 36(3): 26-30.
HE W W, TANG H P, CHEN B K, et al. Study on process and particle size prediction on high-NbTiAl powder produced by PREP[J]. Titanium Industry Progress, 2019, 36(3): 26-30.

[96] CUI Y, ZHAO Y, NUMATA H, et al. Effects of plasma rotating electrode process parameters on the particle size distribution and microstructure of Ti-6Al-4V alloy powder[J]. Powder Technology, 2020, 376: 363-372.

[97] ZHAO Y, CUI Y, NUMATA H, et al. Centrifugal granulation behavior in metallic powder fabrication by plasma rotating electrode process[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 18446.

[98] 姚欣欣,李健宇,王艺飞,等.定向能量沉积增材制造过程中粉末对凝固影响的数值模拟(英文)[J].中国有色金属学报,2021,31(9):2871-2874.
YAO X X, LI J Y, WANG Y F, et al. Numerical simulation of powder effect on solidification in directed energy deposition additive manufacturing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(9): 2871-2884.

[99] 杨星波, 汤慧萍, 朱纪磊, 等. 氧化镧的加入对PREP制备钨粉末性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(8): 3025-3030.
YANG X B, TANG H P, ZHU J L, et al. Influence of lanthanum oxide on the properties of PREP tungsten powder[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(8): 3025-3030.

[100] JAMPT Corporation. Our Technology[EB/OL]. https://www.jampt.jp/en/technology/item_04.php

[101] NASA. NASA Additively manufactured rocket engine hardware passes cold spray, hot fire tests [EB/OL]. https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/nasa-additively-manufactured-rocket-engine-hardware-passes-cold-spray-hot-fire-tests/

[102] YIN J G, CHEN G, ZHAO S Y, et al. Titanium-tantalum alloy powder produced by the plasma rotating electrode process (PREP)[J]. Key Engineering Materials, 2018, 770: 18-22.

[103] 张义文, 上官永恒. 粉末高温合金的研究与发展[J]. 粉末冶金工业, 2004, 14(6): 30-43.
ZHANG Y W, SHANGGUAN Y H. Research and development in P/M superalloy [J]. Powder Metallurgy Industry, 2004, 14(6): 30-43.

[104] 周亚雄, 吴晓明, 杨欢庆, 等. 航天高强不锈钢LMD成形缺陷分析及控制[J]. 火箭推进, 2022, 48(1): 90-96.
ZHOU Y X, WU X M, YANG H Q, et al. Defect analysis and control in aerospace high strength stainless steel by laser melting deposition [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2022, 48(1): 90-96.

[105] 刘世锋, 韩李雄, 王岩, 等. 一种等离子旋转电极气雾化制备钽粉的方法: CN202310634590.2[P]. 2023-08-29.
LIU S F, HAN L X, WANG Y, et al. A method for preparing tantalum powder by gas atomization of plasma rotating electrode :CN202310634590.2[P].2023-08-29.

[106] 张衍诚. 等离子旋转电极雾化球形钨粉制备方法: CN202211615896.5[P]. 2025-04-29.
ZHANG Y C. Preparation method of atomized spherical tungsten powder with plasma rotating electrode CN202211615896.5 [P]. 2025-04-29.

[107] 杨广宇, 汤慧萍, 刘楠, 等. Ti-5Ta-30Nb-7Zr合金医用多孔材料的电子束选区熔化成形及表征[J]. 钛工业进展, 2017, 34(1): 33-36.
YANG G Y, TANG H P, LIU N, et al. Fabrication and characterization of Ti-5Ta-30Nb-7Zr biomedical porous alloy by selective electron beam melting[J]. Titanium Industry Progress, 2017, 34(1): 33-36.

[108] OH I H, NOMURA N, HANADA S. Microstructures and mechanical properties of porous titanium compacts prepared by powder sintering [J]. Materials Transactions, 2002, 43(3): 443-446.

[109] NOMURA N, KOHAMA T, OH I H, et al. Mechanical properties of porous Ti-15Mo-5Zr-3Al compacts prepared by powder sintering[J]. Materials Science and Engineering: C, 2005, 25(3): 330-335.

[110] 赛隆增材. 金属3D打印完整方案提供者[EB/OL]. https://www.slmetal.com/solutions/110.html
SAILONG AM. One-step solution provider in metal 3D printing [EB/OL]. https://www.slmetal.com/solutions/110.html

[111] Carpentertechnology. Market [EB/OL] . https://www.carpentertechnology.com/

[112] 范华全, 王富友, 何锐, 等. 3D打印多孔钽金属髋臼骨缺损假体的制备及其初步临床应用[J]. 陆军军医大学学报, 2022, 44(15): 1516-1522.
FAN H Q, WANG F Y, HE R, et al. Preparation and preliminary clinical application of 3D printed porous tantalum prosthesis for reconstruction of acetabular bone defect[J]. Journal of Army Medical University, 2022, 44(15): 1516-1522.

[113] 马青原, 杜沛南, 彭英博, 等. 金属增材制造技术在核工业领域的应用与发展[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(1): 86-94.
MA Q Y, DU P N, PENG Y B, et al. Application and development of metal additive manufacturing technology in nuclear industry [J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(1): 86-94.

[114] 国家原子能机构.3D打印技术在国内商运核电站首次实现工程应用[EB/OL]. https://www.caea.gov.cn/n6760338/n6760342/c6829486/content.html
CHINA ATOMIC ENERGY AUTHORITY. 3D printing technology has been applied for the first time in China's commercial nuclear power plants [EB/OL]. https://www.caea.gov.cn/n6760338/n6760342/c6829486/content.html

[115] 伍浩松, 张焰. 捷克能源企业拓展3D打印部件的应用[J]. 国外核新闻, 2023(3): 3.
WU H S, ZHANG Y. Czech energy enterprises expand the application of 3D printing components[J]. Foreign Nuclear News, 2023(3):3.

[116] 玉河, 高燕. 3D打印在汽车零部件行业的应用研究[J]. 时代汽车, 2024(11): 130-132.
YU H, GAO Y. Research on the application of 3D printing in the auto parts industry[J]. Auto Time, 2024(11): 130-132.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52105203);国家科技重大专项(2024ZD0703601)

收稿日期:2024-09-03;**录用日期**:2025-03-13

通讯作者:陈同舟(1980—),男,正高级工程师,硕士,研究方向为热喷涂材料工艺与装备,联系地址:中国机械总院集团武汉材料保护研究所有限公司(430030),E-mail:chentongzhou@rimp.com.cn

(本文责编:张宝玲)