

3D打印蜡模技术在复杂薄壁铸件石膏型真空增压生产中的应用

■ 孙宁, 侯蔚, 宋彬, 徐宏, 张红昌, 及晓阳, 李雨, 夏建强

摘要: 3D打印蜡模技术和石膏型真空增压技术相融合是“3D打印”+“传统制造”解决高端复杂薄壁构件的一种新生产手段。采用蜡粉3D打印的蜡模具有熔点低、收缩小、表面光洁、变形量小等特点, 解决了长期以来3D打印的PS粉模熔点高、收缩大、发气量大等造成的脱模不完全、模壳开裂和环保问题。

关键词: 3D打印; 石膏型; 蜡模; 复杂薄壁铸件

一、概述

目前, 我国生产复杂薄壁铸件的主要方法是先生产金属型模具再结合低压铸造、差压铸造、真空吸铸及调压铸造等工艺制造出复杂薄壁金属件, 这种方式工艺开发周期长、出品率和成本率很低, 费用高。采用快速熔模技术(3D打印蜡模和石膏型真空增压相融合的技术)可以从根本上解决我国在复杂薄壁铸件生产中存在的问题, 提高复杂薄壁铸件的质量, 缩短开发制造周期, 降低其生产和研制成本。

石膏型真空增压精铸技术复模性优异、热导率低、型腔表面光洁、铸件尺寸精确、表面质量好, 特别适合于中小型薄壁复杂轻合金铸件的精密成形, 其最小壁厚可达0.8mm(局部0.5mm), 尺寸精度能达CT4~5级, 薄壁件X射线检测达到1级, 可大幅提高薄壁复杂铸件生产的成品率、内部质量及外部质量。

3D打印蜡模技术和石膏型真

空增压技术相融合, 采用蜡粉打印蜡模, 再通过石膏型真空增压进行复杂薄壁铸件快速制造意义十分重大。

二、重要技术

1. 3D打印蜡模技术

(1) 设备选择 采用选择性激光烧结SLS设备HLP-800(由北京北方恒利科技发展有限公司开发), 如图1所示, 最大成形尺寸(800mm×600mm×500mm), 选用蜡粉成形工艺模块。其原理是将材料粉末铺撒在已成形零件的上表面并刮平, 高强度的CO₂激光束在计算机的控制下, 按照截面轮廓的信息, 对制件实心部分所在的粉末进行烧结。一层完成后, 工作台下降一个层厚, 再进行下一层的铺粉烧结。如此循环, 最终形成三维产品。

(2) 材料选择 3D打印专用蜡粉(北方恒利开发), 熔点

71℃, 平均粒径56.3 μm。

(3) 3D打印工艺 扫描速度1600mm/s, 激光功率9~16W, 铺粉厚度0.1mm。

2. 石膏型真空增压技术

(1) 设备选择 石膏型制壳和焙烧生产线及电磁真空增压浇注系统(北方恒利开发), 如图2所示。

(2) 石膏型制壳和焙烧生产过程 将3D打印蜡模进行组树后, 在真空下进行石膏灌注成型, 灌制石膏干燥后进行焙烧脱模, 完全脱模和除水的石膏保温等待浇注。

(3) 电磁真空增压浇注系统 在电磁力作用下驱动金属液进入型腔。该系统具有以下优



图1 选择性激光烧结SLS设备

点：①金属液充型平稳，避免由湍流而引起的氧化和吸气，同时金属液经过磁场作用细化晶粒，对改善铸件的组织、性能有积极的作用。②流量及加压规范可精确、连续控制，反应迅速准确，可严格执行铸造工艺。③炉体内不加压缩空气，并可在保护气氛下工作，从而减少了气体溶入，减少气孔的形成。保温炉容量350kg；最大充型压力0.05MPa；充型及保压时间300s；计算机设定“压力-时间”工艺曲线；流量0~3.0kg/s（单泵）、0~6.0kg/s（双泵）连续可调；真空度10Pa；增压压力0.8MPa。

