

激光增材制造金刚石工具的研究 现状与展望

杜全斌^{1, 2, 3}, 王蕾¹, 赵伟伟¹, 董光¹, 李昂^{1, 4}, 方占江², 闵志宇¹, 李莹³

1. 河南机电职业学院/河南省超硬材料智能制造装备集成重点实验室 河南郑州 451191

2. 禹州七方超硬材料制品有限公司 河南禹州 411081

3. 郑州华晶金刚石股份有限公司 河南郑州 450000

4. 郑州豫钻精密科技有限公司 河南郑州 450003

摘要: 金刚石拥有极高的硬度和优良的耐磨性, 由其作为磨粒制作的金刚石工具在硬脆难加工材料的高效、精密加工方面具有不可替代的作用。然而, 随着新型硬脆材料的推广应用及现代精密加工需求的不断提高, 亟需开发形状复杂化、结构精细化和性能高端化的金刚石工具。与传统制造技术相比, 激光增材制造技术从原理上突破传统工具的结构设计和制造模式, 可实现复杂形状、微小尺寸、超薄厚度金刚石工具的精密成形, 受到国内外研究者的高度关注。检索了对近几年国内外有关激光增材制造金刚石工具的文献报道, 综述了金属基金刚石工具、树脂基金刚石工具的激光增材制造技术与工艺, 最后指出激光增材制造金刚石工具研究现状存在的不足, 同时展望了未来研究方向, 为激光增材制造金刚石工具的研究和应用提供参考, 推动超硬材料工具制造技术的革新与发展。

关键词: 增材制造; 金刚石工具; 金属结合剂; 树脂结合剂; 激光选区熔化

Research status and prospect of laser additive manufacturing of diamond tools

DU Quanbin^{1, 2, 3}, WANG Lei¹, ZHAO Weiwei¹, DONG Guang¹, LI Ang^{1, 4}, FANG Zhanjiang²,
MIN Zhiyu¹, LI Ying³

1. Henan Key Laboratory of Superhard Material Intelligent Manufacturing Equipment Integration, Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 451191, Henan, China

2. Yuzhou Qifang Superhard Material Products Co., Ltd., Yuzhou 411081, Henan, China

3. Zhengzhou Huajing Diamond Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China

4. Zhengzhou Yuzuan Precision Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China

基金项目: 河南省重点研发与推广专项科技攻关项目 (No.242102220064、No.241111231600); 河南省高校重点科研项目 (No. 24A460008)

第一作者: 杜全斌, 博士, 副教授, 研究方向为先进焊接材料与装备、超硬工具制备技术与装备以及激光增材表面修复再制造等, E-mail: paperduqb@126.com。

通信作者: 王蕾, 教授, 主要从事超硬工具制备技术与智能装备研发, E-mail: 349324119@qq.com。

闵志宇, 教授, 主要从事先进陶瓷材料合成加工技术研究, E-mail: mdy@lit.edu.cn。

Abstract: Diamond has extremely high hardness and excellent wear resistance. Diamond tools made with diamond as abrasive grains play an irreplaceable role in the efficient and precise processing of hard and brittle materials. However, with the popularization and application of new hard and brittle materials and the continuous improvement of modern precision processing requirements, there is an urgent need to develop diamond tools with complex shapes, refined structures, and high-end properties. Compared with traditional manufacturing technologies, laser additive manufacturing technology breaks through the structural design and manufacturing mode of traditional tools in principle, and can achieve the precise forming of diamond tools with complex shapes, small sizes, and ultra-thin thicknesses, which has attracted high attention from researchers at home and abroad. Retrieves the literature reports on laser additive manufacturing of diamond tools at home and abroad in recent years, and reviews the laser additive manufacturing technologies and processes of metal-based diamond tools and resin-based diamond tools. Finally, it points out the deficiencies in the current research status of laser additive manufacturing of diamond tools, and looks forward to the future research directions, providing a reference for the research and application of laser additive manufacturing of diamond tools, and promoting the innovation and development of superhard material tool manufacturing technologies.

Keywords: additive manufacturing; diamond tools; metal bonding agent; resin binder; selective laser melting

1 序言

以金刚石为代表的超硬磨粒拥有极高的硬度和优良的耐磨性,是制造硬脆材料加工工具的理想磨料,由其制作的超硬工具在硬脆等难加工材料的高效精密制造方面具有不可替代的作用,广泛应用于航空航天、电子信息、光学器件等领域^[1-3]。金刚石工具传统制造方法有热压烧结法、电镀法和钎焊法等^[4],这些方法受其自身制造原理的限制,难以直接成形复杂结构金刚石工具。目前,我国高端金刚石工具结构形状简单,不具有多孔、微槽、内流道等复杂形状结构和金刚石磨粒有序排布、材料成分梯度分布等特殊微结构^[5],难以形成有效的容屑、冷却、缓解应力等功能,无法满足各种新型硬脆材料的高效率、高精密和长寿命的加工需求。

激光增材制造技术属于智能化的快速成形技术,利用计算机软件对目标产品三维建模和切片处理,以粉状或丝状金属、塑料等可黏合材料为原料,通过逐层堆积的方式实现复杂结构金刚石工具的一体化成形制造^[6]。与传统制造方法相比,将激光增材制造技术应用于金刚石工具制造,从原理上突破传统工具的结构设计和制造模式,可实现复杂形状、微小尺寸、超薄厚度金刚石工具的精密成形^[5]。因此,激光增材制造技术被业界视为复杂结构金刚石工具高效制造的潜在方法,并成为研究热点。

目前,用于制备金刚石工具的激光增材制造技术主要有激光选区熔化(SLM)技术、选择性激光烧结(SLS)技术和光固化成形(SLA)技术等^[6-9]。根据结合剂种类不同,金刚石工具可分为金属基金刚石工具、树脂基金刚石工具和陶瓷基金刚石工具。陶瓷结合剂通常具有高熔点、高硬度和低导热性的特点,难以采用激光增材制造陶瓷基金刚石工具,因此,激光增材制造技术主要用于金属基金刚石工具和树脂基金刚石工具的制备。近年来,国内外学者围绕激光增材制造金刚石工具方面开展了大量探索性研究工作,通过多种增材制造技术成形了金刚石砂轮、锯片、钻头工具^[9],为高效精密制造复杂结构金刚石工具提供了新思路。本文对近年来激光增材制造金刚石工具的研究进展进行回顾和总结,展望了激光增材制造金刚石工具的未来发展方向,以期以为激光增材制造为核心的高性能金刚石工具的数字化制造技术与应用提供参考。

2 激光增材制造金属基金刚石工具

金属基金刚石工具具有良好的机械加工性能,适用于多种硬脆材料的切削加工。传统热压烧结金属基金刚石工具因孔隙率低,面临难排屑、易堵塞、自锐性差和工件表面易烧伤等问题^[8]。虽可通过造孔剂获得诱导孔隙,但存在孔隙形状、大小、分布不均匀和承载强度减弱等现象。激光增材制造

技术可实现任意复杂结构金刚石工具的制造,解决传统制造存在的难题。目前,用于金属基金刚石工具制造的增材制造技术主要为SLM和SLS。SLM技术源于SLS成形思想,两者主要区别在于SLM利用激光将金属粉末完全熔化成形,提高了工具的致密度,解决了复杂结构金属基金刚石工具高效、稳定成形的难题^[10]。

2.1 SLM技术制造金属基金刚石工具

(1) SLM制造用金属及其合金粉末 SLM技术采用小功率激光直接熔化金属及其合金粉末,堆积成形出任意复杂结构和较高致密度的金刚石工具,要求金属及其合金粉末粒径细小($\leq 50\mu\text{m}$)、粒度分布区间窄、球形度高、流动性好^[11-13], SLM分层厚度为 $0.02\sim 0.2\text{mm}$ ^[14],大于金刚石粒度的2倍。

