

航空热端部件粘结剂喷射增材制造研究进展

李哲晗 崔晓涵 李治辉 黄树东 戚诚康 李 飞 张耀中

(上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘 要 针对航空大尺寸热端部件制造, 粘结剂喷射技术(Binder jetting, BJ)提供了高材料适应性及复杂结构成形能力。系统梳理了直接金属成形与间接陶瓷型壳制造两条技术路线的材料体系与工艺研究进展。直接金属BJ中, 溶剂基与金属盐粘结剂通过调控流变行为与固化动力学, 适配 Inconel718、Ti-6Al-4V 等粉体, 结合两步脱脂与气压烧结工艺, 实现生坯密度>65%, 烧结致密度>95%。间接陶瓷型壳BJ中, 呋喃与酚醛树脂粘结剂与氧化铝/氧化硅粉体的反应性匹配, 结合溶胶浸渍强化后处理, 抗弯强度提升至145 MPa。

关键词 航空领域; 粘结剂喷射; 金属; 陶瓷

中图分类号 G353.11; TG665 **文献标志码** A **DOI**: 10.15980/j.tzzz.T20250226

Research Progress in Binder Jetting Additive Manufacture for Aerospace Thermal Critical Components

LI Zhehan, CUI Xiaohan, LI Zhihui, HUANG Shudong, QI Chengkang, LI Fei, ZHANG Yaozhong

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: For the manufacturing of large-scale thermal critical components in aerospace applications, binder jetting (BJ) demonstrates exceptional material adaptability and complex geometry forming capabilities. Research progress in systems and processes for both direct metal forming and indirect ceramic shell manufacturing technologies was systematically reviewed. For direct metal BJ, solvent matrix and metal salt binders achieve optimized compatibility with Inconel 718 and Ti-6Al-4V powders through precise regulation of rheological behavior and curing kinetics, achieving green body density exceeding 65% and sintered density over 95% combined with two-step debinding and gas-pressure sintering processes. For indirect ceramic shell BJ, reactive matching exists between furan/phenolic resin binders and alumina/silica powders, and flexural strength was elevated to 145 MPa with sol-infiltration post-treatment.

Key Words: Aerospace Field, Binder Jetting, Metal, Ceramic

航空热端部件(如涡轮叶片、燃烧室等)在极端高温、循环热载荷及复杂应力耦合环境下^[1-2], 面临多维度制造挑战^[3-5]。增材制造(Additive manufacturing, AM)凭借其创新设计自由度与近净成形优势, 为航空热端部件的制备提供了新路径。其中, 激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)与电子束选区熔化(Electron beam melting, EBM)在复杂结构制备与材料利用率方面表现突出, 但其快速熔融过程易引发高残余应力导致开裂(尤其对IN738等敏感合金), 逐行扫描机制限制了成形效率, 构建方向的陡峭温度梯度加剧了显微组织各向异性。相比之下, 定向能量沉积(Directed energy deposition, DED)技术通过高功率能量源与同步送料实现了成形速率的提升, 但较大的激

光斑直径导致成形精度受限, 需预留过量加工余量, 显著增加后续减材制造成本。这些固有工艺缺陷(如成形效率、残余应力及各向异性)仍制约工程化应用, 亟需发展新一代低应力高精度增材技术体系^[6-7]。

粘结剂喷射技术(Binder jetting, BJ)作为粉末床增材制造的代表性工艺^[8], 其技术链涵盖“微滴沉积-生坯强化-后处理致密化”三阶段。通过微滴沉积技术将粘结剂与粉末颗粒逐层选区键合, 经光/热固化或溶剂活化机制实现生坯强化(抗弯强度为2~5 MPa, 相对密度为50%~60%), 最终通过脱脂-烧结工艺调控致密化行为^[9-10]。相较于激光/电子束熔融技术, BJ的工艺优势为: ①无熔池热应力引入, 彻底规避开裂风险^[11]。②全自支撑成形特性突破复杂结构设计限制, 结合阵列

收稿日期: 2025-06-04; 修订日期: 2025-07-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3706300); 上海浦江计划资助项目((21PJ1408100); 国家自然科学基金资助项目((52074183); 国家科技重大专项资助项目((J2019-VI-0004-0117)

第一作者: 李哲晗, 男, 1999年出生, 博士研究生, E-mail: lizhehan@sjtu.edu.cn

通信作者: 李飞, 男, 1974年出生, 教授, E-mail: lifei74@sjtu.edu.cn

引用格式: 李哲晗, 崔晓涵, 李治辉, 等. 航空热端部件粘结剂喷射增材制造研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(7): 961-970.

LI Z H, CUI X H, LI Z H, et al. Research progress in binder jetting additive manufacture for aerospace thermal critical components[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 961-970.

式喷头面成形策略,效率提升2~3个数量级^[12]。③突破激光振镜系统的光学畸变限制,超大成形幅面(如峰华卓立公司砂型设备达2 500 mm×1 500 mm)兼容航空航天构件尺寸需求。该技术为多材料梯度结构、大尺寸精密铸造型壳等极端工况部件提供了低应力、高效率的制造方法。

BJ成形性能由粘结剂-粉末-后处理三元体系的跨尺度协同效应主导:粘结剂作为工艺核心,需通过精准流变调控实现与压电喷头的微滴生成动力学匹配^[13],同时借助极性基团实现粉末定向吸附,在孔隙内构建三维粘接网络以赋予生坯必要的结构强度^[14]。其功能设计需在粉床渗透阶段确保毛细管填充效率(接触角),并在脱脂阶段通过梯度热解(质量损失率)避免生坯开裂或尺寸畸变^[15]。BJ技术的多材料兼容性优势显著,可适配金属(TC4/Inconel718)、陶瓷($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$)及型砂体系,通过数字化沉积实现金属-陶瓷异质界面等梯度结构原位制造^[16-17]。值得注意的是,上供粉系统对粉末流动性提出严苛要求(霍尔流速 $<25\text{ s}/50\text{ g}$),通常需采用特定粒径分布的球形粉末($D_{50}=15\sim53\text{ }\mu\text{m}$)配合高频激振($>200\text{ Hz}$)实现高密度铺粉^[18-19],而细粉($D_{90}<10\text{ }\mu\text{m}$)的引入可降低烧结活化能,使致密化温度窗口拓宽^[20-21]。因此,粉末体系设计需兼顾工艺经济性、成形质量与烧结效率等多重目标,通过颗粒尺度与界面特性的协同优化实现全流程性能调控。

本综述梳理BJ技术在航天热端部件制造的两范式:①直接金属制造,囊括BJ金属的粘结剂与粉体的设

计与工艺,聚焦耐高温合金(如Inconel系列、钛合金)的生坯致密化控制与烧结致密化。②间接陶瓷型壳制造,涉及BJ陶瓷的粘结剂发展与创新、粉体的制备以及浸渗工艺孔隙的填充,并且从材料研发、回收利用及形性控制等方面给出了前瞻性建议。

1 直接制造:BJ金属成形研究进展

1.1 技术瓶颈与适用性分析

粘结剂喷射技术技术链涵盖“微滴沉积-生坯强化-后处理致密化”三阶段,见图1。因其过程加热平缓、无热应力,与金属成形极其适配。压气机整体叶盘传统上需从钛合金(如Ti-6Al-4V)实心锻坯通过五轴铣削“掏”出盘体和空间扭曲叶片,材料去除量巨大,成本浪费较高。叶片壁薄刚性差,加工中易变形,型面精度和一致性保障困难,且钛合金导热性差、易粘刀的特性加剧了刀具磨损和热影响区问题,加工周期长^[22]。钛合金机匣同样受困于薄壁易变形和难切削问题,复杂特征加工效率低,表面完整性控制要求高。BJ为整体叶盘制造带来革命性改变,直接近净成形出带叶片的叶盘毛坯,材料利用率大幅提高,彻底规避了叶片铣削的颤振、变形、低效和高刀具损耗等核心难题。对于钛合金机匣,BJ的低热输入特性结合烧结/热等静压(HIP)后均匀的组织 and 低应力状态,显著降低了后续精加工的变形风险^[23]。BJ技术使两者均能实现近净成形,大幅减少钛合金切削加工量,降低成本与周期,并支持制造更轻量化(如点阵结构)和集成化的设计^[24]。

