

汽轮机叶片锻造成形数值模拟与工艺优化

■ 刘俊，盛伟，施瑞华，阮发林，侯磊

摘要：利用DEFORM-3D软件对汽轮机叶片模锻进行数值模拟，了解叶片锻造成形特点，确定了较为合理的预制坯形状，并进一步研究了始锻温度、摩擦因数、上模压下速度等工艺参数对锻造成形的影响。根据模拟结果，选择优化的工艺参数进行试制，锻件外观尺寸和力学性能均满足技术要求，验证了工艺方案的可行性。

叶片是工业汽轮机、燃气轮机和航空发动机的重要零件，在上述动力机械的能量转换中起关键作用，是汽轮机、航空发动机的“心脏”。据统计，叶片制造的工时约占汽轮机整机的1/3，工装量占整机的1/2左右。典型的汽轮机叶片如图1所示。

汽轮机叶片材料一般为不锈钢或钛合金，材料加工性能差，叶片型面薄而复杂，为三维扭转曲面，而且质量要求严格。模锻生产可以完整地保持金属流线的连续，增加叶片的强度和承载能力，提高叶片的性能和寿命。但实际生产中制坯形状和尺寸、工艺与模具参数的确定，往往需要进行多次试锻，周期长、成本高。针对这种现状，本文利用DEFORM-3D对叶片模锻过程进行数值模拟，优化叶片锻造工艺参数，减少实验成本，提高叶片设计与生产效率。

1. 叶片锻造模型的建立

以某型汽轮机末级725mm动叶片为例，进行锻造有限元模拟研究，材料为05Cr17Ni4Cu4Nb（17-4PH），其化学成分见表1。建模时，首先利用UG软件分别对上下模和坯料进行造型，并以.stl格式文件导出，再导入到DEFORM-3D软件的前处理界面中进行模拟参数设定。将毛坯属性设为塑性体，材料选择不锈钢“17-4-stainless”，并对其划分有限元网格单元，由于叶片变形量较大，所以坯料网格划分应较多为宜，本文取100 000个。模具设置属性为刚性体，预热温度为200℃。数值模拟开始时模具和坯料位置如图2所示，此时上下模距离 D 为122.5mm，根据725叶片飞边桥部厚度为5mm的设计要求，上下模合模后距离 D 应为15mm，即上模移动的总距离设为107.5mm。

叶片模锻过程是一个复杂的金属塑性成形过程，受到诸多因素的影响，如预制坯形状、始锻温度、摩擦条件、变形速度。本文选取这些参数作为变量进行模拟研究，优化叶片锻造工艺。

2. 模拟结果分析

(1) 模拟分析 叶片毛坯



图1 典型的汽轮机叶片

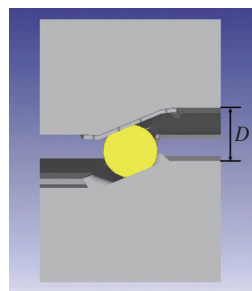


图2 模具与坯料相对位置示意

表1 05Cr17Ni4Cu4Nb的化学成分（质量分数）

(%)

牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	Ti	N	Nb+Ta
05Cr17Ni4Cu4Nb	≤0.055	≤1.00	≤0.50	≤0.030	≤0.025	3.00~5.00	15.00~17.00	3.00~5.00	≤0.050	≤0.050	≤0.050	0.15~0.35

的形状和尺寸直接影响到锻造工艺的成败。据文献指出矩形截面的毛坯在叶身部分内应力、应变都是最小的，是叶片锻坯的最佳选择。根据725叶片产品的结构特征，设计了两种不同的毛坯形状，如图3所示。图3a为坯料叶根处采用圆形，叶冠和叶身都采用矩形，记为毛坯Ⅰ；图3b中坯料叶身部分采用矩形，叶根与叶冠采用扁状，并按其扭转角度进行压扁，记为毛坯Ⅱ。利用DEFORM软件，对两种坯料进行有限元分析模拟锻压成形，其他参数设定一致。图4给出了压下量为105mm时的模拟分析结果。

