

文章编号 1004-924X(2013)05-1222-06

激光选区烧结及其在精密制造业中的应用

李小飞¹, 朱东彬², 董俊慧^{1*}

(1. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

摘要:研究了快速、精确制造金属模具的方法,提出利用激光选区烧结(SLS)技术来快速制造高精度陶瓷型精密铸造用母模。首先,采用正交试验法研究了激光选区烧结工艺参数对制件精度的影响,确定了最佳激光烧结工艺。在此基础上利用浸水起模法替代传统的起模喷烧工艺对陶瓷型精密铸造工艺进行改进。结果表明,选定激光烧结工艺参数为激光功率 25 W,扫描速度 2.0 m/s,扫描间距 0.19 mm,分层厚度 0.25 mm 时,试样尺寸收缩率最低可达 2%。采用陶瓷型浸水起模法起模容易,起模后陶瓷型表面光洁,在 200 °C 焙烧温度下抗弯强度较高,为 0.361 MPa。这些结果表明,利用 SLS 技术能够快速、准确地制造出陶瓷型精密铸造所需母模。

关键词:激光选区烧结;快速成形;尺寸收缩率;陶瓷型精密铸造;浸水工艺

中图分类号:TG156.99 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1222

Selective laser sintering and its application to precision casting process for ceramic models

LI Xiao-fei¹, ZHU Dong-bin², DONG Jun-hui^{1*}

(1. College of Material Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

* Corresponding author, E-mail: jhdong1009@163.com

Abstract: Rapid prototyping technology for producing quickly and precisely metal molds is explored, and the Selective Laser Sintering (SLS) is used to produce a high precision ceramic mold for precision manufacturing. On the basis of orthogonal test and range analysis, the effects of process parameters of SLS, including laser power, scan speed, scan spacing and layer thickness, on the dimensional accuracy of machining work-pieces are discussed and then the optimum parameters are determined. The founder technique is used to replace the traditional removal of organic binders and to improve the precision manufacturing for the ceramic mold. The results show that the shrinkage of the work-piece size is 2% under the conditions of the laser power of 25 W, scan speed of 2.0 m/s with a scan spacing of 0.19 mm and the layer thickness of 0.25 mm. As the ceramic molding founder technique strips easily and the ceramics after stripping has a smooth surface, its tensile strength has been 0.361 MPa in 200 °C roast. These data indicate that the combination of ceramic molding and precision casting has the potential to produce rapid and precise castings.

Key words: Selective Laser Sintering (SLS); rapid prototyping; shrinkage; ceramic model precision casting; founder

收稿日期:2013-01-21;修订日期:2013-02-22.

基金项目:内蒙古工业大学科学研究项目(No. X200923);河北省教育厅资助项目(No. 20111127)

1 引言

快速成型技术是20世纪80年代后期发展起来的一种新型制造技术,它综合了计算机辅助设计、计算机辅助制造、检测、激光、新材料以及精密伺服等多项先进技术^[1]。传统的成型方法有去除成型、添加成型、受迫成型及生长成型,而快速成型技术(Rapid Prototyping, RP)是一种突破传统成型方法的新方法,该方法提出了一个全新的成型原理——离散/堆积成型,即任何三维零件都可看成是许多二维平面沿某一坐标方向的叠加^[2]。离散/堆积成型可以快速制造任意复杂形状的零件,在机械^[3]、电子、航空^[4]、生物医学^[5-6]、汽车等许多领域得到了广泛应用。

选择性激光烧结(Selective Laser sintering, SLS)是快速原型技术之一。该技术采用固体粉末如塑料、蜡、陶瓷、覆膜金属等作为烧结成型材料。根据原型的模型切片信息,利用计算机控制激光逐层烧结。层层叠加后,最终形成所需的原型或零件。选择性激光烧结以其成型材料广泛且无浪费、安全无污染以及可快速制造出复杂原型件等优点,在快速成型技术中占有重要地位。

