

基于 SLS 的诱导轮快速熔模铸造工艺研究

杨来侠, 白 祥, 徐 超, 王 勃, 高 扬

(西安科技大学机械工程学院, 陕西西安 710054)

摘要: 以诱导轮为例, 开展了基于选择性激光烧结 (SLS) 的复杂曲面零件快速熔模铸造工艺研究。首先采用SLS成形聚苯乙烯 (PS) 工艺制作了叶轮树脂模型并进行浸蜡处理, 其次采用硅溶胶工艺制得该诱导轮的型壳, 最后采用PROCAST软件进行数值模拟, 对可能产生的缩孔缩松进行预测, 并进行实际浇注试验。结果表明, 浸蜡前尺寸相对误差范围为-0.185%~3.22%, 浸蜡后模型单面尺寸增加0.2~0.3 mm, 平均表面粗糙度为0.647 μm , 表面粗糙度等级由3级上升到9级; 在型壳预热温度115 $^{\circ}\text{C}$ 、浇注温度1600 $^{\circ}\text{C}$ 、浇注速度1.5 kg/s进行浇注, 保证铸件合格良好的内外质量。经测量后该铸件平均尺寸相对误差范围0.17%~0.19%; 表面粗糙度平均值是0.693 μm , 达到试验预期。

关键词: 激光选区烧结; 复杂曲面零件; 熔模铸造; 工艺参数

作者简介:

杨来侠(1961-), 女, 教授, 主要从事3D打印与快速模具设计。E-mail:1441299463@qq.com

中图分类号: TQ249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

10-1121-06

基金项目:

国家863项目计划项目: 快速模具制造工艺与性能研究(2015AA042503); 国家自然科学基金: 基于复合载药的可降解药物控释系统结构优化设计研究(51605379)。

收稿日期:

2019-04-01 收到初稿,

2019-05-17 收到修订稿。

由于受到模具设计、工艺试制等因素的影响, 传统铸件往往具有开发周期长, 前期资金投入较大, 模具设计后工艺试制繁琐等缺点, 难以满足小批量、个性化的订单实现快速铸造的目的。快速熔模铸造技术作为目前应用广泛的制造技术之一, 通过快速成形技术制作铸造模型, 然后结合传统熔模精密铸造工艺浇注出相应的零件^[1], 该技术的应用不仅无需使用传统的刀具和模具, 而且能够实现传统工艺中难以或无法铸造的复杂零件, 同时具有缩短加工周期, 简化生产工艺等优点, 能够满足小批量、个性化、短周期、高质量的铸件开发需求^[2]。

本文应用选择性激光烧结技术(SLS)制备诱导轮模型, 并对该模型进行浸蜡及修模处理, 然后对模型的尺寸偏差绝对值进行计算; 应用PROCAST对该模型的充型及凝固过程进行仿真, 进而获得最佳浇注工艺参数; 结合熔模精密铸造技术对该蜡模进行陶瓷型壳的制备, 将制备好的型壳进行高温焙烧得到中空型壳; 将型壳预热到预定温度, 进行合金浇注, 获得高质量的诱导轮铸件。

1 基于SLS蜡模的制备

1.1 “蜡模”制备材料及参数

激光选区烧结(SLS)技术是目前快速铸造技术中使用较为广泛的技术^[3]。在原材料使用上, 覆膜砂作为一种应用最为广泛的打印材料, 目前在SLS工艺技术方面的应用已经较为成熟, 但是在实际生产中仍存在问题, 如覆膜砂由于自身材料属性的原因, 激光烧结完成后尚未完全固化仍需进行二次固化, 而且由于覆膜砂SLS成形件的自身强度较低和自重较大的原因, 大尺寸复杂原型件也难以一次成形^[4]。所以, 本试验选择聚苯乙烯作为烧结基材。在众多的有机高分子材料中, 聚苯乙烯(PS)具有密度较小、吸湿率低、流动性好、熔化温度低、收缩变形小等优点, 相比其他粉末, 在型壳焙烧时还具有发气量少、灰分残留少等优点, 这都使得其更加适合熔模铸造工艺, 因此目前基于SLS的快速熔模精密铸造技术主要采用聚苯乙烯粉末作为烧结原材料^[5], 将UG模型导入magic切片软件并另存为Slc格式, 然后导入型号为XJRPSLS300型的快速成型设备, 在激光功率30 W, 填充速度2300 mm/s, 支撑扫

