https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20250417

增材制造金属多孔材料的研究进展

杨 坤，沈 垒，赵少阳，徐晨阳，许忠国
（西北有色金属研究院 金属多孔材料全国重点实验室，陕西 西安 710016）

摘 要：金属多孔材料是一类兼具结构功能一体化特征的材料，其显著特点是具有明确的孔隙结构。这种孔隙结构使其同时具备金属材料与多孔材料的双重特性，因而广泛应用于核工业、石油化工、航空航天等领域。增材制造技术能够实现复杂多孔金属结构的一体化制造，具有材料利用率高、可精确调控孔隙结构等优势。本文介绍了面向金属多孔材料的增材制造技术发展现状，重点分析了增材制造金属多孔材料的成孔机制与性能特点，综述了其在医疗、模具等行业的应用进展，探讨了人工智能在金属增材制造技术中的应用情况，并对该技术未来的发展进行了展望。

关键词：增材制造；金属多孔材料；孔结构；孔隙率；骨科植入体

中图法分类号：TB383 **文献标识码：**A **文章编号：**1002-185X(2026)11-2937-11

1 引 言

金属多孔材料是一种以金属为基体、具有显著孔隙特征的结构功能一体化材料[1]。孔隙结构的存在不仅保留了金属固有的高强度、可焊接性及抗疲劳性等优异性能，更赋予材料高比强度、高比表面积等独特优势，进而衍生出卓越的生物相容性、电磁屏蔽效能、抗热震性、能量吸收能力及渗透特性等多种功能[2]。这些综合性能优势使得金属多孔材料在航空航天、生物医疗、能源交通等领域的规模化应用成为可能，典型代表如多孔钛合金医用植入体[3]，多孔铝高铁填充材料[4]，铁基多孔高温气体净化膜[5]以及多孔含油轴承[6]等。

传统金属多孔材料的制备方法包括粉末冶金、熔体发泡以及模板法。其中，粉末冶金发展最早，商业化应用最为成熟[7]。该工艺通常以金属粉末、纤维或丝网为原料，经过成形、烧结及后续加工等工序获得最终制品，广泛应用于生产过滤分离元件、含油轴承、流体分布与控制用通气元件、热管理用热管等。熔体发泡法的起源可追溯至1943年B. Sosnick在熔融铝中加入汞的发泡尝试[8]。其原理是将发泡剂均匀分散到高温熔融金属中，发泡剂受热分解产生气体（如H_2、CO_2等）在熔体内膨胀并滞留，经冷却凝固后形成多孔结构。基于此原理，后续发展出了气体注入法、原位气体发生法和固-气共晶法等技术路线。熔体发泡法的主要特点在于可制备全闭孔结构的金属多孔材料，例如用于航天器着陆缓冲器的泡沫铝。模板法是第3类重要的金属多孔材料制备技术，其经典产品为Zimmer公司利用聚氨酯多孔材料为模板，通过反应气相沉积技术制备的医用多孔钽植入体[9]。

可见，传统制备工艺（如粉末堆积成孔或工艺调控成孔）在材料孔隙率与孔径尺寸的精确控制方面存在显著局限性，且难以高效制备具有复杂几何构型的金属多孔部件。近年来，数字化驱动的先进制造技术迎来高速发展期。以粉末床激光熔融（laser-based powder bed fusion, PBF-LB）和粉末床电子束熔融（electron beam powder bed fusion, PBF-EB）为代表的金属增材制造（additive manufacturing, AM）技术日趋成熟，已在钛合金、高温合金、铝合金及难熔金属等复杂构件的制造中取得突破，成功应用于医疗、航空、航天等领域。同时，这些技术也为金属多孔材料的研发与制造提供了全新的工艺路径。自2005年以来，增材制造金属多孔材料在孔结构形成机制、孔隙结构精确调控及工程应用拓展等方面均取得了显著进展[10]。

因此，本文旨在系统综述增材制造金属多孔材料的研究现状与进展。首先，介绍当前用于金属多孔材料制备的主流增材制造技术及其特点与局限性。其次，深入分析现有增材制造技术的成孔机制与关键科学问题。重点评述增材制造金属多孔材料在生物医疗、航空航天等领域的典型应用案例。最后，探讨当前技术发展面临的挑战，并对未来研究方向提出展望。

2 面向金属多孔材料的增材制造技术

增材制造是通过将数字模型（CAD）直接转化为实

收稿日期：2025-11-08
基金项目：国家自然科学基金（52204375）
作者简介：杨 坤，男，1987年生，博士，正高级工程师，西北有色金属研究院金属多孔材料全国重点实验室，陕西 西安 710016，电话：029-86231095，E-mail：yangk029@163.com

体物件，提供了前所未有的设计自由度和较高的材料利用率，尤其擅长制造传统方法难以实现的复杂结构。当前，适用于金属多孔材料制备的增材制造技术主要包括粉末床熔融（powder bed fusion, PBF）和粘结剂喷射（binder jetting, BJ）技术。

表 1 对比了上述 3 种技术的主要性能参数[11–20]。其中，粉末床激光熔融技术得益于其精细的光斑尺寸和较小的粉末原料粒度，所制备的构件通常具有优异的表面质量和较高的成形精度[11]。粉末床电子束熔融技术的显著优势源于电子束的高移动速度和高能量密度，使其能够实现粉末床的随形预热。这种原位随形热处理能力在成形过程中即可对构件进行局部温度调控[12–13]，特别适用于加工脆性难熔材料，如金属间化合物和难熔金属等。然而，过高的粉末床温度可能导致熔池材料表面过度粘着，从而增加成形件的表面粗糙度[14]，这对高性能金属多孔材料的制备是不利的。与 PBF-LB、PBF-EB 等直接熔化成形技术不同，粘结剂喷射成形技术（BJ）属于间接增材制造技术。其工艺原理与传统粉末冶金的注射成形类似：首先利用粘结剂将金属粉末逐层粘结成特定形状的生坯，随后通过高温烧结使生坯致密化并获得所需的机械强度[15]。相较于粉末床熔融技术，粘结剂喷射技术的成熟度与普及程度相对较低，因此，该技术制备金属多孔材料的相关研究报道也相对较少。

表 1 适用于金属多孔材料的增材制造技术性能参数对比

Table 1 Main properties of additive manufacturing technology for metallic porous material[11–20]

Parameter	PBF		BJ
	PBF-LB	PBF-EB	
Energy source	Laser	Electron beam	Sintering
Powder size/μm	15–53	45–105	20–150
Layer thickness/mm	0.02–0.1	0.05–0.2	0.03–0.2
Powder bed temperature/℃	≤200	≤1300	-
Building efficiency/$cm^3 \cdot h^{-1}$	About 25 （Single laser）	About 80 cm^3/h	≤7000
Beam diameter/μm	50–120	150–300	30
Maximum build envelope dimension	1500 mm×1500 mm×1500 mm	600 mm×600 mm×700 mm	500 mm×500 mm×495 mm
Minimum part size/mm	0.1–0.3	0.5	-