目前,国内外学者对于SLS技术的研究主要集中在烧结金属复合粉末和激光熔化金属^[7-8]等金属直接成型技术上。国外A. I. Kovalev烧结的钢粉(3.0% C, 3.0% Cr, 1.0% Si, 12.0% V, 剩余Fe),孔隙率不超过5%,平均硬度值为HV825^[9]。除此之外,Fe-Cu-Ni-C、, Ti-AL-V、WC-Co、Mo系高速钢等众多合金材料也被研究和开发,用于激光烧结成型^[10-14]。北京工业大学激光工程研究院张冬云采用区域选择激光熔化法研究了不同参数对AlSi25, AlSi10Mg, AlMgSi0.5, AlMg3 4种合金材料试样性能的影响。利用最佳加工参数制作了AlSi10Mg合金拉伸试样,其抗拉强度为400 MPa、屈服强度为200 MPa,延伸率达到13%^[15]。但金属直接成型技术还有许多不完善之处,故得到的制件致密度、强度和表面粗糙度仍难以满足实际使用要求。

精密铸造是金属特种铸造工艺之一,它能为复杂形状金属零件的大规模生产提供一种比较经济的方法,这些金属零件很难使用其它成型方法来生产。然而,精密铸造所需模具的制造费用高、

生产周期长,尤其是制造单个或批量不大的大型零件时,其铸造模具的生产成本更高。而快速成型技术具有高柔性、快速性,可以制造任意复杂的三维几何实体,并且还有将提取材料过程与制造过程一体化以及设计与制造一体化的特点,因此,将精密铸造与RP技术相结合的快速模具技术能有效地解决以上问题。

本文采用SLS技术制造陶瓷型精密铸造用母模,利用水煮起模工艺代替传统的起模点火喷烧,不仅保证SLS模具的可持续使用,而且使得到的陶瓷型表面质量良好、强度较高。

2 SLS制作母模

SLS工艺原理是借助精确引导的激光束使材料粉末烧结或熔融后凝固形成三维原型或制件。SLS材料应用面广,不仅能制造塑料零件,还能制造陶瓷、蜡、金属等材料的零部件,是目前国内外应用比较广泛的一种RP技术,其工艺流程如图1所示。

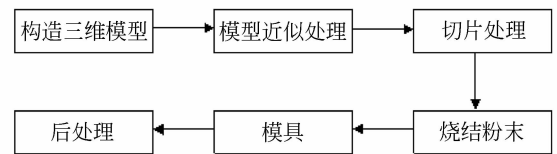


图1 选域激光烧结工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of selective laser sintering technology

SLS工艺可以直接或间接制模。直接制模可以将陶瓷、树脂以及金属粉末直接烧结成模具,但制件易变形,后处理较难。间接制模又称快速制模,是将SLS与精密铸造相结合的一种制模方法。文中利用SLS工艺将聚苯乙烯(PS)粉烧结,维卡软化点为90℃,玻璃化温度为100℃。烧结所得制件经过浸蜡后可作为陶瓷型铸造的母模。

2.1 SLS烧结工艺

影响SLS制件尺寸精度的参数有许多,其中扫描功率、扫描速度、扫描间距、分层厚度对制件尺寸精度的影响较其它参数更显著一些。为了获得合理的烧结参数,减少制件尺寸误差,采用正交试验法烧结试样,试验方案见表1。试验结果见表2。

表 1 因素水平表

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experiments

| 水平 | 因 素 | | | |
|----|--------------|------------------------------|---------------|--------------|
| | A 激光 功率/W | B 扫描速 度/ $m \cdot s^{-1}$ | C 扫描间 距/mm | D 分层 度/mm |
| 1 | 25 | 1.4 | 0.13 | 0.15 |
| 2 | 26.5 | 1.7 | 0.16 | 0.20 |
| 3 | 28 | 2.0 | 0.19 | 0.25 |

