

# 镂空铸型（砂芯）的设计与生成方法

康进武, 刘宝林, 荆涛, 沈厚发

(清华大学材料学院, 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 铸造生产中, 通常难以对铸件成形过程进行有效控制, 主要因为铸型(砂芯)为密实结构。为实现铸件成形过程中的精细控制, 本文提出了面向绿色智能铸造的镂空铸型(砂芯)理念、设计及生成方法。镂空铸型(砂芯)包括形成型腔的自适应厚度壳型和各种外围(内部)镂空结构, 壳型也可以设计成空心壳型, 外围(内部)的镂空结构包括桁架、加强筋和多层嵌套壳等。提出了镂空结构的设计理论, 考虑金属液静压力、胀箱力和型芯受热引发的强度下降以及镂空结构弯矩等多方面因素进行镂空结构设计。采用表面离散、空间离散以及数值模拟相耦合的方法实现了镂空结构的自动生成, 开发了镂空铸型(砂芯)设计软件, 实现了镂空铸型(砂芯)的快速生成, 不依赖于造型软件。镂空铸型(砂芯)可实现铸件成形过程较为灵活的差异化控制, 进而为实现铸件组织、性能和缺陷的控制奠定基础。镂空砂型芯采用3D打印技术制备, 通过试验验证了其在铸造过程控制冷却方面的应用效果, 镂空减重50%以上, 大幅度降低3D打印成本, 有利于3D打印铸造技术的推广。

**关键词:** 智能铸造; 镂空铸型; 镂空砂芯; 生成方法; 控制冷却

## 作者简介:

康进武(1970-), 男, 博士, 副教授/博士生导师, 主要研究方向为铸造CAE、铸造及其模拟仿真、3D打印。  
E-mail: kangjw@tsinghua.edu.cn

中图分类号: TG222

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)08-1045-13

## 基金项目:

北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金项目(L212002)。

## 收稿日期:

2024-11-13 收到初稿,

2024-12-13 收到修订稿。

近年来, 航空航天、汽车和能源等行业的快速发展对高端铸件的应用需求日益增长, 对铸件的成形精度、结构复杂度和质量性能等要求越来越高, 因此对相应铸造技术提出了更高挑战。毋庸置疑, 智能铸造是铸造的发展方向, 其核心应是铸件成形过程的精细控制<sup>[1-2]</sup>。高性能铸型对于生产高品质铸件至关重要, 是实现智能铸造的基础<sup>[3-4]</sup>。传统的铸型准备是一个多环节和多约束的复杂过程, 其设计灵活性和生产效率相对较低, 难以满足向绿色智能铸造发展的需要<sup>[5]</sup>。当前, 3D打印技术、砂型机加工技术与铸造技术正融合互动发展, 推动了无模铸型制造技术的快速进步<sup>[6-8]</sup>。3D打印技术在铸造领域的应用优势主要体现在复杂结构铸型(砂芯)的设计及高效制备上<sup>[9-11]</sup>。砂型芯3D打印技术有力推动了镂空铸型技术的发展, 一方面源于镂空式结构设计能够提升砂型芯3D打印效率, 节省打印时间, 并降低生产成本; 另一方面在于3D打印成形方式对铸型的结构复杂性敏感度不高, 解放了对铸型结构复杂度的限制, 提升了设计自由度并便于成形复杂镂空结构<sup>[12-14]</sup>。然而, 目前工业界的砂型芯3D打印仍只是替代了传统的造型制芯方法, 并未改变砂型芯的设计理念及其传统的密实式结构<sup>[15-16]</sup>。此外, 当前的砂型芯3D打印成本仍较高, 限制了3D打印技术在铸造领域的进一步推广。

镂空铸型技术较好地满足了未来绿色智能铸造中铸件成形过程灵活可控和轻量化的要求<sup>[17]</sup>, 成为了推动铸造业向绿色化和智能化创新发展的关键, 引起学术界和工业界广泛关注。在镂空模型的设计及生成方面, 一些学者进行了创新尝试。华中科技大学陈建树等提出了针对STL模型镂空的算法, 其采用紧密排列的正六面体网格单元(体素)来描述STL模型, 可通过在原模型表面一定范围内增加/删除正六面体网格单元得到镂空模型, 优点是生成的镂空模型壁厚均匀且无干涉, 然而该算法未涉及到镂空铸型模型的直接生成<sup>[18]</sup>。梁恩志等提出了一种二维桁架路径模型的自动生成算法, 其通过融合使用图像处理方法以及特征点提取算法, 对输入的图像进行图形处理并获得图像的所有特征点集合, 再通过求解特征点之间的连接关系得到相

应的矩阵，最后通过特征点集合和矩阵重构出二维桁架的路径模型，但该算法对于三维的空间桁架结构的生成还不能实现<sup>[19]</sup>。Guo等提出了一种桁架结构的自动生成与可视化的方法，其中最主要的一步在于桁架初始结构的选择，通过优化随机增量算法生成了Delaunay三角网形式的桁架几何结构，根据桁架几何结构稳定性与平衡矩阵之间的关系，判断桁架结构的稳定性，再基于节点增加杆数，让结构不稳定的桁架达到结构稳定<sup>[20]</sup>。其采用了满应力法优化了几何结构，获得了满足生产实际要求的桁架结构。Chen等提出了一种三维空间结构的构建方法，通过表面与内部分开建模最后合并的思想，实现了实体模型的镂空处理——先通过程序生成内部镂空结构，之后对其进行CAD模型转化，与外部的CAD模型布尔运算合并后得到STL格式的CAD模型文件；再将实体模型的表面进行网格剖分，在剖分部位相应地生成桁架结构，实现实体模型的外表面镂空结构生成<sup>[21-24]</sup>。此外，一些商业软件也集成开发了抽壳和镂空的功能，但却不能直接生成可用于铸造的镂空铸型。例如，Magics软件具备对零部件几何模型进行镂空的功能，镂空操作时可设置抽壳方向、壁厚和内部结构的详细参数，同时也提供了丰富的内置晶格单元库，并支持导入外部自制晶格，其在镂空点阵结构设计方面具有优势，可以生成有或没有外壳的晶格模型，实现零件内部晶格替换或零件与晶格点阵结构的布尔运算。然而，使用Magics软件难以便捷高效地生成适用于铸造过程并包含铸件型腔的镂空铸型。又如，SolidWorks软件也可以通过阵列、镜像和弯曲等命令来创建复杂的镂空几何模型，但其创建结构特征较为复杂的镂空铸型较为耗时、费力，设计效率和自由度较低，难以满足高端铸件对复杂结构铸型高通量灵活自由设计的需求。再如，nTopology软件可通过强大的工具库来创建包括镂空设计在内的复杂几何模型，其提供了丰富的晶格单元库和拓扑优化工具，并支持参数化建模。此外，nTopology还能够利用函数以及不同物理场来驱动复杂结构的设计与生成，例如通过函数定义三维空间中的点并快速生成晶格或厚度可变的壳体结构，利用不同的物理场仿真结果来实现晶格结构如TPMS，壳体厚度的优化设计等。然而，nTopology软件无法直接生成包含高精度铸件型腔面的镂空铸型，不能校核镂空模型在铸造过程中的高温许用强度等。几种商业软件镂空结构设计功能简要对比如表1所示。

绿色智能铸造的实现离不开铸型的轻量化和智能化，而铸型的轻量化和智能化迫切需要镂空结构的高效率设计与生成。铸型不同于零件的特点是具有用于形成铸件的内部表面和外部表面，内部表面不能镂空，

表1 三种商业软件镂空结构设计功能对比  
Tab. 1 Comparison of hollow structure design functions of three commercial software

