

中介机匣曲面流道尺寸符合性的新型耦合设计方法

A New Coupling Design Method for the Dimensional Conforming of Intermediate Case Curved Surface Flow Channel

■ 史成龙 钱巍 郟喜望 南海 / 中国航发航材院

为满足中介机匣的设计和使用要求，同时提高产品合格率、缩短研制周期，传统的曲面流道尺寸符合性设计方法已力有未逮，融合仿真模拟、数字化采集、智能化分析和多变量精确应用的新型耦合设计方法成为了攻克难题的关键技术。

钛合金中介机匣位于航空发动机中段，连接高压压气机和低压压气机，是航空发动机的重要构件。作为发动机主承力框架，钛合金中介机匣除了承受发动机整机质量、振动和机动过载外，还起着对整个发动机气流分流的作用，如图1所示。中介机匣曲面流道尺寸的偏差会直接影响内外涵道的气流量，进而影响涵道比，而涵道比的偏差最终会影响发动机的推力大小。因此，中介机匣曲面流道尺寸作为关键设计点，对流道轮廓度和粗糙度均提出了非常高的要求。

近年来，熔模精密铸造钛合金ZTC4以其近净成形（指仅需少量加工或不再加工，就可用作机械构件的零件成形技术）优势和优异的综合性能，在航空航天领域得到广泛应用。熔模精密钛合金技术日趋成熟，对钛合金铸件也提出了尺寸100%符合设计目标的要求。但对于中介机匣实现尺寸100%符合设计的要求，采用传统方法存在难度大且

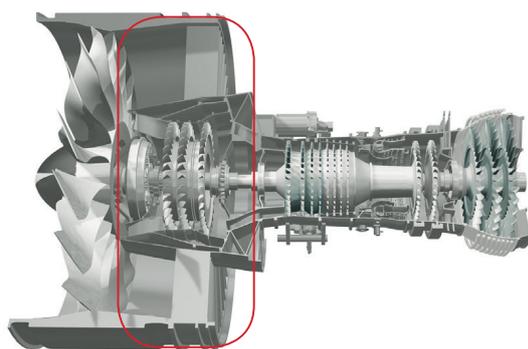


图1 中介机匣内涵流道和外涵流道示意

成本过高的弊端。在此背景下，创新团队提出一种新型耦合设计方法，来降低中介机匣的研制风险、缩短研制时间和降低成本。

尺寸符合性关键因素分析

在制造中，对尺寸产生影响的因素主要包括模具、浇注系统、冷热变形等。其中，浇注系统可以通过模拟和调整设计方案来降低影响，冷热变形可以通过校型降低影响，但模具对铸件尺寸的影响却很难通过以上的措施来降

低，因为优化工艺及决定铸件尺寸的主要因素是蜡模尺寸，以及铸件浇铸成形过程中自由收缩率和结构受阻收缩率。这两种收缩率在浇铸过程中较难实现有效的控制，尤其是对钛合金铸造来说，传统意义上的局部加冷铁等方法改变收缩率的效果不佳，所以需要建立尺寸的网络关系，调整不符合图纸要求的模具尺寸，来满足铸件尺寸要求并完成产品的研制和生产。

针对上述关键影响因素，创新团队首先从钛合金复杂结构中中介机

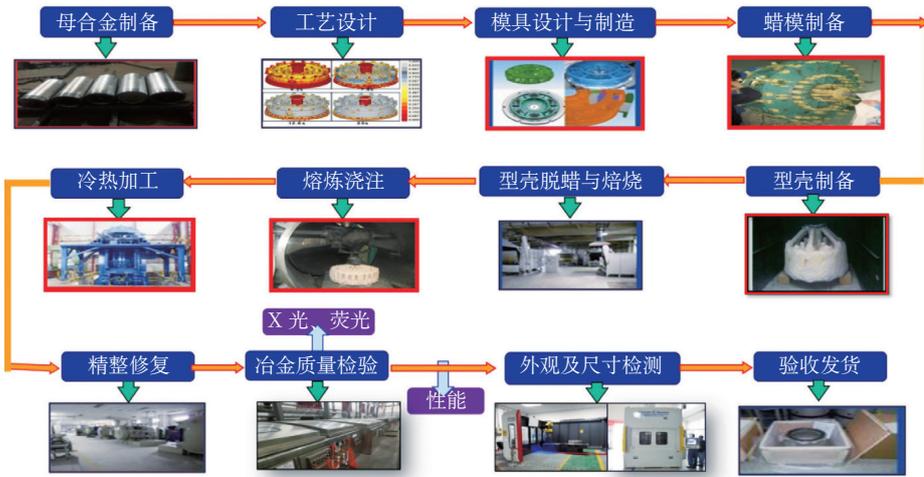


图2 钛合金复杂结构机匣研制主要流程

匣的熔模精密铸造研制全流程（如图2所示）开始分析，整理出所涉及的几十个工序，每个工序包含的操作过程扩展为5~10个步骤。从众多的流程步骤中按照对曲面流道轮廓产生影响的大小程度分析排序，进而梳理出对曲面流道轮廓影响最为重大的5个工序，包括模具设计与制造、蜡模制备、型壳制备、熔炼浇注和冷热加工等，如图2中红框所示。