3. 数字化铸造工艺设计及模拟技术

铸造工艺设计及模拟CASTsoft CAE/CAD技术集铸件工艺设计、铸造过程数值模拟、铸造缺陷预测及结果显示为一体，实现对铸件中的充型流态、凝固过程、温度场模拟、缺陷预测、冷却速度分析及应力分析，从而对铸造过程中所涉及浇口、冒口、冷铁、铸型厚度及冒口套等工艺参数和工艺方案做出评价。在模具制造和实际浇注前得到合理工艺，减少试浇注和修改模具次数，达到缩短开发周期和降低成本的目的。

通过工艺设计及模拟技术对石膏型真空平稳充型控制、石膏型增压凝固控制、石膏型真空增压精铸工艺设计与优化，解决充型平稳性、浇不足、冷隔、缩孔及缩松等问题，为分析研究电流与磁力匹配、铸件变截面加压力度、浇注时间等关系提供数据支

持，进一步优化浇冒口系统、增压压力曲线、凝固顺序及初始温度等重要工艺参数。

三、主要生产过程

铸件石膏型真空增压熔模精密铸造生产技术路线如图3所示。

1. 结构分析

针对某薄壁复杂铝合金壳体研发需要，采用3D打印蜡模，再进行石膏型真空增压熔模精密铸造实现快速无模具生产。

某铝合金壳体外形尺寸565mm×467mm×435mm，铸件壁厚不均匀，最大壁厚45mm，最小壁厚在2mm左右，铸件材料ZL101A合金，铸件中内孔需要安装轴承，铸件要承受一定的压力，因此对铸件的气密性有一定的要求，铸件结构符合铸造过程的顺序凝固原则。通过结构和质量要求分析，采用石膏型真空增压熔模精密铸造方法，底部开设内浇口使充型过程平稳，减少氧化夹渣，配合多浇口和冒口压力补缩工艺，通过浇注速度、模壳温度、下部冷铁来调整凝固顺

序，点冒口和保温棉工艺，保证铸件质量。缸体外形和内部结构如图4所示。

2. 3D蜡模打印和尺寸精密控制

将设计好的三维铸型，通过前处理软件和系统控制软件，对铸件进行分层切片、STL文件错误修复、比例缩放、实体分割/组合，支撑添加、尺寸测量；STL、SSL、CLI图形文件读入，STL图形显示，等间隔分层切片，自适应分层切片，扫描轨迹优化及控制代码生成，加工时间预测等；可与工业CT扫描设备接口，对扫描数据文件（CLI）加工成形。扫描控制代码读入、加工参数设置、加工过程预热温度曲线设置、加工过程激光功率曲线设置，免支撑预热等待温度/时间设定。



图2 电磁真空增压浇注系统

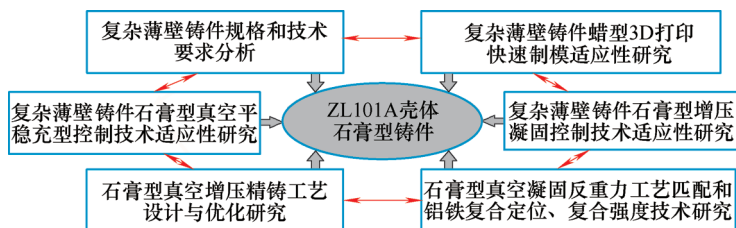


图3 壳体铸件熔模精密铸造生产技术路线

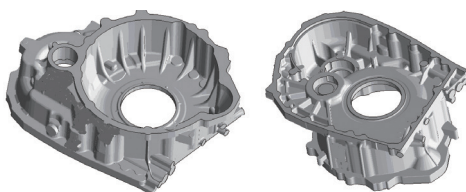


图4 壳体三维结构

根据某铝合金壳体结构特点和蜡粉材料特性,3D打印成形主要参数设置如下。

打印分层厚度:0.12mm。

设置激光光束在工作平面的运动速度:1200mm/s。

设置铺粉直线单元的运动速度:120mm/s。

激光器的实际输出功率:9W。

供料裕量:0.05mm。

转换因子:1.05。

经23h的设备加工生产出主体材料为自制蜡粉铸件原型。这个原型还不能直接使用,需要做简单的后处理工作:第一步,对成形完成蜡件进行未烧结粉清理,采用高压气枪对缸体蜡件进行余粉吹除;第二步,把铸件原型浸入到低温蜡液内(温度控制在55~60℃),使原型表面附着一层薄薄的石蜡,冷却后再次浸入;第三步把冷却后的原型表面打磨光滑,打磨得越光滑,实际生产出的铸件表面粗糙度值越小。模件效果如图5所示。