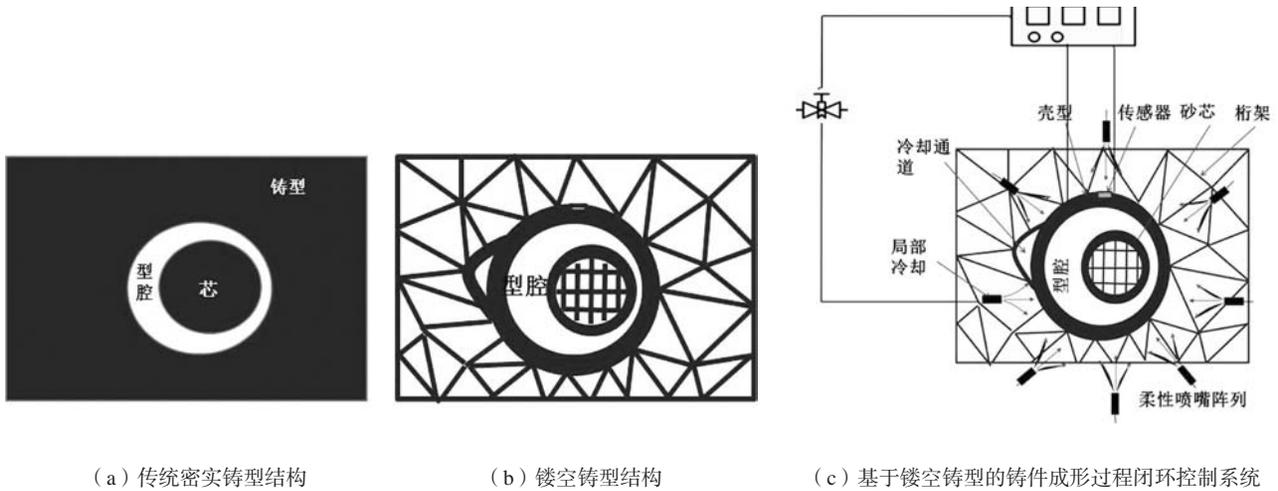
项目	Magics	SolidWorks	nTopology
参数化镂空设计	支持	支持	支持
STL模型文件修复	支持	不支持	不支持
铸造性能分析	不支持	不支持	不支持
内置晶格单元	多种	多种	多种
自定义模型子结构	支持	支持	支持
仿真优化分析	不支持	支持	支持
能否生成铸件型腔	否	否	否

而外表面和内腔表面之间可进行镂空。同时铸型在铸造中承受高温金属液的冲击和压力，砂型中的粘结剂会烧损从而引发强度下降甚至溃散，还要承受铸件收缩或膨胀产生的作用力，因此十分复杂。当前的难点在于如何根据特定形状和材质的铸件，高效率地设计生成并构建科学、合理和高效的镂空铸型系统，实现对铸造过程的自动监测与智能控制。因此，探索全新的镂空铸型设计和生成技术，具有重要的理论和工程应用价值。

## 1 镂空铸型（砂芯）设计理念

镂空铸型的设计理念在于，通过系列镂空结构创造出能够进行原位实时监测和闭环控制的空间，并在铸造过程中按需调控铸件的凝固冷却过程。对铸型进行灵巧镂空，不仅使得在其内部布置传感器进行监测成为可能，也使其具备了局部差异化冷却的能力，从而可根据性能和质量设计需求对铸件不同部位和不同时刻的冷却速度进行原位监测和闭环调控<sup>[25]</sup>。此外，镂空铸型还便于监控动态变形，实现铸件成形过程中的反馈控制冷却，调控铸件的组织和性能，进而得到性能优良、近零残余应力和变形的铸件。传统密实铸型结构、镂空铸型结构以及基于镂空铸型的铸件成形过程闭环控制系统的示意图如图1所示。

镂空铸型除保证铸件型腔的精确性和完整性外，其他部分的镂空没有过多限制，因此其镂空结构具有多样性。镂空铸型主要由形成铸件内腔的型壳和型壳外部（砂芯内部）的支撑结构组成<sup>[26]</sup>。镂空铸型内部特定的型壳用于保证型腔的精确性和完整性，该型壳不同于传统壳型铸造和精密铸造的型壳。由于基于3D打印成形，因此该型壳采用非均匀壁厚——自适应厚度型壳，科学设定型壳厚度，既保证了工况强度需要，又保证了轻量化和外界冷却对铸件的作用。此外，该型壳还可以设计成空心结构，进一步轻量化，并具有保温等功能。铸型外部的镂空结构用于支撑型



(a) 传统密实铸型结构

(b) 镂空铸型结构

(c) 基于镂空铸型的铸件成形过程闭环控制系统

图1 传统密实铸型结构

Fig. 1 Schematic diagram of traditional dense mold structure

壳, 保证镂空铸型的许用强度, 使后者能够放在铸造平台上, 同时其也为预置控制冷却装置提供了可行空间。常用的镂空结构包括桁架式、多层壳式和加强筋式结构, 而外部支撑结构则可采用可选结构的单一式或组合式设计。例如, 镂空铸型采用自适应厚度型壳、多层壳式复合型壳等设计, 可在内层壳与外层壳之间设置加强结构及冷却通道<sup>[27]</sup>, 甚至能够在局部区域设计并构造中空式型壳结构<sup>[28]</sup>。典型的镂空铸型结构如图2所示。

镂空铸型芯具有以下优势: 大幅度减少造型材料的用量, 符合绿色铸造的发展趋势; 显著减少3D打印工作量, 缩短打印时间, 能够提升大型、复杂形状铸型的3D打印成形效率, 进一步促进3D打印技术的发展应用; 实现铸型芯的轻量化, 便于搬运等生产现场操作。总之, 铸型(砂芯)的镂空设计是一种高自由度、可快速优化和科学合理高效的设计理念, 将可能革新传统铸型的设计及生成方法。

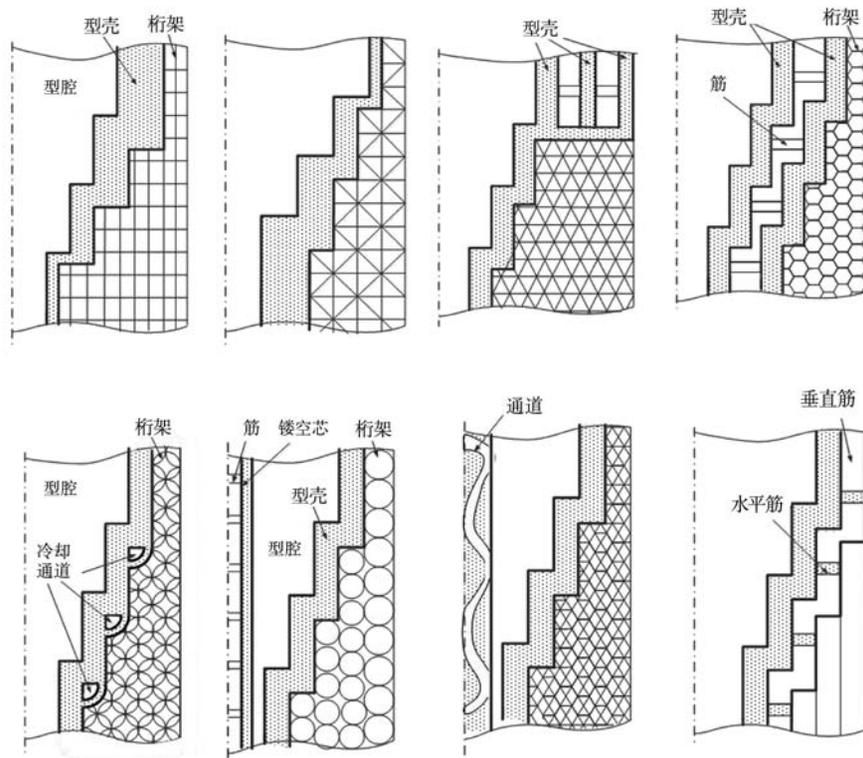


图2 典型镂空铸型结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of typical hollow mold structures

