

铸造 3D 打印砂型表面粘附问题评估与分析

王洪涛^{1,2}, 高喜军², 王伟²

(1. 山东理工大学机械工程学院, 山东淄博 255000; 2. 共享智能铸造产业创新中心有限公司, 宁夏银川 750021)

摘要: 3D打印方式生产的砂型/芯表面有一层粘附层, 严重影响砂型3D打印技术在复杂结构砂型生产领域的应用以及砂型/芯的尺寸精度。通过含缝“8”字抗拉试块对表面粘附层不同层厚位置的强度进行评估, 测定粘附层的厚度约为0.4 mm。对3D打印砂型/芯表面粘附层进行系统分析认为: 3D打印用树脂较传统生产用树脂黏度低, 在砂粒间隙容易扩展流动, 喷射形成的卫星滴运动及喷头堵塞形成的雾化喷射导致产生表面粘附层。因此, 建议选择合理黏度的树脂粘结剂, 不要增加树脂的用量, 使用三筛砂或四筛砂减小砂粒间隙, 减少型砂中的极小颗粒。对于已经形成粘附层的砂型/芯, 通过加热和对砂型芯施加整体震动有利于去除表面粘附层。

关键词: 3D打印; 铸造; 砂型/砂芯; 粘附层

作者简介:

王洪涛(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师。主要研究方向为铸造工程技术、理论和高性能纳米金属材料。E-mail:htwang@alum.imr.ac.cn, htwang@sdu.edu.cn

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)02-0204-05

基金项目:

宁夏回族自治区重点研发计划: 铸造 3D 打印砂型后处理及再生循环利用成套技术装备研发(2018BDH02001); 2016 年科学技术部高技术研究发展中心增材制造与激光制造专项(2016YFB1101000)。

收稿日期:

2019-08-12 收到初稿,

2019-10-13 收到修订稿。

3D打印技术在铸造行业的应用被普遍看好^[1-3]。通过3D打印方式制作砂型/芯, 可使砂型/芯的结构和浇注工艺的设计更加灵活多样^[4]。J. Kang等基于3D打印技术研究了不同栅格/辐条结构砂型和空心砂型对冷却的影响^[5-7], G. Manogharan等研究了使用3D打印技术制作的倾斜及涡旋结构的直浇道对液态金属流态的影响^[8-9]。这样结构的砂型/芯使用传统的模具制作方式工艺极其复杂或难以实现。另外, 3D打印制作的型腔依然要通过浇注液态金属来形成铸件, 从而可以沿用传统的熔化浇注参数, 控制铸件材质的性能和内部缺陷, 获得性能稳定、质量优异的铸件。因此, 砂型3D打印技术在铸造行业的应用既可以发挥3D打印技术生产复杂结构砂型/芯的优势^[10], 又保留了铸件材质的性能及内部质量控制的优势, 从而有巨大的应用前景。

理论上砂型3D打印技术可以提高砂型/芯的尺寸精度, 简化砂型/芯设计, 在制作复杂结构砂型/芯时具有巨大优势, 但实践中发现在打印完成出箱时砂型/芯表面有一层粘附层, 需要通过机械的方法去除。如图1所示, A为表面粘附层, B为经过机械刮擦去除表面粘附的砂型/芯表面。对于铸造生产, 必须保证砂型内腔形状准确, 表面平整, 所以当打印结构复杂的砂型时, 不易直接接触或目视区域的粘附层无法有效清除, 这将给铸件带来致命的缺肉缺陷和夹砂风险, 并阻碍3D打印技术在复杂铸件生产方面的深度应用, 同时也对生产效率造成负面影响。

目前, 关于砂型3D打印技术表面粘附层的研究很少, 但是为了将砂型3D打印技术推向更广阔的应用领域, 更系统的工业应用, 助力传统行业智能化转型升级, 砂型3D打印表面粘附层是个不可避免的问题。基于以上, 本文提出了表面粘附层的评估方法, 并根据砂型3D打印技术的基本原理和工艺过程, 对各环节对表面粘附问题的影响进行系统分析, 包括机械运动部分和材料部分, 最后提出解决粘附层的方法策略。