通过三坐标仪进行尺寸测量,所有尺寸均在正常值范围内,尺寸精度CT6~7,尺寸对比如图6所示。

3. 铸造工艺设计和铸造过程模拟分析

根据产品实际使用要求,采用ZL101A材料进行生产,先将铸件毛坯输出,进行铸造工艺设计,确定工艺布置,设定冒口尺寸及浇注系统;再通过铸造工艺模拟软件进行铸造过程模拟,最后确定可行的铸造工艺方案。具体方法分两步完成。

步骤1:采用数字化铸造工

艺设计及模拟技术铸造工艺设计CAD模块进行工艺热节计算,确定冒口位置、冒口大小、铸件工艺布局及浇注系统。

步骤2:采用数字化铸造工艺设计及模拟技术铸造工艺模拟CAE模块进行铸造过程模拟,根据缺陷重新设计冒口、冷铁和出气孔,得到最终没有缩孔、缩松缺陷的铸件(或使缺陷维持在最小范围)。通过造型、涂料及浇注温度等方式保证表面质量,再通过铸造工艺模拟软件进行铸造过程模拟,最后确定可行的工艺方案,如图7所示。数值模拟结果如图8所示,铸造工艺蜡型组树如图9所示。

工艺优化过程说明如下:

(1) 结合模拟和某铝合金壳体结构,通过改变冒口和浇口

尺寸,反复进行模拟,最后消除了铸造缺陷,确定了浇注工艺参数:浇注温度在(700+10)℃,模壳吃砂量12~15mm,模壳焙烧温度720℃,浇注时模壳温度200℃,浇注时间在15s左右,充型压力为0.014MPa,保压压力为0.12MPa,保压时间为10min。采用上述工艺参数获得的壳体铸件质量最好,铸造成品率最高。