3　增材制造金属多孔材料

孔隙率与孔径分布是决定金属多孔材料力学性能的关键因素，同时对其功能特性也具有显著影响。因此，基于现有报道中金属多孔材料孔结构形貌特征及其孔结构形成机制，对增材制造金属多孔材料的研究现状进行系统阐述。

3.1　随机型孔结构

随机型孔结构（stochastic pore structure，SPS）是指通过调控粉末特性或工艺参数（如能量密度、扫描策略等），主动引入粉末不完全熔化状态，从而在构件内部形成非周期性孔隙缺陷，最终实现多孔化的一种策略。其形成机制如图 1a 所示：在充足的能量输入下，激光束熔融金属粉末形成连续的熔池（图 1b），冷却后获得致密实体；反之，若能量输入不足（如激光功率过低或扫描速度过快）或单道熔覆线搭接不连续，则会在熔道内部（图 1c）或熔道之间形成孔隙，这些孔隙在成形过程中得以保留，最终形成随机型金属多孔材料[21]。

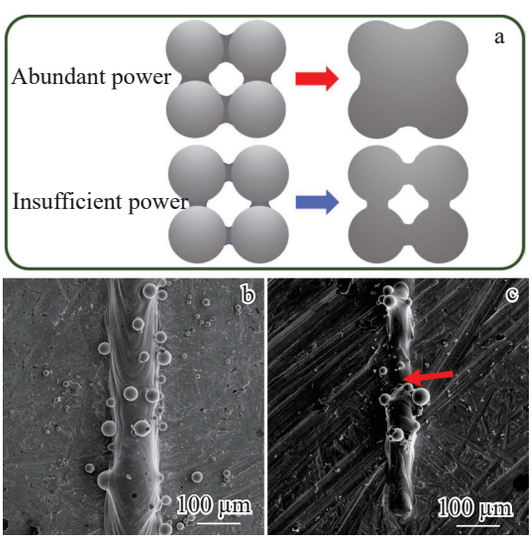


图 1 随机型孔结构的形成机制示意图及单道扫描轨迹

Fig.1 Schematic diagram of mechanism of the stochastic pore structure in additive manufacturing via abundant power and insufficient power (a); single laser scanning trace of abundant laser (b) and insufficient laser with red arrows pointing pores (c)[21]

图 2 为随机型孔结构的几种典型形貌特征。其中，图 2a 为通过降低能量输入（如提高扫描速度或降低激光

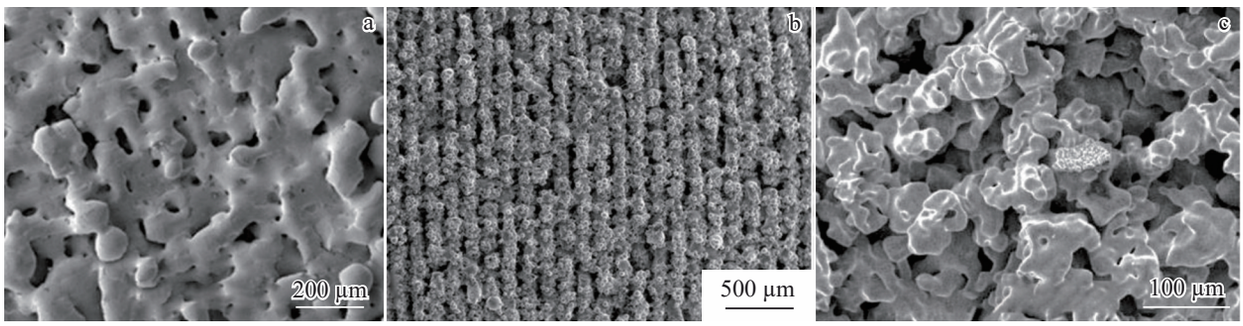


图2 增材制造技术制备的随机型孔结构典型形貌特征

Fig.2 Morphologies of the stochastic pore structures fabricated by additive manufacturing with adjusted energy density (a)[22] as well as scanning strategy (b)[23] and build by binder jetting[15]

功率）导致粉末不完全熔化，在构件表面及内部形成大量相互连通的孔隙缺陷[22]。图2b为通过增大扫描线间距（hatch distance, HD），利用三维搭接形成的孔隙结构[23]。图2c为粘结剂喷射（binder jetting, BJ）技术通过打印生坯并结合后续固态烧结工艺形成的多孔结构[15]。综合上述分析及已有研究，可以推断：图2a和2c所示机制形成的孔隙率通常较低，孔径较小；而通过调控扫描线搭接间距（图2b）则更容易获得高孔隙率和大孔径结构。

表2汇总了当前报道的增材制造随机型孔结构的关键参数[15, 21–34]。可见，相关研究主要集中在不锈钢和钛合金体系，对镁合金、铌合金等材料亦有涉及。综合表2数据可知，受其成孔机制限制，增材制造制备的随机型多孔金属材料的孔隙率普遍低于40%，孔径多分布在100 μm以下[21–24]。此类结构的应用主要聚焦于两大方向：一是生物医用骨科植入体；二是航空航天领域高温热端部件的主动发汗冷却技术研究。

3.2　点阵型孔结构

点阵型孔结构（lattice pore structure，LPS）是指由杆状或板状微结构单元按照周期性单胞（晶胞）排列构成的三维开孔结构。研究表明，在孔隙率一定时，微结构单元的空间拓扑构型是决定点阵多孔材料力学性能的核心因素，因此其结构设计至关重要。现有研究通常遵循如图3所示的设计流程[35]：首先，从晶胞库中选择或创新设计单胞结构，确定材料的空间拓扑形式；其次，通过调整杆/板单元的尺寸参数（如直径、厚度）设定孔隙率（或相对密度），进而调控材料的宏观强度与模量；最后，将优化后的单胞（图3b）在目标构件的几何空间内进行周期性排列填充，完成设计并进入制造阶段。

自2005年英国利物浦大学[10]首次报道采用PBF-LB技术成功制备出了如图4所示的316L不锈钢点阵结构以来，相关研究呈现爆发式增长，成为增材制造领域的热点。当前研究主要集中在以下3个方面：

3.2.1　拓扑构型创新设计以优化应用性能

增材制造技术的成熟与普及，推动了点阵型多孔金属材料在航空、航天及国防等领域的广泛应用，其高比强度、高可靠性等特性高度契合装备轻量化与多功能化的发展需求。因此，大量研究聚焦于探索拓扑构型、相对密度、单胞尺寸等关键参数对点阵材料力学行为（如变形模式、失效机制）的影响规律。为进一步提升力学性能，研究者们相继开发了结构组合[36–38]、拓扑优化[39–40]及仿生优化[41–42]，梯度结构[43]等新型设计策略（图5）。例如，Noronha等[36]通过有序组合板状与管状单元，显著提升了钛合金点阵材料的比强度和比刚度，如图5a所示。