## 2 镂空铸型（砂芯）设计方法

### 2.1 数值模拟驱动

考虑镂空铸型中随铸件形状而改变的变厚度型壳以及复杂的镂空支撑结构，采用手工造型的方式难以生成，因此需要通过算法程序来实现镂空铸型随铸件形状的自动生成。针对镂空铸型难以通过传统的三维造型软件生成，难以完全基于STL（stereolithography，光固化立体造型）文件三角面片格式布尔运算生成的现状，利用表面离散、空间离散和数值模拟相耦合的算法，成功开发出镂空铸型（砂芯）的设计生成算法和程序，设计生成流程如图3所示。设计算法的关键在于通过表面离散模型进行空间离散，通过空间离散模型进行数值模拟，通过数值模拟进行结构参数设计，通过空间离散模型进行镂空结构建模，并复合表面离散模型和空间离散模型生成镂空铸型（砂芯）模型。



图3 镂空铸型（砂芯）的设计生成流程图

Fig. 3 Flow chart for design and generation of hollow mold (sand core)

### 2.2 设计自适应厚度型壳

基于铸件或砂芯三维几何实体模型，首先输出铸件或砂芯STL格式的表面离散模型文件，铸件及砂芯外表面模型可用于后续型腔面的构建。然后，利用有限差分方法对铸件或砂芯STL文件进行空间离散，完成对铸件或砂芯模型的有限差分网格剖分。接下来，基于铸件虚拟传热计算结果确定拟生成的镂空铸型或

砂芯内层型壳的壁厚特征（相当于铸件各处的局部模数）。该步骤中，虚拟传热计算指对空间离散后的铸件模型给定初始温度分布，并设定其表面散热条件，计算传热一段时间后铸件温度场分布，根据其表层单元的温度场分布设计确定表层单元对应的型壳厚度。设计规则为：表层单元温度越高，说明铸件该部位较厚大，则对应的型壳厚度值需更大；表层单元温度越低，说明铸件该部位较薄，对应的型壳厚度值则可以小一些，但具体的厚度应使型壳在对应温度下满足许用强度要求。

壳型厚度可根据铸件虚拟传热计算所得铸件表面温度场分布自动完成计算，不同形状、不同部位和不同温度的铸件表面某一单元处所对应型壳的厚度可依据式（1）进行插值计算：

$$d_i = d_{\min} + \frac{d_{\max} - d_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} (T_i - T_{\min}) \quad (1)$$

式中： $d_i$ 为铸件表面某一单元处所对应型壳的厚度， $T_i$ 为铸件表面某一单元处的温度， $d_{\min}$ 为铸件表面温度最低单元处所对应型壳的厚度， $d_{\max}$ 为铸件表面温度最高单元处所对应型壳的厚度， $T_{\min}$ 为铸件表面单元的最低温度， $T_{\max}$ 为铸件表面单元的最高温度。

镂空铸型（砂芯）设计首先需构建形成铸件型腔的型壳，并要求型壳在高温和力的作用下能够有效约束高温液态金属成形。通常情况下，铸件各处的壁厚和结构往往不一致，因而对铸型（砂芯）的强度要求和冷却速度需求也不一样，而镂空铸型（砂芯）的强度和冷却性能等则主要由型壳厚度和周围（内部）的支撑结构所决定。因此，镂空铸型（砂芯）的内层型壳厚度、周围（内部）支撑结构的确定是镂空设计的关键。常见的抽壳操作所得型壳只是随形形状，并不能形成外部（内部）的支撑结构，也不能形成空心夹层等模块化参数化镂空结构。因此铸型（砂芯）的镂空设计应充分考虑到铸件各处壁厚、结构及冷却需求的不同，按需求自动生成可适应铸件结构特征及冷却需求的可变厚度壳层。

铸造过程中，镂空铸型（砂芯）型壳会受到金属熔体的静压力作用，而在凝固以后除受到铸件的重力作用外，还可能会受到因铸件冷却收缩而产生的压力或张力影响。此外，镂空铸型（砂芯）会受到铸件的高温加热影响，温度升高会使得镂空铸型（砂芯）的型壳强度降低，这些都是镂空砂型型壳厚度设计的主要考虑因素。型壳的厚度是镂空铸型（砂芯）设计的关键，厚度不足会导致镂空铸型（砂芯）在熔融金属的高温作用下开裂，最终造成金属液泄漏。

具体地，镂空铸型型壳厚度可根据式（2）初步确定。

$$d > \frac{\int \rho g h S_n dh}{\sigma(T)} - S_a \quad (2)$$

式中： $d$ 为内层型壳厚度， $\rho$ 为熔融金属液的密度， $g$ 为重力加速度， $h$ 为静压头高度， $S_n$ 为型壳与金属液在内腔表面 $h$ 高度处的微小接触面积， $\sigma(T)$ 为型壳随温度变化的抗拉强度， $S_a$ 为某一横断面上外部支撑结构与型壳接触的等效支撑面积， $l_{min}$ 为型壳最小水平断面周长。目前，由于直接测量镂空铸型（砂芯）的力学性能成本和效率均较低，一般将工业中常用的3D打印标准压缩试块和“8”字试块的高温力学性能作为镂空铸型（砂芯）高温力学性能设计的近似参考。对于砂型，其强度对温度变化较为敏感，随着温度的升高，粘结剂被烧结，强度迅速下降，直至溃散，其抗拉强度随温度变化趋势如图4所示。

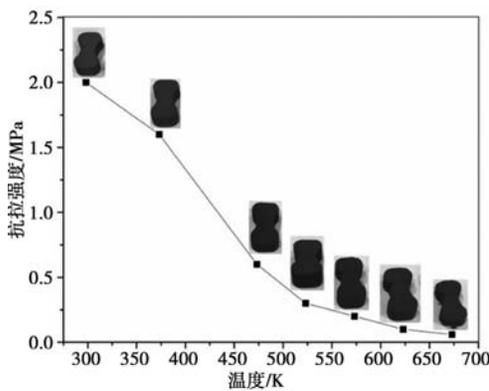


图4 3D打印砂型抗拉强度随温度变化趋势

Fig. 4 Variation trend of 3D printed sand mold's tensile strength with temperature

类似地，镂空砂芯型壳厚度设计需考虑金属液静压力、浮力和液态金属将砂芯加热后对后者强度的影响，铸造过程中镂空砂芯主要受力如图5所示。

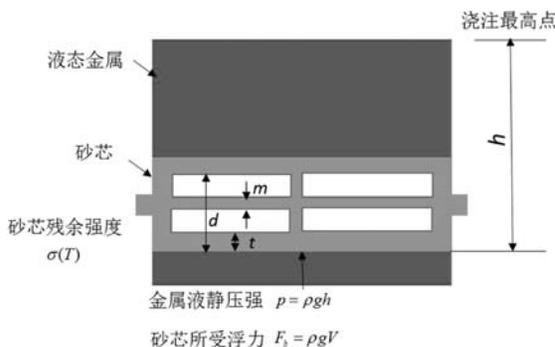


图5 铸造过程中镂空砂芯主要受力示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the main forces on the hollow sand core during the casting process

