

选择性激光烧结覆膜砂材料及成形工艺研究进展

李华艺, 谭 锐, 尹绍奎, 于瑞龙, 于志勇,
王鹏伟, 李延海, 朱慧君, 田立丹

(中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 选择性激光烧结 (SLS) 技术凭借其无模制造优势, 在复杂砂型 (芯) 制备中发挥了重要作用, 而覆膜砂作为关键材料, 其成分与工艺优化对提升砂型性能至关重要。本文系统综述了SLS覆膜砂材料的研究进展, 重点对覆膜砂成分及覆膜工艺和砂型 (芯) 成形工艺研究进行了梳理, 最后介绍了SLS覆膜砂型 (芯) 应用, 并对未来的发展方向进行了展望。

关键词: 选择性激光烧结 (SLS); 覆膜砂; 热塑性酚醛树脂; 激光参数优化; 后处理强化

选择性激光烧结技术 (简称SLS), 是一种基于离散-堆积原理的增材制造技术, 如图1所示, 工作时通过使用激光束逐层烧结粉末材料来构建三维物体。该技术由美国德克萨斯大学的Carl Deckard教授于1989年提出, 在1992年正式发布了基于SLS技术的工业3D打印机^[1]。SLS使用的材料非常广泛, 理论上受热能够互相粘连或表面覆有热固性粘结剂的粉末都能作为SLS的原材料^[2]。选用覆膜砂作为SLS的材料, 结合覆膜砂高填充性能及激光烧结技术无模制造的优势, 在航空航天、汽车和重型机械等领域发挥了重要作用。以航空高端铝合金铸件为例, 铸件内部管路复杂交错, 管壁较薄且精度要求高, 采用模具制备难度大, 选用SLS覆膜砂制芯较好地解决了这一问题。本文综述了国内外相关领域的研究现状, 从覆膜砂成分及覆膜工艺、砂型 (芯) 激光烧结成形工艺及SLS覆膜砂型 (芯) 应用研究三个方面简述SLS覆膜砂材料制备砂型 (芯) 的研究与发展。

作者简介:

李华艺 (2001-), 男, 硕士生, 从事选择性激光烧结覆膜砂材料与工艺研究工作。E-mail: 2782836519@qq.com

通信作者:

谭锐, 男, 正高级工程师。E-mail: 13898817946@163.com

中图分类号: TB332;
TG221

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977 (2025)
08-1119-08

收稿日期:

2025-04-03 收到初稿,
2025-05-14 收到修订稿。

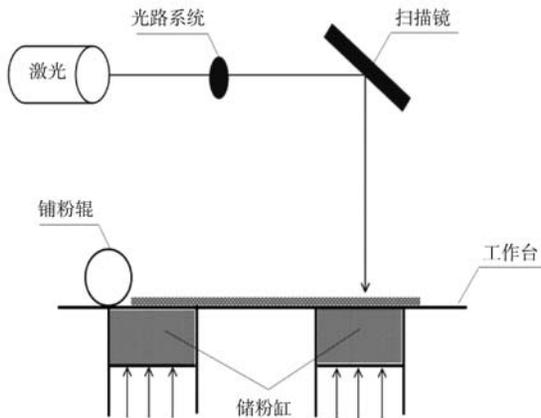


图1 选择性激光烧结原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the selective laser sintering

1 SLS用覆膜砂材料及制备工艺

1.1 覆膜砂的原材料

1940年,德国Croning博士在研发用于炮弹壳生产的壳法工艺(Shell Molding Process)时,发明了一种新型铸造材料——覆膜砂(Resin Coated Sand),这一发现引起了铸造领域科研人员的广泛关注^[3]。覆膜砂是一种树脂附着在砂子表面的材料,在常温下为干态颗粒,加热时树脂融化包裹砂粒粘结在一起,其主要成分包括原砂、粘结剂、固化剂以及一些添加剂,其中热塑性酚醛树脂的含量与原砂特性是影响覆膜砂成形质量的核心影响因素。由于SLS成形过程中较高的激光能量会导致树脂分解(如热降解或烧损),其树脂添加量通常可略高于传统壳型(芯)工艺的常规用量。研究表明,普通覆膜砂树脂加入量(质量分数)在1%~2%,而SLS覆膜砂的树脂加入量在2%~4%^[4]。

1.1.1 覆膜砂原砂

覆膜砂原砂的材料特性包括原砂种类、熔点和粒度等对砂型的最终质量有着绝对性影响。覆膜砂的原砂主要有4种:硅砂、锆砂、铬铁矿砂和宝珠砂^[5]。硅砂是一种天然砂,由于其价格较低、来源广泛,是最常用的覆膜砂原砂,特点包括较大的角形系数、不平整的砂粒表面、较大的热膨胀系数、较差的流动性和高含泥量,由于其流动性差,要达到强度要求就需加入更多的树脂,导致砂型(芯)的发气量大,并且透气性和溃散性能较差。

