• 工艺技术 Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.008

激光增材制造技术在铸造中的应用

段国庆,冯 涛,孙建民,唐光东
(北京易加三维科技有限公司,北京 102200)

摘 要:增材制造技术实现了从三维模型数据直接成型实体零件的过程,具有周期短、精度高、零件复杂性的特点。将增材制造技术与铸造相结合,可提高铸件的生产效率、降低成本,扩大铸造工艺的应用领域及发展方向。简介了增材制造的工艺流程及成型原理,并分别阐述了增材制造技术在熔模精密铸造和砂型铸造工艺中的具体流程及实际应用。

关键词:增材制造;熔模铸造;砂型铸造;应用

中图分类号:TG249 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)07-0662-06

Application of Laser Additive Manufacturing Technology in Foundry

DUAN Guoqing, FENG Tao, SUN Jianmin, TANG Guangdong
(Beijing Epluse 3D Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Additive manufacturing technology realizes the process of directly forming solid parts from 3D model data, which has the characteristics of short cycle, high precision and complex parts. The combination of additive manufacturing technology and casting can improve the production efficiency, reduce the cost, and expand the application field and development direction of casting technology. The technological process and forming principle of additive manufacturing are introduced, and the specific process and practical application of additive manufacturing technology in investment casting and sand casting are described respectively.

Key words: additive manufacturing; investment casting; sand casting; application

铸造是材料成型领域中的重要组成部分,与其他成型技术相比,其制备成本相对较低、工艺灵活性较大,能够制备出结构复杂和尺寸较大的铸件[1]。随着现代产品制造业的快速发展,产品更迭间隔缩短,用户需求逐渐趋于个性化、多样化,传统铸造过程中存在的问题逐渐显现出来,铸件成型周期较长,工艺过程较为复杂,零件结构和尺寸的变化对模具的设计、生产形成影响,难以满足市场需求[2]。

增材制造技术亦称快速成型技术或3D打印技术,自问世以来,便以其高效率、高质量、高灵活性、低成本的特点而迅速引起全世界的广泛关注[3]。增材制造技术打破传统制备工艺的束缚,将计算机三维设计、激光技术、新工艺、新材料集于一体,在无模具的条件下直接通过材料逐层堆积的方式制备出各种结构的金属或非金属零件,具有无模具、周期短、降低小批量生产成本、降低制造复杂度等优势[4,5]。将增材制造技术和传统铸造技术相结合,进行优势互补,提高铸造柔性、缩短制备周期、提高生产效率,保证产品品质及精度、确保产品使用性能、实现单件小批量生产,对于现代铸造行业的发展与改革具有重要的意义[6]。本文将简介增材制造技术的特点及工艺流程,并在此基础上探讨增材制造技术在铸造行业中的应用,尤其是快速熔模精密铸造和快速砂型铸造的工艺及应用。

1 激光增材制造技术

实体CAD软件的快速普及,激光及新材料、新工艺等技术的飞速发展,为增材制造工艺的发展和应用奠定了基础,不仅有效保证了增材制造广泛的材料来源、较高的材料利用率,而且可加工任意结构复杂、无需拔模斜度、产品品质及性能优良的零件,广泛应用于航空航天、船舶、汽车、建筑、医疗器械等领域[7]。

增材制造基于离散-堆积原理,将三维数据转换成二维剖面,进而将剖面逐层堆叠成三维实体零件的过程,其成型工艺流程如图1所示。首先利用切片软件将三维实体数据进行切片分层处理,生成指定高度的分层轮廓截面数据,然后将该数据导入成型机软件控制系统中,在成型过程中,借助激光对粉末

收稿日期:2019-03-13
作者简介:段国庆(1978-),河北廊坊人,工程师.主要从事SLS和SLM打印工艺及其应用方面的工作.
电话:010-80734828,E-mail:duanguoqing@eplus3d.com