SLM制造金刚石工具用金属及其合金粉末的选择应遵循如下原则^[7, 8]。

1) 与金刚石亲和性强,有利于实现基体材料与金刚石之间冶金结合,增强对金刚石颗粒的把持力,提高金属基金刚石工具及复合材料的力学性能与服役性能。

2) 金属及其合金粉末的线膨胀系数应与金刚石的相近,降低界面残余应力。

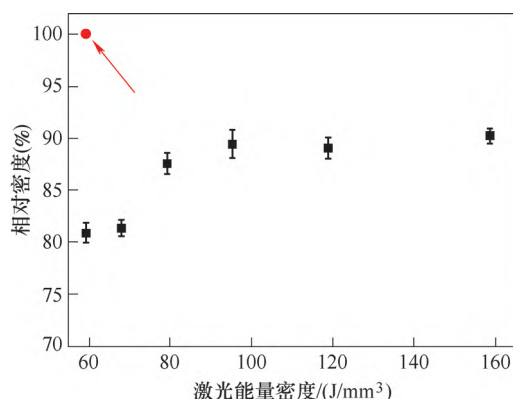
3) 金属及其合金粉末成分简单,组元之间物化及力学性能接近,尽可能为预合金材料。

目前,已应用于SLM制造金属基金刚石工具的金属及其合金粉末主要有钛基合金粉末、铝基合金粉末、镍基合金粉末、Co-Cr-Mo粉末、Cu-Sn-Ti-Zr粉末等,基本满足SLM制造金刚石工具对金属粉末的理化和力学性能要求^[15]。

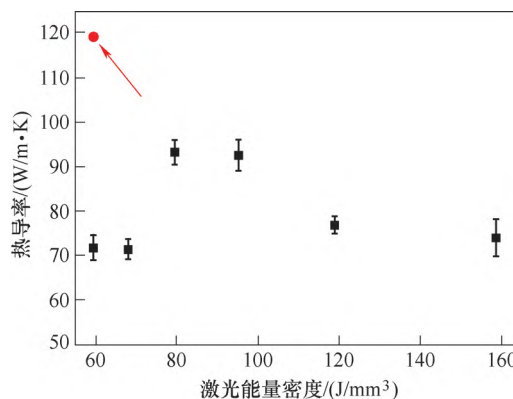
(2) SLM制造金刚石/金属复合材料 SLM制造金属基金刚石工具面临的关键问题与金刚石/金属复合材料相同,主要为:金刚石的热损伤和石墨化、金刚石在基体材料中的均匀性和成形件易开裂等^[7]。为此,对SLM制造金刚石/金属复合材料的激光增材成形进行综述,为采用SLM技术制备金属基金刚石工具提供可行性参考。

苏振华等^[16]利用SLM技术成功制备了金刚石/AlSi10Mg复合材料,结果发现,AlSi10Mg基体在金刚石表面润湿性差,金刚石颗粒的存在阻碍了熔体的流动铺展与填缝,复合材料内部形成大量

孔洞,导致致密度低;金刚石表面TiC镀层对其未起到热保护作用,在激光直接作用下镀Ti金刚石颗粒仍发生石墨化热损伤。MA等^[17]采用SLM技术制备金刚石/Al12Si复合材料,结果表明,随着激光能量密度($59.5\sim 158.7\text{J/mm}^3$)的增加,复合材料的相对密度逐渐增大,升至约90%维持稳定(见图1a);复合材料的热导率先增大后减小,当能量密度为 79.4J/mm^3 和 95.2J/mm^3 时,复合材料热导率较高(见图1b),表明复合材料热导率除受致密度影响外还受界面性质控制。SLM技术可通过调控工艺参数定制金刚石/Al12Si界面。TEM分析发现高能量密度(119J/mm^3)导致金刚石/Al12Si界面发生界面反应,形成紧密结合厚度不均匀的 Al_4C_3 层(见图2),而低能量密度(95.2J/mm^3)没有发生界面反应,形成了“清洁”的扩散结合金刚石/Al界面,对应较高的热导率。



a) 复合材料致密度



b) 复合材料热导率

图1 不同能量密度下复合材料的致密度和热导率^[17]

杨展等^[18]选用Ni10Co10Cu40Sn9Fe31预合金粉和70/80目的金刚石,采用SLM技术制备了金刚石/Ni10Co10Cu40Sn9Fe31复合材料,结果发现,金刚

石颗粒均匀分布在复合材料中,被金属胎体紧密润湿包镶,与金属胎体之间以冶金结合为主,提高了复合材料的力学性能,未被激光直接扫略过的金刚石颗粒仍保持较好的晶形和完整的晶面,但当高能

激光直接作用在金刚石颗粒上时,会造成金刚石局部表面形成小而深的热损伤坑,如图3所示。为降低SLM制造过程中金刚石的热损伤, SPIERINGS等^[19]以Cu-Sn-Ti-Zr活性钎料合金和镍包覆金刚石颗粒为

