基于 JSCAST 熔模铸造锥形件的尺寸控制工艺方案优化

王艺卓，郭怡琳，杨　柳，马晓龙
（西安皓森精铸股份有限公司，陕西西安 710089）

摘要：针对轮廓尺寸为Φ430 mm × Φ250 mm × 188 mm、壁厚5~40 mm的CF8M锥形薄壁回转体熔模铸件在铸造中易发生气孔、变形及尺寸超差的问题，开展工艺优化研究。采用JSCAST软件对顶注式浇注系统及铸件的充型、凝固及冷却过程进行数值模拟，设定浇注温度1 580 ℃、型壳厚度12 mm、充型速度250 mm/s，预测气孔风险区、缩孔缩松倾向及位移变形分布。基于模拟结果，设计反变形补偿量：口部锥角整体减小1.5°，底盘平面设置1.2 mm斜度补偿；蜡模阶段在底盘放置冷蜡块，射蜡温度60 ℃ ± 5 ℃、注射压力2.4 MPa ± 0.2 MPa、保压400~450 s；浇注采用机械手倾斜叉壳、25~30 s平稳浇注，模壳1 050 ℃预热2 h，浇后以钢柱撑起模壳底面悬空空冷。变形模拟显示优化前口部合成位移约2.5 mm、底盘约1.2 mm，径向上下变形差0.7 mm、轴向上下差1.5 mm；优化后预测锥角回弹至29.8°~30.2°、平面度0~0.2 mm。实际试制产品表面无气孔裂纹，100%X射线探伤（ASTM E446 2级）无疏松、夹渣；关键尺寸实测符合要求；动平衡去量后克重为0.14~1.55 g（要求<2 g），100%合格。反变形补偿结合全流程工艺控制可有效消除锥形薄壁铸件的尺寸偏差，无需后续矫正工序，该策略对同类轴对称薄壁回转体铸件的尺寸精度控制具有工程参考价值。

关键词：熔模铸造；锥形薄壁件；JSCAST；反变形补偿；尺寸控制；CF8M
中图分类号：TG142.71　**文献标识码：**B　**文章编号：**1001-4977（2026）09-1058-08
DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0135

Optimization of Dimensional Control Process Scheme for Investment Casting of Conical Components Based on JSCAST

WANG Yi-zhuo, GUO Yi-lin, YANG Liu, MA Xiao-long
(Xi′an Haosen Precision Casting Co., Ltd., Xi′an 710089, Shaanxi, China)

Abstract: To address the blowhole, deformation and dimensional deviation problems in the investment-cast CF8M thin-walled conical rotatory body investment castings with external dimensions of Φ430 mm×Φ250 mm×188 mm and wall thickness of 5-40 mm, a process optimization study was carried out. The JSCAST software was used to numerically simulate the mold filling, solidification and cooling processes of a top-gating system and casting, with parameters including pouring temperature 1 580 ℃, shell thickness 12 mm and filling velocity 250 mm/s, to predict the blowhole risk zone, shrinkage porosity tendency and displacement deformation distribution. Based on the simulation results, the anti-deformation compensation values were designed: the mouth taper angle was reduced by 1.5° and a 1.2 mm slope compensation was added to the bottom plate; during the wax pattern preparation stage, the chill wax blocks were placed at the bottom plate, and the wax injection temperature was 60 ℃±5 ℃, the injection pressure 2.4 MPa±0.2 MPa and the holding time 400-450 s; the pouring was conducted smoothly by a robot tilting fork housing within 25-30 s, with shell mold preheating at 1 050 ℃ for 2 h, followed by air cooling with the shell molds suspended on steel supports from the bottom after pouring. The deformation simulation showed that before optimization, the resultant displacement was about 2.5 mm at the mouth, and about 1.2 mm at the bottom, and the radial top-to-bottom deformation difference was 0.7 mm and the axial top-to-bottom difference was 1.5 mm. After optimization, the taper angle was predicted to recover to 29.8°-30.2° and flatness to 0-0.2 mm. The actual trial castings had sound surfaces without blowhole or crack, and 100% X-ray inspection (ASTME446 Level 2) revealed no shrinkage porosity or inclusions; all critical dimensions met the drawing requirements; the post-dynamic-balancing weights were 0.14-1.55 g (requirement <2 g), with 100%