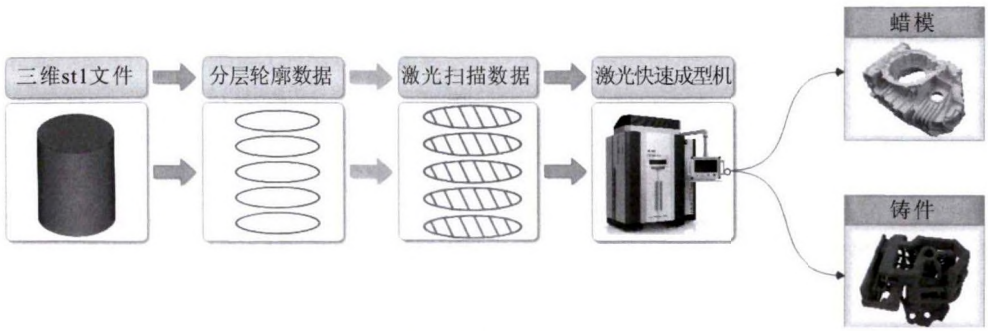


图 1 激光增材制造工艺流程
Fig.1 Laser additive manufacturing process

层的烧结，铺一层粉末，“打印”一个截面，形成一定厚度的片层，然后铺新一层粉末，打印出新一层截面，如此反复层层堆叠，最终获得完整零件。目前，增材制造技术已经包含多种形式，如立体光固化(SLA)、选区激光熔融 (SLM)、选区激光烧结(SLS)、熔融堆积(FDM)、三维喷墨打印(3DP)等。

2 激光增材制造在熔模精密铸造中的应用

熔模制造技术的精度高、操作便捷、重复性好，是零件制备工艺的重要组成部分，但精密铸造需要使用模具，同时受到铸件结构和尺寸的影响，铸造的铸件耗时数周甚至数月，增加了铸件的应用成本。增材制造技术的引入可省略模具制造这一步骤，可直接获得涂挂性能优异的精密蜡模，再结合传统铸造工艺，便捷快速的制备出零件，实现了铸造的高精度、高品质、低成本、短周期的生产目标。

2.1 快速熔模精密铸造

增材制造技术与熔模精密铸造工艺的结合形成了快速熔模精密铸造技术，其主要工艺流程如图 2 所示，首先利用激光增材制造技术制备出铸造用的蜡模，将蜡模沾浆、挂砂处理，再经焙烧和脱蜡获得型壳，最后进行浇注、脱模得到铸件[8]。

2.1.1 快速熔模精密铸造蜡模

(1)数据处理　使用 3D CAD 软件设计出三维立体图形，并借助相关修复软件(如：Magics RP)对模型中存在的坏边、孔洞等缺陷进行自动修复或手动修复；同时为减轻蜡模的模重，提高原材料的利用率，需要对模型进行镂空处理，工艺上综合考虑结构强度等因素的影响，控制蜡模的镂空壁厚 10 mm，最小壁厚 5 mm；对于蜡模尺寸偏大无法一次烧结成型时需进行分割，将模型分块烧结；最后对模型进行切片处理，得到指定厚度的轮廓截面数据，切片工艺直接影响着蜡模的尺寸稳定性、表面光洁度及生产效率，因此制定切片工艺时，既要满足设计文件的要求，又要在兼顾品质和效益前提下确定切片的工艺参数。一般选择的层厚参数为 0.1~0.3 mm，扫描间距选择 0.2~0.5 mm。

(2)打印　将处理好的数据导入打印设备中，并在工作台上准备好均匀铺放的粉末材料，激光束按照指定路径照射，粉末熔融凝固成型，打印出一个截面，形成一定厚度的片层，打印好一层后，铺一层新粉末，再打印新一层截面，如此反复堆叠，最终获得所需蜡模，具体设备运行原理如图 3 所示。

