

3D打印技术和铸造模拟技术在精密铸造生产中的应用

■ 宋彬, 崔聿辰, 李雨, 施利进, 骆建权, 张志峰

摘要: 利用CASTsoft CAD/CAE软件可以对铸造工艺参数如浇注温度、充型时间、铸型材料等进行改进, 改进后再次进行模拟, 经过多次的改进直到消除铸造缺陷。3D打印技术可以使企业有能力快速生产各类大尺寸、结构复杂熔模精密铸件所用蜡模, 减少大量外协费用, 同时对于单件、小批量熔模精密铸件的生产可以不用模具, 从而节省大量模具加工费用。

关键词: 精密铸造; 3D打印; 工艺模拟; 工艺优化; CASTsoft CAD/CAE

在航空航天、国防、汽车等重点行业, 其基础的核心部件一般均为金属零件, 且相当多的金属零件是非对称性的, 有着不规则曲面或结构复杂而内部又含有精细结构的零件。传统的铸造工艺设计方法往往依赖于直觉经验, 在铸件结构较为简单和铸造类似铸件时, 经验可能起到一定的作用。但在浇注大型、复杂铸件且无相关经验时, 只能通过反复工艺试验来确定工艺。当工艺存在重大失误时, 可能使得工艺方案被彻底推翻。通过工艺反复试验来确定工艺的方法, 可能导致先前制作的模具报废, 对于大型铸件来说模具费用会相当高, 这会造成重大经济损失, 同时严重影响新产品的试制, 延长新产品的试制周期。传统生产制造这些零件通常采用铸造或解体加工的方法。现在, 利用CASTsoft CAD/CAE铸造模拟软件与激光粉末快速成形技术的工业级3D打印机相结合, 可有效地解决这

些问题。生产周期不到原来的十分之一, 实现了生产的低成本和高效益, 达到了铸件生产的个性化、多样性、快速铸造的目的。

一、铸造模拟技术和3D打印技术

铸造工艺模拟CASTsoft CAD/CAE系统和3D打印技术系统如图1所示。铸造工艺设计CAD由铸件重量、体积、模数、补缩、浇注等工艺参数计算, 以及工艺图绘制、三维自动转二维、工艺卡自动绘制组成; 铸造工艺模拟CAE集铸造过程仿真、铸造缺陷定量预测及结果定量显示。用3D打印技术无模具制造蜡件后, 通过精密铸造生产出产品毛坯。整个周期只需15~25天。

基本思路如下:

(1) 将三维设计完成的铸件毛坯(含加工余量)输入到铸造工艺设计CAD中, 进行浇注系统、冒口、冷铁、孤立熔池及模数等计算。

(2) 根据计算结果大小和位置将浇注系统、冒口(冷铁)添加到铸件毛坯中。

(3) 将初始化的浇注系统和冒口信息输入铸造工艺模拟CAE, 进行铸造过程模拟仿真, 优化浇注系统和冒口, 并将优化好的浇冒信息输出。

(4) 根据毛坯三维图, 利用HLP-500激光粉末快速成形机直接生产出铸件原型蜡件(含收缩量)。

(5) 按照设计好的铸造工艺方案, 给原型蜡件连接上浇注系统, 并通过制壳、脱蜡、高温焙烧等工艺制造型壳。

(6) 将金属液浇注到型壳里, 冷却后脱壳, 生产出铸件毛坯。

(7) 利用数控设备生产出最终产品进行装配, 验证设计的合理性。

按照传统生产制造图2所示的铸件, 由于是新产品, 生产周期很长。首先是根据技术工程师经验, 设计出大概的浇注工艺,

然后进行模具的设计和生。此零件形状并不复杂，如果采用设计压型进行生产，其模具的设计、生产周期约需2~3个月，模具投入生产到得到铸件还需半个月的时间。只要其中一个环节的设计不合理，整个过程可能就要重新开始，而且可能要反复数次。这不仅浪费了大量的人力物力，又将最终产品的批量生产拖延3~5个月，甚至更久。现在，通过CASTsoft CAD/CAE软件和3D打印技术恰好解决这个难题。利用其特点，从设计到生产出成品件的整个加工周期只要20天，甚至更少。