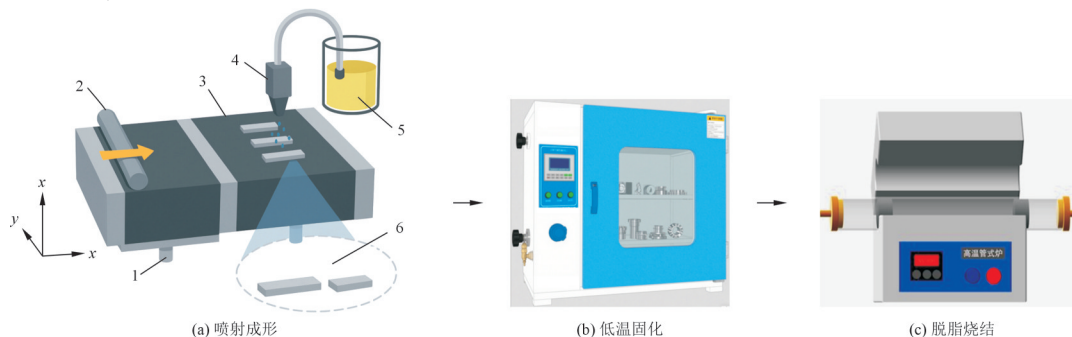


图1 粘结剂喷射成形过程工艺三阶段

Fig.1 Three stages of binder jetting forming process

1. 供粉缸 2. 铺粉辊 3. 成形缸 4. 喷头 5. 黏结剂 6. 生坯

涡轮机匣与燃烧室火焰筒采用高强度镍基高温合金(如Inconel 718),其极端难切削性(高硬度、低导热、加工硬化)导致刀具磨损剧烈,加工效率极低、成本高昂^[25]。作为大型薄壁件,这些铸件在强力切削和装夹下极易发生颤振和变形,尺寸精度控制困难。此外,“大型锻坯+大量铣削”的工艺路线材料利用率极低,且复杂特征(如机匣篦齿槽、火焰筒异形气膜孔)需多种特种加工,工序繁杂、周期长,易引入残余应力和表

面损伤^[26]。BJ技术通过近净成形直接制造具有复杂几何形状(包括内部通道和异形曲面)的铸件,材料利用率大幅提升,显著降低合金成本和锻造依赖度。其冷态打印过程热输入极低,结合后续HIP处理,成形毛坯残余应力小,有效解决了大型薄壁件在传统加工中的变形问题。同时,BJ极大减少甚至免除了对镍基合金的大面积铣削和困难的特种加工工序,缩短制造周期,并赋予更高的设计自由度^[27]。

1.2 粘结剂设计与工艺

粘结剂喷射成形技术中,粘结剂的理化特性直接决定生坯成形质量、脱脂效率及终态零件性能。根据化学键合机制,粘结剂可分为^[28]:酸碱反应型、金属盐基型、溶剂基型。其中,溶剂基粘结剂在金属与陶瓷领域应用最为广泛,但其(如PEG、PVB)固化后形成的分子链间作用力(范德华力、氢键)远弱于金属/陶瓷的原子键合力(金属键、离子键),是BJ生坯强度不足的主要原因。其次,粘结剂以微滴形式选择性渗透粉末间隙,无法完全浸润,导致颗粒间有效粘结面积占比低,大幅降低生坯强度^[29]。

粘结剂性能需兼顾喷头适配性与结构功能性。GILMER D等^[30]开发的双官能单体二甘醇二甲基丙烯酸酯(TEG-DMA)体系通过调节单体/溶剂比例(75%的TEG-DMA+25%的1-丙醇,质量分数),将黏度降至3.8 mPa·s、表面张力降至29.4 mN/m,Ohnesorge数为0.135($Z=7.397$),满足稳定喷射需求,生坯抗弯强度达3.5 MPa。ExOne商用BA-005粘结剂(含EGBE/IPA/EG)可使316 L生坯致密度达55%,抗弯强度提升至8 MPa^[31]。此外,工艺参数与组分改性对性能影响显著。JANZEN K等^[32]发现惰性气氛(N_2)会延缓粘结剂交联,导致生坯强度降低。BAI Y等^[33]通过添加纳米颗粒增强毛细管力,使生坯密度随饱和度非线性增长。采用偏钨酸铵前驱体的无机粘结剂在热解中生成纳米 WO_3 增强相,抗压强度达11.23 MPa,显著优于传统体系^[34]。金属粘结剂研究进展见表1。

表1 金属粘结剂研究进展^[30-34]

Tab.1 Research progress in metal binders^[30-34]

粉体材料	粘结剂	生坯致密度/%	烧结致密度/%	力学性能(生坯)
420 不锈钢	自研 TEG-DMA 粘结剂	—	—	抗弯强度为 3.5 MPa
316L 不锈钢 ($D_{50}=3.8\text{ }\mu\text{m}$)	ExOne 商用粘结剂 BA-005	56.0	—	抗弯强度为 8 MPa
Ti-6Al-4V ($D_{50}=15.6\text{ }\mu\text{m}$)	Markforged 商用粘结剂 C20	52.8	—	抗弯强度为 0.4 MPa
Cu ($D_{50}=17\text{ }\mu\text{m}$)	ExOne 商用粘结剂(含纳米颗粒)	47.0	87.4	抗弯强度为 2.5 MPa

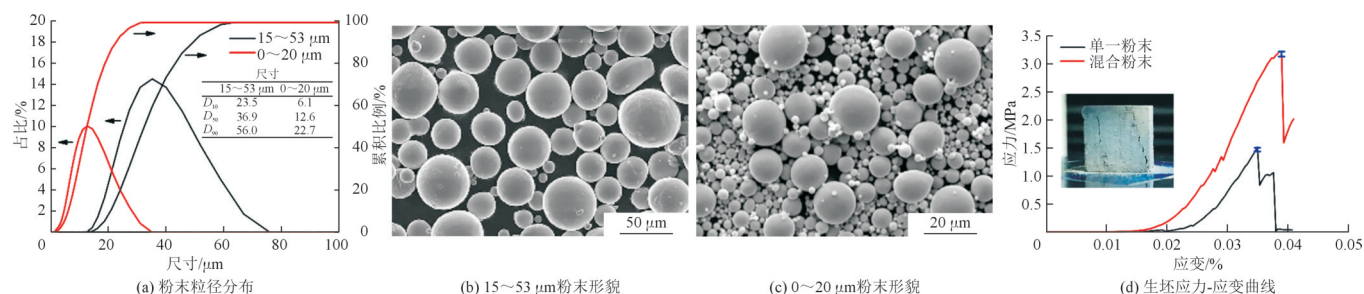


图2 粉体对BJ成形钛合金生坯质量影响^[40-41]

Fig.2 Effects of powder on billet quality for BJ formed titanium alloys^[40-41]

综上,通过优化粘结剂流变特性(黏度/表面张力)、热分解路径及界面润湿性,可协同提升生坯致密度与力学性能,为复杂构件高精度制造提供参考。

1.3 粉体与后处理优化

金属粉末通过真空气雾化等成熟制备技术已可实现粒径均质化($D_{90}<100\text{ }\mu\text{m}$)、高球形度($>98\%$)及超低氧含量($<1\times 10^{-2}\%$,体积分数),且卫星粉比例显著降低^[35],其粒径分布、堆积密度等特性直接影响BJ工艺中的毛细管效应与烧结动力学:优化的粒径级配可提升堆积密度,同时因堆积密度不同会引起不同程度的收缩^[36];表面能差异则通过调控烧结温度与液相形成阈值,最终决定致密度($\rho_{\text{致}}>95\%$)^[37]。尽管较激光选区熔化等熔融基增材技术发展滞后,BJ在航天材料(钛合金/镍基高温合金)的粉末适配性研究已形成初步体系。