描速度4 500 mm/s的工艺参数下烧结出相应的诱导轮PS原型件。具体成形工艺过程如图1所示。

SLS是一种通过离散粉末逐步烧结实现制造的技术。由于激光烧结速度很快，PS粉末不能充分熔融及融合，同时成形过程中烧结成形材料因吸收能量会产生翘曲变形等精度缺陷，因此这种方法制出的模型致密性较差，表面质量低，需要采取相应后期措施来进一步提高其强度及精度^[6]。

对熔模精密铸造用PS原型件进行浸蜡处理，通常浸两次蜡。浸蜡有四个作用：提高表面光洁度，提高模样表面质量；提高原型件强度，方便后续制壳^[7]；修补烧结过程中以及清粉过程中的形状残缺部分；由于聚苯乙烯是有机物而浆料是无机物，浸蜡后方便浆料的涂挂^[8]。本文采用50度全经典石蜡，在AFS-650DG型单缸智能恒温浸蜡机进行浸蜡，浸蜡温度65℃。经由SLS成形的PS诱导轮和经过浸蜡、修模后形成的诱导轮如图2所示。

1.2 模型尺寸精度计算

快速熔模精密铸造作为一种集合多种步骤的技术，实现了CAD模型到最后铸件的目的。在该过程中模型尺寸精度变化是影响铸件最终尺寸精度的重要因素。SLS成形过程中存在多种烧结现象，主要包括：烧结收缩、次级烧结及阶梯效应^[9]。这些现象都会对SLS成形件不同方向造成尺寸影响。浸蜡过程中，将PS模型浸入一定温度蜡液中，温度的变化也会导致PS模型发生一定体积变化。所以需要研究该工艺条件下尺寸精度变化。本文中诱导轮实际高度为20 cm，选取诱导轮叶片与测量平面交线处为测量点，具体位置如图3所示，并通过公式(1)对其尺寸相对误差进行计算。测量与计算结果如表1所示。

$$\varepsilon = [(A_1 - A_0) / A_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中： A_0 为理想尺寸，mm； A_1 为实际尺寸，mm。

由表1结果分析可得，浸蜡前尺寸相对误差范围为-0.185%~3.22%，经过浸蜡的叶片单面尺寸会增加0.2~0.3 mm。

表面粗糙度的检测方法主要分为基于触针描绘的接触法和基于光学原理的非接触法两种。对于表面强度低的测试样件，采用光学非接触式测量克服了接触式测量易划伤表面及难以测量曲面样件的缺点^[10]。本文分别截取上述标注处对应高度的叶片。采用美国ZYGO NewView9000白光干涉仪，对叶片表面选取0.83 mm×0.83 mm范围进行取样，测试结果表如2所示。

结果表明，经过表面浸蜡及修磨后的PS模型，完全消除表面质量缺陷，平均表面粗糙度为0.647 μm，表面粗糙度等级由3级上升到9级。该模型表面质量达到熔模精密铸造的要求。

2 诱导轮浇注系统的确定及数值模拟

通过模拟计算得到的该诱导轮的总质量为4.5 kg，浇注时间为3.5 s。由于该诱导轮采用浇口杯进行补缩，所以需要适当提高浇注速度，选用浇注速度为1.5 kg/s。根据铸造手册，选取直浇道直径35 mm，对应浇口杯直径为80 mm，浇口杯高度80 mm。

根据上述计算，设计相应的浇注系统。采用UG软件进行绘制，并采用PROCAST软件进行网格划分。为保证能够得到尽可能精确的计算结果，同时尽量降低模拟计算时间，在网格划分时采用不同步长进行划分，划分后网格单元总数为29 401个，如图4所示。