3.2.2　点阵结构成形质量提升

在拓扑设计确定后，点阵材料内部数以亿计的微结构单元的成形质量（包括表面粗糙度、尺寸精度及内部缺陷）与微观组织成为影响其最终性能的关键。Zhang等[14]通过实验研究，提出了针对电子束粉末床熔融（PBF-EB）技术成形微结构单元的制造可行性判据，从倾斜角度、最小特征尺寸、成形精度及缺陷控制等方面为点阵设计提供了制造约束指导，如图6所示。

然而，逐层沉积固有的“台阶效应”导致微结构单元表面粗糙度高，引发应力集中并易致材料过早失效。解决此问题主要有2个方向：一是结构-组织协同调控。例如，笔者所在研究团队通过优化点阵构型设计并同步调控Ti-6Al-4V合金微观组织，成功制备出具有高韧性的点阵材料，其在压缩变形过程中变形均匀，应变超过50%仍无脆性断裂发生[44]。二是成形工艺优化。如Noronha等人[37, 45]针对PBF-LB成形空心管状点阵结构，开发了“双轮廓扫描策略”，该策略不仅改善了内部成形质量，还通过扫描路径偏移有效解决了表面粉末粘附问题，显著提升了材料的比强度和比刚度，如图7所示。

3.2.3　后处理工艺开发与优化

由于打印态点阵材料普遍存在表面粉末粘附和内部缺陷，其实际力学性能常低于设计预期。因此，后处理工艺（如热等静压、喷砂、化学抛光等）的开发成为另一研究热点。对于传统致密增材制件，热等静压能有效消除内部孔隙，提升力学（尤其是疲劳）性能[46]。然而，对于点阵多

表 2 增材制造技术制备的具有随机型孔结构金属多孔材料的性能参数

Table 2 Main properties of materials with random pore structure manufactured by additive manufacturing

Method	Material	Strategy	Porosity/%	Pore size/μm	Application	Ref.
PBF-LB	17-4PH steel	Laser power Scanning speed Hatching distance	1.75–17.65 6.96–27.03 7.36–36.02	10–30 12–18 ＞100	-	[24]
PBF-LB	316L stainless steel	Scanning speed	4–35	-	-	[25]
PBF-LB	Alloy steel	Energy density	6–29	-	Injection moulding die	[26]
PBF-LB	Ti-6Al-4V	Laser power	-	-	Orthopedic implant	[21]
PBF-LB	316L stainless steel	Laser spot size Hatch distance	15–21 20.37–32.74	7.2–120.3 2.5–84	Flow cell system	[23]
PBF-LB	316L stainless steel	Rotated scan vector	20.6–22.0	-	Permeable components	[27]
PBF-LB	420 stainless steel	Foaming agent and energy density	12.05–25.36	4–100	Breathable mould steel	[28]
PBF-LB	Corrax stainless steel	Hatch distance	5.91–19.97	39.18–138.67	Breathable mould steel	[29]
PBF-LB	Ti-6Al-4V	Scanning strategy	45.19	30–120	-	[30]
PBF-LB	ZK60 magnesium alloy	Laser power	9.33–18.13	12.5–210	Orthopedic implant	[31]
PBF-LB	C103 Nb alloy	Lattice	48	100–300	Transpiration cooling	[32]
PBF-LB	Nb	Scanning strategy	-	10–50	Orthopedic implant	[22]
PBF-EB	Inconel 625	Focus offset, pulsed scanning, and layer-by-layer rotation	23–32	-	Thermal protection	[33]
PBF-LB	316L stainless steel	Laser power, scan speed, and sintering temperature	25–58	35–160	Orthopedic implant	[34]
BJ	316L stainless steel	Powder size and sintering temperature	0–52.2	14–34.9	Filter element	[15]

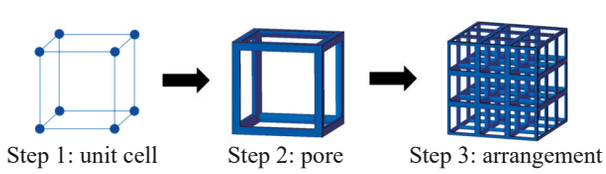


图 3 点阵孔结构的设计流程图

Fig.3 Design flowchart of lattice pore structure[35]

孔材料，其微结构单元表面存在大量应力集中点，未熔合粉末或表面粘粉极易成为失效源。热等静压对此类表面缺陷的改善效果有限。研究表明，通过喷砂、化学抛光等手段降低微结构单元的表面粗糙度，是提升点阵材料性能（特别是疲劳性能）更为有效的途径[47–48]，如图 8 所示。

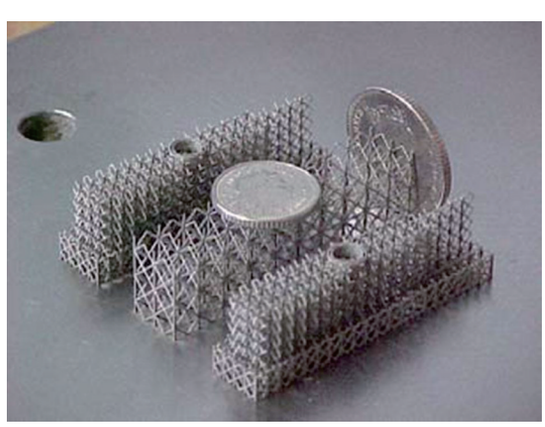


图 4 PBF-LB 技术制备的 316L 点阵型多孔材料

Fig.4 316L lattice porous material fabricated by PBF-LB[10]