粉末堆积密度是影响烧结、收缩和最终产品抗拉强度的关键参数。ZIEGELMEIER S等^[38]发现,堆积密度越高,抗拉强度越高^[36]。粉末床的堆积密度越高,粉末床内部的颗粒间空隙数量就越少,因此最终零件的孔隙率也就越低。使用多峰粉末是提高粉末床密度的有效方法,其中粗颗粒可保证流动性,而细粉则可填充大颗粒之间的空隙,从而提高粉末床密度。将两种不同尺寸的粉末颗粒以一定的大小和体积比混合形成了“双峰”粉末。GERMAN R M^[39]给出了双峰粉末的理论堆积因子的预测公式为:

$$f^*=f_L+(1-f_L)f_s$$

式中, f^* 为最大堆积密度; f_s 为较小粉末的堆积密度; f_L 为较大粉末的堆积密度。

钛合金(如TC4)凭借其高比强度与低密度特性,已成为航天发动机低压压气机叶片的核心材料。然而,其熔体高黏度与低流动性导致增材制造中熔池填充不充分,难以满足要求。SIMCHI A等^[40]设计了 $D_{50}=20\text{ }\mu\text{m}$ 且跨度大的粒度分布,见图2,成功制造出致密度为 $62\%\pm 1\%$ 的生坯,在 $1\text{ }250\text{ }^{\circ}\text{C}\times 3\text{ h}$ 的烧结工艺下将零件致密度提升至 $96\%\pm 1\%$ (阿基米德排水法测量,下同),且生坯致密度、粒径分布宽度与粉末堆积

密度呈正相关,抗拉强度同步提升至 (957 ± 15) MPa,伸长率为 $6\% \pm 2\%$ 。进一步通过双峰级配 $(15 \sim 53 \mu\text{m}: 0 \sim 20 \mu\text{m} = 4:1)$ 可使生坯抗压强度提升了14%,见图2d。 $1420^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ 烧结后级配粉末致密度为95.2%,较单一粒径粉末 $(15 \sim 53 \mu\text{m})$ 的92.6%提高2.8%^[41],屈服应力为589 MPa,伸长率为4.15%。对比发现,采用亚微米级粉末($D_{50} = 8.49 \mu\text{m}$)结合优化烧结工艺 $(1200^\circ\text{C} \times 2\text{h})$ 可实现98.2%致密度^[42],印证细粉的高表面能可显著增强烧结活性,通过降低液相形成温度促进晶界扩散主导的致密化进程。ALEGRE J M等^[23]发现热等静压 $(850^\circ\text{C} \times 20\text{MPa} \times 2\text{h})$ 后TC4合金的内部孔隙基本消除,致密度达到99.9%,抗拉强度达1089 MPa,伸长率为10.58%,均高于烧结态性能。镍基高温合金(如Inconel718)凭借其优异的高温强度与抗氧化性,已成为航空发动机涡轮叶片的核心材料,其熔体低表面张力特性显著改善了熔池对未熔粉末的润湿性,使得增材制造可实现近全致密成形 $(>99\%)$ 。NANDWANA P等^[43]通过热力学模拟(Thermocalc)发现 $D_{50} = 7 \mu\text{m}$ 粉末在 1180°C 产生显著收缩 $(>11\%)$,而 $D_{50} = 21 \mu\text{m}$ 粉末经 $1330^\circ\text{C} \times 5\text{h}$ 烧结后致密度达99.7%(Image-J软件计算),略优于 $7 \mu\text{m}$ 体系(99.5%),揭示了粒径粉末在高温下的晶界扩散优势,见图3。MOSTAFAEI A等^[44]对比气雾化和水雾化制

备的Inconel625粉末发现,微观结构演变(致密化、碳化物、氧化物和金属间化合物相的形成)导致性能存在较大差异,雾化粉末性能最优,致密度达到99.2%,抗拉强度为 (718 ± 14) MPa,伸长率为 $29.1\% \pm 3.1\%$,高于铸造水平。TURKER M等^[45]发现,当层厚从 $100 \mu\text{m}$ 增至 $200 \mu\text{m}$ 时, 1260°C 烧结致密度由92%降至88%,而温度提升至 1300°C 可补偿层厚效应,使致密度达99%且收缩率达21.5%,证实了烧结温度对致密化的主导作用。PAUL S等^[46]采用热等静压 $(1200^\circ\text{C} \times 120\text{MPa} \times 3\text{h})$ 将Inconel718的强度提升至1010 MPa。YANG W X等^[47]综合了级配与冷压两个工艺的优势制备出致密度为 $98\% \pm 1.2\%$ 的高致密试样,并且经标准热处理后抗拉强度达到1206 MPa,伸长率为 $12\% \pm 5\%$,接近锻件标准 $(1270\text{MPa}, 12\%)$ 。从本征机制分析,烧结温度的提升通过促进金属液相生成可显著增强致密化驱动力。热力学研究表明,Inconel718合金的液相线温度区间为 $1260 \sim 1320^\circ\text{C}$,在此温度域内形成的固-液共存相通过以下机制协同作用:①液态金属毛细管力驱动颗粒重排,消除拱桥效应。②晶界液相渗透降低扩散激活能,加速孔隙湮灭。③超固相线液相烧结(Supersolidus liquid phase sintering, SLPS)机制激活,实现晶界滑移主导的快速致密化。粘结剂喷射成形致密度和力学性能的有关研究结果