材料的热物理性能及边界条件的设定对铸造模拟结果起着决定性的作用。该试验中选取的材料为304不锈钢，在换热界面，选用COINC选项，换热系数750 W/(m²·K)。考虑到铸件较小，冷却方式选为空气冷却。304不锈钢熔模铸造工艺参数如表3所示。

304不锈钢液相线温度为1 454℃，根据上述参数并结合铸造经验，在熔模铸造中，浇注温度过低往往会出现浇不足的现象，而浇注温度又不能太高，温度太高又会使得铸件晶粒粗大降低铸件的力学性能。对薄壁件来说，浇注温度选1 600℃为上限（即该诱导轮浇注温度为1 600℃）。在高温下浇注型壳有利于铸件获得较高的精度，同时可以降低薄壁件及复杂

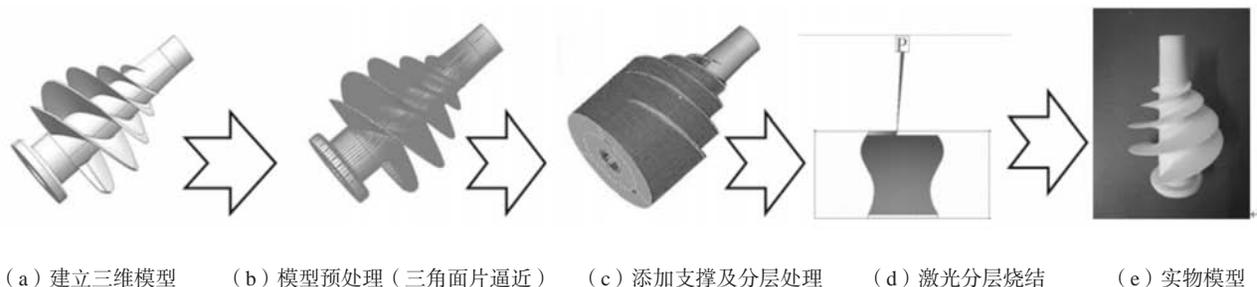


图1 SLS工艺成形过程

Fig. 1 Forming process of SLS

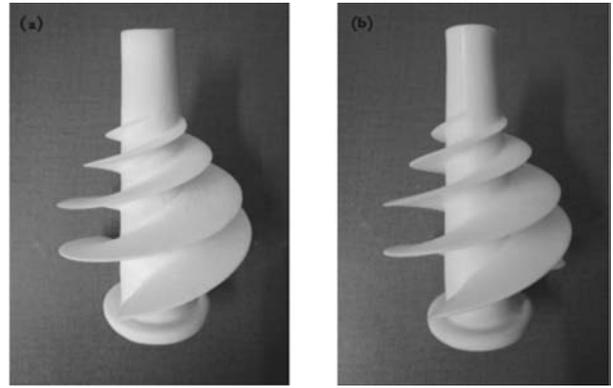
件在浇注过程中产生热裂的倾向。浇注前型壳预热温度的确定非常重要。型壳预热温度过高会导致钢液冷却缓慢，铸件晶粒粗大，脱碳严重，铸件力学性能下降^[11]，因此，结合实际铸造工艺，综合考虑型壳制备工艺，本试验中选取预热温度为1 115 ℃。以质量分数大于30%的硅硅胶和锆英砂（面层）进行制壳。选择应用PROCAST材料库中的热物理性参数进行模拟计算。

浇注系统确定后，应用PROCAST进行流场及温度场分布数值模拟计算，模拟结果如图5所示。从图中可以看出，金属液首先沿诱导轮轴线填充，然后由下到上依次对叶片进行填充。在充型过程中，金属液平稳上升。 $t=3$ s时充型完成，铸件处于液态收缩阶段。 $t=10$ s后等温线呈均匀分布，此后诱导轮从叶片边缘开始逐步凝固，该阶段主要是凝固收缩阶段，从凝固开始直到凝固结束，此时主要发生体积收缩^[10]。

