

精铸件收缩率分布规律研究进展

卜 昆,张雅莉,于 茜,邱 飞,田国良

(西北工业大学航空发动机高性能制造实验室,西安 710072)

[摘要] 空心涡轮叶片作为航空发动机的关键热端部件,通常采用近净形熔模精密铸造工艺制成,其成型质量偏低、废品率极高。首先介绍了熔模精密铸造技术在精确控形方面的研究现状,分析发现,在模具设计时收缩率赋值的准确与否直接影响精铸件的尺寸精度。然后概述了精铸件凝固过程收缩率的各影响因素,重点分析了收缩率的结构相关性研究进展。最后,总结了空心涡轮叶片等精铸件的收缩率分布规律研究成果。

关键词: 熔模精密铸造;尺寸精度;精确控形;收缩率;结构

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.20.037



卜 昆

教授、博士生导师,主要研究方向为计算机辅助技术、现代设计集成制造、精密熔模铸造技术、成形加工过程的仿真优化。

近净形熔模精密铸造是一种精度高并且后续加工少(无)切削的特殊铸造方法,主要用于生产各种复杂空腔结构并且本身材料难以机加工的航空航天热端部件^[1-3],如空心涡轮叶片、整体叶盘、导向器等复杂异型结构^[4]。

空心涡轮叶片作为高推重比涡轮发动机的关键热端部件,其作用是将高温、高压燃气热能转变为旋转运动的机械能。国内单晶空心涡轮叶片的合格率很低,仅30%左右。叶片铸件不合格因素中,铸造缺陷约占15%,再结晶问题约占25%,叶片型面和壁厚尺寸超差占比高达50%^[5]。然而,现阶段针对涡轮叶片尺寸精度控制的研究较少,造成叶片精确控形难度大的原因有二:一是叶片具有流线型外廓,而且内腔结构精细复杂;二是在熔模精铸多个工序中,叶片会由于各种原因引入尺寸超差和变形^[6],且变形不易控制。

熔模精铸的主要工装为精铸模具,对精铸件的成型质量起着决定性作用。在模具设计过程中,关键一步就是依据收缩率对模具型腔进行放形,符合实际情况的收缩率赋值能够有效补偿精铸件的收缩变形,因此如何准确分析并预测收缩率是国内精铸件尺寸精度控制的一大难题。针对该问题进行研究,有利于提高模具尺寸精度、降低制模成本及修模次数、缩短精铸件研制周期,对提高我

国精铸叶片等航空航天部件的设计制造整体水平具有重要的研究意义和工程应用价值。

近净形熔模精密铸造技术

熔模精密铸造工艺过程复杂,如图1所示,目前工厂车间生产精铸件的工艺流程一般为:首先通过模具成型的方式获得陶瓷型芯,然后将其与蜡型模具匹配,压制出带有陶芯的蜡模,再经过蜡模组合、涂制型壳、脱蜡烧结、浇注成型、脱壳脱芯、修整、尺寸检测、材料组织性能检测等工序,最终得到合格的精铸件^[2]。我国的熔模精密铸造技术水平与发达国家相比仍有较大差距,主要集中在精密铸造技术基础理论以及复杂结构在精铸过程中收缩变形规律、单晶叶片制造技术及再结晶控制等领域。

数值模拟技术已广泛应用于熔模精密铸造领域^[7-9],能够模拟得到铸件充型、凝固和冷却过程的流场、温度场、应力场、位移场和微观结构等,对于优化模具型腔设计、降低成本、提高生产率具有重要的指导意义。数值模拟研究很有可能取代试错法,

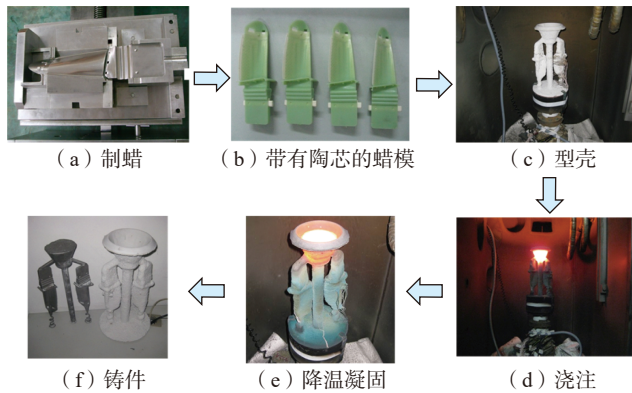


图1 熔模精密铸造基本工艺流程图

Fig.1 Basic process flow chart of investment casting

成为提高铸件质量的有效途径。

为提高涡轮叶片等精铸件的成型品质和合格率,近净形熔模精密铸造技术发展主要包含两方面:一方面控制材料的微观组织从而获得理想的材料性能,即针对铸件进行“精确控性”研究;另一方面以控制铸件结构和尺寸精度使其达到设计要求为目的,开展“精确控形”技术研究。