浇注过程中，镂空砂芯主要受浮力作用，而熔融金属对砂芯的静压力可通过式（3）计算：

$$F_s = \int \rho g H dS \quad (3)$$

式中： $\rho$ 为熔融金属液的密度， $g$ 为重力加速度， $H$ 为静压头高度， $dS$ 为砂芯与金属液在内腔上表面 $H$ 高度处的微小接触面积。对于水平砂芯，如果其直径较小，则其所受浮力可简化为：

$$F_b = \rho g V \quad (4)$$

式中： $V$ 为砂芯的体积。对于水平放置圆形砂芯，镂空砂芯的水平最大断面的强度为：

$$F_s = \sigma(T) [ld - (l-2t)(d-2t) + m(l-2t) + m(d-2t)] \quad (5)$$

式中： $l$ ， $d$ 分别为砂芯的长度和直径， $t$ 为壳厚， $m$ 为镂空砂芯桁架支撑杆的断面宽度， $\sigma(T)$ 为砂芯随温度变化的抗拉强度。镂空砂芯的水平最大断面的强度应大于浮力产生的作用，因此需：

$$F_s > F_b \quad (6)$$

镂空砂芯的壳厚和桁架尺寸应满足：

$$\sigma(T) [ld - (l-2t)(d-2t) + m(l-2t) + m(d-2t)] > \rho g V \quad (7)$$

化简为：

$$-4t^2 + (4m+2d+2l)t > m(l+d) + \rho g V / \sigma(T) \quad (8)$$

同时，型壳随温度变化的抗拉强度 $\sigma(T)$ 需大于熔融金属液在最大压头处的静压力 $\rho g h_{max}$ ，其关系准则如式（9）所示：

$$\sigma(T) > \rho g h_{max} \quad (9)$$

镂空铸型（砂芯）型壳厚度越厚，其高温强度也越高，但是会导致铸件的冷却速度变慢，造型材料的用量也会变大，铸型（砂芯）在落砂时也会越困难。一般地，铝合金由于其良好的导热性和较低的熔点，镂空砂型（芯）结构设计倾向于实现快速冷却和减轻砂型（芯）总体重量，因此壁厚较薄；而铁合金尤其是铸铁，由于熔点较高和较大的收缩率，需要更厚的壁厚以抵抗金属液的烧损并保持砂型芯的完整性。因此，在满足镂空铸型（砂芯）型壳厚度最小值的前提下，镂空铸型（砂芯）型壳厚度整体设计得越薄，越有利于后期实际生产。型壳厚度除通过理论计算和数值模拟分析自适应设计外，还应结合已有的实践经验，针对不同铸造合金体系及特点，对镂空砂型芯的冷却效率、高温许用强度、退让性及透气性、生产制备成本等因素进行综合权衡考虑，进行壁厚优化设计。

### 2.3 设计清砂孔

镂空铸型通常情况下可以一体化成形，也可以提

前设定分型面将铸型分成两部分或多部分进行成形。一体化铸型能够显著提高铸件的尺寸精度，但也要充分考虑3D打印成形后一体化镂空铸型型腔内打印材料的清理问题，尤其是细小型腔空间内多余打印材料的清理难题，可以通过设计清理工艺孔进行清理。针对桁架式镂空砂型分块的清砂孔结构设计如图6所示。

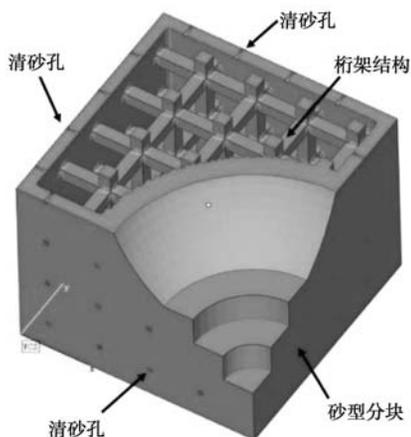


图6 桁架式镂空砂型分块的清砂孔设计示意图

Fig. 6 Schematic of sand clearing holes design for truss hollow sand mold section

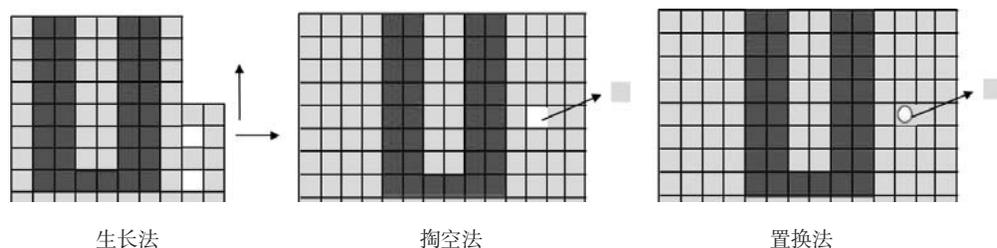


图7 基于空间离散的铸型镂空结构的生成示意图

Fig. 7 Schematic diagram for generation of hollow mold structure based on spatial discretization

### 3.1 基于有限差分的镂空结构生长法

对于镂空铸型结构的生成，流程可分为以下四步：第一步为使用有限差分离散软件将铸件STL模型文件进行有限差分网格剖分，基于此网格单元文件在铸件的外部生成额外的若干单元层，该单元层即为型壳结构部分；在生成自适应厚度型壳的过程中运用到了虚拟传热计算，并基于这个结果进行型壳厚度的判断，最终生成变截面厚度的型壳；第二步为基于上一部分生成的自适应厚度型壳有限差分网格单元文件，根据用户输入的工艺参数，自动在型壳外部添加的桁架支撑结构、加强筋支撑结构或者多层壳结构的有限差分网格单元文件；第三步为将上一部分所得的有限差分网格单元文件进行STL格式转换，在STL格式转换的过程中对自适应厚度型壳与镂空结构上的尖角部位

## 3 镂空铸型（砂芯）生成方法

镂空铸型（砂芯）的生成采用基于表面离散模型+空间离散模型的方法，包括以下步骤：首先根据铸件或砂芯分块生成内层（外层）的型壳结构；型壳生成后，继续在有限差分模型上，通过置换、掏空和生长等方法，结合利用多层壳、加强筋和桁架典型结构和自由镂空块造型库，在铸型型壳外部或者砂芯型壳内部生成多层壳式、加强筋式、桁架式或镂空块（用于从实体中抠出的镂空空腔的形状）等可选镂空设计结构用于支撑型壳；随后，根据应用需要完成清砂孔结构的设计，并完成镂空铸型的强度校核。对于镂空铸型设计，将生成的内层型壳和外围的可选镂空设计结构外表面进行复合运算，即构成镂空铸型的外表面；对于镂空砂芯设计，则是将生成的内层型壳和型壳内部的可选镂空设计结构外表面进行复合运算，即构成镂空砂芯的内表面。最终，将镂空铸型的外表面或镂空砂芯的内表面与型腔面模型合并处理，即构成整个镂空铸型或砂芯的完整表面离散模型，并可输出模型的STL格式文件用于3D打印。基于空间离散的生长、掏空、置换等镂空结构生成方法如图7所示，这些方法适合不同的镂空特征生成。

进行圆角处理以得到圆角结构的镂空铸型，将有限差分模型的每一个小单元的表面都进行三角面片化，得到实心的形状与有限差分模型完全相同的STL格式镂空模型文件；第四步为将铸件STL格式模型文件的各个三角面片单元法线方向进行反向运算，并与上一部分所得的实心的STL格式镂空模型文件进行合并，得到去除了铸件部分的，具有空腔的可直接用于浇注处理的3D打印镂空铸型STL格式模型文件。