从图5可以看出，温度线分布均匀，铸件叶片部分先凝固，然后铸件轴心开始凝固，最后浇口杯凝固，实现了顺序凝固，铸件可以得到充分补缩，避免了铸件缩孔缩松等缺陷的产生。同时，由于铸件冷却过程中具有较小的温度差，可以有效地降低铸件应力和冷却凝固过程中产生的铸造应力，进而有效地降低铸件产生热裂的可能性^[12]。最终保证该铸件具有较高的表面质量及力学性能。

3 铸造方案验证

经过上述数值模拟计算，对该诱导轮进行生产验证。



(a) PS模型 (b) 浸蜡模型

图2 PS模型和浸蜡模型

Fig. 2 PS and waxing models

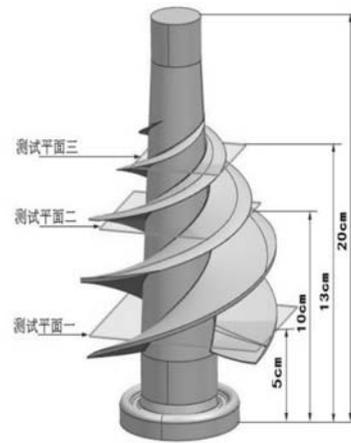


图3 测量位置

Fig. 3 Measurement location

表1 尺寸精度测量结果

Table 1 Measurement results of dimensional accuracy

名称	测量位置	理论尺寸/ mm	测试结果				平均/mm	尺寸相对误差/%
			1号叶片/mm	2号叶片/mm	3号叶片/mm			
PS模型	测试平面一	5.42	5.41	5.42	5.40	5.41	-0.185	
	测试平面二	5.13	5.22	5.24	5.25	5.24	2.14	
	测试平面三	3.42	3.54	3.53	3.51	3.53	3.22	
浸蜡模型	测试平面一	5.42	5.81	5.80	5.90	5.84	7.75	
	测试平面二	5.13	5.62	5.71	5.73	5.69	10.9	
	测试平面三	3.42	3.99	3.93	3.95	3.96	15.8	

表2 表面粗糙度测量结果

Table 2 Measurement results of surface roughness

名称	第一次取样	第二次取样	第三次取样35.897	平均
PS样件 (Sa)	31.666	29.952	0.692	32.505
浸蜡样件 (Sa)	0.595	0.653		0.647

/μm

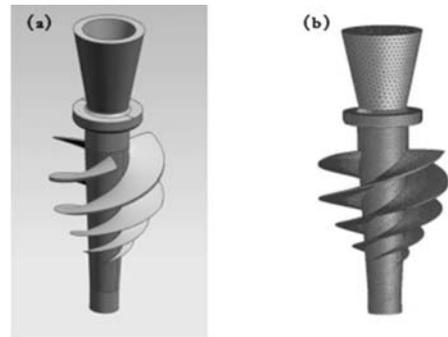
3.1 型壳制备

诱导轮型壳采用硅溶胶 ($W > 30\%$) 工艺进行制壳, 涂挂层数为7~8层^[13], 进行型壳制备。具体撒砂参数如表4所示。

3.2 脱蜡和高温焙烧

将蜡模从型壳中熔失的过程称为脱蜡。该试验中, 由于前期浇注系统是通过快速成型机SLS成形, 所以仅需在浸蜡过程中将浇注系统和PS模样进行粘结, 这样既省去了传统熔模铸造制作浇注系统的时间, 同时也省去了应用高压蒸汽法进行脱蜡的时间。大大缩短了型壳焙烧前的准备时间。

对硅溶胶型壳进行高温焙烧, 主要是提高型壳的耐低温性能和耐高温性能^[14]。本试验中焙烧设备采用电焙烧炉进行焙烧, 将SLS制成的聚苯乙烯“蜡模”在高温焙烧过程中经过高温分解、气化, 得到相应的型壳。型壳焙烧温度过低, 导致型壳强度不够^[15], 同时使蜡模不能充分气化; 焙烧温度过高, 又会使型壳变形, 进而影响成形精度。“蜡模”焙烧时将浇口杯朝