由图可知，坯料Ⅱ产生的飞边明显没有坯料Ⅰ均匀，并且从图4b叶冠的放大图中可见，坯料Ⅱ叶冠处将出现折叠。因此可确定坯料Ⅰ是较为理想的预制坯形状。

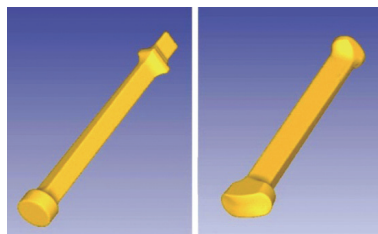
(2) 始锻温度对锻造成形的影响 利用DEFORM软件模拟不同始锻温度下叶片成形过程，模拟时其他参数设置相同，所得始锻温度与成形载荷之间的关系如表2所示。由表2可知，随着锻造温度升高，叶片成形载荷明显变小，这是由于温度升高，金属原子间的结合力降低，变形抗力减小。但在采用螺旋压力机精锻时，由于高速变形产生很大的热效应会使坯料温度升高，如果始锻温度太高，易引起材料的过烧。图5给出了始锻温度为1200℃模拟成形后锻件表面温度分布情况。由模拟可知，整个锻造过程中叶身部分温度一直高于1200℃，成形后最高温度可达1350℃。所以综合考虑，始锻温度选择1165℃为宜。

(3) 摩擦因数对锻造成形的影响 润滑条件直接影响金属充满模腔的难易程度及金属的变形抗力和弹复量的大小，从而影响锻件尺寸精度。利用DEFORM模拟不同润滑条件对叶片成形载荷的影响，其他参数设置相同，所得结果如表3所示。由表3可知，摩擦因数增大，叶片成形载荷越大。这是因为随着坯料与模具接触面间摩擦力增大，静水压力愈大，则金属流动所需的变形力也随之增大。降低摩擦阻力，还可以减小模具磨损，提高工装使用寿命。因此，锻造时应正确选用润滑剂，降低摩擦因数。

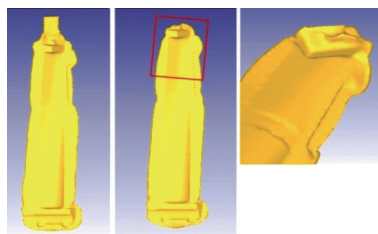
(4) 上模压下速度对锻造成形的影响 上模压下速度直接影响金属材料的应变速率。表4为坯料在不同加载速度下最大成形载荷的模拟结果。由表4可知，叶片成形载荷并不随加载速度呈显著递增或递减的关系，在加载速度为100~500mm/s，成形载荷的变化不大。这是由于提高加载速度，缩短了成形时间，变形抗力增加。另一方面，随着变形速度的提高，单位时间发热率增加，使材料发生软化，变形抗力降低。根据模拟的结果，可以判断加载速度并不是影响叶片变形过程的主导因素。因此，在使用螺旋压力机锻造叶片时，只要满足锻造成形能量的需求即可。

(5) 叶片成形过程分析 图6为始锻温度1165℃，摩擦因数0.3，上模压下速度为400mm/s，不同压下量下坯料等效应力场的分布情况。由图6b可看出，变形初期坯料与上下模的接触点较少，叶根部位首先与模具接触发