基金项目：西安皓森精铸股份有限公司离心机系列开发项目（202506）。
收稿日期：2026–04–08 收到初稿，2026–04–24 收到修订稿。
作者简介：王艺卓（1998–），女，硕士，主要研究方向为熔模精密铸造。电话：18821772712，E-mail：1278786805@qq.com
通信作者：杨柳，女，工程师。电话：18209272783，E-mail: 361029340@qq.com
引用格式：王艺卓，郭怡琳，杨柳，等 . 基于 JSCAST 熔模铸造锥形件的尺寸控制工艺方案优化 [J]. 铸造，2026，75（9）：1058–1064.
Wang Yizhuo，Guo Yilin，Yang Liu，et al. Optimization of dimensional control process scheme for investment casting of conical components based on JSCAST [J]. Foundry，2026，75（9）：1058–1064.

qualification. The anti-deformation compensation combined with the full-process controls can effectively eliminate dimensional deviations of the thin-walled conical castings without subsequent straightening, and this strategy is of a practical engineering reference value for the dimensional accuracy control of similar axisymmetric thin-walled rotatory body castings.

Key words: investment casting; thin-walled conical part; JSCAST; anti-deformation compensation; dimensional control; CF8M

精密铸造过程中金属液充型和凝固伴随着复杂的物理与化学变化，加之形状复杂的铸件其工艺方案、结构设计不佳等因素，铸件容易产生缩孔、缩松、气孔、浇不足及变形等严重影响铸件质量和外观的缺陷[1-3]。近年来，顶部上盘系列锥形薄壁回转体类产品，对于冶金质量、动平衡精度与尺寸稳定性均提出了更高要求。本研究所制备的大口径顶部上盘铸件，最大壁厚40 mm，最小壁厚5 mm，口部直径Φ430 mm，铸件整体轮廓壁厚差异显著，铸造过程中极易发生变形，口部圆度难以控制，进而导致铸件尺寸超差。此类问题会直接造成后续机加工后余量不均、切削加工无法正常完成，以及动平衡无法去量等问题，最终致使产品报废，大幅度增加生产成本。

目前，国内外技术人员已在铸件变形控制领域开展大量研究，研究方向主要集中在数值模拟预测及局部工艺优化等方面[4]。卫东海等[5]利用JSCAST模拟砂铸工艺浇注QT600-3应力框铸件，预测应力及变形趋势，提出减小铸件应力及变形的措施；陈兴福等[6]通过采用模具分体压制，模具组合成型的方式严格控制铸件尺寸精度可达到CT4要求；范修谦等[7]通过设计矫正工装提高方齿圆盘类结构的尺寸精度。

本研究中的薄壁锥形回转体结构具有特殊的轴对称特性，矫正工装必须保证360°均匀受力，不仅制作工装成本高，周期长，且工装尺寸偏大，现场装配与操作难度较大。基于实际生产需求，以本公司开发的11款顶部上盘中的某一典型产品为研究对象，依托JSCAST数值模拟提前预判铸件尺寸变形规律，从设计反变形补偿量预设，到生产全流程各工序精准控制，在不采用任何矫正工艺的前提下，实现了铸件最终尺寸及动平衡性能达标。研究结果可为同类薄壁锥形回转体铸件的开发提供试验数据支撑，在新品开发阶段省去矫正工序，显著降低开发成本，稳定铸件尺寸精度。

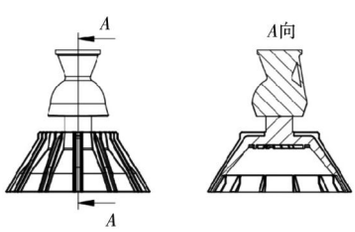
1 铸件基本信息工艺分析

锥形顶部上盘产品材质CF8M化学成分见表1，轮廓尺寸Φ430 mm × Φ250 mm × 188 mm，单重29.38 kg，最大壁厚40 mm，最小壁厚5 mm，铸件由上至下壁厚逐渐减小。采用熔模铸造工艺生产，铸造尺寸依据GB/T 42124.3—2025《铸件尺寸公差、几何公差与机械加工余量》的DCTG 7级验收。铸件内部不允许有疏松、缩孔、夹渣等缺陷。NDT检测要求为全铸件100%RT检测，检测级别为ASTM E446中2级。机加后进行动平衡测试，要求在规定范围内去量后动平衡克重<2 g。

表1 CF8M化学成分
Tab. 1 Chemical composition of CF8M w_B/%

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo
≤0.08	≤1.5	≤2.0	≤0.04	≤0.04	18.0~21.0	9.0~12.0	2.0~3.0

如图1所示，工艺采用顶式浇注系统，金属液从型腔顶部注入，在重力作用下充向型底，该铸件壁厚由上至下是由厚变薄的状态，因此金属液对下方薄壁位置有足够补缩，并且冷却时下方薄壁先冷却，形成由下至上，先铸件，再浇口的顺序凝固[8-9]过程。