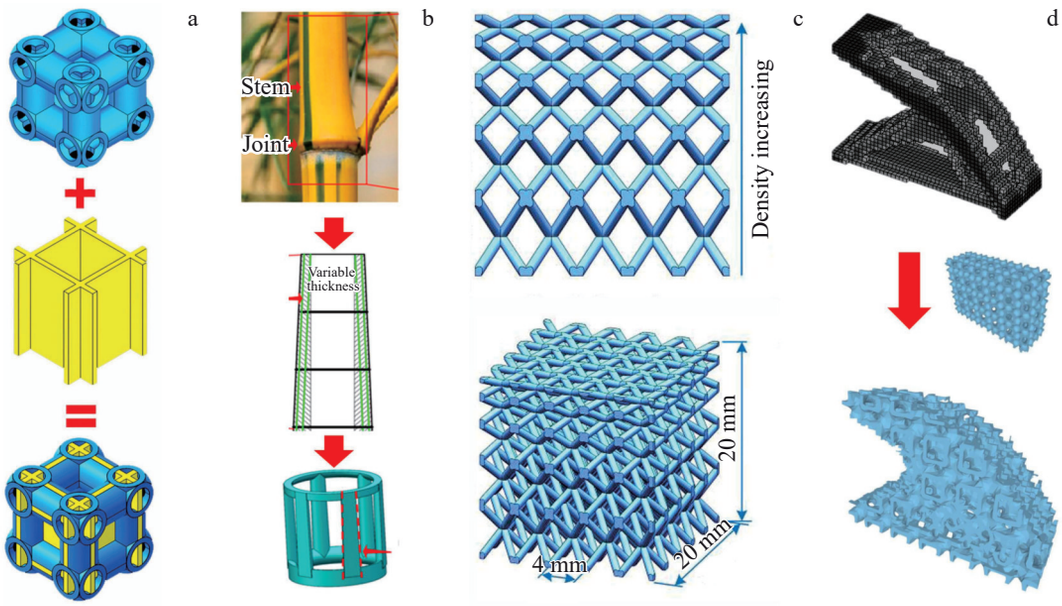


图5　点阵型金属多孔材料的性能优化方法

Fig.5　Performance optimization methods for lattice porous materials: (a) structural combination[36–38], (b) biomimetic structure[41–42], (c) gradient structure[43], and (d) topology optimization[39–40]

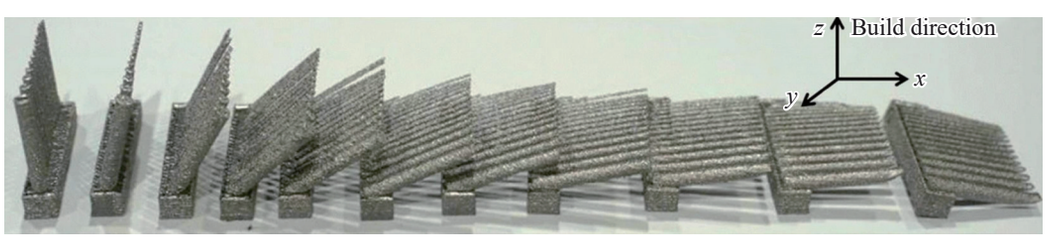


图6　粉床电子束增材制造技术制备的不同直径不同倾斜角的杆单元实物

Fig.6　Image of PBF-EB Ti-6Al-4V cantilever struts of different diameters (0.05–3 mm) and inclination angle (0°–90°)[14]

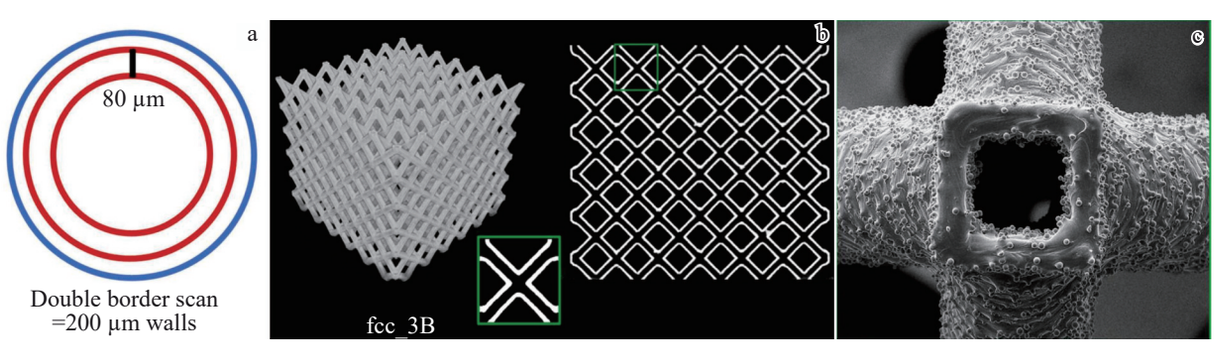


图7　粉床激光增材制备空心管点阵材料

Fig.7　Hollow-strut lattice meta-materials prepared by laser powder bed fusion: (a) laser scan trajectory, (b) CT images, and (c) SEM image of the hollow-strut lattice metamaterial after ultrasonic cleaning (the blue trace represents the outer circle, while each red circle denotes a laser scan trajectory)[37]

3.3　数字型孔结构

数字型孔结构(mathematical equation-based pore structure)是指由数学方程式精确描述并生成的三维孔隙结构，以三周期极小曲面(triply periodic minimal surface, TPMS)结构为代表。TPMS 结构在任意点处的理论平均曲率为零[49]，这使得其应力集中程度显著低于点阵结构，从而赋予材料更优异的静态强度[50]和疲劳性能[51]。同时，其光滑连续的内部表面具有低流阻特性，在高效传热和促进生物流体传输/骨整合方面展现出优势，在热管理器件和骨科植入体应用中潜力巨大[52–53]。

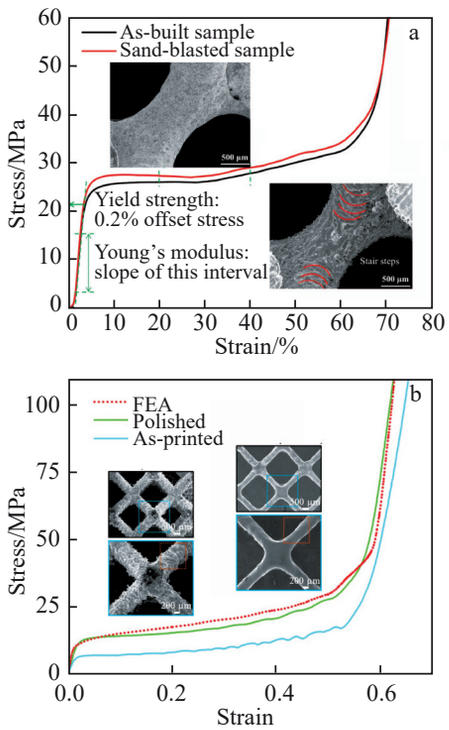


图 8　后处理对点阵型金属多孔材料形貌及力学性能的影响

Fig.8 Influences of post-processing on the morphology and mechanical properties of lattice porous materials: (a) sand blasting[47] and (b) chemical etching[48]

数字型孔结构的另一显著特点是其复杂的内部通道可将空间分割为2个独立且相互交织的域，这为2种流体间的高效热交换提供了理想通道。因此，当前数字型孔结构的研究热点高度集中于热交换应用[52]，特别是增材制造多孔铜基热交换器的开发。Qian等[53]采用PBF-LB技术制备了不同TPMS构型的多孔铜换热器（图9）。结果表明，得益于其独特的结构优势，TPMS换热器的性能因子（j/f因子）相较于传统板式换热器最低提升了178.1%，且较文献[53]报道的先进换热器效率提升了47.8%，充分展现了增材制造在高效换热器领域的应用前景。