(a) 几何模型

(b) 有限元模型

图4 熔模精密铸造的几何和有限元模型

Fig. 4 Geometry and finite element models for investment casting

表3 304不锈钢铸造工艺参数

Table 3 Casting process parameters of 304 stainless steel

密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	液相温度 / $^{\circ}\text{C}$	固相温度 / $^{\circ}\text{C}$	浇注温度 / $^{\circ}\text{C}$	浇注速度 / $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$
7 930	1 454.00	1 213.00	1 600.00	1.50

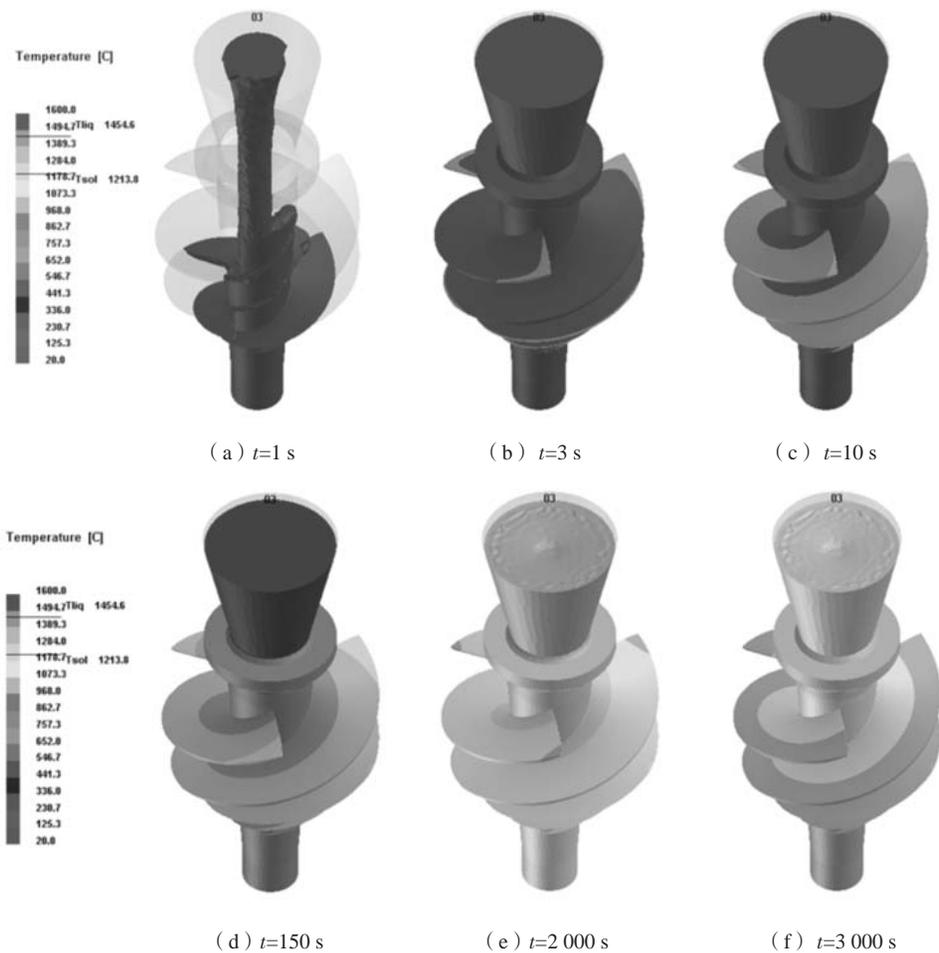
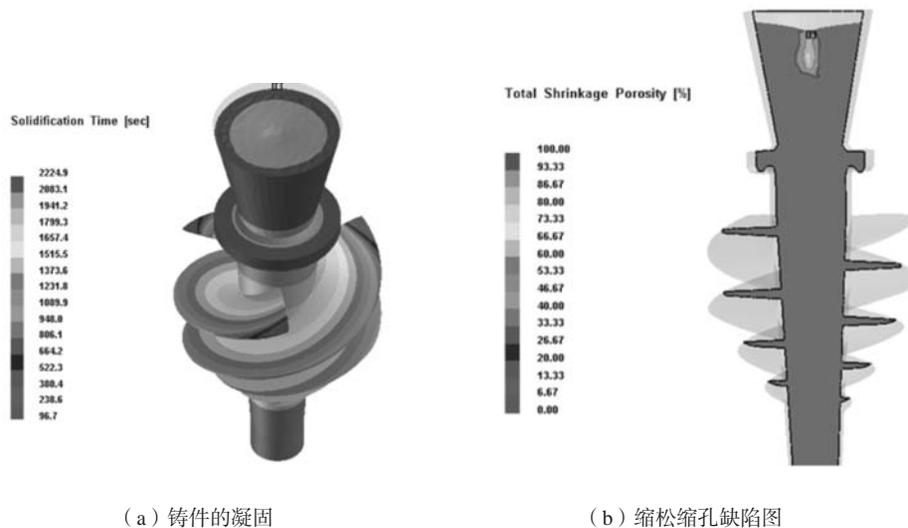