(3)浸蜡　浸蜡是增材制造蜡模的后处理工序，主要目的是提高蜡模表面品质和与涂料的粘接

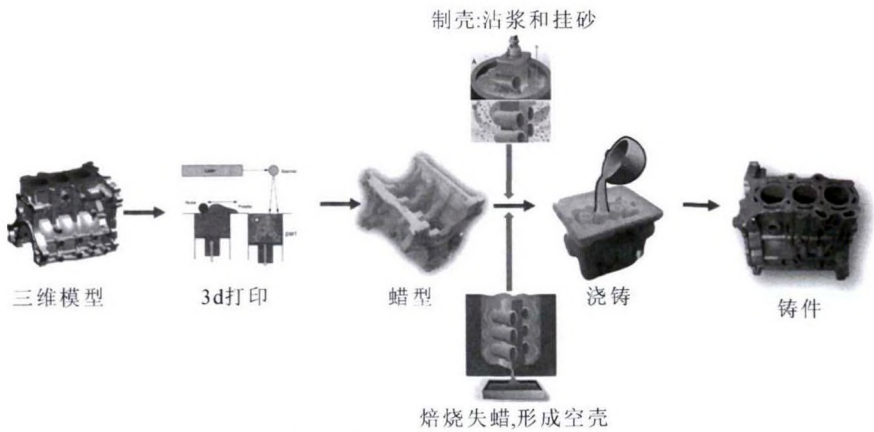


图 2 快速熔模铸造工艺流程
Fig.2 Process flow of rapid investment casting

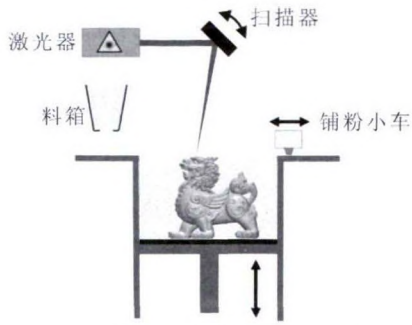


图 3 激光粉末烧结成型原理
Fig.3 Principle of Selective Laser Sintering

性，提高铸件表面品质，同时阻止蜡型与某些涂料的化学反应。该工序的原理是将烧结好的蜡模浸入到一定温度的液态蜡中，保持一定的时间，使蜡料能够充分浸入到蜡型的微小间隙中，然后用从粗到细的砂纸进行仔细打磨，从而获得表面品质优良的蜡模。

2.1.2 涂壳、脱模和浇注

(1)涂壳　用无机粘结剂与一定细度的二氧化硅粉及助剂混为一定粘度的刷涂浆料，将蜡模沉入浆料中挂浆，要求挂浆完成均匀，然后在表面撒砂，阴干。重复以上过程，8~12 次，除第 1 层外，逐层撒砂加工，制壳完成后，应阴干 24 h。通常制成的型壳类型有硅溶胶型壳和水玻璃型壳。

(2)脱模　脱模是在制壳工序之后进行，脱模曾经是制约增材制造技术在熔模精密铸造行业广泛应用的主要影响因素，但随着新型材料的研制出现，该问题已基本得到解决。选用研制的新型混合材料(分解温度仅为 260 ℃)，辅以一定数量的通气孔和集渣器，防止胀壳损坏模壳，再经过高温焙烧(800~950 ℃)即可彻底去除蜡模，且在增材制造蜡模焙烧后，灰粉残留远小于 0.05%。

(3)浇注及后处理　依据不同种类合金及零件的相关要求，选择不同浇注方式，如重力浇注、真空吸铸、压力罐中浇注等。浇注后进行冷却，最后经过后处理得到最终的铸件。

2.2 应用实例

与传统熔模制备工艺相比，快速熔模精密铸造无需模具，省略开模环节，不受零件结构复杂程度影响，可以打印出蜡模并通过蜡型直接铸造，不仅节约成本、节省时间，也提高了铸件的质量及性能，生产的铸件已成功应用于航空、航天、汽车等各个领域。

图 4 是激光增材制造设备生产的某大型机匣蜡模，其净轮廓尺寸长宽均超过 1 m，支板为变截面，最小壁厚 2 mm。采用常规的工艺方法生产时，需要进行模具的设计、制造或修改，该过程周期较长，不仅影响研制进度，而且增加制备成本。为此，北京易加三维科技有限公司采用自主研发的增材制造设备(图 5)直接生产出相应的蜡模应用于熔模精密铸造工艺，快速铸造出铸件，该种方法避免了设计更改和铸造参数的修改(例如铸造收缩率)所带来的模具和工装报废的弊端。

图 4 大型机匣增材制造蜡模
Fig.4 Mainframe casting additive manufacturing wax mold

图 5 增材制造设备
Fig.5 Additive manufacturing equipment

此外，应用快速熔模精密铸造技术还制备出汽车变速箱壳体、发动机缸体缸盖、油底壳、离合器壳体等部件。图 6 所示为汽车变速箱壳体蜡模及最终

(a)变速箱壳体蜡模

(b)铸铝件

图 6 变速箱蜡模及铸件
Fig.6 Wax mold and casting of Gear-box

铸件，变速箱内部结构复杂，质量要求较高，选择合理的制备工艺对于产品的生产至关重要，增材制造中 SLS 成型工艺可以在短时间内制备出铸造蜡模，图 6(a)中变速箱蜡模成型时间为 18 h，大大节省了产品试制、改进的周期。