在铸件“精确控形”技术领域,国外相关研究起步较早,已积累了雄厚的科研和工业实力,属于严密封锁技术,有数据显示,国外某著名发动机公司生产的涡轮导向叶片,实心叶片合格率达90%左右,复杂型腔空心叶片合格率达70%^[10],而我国尚达不到这个水平。关于“精确控形”,国内主要通过优化射蜡温度、射蜡时间、射蜡压力、冷铜温度、型壳预热温度、浇注温度和抽拉速率等工艺参数,以提高蜡模和铸件的尺寸精度^[11-12],而关于模具对铸件成型精度的影响研究较少。据国内某叶片生产单位统计,采用国内的模具时,某型号涡轮叶片精铸成品率不到40%;但采用从国外引进的模具,由国内转包生产时,成品率可达80%以上^[13],由此说明模具的设计制造技术是影响涡轮叶片几何形状与尺寸精度的主要因素。而铸造收缩率是设计叶片模具的关键参数之一^[14],依据收缩率对模腔进行预放形,可有效补偿

铸件精铸过程中的收缩变形,有利于提升叶片尺寸精度。

精铸件收缩率研究

精铸叶片尺寸精度控制一直是制约航空发动机研制的技术难题,而收缩率的准确赋值是保证铸件尺寸精度的前提。国外在精铸件凝固过程收缩率研究中建立了完备的试验系统和测量系统,并制定了相应的测定标准,相关研究系统而深入^[15]。而国内针对精铸件收缩率的基础研究较少,在模具设计时对铸件收缩率赋值不当,导致铸件容易因尺寸超差而不合格,因此有必要针对熔模精铸过程中铸件收缩问题进行研究。

1 精铸过程中收缩类型

从蜡模制备、型壳制备到最终铸件的铸造过程中,零件尺寸经历了3次传递,每次尺寸传递都不是精确的复制^[16],精铸件最终的总收缩是蜡模收缩、少量的型壳膨胀和铸件合金凝固收缩综合而成^[17]。经研究发现,铸件凝固收缩是造成铸造过程尺寸收缩的主要因素,蜡模收缩和型壳膨胀所起作用有限^[18]。

待叶片等精铸件浇注完成后,液态合金降温凝固,其温度从1550℃左右降至室温,精铸件产生收缩变形,铸件形状和尺寸偏离型壳内腔限制。宏观上表现为液态合金比固态合金占据更多的体积,即铸件几何尺寸小于模具型腔尺寸^[19]。微观上表

现为液态合金冷却凝固形成固态时,原子从无序状态转变成有序状态,铸件凝固收缩是原子呈规则、紧密排列造成的^[20]。在定量分析精铸件凝固收缩时,需按照公式(1)和公式(2)进行铸件收缩量和收缩率的计算,式中 ΔL 为收缩量; K 为收缩率; $L_{蜡模}$ 为蜡模尺寸; $L_{铸件}$ 为铸件尺寸。

$$\Delta L = L_{蜡模} - L_{铸件} \quad (1)$$

$$K = \frac{L_{蜡模} - L_{铸件}}{L_{蜡模}} \times 100\% \quad (2)$$

2 精铸件收缩率的影响因素

近年来,通过对精铸件温度场、应力场和位移场进行系统研究发现,影响铸件收缩的因素分别是材料、工艺条件以及铸件结构^[21-22]。铸件结构决定铸件各部位的收缩率分布趋势^[23],而材料与工艺参数只是决定铸件各部位的收缩率具体数值,并不会改变铸件的收缩率分布趋势,即结构是使铸件各处收缩情况不同的主要因素^[24]。

国内外众多研究者针对影响精铸件收缩的材料和铸造工艺进行了研究。当铸件壁厚在3~10mm范围内且采用相同蜡基模料、型壳材料时,合金结构钢熔模铸件、铝合金熔模铸件、高温合金熔模铸件的自由收缩率参考范围分别是0.8%~1.4%、1.2%~1.4%、1.8%~2.4%^[25]。由于熔模精密铸造工序繁杂,车间操作人员应严格执行工艺规程以减小铸件尺寸波动;工程技术人员也应持续关注各工序的生产状况,根据实际生产情况变化及时调整工艺参数,才能保证铸件的高质量、高出品率^[26]。纪超众等^[27]探讨了从铸件CAD模型到最终铸件的尺寸变化规律,通过优化工艺参数提高了精铸件尺寸精度。针对精铸材料特性或工艺进行深入研究是解决精铸产品尺寸超差问题的途径之一。

铸件结构是影响其收缩的主要因素。在铸件降温凝固过程中,由于铸件具有不均匀壁厚的特点,各部位

冷却和收缩过程不同步会导致铸件不同部位发生不同的尺寸变化^[28]。研究发现,长而薄的铸件在长度方向上收缩较大,在宽度或厚度方向上收缩较小^[29]。铸件受阻收缩部位的收缩率较小,自由收缩部位的收缩率较大^[30]。注蜡过程中局部热积累会导致蜡模产生不均匀的收缩^[31],结构也是影响蜡模收缩的主要因素^[24]。Bonilla等^[32]指出蜡模从注射温度冷却到室温的过程中,除了射蜡参数、模具冷却方式影响蜡模收缩外,零件几何形状也影响蜡模的收缩程度。在其他领域,由于注塑成型与熔模精密铸造工艺流程相似,注塑件收缩研究对精铸件收缩研究具有借鉴意义。注塑件通常具有空腔结构,模具对注塑件收缩过程的阻碍作用不同,导致注塑件各部分的收缩情况产生差异,其中无约束尺寸收缩率可以达到有约束尺寸收缩率的2倍左右^[33]。由于结构对模具成型制品收缩的影响,注塑成型齿轮齿顶的径向收缩率小于齿根^[34],注塑件外部收缩量大于内部收缩量^[35]。所以针对精铸件收缩率的结构相关性进行深入研究,有利于控制铸件的收缩余量,对提高精铸件成型品质和合格率具有重要意义,同时对蜡模收缩和注塑制品收缩研究具有借鉴意义^[36]。