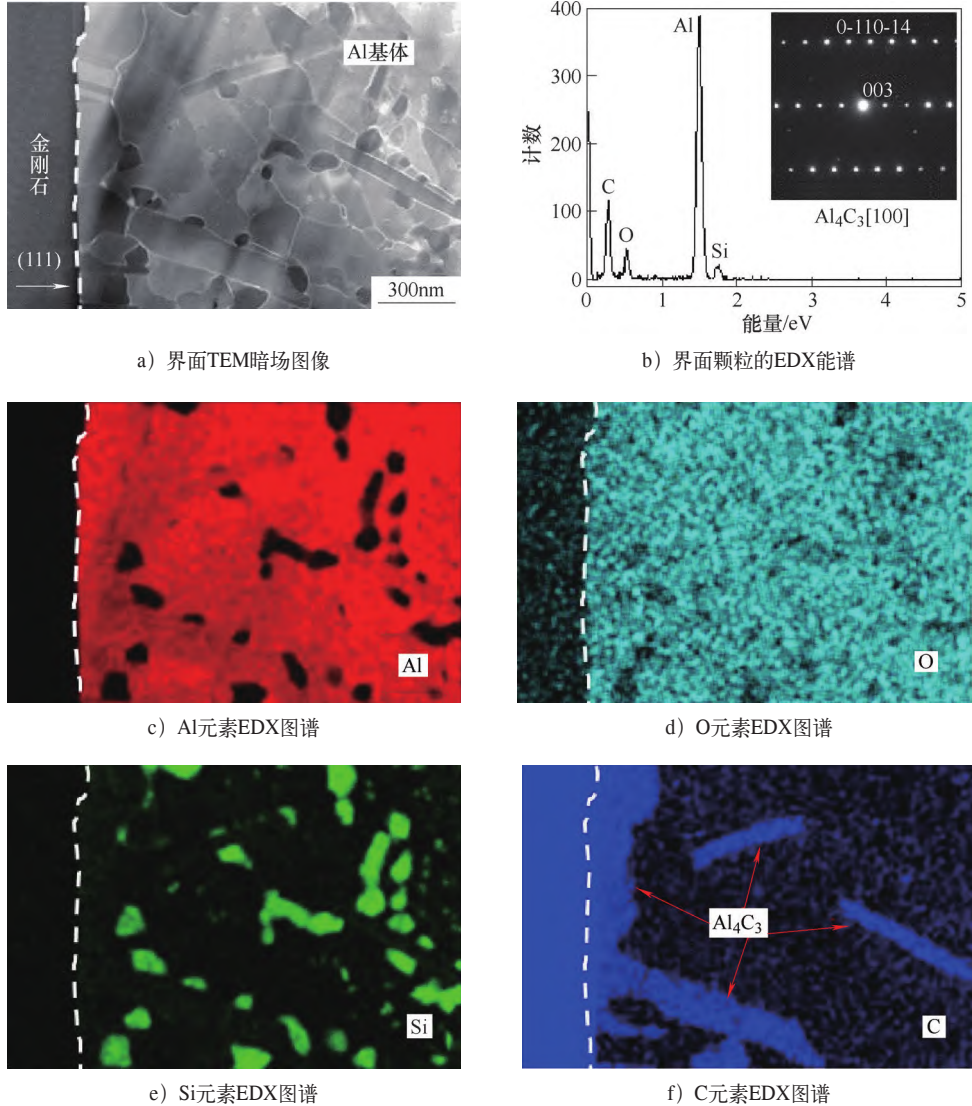


图2 金刚石 (111) /Al12Si界面区域扫描透射电子显微镜高角度环形暗场图像、能谱及图谱^[17]

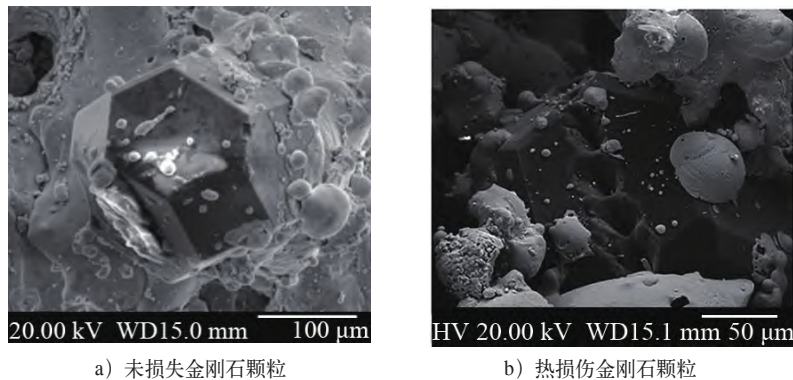
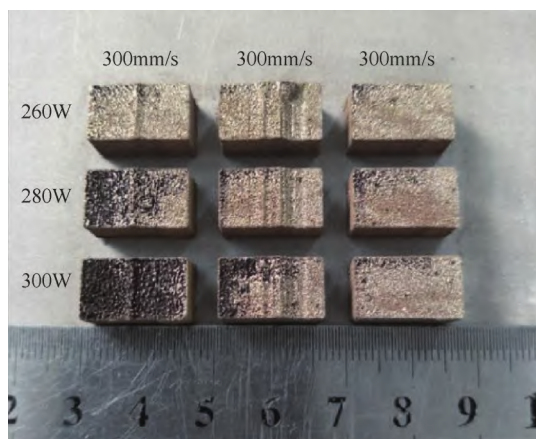


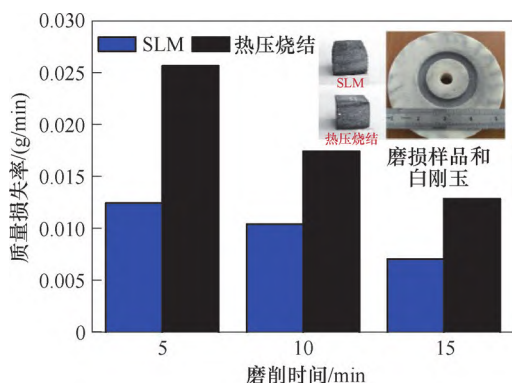
图3 SLM制备金刚石/金属复合材料SEM照片^[18]

原料,利用SLM技术制造金刚石/Cu-Sn-Ti-Zr复合材料块状试样,发现金刚石颗粒紧密包裹在Cu-Sn-Ti-Zr基体合金中,镍包覆层具有隔热防护作用,使激光扫描后金刚石颗粒未发生石墨化,但其表面仅形成非常薄的TiC层与基体合金结合,且镍包覆层基本全部溶解于基体合金中。

GAN等^[20]通过有限元模拟和单道、单层激光熔覆试验,获得最佳工艺参数为激光功率260W、扫描速度300mm/s、层厚0.09mm;基于最佳工艺参数,采用SLM技术制备金刚石/Cu-Sn-Ti复合材料块体试样,如图4a所示,并与热压烧结试样作对比,结果表明,SLM试样相对密度($\geq 90\%$)、基体显微硬度($302\text{HV} \pm 15\text{HV}$)、耐磨性高于热压烧结试样,质量损失率低于热压烧结样品,如图4b所示;SLM试样因金刚石界面生成较多的TiC,显著提高了Cu-Sn-Ti基体与金刚石的结合力。



a) SLM试样块



b) 质量损失率

图4 SLM试样和质量损失率^[20]

针对SLM制备金刚石/金属复合材料致密化程度低的问题,张俊涛等^[21]采用SLM技术制备金刚石/TC4复合材料,通过响应曲面分析法优化SLM工艺

参数,建立致密度数学模型,即

$$\rho = \begin{cases} -3.0559 + 0.0409P + 0.0019v + 2.3232h - \\ 6.35 \times 10^{-9}Pv - 0.0065Ph - 0.0002vh - \\ 0.0001P^2 - 6.3221 \times 10^{-8}v^2 - 11.8491h^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 ρ ——致密度(%);

P ——激光功率(W);

v ——扫描速率(mm/s);

h ——扫描间距(mm)。

利用模型优化参数和预测结果,获得最高致密度的工艺参数为激光功率164W、扫描间距0.045mm、扫描速度613mm/s,对应最高致密度预测值为95.1%。利用优化的工艺参数进行激光增材试验,测得试样平均致密度为94.93%,与预测值基本吻合,验证了模型的可信度;增材制造过程中,激光热输入对金刚石表面造成局部石墨化等热损伤,同时由于TC4熔体在金刚石表面的润湿性差,金刚石颗粒的存在严重阻碍熔体流动,导致复合材料内部存在间隙,降低增材制造复合材料的致密度。

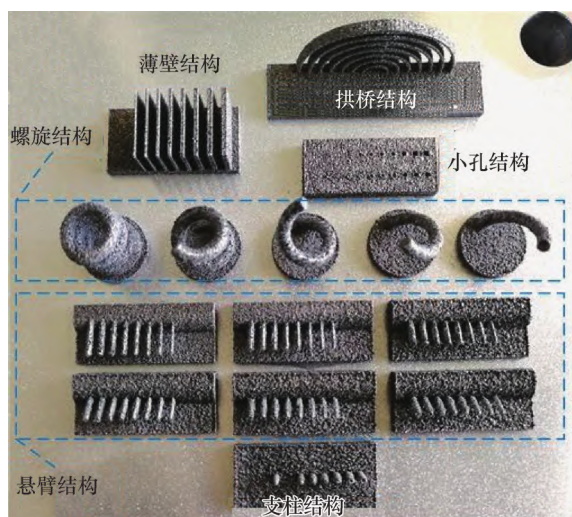
上述不同种类金刚石/金属复合材料的SLM制备研究,证明了SLM技术的可成形性,为采用SLM技术制备复杂结构金属基金刚石工具提供了一种新方法。