1 砂型3D打印表面粘附层评估

本研究评估办法使用标准“8”字抗拉试块, 试块中间预留缝隙, 如图2所示。缝隙宽度为0~1 mm, 每0.2 mm一个步长。预留的缝隙完整保留了粘附层, 可以通过

抗拉试验测得其最低强度。

本研究使用斯派特公司的XQY-II智能型砂强度仪测量试块的抗拉强度，测量过程按照GB/T 2684—2009铸造用砂及混合料试验方法执行。

试块使用德国EXONE公司的MAX型铸造3D砂型打印机进行打印，粘结剂为共享化工公司生产的铸造3D打印机专用呋喃树脂和固化剂，打印砂型选用50~100粒度陶粒砂，预混固化剂，打印分辨率按EXONE默认分辨率执行。

如图3所示，当“8”字试块不含缝隙时，即缝隙宽度为0时，试块的抗拉强度在1~1.8 MPa之间。这个强度波动与砂型/芯的硬化时间有关，呋喃树脂的特性是硬化时间越长强度越高，一般以24 h强度作为呋喃树脂粘结剂的终强度。但不同硬化时间所测量的强度衰减规律是一致的。硬化时间长，强度高，相同缝宽的试块强度也较高；同理，硬化时间短，强度低，相同缝宽的试块强度也低。按中位数计算，不含缝的试块强度约1.6 MPa，含0.2 mm缝宽的砂型强度约0.5 MPa，含0.4 mm缝宽的砂型强度约0.25 MPa，0.6 mm缝宽试块强度约为0.1 MPa，0.8 mm缝宽的砂型强度非常低，均在0.05 MPa以下，而缝宽为1 mm的试块在出箱时就是断开的，无法测量强度。

2 表面粘附层形成原因分析

砂型3D打印技术是基于喷墨技术发展起来的，在打印时，每铺一层砂粒，随之选择性喷射一层粘结剂，粘接剂在砂粒之间浸润和流动，将砂粒粘接在一起，形成块体砂型或砂芯。首先，与传统生产方式使用模具阻止型砂和粘结剂的流动不同，3D打印并不存在物理的截止面，而是以打印区与非打印区的虚拟分界面代替，整个打印工作箱都铺满砂粒，喷射的粘接剂不会在分界面截止，粘接剂将扩展流动跨过分界面至非打印区，最终在成形的砂型/芯表面形成粘附层；第二，与传统砂型生产方式相比，3D打印不存在搅拌操作。控制粘接剂的喷射量、形式以及粘接剂与砂粒的交互作用，并避免粘接剂喷射至非打印区是控制粘附层的关键。

2.1 粘结剂的横向扩展流动分析

砂型垂直表面粘附层的形成与设备因素和树脂的横向扩展流动有关，其结构可简化为图4所示。其中a为设备及机械相关的影响层，b为与砂粒缝隙树脂的横向扩展流动有关。呋喃树脂为有机物液体，具有较大的黏性。牛顿流体的黏性定义为：

$$\tau = \eta (dv / dx) \quad (1)$$

式中： τ 为流体的内摩擦力，为流体运动的阻力， η

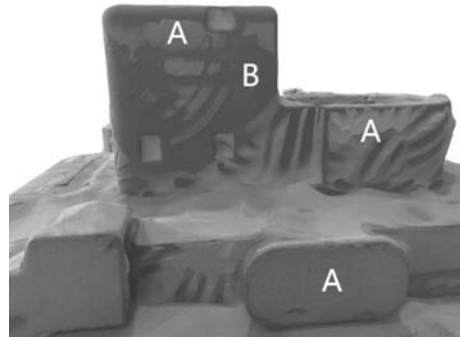


图1 铸造3D打印砂型表面粘附层实物图

Fig. 1 Adhesive layer on the surface of 3D printed sand mold/core

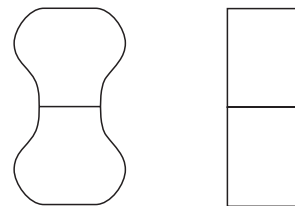


图2 含缝“8”字拉伸试块示意图

Fig. 2 Schematic diagram of “8-shaped” sand block tensile specimen with a gap at the middle