（a）主视图 （b）剖视图

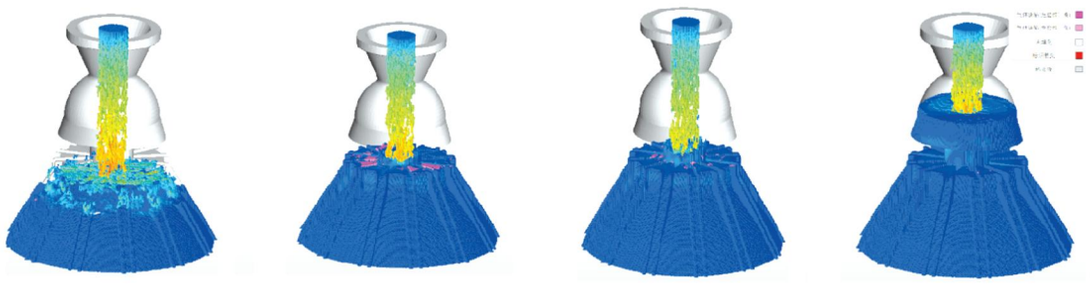
图1 浇注系统及铸件
Fig. 1 Gating system and casting

2 JSCAST模拟分析

采用三维造型软件SolidWorks建模并输出铸件铸型STL格式文件，将STL文件导入JSCAST中。先导入材料：CF8M、锆英砂、莫来砂，再进行铸型定义，划分网格，然后设定流动、凝固和变形的计算条件[10-12]。关键参数设置如下：铸件材料为CF8M，其浇注温度为1 580 ℃；型壳厚度大约12 mm，外表面设为空气冷却；使用速度计算器设置充型速度为250 mm/s；铸造变形应力计算设定铸件最终温度为20 ℃。最后进行数值模拟，模拟结果如下。

2.1 流动

因该浇注系统设计导致金属液直冲型腔表面并产生紊流卷气，铸件浇口根部产生卷入性气孔[13-15]，如图2所示为金属液在不同时间的充型状态，蓝色代表充型



（a）5 s （b）7 s （c）10 s （d）15 s

图2 金属液填充状态

Fig. 2 The mold filling state of liquid metal

的金属液，色卡显示红色代表气体缺陷，颜色越深，气体缺陷危险性越高。图2表示在5 s、7 s、10 s和15 s是金属液充填状态，可以看出，在注满产品下半部分时，铸件无明显气体缺陷；图2（b）即将填满整个铸件，底盘平面大面积红色，表示该位置有卷气，产生气孔的风险；图2（c）为金属液已基本充填满铸件型腔，底盘平面浇口周围有气孔缺陷，是因为模壳透气性有限，无法及时排出钢液中气体，形成气孔；图2（d）显示铸件，浇口及部分浇道已被金属液充填，底盘平面有个别红色缺陷。因此，在浇注过程中底盘表面容易产生气孔缺陷，这也与我们现场试浇注铸件结果一致，使铸件后处理困难，成本提高。

2.2 凝固

根据模数法[16]设计计算浇口尺寸，浇口直径设定为80 mm，高度50 mm。通过JSCAST软件对铸件进行凝固模拟，以临界固相率（f_s=0.70）为判据分析缩孔缩松风险，结合图3云图可见：仅顶部浇口杯区域呈现红色，形成集中热节。从原理上看，热节是局部凝固滞后、易形成孤立液相的区域，是缩孔缩松的主要诱因[17-18]。本次模拟中，铸件本体凝固时间差异小、温度梯度平缓，未形成孤立热节，无封闭液相区，因此不存在缩孔缩松风险；浇口杯热节符合补缩设计预期，可作为补缩源，为铸件提供有效补缩。

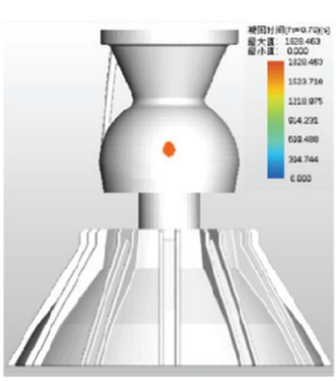


图3 缩孔缩松预测结果

Fig. 3 Prediction results of the shrinkage cavities and porosities

凝固模拟结果显示，铸件本体未形成热节，仅浇口杯存在集中热节，该热节可保障补缩效率，铸件本体无缩孔缩松缺陷风险，工艺符合顺序凝固要求。

2.3 变形

该产品目前最大技术难点在于过程变形，由于结构壁厚差异显著，温度场分布不均引发的各区域收缩不同步、热应力累积导致的尺寸与形状偏移[19-20]。采用JSCAST对铸件在凝固及后续冷却过程进行数值模拟，为该铸件生产工艺优化提供数据支撑，为后续实现尺寸合格奠定基础。经JSCAST软件模拟，得到铸件变形结果如下：图4为铸件凝固后位移变形分布，以及变形倍率放大10倍后的变形效果示意图。