相比之下,锆砂和铬铁矿砂具有较高的耐火度、良好的导热性和较低的热膨胀系数,但由于这些矿产资源稀缺,成本较高,主要应用于生产形状复杂、尺寸稳定性要求高的精密复杂铸件等^[6]。为替代昂贵的锆砂,美国Carb Ceramics公司在20世纪30年代研发出一种新型陶粒砂——“宝珠砂”,其颗粒为人工制造的莫来石球形颗粒。宝珠砂具有球形颗粒结构、形状均匀、结构稳定、表面光滑和不易破碎的特点,材料耐火度达1600℃以上,且具有低热膨胀特性(热膨胀系数 $\leq 0.13\%$),配合优异的导热性[热导率 $5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]、紧实成形性和透气性能(透气率 >180),具有多重性能优势。在实际铸造应用中,球形宝珠砂的角形系数 ≤ 1.1 ,颗粒间摩擦力小,铺粉均匀性提高,可减少激光烧结时的层间缺陷(如孔隙、裂纹)。宝珠砂的铺粉密度比不规则硅砂提高21.3%,其卓越的流动充型能力可实现型腔高精度填充,较传统硅砂可显著改善砂型致密度和铸件表面质量,同时降低树脂添加量15%~20%,在复杂铸件生产领域已取得突破性应用成果,在覆膜砂生产中,宝珠砂得到了成功应用。

此外,原砂熔点需与铸造金属匹配。例如,钛合

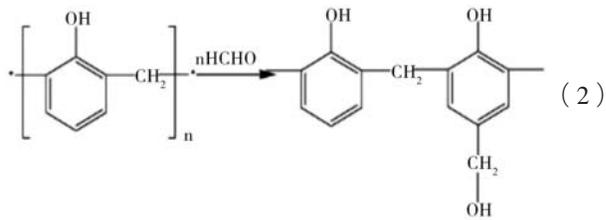
金铸造需使用高熔点锆砂(熔点 $>2\ 000\text{ }^\circ\text{C}$),而铝合金铸造可采用硅砂(熔点约 $1\ 700\text{ }^\circ\text{C}$)^[7]。若原砂熔点不足,浇注时砂型会发生软化甚至熔融,导致铸件粘砂或变形。而原砂的粒度及级配也会影响铺粉密度与表面精度,通常情况下,细粒度砂可提高砂型表面光洁度,但过细砂(如 >300 目)易团聚,导致激光能量吸收不均,形成局部过烧或粘结不足。杨慧^[8]通过试验对比50/100目、100/50目、70/140目覆膜硅砂及宝珠砂的强度及灼减量,发现向粗砂中填入细砂,使得铺粉密度提升至 $1.68\text{ g}/\text{cm}^3$,孔隙率降低至23.5%,有利于覆膜。

1.1.2 覆膜砂粘结剂和固化剂

覆膜砂所用的粘结剂为热塑性酚醛树脂,常温下为黄色固体,加入量占原砂2%~4%。通常情况下树脂的加入量越多,覆膜砂的强度就越高。但是通过提高粘结剂含量来提高砂型初强度会导致SLS砂型发气量较大、溃散性能较差,当树脂过高,发气量 $>12\text{ mL}/\text{g}$,铸造时易产生气孔^[10]。一些研究指出,通过改性来提高酚醛树脂强度的可行性很高^[10]。王宇翔等^[11]向酚醛树脂中加入聚酰胺、液体丁腈橡胶以及液体羧基丁腈橡胶,其复合树脂提高了增韧效果和热稳定性。Tetsuo Haraga^[12]及其团队通过创新地将异氰酸酯结构融入酚醛树脂的分子链中,显著优化了树脂的拉伸强度等关键物理特性。Esmeraldo M A^[13]等认为腰果酚替代量不大于15%时,能显著改善树脂的耐化学性和拉伸强度及弯曲强度,吴锦涵^[14]使用苯并噁嗪和腰果酚协同改善改性酚醛树脂。也有学者用硅烷偶联剂改性酚醛树脂,游胜勇等^[15]用KH560改性酚醛树脂,使得其拉伸强度及冲击强度显著提高。