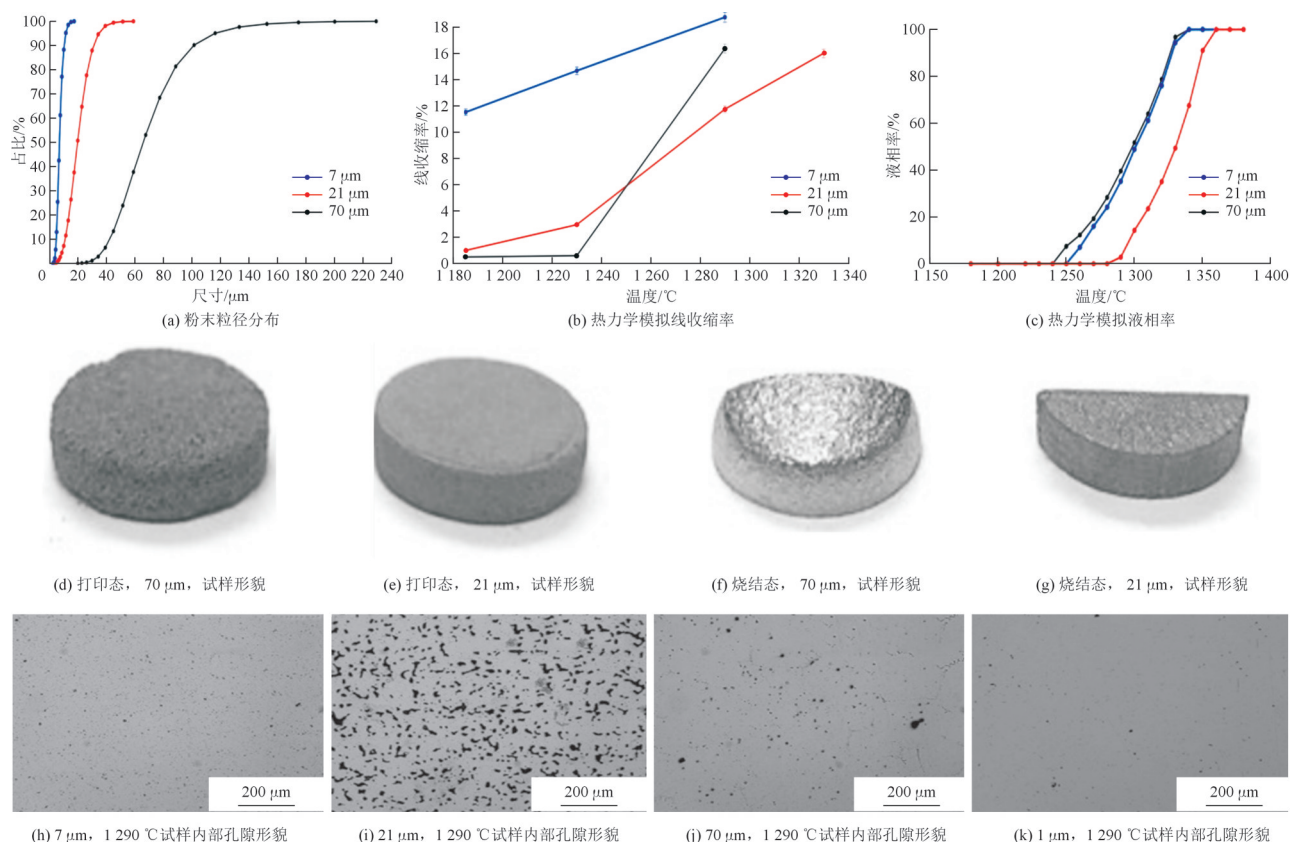


图3 BJ成形高温合金性能研究进展^[43]

Fig.3 Research progress in performance of BJ formed superalloys^[43]

见表2^[39-47]。

研究表明,细粉体系虽能通过高表面能效应实现更高烧结致密度,但其制备成本与薄层厚导致的低成形效率制约了工业化应用。相比之下,级配混合粉末通过几何密堆效应可平衡成本与效率,但致密度通常

低于细粉体系。烧结温度需基于材料固-液相线精确调控:温度升至液相区可提升致密化驱动力,但液相率超过40%时将引发黏性流动主导的结构失稳^[48];辅以氩气/氮气惰性气氛可抑制氧化反应,优化液相润湿性与晶界扩散效率。

表2 适用于金属材料的BJ粘结剂研究^[39-47]

Tab.2 BJ binder for metal materials^[39-47]

粉体材料	粘结剂	生坯致密度/%	烧结致密度/%	力学性能
Ti-6Al-4V($D_{50}\approx 20\text{ }\mu\text{m}$)	ExOne 商用粘合剂 CleanFuse	62±1	96±1	抗拉强度为(957±15) MPa,伸长率为6%±2%
Ti-6Al-4V ($D_{50}=36.9\text{ }\mu\text{m}$ $D_{90}=12.6\text{ }\mu\text{m}$)	自研溶剂基粘结剂(乙醇与 聚乙烯吡咯烷酮)	—	95.2	屈服强度为589 MPa,伸长率为4.15%
Ti-6Al-4V($D_{50}=12.6\text{ }\mu\text{m}$)		57.9	98.2	抗拉强度为(935±12) MPa,伸长率为12.7%±0.6%
Ti-6Al-4V	溶剂基粘结剂	—	99.9	抗拉强度为1 089 MPa,伸长率为10.58%
Inconel718($D_{50}=21\text{ }\mu\text{m}$)	乙二醇溶剂基粘合剂	—	99.7	
Inconel625	ExOne 商用粘结剂	55.0	99.2	抗拉强度为(718±4) MPa,伸长率为29.1%±3.1%
Inconel718		—	99.0	
Inconel718(15~45 μm)	PVA 粘结剂	—	99.0	抗拉强度为1 010 MPa
Inconel718($D_{50}=29.1\text{ }\mu\text{m}$; $D_{90}=11.4\text{ }\mu\text{m}$, 10:1)	ExOne 商用粘结剂 BA-005	68.0	98±1.2	抗拉强度为1 206 MPa,伸长率为12%±5%

2 间接制造:BJ陶瓷型壳研究进展

2.1 技术瓶颈与适用性分析

随着航空发动机向高推重比与超高温工况发展,涡轮叶片等热端部件的多腔气冷结构复杂度显著提升^[49]。采用BJ技术“直接制造”的方式可能会因变形失稳而降低良品率,进而造成成本升高,而熔模铸造等传统铸造虽能控制尺寸精度(CT5级),但模具开发周期长且成本占比高^[50]。基于此,BJ技术驱动的“间接复合成形”模式展现出独特优势:通过融合铸造工艺数据库与BJ无模制造特性,可消除陶瓷型壳模具制备环节,其开放式多材料打印架构配合阵列式喷头系统,能够实现陶瓷型壳/型芯梯度材料的一体化成形,同时面扫描策略使成形效率较传统SLS有较大提升^[51]。

2.2 粘结剂设计与工艺

陶瓷与砂型粘结剂喷射技术在粘结剂体系上具有工艺协同性,其核心工艺参数(流变性、黏度、饱和度)高度一致,常采用呋喃树脂与酚醛树脂两类主流体系^[52],呋喃树脂凭借低成本优势及酸性催化固化机制,可实现打印过程原位聚合,有效降低生坯搬运破损率;但固化过程中会释放甲醛等挥发性有机物,需配置尾气处理系统^[53],相比之下,酚醛树脂通过热固化工艺(120~180℃)实现快速交联,虽成本较高,但其热解残留C含量更低,更适用于高精度铸造型壳制造。

在陶瓷/砂型BJ技术中,粘结剂体系优化研究取得显著进展。BAZHENOV V E等^[54]采用呋喃树脂结合

支撑剂陶瓷颗粒与空心球,生坯试样抗弯强度仅为0.56~0.77 MPa,揭示传统树脂体系力学性能局限。谭锐等^[55]通过间苯二酚、双酚A、预聚物改性呋喃树脂(添加量为1.43%,质量分数),将砂型抗拉/抗弯强度分别提升至2.20 MPa与5.55 MPa(固化剂质量分数为0.22%),尺寸精度达±0.23 mm。王钰沅^[56]采用酚醛树脂制备SiC叶轮,虽各向异性显著(X、Y轴抗弯强度分别为1.38、2.74 MPa),仍能满足复杂结构成形需求。ZHANG Z F等^[57]开发酚醛-PVA复合体系,当PVA质量分数为4.5%、层厚为0.36 mm、粘合剂饱和度为75%时,通过分子间交联使生坯抗拉强度达2.31 MPa,成功制备出发动机气缸盖等精密构件。对比发现,水玻璃因黏度不足导致硅基材料强度低于酚醛树脂体系^[52]。GILMER D B等^[58]采用聚乙烯亚胺(PEI)替代商业粘结剂(1.82 MPa),使SiO₂试样抗弯强度突破6.28 MPa,较传统呋喃体系(3.60 MPa)提升了74%。适用陶瓷材料的BJ粘结剂见表3。

表3 适用陶瓷材料的BJ粘结剂研究^[54-58]

Tab.3 BJ binder for ceramic^[54-58]

粉体材料	粘结剂	力学性能
支撑剂与空心 球陶瓷	呋喃树脂	生坯抗弯强度为0.56~ 0.77 MPa
SiO ₂	改性呋喃树脂	生坯抗拉强度为2.20 MPa, 抗弯强度为5.55 MPa
SiC ($D_{50}=6.7\text{ }\mu\text{m}$)	酚醛树脂	生坯抗弯强度为2.74 MPa
覆膜砂	热塑性酚醛树脂和聚 乙烯醇	生坯抗拉强度为2.31 MPa
SiO ₂	聚乙烯亚胺粘合剂	生坯抗弯强度为6.28 MPa