生变形，随着压下量增加，叶身与叶冠部位相继产生形变，这一



(a) 毛坯Ⅰ (b) 毛坯Ⅱ
图3 两种不同的毛坯形状



(a) 毛坯Ⅰ (b) 毛坯Ⅱ
图4 压下量为105 mm时两种毛坯的模拟结果

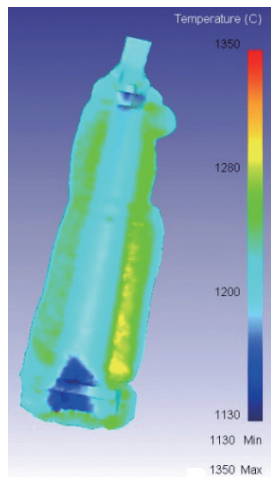


图5 始锻温度为1200℃模拟成形后锻件表面温度分布情况

表2 锻造温度与成形载荷的关系

始锻温度/℃	1100	1165	1200
成形载荷L/kN	103 000	94 300	86 800

表3 摩擦因数与成形载荷的关系

摩擦因数μ	0.2	0.3	0.5
成形载荷L/kN	83 100	94 300	107 000

阶段坯料被压扁，基本属于镦粗变形，所需成形载荷较小。第二阶段为坯料充模阶段，由图6c可看出，在此压下量下，叶片各部分发生剧烈变形且受力均匀，变形抗力迅速增大。第三阶段为模具打靠阶段，变形主要发生在分模面附近的区域，飞边处等效应力较大，如图6d所示。这阶段飞边厚度逐渐减薄，形成较大的金属流动阻力。当压下量为107.5 mm时，终锻完成，此时所需的

变形力最大。图6是叶片模锻成形过程

3. 生产试验验证

选取模拟优化后的工艺参数进行现场试验，叶片锻件满足尺寸要求，外观质量优，如图7所示。在叶根处取样进行力学性能检测，所得结果列于表5，其性能均满足725动叶片锻造毛坯的技术要求，从而验证了工艺方案的可行性。

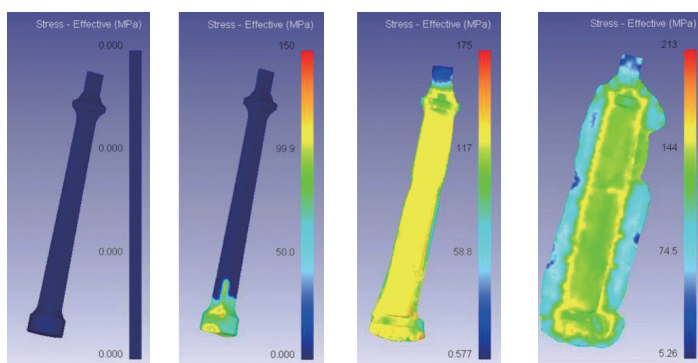
始锻温度可减小锻造打击力，但始锻温度过高，易发生材料过烧，综合考虑，始锻温度选择1165℃为宜；良好的润滑效果可以减小最大成形载荷。加载速度并不是影响叶片变形过程的主导因素，在使用螺旋压力机锻造叶片时，只要满足锻造成形能量的需求即可。

(3) 采取模拟优化后的工艺参数进行现场试制，锻件外观尺寸和力学性能均满足技术要求，验证了DEFORM软件的实用性。

参考文献

- [1] 盖超. 汽轮机锻造工艺余量自动加放技术的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [2] 王开全. 汽轮机叶片精密模锻技术CAD与CAE研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2004.
- [3] 钟杰, 郭成, 胡楚江. 汽轮机叶片材料高温变形行为及模锻参数优化[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(6): 166-171.
- [4] 张国新. 汽轮机叶片锻坯优化设计[J]. 锻压技术, 2008, 33(4): 19-21.
- [5] 盖超, 陈伟, 吕彦明. DEFORM-3D软件在叶片锻坯结构形式选取中的应用[J]. 热加工工艺, 2007, 36(1): 74-76.
- [6] 孙曙宇. 汽轮机叶片锻造成形有限元数值模拟研究[D]. 成都: 西华大学, 2008.

作者简介: 刘俊、盛伟、施瑞华、阮发林、侯磊, 南车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司锻压事业部



(a) 原始坯料 (b) 压下量为35 mm (c) 压下量为100 mm (d) 压下量为107.5 mm

图6 叶片模锻成形过程



图7 725叶片锻件照片

表4 加载速度与成形载荷的关系

加载速度 /mm·s ⁻¹	100	300	400	500
成形载荷L /kN	90 100	94 200	94 300	90 700

表5 725叶片锻件力学性能检测结果及技术要求

	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	断后伸长率 δ_5 (%)	断面收缩率 ψ (%)	硬度HBW
试样1	844	928	19.5	74	302
试样2	858	931	20.0	73	304
技术要求	755~890	890~960	≥16	≥55	277~311

4. 结语

(1) 利用DEFORM软件对汽轮机叶片锻造过程进行了数值

模拟，了解叶片锻件成形特征，确定了较优的预制坯形状。

(2) 模拟结果显示，提高

MW 20160506