固化剂主要为乌洛托品溶液,通常加入量占树脂的15%~20%,当乌洛托品加入量过低($<15\%$)时,树脂固化剂交联不充分,砂型强度低、易溃散;当乌洛托品加入量过高($>20\%$)时,反应过快导致树脂过固化,脆性增加,强度反而下降。而过量乌洛托品可能提前引发树脂预固化,尤其在潮湿环境,导致覆膜砂结块失效。在激光烧结过程中乌洛托品受热分解成氨气与甲醛,反应产生的氨气使环境呈碱性。此外,固化剂乌洛托品分解出的甲醛与树脂发生缩合反应,树脂苯酚链上的羟基的对位处生成羟甲基,形成三维网络结构,从而固化树脂并赋予砂型强度。将热塑性树脂变为体型结构的热固性树脂,热固性树脂加热后不会再次软化,酚醛树脂固化反应具有变形量小、成形成件强度高的优势。化学反应式具体如下^[16]:





1.1.3 覆膜砂其他添加剂

覆膜砂还会添加硬脂酸钙来起到润滑作用，防止在覆膜的过程中产生结块或覆膜不均匀的现象，减少覆膜过程中的机械阻力。此外，为了增强覆膜砂效果，还会添加一些特殊的添加剂。华中科技大学^[17]在相关专利中提出，在覆膜砂中加入复合粘结剂及光吸收剂，以优化砂型的烧结特性，拓宽了覆膜砂材料的应用领域，使其更好地契合选择性激光烧结（SLS）技术的成形特性及制造优势。魏蓉^[18]向覆膜砂中添加PAN基碳纤维，梁小文等^[18]在覆膜砂中加入钇溶胶，Shang qin^[20-21]等使用多壁碳纳米管（CNTs）作为纳米增强剂，以促进激光烧结过程并增强聚合物复合材料的热性能和力学性能，从而增强了覆膜砂性能。

1.2 覆膜砂制备工艺

覆膜砂的覆膜方法有4种：干混法、冷法、温法和热法覆膜。干混法是将不同配比的原材料先经过干燥处理，然后进行混合，最后通过热压成形得到覆膜砂；冷法覆膜主要是用酒精将树脂溶解，再均匀地覆膜在砂子上；温法覆膜是在特定的温度下，对砂粒和

树脂混合物进行加热处理，使树脂部分融化并均匀地粘附在砂粒表面，然后冷却固化形成覆膜砂；而热法是通过加热砂子的方式将树脂加热至融化进行覆膜。

覆膜砂的干混法主要在覆膜砂生产的早期阶段，随后被冷法取代。早在1958年，傅朝荣等^[22]研究了冷法覆膜溶剂，使用了酒精和丙酮溶液作为溶解树脂的溶剂，研究表明，酒精远好于丙酮，且酒精含量越高，覆膜效果就越好。后来，学者们在冷法覆膜上进行了改善，但由于设备不成熟，只将砂子加热60~80℃进行混砂，随着半自动覆膜砂生产线的完善，也逐渐被淘汰。热法覆膜是如今使用最普遍的覆膜方法，热法覆膜是一种通过加热（150~190℃）将树脂（2%~4%）与固化剂乌洛托品（15%~20%）均匀包覆砂粒的铸造砂制备工艺。具体如图2所示，原砂加热后倒入混砂机，降温至覆膜温度，依次加入树脂、乌洛托品及硬脂酸钙并搅拌均匀，出料后经冷却、破碎及筛分处理。而加热温度与混炼时间都会影响覆膜的效果。梁春永等^[23]认为最佳的工艺参数为：加热砂温180℃、树脂的混砂时间为60s、固化剂的混制时间为30s、硬脂酸钙的混制时间为30s。刘泰涑^[24]通过差示扫描量热仪（DSC）对混砂过程进行热分析，DSC曲线显示在67.4℃和170.6℃处存在吸热峰，分别对应于酚醛树脂的熔融峰和固化峰。冀运东^[25]通过对比4种不同软化点的树脂指出，树脂的粘度是覆膜质量的关键因素，树脂覆膜时的温度过高，会导致树脂焦化或氧化影响键合力下降，因此，树脂加入时的温度应保持在树脂软化点的40~50℃左右。

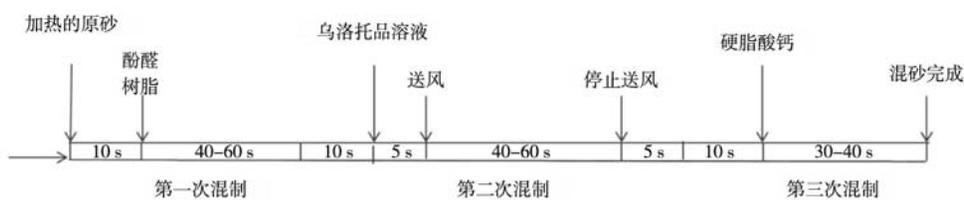


图2 热法覆膜混砂时间图

Fig. 2 Time diagram of the thermal thermal sand mixing process

除此之外覆膜的设备也会影响覆膜的效果，覆膜的设备主要分为行星转子式、摆动式以及刮板式^[26]。裴立威^[27]指出行星转子式制作覆膜砂的性能最优，使用行星转子混砂机制备的覆膜砂不仅能有效增进树脂与原砂的混合，还确保了覆膜砂具备所需的强度特性。