4　增材制造金属多孔材料的应用

近年来，随着高性能金属多孔材料在硬组织植入物、过滤与分离、能源环保及热防护等领域需求的持续增长，增材制造技术凭借其精准的孔结构调控能力，推动了该类材料的研发与应用呈现爆发式增长态势。以下从4大核心应用领域展开论述。

4.1　骨科植入物

骨科植入物是金属增材制造技术批量化应用最早的领域。自2015年7月22日北京爱康医疗采用电子束选区熔化（PBF-EB）技术研发的我国首个3D打印人体植入物——人工髋关节获得国家食品药品监督管理总局（CFDA）注册批准以来，随着医疗界对增材制造技术的认可度不断提升

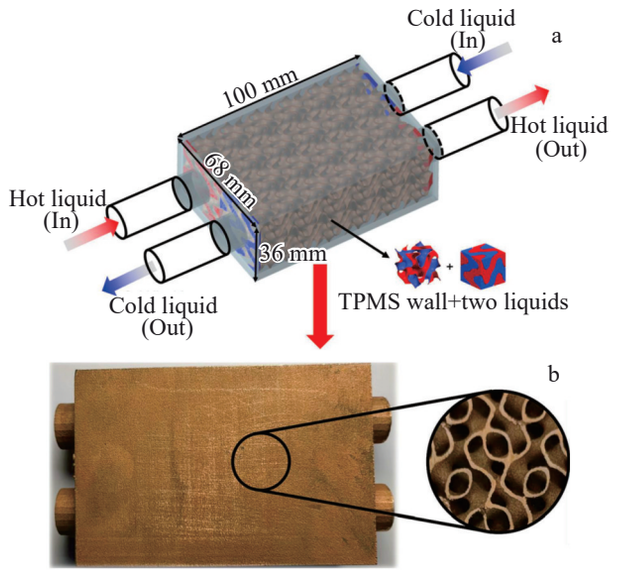


图 9　PBF-LB技术制备的具有数字型孔结构的铜基热交换器

Fig.9 Copper heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces prepared by PBF-LB: (a) schematic diagram of heat transfer in the TPMS heat exchanger; (b) photos of the 3D printed TPMS heat exchanger[53]

以及我国植入物认证政策的持续优化，增材制造技术制备的骨科植入物在近5年内呈现爆发式增长。

截至2025年7月底，获注册认证的增材制造骨科植入体数量已达到69种（如图10所示）。同时，为了提供优异的生物相容性，所有已获认证的骨科植入体结构中均整合了多孔结构。研究表明，孔径在400~600 μm、孔隙率在75%~85%的多孔结构最适合体内组织生长、细胞粘附与增殖，而这一孔结构参数范围恰好符合增材制造的工艺特点。

从适应病症部位来看，已认证产品主要集中在脊柱类、髋关节和膝关节植入体，这与我国关节疾病的发病率高度吻合。从材质分布来看，具有优异生物相容性的钛合金植入体占65种，近年来成形工艺逐渐成熟的钽金属植入体占3种，CoCrMo合金制备的定制式膝关节植入体占1种。

4.2　过滤与分离

过滤与分离是传统金属多孔材料应用最广泛的领域之一。尽管传统粉末冶金工艺能够实现过滤与分离用金属多孔材料的低成本制造，但难以制备具有复杂结构或特殊过滤性能要求的器件。增材制造技术应用于过滤与分离领域金属多孔材料的研究始于2009年，Yadroitsev等[54]采用PBF-LB技术制备了用于化学和生物医学的薄壁3D过滤器并评价了其性能。然而，截至目前，国内尚未见相关商业化应用的报道。相比之下，英国的Croft Additive Manufacturing（CAM）公司[55–56]已采用增材制造技术开发出商业化产品，测试结果表明，PBF-LB制备的过滤器较传统烧结件渗透阻力降低35%、抗压强度提升

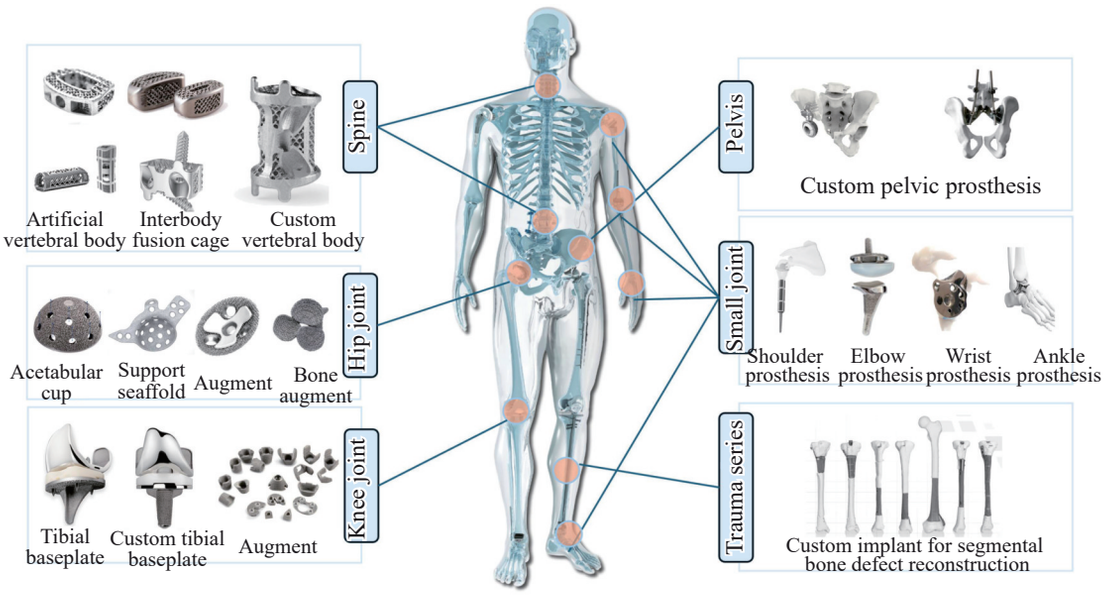


图 10　获国家药品监督管理局（NMPA）注册认证的增材制造金属植入体

Fig.10　Additive manufacturing metal implants registered and certified by the national medical products administration (NMPA)