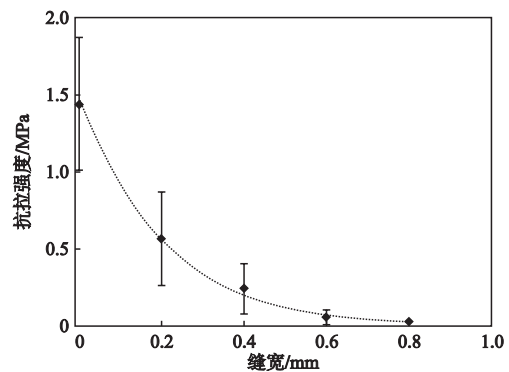
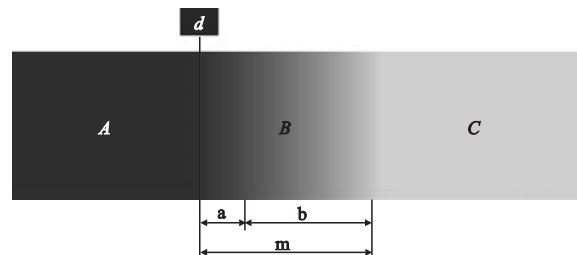


图3 含缝“8”字型砂试块抗拉强度随缝宽变化曲线

Fig. 3 Variation of strength with gap span in the “8-shaped” sand tensile specimen



a为机械相关影响层，b为树脂横向扩展流动层，m为名义表面过渡层，d为打印机喷头，e为砂型打印区/非打印区分界面，A为砂型硬化区，B为粘附层区，C为散砂区

图4 干砂与型砂界面结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of interface structure between sand mold and loose sand

为流体的粘度系数, dv/dx 为速度梯度。从公式(1)可以看出, 流体的粘度越大, 流动阻力越大, 反之后就更容易流动。用于打印的墨滴粘度不能太大, 也不能太小。段国林等人^[11]总结了墨滴适用范围, 取 $Z=1/Oh$, Oh 为奥内佐格数, 认为墨滴的物理特性应满足 $1<Z<10$ 。

在重力作用下的流体横向流动距离与重力势能降低和流动时间成正比, 与粘度成反比, 即树脂量越多, 时间越长, 流动距离越远。在砂型3D打印所喷射树脂扩展流动条件下, 树脂量全域积分总量不变, 随着远离流动原点, 流动前沿树脂量迅速减少, 重力势能迅速降低, 从而扩展流动树脂量呈指数规律下降, 这与图2型砂强度随缝宽增加的迅速衰减规律一致。由于树脂含量与型砂强度并不是线性关系, 所以在低含量树脂区的强度预测与测量值之间的有一定区别, 但从强度衰减的规律可以看出主要受扩展流动机制控制。另外, 在此实验为双半无限的窄缝流动, 即两边硬化区内的树脂都向缝宽内流动, 当两边的流动前沿相遇后, 将发生叠加, 重叠部分的树脂浓度增加, 所以实测强度比单纯理论预测稍高。

虽然有树脂与强度的非线性关系和含量叠加的影响, 含缝抗拉试块的缝宽中心区域依然是强度最低的位置, 可以反映横向扩展流动发生的大致范围, 尤其是在低浓度区, 在理想情况下, 双边扩展流动前沿均达到缝宽中心, 而没有发生重叠, 就可以认为树脂的扩展流动距离为缝宽的一半, 在本研究中可以近似认为0.8 mm缝宽接近这种状态, 扩展流动距离约为0.4 mm。

2.2 机械相关影响因素分析

机械相关影响主要包括喷墨过程的影响和喷墨效果的影响。

(1) 喷墨过程影响分析。砂型3D打印的机械喷墨过程可以简化为图5。每铺设一层砂粒, 打印头将选择性喷射一层粘接剂。压电陶瓷打印头很难完美喷射单独的墨滴, 总会在主墨滴后面形成跟随的小墨滴, 称为卫星滴^[11-12], 如图5a1所示。设打印头的运行速度为 v , 由于打印头的运动而导致的主墨滴位置偏差可以通过补偿进行矫正, 但卫星滴的滴落偏差无法避免。不考虑喷射的出口速度, 可以估算出卫星滴所影响的表面粘附层宽度为 $v(2h/g)^{1/2}$, 其中 g 为重力加速度, h 为滴落高度, 最大值为 H 。压电陶瓷打印喷头的墨滴挤出速度大于零, 所以卫星滴所影响的粘附层宽度小于估算值。