对于镂空砂芯设计，首先对读入的砂芯STL文件进行有限差分网格剖分，得到砂芯的有限差分网格模型。在有限差分模型下，识别砂芯表面，计算砂芯网格距离砂芯表面的距离，当该距离小于砂芯厚度时，则设为砂芯型壳网格，将其网格属性赋为砂芯型壳。然后通过置换法，如图8（a）所示。判断各砂芯网格

是否位于桁架上，如果位于桁架上，则其网格属性赋为砂芯桁架属性。识别砂芯有限差分模型的所有内表面，并将其表面离散为三角面片，如图8 (b) 所示，

以STL格式表示。将砂芯STL格式的三角面片和砂芯内部的三角面片进行布尔运算，得到镂空砂芯的最终STL格式文件。

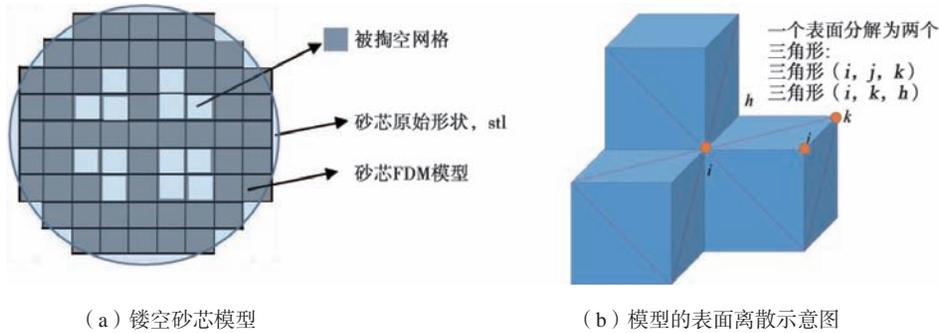


图8 通过掏空法生成镂空砂芯模型及模型的表面离散示意图

Fig. 8 Schematic diagram for generation of hollow sand core model by hollowing out method and surface discretization of the model

### 3.2 基于有限差分的单元替代法

基于自由镂空模块，对密实的铸型（砂芯）结构可以根据基本规则形状或任意实体形状实现镂空，并能够保证镂空内腔的光滑，从而避免裂纹。自由镂空的实现算法即通过给定的规则形状对原有的有限差分网格单元进行替换，基于有限差分的单元替代法生成镂空铸型原理方法如图9所示。

自由镂空时可设定镂空块簇，即将若干行、列、层的基本剖分单元合并成一个簇，将其用一个基本镂空块进行镂空，镂空时基本镂空形状通过放大缩小来适应镂空簇的大小。镂空簇可设定最大尺寸和最小尺寸，该尺寸通过行、列、层上的镂空块的数量来确定。基于标准形状和任意给定形状的砂型分块（砂芯）自由镂空设计案例分别如图10和图11所示。

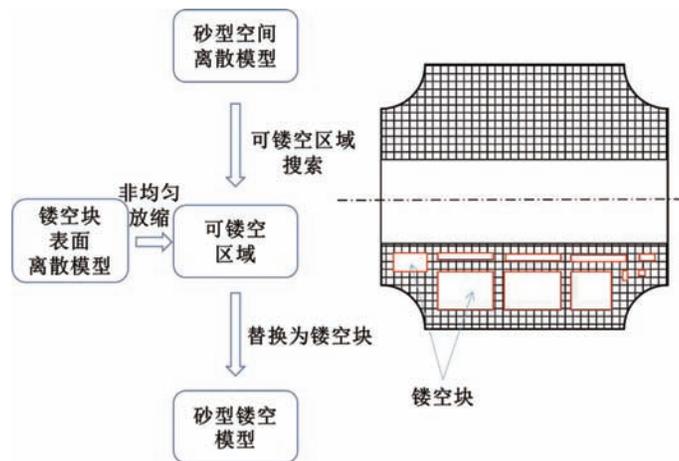


图9 通过基于有限差分的单元替代法生成镂空铸型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of hollow mold generated by finite-difference-based unit substitution method

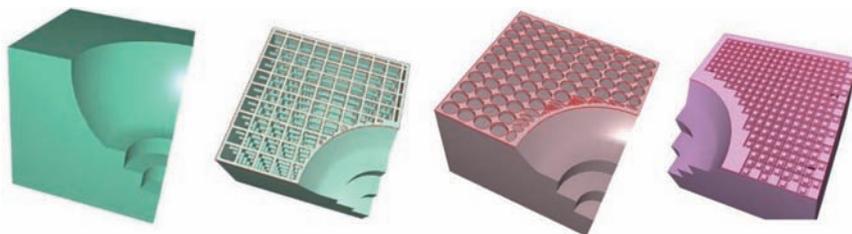


图10 基于标准形状的砂型分块（砂芯）自由镂空设计案例

Fig. 10 Case of free hollow design for sand mold section (sand core) based on standard shape

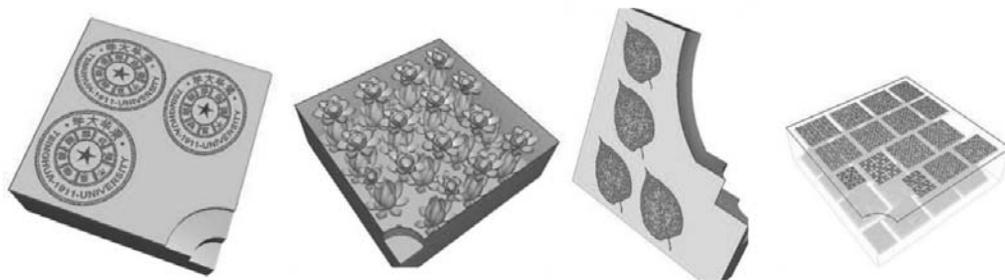


图11 基于任意给定镂空形状的砂型分块(砂芯)自由镂空设计案例  
Fig. 11 Case of free hollow design for sand mold section (sand core) based on any given hollow shape

### 3.3 基于图像处理的自由镂空法

特定情况下,对镂空后的铸型需要进行局部修改调整,这时采用基于图像处理的自由镂空方法。基于图像修改的镂空铸型生成步骤如图12所示。

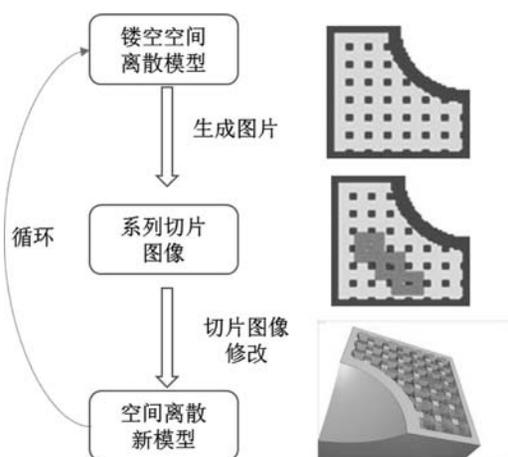


图12 基于图像修改的镂空铸型生成步骤示意图  
Fig. 12 Schematic diagram of the step for hollow mold generation based on image modification

将原镂空设计中生成的铸型有限差分模型输出为 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个方向的系列图像(将有限差分单元和图像的像素进行映射,如一个单元对应一个像素),图像的背景为白色,砂芯未镂空部分为纯蓝色,镂空部分为灰色。通过外部图像编辑软件,可以编辑修改图片,每次只修改单一方向的系列图片,修改图片时可增加壳厚或加强筋或桁架等,增厚部分采用纯蓝色,也可以通过擦除功能减薄局部壳厚,擦除后的颜色采用有别于背景色和未镂空部分的颜色。即纯蓝色对应未镂空部分,纯蓝色和背景色白色之外对应镂空。将需要修改的位置通过逐幅图像进行修改,修改后并保存为原文件。修改时增厚的部分不能侵入铸造型腔,不能侵入背景。