3 精铸件收缩率的结构相关性研究

精铸件收缩率受材料、铸件结构及工艺因素等影响而很难精确确定,为补偿精铸件凝固过程的收缩,传统应对方法是模具设计时,根据材料特性和精铸工艺特点给定一个经验收缩率值对铸件设计模型进行放形,生产实践表明,该方法虽然有利于提高产品合格率,但补偿准确度较低,容易引起尺寸超差问题。该方法存在的明显不足是:假设铸件在不同部位的收缩率数值相同。后来,有学者对传统补偿方法提出了改进,即沿X、Y、Z三坐标轴方向分别对铸件设计模型进行放形,现已成功应用于工

厂,该放形方法在一定程度上提高了模具精度,但因忽略了铸件的具体结构特征,仍不能精确补偿铸件收缩,需要多次修模^[13,37]。为了解决目前收缩率赋值方法未考虑结构因素影响的问题,有必要针对收缩率的结构相关性开展研究。

国外研究者 Sabau^[38]对有孔和无孔阶梯块工件进行了精铸试验,并对铸件最终尺寸和加工容差进行了数值模拟预测,分析了两种结构铸件的凝固收缩率分布规律,发现无孔阶梯块铸件的收缩率更大,铸件位移场云图如图2所示。Herman等^[39]通过对具有相同结构的叶片铸件、蜡模的各截面收缩变形进行分析,发现大多数情况下二者以相同方式发生变形,得到结构相同时其收缩变形趋势一致的结论。

国内对熔模精铸件收缩率的结构相关性研究起步较晚,目前还处于探索与基础研究阶段。针对圆弧结构铸件的所有尺寸,采用相同收缩率对模具进行预放形时,发现铸件内半径尺寸经常大于图纸设计尺寸,为了解决这一问题,周祚超等^[40]通过分析圆弧铸件的收缩行为,提出对铸件内半径采用零收缩率的方法可以解决尺寸超差问题。魏战雷等^[20]设计了如图3所示的长方体、圆柱体、

回字形和环形4种典型结构铸件,通过开展熔模精密铸造工艺试验研究铸件收缩特性,得到了如下结论:当铸件基础尺寸在10~80mm时,铸件的自由收缩率在3.11%~2.09%之间,受阻收缩率比自由收缩率低30%~50%左右。作者所在课题组通过研究发现,在铸造材料、工艺完全相同的情况下,铸件收缩率仍不是线性分布,即铸件收缩变形具有结构相关性的特点。因此,为了保证铸件具有高尺寸精度,在模具型腔设计时,对于铸件不同部位的收缩率应进行差别性设计并赋值,从而精确补偿铸件收缩。

精铸件收缩率分布规律研究与预测

为了改善国内精铸件尺寸超差问题严重,导致合格率降低的现状,针对精铸件结构对其收缩率分布影响规律的研究显得极为迫切。

1 复杂结构铸件收缩率研究与模具优化

空心涡轮叶片精密铸造工序复

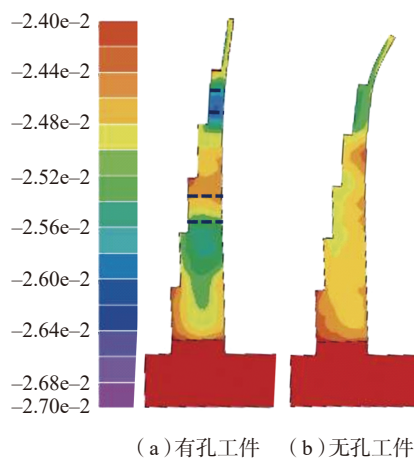


图2 放大15倍的铸件位移场云图 (cm)

Fig.2 Displacement distribution (cm) for castings (Deformation was magnified 15 times)

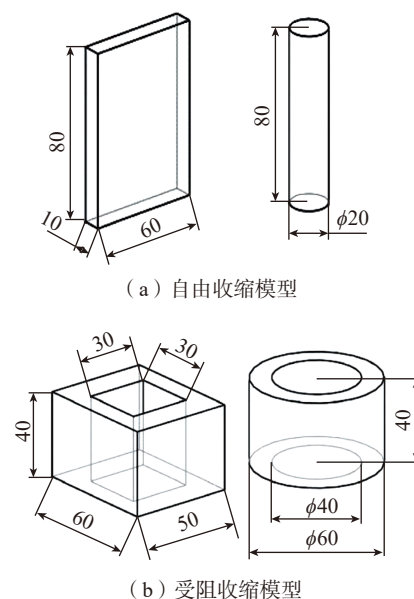


图3 长方体、圆柱体、回字形和环形4种典型结构模型

Fig.3 Four typical structural models of cuboid, cylinder, sigmoid and ring

杂、周期长,是航空发动机所有零件中合格率最低、国外封锁和垄断最为严格的零件之一^[41]。空心涡轮叶片结构复杂,如图4和图5^[42]所示,包括叶身、缘板和榫头。叶身部位包括叶盆、叶背、前缘和后缘,细节结构包括外型面、内型面、纵向肋和横向肋、扰流柱等。通过对叶片精铸凝固过程进行数值模拟,由位移场计算得到叶片某截面的收缩率呈非线性非均匀分布^[43-44],如图6所示。宋得军^[45]和刘杰^[46]等对叶片实测模型与CAD设计模型进行误差计算与分析后,得到前缘和后缘收缩率比叶盆和叶背区域收缩率大的结论,而且叶背收缩率大于叶盆收缩率,叶片产生“抱缩”变形。