2 砂型（芯）激光烧结成形工艺

砂型3D打印的方法主要有2种，分别为选择性激光烧结（SLS）覆膜砂与粘结剂喷射3D打印（3DP）树脂

砂。SLS覆膜砂型与近些年来广泛应用的3DP树脂砂型对比，具有更高的结构强度、尺寸精度和热稳定性，特别适用于制造复杂、要求高的精密铸型，具体性能如表1所示^[29-30]。SLS通过激光将覆膜砂砂粒逐层烧结成形，避免了粘结剂在高温下易分解的问题，使砂型在浇注高温合金时不易炸裂或烧蚀，显著提高铸件质量。同时，其致密性与尺寸控制能力强，后处理工序少，材料可循环使用，具备更高的工业应用价值。例如，在航空发动机叶片或涡轮部件的试制中，SLS砂型能够直接打印带有复杂冷却通道的中空结构型芯，而

表1 SLS覆膜砂型与3DP树脂砂型(芯)技术对比
Tab. 1 Comparison of SLS printing and 3DP printing sand (core) technologies

w_B/%

项目	SLS砂型	3DP砂型
成形原理	激光选择性烧结覆膜砂砂粒	粘结剂喷射到原砂砂粒上进行固化
砂型强度	高,可用于各种合金铸件铸造	较低,易碎裂,适合有支撑的结构
致密度与透气性	致密性好,透气性可控	多孔结构,透气性好但易渗漏
热稳定性	激光烧结结构抗热开裂	粘结剂遇高温易分解产生缺陷
尺寸精度	±0.2 mm以内	±0.5 mm以内
后处理需求	少,强度高可直接浇注	需干燥、加固或涂层处理
环保性	材料重复利用率高,粉尘较少	粉尘大,粘结剂残留影响环境

传统3DP砂型因强度不足或热分解问题难以胜任^[28]。

关于SLS砂型(芯)成形工艺的研究主要有两个方面,一方面是对强度的影响,另一方面是对精度的影响。精度及强度主要取决于SLS系统,包括激光系统的功率和光斑直径,扫描系统的扫描速度、扫描间距和扫描方式,以及粉末系统的铺粉层厚和预热温度。而激光功率、扫描速度、铺粉厚度、预热温度和扫描间距等对SLS砂型(芯)的性能有着直接的影响^[31]。

2.1 激光功率与扫描速度

在激光烧结工艺中,激光的输出功率与扫描速度共同作用于粉末的加热时长及温度^[32]。激光束所达到的温度及其加热时间,对于树脂的融化状态以及覆膜砂的固化程度具有关键作用。因此,精确调控激光功率与扫描速度的组合至关重要,这既能确保扫描区域内砂粒间树脂的固化反应顺利进行,又能有效防止树脂因过度吸收能量而发生“炭化”,进而保障SLS砂型(芯)的强度。这种参数的优化组合显得尤为关键。鉴于激光光强分布的非均匀性,光斑中心区域的激光强度达到峰值,意味着该区域粉末在单位时间内吸收的能量最多,因此受热温度最高,烧结深度也最大。随着与光斑中心距离的增大,激光强度按指数规律逐渐减弱,导致烧结深度相应减小。直至光斑边缘之外,粉末仅能依靠间接传递的热量进行加热并产生黏结。研究表明,激光束光强分布公式如下:

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/\omega_0^2) \quad (5)$$

式中: I_0 为光斑中心最大光强; ω_0 为光斑半径; r 为砂粒表面上一点到激光光斑中心的距离。

激光烧结过程中,当激光照射到砂粒表面时,砂粒表面会反射一部分能量,也会吸收一部分能量,剩余的能量会传递到下一层:

$$E = E_{\text{吸}} + E_{\text{反}} + E_{\text{传}} \quad (6)$$

覃丹丹^[33]等人研究了激光能量密度对SLS覆膜砂试样尺寸的影响。在不改变激光功率的条件下,增大扫

描速度,单位时间内激光能量的输入降低,树脂的软化区及热影响范围缩小。因此,试样的实际长度、宽度以及烧结深度均会减小。Cheng R^[34]等研究表明,当扫描速度从2 000 mm/s增至3 400 mm/s时,砂芯尺寸误差由±0.3 mm降至±0.15 mm,但速度超过4 000 mm/s会导致未熔合缺陷。李湘生^[35]提出大激光功率、高扫描速度与小激光功率、低扫描速度对砂型质量的影响是相同的。