(2) 为进一步调整某铝合金壳体上部微小热节,浇注前在焙烧完成铸型上方放厚度为



图5 3D打印蜡模

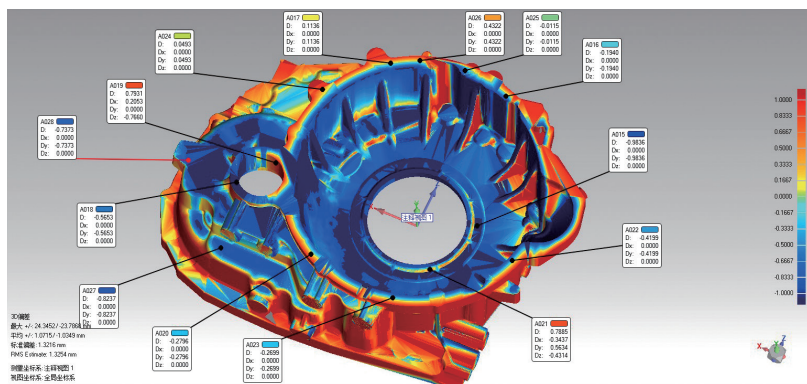


图6 3D打印和尺寸对比

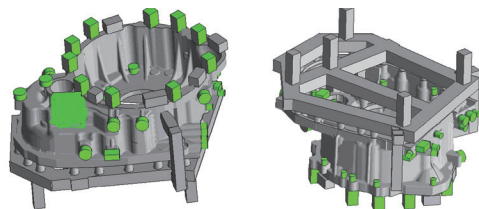


图7 铸造工艺

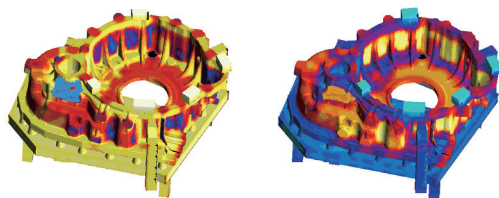


图8 铸造工艺模拟温度分布

20mm铁板用于激冷。

(3) 为保证冒口和浇口充分补缩, 焙烧前在铸件热节处放置冷铁。

4. 铝合金壳体石膏型真空增压熔模精密铸造过程

由于铝合金壳体结构特点和3D打印蜡模特性, 熔模铸造制壳、干燥、脱蜡方面与传统蜡模和3D打印PS蜡模工艺有很多不同。

熔模制壳和干燥: 将组好工艺树的蜡型放在真空罐中, 在真空条件下进行灌浆, 放在温度为20℃的室内静置15~20h, 待石膏型完全硬化。

脱蜡: 3D打印缸体蜡模采用自制蜡粉, 材料成分与传统中低温蜡相似, 由于3D打印工艺需要进行组分调整, 同时加入有利于蜡粉流动性的特殊组分, 为了防止对传统回收蜡成分的污染, 选用蜡不进行回收。蜡粉的熔点在80℃以下, 由于石膏对水的敏感性, 不能采用水浴脱蜡(90~95℃)和高压水蒸气脱蜡(超过100℃)两种方式进行脱蜡。通过直接进行焙烧加热的方法进行脱蜡, 可以顺利完成脱蜡工作。

本次采用焙烧脱蜡, 具体参数如下。

脱蜡温度: 90~140℃。

脱蜡工具: 焙烧炉。

脱蜡时间: 1~3h。

脱蜡前模组存放时间: >12h, 但模组存放不得超过3天。脱蜡是否完成以浇口流蜡和冒烟颜色为判断。

焙烧时间: 2~3个工作日。

采用ZL101A合金, 按优化工艺参数铸造壳体铸件。

铸件精度及表面质量的控制, 采用先进石膏型材料配方工艺技术, 提高铸型表面质量及尺寸精度, 提高铸件尺寸精度和表面质量。从材料和工艺入手进行缸体成形过程的全程质量控制, 形成质量控制规范及体系。采用先进成分分析设备、力学性能检测设备和无损检测设备进行材料成分、力学性能和铸件内部质量检测。铸件毛坯效果如图10所示。

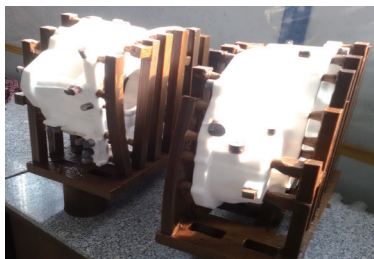


图9 铸造工艺蜡型组树

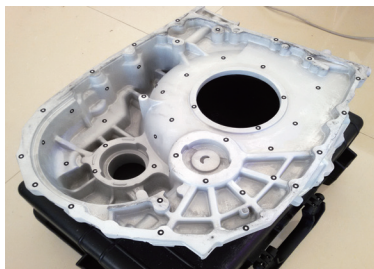


图10 铸件毛坯效果

四、结语

通过某薄壁复杂铝合金壳体无模快速生产, 验证了3D打印蜡模技术和石膏型真空增压技术相融合是“3D打印”+“传统制造”解决高端复杂薄壁铸件的一种新型生产手段, 能够解决制造周期长、加工量大、补焊、尺寸不稳定、内部缺陷多及反修次数多等现有制造问题。该技术在产品开发, 以及单件小批量/复杂零部件/金属模具制作方面优势明显, 可以实现4~7个工作日

得到金属产品。

参考文献

- [1] 李庆春. 铸件形成理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2] 李魁盛. 铸造工艺及原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [3] 毛红奎, 徐宏. 铸造过程模拟仿真及工业设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [4] 王智平. 底杯铸件铸造工艺模拟[J]. 铸造, 2006 (2) 149-151.
- [5] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [6] 靳玉春, 侯华, 等. 材料成型过程数值模拟[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1997.
- [7] 柳百成, 等. 铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [8] 范英俊. 铸造手册之特种铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [9] 刘云, 侯击波, 等. 电磁泵铸造技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

作者简介: 孙宁, 中国兵器工业新技术推广研究所, 研究员, 从事工业加热领域先进工艺技术研究与应用, 以及先进制造基础与共性工艺技术顶层设计研究。侯蔚, 中国兵器工业新技术推广研究所。宋彬、徐宏、张红昌、及晓阳, 北京北方恒利科技发展有限公司。李雨、夏建强, 安徽恒利增材制造科技有限公司。

MW 20161020