该产品是绕“*Y*轴”360°对称的回转体圆锥形结构，*X*和*Z*向变形基本一致，称为“径向变形”；*Y*向变形称为“轴向变形”。从模拟结果可见，整体呈现中部凹陷、口部张开的变形特征，结合位移色标对比可知：口部变形量最大，合成位移为2.5 mm左右，向上变形量依次减小，底盘位置整体变形量最小，合成位移为1.2 mm左右。

径向（*X*、*Z*向）变形方面，底盘位置变形位移最大，约为1.2 mm，靠近口部位置变形位移相对较小，约0.5 mm左右。产品出现明显锥形角度扩大，主要原因是因为底盘壁厚较大，金属液收缩大，径向收缩显著，而口部位置壁薄收缩量小，致使径向上下变形量相差0.7 mm，最终表现为锥角张开。

轴向（*Y*向）变形方面，靠近口部位置变形量最大，位移约2 mm；底盘位置轴向位移最小，基本在0.5 mm左右，轴向上下变形量相差1.5。其机理为：底盘壁厚大，以径向收缩为主，口部壁薄冷却速度较快，在底盘收缩牵引作用下，薄壁口部呈现扩张、上翘趋势。

此外，底盘呈现凹陷状态，在底盘的同一平面内，浇口正下方与距浇口最远端的轴向位移相差约0.7 mm，主要是浇口区域收缩量大加之浇口杯金属

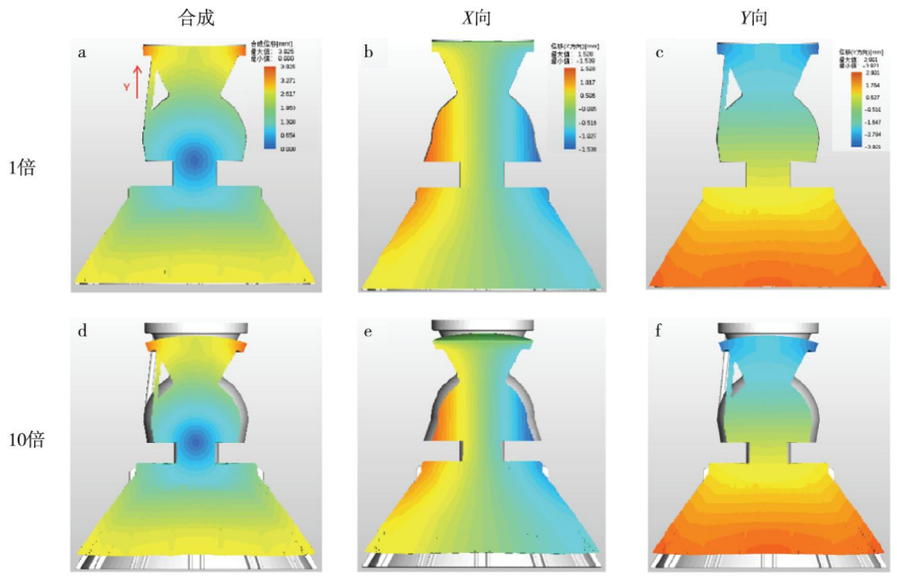


图4 铸件位移变化分布

Fig. 4 Distributions of displacement changes in the casting

液重力作用的叠加效应所致，最终呈现该产品口部张开，中间凹陷的整体变形形态。

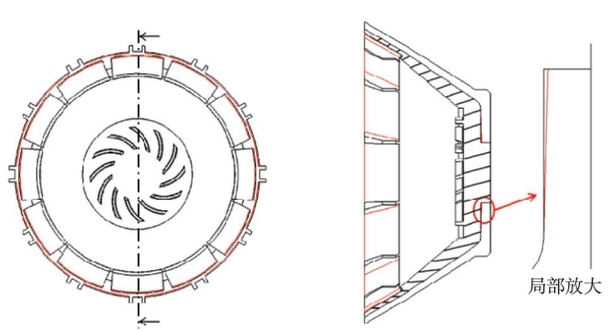
3 工艺方案优化

基于以上模拟及实际试验生产情况，该产品主要难点问题为铸件变形，尺寸超差。因此，在设计制造该产品时，从模具三维模型设计到蜡模，及铸件成形过程控制制定一套针对该类型结构变形的工艺方案，减少铸件变形后的矫正工序，节省成本。此外制造该产品过程我们还需关注表面气孔、内部缺陷等问题。