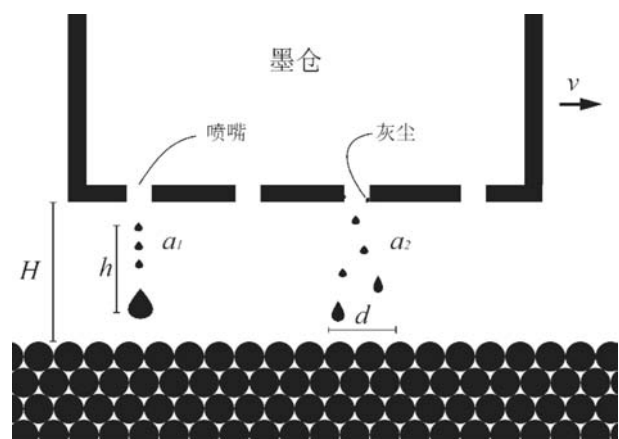
(2) 喷墨质量分析。工业回收处理的型砂含有少量的细小砂粒, 在打印过程中会因树脂的喷射而扬起, 因静电和树脂的原因粘附在喷嘴上, 喷出的墨滴

与粉尘发生交互作用, 运动方向受到干扰, 同时分解成若干细小墨滴, 形成雾化效果, 如图5a2所示。雾化直径 d 与打印头高度 H 成正比, H 越高, d 越大。树脂雾化喷射的原因在于微粒细砂含量高和打印头不能及时得到有效清理。雾化喷射的程度随着打印头的使用时间逐渐恶化, 到一定程度甚至会发生喷孔堵塞, 必须进行拆机清理。

2.3 型砂及其他影响因素分析

砂型/芯的强度越高, 孔隙越大, 扩展流动越容易, 强度衰减的越慢, 表面粘附层越厚。对砂型强度和孔隙率有影响的型砂参数有: 角形系数, 酸耗值和粒度分布。角形是指砂粒的形状, 砂粒越接近球形, 砂粒流动性越好, 砂粒间互相啮合的机会越小, 从而砂粒间隙越大, 有利于扩展流动发生。使用不同粒度组成的砂粒, 可以使小的砂粒填充大砂粒间形成的孔隙, 有利于减小孔隙率, 既可以抑制扩展流动, 也可以提高强度。型砂的酸耗值较高会中和固化剂里的酸, 弱化固化剂的催化效果, 降低砂型整体强度。

型砂中的极小颗粒如微粉、微粒、含泥对砂型/芯的影响有两个方面。一方面, 这些极小颗粒比表面积很大, 会吸附更多树脂, 抑制树脂的扩展流动, 使砂粒不能形成有效的连接, 从而降低砂型的强度。二是喷射的树脂将可能使颗粒扬起, 由于静电或树脂的黏性粘在喷孔边缘, 导致形成图5a2所示的雾化喷射, 导致表面粘附层扩大。



H 为打印头距离砂面的高度, h 为墨滴拖尾高度, v 为打印头移动速度, d 为因灰尘污染堵塞喷嘴导致的雾化喷射直径

图5 3D打印头墨滴喷射(a_1)和喷嘴污染(a_2)对表面粘附层的影响

Fig. 5 Schematic diagram showing adhesive layer affected by ink droplet injection and nozzle pollution

砂粒间的孔隙为树脂的扩展流动提供了通道,但树脂的扩展流动受树脂本身的粘度和树脂与砂粒表面的润湿性控制。在3D生产条件下,砂粒提前预混了固化剂,固化剂为酸性水溶液,对树脂有催化作用,与树脂的浸润性很好,因此树脂的扩展流动主要受树脂本身粘度和在催化剂条件下的硬化速度影响。由于3D打印用树脂必须适配微小孔径的打印喷头(打印喷头孔径约为0.25 mm),3D打印喷头用树脂一般粘度较低,流动性较好,因此流动阻力也小,容易产生表面粘附层。