3 快速砂型铸造

3.1 快速砂型铸造

快速砂型铸造是增材制造技术与传统砂型铸造相结合形成的新型铸造技术，所制备的铸件满足零件的相关性能。传统复杂的零件铸造，由于需要将砂芯分割成几块甚至几十块小砂芯，再设计制造相同数量的模具，从而造成砂芯制造费时、费力、拼接后砂芯整体精度差等问题。快速砂型铸造避免了反复设计及制造模具的过程，其流程比传统砂型铸造的流程大大缩短，且任意复杂形状的砂芯均可一次成型，同时快速砂型铸造的精度高、成型速度快，砂芯精度达到±0.2 mm[9,10]。通过优化设计的金属铸件，能大幅度提高铸件性能，从而有可能改变砂型铸造行业生产高质量铸件的潜力[11]。

砂芯增材制造铸件的制备流程如图 7 所示，利用计算机设计出需要进行铸造的三维模型，包括浇冒口系统、反变形量、补贴、缩尺等多思路的设计，然后利用铸造 CAE 软件对充型、凝固进行模拟，预测可能存在的卷气、冲砂、冷隔、应力集中、变形过大等缺陷，从而进一步优化结果，形成最佳的工艺方案。

获得最佳工艺后，将相应数据在打印设备上进行砂芯、外模的激光烧结成型。成型后的砂模经过清砂处理后，需要进行烘烤固化。由于砂模成型后，强度只能达到 0.75 MPa，不足以进行砂型铸造，因此要进行二次固化。由于在成型过程中，砂子之间只有经过激光扫描的位置才有连接的强度，而未扫描的位置，基本没有强度，成型后砂芯的强度不足以进行砂型铸造，因此要进行二次固化。若砂模的结构中无悬空构造，可以连同取件板直接放到烘箱中，温度为180 ℃，时间为 1~5 h，砂型越大，时间越长。若砂型有悬空构造，将砂型放置到固化箱体中，用直径 1~2 mm 的玻璃珠填埋后放到烘箱中，温度在 160~200 ℃，时间为 7~13 h，箱体越大，玻璃珠填埋越多，时间越长。对于体积大，内部构造复杂的芯体，易出现固化不完全的现象，可以去除玻璃珠后放到烘箱中再次固化，温度为 180 ℃，时间为 0.5~3.0 h。

获得砂型砂芯后，进行组芯形成铸型，再将达到要求的金属液浇入铸型，待冷却凝固后得到铸件。以易加三维制备缸体缸盖为例，缸体采用 HT250 进行感应炉熔化重力浇注，浇注温度 1 400 ℃到 1 430 ℃，浇注时间 20 s，采用较高的浇注温度，可加速发气，使砂型砂芯发的气及时排出。缸盖采用 ZL110 进行浇注，电阻炉熔化重力浇注，浇注温度 730 ℃。最后将经过后处理的铸件毛坯进行内外部质量、关键尺寸的检测，以得到质量完全满足要求的铸件。