3.1 蜡模模具三维设计与数值模拟

2.3节中提到，径向口部变形量为1.2 mm左右，底盘变形量为0.5 mm左右。利用SolidWorks建模显示，该偏移量下铸件变形角度将增大1°。此外，该产品在蜡模制作过程中也会变形，根据以往同类型产品经验，蜡模角度会增大0.5° ± 0.2°。因此在蜡模模具三维设计时，调整三维模型形状，给予口部角度1.5°的补偿量，即原三维模型口部角度为30°，调整后为28.5°。此外，2.3节中提到浇口正下方凹陷情况，在底盘平面上，浇口正下方与浇口最远处轴向变形量相差0.7 mm，蜡模变形会导致凹陷0.5 mm，最终铸件呈现结果为中间凹陷1.2 mm左右的量，因此在蜡模模具三维设计时，给予此位置从中间向周围1.2 mm的斜度补偿量。

图5为调整反变形补偿后的三维模型与原三维模型的装配对比。为清晰体现二者轮廓差异，基于SolidWorks装配环境采用消除隐藏线模式进行显示，其中红色线条为反变形补偿后模型外轮廓，黑色为原始模型外轮廓。由图5（a）可见，经反变形补偿后，模型口部整体径向收缩，对应施加1.5°的角度补偿量；图5（b）则反映了针对结构凹陷所设置的1.2 mm斜度补偿。需说明的是：补偿位置依据产品实际加工工艺确定，该区域为非加工面，要求毛坯一次成形到位，故需进行预补偿；其余未补偿区域后续将通过机加工保证尺寸精度，具备充足的加工余量，因此无需预先反变形调整，并非忽略其变形影响。



（a）俯视图 （b）剖视图

图5 调整前后的铸件三维模型

Fig. 5 The three-dimensional molds of the casting before and after adjustment

采用反变形补偿优化后的三维模型，在相同边界条件下开展变形数值模拟。由图6可见，优化后模拟所得整体变形量小于优化前，表明锥形构件的变形行为与锥角密切相关，锥角越小，整体变形量越小。但是变形趋势基本一致，且对应位移变化量基本一致，可预测经反变形补偿设计为28.5°的锥角，在铸件成形过程变形后可回弹至目标角度30°。表2为三维模型优化前后调整的锥角与平面度在最初开模三维模型-蜡模-铸件

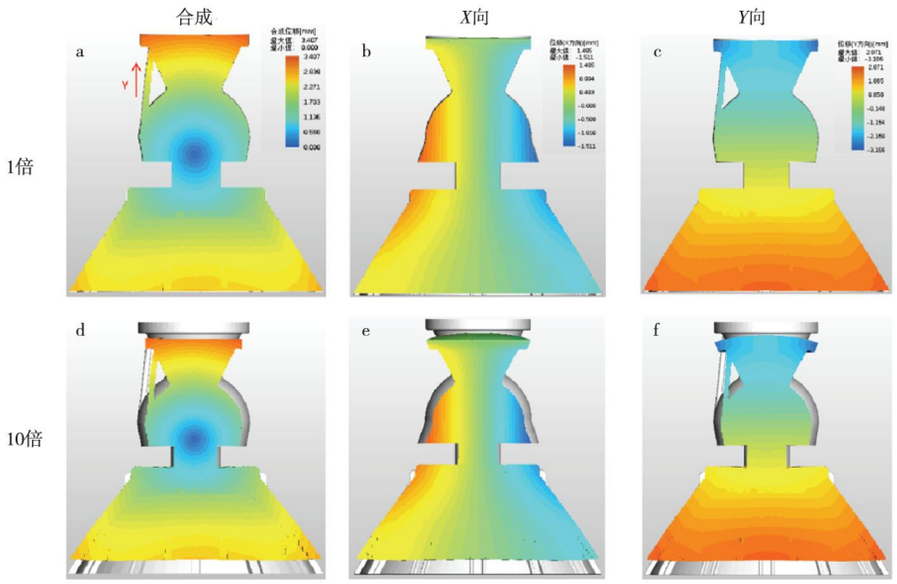


图6 优化后铸件位移变化分布

Fig. 6 The distributions of displacement changes of the optimized casting

表2 优化前后尺寸模拟预测

Tab. 2 Simulation prediction of dimensions before and after optimization

参数	图纸要求	优化前			优化后		
		三维模具模型	蜡模	铸件	三维模具模型	蜡模	铸件
角度/（°）	30 ± 0.5	30	30.3~30.7	31.3~31.7	28.5	28.8~29.2	29.8~30.2
平面度/mm	≤0.5	0	0.3~0.5	1~1.2	1.2	0.7~0.9	0~0.2