2.2 预热温度

对扫描前的覆膜砂进行预热能有效改善SLS砂型(芯)初强度及尺寸精度。由于激光能量较高,照射时能量由外至内传递会产生温度梯度差,对覆膜砂进行预热可以减小体积受热膨胀,保持覆膜砂的流动性。预热温度应低于打印材料的熔点的10~30 °C,覆膜砂中的树脂软化温度一般在80~90 °C,因此预热温度在50~80 °C之间。图3为在激光功率为18 W、扫描速度为1.2 m/s和铺粉层厚为0.2 mm时,不同预热温度对SLS件抗拉强度的影响^[36]。

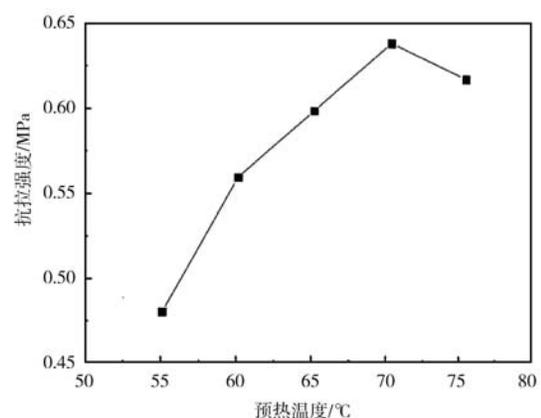


图3 预热温度对SLS砂型强度的影响
Fig. 3 Effect of preheating temperature on strength of the SLS sand mould

研究表明, 预热温度对激光烧结成形质量具有显著影响。从热力学角度分析, 适宜的预热条件可有效调控烧结应力场分布, 从而优化制件的力学性能与致密性。当预热不足时, 由于覆膜砂的热容特性, 砂粒间温度梯度增加, 导致树脂相变不充分, 砂粒界面结合强度降低, 直接影响成形精度与结构完整性。反之, 过高的预热温度将引发树脂热解反应, 使粘结相发生炭化分解, 导致成形件坍塌。

2.3 铺粉层厚

覆膜砂颗粒在激光照射前通常处于杂乱无章的分散状态。经过铺粉工艺后, 激光逐层扫描, 直接照射到的树脂在工作缸的同一水平区域内会受热固化并粘结。而那些未被直接照射的底层粉末树脂则会软化并发生粘结。随着下一层粉末的扫描, 层与层之间的树脂通过间接传热也会相互粘结, 导致颗粒间的空隙缩小, 排列更加紧密和一致, 从而优化了堆积形态。由于激光从上至下扫描, 热量向下传递, 表层和下一层会存在温度差, 固化程度也不相同。为了更好的传热, 减小温度梯度差, 会选择较小的铺粉层厚。Li^[37]表明0.25 mm层厚可实现树脂充分熔融与砂粒间有效粘结, 拉伸强度达6.8 MPa; 层厚增至0.35 mm时, 层间结合力下降30%, 导致分层风险。但铺粉层太薄, 会导致SLS件烧结时间变长, 且高热量还会导致树脂炭化, 降低砂型的精度及强度, 粉层之间也容易发生翘曲变形, 产生SLS件被铺粉辊推移的“推粉”现象^[38]。



图4 推粉现象

Fig. 4 The phenomenon of pushing powder

2.4 扫描间距

Nelson^[39]研究表明, 成形件的质量与激光能量有密切关系, 并将能量密度定义为式(7):

$$E_D = P/\pi v d \quad (7)$$

式中: P 为激光功率, v 为扫描速度, d 为扫描间距。

表层粉末吸收的激光能量与激光功率大小成正

比, 与扫描速度和扫描间距大小成反比。当激光扫描覆膜砂时, 光斑的能量分布并不均匀, 樊自田^[40]将其从内向外分为三个区域硬化粘结区、软化粘结区和未粘结区, 对应着覆膜砂吸收的能量大小。虽然光斑的大小是一定的, 扫描间距会影响同一层砂粒能量的吸收与传递。Yeganeh A M^[41]等将扫描间距从0.15 mm降低到0.08 mm, 使砂型表面粗糙度(R_a)从25 μm 降至12 μm , 但需配合高扫描速度(>3 000 mm/s)以避免热累积。邓琦林^[42]深入探讨了扫描间距对激光输入总能量分布产生的影响。研究发现, 仅在扫描间距小于光束半径的情况下, 相邻激光束能量叠加后的分布才能基本保持均匀状态。这种均匀分布对于确保烧结致密度的一致性以及性能的稳定性极为有利。此外, 研究还指出, 需要避免出现扫描间距过小的情况, 因为这可能会导致激光能量过高, 进而引发收缩和翘曲变形等问题。