表 2 正交试验结果

Tab. 2 Results of orthogonal experiments

| 试验 编号 | 激光 功率/ W | 扫描 速度/ $m \cdot s^{-1}$ | 扫描 间距/ mm | 分层 厚度/ mm | 尺寸/ mm | 收缩 率/% |
|----------|----------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|
| 1 | 25 | 1.4 | 0.13 | 0.15 | 9.46 | 5.4 |
| 2 | 25 | 1.7 | 0.16 | 0.20 | 9.66 | 3.4 |
| 3 | 25 | 2.0 | 0.19 | 0.25 | 9.8 | 2 |
| 4 | 26.5 | 1.4 | 0.16 | 0.25 | 9.58 | 4.2 |
| 5 | 26.5 | 1.7 | 0.19 | 0.15 | 9.42 | 5.8 |
| 6 | 26.5 | 2.0 | 0.13 | 0.20 | 9.52 | 4.8 |
| 7 | 28 | 1.4 | 0.19 | 0.20 | 9.53 | 4.7 |
| 8 | 28 | 1.7 | 0.13 | 0.25 | 9.63 | 3.7 |
| 9 | 28 | 2.0 | 0.16 | 0.15 | 9.49 | 5.1 |

对正交试验尺寸收缩率做极差分析,见表 3。

从表 3 可知,四因素对试样尺寸收缩率影响的主次顺序为分层厚度 > 激光功率 > 扫描速度 > 扫描间距。得出的最佳工艺参数如下:激光功率为 25 W;扫描速度为 2.0 m/s;扫描间距为 0.19 mm;分层厚度为 0.25 mm。由此得到的制件尺寸精度为 1 级。

表 3 收缩率的极差分析

Tab. 3 Range analysis of shrinkage

| 因素 | A | B | C | D |
|-------|------|------|------|------|
| K_1 | 10.8 | 14.3 | 13.9 | 16.3 |
| K_2 | 14.8 | 12.9 | 12.7 | 12.9 |
| K_3 | 13.5 | 11.9 | 12.5 | 9.9 |
| k_1 | 3.6 | 4.8 | 4.6 | 5.4 |
| k_2 | 4.9 | 4.3 | 4.2 | 4.3 |
| k_3 | 4.5 | 4.0 | 4.2 | 3.3 |
| R | 1.3 | 0.8 | 0.4 | 2.1 |

2.2 后处理

PS 粉经过激光选区烧结后形成的制件空隙较多,为了进一步提高制件的力学性能、降低表面粗糙度,采用渗蜡方式对制件进行后处理,以便满足陶瓷型铸造的要求。第一次渗蜡蜡温为 80 °C,渗蜡时间为 30 s。第二次渗蜡蜡温为 60 °C,渗蜡时间为 3 s。经过 2 次渗蜡,原型件强度增加,粗糙度降低,且在原型件表面均匀地覆盖一层约为 0.02 mm 的蜡层,原型件和渗蜡件分别如图 2、图 3 所示。因渗蜡而使原型件增加的尺寸可以在 SLS 工艺收缩补偿系数中得到补偿。

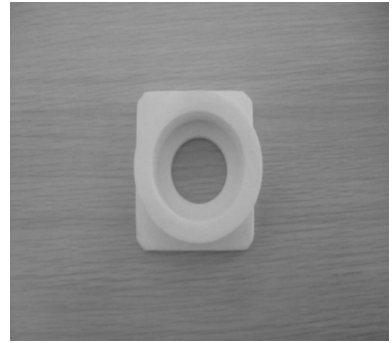


图 2 SLS 原型件

Fig. 2 SLS Prototype

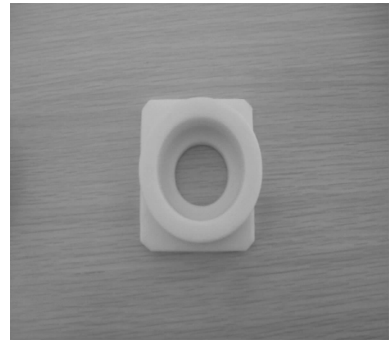


图 3 SLS 渗蜡件

Fig. 3 SLS post-processed with wax

3 陶瓷型精密铸造工艺

陶瓷型精密铸造工艺可适用于多种铸件的生产,如锻压、冲压用模具以及镶块铸件、压铸模零件、注塑模、玻璃模、铸造型板和芯盒等各种机器零件和配件等。陶瓷型精铸模具尺寸精度高,粗糙度低,可使模具机加工减少 40%~70%,缩短了生产周期,降低了制造成本,适合中小批量及单