的具体数值变化预测，结果表明预测值满足最终图纸要求尺寸精度。后续将基于该优化三维模型开展模具加工，并通过实际生产试验对产品成形精度进行验证。

3.2 蜡模制备与涂料控制

由于底盘壁厚与口部壁厚差异较大，在底盘位置设计冷蜡块，减小底盘蜡模收缩。射蜡温度为60 ℃ ± 5 ℃，合模压力为80 t，注射压力为2.4 MPa ± 0.2 MPa，保压时间为400~450 s，冷却方式为水冷，蜡模表面无油纹、无裂纹，整体收缩均匀。挂壳采取两层面层、七层加固层，保证型壳强度与透气性，及铸件表面质量。

3.3 浇注与凝固

对于CF8M材质一般使用浇注温度为1 560~1 580 ℃[21]，由于该铸件口部壁厚为5 mm，相对较薄，因此浇注过程有浇不足风险[22]，在不过热情况下尽量选择较高温度浇注。在2.1部分，模拟结果显示底盘表面有较大面积气孔风险，因此采用机械手叉壳倾斜浇注方式浇注，浇注需缓慢平稳，以免卷气形成气孔缺陷。此外，该产品因最终需要进行动平衡检测，动平衡克重要求<2 g，口部圆度需<1.5 mm，因此在浇注后的冷却放置采用特殊装置，将整个模壳从中间底面厚大部位撑起，避免口部薄壁部位局部受力，撑起后可使得口部圆360°均匀受力，均匀收缩。

因此，该浇注与凝固通过以下方式控制铸件内部质量与尺寸：浇注温度为1 580 ℃，模壳预热温度为1 050 ℃，预热时间为2 h，浇注时间为25~30 s，浇注方式为机械壁倾斜叉壳，平稳浇注，浇注完成后的模组，需使用钢柱支撑工装将模组支撑悬空，进行自然冷却。