3.2 应用实例

与传统铸造技术相比，增材制造技术应用于砂型铸造，获得尺寸精度较高、结构复杂、铸件质量好、生产周期短的砂型铸造方式，而且降低了铸造成本，

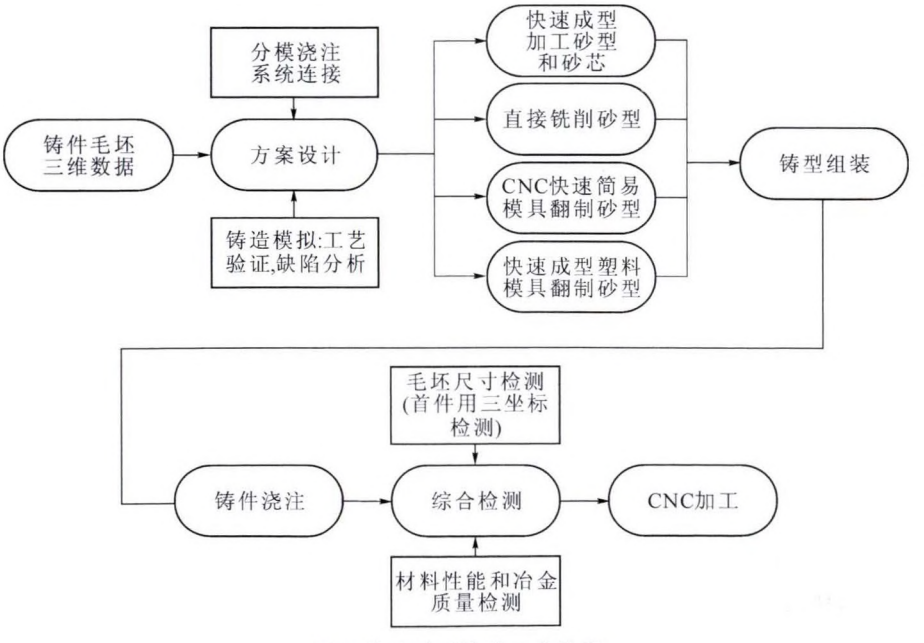
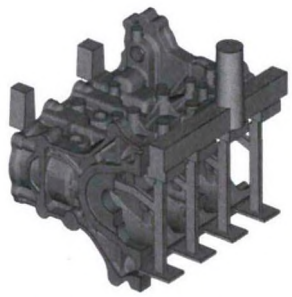


图 7 快速砂型铸造工艺流程

Fig.7 Process flow of rapid sand casting

获得的铸件在实际中得到广泛应用。

目前快速砂型铸造技术的应用已经逐渐成熟，应用范围越来越广。以铸铁缸体为例，首先设计出铸造工艺，然后进行铸造模拟，将模型进行 CAD 分型，经过 SLS 增材制造制备出砂型和砂芯后，浇注成合格的铸铁毛坯，其流程如图 8 所示。从设计到铸造两件缸体铸造毛坯仅需 25 天，大大缩短了制造周期，降低了生产成本，且浇铸的缸体满足产品的技术要求，虽然其浇注温度较高，但是无疏松、脉纹等缺陷产生，断芯的几率在 5% 以下。图 9 是缸盖砂芯装配，铸铝缸盖的试制周期更短，仅需要 12 天就可以成功获得 2 件铸铝缸盖毛坯。图 10 为液压阀内芯结构，其结构较为复杂，传统工艺需要多块砂芯，而应用 SLS 增材制造技术，内芯整体烧结，精度大大提高，也简化组芯过程，提高了生产效率。



(a)带浇注系统的三维模型

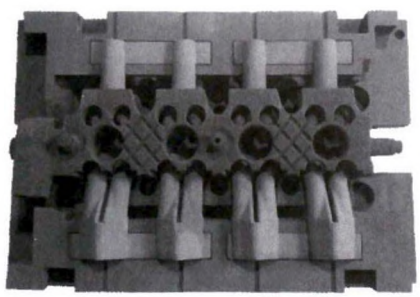
(b)分型

(c)组模

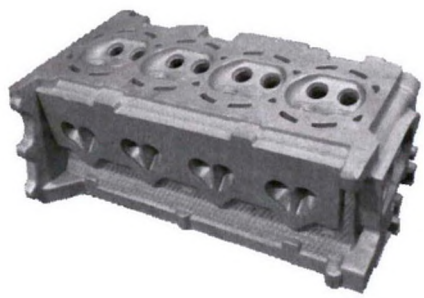
(d)灰铁缸体

图 8 铸铁缸体制备流程

Fig.8 Preparation process of cast iron cylinder



(a)缸盖砂芯



(b)缸盖铸件

图 9 缸盖

Fig.9 Cylinder head

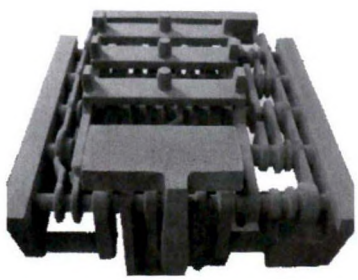


图 10 液压阀内芯

Fig.10 Inner core of hydraulic valve

4 结论

增材制造技术与铸造工艺的相互结合，不仅提高铸造过程中材料的利用率，降低由于工装投入、制造及返修带来的加工成本，缩短研制周期，加快生产效率，同时也为增材制造技术打开了新的发展方向。二者优势互补，快速铸造技术的发展进一步增加了铸造行业生产高质量铸件的潜力，使得快速铸造制

（下转第 670 页）

[8] B Feng, Y Xin, R Hong, et al. The effect of architecture on the mechanical properties of Mg-3Al-1Zn Rods Containing Hard Al Alloy Cores [J]. Scripta Materialia, 2015(98): 56-59.