2.5 其他激光工艺参数

激光光斑直径指激光束在聚焦后的光斑大小, 通常为几十微米到几百微米, 主要影响成形精度。当选用小光斑直径时, 可以提高细节分辨率和表面质量, 但能量集中, 可能导致局部过热或材料烧损, 且扫描时间增加, 从而降低了成形效率, 适合高精度零件; 当光斑直径较大时, 降低细节分辨率, 牺牲成形精度, 通常适用于大尺寸零件或精度要求不高的零件。选择时需平衡精度与效率, 结合材料特性和零件要求。Tong^[43]等通过复合扫描策略(LSIC)发现, 采用200 μm 大光斑进行主烧结与80 μm 的小光斑进行轮廓修正时, 拉伸强度较单一光斑工艺提升30%以上。其机理在于: 大光斑确保熔池深度约0.5 mm以实现层间充分渗透, 而小光斑减少热影响区宽度从1.2 mm降至0.8 mm, 从而使得孔隙率从15%降至8%, 提升烧结件强度。

扫描方式对精度也有影响, 常规的扫描方式包括单向扫描、双向扫描、分区扫描、螺旋扫描、分形扫描、层间旋转扫描、轮廓偏置扫描和随机扫描。单向扫描简单易实现, 但热应力集中且各向异性明显; 双向扫描效率较高, 热应力分布更均匀, 但仍存在一定的各向异性; 分区扫描适合大尺寸零件, 能减少整体热应力, 但区域边界可能产生接缝; 螺旋扫描热应力分布均匀, 适合圆形或对称零件, 但对复杂形状适应性差; 分形扫描热应力均匀且适合复杂几何形状, 但路径规划复杂; 层间旋转扫描显著减少各向异性, 提高力学性能均匀性, 但设备控制要求高; 轮廓偏置扫描轮廓清晰, 表面质量高, 适合薄壁或高精度零件, 但效率较低; 随机扫描热应力分布均匀, 适合复杂形

状，但路径规划复杂且效率较低。选择扫描方式时需综合考虑零件几何形状、材料特性和成形要求，以平衡效率、精度和性能。

2.6 后处理强化工艺参数

激光烧结砂型（芯）的初始强度通常较低，无法承受金属液的静压力和热作用力，因此不能直接用于浇注，需通过固化处理提升强度。固化处理主要通过加热保温实现。加热时，部分树脂熔融，同时乌洛托品分解出亚甲基，促使熔融树脂从线性结构转变为体型结构，使覆膜砂固化成形。为了使砂型受热均匀，往往需要添加填充材料，常见的填充材料为玻璃珠^[44]，何明智^[45]等研究了填充玻璃珠覆膜砂烧结试样在不同烘烤温度下的固化处理的效果，发现覆膜砂试样后处理稳定190℃时固化较完全。

3 SLS覆膜砂型（芯）应用

选择性激光烧结覆膜砂技术凭借其高精度、高自

由度的成形能力，在多个领域实现了复杂铸造模具的革新性应用。在汽车零部件制造中，通过优化新旧砂配比与激光参数，直接烧结发动机缸盖型芯，将开发周期从数周缩短至数天，尺寸精度达 ± 0.2 mm，浇注的铝合金缸盖气密性合格率超98%^[46]，同时支持变速箱壳体等模具的快速试制，成本降低42%^[47]。在航空航天领域，针对镁合金易氧化难题，添加硼酸基复合阻燃剂的覆膜砂型成功用于ZM₂镁合金机匣体铸造，实现壁厚3~5 mm、集成4 mm油路砂芯的复杂薄壁结构，铸件抗拉强度提升36%，表面粗糙度达 $R_a=3.2\sim 6.3$ μm ^[48]；此外，该技术结合熔模铸造制造的镍基高温合金涡轮叶片，轮廓精度 ± 0.1 mm，晶粒取向一致性提高20%^[49]。在文创领域，SLS技术通过砂型一体化成形实现了青铜雕塑“镂空云纹鼎”的0.2 mm级精细纹饰，并利用分模块烧结与榫卯组装方案突破设备幅面限制，完成大型铸件无痕拼接^[50]。SLS砂型（芯）的实例见图5。



图5 SLS砂型（芯）^[51]
Fig. 5 SLS sand mold (core)

4 结论与展望

激光烧结覆膜砂型（芯）的研究是一个综合性问题，为提高砂型质量，满足不同零件的多样化需求，诸多学者对覆膜砂的成分配比和成形工艺做了大量研究。本文综述了选择性激光烧结（SLS）覆膜砂材料及成形工艺的研究进展，在覆膜砂材料方面，介绍了原材料选择、树脂改性方法和添加剂的应用，以及覆膜工艺的研究进展；在激光成形工艺上，描述激光功率、扫描速度、铺粉厚度、预热温度和扫描间距等参数对砂型（芯）的影响，并结合后处理强化工艺进一

