

型壳厚度对精铸件影响规律的仿真研究

Numerical Simulation for the Influence of Shell Thickness to the Precision Casting

■ 张海云 卜昆 成昊聪 / 西北工业大学 段朋国 / 中国航发西航 朱宇 / 中国航发研究院

为了生产出型面精度合格的涡轮叶片，必须严格控制相关精铸参数。型壳厚度作为其中一个重要因素，可以用数值仿真的方法对其进行详细分析。

数据显示，目前涡轮叶片生产的不合格率可达40%，其中一半都是因尺寸导致的，也就涉及叶片精铸件的型面精度问题。影响精铸件型面精度的因素包括型壳预热温度、浇注温度、抽拉速率和型壳厚度^[1-3]等。针对型壳厚度，西北工业大学的李扬通过仿真软件Abaqus研究了型壳厚度对工字梁残余应力的影响，并结合脱壳温度得到残余应力最小的参数组合^[3]；华德峻等研究了型壳局部增厚对铸件缩孔的影响，发现型壳厚度的不均匀性会导致铸件相应各部位冷却效果上的较大差异，从而形成缩孔，严重影响铸件性能^[4]。在上述研究基础上，本文通过数值模拟仿真技术，针对型壳厚度对精铸件温度场、应力场和位移场的影响规律开展了研究。

精铸件仿真过程设置及验证

以和涡轮叶片外形一致的实心精铸件为研究对象，建立其浇注系统UG模型^[5]。为了便于计算，在进行定向凝固仿真时只采用1/4浇注系统模型，如图1所示。

对UG模型进行网格划分，对于细小结构处，保证网格尺寸占所要划分区域尺寸的1/3即可^[6]，对于



(a) 浇注系统UG建模 (b) 浇注系统1/4模型

图1 模型建立

结构粗大的区域，尺寸统一划分为2mm，之后进行网格质量检查。检查合格的网格在模拟软件ProCAST中

进行装配，然后设置仿真参数，包括材料属性、边界条件，之后即可提交运算。对比型壳厚度均为6.5mm时实测和仿真中间截面处的变形量曲线（如图2所示）可知，实测和仿真均在前、后缘处出现变形量的突变，叶盆、叶背处变形量都相对平稳，说明仿真能较好地代替实际情况。因此，随后对型壳厚度进行单因素仿真，结合生产实际，确定型壳厚度为5.5mm、6.5mm、7.5mm、8.5mm，然后分析型壳厚度对精铸件温度场、应力场、位移场的影响。

型壳厚度对精铸件温度场影响规律

采用高速凝固法进行精铸件的制备。该方法前期凝固降温主要和冷铜盘

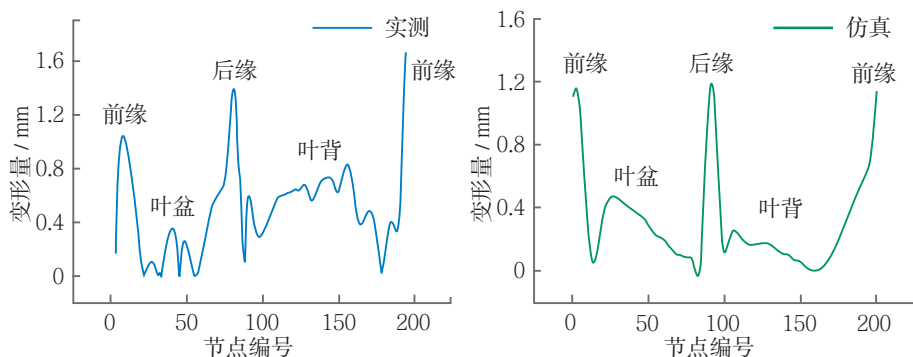


图2 仿真和实测中间截面处的变形量曲线

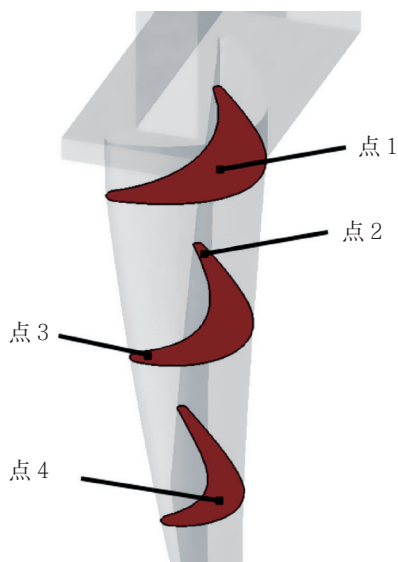
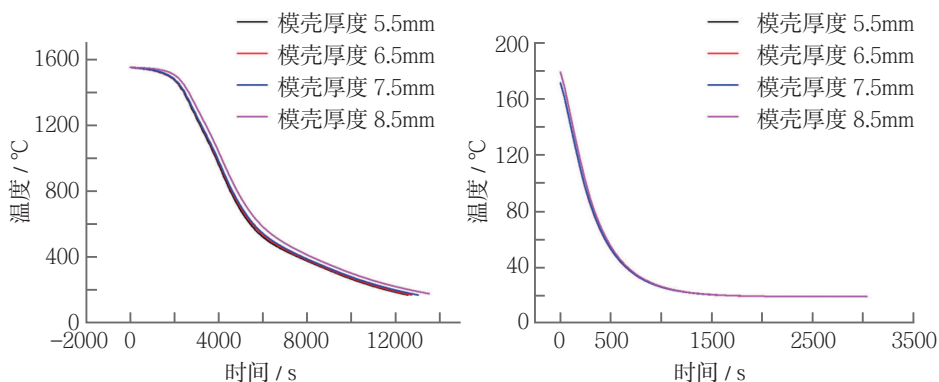