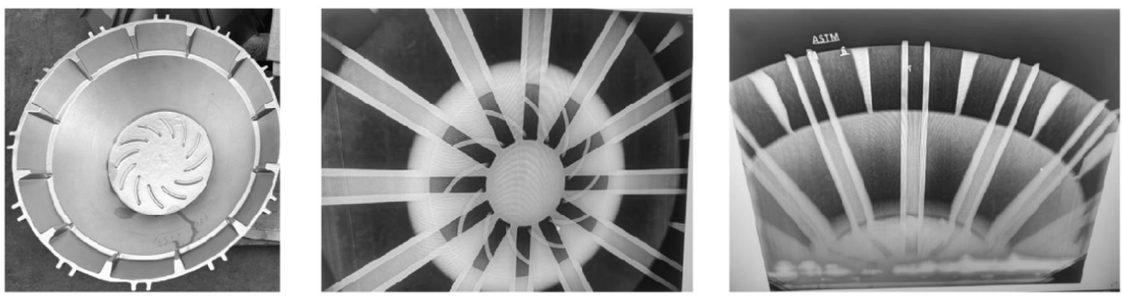
4 验证结果

4.1 铸件表面与内部缺陷验证

如图7所示，经投产验证，在该工艺方案下，铸件表面质量良好，无气孔、裂纹等表面缺陷。对试制铸件进行X射线探伤检测，探伤结果显示内部无疏松、夹渣等缺陷。

4.2 尺寸验证

图8所示为关键控制尺寸，分别为口部直径、口部上5 mm位置的圆度、锥形角度和凹陷位置平面度。采用量程0~500 mm数显游标卡尺测量口部直径，该量程



（a）外观　（b）底盘位置　（c）口部位置

图7　铸件质量检测

Fig. 7 The casting quality inspection

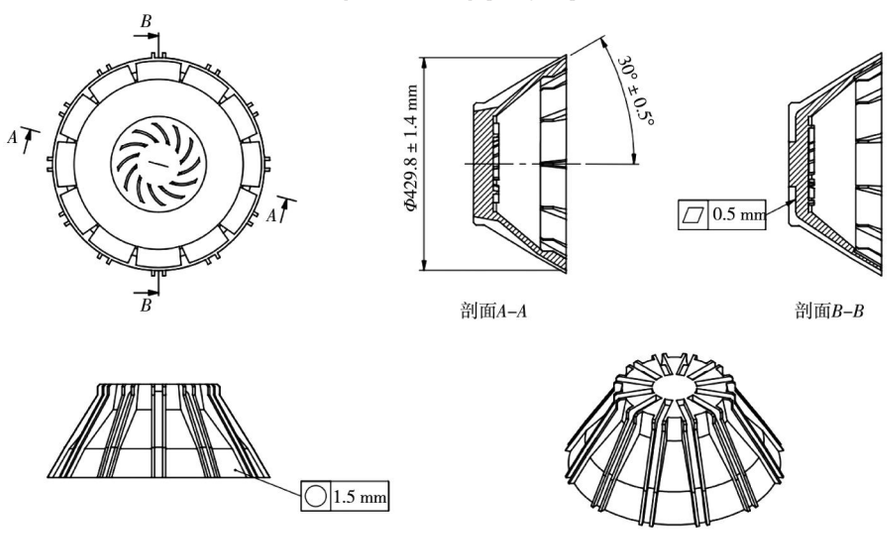


图8　关键尺寸标注

Fig. 8 Key dimension marking

卡尺最大允许测量误差为 ± 0.05 mm；采用德国ZEISS三坐标在零件表面采集坐标点对圆度、角度和平面度进行测量，仪器分辨率0.001 mm；每组特征重复测量3次，所有尺寸测量均在室温23 ℃ ± 1 ℃、相对湿度50%的标准试验环境下完成。表3为其关键尺寸实测均值，可以看出经过反变形量补偿、蜡性阶段和浇注凝固阶段的稳定性控制，最终关键尺寸都在合格范围内，与模拟预测基本相同，也说明JSCAST对变形量预测的准确性。

4.3　加工与动平衡验证

该产品在高转速下工作，微小质量不均会产生巨大离心力，直接引发剧烈振动、磨损和精度下降，甚至至整机损坏与安全事故。依据图纸要求对加工后的产品进行动平衡测试。图9及表4为动平衡测试方案及3件产品去量前后动平衡实测结果。结果显示动平衡在图纸要求位置去量后合格（<2 g）。

表3　尺寸实测结果

Tab. 3 Measurement results of dimensions

项目	口部直径/mm	角度/（°）	口部圆度/mm	平面度/mm
测量方法	数显卡尺	三坐标	三坐标	三坐标
图纸要求	Φ429.8 ± 1.4	30 ± 0.5	1.5	<0.5
实测	Φ430.78	29.78	0.91	0.15
	Φ431.02	29.95	0.8	0.24
	Φ430.8	29.84	0.56	0.4

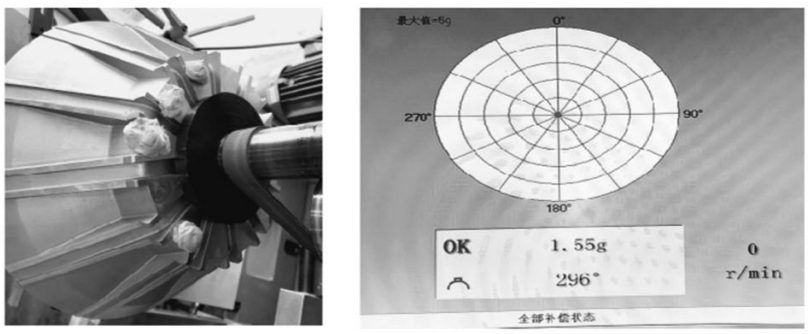
表4　动平衡测量值

Tab. 4 Balance measurement values

产品编号	去量前/g	去量后/g
1	180	1.55
2	150	0.55
3	156	0.14

5　结论

（1）借助JSCAST数值模拟技术，对该类型产品进行了浇注、凝固和变形过程产生缺陷预测，并结合实际得出结论。浇注过程金属液直冲或快浇容易卷入气体，在铸件表面形成气孔缺陷；根据模数法计算的浇冒口尺寸Φ80 mm × 50 mm的设定，足以补缩铸件，铸件本体无缩孔缩松缺陷风险，工艺符合顺序凝固要求；变形模拟得出该锥形回转体整体呈口部扩张翘