2.3 粉体选择与烧结强化

陶瓷粉末制备工艺相较于金属体系呈现显著差异性:其合成路径涵盖机械破碎(高能球磨)^[59]、高温固相反应($>1\,600\,^{\circ}\text{C}$)^[60]、化学气相沉积(CVD)^[61]及溶胶-凝胶法(Sol-Gel)等复杂方法。粉体形貌特征因工艺差异呈现多态性(球形/片状/不规则),其中非等轴性形貌导致流动性下降与粉床堆积密度降低,进而引发烧结颈不对称生长(孔隙率增加)及烧结温度提高等缺陷^[62-63]。当

前陶瓷型壳/型芯主流材料包括: Al_2O_3 (高熔点/低膨胀)、 SiO_2 (低成本/易溃散)、锆英石(ZrSiO_4 ,抗侵蚀)、莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$,低导热)及 Y_2O_3 (超高温稳定)^[51]。

JIMENEZ E M等^[64]采用球磨法制备棱柱形氧化铝粉末(不规则度较高)时,生坯致密度仅为46%,见图4。经 $1\,800\,^{\circ}\text{C} \times 6\,\text{h}$ 烧结后致密度仍低于60%,归因于非等轴颗粒引发的烧结驱动力衰减(表面能 γ 降低)与孔隙粗化效应。参数敏感性分析表明,生坯密度对烧结结果影响最大(贡献度 $>50\%$),其次为烧结温度,升

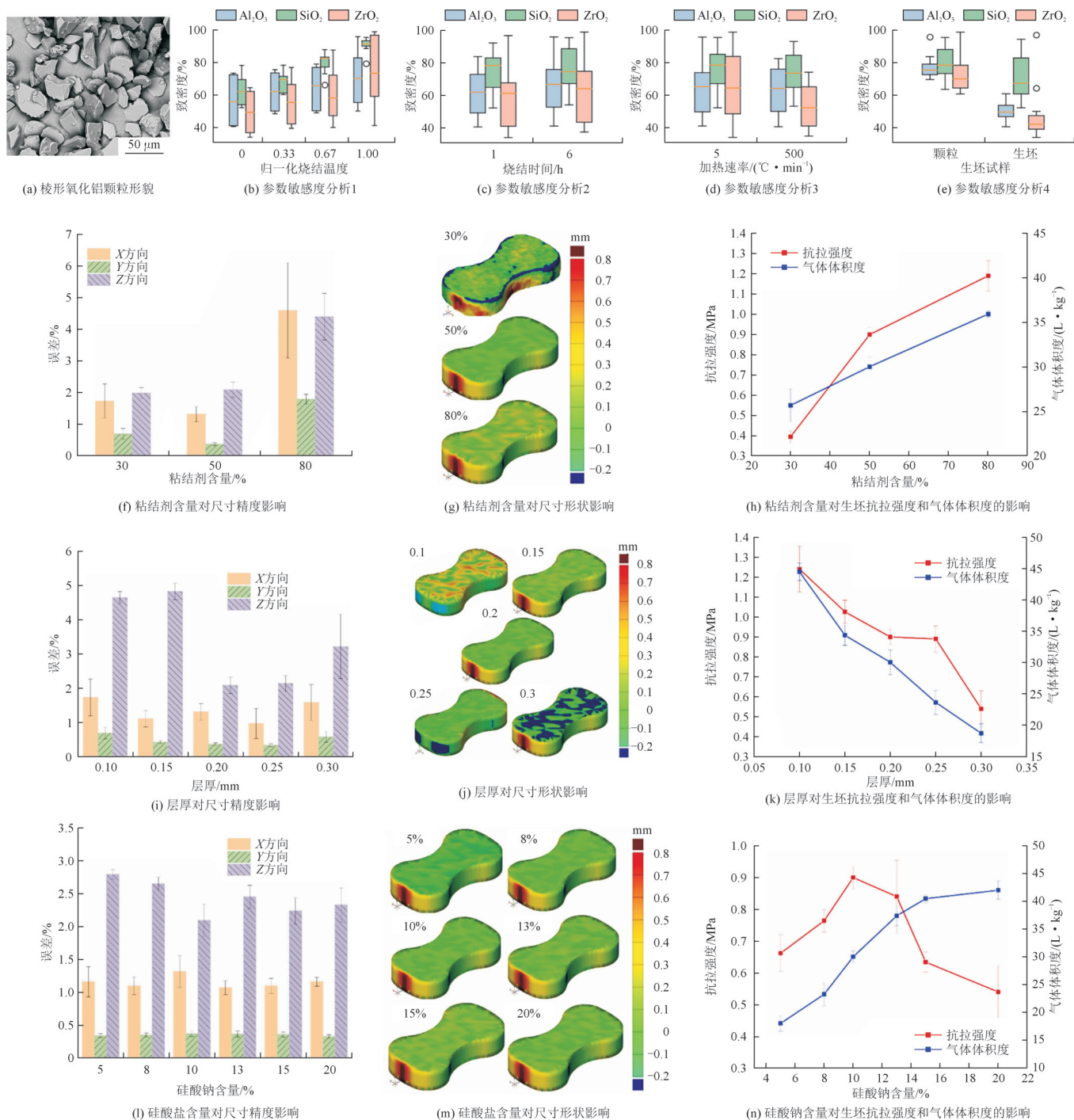


图4 BJ陶瓷后处理性能强化工艺研究进展^[64,68](含量均指质量分数)

Fig.4 Research progress on performance enhancement for BJ ceramic post-processing^[64,68]

温速率影响可忽略,见图4b~图4e。该研究揭示了不规则粉末导致的低粉床密度是致密化瓶颈的主因,而细粉虽能提升烧结驱动力,却受限于铺粉均匀性。MIAO G X等^[65]通过喷雾冷冻干燥将 Al_2O_3 纳米颗粒造粒为微米级颗粒,使粉床致密度从32.0%提升至50.7%。HUANG S J等^[66]在无机胶体粘结剂中添加(质量分数,下同)35%碱性碳酸锆($\text{ZrOCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, ZBC),生坯密度从40%增至51%,经1500℃烧结后碳酸锆分解成氧化锆填补 Al_2O_3 颗粒间孔隙,致密度从45%升至65%,抗弯强度从60 MPa提高至79 MPa,同时表面粗糙度显著降低。因此,通过造粒技术优化粉体流动性,或利用粘结剂纳米掺杂实现孔隙原位填充,是突破陶瓷BJ致密度限制的有效途径。ASLAN i等^[67]针对 SiO_2 体系的研究进一步验证了125~250 μm 粒径范围优势,较250~500 μm 粒径范围生坯致密度与抗弯强度均提高,且喷头低速进给可进一步强化该效应,这与MIAO G X等^[65]在氧化铝造粒粉中的致密化规律(粉床密度从32.0%提高到50.7%)形成机理呼应。WANG F等^[68]通过硅酸钠/陶砂(100~210 μm)混合体系实现抗拉强度>1.2 MPa与尺寸误差<0.5%(见图4f~图4n),其多相复合策略与HUANG S J等^[66]的 ZrOCO_3 掺杂法(抗弯强度从60提高到79 MPa)均体现异相增强的共性规律。值得注意的是,尽管BJ工艺避免了激光成形的高热应力各向异性,但其层间结合强度仍受制于铺粉均匀性。LIU H等^[69]在呋喃树脂/ SiO_2 体系中观察到Z向抗压强度明显高于X向,同时铺粉辊压实可使生坯强度提升,抗弯强度与粘结剂粘滴体积呈强线性相关。粘结剂喷射成形陶瓷生坯性能研究见表4。

表4 粘结剂喷射成形陶瓷生坯性能研究^[64-69]Tab.4 Properties of BJ formed ceramic green bodies^[64-69]