图3 选取截面和点

密切相关，后期降温速率和型壳厚度等因素有关。为了研究型壳厚度对精铸件温度场产生的影响，取叶身上的几个特征部位的点。考虑到涡轮叶片主要有叶盆、叶背、前缘、后缘等4处特点鲜明的结构，且在实际生产过程中，此处应力、位移等变化量较大，所以需要在不同截面和点处进行分析。分别取叶根截面中间为点1、叶身中部后缘为点2、叶身中部前缘为点3、叶尖中部为点4，截面和点选取如图3所示。

将各点温度随时间变化数据绘制曲线，并将不同型壳厚度下各点温度随时间变化曲线进行对比。由于其余3点表现的规律和点1一致，因此只需分析点1温度随时间变化曲线，如图4所示。

从图4(a)中可以看出，型壳厚度越厚，同一时间下同一点的温度越高，但相差不大，最明显的是型壳厚度为8.5mm的情况，各点温度在相同时间下都比其他型壳厚度的温度高近50℃；且型壳厚度越厚，精铸件温度降到最低的时间越晚，



(a) 凝固冷却至300℃过程温度随时间变化 (b) 脱壳过程冷却至室温温度随时间变化

图4 点1处温度随时间变化曲线

型壳厚度为5.5mm的情况相比型壳厚度为8.5mm的情况，其凝固结束时间早了近1000s。从图4(b)中可以看出，脱壳阶段初始温度差异较明显，之后差异很小。脱壳初始阶段的差异主要由定向凝固阶段的不同型壳厚度引起的；之后差异逐渐减小至很小，是由于脱壳后所处环境均为空冷状态且铸件结构一致。

型壳厚度对精铸件应力场影响规律

由上可知，型壳厚度会对精铸件温度场产生影响，而温度场是应力场、

位移场产生差异的根本原因，所以型壳厚度必然会对铸件的应力场产生一定影响。图5为定向凝固结束后未去约束前的应力场分布情况，可以看到，在不同型壳厚度下，精铸件后缘处的应力都较大，5.5mm型壳厚度和8.5mm型壳厚度导致的应力分布、应力集中程度明显高于中间两种情况。