件生产。

陶瓷型铸造所用黏结剂硅酸乙酯必须经过水解才具有黏结作用,即需要加入稀释的盐酸酒精水溶液。这使得酯分子中大部分原子团都改变成羧基团,并使有机硅酸变成无机硅酸溶胶,再在硅酸溶胶中加入硬化剂使之胶凝。这时羧基团凝缩成硅氧烷,形成一种硅网,使铸型硬化。

3.1 水解工艺

水解时确定加水量是制备水解液的关键问题,它决定水解液的质量和铸型的质量。试验用硅酸乙酯为 Si40,采用加水量和水解后 SiO₂ 含量的摩尔比值 M 来计算加水量。由于北方气候干燥,试验中 M 取 0.75。为了获得足够强度的陶瓷型浆料,水解后 SiO₂ 含量定为 18%。经计算得到硅酸乙酯水解液配比如表 4 所示。水解液需搅拌 1 h 并放置 24 h 后使用。

表 4 硅酸乙酯水解液组成的体积分数对比

Tab. 4 Volume fraction comparison of hydrolysis solution for ethyl silicate

| 硅酸乙酯 | 蒸馏水 | 酒精 | 盐酸 |
|------|------|-------|------|
| 37% | 3.8% | 58.6% | 0.6% |

3.2 粉液比对陶瓷型浆料性能的影响

粉液比(g/ml)为单位体积水解液中加入的耐火材料的质量,粉液比越高,陶瓷型浆料的强度也越高。在保证浆料流动性的前提下,要尽可能地增加耐火材料的加入量。本实验选择的粉液比为 2.3 : 1,既保证了浆料具有优良的流动性,又具有合适的强度。

3.3 浆料配置工艺

陶瓷型浆料的耐火材料常用 3、4 种粉砂搭配而成。增加细粉量可以提高陶瓷型浆料强度,但会使透气性有所降低且陶瓷型容易出现大的裂纹。因此,应合理选择耐火材料配比是保证陶瓷型浆料质量的一个条件。本文采用石英砂作耐火材料,其组分为 30 目 : 100 目 : 270 目 = 20 : 35 : 45,这样,陶瓷型浆料强度较高,可达到 0.2 MPa,且表面较光洁。

3.4 硬化工艺

硬化剂的量会影响陶瓷型浆料的胶凝时间,为了更好地控制陶瓷型浆料的胶凝时间,采用三乙醇胺作为硬化剂,pH 值为 9,每毫升水解液中

加入 2 ml 三乙醇胺。加入浆料后 pH 值为 6,胶凝时间为 10 min。

3.5 起模及焙烧工艺

为了避免陶瓷型浆料自然干燥所造成的大裂纹,陶瓷型浆料一般要在弹塑性阶段起模,起模后立即对铸型进行点火喷烧。喷烧会使铸型表面迅速硬化,减少铸型变形,但由于喷烧会使铸型内大量的有机物燃烧,形成一定的热应力,再加上硅胶收缩产生的内应力,使喷烧后陶瓷铸型的表面仍然会有一些细小裂纹,这样就增加了铸型的表面粗糙度。为此,采用水煮陶瓷型工艺来获得表面光洁的陶瓷型铸件。灌浆 3 min 后将处于弹塑性阶段的陶瓷型铸件与母模放入 80 °C 的水中,浸泡 10 min,陶瓷型表面硬化。再放入 80 °C 烘干炉中保温 1 h 后起模。母模浸蜡后会在表层形成一层极薄的蜡层,在 80 °C 烘干时溶化并渗入到陶瓷型铸件中,因此母模与陶瓷型铸件之间形成空隙,便于起模。起模后陶瓷型铸件表面光洁,无明显裂纹,见图 4。