精铸模具精度是保证叶片尺寸精度的关键。窦杨青等^[47]将计算

得到的涡轮叶片收缩误差分布曲线应用于模具型腔的优化。Dong等^[48]利用反向迭代算法,通过调整叶型中弧线的几何特征参数,对叶片不同方位的收缩变形进行了有效修正,并以A356合金涡轮叶片为例,采用所提出的模具型腔优化方法后,其尺寸误差大幅度降低。Zhang等^[49]提出了一种基于逆向工程的涡轮叶片模具型腔优化方法,将铸造中材料的非线性收缩叠加在叶片型腔初始轮廓上,补偿了蜡和合金凝固冷却过程中的收缩,从工程实际出发,该方法大大减少了叶片模具设计时间和成本。

2 典型结构铸件收缩率及其预测研究

由于复杂空心涡轮叶片的尺寸难以测量^[50],为了研究结构形式和

收缩率之间的影响关系,丁肖艺^[44]等对叶身截面进行结构特征识别和典型结构提取,通过对如图7所示C型结构、I型结构以及II型组合结构的精铸过程进行数值模拟和试验,讨论铸件因结构特征不同而在凝固过程中不同的收缩变形情况,获得各典型结构随几何特征参数变化的收缩率分布规律。如图8所示,当只改变I型结构肋长这一参数时,该结构斜划线部位的壁厚收缩率分布趋势相同,都是关于肋中心近似对称,并且纵向肋处的收缩率最小。在距离肋中心较近的区域内,I型结构的收缩率随着肋长的增大而增大。此外,I型结构的收缩率随着肋厚的增大而增大^[51-52]。Rezavand等^[53]为了降低对涡轮叶片蜡模收缩的研究难度,基于叶片曲率和不均匀厚度,从叶片

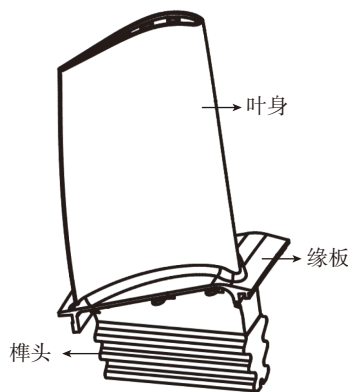


图4 空心涡轮叶片模型
Fig.4 Hollow turbine blade model

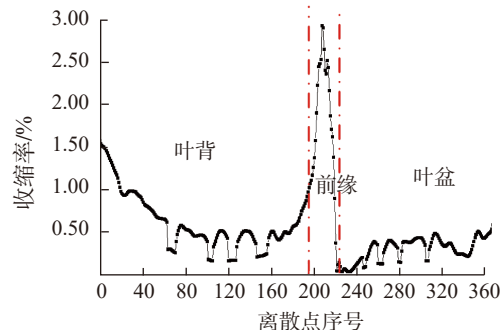
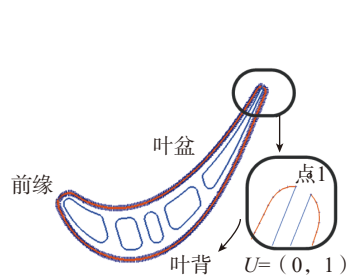


图6 叶片某截面参数化离散示意图与仿真收缩率分布图
Fig.6 Parametric discrete schematic diagram and simulated shrinkage rate distribution of a blade section

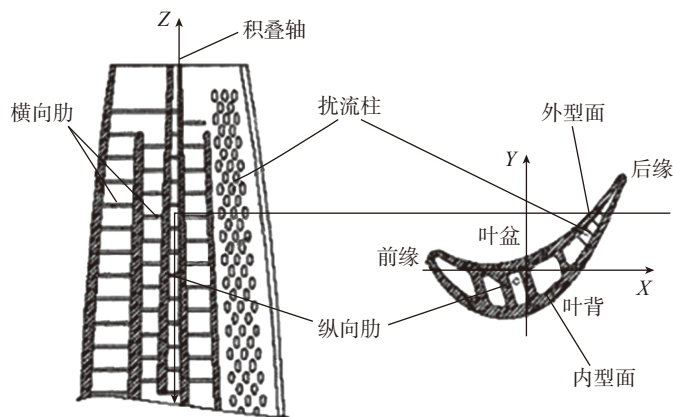
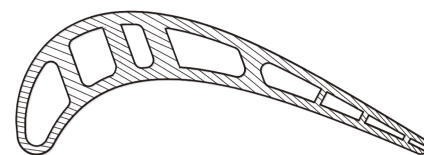