(3) SLM制造金属基金刚石工具 SLM技术适合制造网格状、晶格状、栅格状等任意复杂结构金刚石工具,可显著提高工具的承载压力、工作效率和磨削性能,又可有效解决传统金属基金刚石工具所面临的易堵塞、高温烧伤和使用寿命短等问题。为提高隧道掘进机(TBM)刀具和采矿设备刀片的耐磨性,RAHMANI等^[22]提出了SLM/SPS复合制备抗冲击耐磨刀具材料的新方法,其原理是采用SLM技术制备镀镍金刚石-316L混合粉末的胞格结构,将耐腐蚀和延展性金属等填充晶格,然后采用SPS烧结成形。结果表明,该方法制备的镀镍金刚石-316L晶格中金刚石分布均匀,金刚石含量较高的材料具有更高的耐磨性,在冲击磨损条件下可使耐磨性提高约2.0倍,但导致晶格结构支柱直径增大、强度降低。镀镍层和快速烧结时间有助于减少金刚石的石墨化。同时,利用SLM/SPS复合技术制备出功能梯度网格状结构(FGL)的钻探工具材料,FGL晶格为0%~100%的梯度变化,结构材料由底

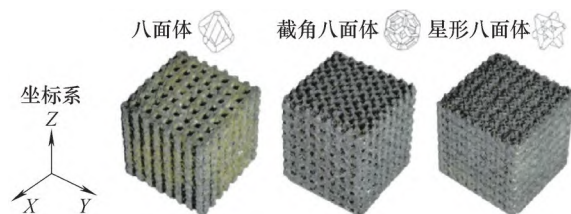
层至顶层依次为316L/Ti6Al4V、316L/Ti6Al4V-金刚石复合材料和镀镍金刚石，底部较多的韧性金属材料，更好地吸收冲击韧性，顶层的高金刚石含量提供了极高的硬度和较高的耐磨性。

TIAN等^[23-27]以粒径62~75 μm 的金刚石磨粒和粒径15~53 μm 的AlSi10Mg合金为原料，通过几种常见结构的制造极限对SLM制造金刚石砂轮的可行性进行评估。如图5a所示，采用正交试验探索了SLM的最佳工艺参数，发现金刚石磨粒牢固嵌入铝基金体内，与AlSi10Mg之间形成C-Al强界面，结合状况良好，SLM的最佳工艺参数为激光功率250W、扫描速度2.5m/s、层厚20 μm ；SLM制造薄壁的最小

厚度0.3mm、圆孔的最小直径为0.2mm以及方孔的最小边长0.3mm。基于最佳工艺参数，采用SLM技术制备了八面体、截角八面体和星形八面体等多孔结构的铝基金刚石砂轮（见图5b），研究了3种多孔结构的形态特性、力学性能和渗透性，发现在相同的孔隙率下，八面体结构铝基金刚石砂轮的机械性能和渗透性最佳，是高性能多孔砂轮的潜在结构。采用SLM技术制备八面体结构、蜂窝结构和实心结构的AlSi10Mg基金刚石砂轮（见图5c），采用磨削表面粗糙度和表面硬度评估其磨削性能。图6所示对比了3种SLM制造的铝基金刚石砂轮和电镀砂轮的磨削表面粗糙度随磨削时间、磨削深度的关系，



a) 制造极限试样

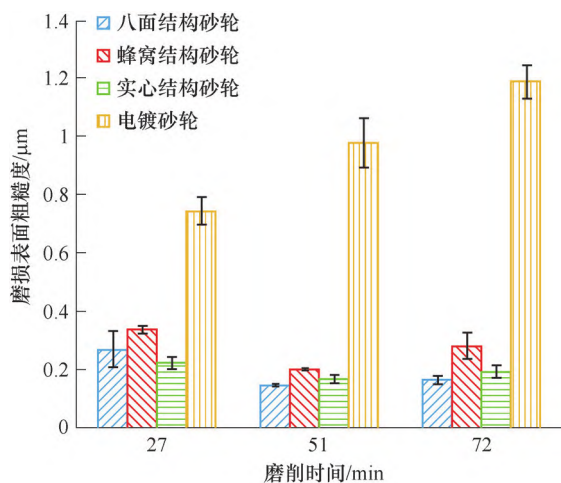


b) 八面体、截角八面体和星形八面体试样

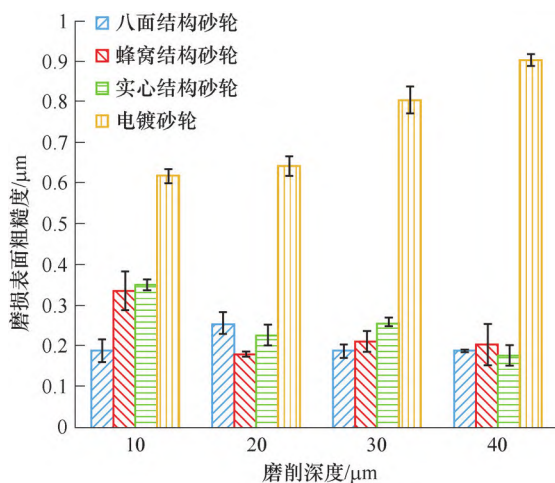


c) 八面体、蜂窝和实心结构砂轮

图5 SLM技术制备铝基金刚石工具^[23-25]



a) 磨损表面粗糙度与磨削时间的关系



b) 磨损表面粗糙度与磨削深度的关系

图6 SLM制备不同结构砂轮及电镀砂轮的磨损表面粗糙度与磨削时间、磨削深度的关系^[24]

发现与电镀砂轮不同, SLM制造的3种结构金刚石砂轮的磨削表面粗糙度对研磨时间和磨削深度不敏感, 意味着初始轮磨损后SLM制造砂轮的表面粗糙度变化很小, 表明SLM制造的砂轮具有出色的自锐能力、抗磨损能力和磨削效率。测试不同砂轮的磨削表面硬度发现, 不同磨轮均会产生一定程度的加工硬化, 但SLM制造的砂轮磨削表面硬化明显低于电镀砂轮, 此外, 由于八面体结构砂轮的挤压力 and 摩擦力最小, 使其获得最小的磨削表面硬化。

2.2 SLS制造金属基金刚石工具

SLS技术可加工的材料范围广, 材料利用率高, 无需支撑结构, 可成形镂空、中空内流道等任何复杂结构的金刚石工具。YANG等^[28, 29]采用SLS

技术制造了一种磨粒规则排布的Ni-Cr基金刚石砂轮, 解决了精密/超精密磨削用金刚石砂轮磨粒分布无序、不均匀和制备工艺复杂、成本高的难题。SLS制造磨粒规则排布金刚石砂轮工艺流程如图7所示。由图7可知具体步骤如下: 首先, 将Ni-Cr合金粉末均匀喷涂在钢基体上, 激光烧结熔化Ni-Cr粉末, 并有序排布金刚石磨粒, 如图7a所示; 精确控制激光路径及工艺参数, 将金刚石磨粒激光烧结在Ni-Cr合金结合剂上, 如图7b所示; 气流去除多余磨粒, 制造出具有单层金刚石磨粒规则排布的砂轮, 如图7c所示; 重复上述步骤, 经过逐层添加材料并冷却至固态后, 可制造出多层具有规则分布磨粒的砂轮, 如图7d所示。图8所示为采用上述SLS工艺流程