图 4 起模后的陶瓷型

Fig. 4 Ceramic mold after stripping

对点火喷烧后的陶瓷型铸件与浸水的陶瓷型铸件进行差热分析,结果如图 5、图 6 所示。

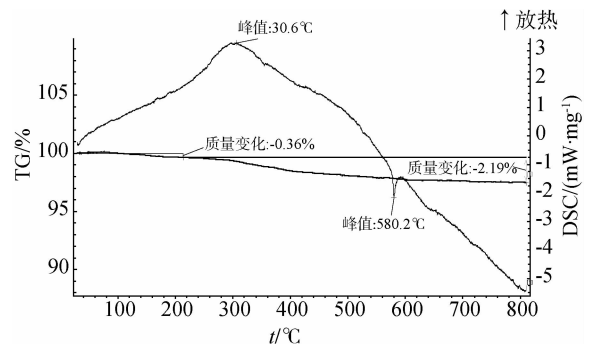


图 5 点火后试样差热分析

Fig. 5 Differential thermal analysis of sample after ignition

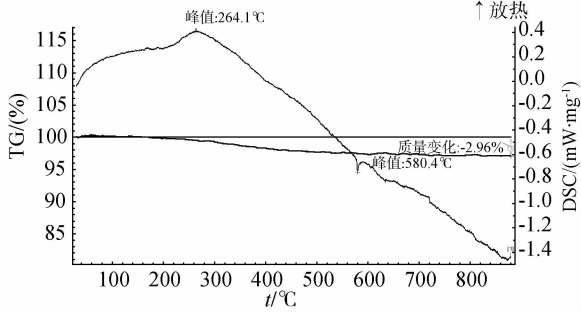


图 6 水煮后试样差热分析

Fig. 6 Differential thermal analysis of boiled sample

由图 5、6 可以看出:在低于 300 °C 时点火试样是放热反应,达到 300 °C 后放热减缓,在 306.6 °C 时放热值最高达到 3.5 mW/mg。而水煮试样则在 264.1 °C 时放热量最大,最高点为 0.42 mW/mg。放热反应主要是由于水合无定形状态的硅酸转变成晶体状的二氧化硅,以及陶瓷型铸件内残余有机物燃烧所致,由放热峰值可以看出浸水试样内剩余有机物和酒精量较少,所以放出的热量较少。因此,水煮工艺在陶瓷型铸件焙烧前期的处理要优于点火工艺。

浸水工艺在 264 °C 有一个波峰,说明陶瓷型中的有机物、乙醇和水已经大部分失去,硅酸凝胶和无机硅聚物脱水并最后完成体型结构,使得陶瓷型试样强度提高。通过测量,两种试样的重量变化基本一致,说明水煮后陶瓷型里的有机物被水替代。

陶瓷型起模后仍会有残留的有机物与水分存在,需要进行焙烧。焙烧过程不会产生烧结现象,

但是陶瓷颗粒间的接触程度增加,可以增大陶瓷型铸件的强度。

表 5 试样焙烧后的抗弯强度

Tab. 5 Bending strength of roast samples

| 温度/°C | 100 | 200 | 300 | 400 | 600 | |
|--------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 抗弯强度 / (MPa) | 浸水 | 0.287 | 0.361 | 0.346 | 0.277 | 0.317 |
| | 点火 | 0.298 | 0.232 | 0.308 | 0.338 | 0.299 |

制作长、宽、高为 40 mm×20 mm×6 mm 的陶瓷型小试样,分别进行浸水与点火处理后焙烧。取焙烧温度为 100、200、300、400、600 °C,保温 0.5 h 后随炉冷却至室温,测量其抗弯强度,结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,浸水试样在焙烧温度为 200 °C 时强度最高,且高于点火试样的焙烧强度。这显然是由于浸水陶瓷试样没有出现裂纹,故试样强度有所提高。

4 结 论

本文利用 SLS 技术制造了陶瓷型精密铸造用母模,SLS 烧结工艺参数如下:激光功率为 25 W,扫描速度为 2.0 m/s,扫描间距为 0.19 mm,分层厚度为 0.25 mm,此时试样尺寸收缩率为 2%,由此得到的制件尺寸精度为 1 级。陶瓷铸型采用浸水法后 200 °C 焙烧未出现裂纹,且强度最高,达到 0.361 MPa。实验显示,利用 SLS 技术能够快速、精确地制造出陶瓷型精密铸造所需母模。

参考文献:

- [1] 董未名,严冬明,周登文,等.基于 CAD 模型的直接快速成型软件[J].计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(3):306-367.
DONG W M, YAN D M, ZHOU D W, et al.. CAD model driven rapid prototyping software [J]. *Computer aided design and computer graphics*, 2004,16(3):306-367. (in Chinese)
- [2] CERIT E, LAZOGLU I. A CAM-based path generation method for rapid prototyping application [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2011,56(1-4):319-327.