图5 诱导轮不同时刻温度场

Fig. 5 Numerical simulation results of temperature field at different moments



(a) 铸件的凝固

(b) 缩松缩孔缺陷图

图6 诱导轮铸件的凝固和缩松缩孔缺陷图

Fig. 6 Numerical simulation results of solidification process and shrinkage porosity

向炉门, 保证蜡模能充分分解气化。对于该蜡模, 前期在炉温600℃焙烧1 h, 然后在1 000℃保温2 h。焙烧良好的型壳具有较好的透气性, 型壳面层呈白色或浅白色, 内部无灰分残留, 表面无裂纹。

3.3 浇注

浇注前需要对型壳进行预热, 以挥发型壳中残留的水分, 否则在浇注高温金属时会产生大量气体, 使铸件产生气孔。较高的型壳预热温度可以有效减少金属液与型壳的温差, 延缓合金温度降低速度, 方便充型。本试验型壳预热温度为1 115℃, 在浇注温度1 600℃, 浇注速度1.5 kg/s对该型壳进行浇注。浇注后铸件随空气冷却。冷却后对铸件进行清理和精整, 清除模组上的型壳, 切除浇冒口, 然后进行喷砂处理, 以去除残余的型壳及氧化皮, 精整完的诱导轮铸件如图7所示。对铸件的尺寸和表面精度进行测量, 结果表明, 相比于蜡模铸件1号叶片、2号叶片、3号叶片的平均尺寸相对误差是0.17%~0.19%, 表面粗糙度平均值是0.693 μm, 该值满足设计要求。

4 结论

(1) 将聚苯乙烯粉末通过SLS快速成形制作蜡模, 在激光功率30 W, 填充速度2 300 m/s, 支撑扫描速度4 500 m/s的参数下, 烧结出合格PS模型。经测量该PS模样尺寸相对误差范围为-0.185%~3.22%。浸蜡后的模样, 叶片单面尺寸会增加0.2~0.3 mm, 平均表面粗糙度为0.647 μm, 表面粗糙度等级为9级。

(2) 对制备合格的型壳在600℃焙烧1 h后, 接着在1 000℃保温焙烧2 h进行脱蜡处理, 此时蜡模熔失残

表4 型壳用料参数

Table 4 Parameters of shell materials

面层	过渡层	背层
石英砂 (80~120目)	高岭石熟料 (220目)	高岭石熟料 (16~30目)



图7 诱导轮铸件

Fig. 7 Finished induction wheel casting

余量接近0, 制备的型壳面层呈白色或浅白色, 表面无裂纹。

(3) 通过PROCAST模拟计算, 初步确定金属液浇注参数。试验结果表明, 选用304不锈钢作为浇注合金, 在型壳预热温度1 115℃、浇注温度1 600℃、浇注速度1.5 kg/s下, 能够浇注出合格的金属铸件。经测量该铸件平均尺寸相对误差是0.17%~0.19%, 表面粗糙度平均值是0.693 μm。该铸造方案实现了快速熔模铸造的目的。