120%，尤其适用于高温腐蚀性介质分离（如图 11 所示）。

4.3　透气模具

将金属多孔材料作为注射模具排气系统部件，可有效排除注塑过程中的残留气体，在减小注射压强、缩短生产周期和降低废品率等方面具有显著优势。增材制造技术不仅能实现复杂结构的高效制备，还能根据服役条件对孔隙结构进行按需调控。因此，该技术在制备具有保护性透气功能或随形水冷结构的模具方面展现出巨大应用前景。2008 年，Narahara 等[57]通过控制选区激光烧结（SLS）工艺参数实现孔结构的调控。结果表明，增材制造技术制备的多孔透气模具成形质量高，有效降低了注塑成形压力，提高了模具使用寿命。Zeng 等[28]则将 PBF-LB 技术与发泡造孔技术相结合，使用 CrN_x 作为成形 AISI 420 不锈钢的发泡剂，通过调整工艺参数和发泡剂比例，制备出孔径为 2~30 μm、孔隙率为 26% 的透气材料，如图 12 所示。测试结果表明，其透气性能、耐腐蚀性和机械强度均优于传统粉末冶金工艺制备的 PM-35 透气材料。

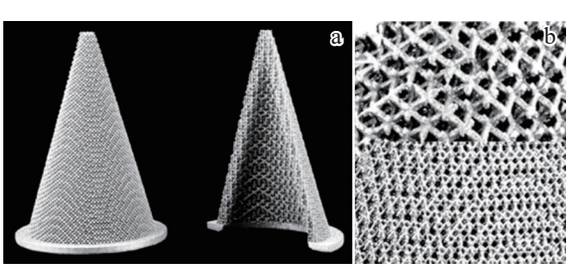


图 11　英国 CAM 公司采用增材制造技术制备的锥形过滤器

Fig.11　Filters prepared by CAM using additive manufacturing: (a) 32 mm-diameter AM conical filter; (b) pore morphology[55-56]

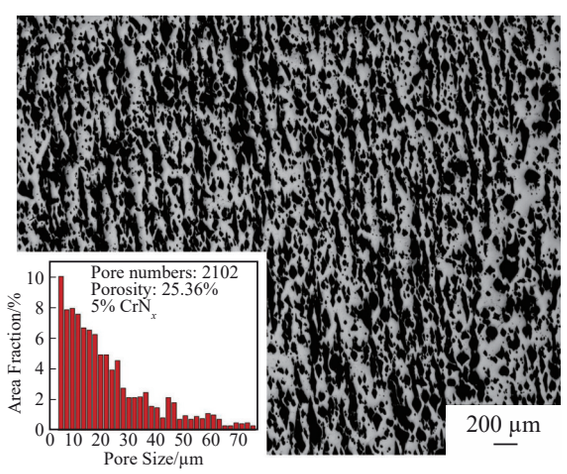


图 12　PBF-LB 技术制备的透气 AISI 420 不锈钢形貌与孔径分布

Fig.12　OM image and pore size distribution of cross-section of the breathable AISI stainless steel sample prepared by PBF-LB[28]

4.4　热管理与热防护

先进航天飞行器是 21 世纪航空航天领域的战略制高点，其热防护技术与专用材料在高速飞行极端环境中面临严峻挑战。随着增材制造技术的成熟，以金属多孔材料为核心部件的主动发汗冷却技术，凭借其抵抗长时间空气动力学加热的能力、更大的设计灵活性和可重复使用的优势，成为增材制造金属多孔材料的另一关键应用领域。2018 年，Huang 等[58]采用 PBF-LB 制备了不同孔隙参数的发汗冷却结构，并与传统粉末烧结金属多孔材料进行了性能对比，如图 13 所示。结果表明，增材制造技术制备的热防护材料冷却效率更优，且强度较传统粉

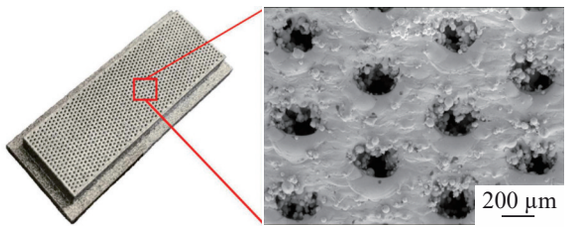


图 13 增材制造技术制备的用于主动发汗冷却的金属多孔材料

Fig.13 Metal porous materials prepared by additive manufacturing technology for transpiration cooling[58]

末冶金材料提高了 440%。清华大学姜培学团队[59]近期的综述文章对此领域的进展进行了详细介绍。

5 人工智能在金属增材制造的应用

在金属增材制造成形过程中，数以亿计的孔结构以及制造过程中快速熔化行为和极端非平衡凝固条件，无法避免孔隙、裂纹等冶金缺陷以及强织构、柱状晶粗大等凝固组织缺陷，进而恶化材料力学性能。因此，传统试错法在增材制造工艺开发与质量控制等方面，已经无法满足相关行业应用在研发速度上的需求。

表 3 人工智能在增材制造技术各环节的应用情况

Table 3 Main application of AI in additive manufacturing

Application direction	Core objective	Typical AI technology & method	Ref.
Process optimization & intelligent parameter decision-making	Find the optimal process parameters to achieve a balance between multiple objectives	Machine Learning algorithms, genetic algorithms for optimizing neural networks, and deep Learning	[60–61]
Defect detection & quality monitoring	Identify defects in real-time during the manufacturing process and provide early warnings or enable adaptive repair	Computer vision, deep learning, and multi-modal data fusion	[62–64]
Material & microstructure analysis	Rapidly analyze material microstructures and predict their final properties	Deep learning and convolutional neural networks (CNN)	[65–66]
Intelligent design & generative design	Automatically generate manufacturable structural designs based on performance requirements or inspiration images	Generative AI topology optimization, and reinforcement learning	[66–67]
Process monitoring & adaptive control	Enable the manufacturing system to “perceive” the environment and make real-time adjustments for dynamic, intelligent production	Real-time perception with optical scanning, computer vision, and parameter modeling	[65,68]
Manufacturing traceability & security assurance	Trace the manufacturing origin of a part through its characteristics to ensure supply chain security	Deep learning models	[69]

随着计算机技术飞速发展，近年来人工智能（artificial intelligence，AI）依托模式识别和算法优化等技术，赋予计算机从大量数据中学习并总结归纳规律的能力，为高性能金属多孔材料的高质量制造提供了全新的技术路径。表 3 总结了人工智能在增材制造中的应用情况[60–69]。可以看到，以机器学习算法（machine learning algorithms）为代表的人工智能技术已全面深入到增材制造技术的各个技术环节，其核心作用是处理复杂数据、优化工艺、提升质量与效率。研究者可利用积累的海量数据，在合金成分、工艺参数、冶金缺陷、性能评估及过程监控等方面应用机器学习技术，显著提高了增材制造的智能化水平，有效降低研发成本并缩短周期。