二、铸造工艺方案设计

利用北京北方恒利科技发展有限公司开发的铸造工艺设计及工艺模拟CASTsoft CAD/CAE技术对铸件毛坯模数、工艺热节、冒口系统、浇注过程及凝固过程进行计算，对铸件毛坯进行工艺设计和铸造工艺缺陷分析，依据分析结果对工艺进行改进，最后设计出合理的铸造工艺。采用CASTsoft CAD/CAE技术进行体积法和模数法进行浇注系统计算、浇口棒计算和浇口位置确定，初步确定工艺，通过浇注过程凝固过程进行分析，进一步优化合理工艺，从而缩短工艺试制周期，降低工艺试制成本。

1. 工艺确定步骤

步骤1：采用CASTsoft CAE铸造工艺设计模块进行工艺热节计算，确定铸件工艺布局（见图3、图4），确定浇注系统。

根据模拟计算缺陷的结果

（见图5、图6），可以知道工艺方案1热节集中在铸件侧面的大平面旁边，适合放置冒口浇口棒，所以按方案1计算浇口棒，确定铸件工艺布局，确定浇注系统。

步骤2：根据缺陷设计浇口棒，得到最终没有缩孔、缩松缺陷的铸件。通过造型、涂料及浇注温度等方式保证表面质量，再

通过铸造模拟软件进行铸造过程模拟，最后确定可行的浇注工艺方案（见图7）。

2. 前处理

本次模拟时，铸件毛坯进行网格剖分的网格尺寸为 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，共剖分网格800万单元（见图8）。模壳网格

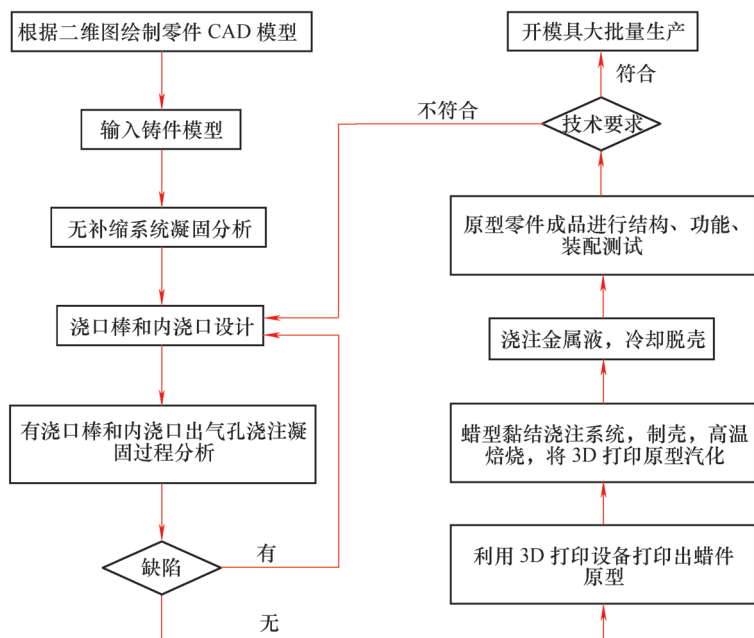


图1 铸造工艺模拟CASTsoft CAE系统和3D打印技术系统

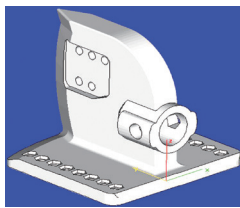


图2 三维铸件

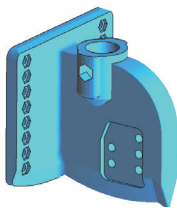


图3 工艺方案1

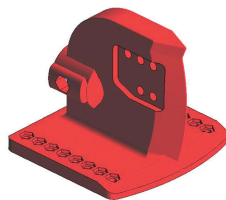


图4 工艺方案2

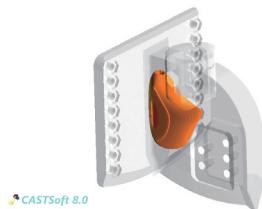


图5 工艺方案1热节及收缩情况

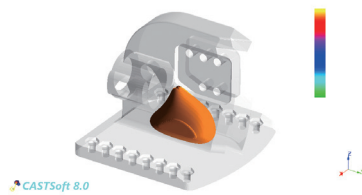


图6 工艺方案2热节及收缩情况

剖分如图9所示。

3. 铸造模型构建及模拟计算

按工艺要求添加精密铸造相应的工艺参数。参数设置如下：铸件材料为WCB，铸型材料为水玻璃，浇注温度1600℃，模壳焙烧1000~1150℃，浇注时模壳700℃左右。