- [3] 沈连官,王翔,邓益民.激光光刻成型法在微型机械研究中的应用[J].光学精密工程,1995,3(2):11-15.
SHEN L G, WANG X, DENG Y M. Application of laser photoforming technology in machining of micromachines [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995,3(2):11-15. (in Chinese)
- [4] 战培国,赵昕.风洞试验模型技术新发展[J].航空科学技术,2011,(5):8-11.
ZHAN P G, ZHAO X. New development of model techniques for wind tunnel test [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2011,(5):8-11. (in Chinese)

- [5] 孔卫东,王淑范,王迪,等.选区激光熔化直接成型个性化舌侧托槽的研究[J].激光技术,2012,36(3):301-306.
KONG W D, WANG SH F, WANG D, *et al.*. Preliminary study on direct manufacturing of customized lingual brackets by selective laser melting [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(3):301-306. (in Chinese)
- [6] JIN G Q, LI W D. Adaptive rapid prototyping/manufacturing for functionally graded material-based biomedical models [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2013, 65(1-4):97-113.
- [7] 刘杰,杨永强,苏旭彬,等.多零件选区激光熔化成型效率的优化[J].光学精密工程,2012,20(4):699-705.
LIU J, YANG Y Q, SU X B, *et al.*. Efficiency optimization of selective laser melting for multi-parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):699-705. (in Chinese)
- [8] AHN D G. Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools-state of the art [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(5):925-938.
- [9] KOVALEV A I, MISHINA V P, WAINSTEIN D L, *et al.*. Selective laser sintering of single-phase powder Cr-V tool steel [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2002, 11(5):492-495.
- [10] LIU J H, SHI Y S, CHEN K H, *et al.*. Research on manufacturing Cu matrix Fe-Cu-Ni-C alloy composite parts by indirect selective laser sintering [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(7):693-697.
- [11] KUMAR S, KRUTH J P. Effect of bronze infiltration into laser sintered metallic parts[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(2):400-407.
- [12] TRAINI T, MANGANO C, SAMMONS R L. Direct laser metal sintering as a new approach to fabrication of an isoelastic functionally graded material for manufacture of porous titanium dental implants [J]. *Dental Materials*, 2008(24):1525-1533.
- [13] ALCISTO J, ENRIQUEZ A, GARCIA H, *et al.*. Tensile properties and microstructures of laser-formed ti-6Al-4V [J]. *Jmepeg*, 2011, 20:203-212.
- [14] NIU H J, CHANG I T H. Selective laser sintering of gas atomized M2 high speed steel powder [J]. *Journal of Materials Science*, 2000(35):31-38.
- [15] 张冬云.采用区域选择激光熔化法制造铝合金模型[J].中国激光,2007,34(12):1700-1704.
ZHANG D Y. Model manufacturing process from aluminum alloys using selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(12):1700-1704. (in Chinese)

作者简介:



李小飞(1977—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,1998年、2004年于内蒙古工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光烧结技术方面的研究。E-mail: lxf61751@163.com



朱东彬(1975—),男,河北唐山人,博士,主要从事快速成型、CAD/CAM/RPM、功能陶瓷等方面的研究。E-mail: zhu_dongbin@163.com

作者简介:



董俊慧(1961—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,教授,博士生导师,1983年、1990年于内蒙古工业大学分别获得学士、硕士学位,2001年于天津大学获得工学博士学位,现为内蒙古工业大学材料科学与工程学院副院长,主要从事金属模具的激光快速成型与陶瓷型精密铸造,模糊神经网络,抗碱腐蚀新型稀土合金材料的研制等方面研究。E-mail: jhdong1009@163.com