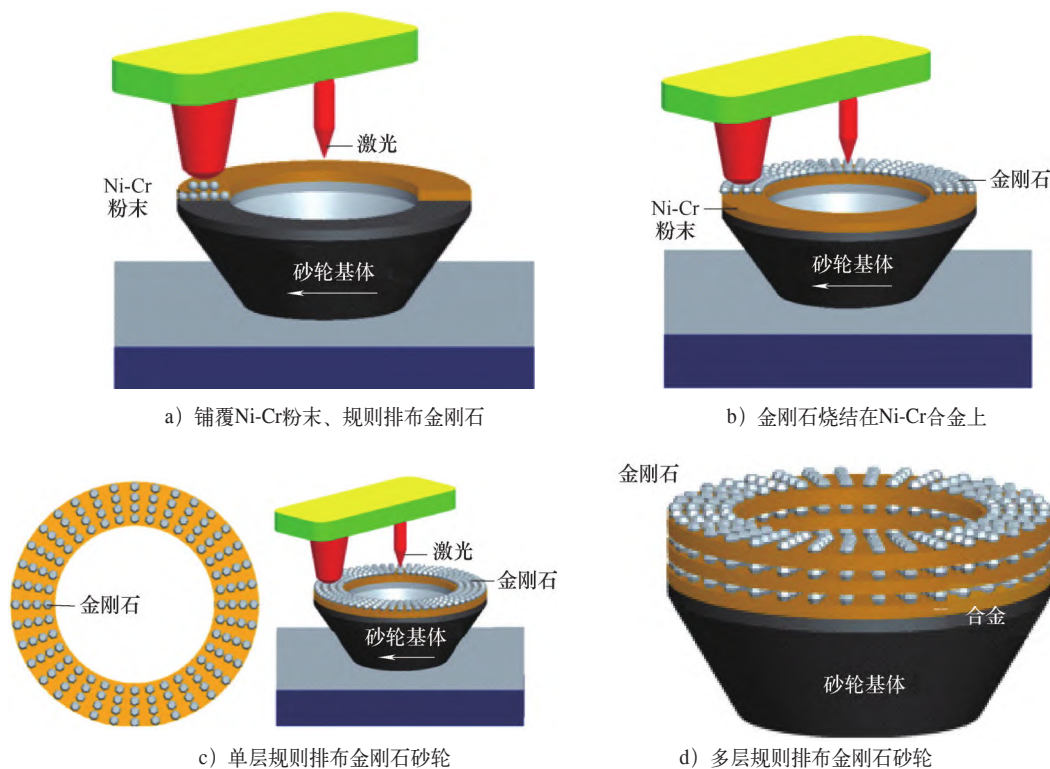


图7 SLS制造磨粒规则排布金刚石砂轮工艺流程示意^[28]

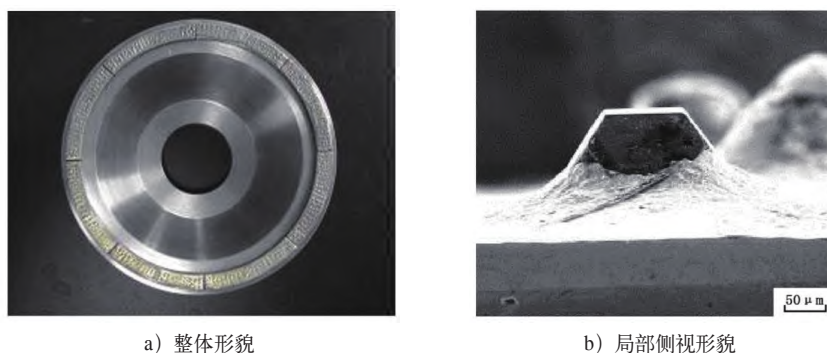


图8 SLS制造金刚石砂轮整体及局部侧视形貌^[28]

程所制造的规则排布金刚石砂轮整体及局部侧视图。当能量密度为 $342.8\sim 364.2\text{J/mm}^2$ 时,月牙状的Ni-Cr合金包裹在金刚石磨粒的边缘,表明Ni-Cr合金对金刚石具有良好的润湿性,金刚石磨粒表面没有裂纹或热损伤,形状保持完整,如图8b所示。重载磨削试验发现,金刚石磨粒主要发生3种磨损特性:磨耗、微破碎和宏观破碎,随着磨削时间的增加,磨粒的磨耗和破碎情况逐渐加剧,但未出现磨粒脱落的现象,表明SLS制造磨粒规则排布金刚石砂轮具有良好的磨削性能,能够有效地完成磨削任务,并在较长时间内保持稳定的工作状态,为精密和超精密磨削提供了一种新的、可行的工具。

针对传统孕镶金刚石钻头钻探硬岩地层效率低、寿命短、能耗大等问题,张绍和团队^[30-34]采用SLS技术制备了栅格状胎体孕镶金刚石钻头(DIBGM),包括栅格状工作层、非工作层和钻头钢体3部分(见图9),栅格状工作层是由沿径向与周向分布于整个钻头唇面的栅格片和空隙构成,工作层内外环栅格片比中间栅格片厚 $0.1\sim 0.5\text{mm}$,中间栅格片厚度为 $0.2\sim 1.0\text{mm}$,内外环栅格片厚度为 $0.3\sim 1.5\text{mm}$,栅格空隙体厚度 $0.1\sim 0.5\text{mm}$ 。该团队基于岩石断裂力学理论,揭示了栅格状胎体孕镶金刚石钻头以拉裂破坏方式破岩的机理,发现该栅格状结构能提供更大压力,与常规钻头相比,栅格状钻头钻压提高了约67%,使钻头能更高效地压入岩体,产生破碎穴及裂纹。采用粉末冶金法优选用于DIBGM基体材料的激光增材合金粉末(Co-Cr-Mo合金和Inconel718),并与传统WC基复合材料进行比较,发现Co-Cr-Mo合金因与传统WC基体相似的力学性能而更适合作为DIBGM基体材料。为验证CoCrMo合金粉末作为DIBGM基体材料的可行性和适用性,采用SLS技术制备了CoCrMo基超薄栅格状

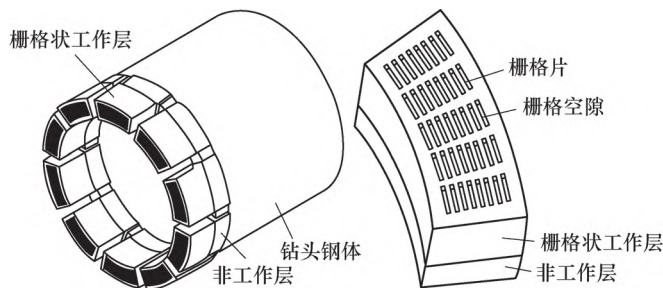


图9 SLS制造栅格状金刚石钻头结构示意图^[33]

金刚石圆锯片(见图10),并进行岩石切割试验,结果见表1。由表1可知,CoCrMo合金粉末完全满足硬岩地层钻进性能要求,不同强度的硬岩适用不同的栅格片厚度,如厚度 0.6mm 的网格片适用于抗压强度达 90MPa 的硬岩, 0.7mm 的网格片可用于抗压强度达 160MPa 的硬岩。

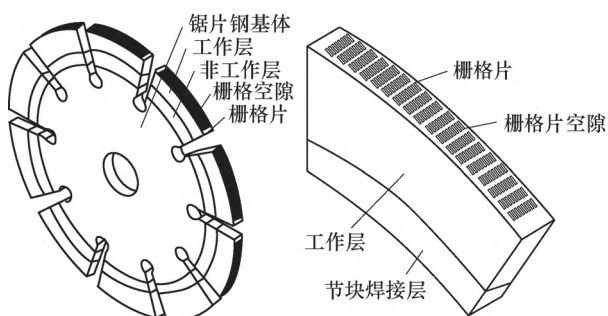


图10 SLS制造栅格状金刚石锯片结构示意图^[34]

表1 SLS制备不同栅格片厚度超薄金刚石钻头岩石切割测试结果^[30]