图6为去完型壳约束降至室温时精铸件叶身处的应力场，可以看到后缘处依旧是应力集中区域，其次是前缘处应力值较大，其余区域应力值在100MPa以内，应力释放较

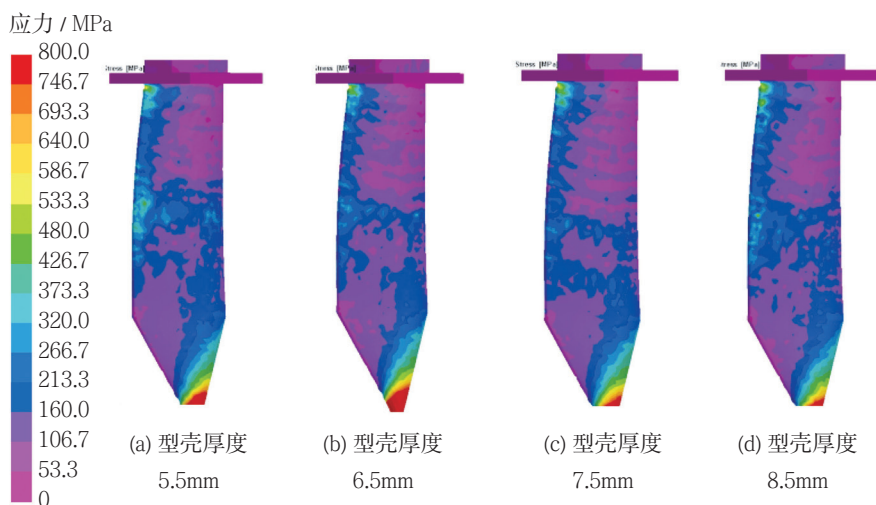


图5 定向凝固结束后未去约束前不同型壳厚度下应力场分布情况

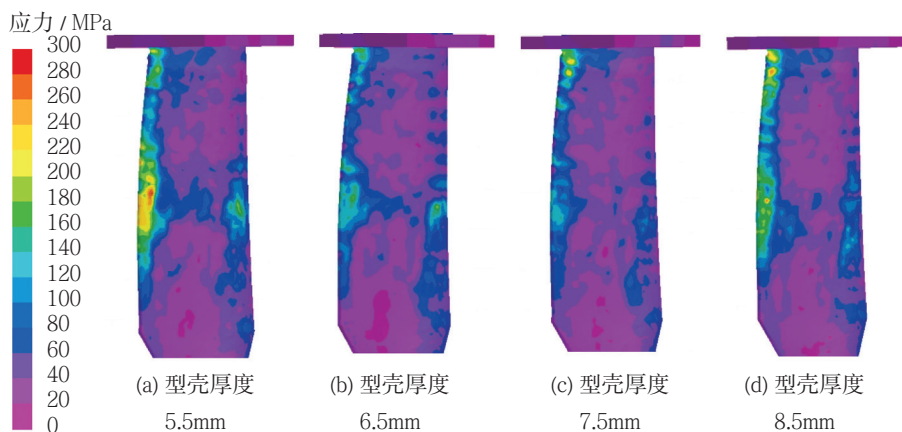


图6 去约束降至室温后不同型壳厚度下应力场分布情况

为彻底。型壳厚度为5.5mm和8.5mm时的应力值明显大于中间两种情况，说明型壳厚度太薄或者太厚，都会使得精铸件产生较大应力，比较中间两种情况，发现对于该实心精铸件来说，采用7.5mm的型壳厚度，其应力场的分布会更均匀，应力数值会相对较低。

型壳厚度对精铸件位移场影响规律

为了直观显示特征截面处的变形情况，选取叶尖、叶身中部、叶根处的截面曲线，通过偏差检查离散成200个点，起点均为前缘，沿叶盆方向进行数据偏差检查^[7]。结果显示，前、后缘处属于变形量最大的区域，但是型壳厚度导致的差异却最小，叶盆、叶背处变形量较小且趋势较平稳，但是型壳厚度导致的差异却最大。其中，叶盆处的变形量大致随着型壳厚度的增加而减小，叶背处的变形量大致随着型壳厚度的增加而增加。因此，采用不同型壳厚度时，可以主要比较叶盆、叶背处的变形量，从而选择变形量较小的情况作为较合适的型壳厚度进行实

际生产，根据如上规律可知，型壳太厚或者太薄在叶盆、叶背处的变形量综合来看较大，型壳厚度为6.5mm、7.5mm时变形量相对较小。

仿真结果综合分析

型壳厚度越厚，涡轮叶片定向凝固过程中温度降低得越慢，降温所需时间也越长，这种温度差异导致脱壳初始阶段温度场存在差异，但随着脱壳的进行，最初型壳厚度导致的温度差异逐渐减小。型壳厚度太薄或者太厚，都会使得精铸件产生较大应力，对于该实心精铸件采用7.5mm型壳厚度，其应力场的分布会更均匀，应力数值会相对较低；型壳厚度主要对精铸件叶盆、叶背处的变形量产生影响，叶盆处的变形量大致随着型壳厚度的增加而减小，叶背处的变形量大致随着型壳厚度的增加而增加，因此可以主要比较叶盆、叶背处的变形量，选择变形量较小的情况作为合适的型壳厚度进行实际生产；型壳太厚或者太薄会使得叶盆、叶背处的变形量进一步增大，当型壳厚度为6.5mm、

7.5mm时变形量相对较小。

综合以上分析，合适的型壳厚度为7.5mm。

结束语

由于生产过程具有不可视、难以控制且周期长的特点，涡轮叶片精密熔模铸造的产品合格率一直有待提升。采用数值模拟仿真技术，针对型壳厚度对精铸件“三场”的影响规律进行研究，可以快捷地确定壳型厚度的最佳值，在一定程度上缩短生产周期，提高生产效率，能为工厂的生产提供借鉴。

航空动力

(张海云，西北工业大学，硕士研究生，主要从事精密熔模铸造技术研究)

参考文献

- [1] 毛蒲, 芦刚, 严青松, 等. 熔模精铸型壳性能强化的研究现状[J]. 铸造技术, 2015, 36(04).
- [2] 林波, 陈云祥. 熔模精密铸造型壳制备工艺研究进展[J]. 铸造技术, 2021, 42(10).
- [3] 李扬. 基于Abaqus的单晶涡轮叶片残余应力分布的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [4] 华德峻. 型壳局部增厚对铸件缩孔的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2003(03).
- [5] 钟懿. 涡轮叶片结构几何建模与等几何分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [6] 龚勋. 涡轮冷却叶片结构网格参数化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [7] 甘露. 基于位移场的精铸涡轮叶片误差分析系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.