（a）动平衡装置　　（b）去量后结果

图9　动平衡测试

Fig. 9 Dynamic balance test

起、中间凹陷的变形趋势。铸件径向上下端相差0.7 mm的变形量，轴向上下相差1.5 mm变形量，此外铸件在底盘同一平面上轴向的变形量相差0.7 mm。

（2）基于模拟结果制定工艺方案：由变形模拟得知具体位置变形量，制作模具时设计三维模型反变形补偿量，锥形角度整体减小1.5°，底盘平面增加1.2 mm的斜度补偿，采用优化后的三维模型进行模拟预测优化后的尺寸；压制蜡模时在底盘位置放置冷蜡块，使整体蜡型收缩均匀，减小蜡型变形量；浇注过程采用机械臂叉壳，倾斜旋转平缓浇注，避免气孔缺陷产生；浇注后将整个模壳从中间底面厚大部位撑起悬空放置空冷，避免口部薄壁部位局部受力，均匀收缩。

（3）通过优化后的方案生产批量产品，外观质量良好，无气孔、疏松等缺陷；X射线探伤结果显示，铸件底盘、口部均无缺陷；关键控制尺寸实测结果显示，过程控制的4个关键尺寸符合验收标准。此外该产品批量生产加工后实现全尺寸、动平衡（<2 g）100%合格。

参考文献：

[1] 侯华. 铸造充型凝固过程宏微观数值模拟及工程应用 [D]. 太原：中北大学，2005.

[2] Zhao Y H，Zhang B，Hou H，et al. Phase-field simulation for the evolution of solid/liquid interface front in directional solidification process [J]. Journal of Materials Science & Technology，2019，35（6）：1044–1052.

[3] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势 [J]. 铸造，2012，61（10）：1105–1115.

[4] 杨敬伟. 大型铸钢件冒口补浇的数值模拟 [J]. 金属加工（热加工），2018（12）：23–24.

[5] 卫东海，李克锐，吴现龙，等. 铸铁件应力与变形的数值模拟及试验研究 [J]. 铸造，2013，62（2）：134–137.

[6] 陈兴福，刘浩然，吴亚夫，等. 薄壁复杂扩压器部件熔模精密铸造工艺研究 [J]. 铸造，2014，63（8）：806–808.

[7] 范修谦，袁建强. 缆车转环精铸件的矫正与测量 [J]. 特种铸造及有色合金，2014，34（5）：515–516.

[8] 周韬，彭祥，徐达义，等. 大型球墨铸铁机床床身材质和铸造工艺优化设计 [J]. 铸造，2026，75（7）：791–797.

[9] 黄宏，李峰，胡海涛，等. 大型复杂薄壁TiAl合金扩压机匣精密铸造数值模拟与工艺优化 [J/OL]. 航空材料学报，2026-06-23，https：//kns.cnki.net/kcms2/article/abstract.

[10] 宋春丽，裴小龙，陈利文，等. 大型薄壁复杂铝合金舱体件低压铸造模拟对比分析 [J]. 特种铸造及有色合金，2023，43（6）：794–799.

[11] 朱金东，大中逸雄，木下文昭，等. 铸造软件JSCAST在压铸缺陷预测及压铸模具设计中的应用 [C]// 中国机械工程学会. 第八届中国国际压铸会议论文集，2012：152–157.

[12] 胡清明，刘斌，余熳烨，等. 基于数值模拟技术镁合金压铸模浇注系统优化设计 [J]. 模具工业，2009，35（7）：11–15.

[13] 吴贝，熊京鹏，谷立东，等. 镁基材料半固态压铸成形研究进展与展望 [J]. 特种铸造及有色合金，2026，46（4）：496–507.

[14] 顾国明，景宗梁.熔模精密铸造技术及应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2021.

[15] 刘一军. 4G93SD4气缸盖低压铸造数值模拟及工艺优化 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2007.

[16] 王顺程，沈黎，马勇. 基于正交试验冷却器盖压铸工艺设计与模拟优化 [J]. 特种铸造及有色合金，2025，45（9）：1291–1296.

[17] 张浩正. K4648镍基高温合金异型结构件铸造过程数值模拟及实验研究 [D]. 长沙：中南林业科技大学，2025.

[18] 祁小玲. 柱塞泵铜钢双金属缸体的熔铸复合工艺及组织性能研究 [D]. 济南：山东大学，2025.

[19] 陈宇豪，尹昊，李伟东，等. 熔模铸造全流程变形模拟预测与误差遗传机制 [J]. 铸造，2026，75（6）：653–662.

[20] 余童. 航空发动机高温合金导向器铸件变形控制研究 [D]. 上海：上海工程技术大学，2021.

[21] 罗宏煜. 液固浇铸不锈钢/碳钢复合圆坯数值模拟及实验研究 [D]. 鞍山：辽宁科技大学，2025.

[22] 李庆庆. 基于ProCAST的复杂形貌耐热不锈钢薄壁件模拟与工艺研究 [D]. 西安：西安工业大学，2025.

（编辑：刘东辉，ldh@foundryworld.com）