图5 涡轮叶片叶身剖面图
Fig.5 Turbine blade body profile



(a) 涡轮叶片叶身截面示意图



(b) C型结构 (c) I型结构 (d) II型结构

图7 涡轮叶片叶身与各典型结构截面示意图

Fig.7 Cross-sectional diagrams of turbine blade body and typical structures

几何形状中提取并设计了如图9所示两个模型,研究了注蜡阶段叶片几何特征对关键尺寸收缩的影响规律,相比于叶片的不均匀厚度,叶片曲率对弦长和翼型偏差的影响更大。Tian等^[54]为了预测叶片I型典型结构铸件的收缩率分布规律,首先针对该结构提取了肋长、肋厚、壁厚等几何参数,设计并制作了一系列具有不同几何参数的I型铸件,利用训练样本建立了基于铸件几何参数的收缩率预测模型,并通过测试样本验证了预测模型的准确性。

关于其他结构形式精铸件的凝固收缩率预测,Wang等^[55]针对如图10所示变截面环形结构铸件的收缩进行了研究,提出了一种将蜡模测量位移场作为铸件凝固过程数值分析的输入并进行铸件收缩预测的方法,基于该方法预测的铸件平均收缩率仅比试验结果小0.32%。Bu等^[56]设计了如图11所示轮毂形结构,针对不同区域分别建立了铸件结构参数与收缩率之间的多元非线性回归模型,用于预测铸件收缩率,

所建立的各回归模型收缩率预测数据与实测数据的皮尔逊相关系数均大于0.878,这表明基于铸件结构参数的收缩率预测模型具有良好的预测精度。

3 精铸件收缩率研究重点

熔模精铸件的结构具有复杂多样性特点,由于不同结构精铸件的收缩率分布形式不同,所以为了提高某一特定结构铸件的模具设计精度,需针对特定结构铸件进行收缩率分布规律研究与预测。结合关于精铸收缩的文献、工厂调研结果和课题组仿真与试验研究成果,作者认为今后研究基于结构的铸件收缩率时,主要从两个研究方向开展工作:一是利用仿真或试验的方式直接对复杂结构铸件精铸过程进行研究,计算并分析得到复杂铸件的收缩率分布趋势,结合精铸合金材料的收缩率取值范围对铸件模具型腔进行优化。该方法能够提高对模具收缩率赋值的准确度,但是受到铸件结构复杂和计算误差等因素的影响,模具优化精度比较低,可能需要多次修模,研制周期较

长。为了提高某精铸件的尺寸精度,另一个研究方向是首先对该复杂结构铸件进行典型结构提取,针对较为简单的典型结构铸件精铸过程进行研究。在获得典型结构铸件的收缩率分布规律后,基于结构参数进行收缩率建模以预测典型结构收缩率分布规律,为进一步建立复杂结构精铸件的收缩率预测模型奠定基础。在铸件收缩率建模时需为其提供大量的基础数据,虽然获取并积累收缩数据这一过程比较耗时,但模具设计时利用收缩率预测模型可以实现模具的一次成形,提高制模效率。

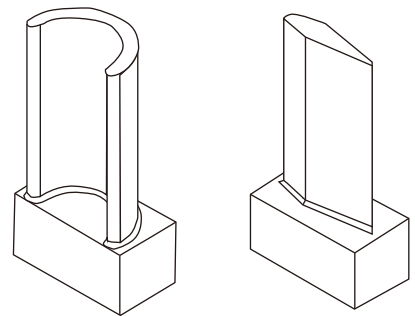


图9 Rezavand从叶片中提取的设计模型
Fig.9 Design model extracted from blade by Rezavand

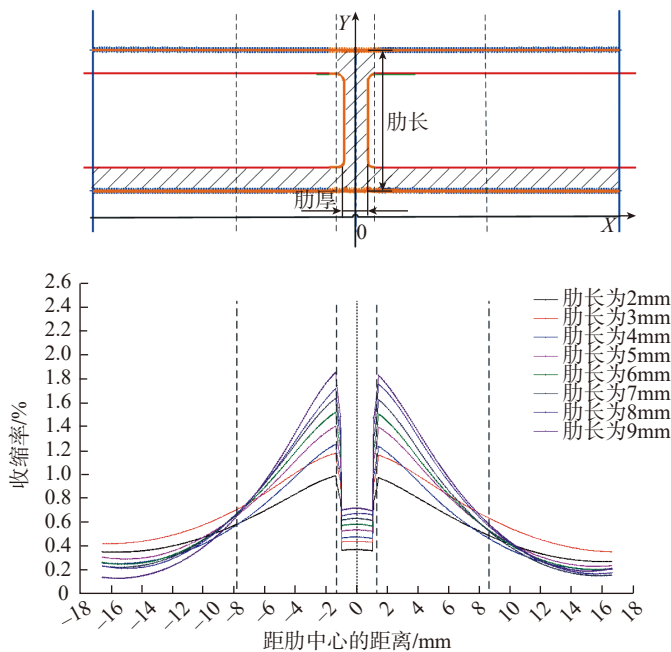


图8 I型结构截面图与收缩率分布图

Fig.8 Section diagram and shrinkage rate distribution diagram of I type structure