6 总结与展望

三维孔隙结构赋予金属多孔材料多重功能特性，使其在生物医疗、航空航天等领域的应用日益广泛。近年来，随着增材制造装备的普及以及原材料成本的持续降低，增材制造技术为金属多孔材料的制备提供了全新途径。该技术已在骨科植入物领域实现批量应用，并在其他行业的应用探索中逐步展开。然而，受限于研究时间较短，当前对部分金属多孔材料的认知仍较多依赖经验积累，缺乏系统理论指导，使得增材制造金属多孔材料的发展面临以下主要挑战和机遇：

1）结构设计与性能预测工具亟待开发：相较于随机型孔结构，点阵型和数字型孔结构具有更强的可设计性，高度契合航空航天等高可靠性应用场景的需求。然而，目前缺乏成熟的商业化软件用于这类复杂孔结构的自动化设计与性能预测。现有设计过程主要依赖研究人员的

经验试错，性能验证则需借助操作复杂、门槛高的有限元模拟软件。虽然模拟精度较高，但效率低、成本高。因此，未来亟需开发用户界面友好的金属多孔材料专用设计与性能预测软件。此类软件应能兼容通过实验研究获得的增材制造成形能力判据（如最小特征尺寸、悬垂角限制等），并具备直观易用的操作界面，以显著降低设计门槛，加速增材制造金属多孔材料的推广应用。

2）标准化评价体系尚未建立：经过近半个世纪的发展，烧结金属多孔材料的材料标准与性能测试标准已相当完善，为应用设计提供了便利。然而，对于增材制造金属多孔材料，其核心参数（如孔隙率、孔径分布）的测试方法大多借鉴传统技术，且现有研究采用的评价方法不统一，导致不同研究结果之间缺乏可靠的可比性。因此，亟需针对增材制造金属多孔材料的独特孔结构特点（如复杂形貌、内部连通性），建立统一的材料性能评价方法与标准体系。这将有效促进材料研发水平的提升，并拓展其应用范围。

3）间接增材制造技术的工程化研究需加速：以粘结剂喷射成形（binder jetting, BJ）为代表的间接增材制造技术虽起步较晚，但从其所能实现的孔隙结构、生产成本及规模化生产稳定性控制等方面来看，该技术极具应用潜力。因此，应尽快围绕BJ技术，选定具有明确需求的具体应用场景，并系统性地开展从粘结剂选型、粉末原料适配、增材制造工艺优化、烧结工艺调控到最终性能测试评价的全流程工程应用技术研究，以推动该技术的产业化进程。

4）增材制造与其他制备技术的复合联用，是突破单一技术局限、实现金属多孔材料与结构跨尺度精准构筑的关键路径。例如，将增材制造与脱合金技术联用[70]，可先通过增材制造精确成形大尺寸、宏观几何可控的母体合金，再通过后续脱合金过程在微观甚至纳米尺度上造孔。这种“自上而下”与“自下而上”的结合，高效地实现了块体跨尺度多级金属多孔材料的高质量成形。同样，将增材制造与熔渗技术结合[71]，可利用增材制造预先制备出三维连通、形貌高度可控的框架结构作为增强体，再通过熔渗将第二相基体材料填入其中。这种方法为制备框架结构精确设计、界面结合良好的高性能金属基复合材料开辟了新途径，极大地拓展了材料的设计自由度与最终性能边界。

5）人工智能与增材制造的深度融合，有望颠覆传统制造范式，迈向“自感知、自决策、自优化”的智能生产时代。AI可作为核心驱动力，推动金属多孔材料的增材制造进入“功能导向设计”的新纪元。通过深度学习与多物理场仿真相结合，AI可以逆向设计出具有目标传热、吸能或生物相容性的最优多孔构型。在制造过程中，机器学习通过实时分析熔池动态与热历史，精准预测并调控孔隙的形成、形状与分布，有效地避免缺陷，确保结构一致性。此外，生成式AI会加速新型多孔合金的成分开发，通过分析“成分-工艺-结构-性能”之间的复杂映射关系，快速筛选出兼具优异力学性能和特定功能性的新材料配方。最终，AI将实现金属多孔构件从宏观架构到微观结构的全流程数字化智造，为航空航天、生物医疗和能源化工等领域带来突破性的轻量化及功能一体化解决方案。

参考文献　　References

[1] Zhu B, Duke M, Dumée L F *et al. Membranes*[J], 2018, 8(3): 27

[2] Liu Zhuomeng(刘卓萌), Wang Jianzhong(王建忠), Zhao Yongqing(赵永庆). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(12): 4325

[3] Zhang Yongdi(张永弟), Zhao Lisong(赵立松), Dai Luyu(戴璐钰) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2025, 54(6): 1581

[4] Liu Yanqiang(刘彦强), Fan Jianzhong(樊建中), Ma Zili(马自力) *et al. Materials Reports*(材料导报)[J], 2017, 31(15): 101

[5] Yang K, Wang J, Yang B J *et al. JOM*[J], 2020, 72(12): 4576

[6] Zhang Guotao(张国涛), Cai Weijie(蔡伟杰), Yin Yanguo(尹延国) *et al. Tribology*(摩擦学学报)[J], 2023, 43(5): 549

[7] Huang Boyun(黄伯云). *Principles of Powder Metallurgy* (粉末冶金原理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 265

[8] Banhart J. *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(6): 559

[9] Yang Kun(杨 坤), Yang Guangyu(杨广宇), Jia Liang(贾 亮) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(10): 3921

[10] Brooks W, Sutcliffe C, Cantwell W *et al. Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings: Processes, Modeling, Applications, Materials: Solid Freeform Fabrication Symposium*[C]. Austin: University of Texas at Austin, 2005: 412

[11] Tan C L, Weng F, Sui S *et al. International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2021, 170: 103804

[12] Liu Kai(刘 凯), Li Zhongwen(李忠文), Gao Yuxiang(高宇翔) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2025, 54(6): 1521

[13] Wang J, Tang H P, Yang K *et al. JOM*[J], 2018, 70(5): 638

[14] Zhang X Z, Tang H P, Leary M *et al. JOM*[J], 2018, 70(9): 1870

[15] Verlee B, Dormal T, Lecomte-Beckers J. *Powder Metallurgy*[J], 2012, 55(4): 260

[16] *Qbeam*, S600 2025[S]. 2025

[17] *Product Introduction*, FS1521M[S]. 2025

[18] *Products and Services*, BLT-S1500 2025[S]. 2025

[19] *Product Introduction*, H400[S]. 2025

[20] *Metal Solution*, EOS M 400-4 2025[S]. 2025

[21] Pei X, Wu L N, Lei H *et al. Acta Biomater*[J], 2021, 126: 485

[22] Zhang S, Cheng X, Yao Y *et al. Materials Science and Engineering C*[J], 2015, 53: 50

[23] Xie D, Dittmeyer R. *Additive Manufacturing*[J], 2021, 47: 102261

[24] Stoffregen H, Fischer J, Siedelhofer C *et al. 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference*[C]. Austin: SFF, 2011: 680