环境因素的影响主要是打印工作箱内的温/湿度条件和出箱后的车间温/湿度条件。一方面温度越高树脂粘度越低,树脂的硬化越快。湿度的影响主要是因为树脂硬化是脱水反应,湿度高不利于树脂硬化,从而延长扩展流动的时间,使粘附层变厚。所以提高温度,加强空气对流,有利于减少粘附层。

3 机械振动对粘附层的影响

目前,生产车间使用压缩空气清理3D打印砂型的表面粘附层及其他散砂。但在实际操作过程中常有损伤和清理不彻底的问题,急需发展新的清理方法。图6展示了磕碰振动对砂型3D打印试块表面粘附层的影响,其中a为出箱的初始状态,b为经过磕碰振动后的状态。从图6可以看出经过磕碰振动后表面粘附层发生了剥落,说明振动过程有利于去除表面粘附层。

通过振动的方式去除表面粘附层的砂粒实际上是利用了砂粒运动的惯性力。如果给砂型施加高频正弦振动,设砂粒的运动轨迹为:

$$s = a \times \sin(2\pi ht) \quad (2)$$

式中: s 为砂粒位置, h 为振动频率, a 为振幅, t 为时间。

则砂粒的即时加速度为:

$$(d^2s)/(dt^2) = -4\pi^2 ah^2 \sin(2\pi ht) \quad (3)$$

设砂粒为球形,半径为 r ,砂粒密度为 ρ ,则砂粒的质量为:

$$m = (4/3)\pi r^3 \rho \quad (4)$$

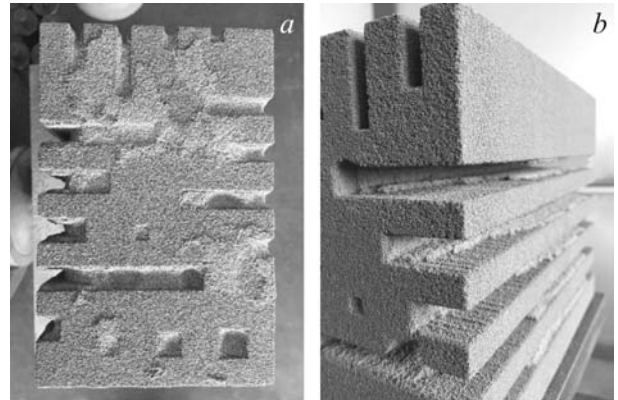
砂粒所受到最大惯性力为:

$$m(d^2s)/(dt^2) = (16/3)\pi^3 \rho ah^2 r^3 \quad (5)$$

由公式(5)可以看出,振动过程的惯性力与振幅成正比,与频率的平方成正比,与砂粒半径的3次方成正比,说明在选定的砂粒粒度条件下,提高振动频率更有利于去除表面粘附层。

4 改进表面粘附层的方法

对于3D打印的砂型,粘附层有其必然性。一方面3D打印使用低粘度树脂,容易发生扩展流动;二是3D



(a) 打印出箱初始状态 (b) 自由落体振动处理状态

图6 振动前后表面粘附层实物图

Fig. 6 3D printed sand blocks before and after shock treatment

打印过程中不存在搅拌,没有直接喷射树脂的砂粒需要通过树脂的扩展流动来实现与周围砂粒的连接,所以表面粘附层无法避免,但必须建立有效的机制进行有效控制,因此建议:

(1) 不要过度增加树脂的用量。获得强度适中且均匀的砂型/芯即可,过度增加树脂量将导致表面粘附层的增加和不必要的浪费;

(2) 应调整喷头的压电特性,尽量减少卫星滴;

(3) 使用粒度分布合理的砂子,建议使用3筛或4筛砂,并尽量减少极小颗粒。

5 结束语

砂型3D打印机使用压电喷头喷出树脂,依赖树脂在砂粒缝隙的扩展流动将砂粒粘合在一起,形成整体砂型/芯。这种扩展流动在打印区/非打印区的分界面同样发生,导致形成表面粘附层。本研究使用含缝“8”字抗拉试块对表面粘附层不同层厚位置的强度进行了评估,发现单边表面粘附层的厚度约为0.4 mm。通过对3D打印砂型/芯表面粘附层的系统分析,得出以下结论:

(1) 因为喷墨的需要,3D打印用的树脂粘度较低,容易发生树脂的扩展流动,导致产生表面粘附层。压电喷头形成的卫星滴和喷头堵塞形成的雾化喷射会扩大表面粘附层的厚度。

(2) 减弱表面粘附层需从降低扩展流动距离,减少扩展流动时间及避免机械相关影响角度考虑。主要包括:选择合理粘度的树脂粘结剂,不要过分增加树脂的用量,应使用三筛砂或四筛砂,应尽力减少型砂中的极小颗粒,应持续优化压电喷头的压电特性。

(3) 对于已经形成粘附层的砂型/芯,可以使用压缩空气去除,但应该建立合适的标准和工艺。通过加热和施加震动有利于去除表面粘附层。

参考文献:

- [1] KANG J, MA Q. The role and impact of 3D printing technologies in casting [J]. *China Foundry*, 2017, 14 (3): 157-168.
- [2] 李少海, 李昭青. 3D打印在铸造技术中应用 [J]. *铸造技术*, 2018, 39 (2): 384-389.
- [3] UPADHYAY M, SIVARUPAN T, EI MANSORI M. 3D printing for rapid sand casting-a review [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 211-220.
- [4] HACKNEY P, WOOLDRIDGE R. Optimisation of additive manufactured sand printed mould material for aluminium castings [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 11: 457-465.
- [5] KANG J W, SHANGGUAN H L, DENG C Y, et al. Additive manufacturing-driven mold design for castings [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 472-478.
- [6] DENG C Y, KANG J W, SHANGGUAN H L, et al. Effects of hollow structures in sand mold manufactured using 3D printing technology [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 516-523.
- [7] SHANGGUAN H L, KANG J W, YI J H, et al. Controlled cooling of an aluminum alloy casting based on 3D printed rib reinforced shell mold [J]. *China Foundry*, 2018, 15 (3): 210-215.
- [8] SAMA S R, WANG J, MANOGHARAN G. Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 34: 765-775.
- [9] SAMA S R, BADAMO T, LYNCH P, et al. Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 25: 563-578.
- [10] 李栋, 唐昆贵, 付龙. 3D打印的气缸盖砂芯 [J]. *铸造*, 2016, 65 (4): 325-328.
- [11] 朱东彬, 楚锐清, 张晓旭, 等. 陶瓷喷墨打印机机理研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53 (13): 108-117.
- [12] 齐乐华, 罗俊, 李莉, 等. 均匀液滴喷射过程仿真与试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44 (12): 86-92.

Evaluation and Analysis on Surface Adhesion of 3D Printed Sand Mold

WANG Hong-tao^{1,2}, GAO Xi-jun², WANG Wei²

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China; 2. National Intelligent Foundry Industry Innovation Center Co., Ltd., Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract:

The adhesive layer at the surface of sand mold/core produced by 3D printing will limit the application of 3D printing to the production of sand mold/core with complex structure and affect the dimensional accuracy of sand mold/core. In the present paper, the adhesive layer thickness is evaluated according to the strength of adhesive layer at different depths by using the "8-shaped" sand block tensile sample with a gap at the middle. Based on the principle of 3D printing, the adhesive layer on the surface of the 3D printing sand mold/core is analyzed in detail. It is found that the viscosity of the resin used in 3D printing is lower than that used in traditional production due to the need of ink-jet, so it easily expand and flow in the interval of sand particles, and the satellite droplets of the injection, and the spray formed by choked nozzle are the main reasons for adhesive layer formation. Therefore, some suggestions were made to avoid the presence of the adhesive layer. For example, choose the resin binder with reasonable viscosity, no use excessively resin, use three or four screen sand to reduce the sand interval, decrease the extreme small particles in sand as far as possible, et al. For the sand mold/core with adhesive layer formed, it is conducive to removal of the surface adhesive layer by heating and applying overall vibration to the sand mold/core.

Key words:

3D printing; casting; sand mold/core; adhesive layer