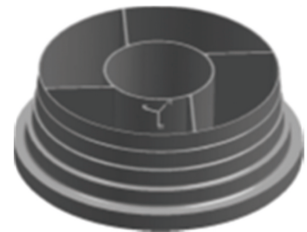


图10 变截面环形结构铸件模型
Fig.10 Casting model of variable section ring structure

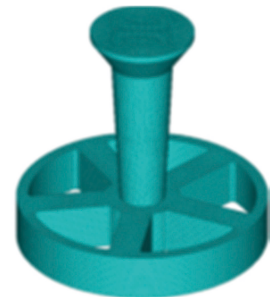


图11 轮毂形结构铸件浇注系统模型
Fig.11 Casting system model of hub-shaped casting

综上所述,研究基于结构的精铸件收缩率分布规律并对其进行预测,有利于大幅度降低制模成本及修模次数,对提高精铸件的设计制造整体水平具有重要意义。此外,精铸件收缩率分布规律的研究方法和成果,对于熔模铸造过程中蜡模与注塑成型过程中注塑件的尺寸精度控制都具有借鉴意义。

提高熔模铸件尺寸精度是一个系统工程,涉及精铸过程的方方面面,除了提高铸件收缩率赋值的准确性,还包括严格控制精铸工艺参数,特别是对铸件尺寸有显著影响的参数,以减小尺寸波动、解决产品尺寸超差问题;选择适当的蜡模、型壳及铸件材料;建立合理的尺寸测量系统等,都有利于保证铸件的成型精度。后续,还应加强研发单位和生产单位的互动合作,实现优势互补和资源共享,加快研究成果的验证进度,有利于将研究成果尽快应用于实际生产,从而不断提高精铸件的整体研制水平。

结论

为了提高精铸件的尺寸精度,分析精铸件凝固过程收缩率的各影响因素及其分布规律的研究可得到:

(1) 尺寸精度控制是精铸件制造过程中最棘手的问题,精铸模具作为熔模精密铸造的主要工装,对精铸件的成型质量起着举足轻重的作用,而铸造收缩率是设计模具的关键参数之一。铸件凝固收缩是造成铸造过程尺寸收缩的主要因素,蜡模收缩和型壳膨胀为次要因素。

(2) 影响精铸件收缩的因素分别是材料、工艺条件以及铸件结构。铸件结构是影响其收缩的主要因素,决定了铸件各部位的收缩率分布趋势。

(3) 基于精铸件结构特征,通过研究并预测精铸件收缩率分布规律,从而在模具设计时对铸件各部位的

收缩率准确赋值,精确补偿收缩以提升铸件尺寸精度。

参考文献

- [1] ZHANG Y, LI X Y, ZHANG L Y, et al. Simulation and optimization for investment casting of impeller based on 3D printing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 012016.
- [2] PATTNAIK S, KARUNAKAR D B, JHA P K. Developments in investment casting process—a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2332–2348.
- [3] 沈响,郑功,冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2019, 11(1): 54–62.
- [4] SHEN Yun, ZHENG Gong, FENG Chenming. Research progress in investment casting technology[J]. Precision Forming Engineering, 2019, 11(1): 54–62.
- [5] 曹腊梅,汤鑫,张勇,等. 先进高温合金近净形熔模精密铸造技术进展[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 238–243.
- [6] CAO Lamei, TANG Xin, ZHANG Yong, et al. Advances in precision casting technology for near-net shape investment casting of advanced superalloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 238–243.
- [7] 卜昆,王念鲁. 铸件分布方式对单晶空心涡轮叶片精铸质量的影响[J]. 铸造, 2014, 63(2): 110–114.
- [8] BU Kun, WANG Nianlu. Effect of casting distribution mode on precision casting quality of single crystal hollow turbine blades[J]. China Foundry, 2014, 63(2): 110–114.
- [9] LIU C, JIN S, LAI X, et al. Influence of complex structure on the shrinkage of part in investment casting process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5–8): 1191–1203.
- [10] WANG D H, HE B, LI F, et al. Cavity Pressure and Dimensional accuracy analysis of wax patterns for investment casting[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2013, 28(6): 637–642.
- [11] DONG Y, BU K, ZHANG D. Numerical simulation of displacement field of solidification process for investment casting[C]// Asia Simulation Conference—7th International Conference on System Simulation & Scientific Computing. Beijing: IEEE, 2008.
- [12] DONG Y W, DOU Y Q, BU K, et al. Reversing design methodology of investment casting die profile based on ProCAST[J]. China Foundry, 2010, 7(2): 132–137.
- [13] 董一巍. 净成形空心涡轮叶片精铸模具型腔优化设计方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2012.
- [14] DONG Yiwei. Research on cavity optimization design method of net forming hollow turbine blade precision casting mold [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012.
- [15] 周李明,王峰,王东,等. 工艺参数对蜡模成形性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017(2): 173–175.
- [16] ZHOU Liming, WANG Feng, WANG Dong, et al. Effects of process parameters on the formability of wax die [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2017(2): 173–175.
- [17] QIU F, BU K, SONG J H, et al. Dimensional control of nickel-based single crystal turbine blade investment casting by process control optimization[J]. International Journal of Metalcasting, 2017, 12(7): 1–11.
- [18] 张丹,张卫红,万敏,等. 基于位移场仿真与特征参数提取的精铸模具型面逆向设计方法[J]. 航空学报, 2006, 27(3): 514–519.
- [19] ZHANG Dan, ZHANG Weihong, WAN Min, et al. Reverse design method of precision casting mold surface based on displacement field simulation and feature parameter extraction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(3): 514–519.
- [20] DONG Y W, LI X L, ZHAO Q, et al. Modeling of shrinkage during investment casting of thin-walled hollow turbine blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 190–203.
- [21] 李世峰,张定华,卜昆. 单晶空心涡轮叶片精确控形技术的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(3): 559–564.
- [22] LI Shifeng, ZHANG Dinghua, BU Kun. Research progress of precise shape control technology for single crystal hollow turbine blades[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(3): 559–564.
- [23] 李鹏飞,孙朔,郭万军,等. 熔模精铸叶片叶根缩陷的原因分析及其改进[J]. 机械工程师, 2016(5): 214–215.
- [24] LI Pengfei, SUN Shuo, GUO Wanjun, et al. Cause analysis and improvement of blade root shrinkage in investment casting[J]. Mechanical