创新团队把对曲面流道轮廓尺寸影响最大的5个工序单独列出，并借助“鱼骨分析法”梳理出各工序影响曲面流道轮廓的数十项细节因素（如图3所示），并总结出3项关键技术，包括复杂结构机匣模具内腔模型设计技术、异形薄壁机匣曲面流道轮廓尺寸形状控制（全轮廓度1mm）和大尺寸大质量机匣流道表面完整性控制技术（粗糙度 $\leq 1.6\mu\text{m}$ ）。由图3可以看出，每个工序中对曲面流

道轮廓尺寸的影响因素很多，同时这些影响因素所涉及的专业和领域众多，而且不同工序的因素存在相互影响甚至交错影响。例如，设备问题、车间温度、车间湿度、炉内真空度等属于装备类因素；出模人员因素、型壳磕碰破损、浇注人为因素等属于人为因素；模具设计错误、工艺设计不合理、热工艺设计不合理等为设计因素。

尺寸符合性设计总体思路与实践

针对上述影响因素和关键技术，创新团队首先借助钛合金熔模精密铸造平台的自动化水平的提升，包括不断提升型壳制备、复杂结构内部缺陷数字化检测、荧光检测、模具结构自动化和机器人自动打磨设备的自动化水平，处理了图3中的36个影响因素；其次充分利用计算机模拟仿真技术对正向设计的促进作用，通过蜡模充型模拟、金属液充型模拟、缺陷模拟等技术处理了图

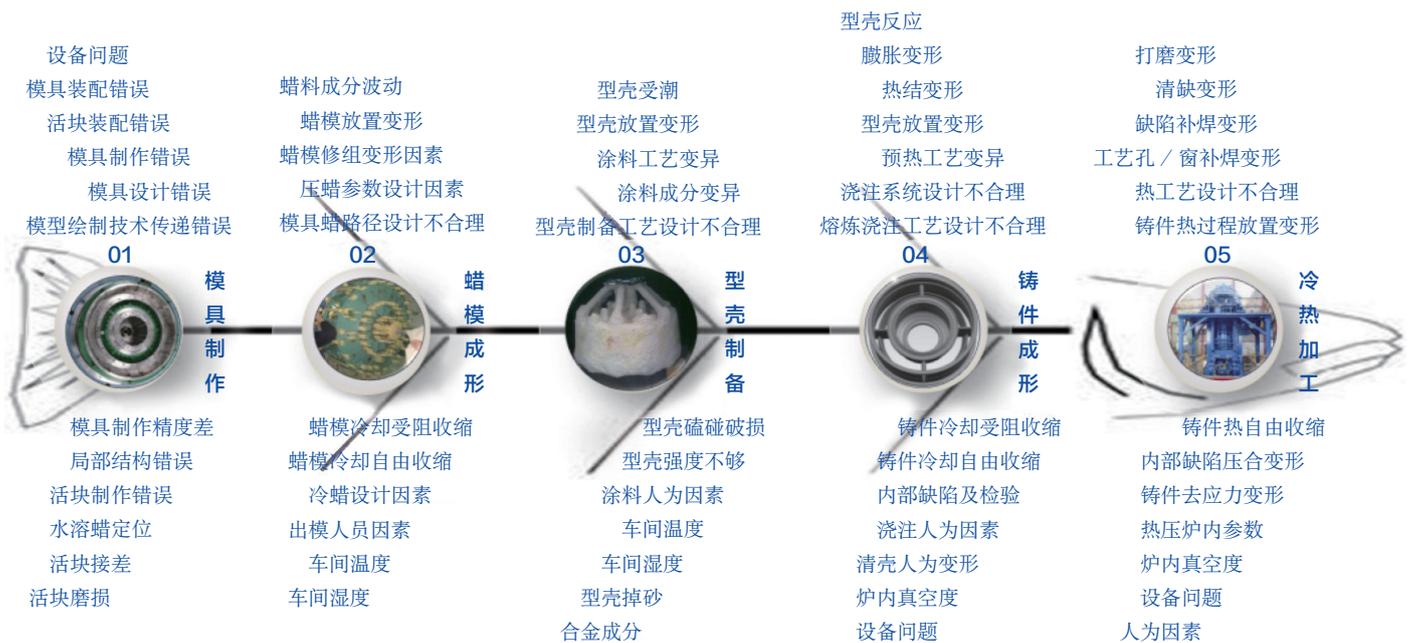


图3 影响因素鱼骨图分析

3中的10个因素；然后对剩余的因素采用具体问题具体分析的方案处理了其中的12个因素；最后还剩下以上方案均无法处理的5个因素，包括蜡模和铸件的冷却受阻收缩和自由收缩，以及铸件热自由收缩等。针对最后5个因素，团队调整思路，将这5个因素看成固定规律，由此找出中间隐藏的一致规律性，继而依据收缩规律将整个流道的变化按物理特性分为两个独立且可定量评价的部分，将这些数据规律收入数据库中。随着数据的丰富，可以用整体收缩率来设计新机匣的模具内腔模型，用分阶段收缩率制作合格蜡模模型，用以验收模具蜡模或输出3D打印快速成形蜡模的制作要求。