步提高了砂型的适用性。目前，SLS覆膜砂技术已在汽车和航空航天等领域成功应用，实现了复杂铸件的高效制造与成本控制。然而，材料成本高、SLS覆膜砂件初强度低和发气量大等问题仍需突破。因此，为推动SLS覆膜砂型（芯）的发展，未来研究可从以下方向展开：（1）通过对树脂进行改性、添加复合增强剂等措施，开发SLS覆膜砂材料制备新工艺，提高砂型（芯）的初始强度和高温稳定性；（2）优化激光烧结工艺及烧结设备，提高打印砂型（芯）的精度和综合性能。

参考文献:

- [1] 杨力. 覆膜砂选择性激光烧结材料及成形工艺的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [2] 朱林泉, 白培康, 朱江森. 快速成型与快速制造技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [3] 孙传圣. 覆膜砂增材复合制造方法及工艺 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [4] 林海强. 影响激光快速成形制芯工艺精度的关键 [J]. 现代铸铁, 2013, 33 (3): 83-87.
- [5] 吴国华, 周杰. 原材料对铸造覆膜砂质量的影响 [J]. 热加工工艺, 1995 (4): 29-30.
- [6] 唐路林, 李乃宁, 吴培熙. 高性能酚醛树脂及其应用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [7] 李娜, 冯月雪, 高永菊, 等. 铸造烧结陶粒砂在制芯中的应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 369-372.
- [8] 杨慧. 原砂及树脂加入量对覆膜砂性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2021, 41 (1): 48-50.
- [9] MARIUSZ L, ALDONA G, DARIUSZ D, et al. Mechanical reclamation of spent moulding sand on chromite sand matrix; removal of alkali-phenolic binder [J]. Materials, 16 (7): 2919.
- [10] GUO S, LI J, ZHANG H, et al. Balling behavior of phenolic resin during selective laser sintering process [J]. Materials Letters, 2024: 136447.
- [11] 王宇翔, 张春辉. 热塑性树脂增韧改性酚醛树脂的制备及其性能研究 [J]. 塑料科技, 2024, 52 (9): 7-14.
- [12] HARAGA T, NOMURA R, KAI I, et al. Process for preparation of resin-coated molding sand: US, 4460629A[P], 1984.
- [13] ESMERALDO M A, GOMES A C, FREITAS J E B, et al. Dwarf-green coconut fibers: a versatile natural renewable raw bioresource. treatment, morphology, and physicochemical properties [J]. Bioresources, 2010, 5 (4): 2478-2501.
- [14] 吴锦涵. 苯并噁嗪/腰果酚改性酚醛树脂及其在碳纸中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江科技大学, 2024.
- [15] 游胜勇, 戴润英, 董晓娜, 等. 硅烷偶联剂改性酚醛树脂的合成 [J]. 合成树脂及塑料, 2017, 34 (6): 17-19.
- [16] 宋照伟, 陈瑞, 祝强, 等. 覆膜砂选择性激光烧结粘附机理探讨 [C]// 2019中国铸造活动周论文集, 2019: 800-805.
- [17] 史玉升, 闫春泽, 沈其文, 等. 用于选择性激光烧结成形的覆膜砂及其制备方法: CN101823119A [P]. 2010.
- [18] 魏蓉. 碳纤维增强覆膜砂选择性激光烧结成型性能研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- [19] 梁小文, 王德清, 徐志锋, 等. 选区激光烧结用覆膜铝砂的制备及其SLS成形工艺研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (8): 814-825.
- [20] SHANGQIN Y, JIANGMING B, CHEE C, et al. Material evaluation and process optimization of cnt-coated polymer powders for selective laser sintering [J]. Polymers, 2016, 8 (10).
- [21] 王鹏伟, 尹绍奎, 于瑞龙, 等. 一种选区激光烧结用覆膜砂及其制备方法 [P]. 中国: CN117548622A, 2025.
- [22] 傅朝荣, 黄恢元, 柳百成. “冷法”覆膜砂配制工艺及其参数的研究 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1958 (1): 62-71.
- [23] 梁春永, 王磊, 李海鹏, 等. 覆膜砂工艺参数优化的研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2007 (6): 28-31.
- [24] 刘泰涿. 宝珠覆膜砂选择性激光烧结的数值模拟与实验研究 [D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2019.
- [25] 冀运东, 李琳. 酚醛树脂粘度特性对覆膜砂性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2007 (13): 44-46.
- [26] 张才元, 张国玲, 张兆鹏, 等. 覆膜砂设备和工艺的研究 [J]. 铸造, 1993 (5): 19-21.
- [27] 裴立威. 覆膜砂性能影响因素的探讨 [J]. 冶金与材料, 2020, 40 (1): 172-173.
- [28] GU Dongdong. Laser additive manufacturing of high-performance materials [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2015, 10.
- [29] EDGAR J, TINT S. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing [J]. Johnson Matthey Technology Review, 2015, 59 (3): 193-198.
- [30] 樊自田, 杨力, 唐世艳. 增材制造技术在铸造中的应用 [J]. 铸造, 2022, 71 (1): 1-16.
- [31] 鲍飞, 封雪平, 缪锋, 等. 激光工艺参数对选择性激光烧结覆膜砂初坯强度的影响 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (4): 790-793.
- [32] YANG Li, TANG Shiyun, FAN Zitian, et al. Rapid casting technology based on selective laser sintering [J]. China Foundry, 2021 (4): 296-307.
- [33] 覃丹丹, 党惊知, 白培康, 等. 选择性激光烧结铸造覆膜砂的实验研究 [J]. 铸造技术, 2006 (7): 671-673.
- [34] CHENG R, WU X, ZHENG J. The optimization design study of selective laser sintering process parameters on the pro-coated sand mold [J]. Applied Mechanics & Materials, 2011 (55-57): 853-858.
- [35] 李湘生. 激光选区烧结的若干关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [36] 杜宇雷. 3D打印材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [37] SHENG L X, SHENG S Y, JUN W Z, et al. An experimental study of the powder preheating process for a SLS (Selective Laser Sintering) forming machine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001 (4): 412-415.
- [38] 张昕, 白培康, 李玉新. 覆膜宝珠砂激光烧结工艺影响因素的优化研究 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (2): 282-284.
- [39] NELSON, CHRISTIAN J. Selective laser sintering: a definition of the process and an empirical sintering model [M]. US: The University of Texas at Austin. 1993.
- [40] 樊自田, 黄乃瑜. 选择性激光烧结覆膜砂铸型 (芯) 的固化机理 [J]. 华中科技大学学报, 2001 (4): 60-62.