4. 铸造工艺结果显示及工艺合理评定

采用CASTsoft CAE铸造工艺模拟模块进行铸造过程模拟验证，通过凝固过程、温度场及缩孔缩松的判定，可以看到铸件内部没有产生缺陷，理论上满足质量要求。如图10~图14所示。

三、3D打印蜡模的制造

1. 生产设备及原理

使用激光粉末快速成形技术的工业级3D打印机烧结粉末材料（如蜡粉、PS粉、ABS粉、尼龙粉、覆膜砂和金属粉等）。成形时先在工作台上铺上一层粉末材料，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。优点：由于粉末具有自支撑作用，不需另外支撑；材料广泛，不仅包括PS塑料材料和尼龙材料，还可以直接生产金属和陶瓷零件。且材料可重复使用，利用率高。可用于样件、功能件、模具、模型、铸造蜡模等。设备结构如图15所示。

2. 蜡模的生产

生产蜡模，首先要确定蜡模尺寸。根据蜡模收缩率、合金收缩率、模壳膨胀系数、模拟结果

给出蜡模X、Y、Z方向上的线收缩率。该收缩率确定后，可以在Magics RP软件对零件处理时首先进行放缩，这样即可得到理想尺寸的蜡模，继而获得尺寸合格的铸件毛坯。

经过12.5h的设备加工生产出主体材料为PS粉（聚苯乙烯）铸件原型。这个原型还不能直接使用，需要做一下简单的后处理工

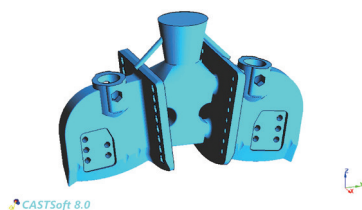


图7 铸件工艺三维模型

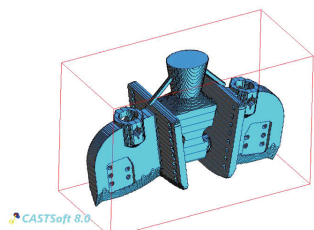


图8 铸件网格剖分

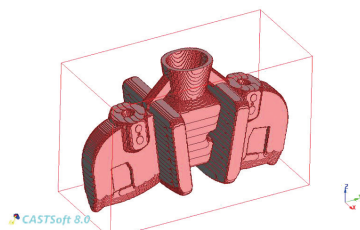


图9 模壳网格剖分

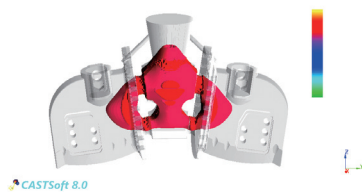


图10 孤立熔池位置a

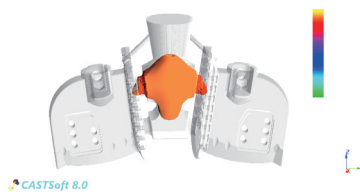


图11 孤立熔池位置b

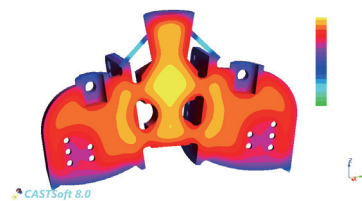


图12 凝固过程温度场剖面

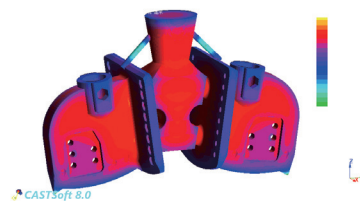


图13 凝固过程温度场

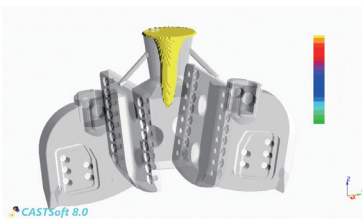


图14 缺陷透视

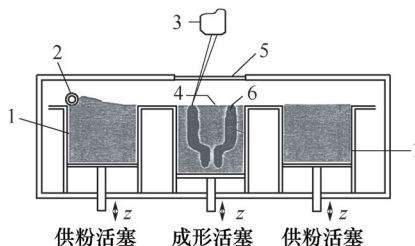


图15 设备结构原理

1. 原始粉末 2. 铺粉辊筒 3. 激光三维扫描头
4. 加工平面 5. 激光窗 6. 生成的零件

作。第一步是把铸件原型浸入到中温蜡液中，使原型表面附着一次很薄的石蜡，冷却后再次浸入。第二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低。最终生产出的铸件如图16所示。