粉体材料	粘结剂	生坯致密度/%	力学性能
Al_2O_3 ($D_{50}=28\ \mu\text{m}$)	ExOne 商用粘合剂	46	—
Al_2O_3 ($D_{50}=73.9\ \mu\text{m}$)	商用粘合剂	50.7	—
Al_2O_3 ($D_{50}=1\ \mu\text{m}$)	溶剂基粘结剂 TW504226Y	51	烧结抗弯强度为60 MPa
SiO_2	呋喃树脂	61.31	生坯抗弯强度为0.38 MPa
硅酸钠/陶砂(100~210 μm)	溶剂基粘结剂	—	抗拉强度>1.2 MPa, 尺寸误差<0.5%
SiO_2	呋喃树脂	55.09	生坯抗弯强度为6.19 MPa

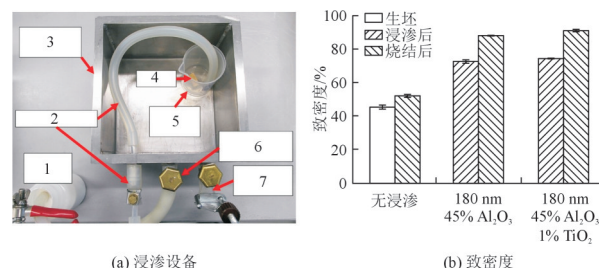
陶瓷BJ成形的本质是“粉体-工艺-结构”三元耦合下的多物理场竞争过程。在介观尺度,颗粒表面能与毛细管力的协同作用主导粉床重排与烧结颈演化,但非等轴颗粒引发的局部应力奇点会破坏毛细管力平

衡,导致孔隙粗化^[70]。在跨尺度层面,粘结剂渗透动力学受控于 Ohnesorge 数与粉体润湿滞后角的动态博弈^[71],需通过纳米掺杂构建“化学键合-机械互锁”双模界面,破解传统树脂的弱键合困境。而层间效应本质是Z向重力势能与X/Y向铺粉剪切力的能量耗散差异,需引入动态界面工程实现孔隙定向湮灭^[72]。该理论为高熵陶瓷构件的多场耦合制造提供了新范式。

2.4 后处理强化技术-浸渗

浸渗技术作为陶瓷材料致密化增强的重要手段,通过液相/溶胶前驱体在生坯孔隙网络中的毛细渗透与高温反应,实现孔隙原位填充与晶界强化,见图5^[73]。其核心机理为:①低黏度浸渗剂通过Darcy定律主导的渗透动力学实现孔隙三维贯通。②高温下浸渗相与基体发生固相反应,形成高强度晶界相(如莫来石、尖晶石)。③体积膨胀效应补偿烧结收缩,抑制裂纹萌生。

硅溶胶浸渗技术在氧化铝陶瓷致密化领域展现出显著潜力。PENG L等^[74]采用细粉氧化铝体系($D_{50}\approx 10\ \mu\text{m}$),发现硅溶胶质量浓度、浸渗时间与致密度呈线性相关,1500℃×2 h烧结试样的孔隙率从40%线性降至30.5%,抗弯强度同步提升100%(从22.31提升到44.8 MPa),微观机理揭示, SiO_2 在 Al_2O_3 颗粒界面处通过固相反应生成莫来石相($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$),其晶格错配度诱导位错缠结,使晶界断裂韧度提升。CRAMER C L等^[75]在粗粉体系($D_{50}=30.93\ \mu\text{m}$)中通过饱和浸渗(质量增加了15%)进一步优化该效应:1600℃烧结时莫来石相含量(质量分数,下同)达23.4%,孔隙率低至26.73%,证实高浸渗剂负载可补偿粗粉烧结活性不足的缺陷。VOGT J等^[76]采用体积分数为45%的180 nm Al_2O_3 与1%的100 nm TiO_2 进行浸渗,在1650℃×5 h烧结致密度达91.2%(提升了24%),抗弯强度达到145 MPa,见图5b。对比表明,硅溶胶体系依赖固相反应构建强化晶界,而氧化钛则通过液相烧结机制降低致密化能垒,为不同应用场景提供了差异化解决方案。

图5 浸渗设备及1650℃×5 h烧结致密度^[76]Fig.5 Infiltration equipment and relative density sintered at 1650℃ for 5 h^[76]

1. 浆料池 2. 浆料入口 3. 气密舱 4. 试样 5. 试样盒 6. 真空泵出口 7. 真空泵入口

3 总结与展望

系统探讨了粘结剂喷射技术在航空发动机大尺寸热端部件制造领域的关键进展与挑战。BJ技术凭借其优异的材料适应性和复杂结构成形能力,为该类高性能构件的制造提供了极具潜力的解决方案,核心聚焦于两条主要技术路线。

(1)直接金属BJ成形路线 通过开发溶剂基与金属盐粘结剂体系,精确调控其流变行为与固化动力学,成功适配了Inconel 718、Ti-6Al-4V等高性能合金粉末。结合优化的两步脱脂工艺与气压烧结策略,显著提升了制件质量,实现了生坯密度和烧结致密度的关键突破。

(2)间接陶瓷型壳BJ制造路线 重点研究了呋喃与酚醛树脂粘结剂与氧化铝/氧化硅基陶瓷粉体的反应性匹配问题。通过引入溶胶浸渍强化等后处理技术,有效增强了型壳的力学性能,将其抗弯强度提升至145 MPa,为精密铸造提供了可靠的高强度陶瓷模具。

粘结剂-粉体界面的化学键合强度、粉体级配的科学设计以及脱脂-烧结工艺链的精确协同是提升BJ制件最终性能(如致密度、强度、尺寸精度等)的关键核心要素。对这些要素的深入理解和有效控制是实现高性能制造的前提。面向未来航空应用的更高要求,BJ技术需在以下维度实现范式突破。

(1)粘结剂-粉末体系创新 粘结剂喷射技术非活性气氛与常温成形特性为高氧敏感材料(Ti/Ti合金)、高碳当量合金及易偏析体系(W-Cu)提供了独特优势,结合数字化多材料沉积能力可精准调控复合材料(如SiC晶须/ Al_2O_3 纳米颗粒增强体系)的梯度结构分布,缩短新材料研发周期。针对生坯强度不足的瓶颈,创新路径包括:①开发光聚合粘结剂体系,通过阳离子环氧树脂/丙烯酸酯体系提升交联密度与成形分辨率。②基于固-液界面能调控理论,建立 θ/η 优化模型(θ 为动态接触角, η 为黏度)。通过分子动力学模拟指导表面活性剂定向修饰,使粘结剂-粉体界面结合能提高,为高精度复杂构件制造提供跨尺度解决方案。

(2)粉末的回收与利用 粘结剂喷射工艺中未固化粉末与废弃构件的低效回收显著增加制造成本并引发环境负担,其根源在于劣化粉末的表面活性与卫星粉增生,导致铺粉缺陷率上升及终件力学性能下降。金属粉末受限于传统回收工艺(机械筛分/高温退火),难以兼顾氧含量控制与球形度保持,而陶瓷粉末因本征脆性面临颗粒破碎与异质团聚难题。对此,可以采用:①低温等离子体清洗与超临界 CO_2 萃取协同工艺实

现粘结剂残留高效脱除,能耗降低。②基于动态共价键或刺激响应型聚合物构建自修复粘结剂,通过pH/温度触发机制实现残留粘结剂的原位可控降解,从源头降低界面污染风险。③构建粉末循环多参数演化模型,结合AI算法实现粉末寿命精准评估与分级复用,推动BJ技术向绿色智能制造转型。

(3)致密化与变形控制 面向高致密复杂金属构件制造需求,需构建多尺度协同的致密化与形性调控体系:①基于BJ与MIM工艺在孔隙演化动力学层面的同源性,引入分段控温策略(脱脂-扩散-致密化三阶段)结合热等静压(HIP)的全向压力渗透消除闭孔缺陷,或通过放电等离子烧结(SPS)的焦耳热活化与微波-超声多物理场耦合技术突破闭孔缺陷消除瓶颈。②针对10%~20%各向异性收缩引发的几何失稳(液相>40%时粘性坍塌、悬垂结构熔融塌陷),提出异质/同质协同支撑策略——采用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 惰性微粒构建非共晶支撑网络抑制界面反应,结合拓扑优化设计热膨胀匹配的金属随形框架,降低尺寸偏差。③建立烧结多场耦合仿真数据库,通过深度卷积神经网络(DCNN)提取温度-应力-密度场关联特征,并采用生成对抗网络(GAN)逆向推导预补偿模型,最终实现“致密度-晶粒尺寸-力学性能”的跨尺度精准调控。