岩石	可钻性分类	抗压强度/MPa	切割寿命/次		
			栅格片厚度 0.5mm	栅格片厚度 0.6mm	栅格片厚度 0.7mm
粗粒白砂岩	3~4	50	3	>30	>30
细粒黑砂岩	5	60~70	—	>30	>30
板岩	6~7	90	—	>30	>30
粗粒花岗岩	8~9	120	—	18	>30
细粒花岗岩	10~11	160	—	—	>30

3 激光增材制造树脂基金刚石工具

树脂基金刚石工具是以酚醛树脂、聚酰亚胺树脂或环氧树脂为结合剂,金属氧化物、金属及合金粉末和金刚石为填充原料,将结合剂和填充原料充分混合后,经过一定的成形工艺制备而成。其传统制备方法包括树脂研磨混合、热压成形、冷却固化、脱模成坯体及后处理等工序,工艺较复杂、生产周期长,难以实现复杂结构零件的快速成形。为解决传统制备方法存在的问题,引入激光增材技术制备树脂基金刚石工具可显著缩短生产周期,制造出特殊复杂结构提高工具散热能力,减小磨削力,降低磨耗等。目前,用于树脂基金刚石工具制造的激光增材制造技术主要有SLA和SLS。

Sandvik公司采用SLA技术制造了树脂基金刚石薄膜，并将其应用于工业领域。GUO等^[35, 36]基于SLA技术，采用紫外光固化树脂和金刚石磨粒制造了一种新型磨削加工金刚石工具，SLA制造工艺流程如图11所示。

实施步骤如下：

1) 在暗室中将紫外光固化树脂和金刚石磨料均匀混合，液态混合物在真空条件下静置30min，释放搅拌过程中产生的气泡。

2) 液态混合物可旋涂在基板顶部进行固化直接整体成形；或注入单独扇形模具中进行固化成扇形

片，然后将固化后的扇形片有序粘附在基板上，组装成工具。

旋涂固化整体成形效率高，但固化深度不均匀，产生波纹；扇形磨具法固化深度均匀。通过与基于浆料的铁板研磨进行对比试验，发现新研制的紫外光固化树脂基金刚石研磨盘研磨陶瓷工件的表面粗糙度降低10%，稳定加工状态下材料去除率减少约25%，研磨60min后加工效果降低了约51.34%，如图12所示。紫外光固化树脂基磨具已被研究证实相比传统磨具具有显著优势，磨料混合树脂的性能会影响工具性能，进而影响加工效率。为

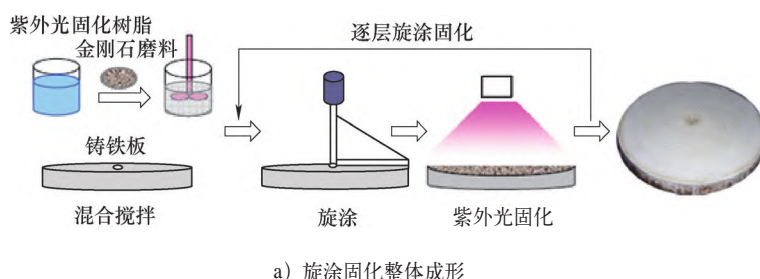
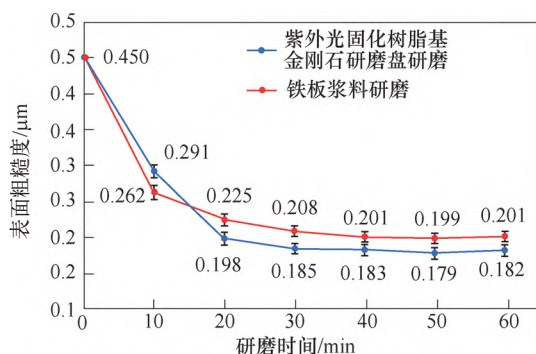
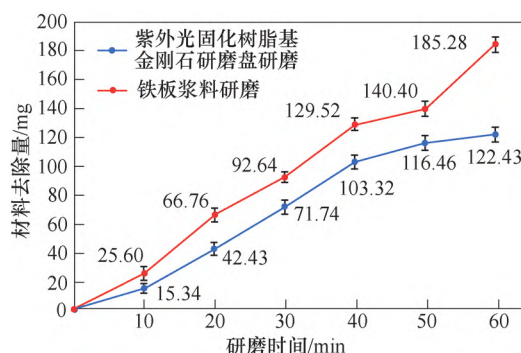


图11 树脂基金刚石磨具SLA制造工艺流程^[35]



a) 陶瓷工件的表面粗糙度



b) 陶瓷工件的失重率随时间的关系

图12 铁板研磨和紫外光固化树脂基金刚石磨具加工陶瓷工件的表面粗糙度和失重量^[35]

此, HUANG等^[37]研究了紫外光固化时间和金刚石浓度对磨料混合树脂试样特性的影响,发现固化深度和力学性能随曝光时间增加而增加、随磨料浓度增加而降低,当金刚石浓度(质量分数)为12.5%时固化时间影响显著,在60s和80s这两个时间段存在极值。制造了3种固化时间(40s、60s和80s)的紫外光固化树脂基金刚石砂轮,研究固化时间对砂轮加工质量的影响,结果表明固化时间为80s的砂轮加工工件平均表面粗糙度最小,固化时间为60s的砂轮平均表面粗糙度最大。

单层有序排布金刚石磨具的研究表明磨粒位置的合理规划和控制对磨具的寿命和工件加工质量有决定性的影响,为实现金刚石磨粒的三维可控排布,邱燕飞等^[38, 39]基于SLA技术原理,开发了一种磨粒三维可控排布的树脂基金刚石磨具制备装置,如图13所示。利用所开发的装置生产了磨粒环形、矩形和螺旋形三维空间排布的树脂基金刚石砂轮。通过石英玻璃的端面磨削试验发现,三维有序排布树脂基金刚石砂轮与无序排布砂轮相比,具有更长的有效磨削寿命和更大的材料去除量;树脂基体对金刚石的把持力小,磨削过程发生了严重的磨粒失效现象,表现为:①金刚石出露高度过大导致其从光固化树脂基体上脱落或蹦出。②金刚石出露高度过小导致其在磨削剪切力作用下在树脂基体表面滑移。为此,研究了 Al_2O_3 颗粒增强树脂基金刚石砂轮

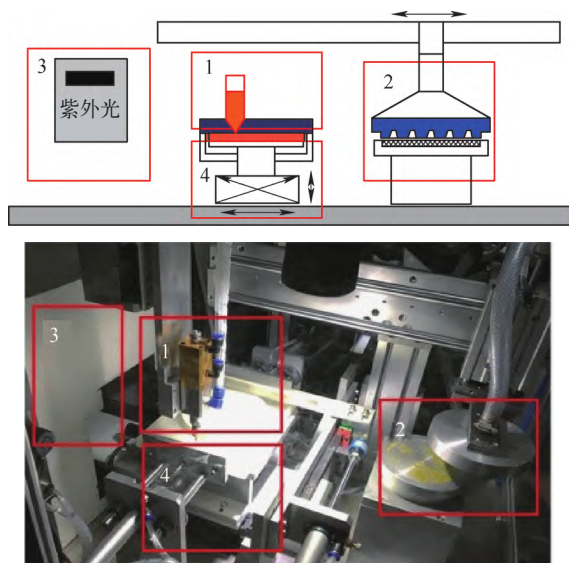
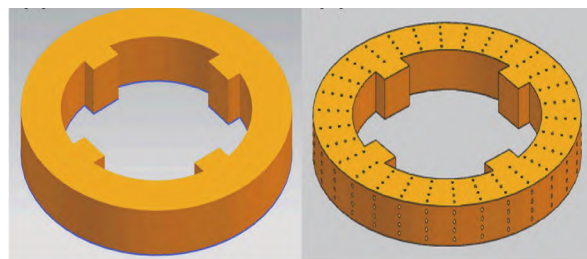