Engineer, 2016(5): 214–215.

[17] AGUILAR J, SCHIEVENBUSCH A, KATTLITZ O. Investment casting technology for production of TiAl low pressure turbine blades—process engineering and parameter analysis[J]. Intermetallics, 2011, 19(6): 757–761.

[18] WANG D, DONG A, ZHU G, et al. The propagation and accumulation of dimensional shrinkage for ring-to-ring structure in investment casting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1–4): 623–629.

[19] CHICA E, AGUDELO S, SIERRA N. Lost wax casting process of the runner of a propeller turbine for small hydroelectric power plants[J]. Renewable Energy, 2013, 60: 739–745.

[20] 魏战雷, 任贵娟, 李建崇, 等. Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金铸造收缩特性研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(3): 18–21.

WEI Zhanlei, REN Guijuan, LI Jianchong, et al. Study on casting shrinkage characteristics of Ti-48Al-2Nb-2Cr alloy[J]. Precision Forming Engineering, 2018, 10(3): 18–21.

[21] 刘庚武. 压铸合金收缩率检测试验模具的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(15): 60–62.

LIU Gengwu. Research on die casting alloy test method for shrinkage rate test[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(15): 60–62.

[22] 许广涛, 周志杰, 王狂飞, 等. 某大型铝合金件石膏型精铸与尺寸控制[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 117–119.

XU Guangtao, ZHOU Zhijie, WANG Kuangfei, et al. Gypsum-type precision casting and size control of a large aluminum alloy piece[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(9): 117–119.

[23] 施臣. 奇形薄壁精铸件变形规律的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 1984(1): 7–10.

SHI Chen. Study on deformation law of singular thin-walled precision casting[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 1984(1): 7–10.

[24] 陈冰. 熔模铸件的尺寸稳定性和精度[J]. 特种铸造及有色合金, 2003(1): 53–56.

CHEN Bing. Dimensional stability and accuracy of investment castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2003(1): 53–56.

[25] 中国铸造协会. 熔模铸造手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

China Foundry Association. Investment casting handbook[M]. Beijing: China Machine

Press, 2000.

[26] 聂爽, 刘子辉. 精密铸造铸件的生产流程及工艺控制[J]. 现代铸铁, 2017(6): 33–43.

NIE Shuang, LIU Zihui. Production process and process control of precision casting castings[J]. Modern Cast Iron, 2017(6): 33–43.

[27] 纪超众, 芦刚, 严青松, 等. 基于SLS快速熔模精铸的尺寸精度影响因素研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(19): 110–113.

JI Chaozhong, LU Gang, YAN Qingsong, et al. Research on influence factors of dimensional accuracy based on SLS rapid investment casting[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(19): 110–113.

[28] MAVROMIHALES M, MASON J, WESTON W. A case of reverse engineering for the manufacture of wide chord fan blades (WCFB) used in Rolls Royce aero engines[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(3): 279–286.

[29] WANG W, STOLL H W, CONLEY J G. Rapid tooling guidelines for sand casting[M]. Berlin: Springer, 2010.

[30] 蒲军. ZL101A 消失模铸造收缩率的测定[J]. 铸造技术, 2011, 32(9): 1336–1337.

PU Jun. Determination of shrinkage of ZL101A EPC[J]. Casting Technology, 2011, 32(9): 1336–1337.

[31] A K S H A Y W, A L O K S, SATYANARAYANA A, et al. Analysis of shrinkage & warpage in ceramic injection molding of HPT vane leading edge core of a gas turbine casting[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(9): 19471–19479.

[32] BONILLA W, MASOOD S H, IOVENITTI P. An investigation of wax patterns for accuracy improvement in investment cast parts[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18(5): 348–356.

[33] 祝铁丽, 王敏杰. 注塑成型制品的收缩规则[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(4): 72–76.

ZHU Tieli, WANG Minjie. Shrinkage rules of injection molded products[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2001, 8(4): 72–76.

[34] 祝铁丽, 王敏杰, 徐文波. 注射成型塑料齿轮的收缩规律研究[J]. 模具技术, 2000(1): 19–22.

ZHU Tieli, WANG Minjie, XU Wenbo. Study on shrinkage law of injection molding plastic gears[J]. Mold Technology, 2000(1):

19–22.

[35] HASSAN H, REGNIER N, PUJOS C, et al. Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(13): 1547–1557.