[9] B Feng, Y Xin, Z Sun, et al. On the rule of mixtures for bimetal composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 704: 173-180.

[10] B Feng, Y Xin, H Yu, et al. Mechanical behavior of a Mg/Al composite rod containing a soft Mg sleeve and an ultra hard Al core [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016(675): 204-211.

[11] B Xiong, C Cai, H Wan, et al. Fabrication of high chromium cast iron and medium carbon steel bimetal by liquid - solid casting in electromagnetic induction field [J]. Materials & Design, 2011(32): 2978-2982.

[12] G Xie, H Sheng, J Han, et al. Fabrication of high chromium cast iron/low carbon steel composite material by cast and hot rolling process [J]. Materials & Design, 2010(31): 3062-3066.

[13] S Rong, H Zhou, R Zhu, et al. Study on liquid-liquid bimetal composite casting hammers [J]. China Foundry, 2014(11): 412-417.

[14] 吴振卿，王赞斌，侯成东，等. 高铬铸铁-低合金钢双金属复合锤头的研制[J]. 矿山机械, 2009(3)60-62.

[15] 李远扬，陈维平，郑开宏，等. 机械振动对双金属复合铸造行为的影响[J]. 铸造技术, 2017, 38(92): 377-381.

[16] 郭莹. 双金属锤头复合铸造工艺研究 [J]. 铸造技术, 2011, 33(12):1224-1226.

[17] 刘清梅，吴振卿，关绍康. 双金属复合锤头界面结合性能的研究[J]. 热加工工艺, 2003(1):12-14.

[18] 程巨强，贾劭冲，刘志学，等. 液-液复合铸造锤头组织和性能的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2014(3):640-643.

(上接第 666 页)

备的铸件得到广泛应用，为航空航天和汽车部件的研制提供了基本保障，也为大型复杂、高要求零部件的研制生产开辟了新的途径，经济效益显著提高，同时还具有深远的社会效益。

参考文献：

[1] 夏建强，常峰，李雨. 选择性激光烧结技术在熔模铸造中的应用[J]. 铸造技术，2017，38(5):270-272.

[2] 杨锌，边毅，孙建新，等. 基于 3D 技术的快速砂型铸造新模式[J]. 特种铸造及有色合金，2017，37(11):73-75.

[3] 周宸宇，罗岚，刘勇，等. 金属增材制造技术的研究现状[J]. 热加工工艺，2018，47(6): 9-14.

[4] 陶攀，李怀学，许庆彦. 激光选区熔化工艺过程数值模拟的国内外研究现状[J]. 铸造，2017，66(7):695-701.

[5] 杨平华，高祥熙，梁菁，等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. 材料工程，2017，45(9):13-21.

[6] 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.

[7] 田国强，鲁中良，李涤尘. 基于增材制造技术的复杂结构模具数字化制造方法[J]. 航空制造技术，2014，453(9):38-41.

[8] 段望春，高佳佳，董兵斌，等. 3D 打印技术在金属铸造领域的研究现状与展望[J]. 铸造技术，2018，39(12):2895-2900.

[9] Hawaldar N, Zhang J. A comparative study of fabrication of sand casting mold using additive manufacturing and conventional process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4):1037-1045.

[10] Almaghariz E S, Conner B P, Lenner L, et al. Quantifying the role of part design complexity in using 3D sand printing for molds and cores [J]. International Journal of Metalcasting, 2016, 10 (3): 240-252.

[11] Reddy S S, Jiayi W, Guha M. Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018(34):765-775.

技术资料邮购

《铸造抗磨产品实用生产技术集》

《铸造抗磨产品实用生产技术集》本书由李德臣教授级高工编著。 共8章： 1、关于锰钢生产技术；2、球墨铸铁与蠕墨铸铁生产技术；3、抗磨产品生产技术；4、锤头生产技术；5、消失模、V法生产技术；6、典型铸件的生产技术；7、还原罐生产技术；8、关于企业管理。全书22万字。特快专递邮购价：98元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071