将修改图片转换为有限差分模型,就得到了修

改后的镂空设计模型(将图像像素映射回有限差分单元,如一个像素映射为一个有限差分模型的一个网格)。再次将有限差分模型输出到图像时,就把单方向图像上的修改更新到了其他两个方向上。一次只修改一个方向。反复该过程实现 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个方向的修改。基于手动图像修改的镂空铸型生成步骤及案例如图13所示。

基于前述设计理念、方法和原则,作者开发了具有自主知识产权的铸型(砂芯)镂空设计软件FT-HollowMold和FT-HollowCore,可实现多层壳、桁架式、自由镂空式镂空,满足了镂空铸型模型的高通量快速设计优化及生成的需求。

## 4 镂空铸型(砂芯)设计及应用案例

### 4.1 镂空铸型设计案例

使用镂空铸型设计软件FT-HollowMold,对叶片铸件模型( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个方向上尺寸为 $50\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 136\text{ mm}$ )进行双层壳结构的镂空铸型设计,生成了一体化多层壳镂空铸型模型,如图14所示。

### 4.2 镂空砂芯设计案例

使用镂空砂芯设计软件FT-HollowCore,对长圆柱状的砂芯进行多层壳结构的镂空设计,生成了嵌套式多层壳镂空结构,如图15所示。所生成的多层壳结构可作为强制冷却通道,在铸造过程中通过砂芯对铸件进行强制冷却。

### 4.3 镂空砂芯应用案例

使用开发的镂空设计软件,对大型机床铸铁件的某一砂芯进行镂空设计,该砂芯三个方向最大尺寸为 $2\ 005\text{ mm} \times 655\text{ mm} \times 155\text{ mm}$ ,间隙尺寸为 $10\text{ mm}$ ,镂空砂芯设计能够减重60%,设计后的镂空砂芯模型如图16所示。进一步将镂空砂芯应用于生产实践中,消除了铸件裂纹缺陷。

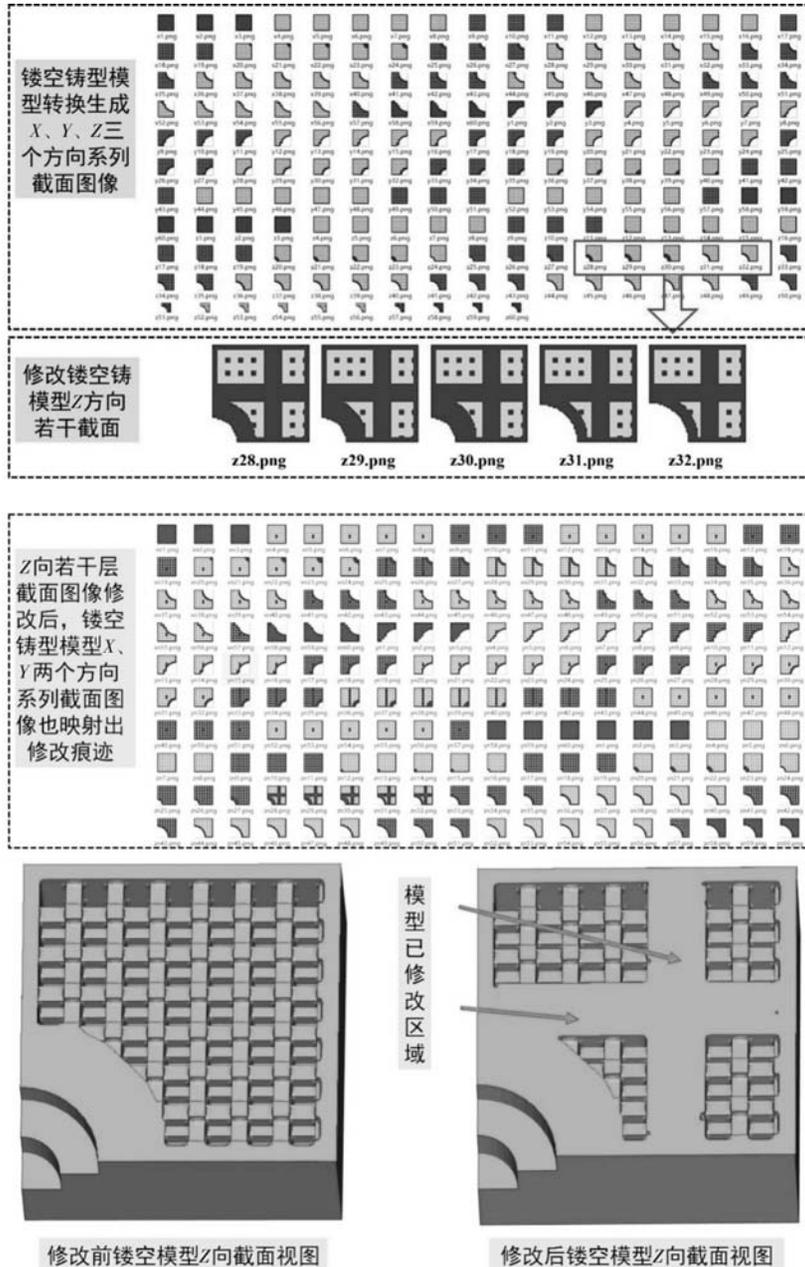


图13 基于手动图像修改的镂空铸型生成算例

Fig. 13 Case of hollow mold generation based on manual image modification

#### 4.4 镂空铸型应用案例

将镂空铸型应用于某一锥形筒体件（最大轮廓尺寸为500 mm × 500 mm × 700 mm，上端框厚约18 mm，下端框厚约22 mm，中间部位厚约10 mm）的铝合金低压砂型铸造成形中<sup>[29]</sup>，相比密实砂型，镂空砂型显著减少了铸件孔隙率，如图17所示。

### 5 结论及展望

(1) 提出了面向绿色智能铸造的镂空铸型（砂

芯）理念、设计与生成方法。利用表面离散、空间离散和数值模拟相耦合的方法，实现了镂空铸型（砂芯）的设计与生成。开发出了具有自主知识产权的镂空铸型（砂芯）设计与生成程序，设计自由度高，可快速优化，科学合理高效，能够满足复杂铸件镂空铸型（砂芯）设计的需要。