(4)技术交叉与协同 粘结剂喷射技术在航空热端部件制造中的持续突破需通过多技术耦合范式实现:与激光增材制造(LAM)协同可构建“BJ基体-LAM局部强化”复合工艺链,利用BJ高效成形复杂内腔结构,结合LAM在关键区域进行梯度熔覆以优化性能均匀性;与冷喷涂(CS)技术集成能在BJ基体上低温固态沉积热障/耐磨涂层,规避热输入变形的同时提升表面功能性;基于高强度BJ陶瓷型壳替代传统熔模铸造蜡模,可实现内置随形冷却水道等复杂铸型的精准制造(BJ-IC集成);通过扩散连接集成子部件,可突破单体设备成形极限构建超大结构。该协同体系的核心挑战在于数字化工艺链设计、异质材料界面行为调控及跨尺度变形协同控制,最终推动航空热端部件向整体-局部性能协同优化方向演进。

参考文献

- [1] 程准. K417G镍基高温合金大间隙粉末冶金连接技术及接头组织和性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2021.
- [2] 胡彬彬, 王臻. 燃气轮机热端部件用高温合金的研究进展[J]. 科技与创新, 2024(17): 107-109.
- [3] 李世峰, 黄康, 马护生, 等. 航空发动机涡轮叶片气膜冷却孔设计与制备技术研究进展[J]. 热能动力工程, 2022, 37(9): 1-11.
- [4] 高利. 基于涡轮发动机热端部件的高温合金材料钻削仿真研究[D]. 北京:北方工业大学, 2021.
- [5] 宋迎东, 凌晨, 张磊成, 等. 航空发动机和燃气轮机热端部件热腐

- 蚀-疲劳研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 771-788.
- [6] ZHOU X, XU D K, GENG S J, et al. Mechanical properties, corrosion behavior and cytotoxicity of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser metal deposition[J]. *Materials Characterization*, 2021, 179: 111 302.
- [7] 张成, 刘玉德, 张萌, 等. 选区激光熔化 TC4 试样的力学性能及微观组织分析[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(3): 302-306.
- [8] FAYAZFAR H, SALARIAN M, ROGALSKY A, et al. A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties[J]. *Materials & Design*, 2018, 144: 98-128.
- [9] SU Z H, ZHAO K L, YE Z C, et al. Overcoming the penetration - saturation trade-off in binder jet additive manufacturing via rapid in situ curing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59: 103 157.
- [10] HUANG N, COOK O J, ARGÜELLES A P, et al. Review of process-structure-property relationships in metals fabricated using binder jet additive manufacturing[J]. *Metallography Microstructure and Analysis*, 2023, 12(6): 883-905.
- [11] MARTIN E, NATARAJAN A, KOTILINGAM S, et al. Binder jetting of “Hard-to-Weld” high gamma prime nickel-based superalloy RENÉ108[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 39: 101 894.
- [12] MOSTAFAEI A, ELLIOTT A M, BARNES J E, et al. Binder jet 3D printing-Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges[J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 119: 100 707.
- [13] YAMAGUCHI D, OYA N. X-ray observation study of the influence of binder deposition on sintering process of aluminum binder jetting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 128(5): 1 981-1 990.
- [14] BAI Y, WALL C, PHAM H, et al. Characterizing binder-powder interaction in binder jetting additive manufacturing via sessile drop goniometry[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019; 141(1): 011 005.
- [15] CAI J W, ZHANG B C, QU X H. Microstructure evolution and mechanical behavior of SS316L alloy fabricated by a non-toxic and low residue binder jetting process[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 616: 156 589.
- [16] 衡玉花, 毛貽桅, 冯琨皓, 等. 金属粉末床粘结剂喷射 3D 打印关键问题的研究现状与展望[J]. *电加工与模具*, 2024, 10(2): 1-14, 72.
- [17] 陈晓彤, 高雄, 陈婧祎, 等. 陶瓷材料粘结剂喷射 3D 打印进展、应用及挑战[J]. *现代技术陶瓷*, 2025, 46(2): 99-144.
- [18] OROPEZA D, HART A J. A laboratory-scale binder jet additive manufacturing testbed for process exploration and material development[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(11): 3 459-3 473.
- [19] JIANG R, MONTEIL L, KIMES K, et al. Influence of powder type and binder saturation on binder jet 3D-printed and sintered Inconel 625 samples[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(11): 3 827-3 838.
- [20] NAN W, PASHA M, ZAFAR U, et al. Characterisation of gas-atomised metal powders used in binder jet 3D printing[J]. *Powder Technology*, 2024, 436: 119 471.
- [21] LEE S M, KANG S J L. Microstructure development during liquid-phase sintering[J]. *International Journal of Materials Research*, 2005, 96: 141- 147.
- [22] 叶忠宇, 高晓斐, 李婷婷, 等. 航空发动机整体叶盘叶片预变形控制研究[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(15): 96-102.
- [23] ALEGRE J M, DÍAZ A, GARCÍA R, et al. Mechanical and fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated using binder jetting process and subjected to hot isostatic pressing[J]. *Materials*, 2024, 17(15): 3 825.
- [24] SIMCHI A, PETZOLDT F, HARTWIG T, et al. Microstructural development during additive manufacturing of biomedical grade Ti-6Al-4V alloy by three-dimensional binder jetting: Material aspects and mechanical properties[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(3-4): 1 541-1 558.
- [25] PERRUT M, CARON P, THOMAS M, et al. High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and γ -TiAl alloys[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2018, 19(8): 657-671.
- [26] 梁松山, 李克, 孙世伟. 航空发动机涡轮机匣榫槽加工工艺研究[J]. *金属加工(冷加工)*, 2013(15): 23-25.
- [27] DU W, HAYES J, MYERS K, et al. Development of a high-temperature Inconel 625 heat exchanger by model design and binder jetting additive manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2025, 251: 113 333.
- [28] 魏青松, 衡玉花, 毛貽桅, 等. 金属粘结剂喷射增材制造技术发展展望[J]. *包装工程*, 2021, 42(18): 103-119, 112.
- [29] MIYANAJI H, ZHANG S, YANG L. A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 124: 1-11.
- [30] GILMER D, HAN L, HONG E, et al. An in-situ crosslinking binder for binder jet additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 35: 101 341.
- [31] LECIS N, MARIANI M, BELTRAMIR, et al. Effects of process parameters, debinding and sintering on the microstructure of 316L stainless steel produced by binder jetting[J]. *Materials Science and Engineering*, 2021, A828: 142 108.
- [32] JANZEN K, RIEß T, EMMELMANN C. Investigation on curing strategies for metal binder jetting with Ti-6Al-4V[J]. *Additive Manufacturing Letters*, 2025, 13: 100 272.
- [33] BAI Y, WILLIAMS C B. The effect of inkjetted nanoparticles on metal part properties in binder jetting additive manufacturing[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(39): 395 706.
- [34] HENG Y H, MAO Y W, FENG K H, et al. Enhanced green density of binder jetted tungsten heavy alloys with an inorganic metal salt binder[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 35: 2 226-2 241.
- [35] 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.
- [36] CHEN Z P, WAN B B, LIU J C, et al. Sintering densification mechanism of binder jet 3D printing 316L stainless steel parts via dimensional compensation technology[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 3 296-3 307.
- [37] WHEAT E, VLASEA M, HINEBAUGH J, et al. Data related to the sinter structure analysis of titanium structures fabricated via binder jetting additive manufacturing[J]. *Data in Brief*, 2018, 20: 1 029-1 038.
- [38] ZIEGELMEIER S, CHRISTOU P, WÖLLECKE F, et al. An experimental study into the effects of bulk and flow behaviour of laser sintering polymer powders on resulting part properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215: 239-250.
- [39] GERMAN R M. Prediction of sintered density for bimodal powder mixtures[J]. *Metallurgical Transactions*, 1992, A23(5): 1 455-1 465.
- [40] SIMCHI A, PETZOLDT F, HARTWIG T, et al. Microstructural development during additive manufacturing of biomedical grade Ti-