[25] Li R D, Liu J H, Shi Y S *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2010, 19(5): 666

[26] Furumoto T, Koizumi A, Alkahari M R *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 219: 10

[27] Xie D, Fränkle B, Klahn C *et al. Chemie-Ingenieur-Technik*[J], 2022, 94(7): 983

[28] Zeng G H, Song T, Dai Y H *et al. Materials & Design*[J], 2019, 169: 107693

[29] Zhang Liangliang(张亮亮), Wang Minjie(王敏杰), Li Hongxia (李红霞) *et al. Chinese Journal of Lasers* (中国激光)[J], 2024, 51(20): 182

[30] Wang X, Li A, Liu X F. *Materials Letters*[J], 2023, 335: 133741

[31] Xie W, Man H C, Chan C W. *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2024, 12(4): 1346

[32] Mullin K M, Martin J H, Roper C S *et al*. *International Journal of Thermal Sciences*[J], 2024, 196: 108758

[33] Wang Y F, Wang H Q, Li H *et al*. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2025, 142: 277

[34] Xie F X, He X B, Cao S L *et al*. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2013, 213(6): 838

[35] Egan P F, Gonella V C, Engensperger M *et al*. *PLoS One*[J], 2017, 12(8): e0182902

[36] Noronha J, Dash J, Rogers J *et al*. *Advanced Materials*[J], 2025, 36(34): e2402179

[37] Noronha J, Leary M, Brandt M *et al*. *Materials Advances*[J], 2024, 5(9): 3751

[38] Pham M S, Liu C, Todd I *et al*. *Nature*[J], 2019, 567(7748): E14

[39] Khadiri I E, Abouelmajd M, Zemzami M *et al*. *2022 8th International Conference on Optimization and Applications*[C]. Marrakech: ICOA, 2022: 245

[40] Wang W, Feng D, Yang L *et al*. *Additive Manufacturing*[J], 2023, 67: 103507

[41] Fernandes M C, Aizenberg J, Weaver J C *et al*. *Nature Materials*[J], 2021, 20(2): 237

[42] Zhang W, Li M. *Materials (Basel)*[J], 2021, 14(16): 4410

[43] Bai L, Gong C, Chen X *et al*. *Materials & Design*[J], 2021, 210: 110110

[44] Yang K, Wang J, Jia L *et al*. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35(2): 303

[45] Noronha J, Rogers J, Leary M *et al*. *Additive Manufacturing*[J], 2023, 72: 103637

[46] Tammas-Williams S, Withers P J, Todd I *et al*. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2016, 47(5): 1939

[47] Ahmadi S M, Kumar R, Borisov E V *et al. Acta Biomaterialia*[J], 2019, 83: 153

[48] Chang S, Liu A, Ong C Y A *et al. Materials Research Letters*[J], 2019, 7(7): 282

[49] Han Meng(韩 梦), Ding Chao(丁 超), Xu Shenghang(徐圣航) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2025, 54(12): 3128

[50] Yu G, Li Z, Li S *et al. Materials & Design*[J], 2020, 192: 108754

[51] Kelly C N, Francovich J, Julmi S *et al. Acta Biomaterialia*[J], 2019, 94: 610

[52] Yeranee K,Yang R. *Energies*[J], 2022, 15(23): 8994

[53] Qian C, Wang J, Zhong H *et al*. *International Communications in Heat and Mass Transfer*[J], 2024, 152: 107292

[54] Yadroitsev I, Shishkovsky I, Bertrand P *et al*. *Applied Surface Science*[J], 2009, 255(10): 5523

[55] Burns N. *Filtration+Separation*[J], 2014, 51(2): 42

[56] Burns N, Burns M, Travis D. *Chemical Engineering & Technology*[J], 2016, 39(3): 535

[57] Narahara H, Nakao Y, Fukumaru H *et al*. *International Journal of Automation Technology*[J], 2008, 2(3): 175

[58] Huang G Y, Min Z, Yang L *et al*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2018, 124: 1076

[59] Xu R, Cheng Z, Jiang P. *Journal of the Global Power and Propulsion Society*[J], 2023, 7(1): 19

[60] Wang S, Shi Y, Cheng W *et al*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*[J], 2025, 154: 111012

[61] Kumar A, Shukla M. *JOM*[J] 2025, 77: 2189

[62] Kim J, Yang Z, Ko H *et al*. *Journal of Manufacturing Systems*[J], 2023, 68: 117

[63] Riensche A R, Bevans B D, King G *et al. Materials & Design*[J], 2024, 237: 112540

[64] Du Y, Mukherjee T, Li R *et al*. *Progress in Materials Science*[J], 2026, 157: 101587

[65] Hu Yinan(胡逸楠), Yu Huan(于 欢), Wu Shengchuan(吴圣川) *et al*. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*(力学学报)[J], 2024, 56(7): 1892

[66] García-Gascón C, Bas-Bolufer J, Castelló-Pedrero P *et al*. *Fibers and Polymers*[J], 2025, 26: 1247

[67] Lew A J, Buehler M J. *Forces in Mechanics*[J], 2021, 5: 100054

[68] Florczak S, Größbacher, Ribezzi D *et al. Nature*[J], 2025, 645(8079): 108

[69] Bimrose M V, McGregor D J, Wood C *et al*. *npj Advanced Manufacturing*[J], 2025, 2(1): 20

[70] Zhong H, Song T, Liu H *et al*. *Advanced Materials*[J], 2025, 37: 2503701

[71] Shao C, Chen H, Zou Y. *Nature Communications*[J], 2025, 16(1): 9487

Research Progress on Additive Manufacturing Technologies for Metallic Porous Materials Applications

Yang Kun, Shen Lei, Zhao Shaoyang, Xu Chenyang, Xu Zhongguo
(State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Porous metallic materials are a class of materials characterized by their structurally and functionally integrated features, with a well-defined pore structure being their most notable attribute. This porous structure enables them to exhibit dual characteristics of both metallic and porous materials, making them widely applicable in fields such as nuclear industry, petrochemical engineering, and aerospace. Additive manufacturing technology allows for the integrated fabrication of complex porous metallic structures, offering advantages such as high material utilization rate and precise control over pore structure. This paper reviews the current development of additive manufacturing technologies for metallic porous materials, focusing on the pore formation mechanisms and performance characteristics of additively manufactured porous metallic materials. It also summarizes their application progress in industries such as healthcare and mold manufacturing, discusses the integration of artificial intelligence in metallic additive manufacturing, and provides an outlook on the future development of this technology.

Key words: additive manufacturing (AM); metallic porous materials; pore structure; porosity; orthopedic implant

---

Corresponding author: Yang Kun, Ph. D., Professor of Engineering, State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231095, E-mail: yangk029@163.com