(2) 铸型（砂芯）镂空设计主要包括设计厚度可自适应变化的型壳或空心型壳，设计型壳外围（内部）的桁架、多层壳和加强筋等支撑加强结构以及设

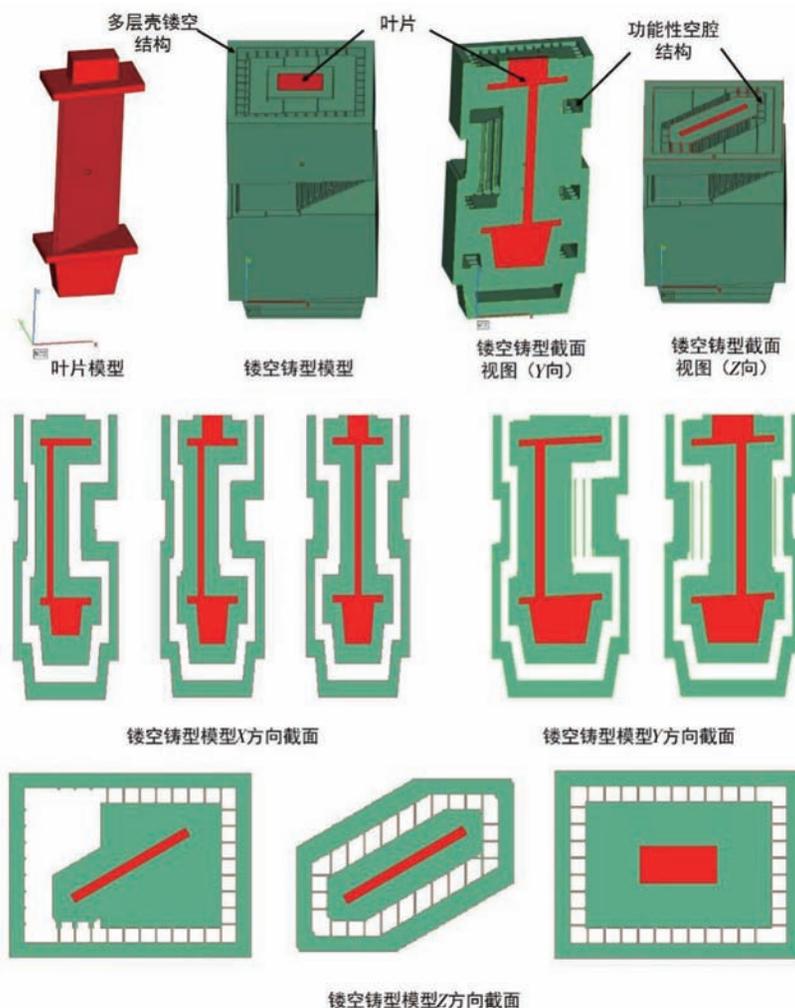


图14 叶片铸件模型及生成的一体化双层壳镂空铸型模型（含截面视图）

Fig. 14 Blade casting model and the as-generated hollow mold model with an integrated bilayer shell (including cross-section views)

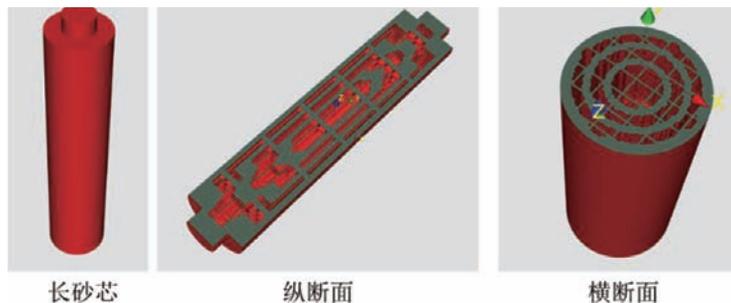


图15 多层壳镂空砂芯结构模型

Fig. 15 Model of hollow sand core structure with multi-layer shells

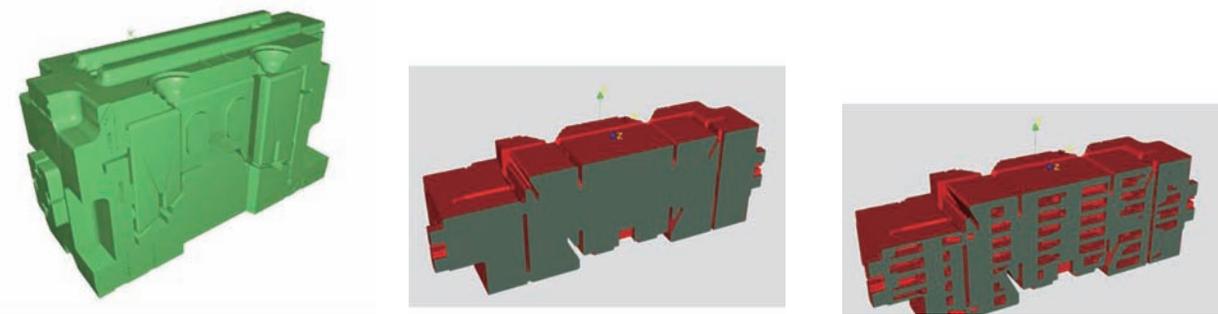
计清砂孔等特定结构，基于有限差分生长法、掏空法和置换法，可生成多种类和多参数的镂空结构。

(3) 提出了基于标准形状，任意给定形状的镂空铸型（砂芯）模型快速生成方法，为进一步开发面向铸件局部几何特征和工艺控制需求的铸型（砂芯）设

计生成方法奠定了基础。

(4) 开发了基于图像处理的镂空结构模型手动自由修改设计及生成方法，提高了镂空设计的灵活性。

(5) 对铸型（砂芯）进行镂空，能够在铸造过程中调控其对铸件整体或局部的冷却能力，并为布置



(a) 大型机床铸铁件砂芯模型 (b) 密实砂芯模型横断面 (c) 镂空砂芯模型横断面

图16 大型机床铸铁件密实砂芯与镂空砂芯的对比

Fig. 16 Comparison between dense sand core and hollow sand core for cast iron parts of large machine tools

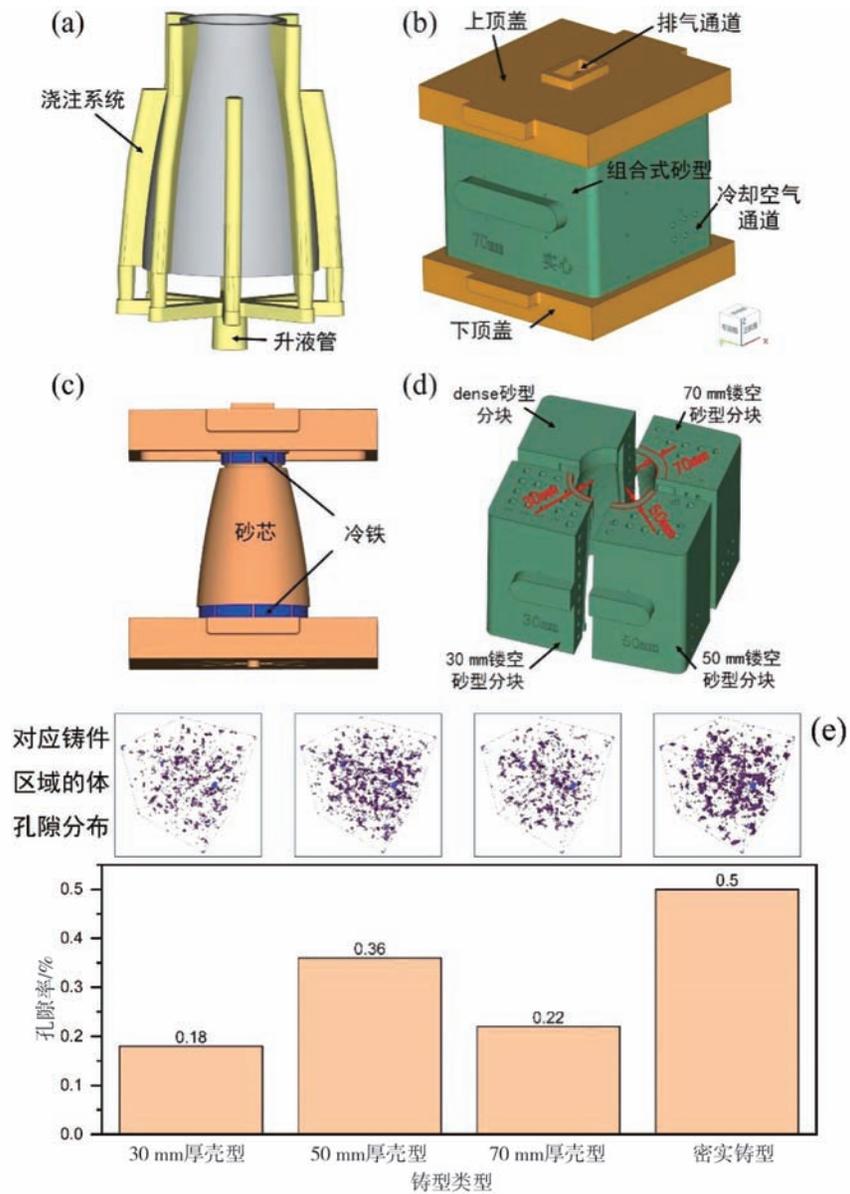


图17 镂空和密实砂型对应的低压铸造铝合金筒体件孔隙率对比

Fig. 17 Comparison of the porosities of the low-pressure aluminum alloy cylinder castings corresponding to hollow and dense sand molds