- [41] YEGANEH A M, MOVAHHEDY M R, KHODAYGAN S. An efficient scanning algorithm for improving accuracy based on minimising part warping in selected laser sintering process [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2019 (1) : 14.
- [42] 邓琦林, 张宏, 唐亚新, 等. 固态粉末的选择性激光烧结 [J]. *电加工*, 1995 (2) : 32-35.
- [43] TANG Q, XUE K, WANG T, et al. Laser sintering and invalidating composite scan for improving tensile strength and accuracy of SLS parts [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 1-11.
- [44] 李小城, 肖军杰, 王刚. SLS覆膜砂成型件后处理强度研究 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45 (13) : 121-123.
- [45] 何明智, 顿亚鹏, 蒋芳, 等. 选区激光烧结覆膜砂后处理固化工艺及性能研究 [J]. *机电工程技术*, 2023, 52 (8) : 27-29.
- [46] 费磊, 邢娜, 孙晶. 基于SLS汽车零件铸造模具快速成型技术的研究 [J]. *自动化技术与应用*, 2018, 37 (6) : 130-133.
- [47] 李偲偲, 徐志锋, 赵燕燕, 等. 基于SLS覆膜砂型(芯)的镁合金砂型铸造的阻燃机理分析 [J]. *铸造*, 2015, 64 (2) : 140-143.
- [48] 刘秀梅, 徐志锋. 选区激光烧结在航空件铸造中的应用 [J]. *金属加工(热加工)*, 2010, (13) : 19-22.
- [49] 潘锐, 刘见向, 张炳荣. 3D打印在铝合金发动机缸盖型芯中的应用 [J]. *铸造技术*, 2017, 8 (1) : 224-226.
- [50] 童强. 激光三维打印在文化创意产品制造中的应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [51] 余立华, 业冬. 利用SLS技术烧制发动机缸盖水套砂芯 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2018, 38 (9) : 988-990.

Research Progress on Coated Sand Materials for Selective Laser Sintering and Forming Process

LI Hua-yi, TAN Rui, YIN Shao-kui, YU Rui-long, YU Zhi-yong, WANG Peng-wei, LI Yan-hai, ZHU Hui-jun, TIAN Li-dan

(1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Analytical and Testing Center, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract:

Selective laser sintering (SLS) technology, with its advantages in manufacturing without patterns, has played an important role in the preparation of complex sand mold s(cores). As a key material, the composition and process optimization of coated sand are crucial for improving the performance of sand molds. This article systematically reviewed the research progress of the SLS coated sand materials, focusing on the composition of the coated sand, coating technology, and sand (core) forming process. Finally, the application of the SLS coated sand (core) was introduced, and the future development direction was discussed.

Key words:

selective laser sintering (SLS); coated sand; thermoplastic phenolic resin; laser parameter optimization; post-processing intensification