此外，创新团队在实践中还引入了蓝光非接触数字化检测设备及

分析技术，广泛应用于研制全流程的数据收集和处理，实现对隐藏在表面现象背后规律的梳理、验证和推广。创新团队通过对1000多万数据点的自动采集和智能化处理，实现了高效输出偏差数据的目标。通过对数据的梳理发现，单一参数设计理念无法满足三环曲面流道轮廓的设计要求，只有多参数耦合设计才能突破目前曲面流道轮廓偏差大的技术瓶颈。

设计方法验证

通过本项目的实施，创新团队将中介机匣的三环流道轮廓偏差由3mm波动范围控制到了1mm的范围内(如图4所示)，并且提供了良好的原始流道基底。经过表面处理后，流道粗糙度实现了小于 $1.6\mu\text{m}$ 的目标，

同时减少了大量的流道补焊、打磨等返工过程，周期缩短了1/3。经过进一步的分析还发现，借助数据库中分阶段收缩率制作的合格蜡模模型可以把对铸件曲面流道合格与否的判断结果提前到对蜡模流道合格与否的判断上，将判断里程碑提前了30天。此外，根据蜡模流道轮廓偏差数值可以及时报废不合格的蜡模，成本降低了20%，成品率也得到提升。

本项目的方法目前已经在国内所有型号的中介机匣上得到应用，并应用在LEAP发动机上。此外，团队与GE航空集团、罗罗公司和俄罗斯联合发动机制造集团(UEC)开展了关于新一代发动机中介机匣的研制合作，并将本方法应用到新一代GE9X、PD-35和罗罗公司的发动机机匣的研制中。

结束语

基于仿真模拟与数字智能化全流程尺寸检测，创新性地建立了航空发动机用关键结构件曲面流道尺寸符合性耦合设计方法，使流道轮廓尺寸波动范围由3mm缩小到1mm的范围，极大地缩短了研制周期，并且降低了铸件报废率，近净成形能力大幅提升。此外，团队进一步制订了项目的后续目标：随着所收集数据的增多，实现数据库资源的不断丰富，并结合计算机模拟收缩率数值的补充，最终形成一个足够丰富连续的数据库平台，当有新机匣的研制任务时，可实现在智能分析后输出新机匣的曲面流道设计参数。

航空动力

(史成龙，中国航发航材院，高级工程师，主要从事钛合金熔模精密铸造研究)

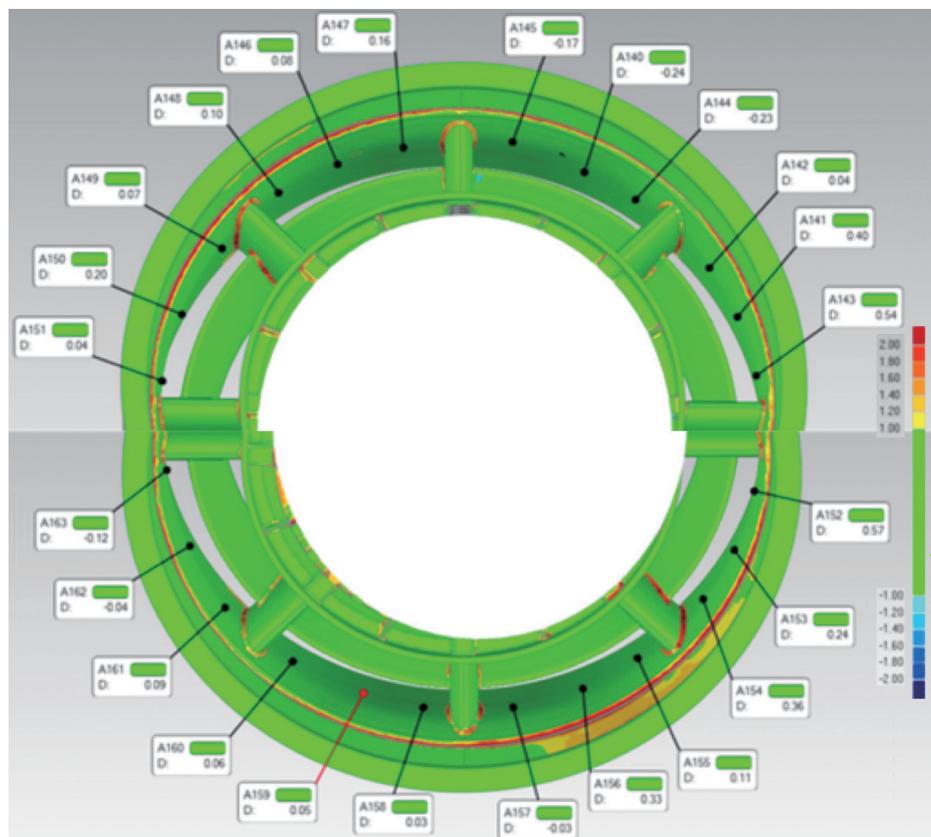


图4 中介机匣实际扫描数据示例