传感器进行实时监测创造可行空间, 将支撑实现根据铸件性能和设计需求对不同部位不同时刻进行原位监测和工艺条件闭环调控的技术愿景, 最终可改善铸件的冷却凝固过程和凝固后的温度均匀性并优化铸件性能。

(6) 将镂空砂芯应用于大型机床铸铁件的生产实践中, 砂芯减重60%以上, 消除了铸件裂纹缺陷, 证实了在铸造过程中实现各部位控制冷却或差异化冷却的可行性; 将镂空砂型应用于铝合金筒件件低压铸造成形实践中, 显著减少了铸件孔隙率。

#### 参考文献:

- [1] KANG J, LIU B, JING T. et al. Intelligent casting: empowering the future foundry industry [J]. *China Foundry*, 2024, 21 (5): 409–426.
- [2] 许庆彦. 铸造技术路线图: 数字化、网络化、智能化铸造 [J]. *铸造*, 2017, 66 (12): 1243–1250.
- [3] LEHMHUS D. Advances in metal casting technology: a review of state of the art, challenges and trends-part I: changing markets, changing products [J]. *Metals*, 2022, 12 (11): 1959.
- [4] UPADHYAY M, SIVARUPAN T, MANSORI M E. 3D printing for rapid sand casting—a review [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 29: 211–220.
- [5] HAWALDAR N, ZHANG J. A comparative study of fabrication of sand casting mold using additive manufacturing and conventional process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97 (1–4): 1037–1045.
- [6] WANG J, SAMA S R, MANOGHARAN G. Re-thinking design methodology for castings: 3D sand-printing and topology optimization [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2019, 13: 2–17.
- [7] SAMA S R, WANG J, MANOGHARAN G. Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 34: 765–775.
- [8] SAMA S R, BADAMO T, MANOGHARAN G. Case studies on integrating 3D sand-printing technology into the production portfolio of a sand-casting foundry [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14: 12–24.
- [9] KANG J, MA Q. The role and impact of 3D printing technologies in casting [J]. *China Foundry*, 2017, 14 (3): 157–168.
- [10] ZHAO D, GUO W, ZHANG B, et al. 3D sand mould printing: a review and a new approach [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, 24 (2): 285–300.
- [11] KANG J, SHANGGUAN H, DENG C, et al. Additive manufacturing-driven mold design for castings [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 472–478.
- [12] 张鹏. 基于砂型3D打印技术的铸造工艺设计方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [13] 赖晓玉. 3D打印砂型铸造A356铝合金微观组织与性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [14] 徐伟业. 复杂零件的3D打印砂型铸造成形模拟及工艺研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [15] SIVARUPAN T, BALASUBRAMANI N, SAXENA P, et al. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 40: 101889.
- [16] WALKER J, HARRIS E, LYNAGH C, et al. 3D printed smart molds for sand casting [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2018, 12 (4): 785–796.
- [17] KANG J, SHANGGUAN H, PENG F, et al. Cooling control for castings by adopting skeletal sand mold design [J]. *China Foundry*, 2021, 18 (1): 18–28.
- [18] 陈建树, 张李超, 黄树槐. 基于体素表达法的STL模型镂空算法研究 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2004, 32 (3): 11–13.
- [19] 梁恩志, 陆小龙, 赵世平, 等. 二维桁架路径模型的自动生成算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46 (5): 91–96.
- [20] 郭丽华, 汤文成, 赵春花. 桁架结构的自动生成与可视化实现 [J]. *机械设计*, 2010, 27 (6): 14–17.
- [21] CHEN Y. 3D texture mapping for rapid manufacturing [J]. *Computer-Aided Design & Applications*, 2007, 4 (6): 761–771.
- [22] CHEN Y. A mesh-based geometric modeling method for general structures [C]//Proc. ASME. IDETC-CIE2006, Volume 3: 26th Computers and Information in Engineering Conference, DETC2006-99513: 1–13.
- [23] CHEN Y, WANG S. Computer-aided product design with performance-tailored mesostructures [J]. *Computer-Aided Design & Applications*, 2008, 5 (1–4): 1–11.
- [24] WANG H, CHEN Y, DAVID W R. A hybrid geometric modeling method for large scale conformal cellular structures [C]//Proc. ASME.

ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers & Information in Engineering Conference, DETC2005-85366: 1-7.

[25] 康进武, 上官浩龙, 邓承佺, 等. 智能铸型研究 [C]// 2017中国铸造活动周论文集. 中国机械工程学会铸造分会, 2017: 450-456.

[26] 上官浩龙. 基于3D打印的镂空砂型研究 [D]. 北京: 清华大学, 2018.

[27] WANG J, ZHENG L, KANG J, et al. Study on the directional solidification process of an aluminum alloy bar in multi-shell mold being gradually immersed in water [J]. Materials, 2020, 13: 2197.

[28] 邓承佺. 中空砂型设计及应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2018.

[29] LIU B, KANG J, YANG X, et al. Effects of hollow sand mold on the microstructure and mechanical properties of a low pressure aluminum alloy casting [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 4488-4497.

(文章转载自China Foundry, 2024年第5期)

---

## Design and Generation Method of Hollow Mold (Sand Core)

KANG Jin-wu, LIU Bao-lin, JING Tao, SHEN Hou-fa

(School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Beijing 100084, China)

### Abstract:

In casting production, it is typically challenging to exert effective control over the casting's shaping process, which is primarily owing to that the mold (sand core) is dense structure. To achieve precise control during the casting's shaping process, this paper proposes the concept, design and generation method of hollow mold (sand core) for green intelligent casting. The hollow mold (sand core) comprises a thickness-adaptive shell forming the casting cavity and a variety of peripheral (internal) hollow structures. The shell may also be designed as hollow, while the peripheral (internal) hollow structures include trusses, reinforced ribs and multi-layer shells, etc. A design theory for hollow structures is proposed, which considers several factors, including the static pressure of liquid metal, the buoyancy force, the heat-induced strength degradation of the mold or core, the bending moment of the hollow structure, and other factors. The method of coupling surface discretization and spatial discretization, in conjunction with numerical simulation, is employed to facilitate the automatic generation of hollow structures. This has led to the development of a dedicated hollow mold (sand core) design software, which enables the rapid generation of hollow mold (sand cores) that are not dependent on modelling software. The hollow mold (sand core) enables more flexible and differentiated control during the casting process, which in turn provides the basis for the control of microstructures, properties and defects of castings. The hollow mold (sand core) is prepared using 3D printing technology, and it can be used to realize engineered cooling during the casting process, with its application efficacy has been demonstrated through experiment. Furthermore, a weight reduction of more than 50% has been achieved through this method, which significantly reduces the cost of 3D printing and greatly promotes the 3D printing casting technology.

### Key words:

intelligent casting; hollow mold; hollow sand core; generation method; engineered cooling

---