3. 蜡模的组焊

按照设计好的铸造工艺方案，给蜡件连接上浇注系统，如图17所示。快速成形机制出的蜡模原型要求无形变，尺寸准确，通过精整处理后表面光洁，可以进行组焊、蘸浆、制壳、脱蜡。浇注系统选用性能相近的中温蜡，以便于黏结牢固，满足制壳的强度要求，其尺寸按熔模铸造工艺设计选取。组焊工艺与传统蜡模相似，保证内浇口长度和间距，便于冒口补缩，模壳放置平稳。

4. 型壳制备

快速成形技术制成的蜡模涂挂性能好，可以用原工艺配制涂料，黏浆与撒砂，干燥。黏结剂用硅溶胶或硅酸乙酯，面层耐火材料用锆砂粉，背层用莫来石或煤矸石粉。由于使用的烧结粉料熔化温度高，没有流动性，型壳不能通过蒸汽脱蜡工艺将原型全部去除，但可以在纯氧环境下通过高温焙烧的方法去除蜡模，或者在开放的大气环境中焙烧脱除浇冒口及蜡模。直接高温焙烧会使型壳涨裂导致生产失败。因此，我们通过以下步骤制壳：①利用水玻璃工艺制壳5层。②脱蜡温度170℃，压力0.7MPa，持续时间13min。③焙烧温度缓慢上升，加热到850℃，持续时间1h。④简单清理一下内部残留。

5. 浇注金属液，冷却脱壳

浇注金属液，冷却脱壳、铸件清理和原精铸工序相同，最终得到如图18所示铸件。

四、结果与分析

使用CASTsoft软件可以有效地预测出工艺设计中存在的问题，能够预测出铸件可能存在的铸造缺陷，并根据模拟结果确定、改进、优化铸造工艺。利用CASTsoft CAE软件可以对铸造工艺参数如：浇注温度、充型时间、铸型材料、浇口棒等进行改进，改进后再次进行模拟，经过多次的改进直到消除铸造缺陷。3D打印技术可以使企业有能力快速生产各类大尺寸、结构复杂熔模精密铸件所用蜡模，减少大量外协费用，同时对于单件、小批量熔模精密铸件的生产可以不用模具，从而节省大量模具加工费用。

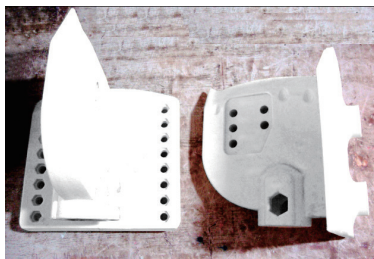


图16 3D打印蜡件

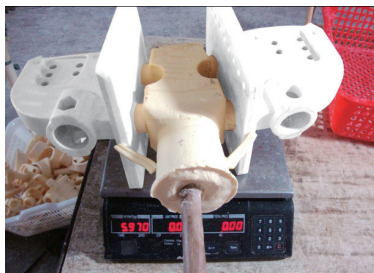


图17 3D打印蜡件连接浇注系统



图 18

五、结语

CASTsoft软件与3D打印技术的结合可以大幅缩短生产周期，为新产品研制和开发获得了大量宝贵时间，降低了生产成本，极大地提高了铸造车间精密铸造水平，为确保后续型号产品中精密铸件生产任务的顺利完成打下良好的基础，可大幅提高企业的竞争力。

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] 范英俊.铸造手册之特种铸造[M].北京：机械工业出版社，2003.
- [4] 胡汉起.金属凝固原理[M].北京：机械工业出版社，1997.
- [5] 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.
- [6] 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.

作者简介：宋彬、崔聿辰、李雨，北京北方恒利科技发展有限公司。施利进、骆建权、张志峰，浙江遂金特种铸造有限公司。

MW 20160720