[36] 蒋睿嵩, 汪文虎, 王增强, 等. 航空发动机涡轮叶片精密成形技术及其发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 57–62.

JIANG Ruisong, WANG Wenhui, WANG Zengqiang, et al. Precision forming technology of turbine blade for aero-engine and its development trend[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 57–62.

[37] JONES S, YUAN C. Advances in shell moulding for investment casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2–3): 258–265.

[38] SABA U A S. Alloy shrinkage factors for the investment casting process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37(1): 131–140.

[39] HERMAN A, ČESAL M, MIKEŠ P. The deformation of wax patterns and castings in investment casting technology[J]. Archives of Foundry Engineering, 2012, 12(1): 37–42.

[40] 周祚超, 王艳霞, 薛云, 等. 圆弧铸件的线收缩行为及线收缩率的正确选择[J]. 铸造, 2010, 59(7): 655–657.

ZHOU Zuochao, WANG Yanxia, XUE Yun, et al. Correction of linear shrinkage behavior and linear shrinkage of arc castings[J]. China Foundry, 2010, 59(7): 655–657.

[41] 王增强. 先进航空发动机关键制造技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(22): 34–38.

WANG Zengqiang. Key manufacturing technology of advanced aero engines[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(22): 34–38.

[42] 张定华. 涡轮叶片精密铸造模具技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

ZHANG Dinghua. Precision casting mold technology for turbine blades[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014.

[43] DONG Y, ZHANG D, BU K, et al. Geometric parameter-based optimization of the die profile for the investment casting of aerofoil-shaped turbine blades[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9–12): 1245–1258.

[44] 丁肖艺. 基于仿真的涡轮叶片典型结构收缩率计算方法研究[J]. 西安: 西北

工业大学, 2014.

DING Xiaoyi. Research on calculation method of typical structure shrinkage of turbine blade based on simulation[J]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

[45] 宋得军, 卜昆, 王红霞, 等. 精铸涡轮叶片收缩变形的测量与分析[J]. 现代制造工程, 2008(3): 5-8.

SONG Dejun, BU Kun, WANG Hongxia, et al. Measurement and analysis of shrinkage deformation of precision cast turbine blades[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(3): 5-8.

[46] 刘杰, 卜昆, 李永毅, 等. 涡轮叶片铸件收缩率计算与分析[J]. 现代制造工程, 2008(3): 9-11.

LIU Jie, BU Kun, LI Yongyi, et al. Calculation and analysis of shrinkage rate of turbine blade castings[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(3): 9-11

[47] 窦杨青, 卜昆, 董一巍, 等. 涡轮叶片位移场模型变形特征解耦方法研究[J]. 机械设计与制造, 2010(1): 104-106.

DOU Yangqing, BU Kun, DONG Yiwei, et al. Research on the decoupling method of deformation characteristics for displacement field model of turbine blade[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2010(1): 104-106.

[48] DONG Y W, BU K, DOU Y Q, et al. Determination of wax pattern die profile for investment casting of turbine blades[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(2): 380-387.

[49] ZHANG D H, JIANG R S, LI J L, et al. Cavity optimization for investment casting die of turbine blade based on reverse engineering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(9-12): 839-846.

[50] LU Z L, CAO J W, JING H, et al. Review of main manufacturing processes of complex hollow turbine blades[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2013, 8(2): 87-95.

[51] 张雅丹. 空心涡轮叶片纵向肋结构的收缩率分布规律研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.

ZHANG Yadan, Study on the shrinkage distribution law of longitudinal rib structure of hollow turbine blades[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.

[52] 赵丹青. 基于涡轮叶片的典型结构收缩分布规律研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.

ZHAO Danqing. Research on typical structure shrinkage distribution law based

on turbine blades[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.

[53] REZAVAND S A M, BEHRAVESH A H. An experimental investigation on dimensional stability of injected wax patterns of gas turbine blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1-3): 580-587.

[54] TIAN G L, BU K, ZHAO D Q, et al. A shrinkage prediction method of investment casting based on geometric parameters[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1-4): 1035-1044.

[55] WANG D, HE B, LIU S, et al. Dimensional shrinkage prediction based on displacement field in investment casting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4): 201-208.

[56] BU K, TIAN G L, QIU F, et al. Research on the influence of structure parameters on the fractional shrinkage of wheel shape casting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(7): 1-10.

通讯作者: 卜昆, E-mail: pukun89@nwpu.edu.cn.

Research Development on Shrinkage Fraction Distribution of Investment Castings

BU Kun, ZHANG Yali, YU Qian, QIU Fei, TIAN Guoliang

(Laboratory of Aero-Engine High Performance Manufacturing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] As the key hot end component of aero-engine, hollow turbine blades are usually made by near-net shape investment casting process, which has low molding quality and high rejection rate. Firstly, the research status of investment precision casting technology in "precise shape control" was introduced. It was found that the accuracy of shrinkage fraction assignment in mold design directly affects the dimensional accuracy of precision castings. Then, the influencing factors of casting shrinkage fraction during solidification process were summarized, and the research process of structural correlation of shrinkage fraction was analyzed emphatically. Finally, the research results of shrinkage fraction distribution of precision castings such as hollow turbine blades were summarized.

Keywords: Investment casting; Dimensional accuracy; Precisely shape controlling; Shrinkage fraction; Structure

(责编 海山)