- 6Al-4V alloy by three-dimensional binder jetting: material aspects and mechanical properties [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(3-4): 1541-1558.
- [41] TANG Y, HUANG Z G, YANG J M, et al. Enhancing the capillary force of binder-jetting printing Ti-6Al-4V and mechanical properties under high temperature sintering by mixing fine powder [J]. *Materials*, 2020, 10(10): 1354.
- [42] 李风伟, 谢英密, 毛貽桅, 等. 粉末粒径对3D打印TC4钛合金致密度和性能影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(12): 1674-1678.
- [43] NANDWANA P, ELLIOTT A M, SIDDEL D, et al. Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challenges [J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2017, 21(4): 207-218.
- [44] MOSTAFAEI A, TOMAN J, STEVENS E L, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of differently heat-treated binder jet printed samples from gas- and water-atomized alloy 625 powders [J]. *Acta Materialia*, 2017, 124: 280-289.
- [45] TURKER M, GODLINSKI D, PETZOLDT F. Effect of production parameters on the properties of IN718 superalloy by three-dimensional printing [J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(12): 1728-1735.
- [46] PAUL S, SMITH P J, MUMTAZ K. Use of aqueous polyvinyl alcohol in binder jetting of Inconel 718 [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 135(5): 2355-2372.
- [47] YANG W X, CAI Z C, DUAN W, et al. Effect of feedstock bimodal powder design and cold isostatic pressing on the mechanical behavior of binder jetting additive manufactured Inconel 718 superalloy [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 133: 607-622.
- [48] GERMAN R M. Supersolidus liquid-phase sintering of prealloyed powders [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1997, A28(7): 1553-1567.
- [49] 李钰洁, 刘永葆, 余又红, 等. 进口热斑在气冷涡轮动叶流道内迁移特性分析 [J]. *海军工程大学学报*, 2020, 32(3): 76-81.
- [50] 马岚波, 税国彦, 关洋, 等. K4169合金-陶瓷型壳界面传热系数研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41(8): 1048-1052.
- [51] 田国强, 安晓东, 许小奎, 等. 空心叶片铸造用陶瓷铸型增材制造技术综述 [J]. *中国陶瓷*, 2022, 58(4): 1-8.
- [52] 赵火平, 叶春生, 樊自田, 等. 粘结剂体系对微喷射粘结成形砂型精度和性能的影响 [J]. *铸造*, 2017, 66(3): 223-227.
- [53] UPADHYAY M, SIVARUPAN T, EL MANSORI M. 3D printing for rapid sand casting-A review [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 211-220.
- [54] BAZHENOV V E, DEPUTATOVA K A, RIZHSKY A A, et al. The method for fabricating proppant and cenosphere sand-based casting molds involving the use of binder jetting 3D printing with furan binder and impregnation with colloidal silica binder [J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2025, 9(3): 96.
- [55] 谭锐, 尹绍奎, 姜延春, 等. 砂型喷墨3D打印用呋喃树脂的制备工艺与性能研究 [J]. *铸造*, 2021, 70(10): 1217-1222.
- [56] 王钰洋. 碳化硅陶瓷的粘结剂喷射成型及致密化工艺研究 [D]. 山东淄博: 山东理工大学, 2024.
- [57] ZHANG Z F, WANG L, ZHANG L T, et al. Binder jetting 3D printing process optimization for rapid casting of green parts with high tensile strength [J]. *China Foundry*, 2021, 18(4): 335-343.
- [58] GILMER D B, HAN L, LEHMANN M L, et al. Additive manufacturing of strong silica sand structures enabled by polyethyleneimine binder [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5144.
- [59] 侯晓刚, 菅文娟, 孙高梅琳, 等. 干法制粉用氧化铝陶瓷研磨体性能测试评价体系的研究及应用 [J]. *中国建材科技*, 2023, 32(5): 32-37.
- [60] 兰晓琳, 郑红星, 张依帆, 等. 常压高温固相反应制备SiC陶瓷粉体的研究进展 [J]. *应用化学*, 2023, 40(4): 476-485.
- [61] 向茂乔, 耿玉琦, 朱庆山. 氮化硅粉体制备技术及粉体质量研究进展 [J]. *化工学报*, 2022, 73(1): 73-84.
- [62] CHEN Q, JUSTE E, LASGORCEIX M, et al. Binder jetting process with ceramic powders: Influence of powder properties and printing parameters [J]. *Open Ceramics*, 2022, 9: 100218.
- [63] GRANT L O, HIGGS C F, CORDERO Z C. Sintering mechanics of binder jet 3D printed ceramics treated with a reactive binder [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(6): 2601-2613.
- [64] JIMENEZ E M, AMAN B, EHRMAN O, et al. Evaluating the sintering behaviors of ceramic oxide powders processed via binder jet additive manufacturing [J]. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 2024, 6(6): e10236.
- [65] MIAO G X, DU W, MOGHADASI M, et al. Ceramic binder jetting additive manufacturing: Effects of granulation on properties of feedstock powder and printed and sintered parts [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101542.
- [66] HUANG S J, YE C, ZHAO H, et al. Additive manufacturing of thin alumina ceramic cores using binder-jetting [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 29: 100802.
- [67] ASLAN İ, CAN A. Effects of printing parameters on the mechanical properties of sand molds produced by a novel binder jetting 3D printer [J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2025, 10(4): 2939-2950.
- [68] WANG F, CUI X H, YANG Q, et al. Fabrication and posttreatment for inorganic binder jetting sand molds for casting [J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 73: 103690.
- [69] LIU H, LEI T, PENG F. Compensated printing and characterization of the droplet on the binder migration pattern during casting sand mold 3D printing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 108: 114-125.
- [70] MATSUI K, HOJO J. Initial sintering mechanism and additive effect in zirconia ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, 105(9): 5519-5542.
- [71] YANG Z S, ZHANG Y M, YAN W T. High-fidelity modeling of binder-powder interactions in binder jetting: Binder flow and powder dynamics [J]. *Acta Materialia*, 2023, 260: 119298.
- [72] HARTMANN C, VAN DEN BOSCH L, SPIEGEL J, et al. Removal of stair-step effects in binder jetting additive manufacturing using grayscale and dithering-based droplet distribution [J]. *Materials*, 2022, 15(11): 3798.
- [73] HUANG S W, WU H D, JIANG C, et al. Preparation of high-strength ZrO₂ ceramics by binder jetting additive manufacturing and liquid glass infiltration [J]. *Ceramics International*, 2024, C50(21): 44175-44185.
- [74] PENG L, JIANG W M, YANG L, et al. Effect of silica sol on performance and surface precision of alumina ceramic shell prepared by binder jetting [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(17): 24372-24382.
- [75] CRAMER C L, ARMSTRONG B L, TROFIMOV A A, et al. Alumina-based filters made via binder jet 3D printing of alumina powder, colloidal silica infiltration, and sintering [J]. *The American Ceramic Society*, 2021, 18(6): 1960-1968.
- [76] VOGT J, FRIEDRICH H, STEPANYAN M, et al. Improved green and sintered density of alumina parts fabricated by binder jetting and subsequent slurry infiltration [J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2022, 7(2): 161-171.

(编辑:彭瑾)