图13 磨粒可控排布制备装置示意及实物^[39]

1—光固化树脂涂布机械 2—磨粒排布机构 3—固化机构 4—升降机构

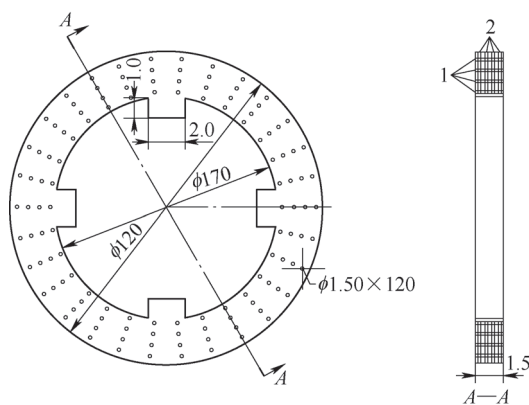
磨削性能的作用规律,发现添加15%的 Al_2O_3 可有效提高砂轮的磨削寿命。

针对树脂基金刚石工具磨削弧区高温易烧伤,SLA技术难以制备带有微通道冷却结构的树脂基金刚石砂轮的难题,陈家泓和张凤林等^[40, 41]以尼龙(PA2200)、玻璃微珠(K46)、白刚玉(500#)和金刚石磨粒(W40)为原料,采用SLS技术制备了工作层具有不同尺寸规格内冷却微流道结构的树脂基金刚石砂轮,如图14所示。结果发现,SLS制备的树脂基金刚石砂轮中金刚石磨粒、白刚玉和玻璃微珠均匀分散在基体中,白刚玉可增加砂轮硬度,但对弯曲强度不明显,如图15所示。磨削试验表明,SLS制备的树脂基金刚石砂轮可以对玻璃、硬质合金等硬脆材料进行有效磨削加工,砂轮工作层内冷却微流道有助于提高砂轮的散热能力,降低

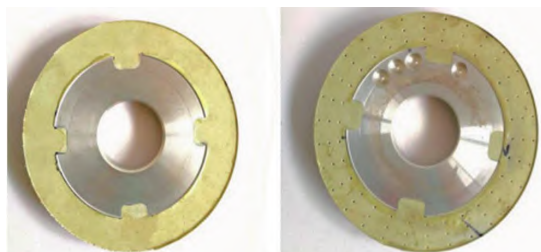


a) 实心砂轮3D图

b) 带有微通道砂轮3D图



c) 带有微通道砂轮平面图



d) 实心砂轮实物

e) 带有微通道砂轮实物

图14 树脂基金刚石砂轮结构示意及实物^[41]

砂轮的磨削力和磨削工件表面粗糙度。随着微流道冷却孔径的增大,可有效降低不含白刚玉砂轮对玻璃的磨削力,其原因是较大冷却孔改善了冷却和润滑效果,微通道冷却孔内冷却液流动示意如图16所示。

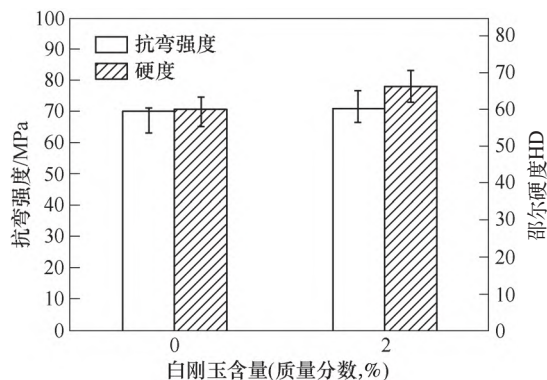
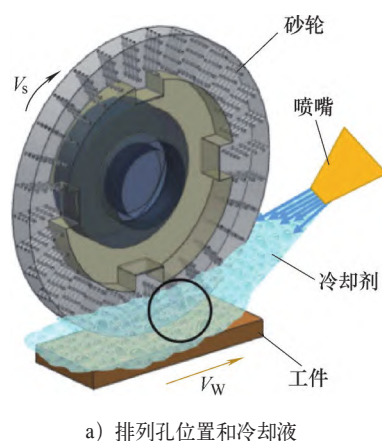
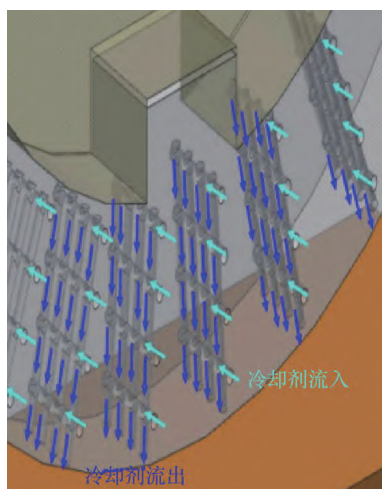


图15 添加和未添加白刚玉对SLS制备金刚石砂轮硬度和抗弯强度的影响^[41]



a) 排列孔位置和冷却液



b) 冷却剂流动示意

图16 微通道冷却孔内冷却液流动示意^[41]

示;随着微流道冷却孔数的增加,含白刚玉砂轮对玻璃和硬质合金的磨削力略有降低;磨削后玻璃和硬质合金的表面粗糙度值为 $2\sim 4\mu\text{m}$,表明SLS制备树脂基金刚石砂轮可用于玻璃和硬质合金的半精密加工阶段磨削。

4 结束语

目前,激光增材制造技术在金刚石工具领域的应用研究已取得一定成果,但从现有文献报道看仍存在不足之处限制其发展与应用,需要重点关注如下几方面。

1) 基体材料方面,金属基材料如AlSi10Mg、Al12Si、Ti6Al4Vi、Cu-Sn-Ti、Cu-Sn-Ti-Zr、Ni-Cr-B-Si、Co-Cr-Mo及316L金属粉等,树脂基材料如尼龙树脂、紫外光固化树脂、环氧树脂和酚醛树脂等,尽管这些材料在激光增材制造金刚石工具应用方面展现出潜力,但仍面临与金刚石的热膨胀系数差异大、对金刚石的把持力小等问题,基体材料体系及其物性特征等仍需不断深入研究,开发适应不同类型金刚石工具的专用基体材料。

2) 制造工艺方面,SLM、SPS和SLA等技术的应用为复杂结构金刚石工具的制造提供了可能,但目前所制造的金刚石工具仍存在微裂纹、微孔隙,以及金刚石的石墨化、界面结构难控制等问题,工艺优化仍有很大空间。

3) 性能研究方面,通过合理设计与优化工艺,可在一定程度上提升金刚石工具的耐磨性、硬度等关键性能,但要达到理想的综合性能仍需深入研究。

针对上述问题,未来研究可聚焦于以下方面。

1) 基体材料创新,研发适配激光增材制造的新型金刚石/金属、金刚石/树脂等复合材料粉末,优化金刚石与基体的界面结合特性,提升复合材料的激光增材适用性。

2) 工艺精进,借助先进监测与智能控制技术,精准调控激光参数,减少缺陷生成,提高工具精度与质量稳定性。

3) 跨学科融合,结合材料学、机械工程、计算机科学等多学科知识,构建完善的“工艺-结构-性能”关系模型,实现金刚石工具的定制化设计与高效制造,推动其在高端制造、电子信息、能源等领