参考文献:

- [1] 姜耀林, 邵中魁. 3D打印在快速熔模精密铸造技术中的应用 [J]. 机电工程, 2017, 34 (1): 48-51.
- [2] 谭东, 夏少华, 史耀君, 等. 基于3D打印技术的车钩快速铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (6): 475-478.
- [3] 杨来侠, 杨繁荣, 周文明. 聚苯乙烯/玻璃纤维复合粉末SLS烧结件收缩率实验研究 [J]. 塑料工业, 2017, 45 (12): 54-58.
- [4] 张昕, 白培康, 李玉新. 覆膜砂激光烧结在铸造领域的应用 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (3): 501-503.
- [5] 汪艳. 选择性激光烧结高分子材料及其制件性能研究 [D]. 华中科技大学, 2005.
- [6] 孙胜伟, 张坚, 郑海忠, 等. 激光选区烧结PS制件的精度研究 [J]. 现代塑料加工应用, 2007 (1): 26-28.
- [7] 廖可, 高翔, 万里鹏, 等. 选区激光烧结及其在飞机熔模铸件上的应用 [J]. 航空制造技术, 2014 (S1): 26-28, 37.
- [8] 史玉升, 孙海宵, 樊自田, 等. 基于选择性激光烧结方法的金属零件快速制造技术研究 [J]. 铸造, 2003 (10): 749-752.
- [9] 吴晓勇. 基于选择性激光烧结的聚苯乙烯成型工艺研究 [D]. 电子科技大学, 2018.
- [10] 徐新华, 王青, 盛建国. 基于干涉图像处理的面粗糙度检测系统 [J]. 激光与光电子学展, 2009, 46 (12): 87-90.
- [11] 包彦堃, 陈才金, 朱锦伦. 熔模精密铸造 [M]. 第1版. 浙江: 浙江大学出版社, 2012: 314-400.
- [12] 王明光. 基于ProCAST的拨叉件熔模精密铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2015, 64 (7): 632-635.
- [13] 王常卫. 熔模铸造型壳性能的改进及分析 [J]. 科技情报开发与经济, 2004 (7): 156-157.
- [14] 孔胜国. 大尺寸燃气轮机叶片的熔模铸造工艺 [J]. 铸造, 2012, 61 (10): 1138-1141.
- [15] 苏鹏, 刘鸿羽, 赵军, 等. 钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状 [J]. 铸造, 2012, 61 (12): 1401-1404.

Investment Casting Process of Induction Wheel Based on SLS

YANG Lai-xia, BAI Xiang, XU Chao, WANG Bo, GAO Yang

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an710054, Shaanxi, China)

Abstract:

Taking the induction wheel as an example, the rapid investment casting process of complex curved parts based on selective laser sintering (SLS) was studied. Firstly, the impeller resin model was fabricated by SLS polystyrene (PS) process, and the waxing treatment was carried out. Secondly, the mold shell of the induction wheel was prepared by using the silica sol process. Thirdly, numerical simulation was conducted using PROCAST software to predict the shrinkage porosity that may occur, and the actual casting experiment was carried out. The desired results were achieved in the inspection tests. The relative error range of the pre-wax is -0.185%-3.22%, the single-sided size of the leaf after the waxing is increased by 0.2-0.3 mm, and the average surface roughness after waxing is 0.647 μm , which is raised from grade 3 to grade 9; casting is carried out at a mold shell preheating temperature of 115 $^{\circ}\text{C}$, a pouring temperature of 1600 $^{\circ}\text{C}$ and a pouring speed of 1.5 kg/s to ensure good internal and external quality of the induction wheel; the relative error of the average size of the produced casting is 0.17%-0.19%, and the average surface roughness is 0.693 μm .

Key words:

laser selective sintering; complex curved parts; investment casting; process parameter