域的广泛应用,提升我国在超硬材料工具制造领域的国际竞争力。

4) 激光增材制造金刚石工具的标准化制定,从原材料采购、设备选型与校准到生产过程中的工艺参数设定进行标准化规范,确保企业生产过程科学合理、高效有序,提高生产效率和产品合格率。

参考文献:

- [1] 崔冰, 江涛, 赵卫星, 等. Ti₃AlC₂构建梯度界面面对Cu-20Sn-10Ti合金钎料钎焊金刚石磨粒磨削性能的影响[J/OL]. 机械工程学报: 1-11[2025-01-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20241219.1356.014.html>.
- [2] 杜全斌, 张黎燕, 李昂, 等. Sn对Cu-Sn-Ti钎料显微组织与性能的影响[J]. 焊接学报, 2024, 45 (2): 89-97.
- [3] CUI B, ZHAO W X, YAN P, et al. Interfacial characteristics and grinding performance of diamond specimens brazed with Cu-Sn-Ti alloy and Ti₃AlC₂-metal composite filler metal[J]. Diamond & Related Materials, 2023, 132: 109637.
- [4] CUI B, LIU Z W, DU Q B, et al. Mechanism of Mn in controlling the microscopic characterization and interfacial properties of Cu-Sn-Ti-Ga filler metal for brazing[J]. Diamond & Related Materials, 2024, 143: 110903.
- [5] 王建宇, 黄国钦. 金刚石磨粒工具增材制造技术现状及展望[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42 (3): 307-316.
- [6] 张绍和, 唐健, 周侯, 等. 3D打印技术在金刚石工具制造中的应用探讨[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38 (2): 51-56.
- [7] 陶亚坤, 甘杰, 周燕, 等. 增材制造金刚石工具研究现状及展望[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42 (5): 511-517.
- [8] 张云鹤, 黄景奎, 宋运运, 等. 3D打印金刚石工具的研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41 (3): 40-47.
- [9] 魏瑛康, 李嘉旭, 王岩, 等. 增材制造技术在金刚石工具制备中的应用研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2024, 42 (6): 652-664.
- [10] 辛艳喜, 蔡高参, 胡彪, 等. 3D打印主要成形工艺及其应用进展[J]. 精密成形工程, 2021, 13 (6): 156-164.
- [11] 张飞, 高正江, 马腾, 等. 增材制造用金属粉末材料及其制备技术[J]. 工业技术创新, 2017, 4 (4): 59-63.
- [12] 韩寿波, 张义文, 田象军, 等. 航空航天用高品质3D打印金属粉末的研究与应用[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27 (6): 44-51.
- [13] 姚妮娜, 彭雄厚. 3D打印金属粉末的制备方法[J]. 四川有色金属, 2013 (4): 48-51.
- [14] 周松. 基于SLM的金属3D打印轻量化技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [15] 韦文杰, 张绍和. 栅格胎体孕镶金刚石钻头的破岩机理分析[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45 (5): 180.
- [16] 苏振华, 刘刚, 代兵, 等. 选区激光熔化制备金刚石/铝复合材料的缺陷研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40 (3): 46.
- [17] MA Y, JI G, LI X P, et al. On the study of tailorable interface structure in a diamond/Al₁₂Si composite processed by selective laser melting[J]. Materialia, 2019, 5: 100242.
- [18] 杨展, 谭松成, 杨凯华. 3D打印金属基金刚石复合材料的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38 (1): 50-54.
- [19] SPIERINGS A B, LEINENBACH C, KENEL C, et al. Processing of metal-diamond-composites using selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21 (2): 130-136.
- [20] GAN J, GAO H, WEN S F, et al. Simulation, forming process and mechanical property of Cu-Sn-Ti/diamond composites fabricated by selective laser melting[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2020, 87: 105144.
- [21] 张俊涛. 金刚石颗粒增强工具材料3D打印研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [22] RAHMANI R, ANTONOV M, KOLLO L. Selective laser melting of diamond-containing or postnitrided materials intended for impact-abrasive conditions: experimental and analytical study[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 4210762.
- [23] TIAN C C, LI X K, ZHANG S, et al. Porous

- structure design and fabrication of metal-bonded diamond grinding wheel based on selective laser melting (SLM) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100 (5/6/7/8) : 1451-1462.
- [24] TIAN C C, LI X K, ZHANG S, et al. Study on design and performance of metal-bonded diamond grinding wheels fabricated by selective laser melting (SLM) [J]. Materials & Design, 2018, 156: 52-61.
- [25] TIAN C C, LI X K, LI H, et al. Study on process and manufacturability of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM) [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1303 (1) : 12144.
- [26] TIAN C C, LI X K, LI H, et al. The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM) [J]. Materials Science & Engineering, 2018, 743: 697-706.
- [27] TIAN C C, LI X K, CHEN Z Y, et al. Study on formability, mechanical property and finite element modeling of 3D-printed composite for metal-bonded diamond grinding wheel application[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 54: 38-47.
- [28] YANG Z B, ZHANG M, ZHANG Z, et al. A study on diamond grinding wheels with regular grain distribution using additive manufacturing (AM) technology[J]. Materials & Design, 2016, 104: 292-297.
- [29] YANG Z B, HU J C, LI K Q, et al. 3D printing of diamond tools for dental ceramics processing[J]. Advanced Engineering Materials, 2017: 1700747.
- [30] WU J J, ZHANG S H, QU F, et al. Matrix material for a new 3D-printed diamond-impregnated bit with grid-shaped matrix[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2019, 82: 199-207.
- [31] WU J J, ZHANG S H, LIU L L, et al. Rock breaking characteristics of a 3D printing grid-matrix impregnated diamond bit[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2020, 89: 105212.
- [32] 韦文杰, 张绍和. 栅格胎体孕镶金刚石钻头的破岩机理分析[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45 (5) : 180.
- [33] 张绍和, 张昊旻, 曲飞龙, 等. 栅格状工作层金刚石钻头及其3D打印制作工艺: CN105649538A[P]. 2016-06-08.
- [34] 张绍和, 张昊旻, 韦文杰, 等. 金属结合剂复杂型面金刚石锯片及其3D打印制作工艺: CN105562825A[P]. 2016-05-11.
- [35] GUO L, ZHANG X R, CHEN S B, et al. An experimental study on the precision abrasive machining process of hard and brittle materials with ultraviolet-resin bond diamond abrasive tools[J]. Materials, 2019, 12 (1) : 125.
- [36] GUO L, ZHANG X R, LI C, et al. An experimental study on the abrasive machining process of electronic substrate material with a novel ultraviolet-curable resin bond diamond lapping plate [J]. IEEE Access, 2019, 7: 64375-64385.
- [37] HUANG Q Y, GUO L, MARINESCU I D. Research on the properties of resin bond wheel cured by ultraviolet light[J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 259-269.
- [38] 邱燕飞. 金刚石磨粒三维可控排布树脂磨具的构造与制备[D]. 厦门: 华侨大学, 2019.
- [39] QIU Y F, HUANG H. Research on the fabrication and grinding performance of 3-dimensional controllable abrasive arrangement wheels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104 (5/6/7/8) : 1839-1853.
- [40] 陈家泓, 张凤林, 许琼生, 等. 选区激光烧结3D打印树脂结合剂金刚石砂轮初探[J]. 超硬材料工程, 2018, 30 (4) : 1-5.
- [41] DU Z J, ZHANG F L, XU Q S, et al. Selective laser sintering and grinding performance of resin bond diamond grinding wheels with arrayed internal cooling holes[J]. Ceramics International, 2019, 45 (16) : 20873.

MW 20250202