

# 重型燃机叶片锻造过程数值模拟与工艺优化

吕成<sup>1</sup>, 张立文\*<sup>1</sup>, 王照坤<sup>2</sup>, 陈亚莉<sup>2</sup>, 郑渠英<sup>2</sup>, 王丹<sup>2</sup>

(1.大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116024

2.沈阳黎明航空发动机集团, 辽宁沈阳 110043)

**摘要:** 高温锻造过程中, 坯料内的温度场、应变场等热力参数对锻件内的裂纹损伤和微观组织有重要影响. 利用刚粘塑性有限元法, 对某重型燃机叶片的锻造过程进行了有限元数值模拟, 得到了锻造过程中锻件内温度场、应变场以及锻造载荷随时间的变化规律, 并在此基础上结合裂纹损伤和修复机制以及再结晶组织演化规律, 提出了一种优化的锻造工艺方案. 即在终锻尺寸公差基础上欠压 4 mm 进行预锻, 预锻温度 1 160 °C, 终锻温度 1 120 °C. 实际锻造工艺试验验证了工艺方案的可行性, 为该工艺的工程应用奠定了科学基础.

**关键词:** 裂纹损伤; 微观组织; 叶片; 锻造; 工艺优化; 数值模拟  
**中图分类号:** TG316 **文献标识码:** A

## 0 引言

叶片是重型燃机中的重要零部件, 起着能量转换的关键作用<sup>[1]</sup>, 其质量直接关系到燃机的工作效率和工作寿命. 叶片形状复杂, 其锻造工艺性差, 流动规律难以掌握. 以往由于缺乏系统精确的理论分析手段, 工艺设计多采用试错法, 不断调整工艺参数和修改模具, 既消耗了大量的人力、物力, 又延长了生产周期. 目前, 计算机数值模拟已被广泛应用于叶片的锻造工艺设计中<sup>[2~7]</sup>, 通过计算机数值模拟, 可以在计算机上虚拟实现成形过程, 得到大量任一时刻的变形场量信息, 进而掌握变形规律, 优化成形工艺.

某重型燃机叶片所用材料为一新型马氏体热强不锈钢, 其成形极限较低, 锻造范围较窄, 并且成形条件对锻件的微观组织有重要影响, 进而影响到最终锻件的性能, 所以必须严格控制变形条件, 优化工艺参数. 本文采用有限元软件 DEFORM3D 对某重型燃机叶片的锻造过程进行计算机数值模拟, 通过与物理模拟的比较分析, 给出一种优化的工艺方案, 并经实际锻造工艺试验验证该工艺方案的可行性.

## 1 工艺分析

重型燃机叶片锻造为多工步锻造, 分为聚积、成形、压扁、预锻和终锻工步. 其中, 聚积、成形和

压扁工步为预成形制坯工步. 由于受金属临界变形量的限制, 必须在终锻前增加一道预锻工步, 预锻完成后的坯料冷却到室温进行打磨、吹沙, 然后加热至终锻温度保温, 待坯料内外温度均匀一致时, 进行终锻以获得最终叶片锻件. 预锻变形量不足, 将引起终锻变形量过大, 产生裂纹损伤和组织缺陷; 而如果预锻变形量过大, 则很可能在预锻过程中就产生大量的锻造裂纹, 并且引起终锻变形量的不足, 因此, 预锻和终锻的工艺设计对叶片锻造有重要影响.

叶片的预锻和终锻在 25 MN 曲柄压力机上进行. 叶片材料为一新型马氏体热强不锈钢, 该钢的力学性能见表 1. 该合金的变形抗力较大, 因此锻造温度不能过低, 而若锻造温度过高, 则可能析出一些脆性相, 从而降低最终锻件性能. 锻造温度为 950~ 1 160 °C.

表 1 叶片用钢力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of blade steel

$t / ^\circ\text{C}$	$\sigma_b / \text{M Pa}$	$\sigma_{0.2} / \text{M Pa}$	$W\%$	$h\%$
20	$\geq 1\ 127$	$\geq 931$	$\geq 12$	$\geq 58$
500	$\geq 925$	$\geq 770$	$\geq 12$	$\geq 60$

在叶片的锻造工艺设计中, 金属的临界变形量是一个重要影响参数, 其决定了锻造每一工步所允许的金属变形量大小. 本文通过热压缩试验测得了叶片材料的热塑性曲线. 试样尺寸为  $\text{O}10$

收稿日期: 2005-09-20; 修回日期: 2007-04-15.

基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2004AA503010).

作者简介: 吕成 (1980-), 男, 博士生; 张立文\* (1962-), 男, 教授, 博士生导师.

× 12 mm, 试验中试样以 50℃ /s 的速度加热到试验温度, 保温 30 s, 然后以 10/s 的变形速率压缩到不同的变形程度. 压缩完成后的试样空冷至室温以观测其微观组织和力学性能, 从而判断不同变形温度下的临界变形量 (W) 以及不同变形条件对其力学性能的影响, 图 1 为试验所测得的钢热塑性曲线, 可以看出, 叶片用钢一次加热的变形程度不超过 60% .

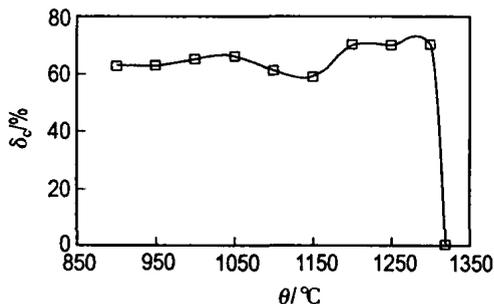


图 1 叶片用钢的热塑性曲线

Fig. 1 Thermal plasticity curve of blade steel

## 2 有限元模型的建立

叶片模具的型面十分复杂, 因此, 锻模几何造型的精度直接决定了数值模拟结果的可靠性. 首先使用 UG 几何造型软件对模具和坯料进行精确的造型, 然后在 DEFORM 3D 中进行定义和计算. 由于叶片的锻造为一高温大变形过程, 坯料的弹性变形可忽略, 采用刚粘塑性材料模型, 模具设为刚性体. 图 2 给出了数值模拟过程中坯料的网格变形图.

重型燃机叶片所用材料为一新型马氏体热强不锈钢, 其高温力学性能和热物性参数通过试验测得. 刚粘塑性材料的流动应力模型为  $\sigma = \sigma_0(\dot{\epsilon})^n \exp(-\beta/T)$ , 即材料的流动应力与等效塑性应变  $\dot{\epsilon}$  应变速率  $\dot{\epsilon}$  和温度  $T$  有关, 计算中采用分段线性化的方法, 根据试验测得的高温力学性能取点输入.

预锻坯料的初始温度为 1 160℃, 根据工艺规范模具应进行预热, 预热温度为 300℃. 在多工步模拟过程中, 将前一工步模拟完成的坯料作为下一工步的初始坯料, 但必须重新设置坯料的初始条件. 坯料与模具之间的摩擦采用剪切摩擦模型:

$$f_s = mk$$

式中:  $f_s$  为摩擦力;  $k$  为剪切屈服强度;  $m$  为摩擦因子, 其大小与界面接触状态有关, 取为 0.3. 模拟过程中坯料与模具的界面换热系数取为 11 kW/m<sup>2</sup>℃.

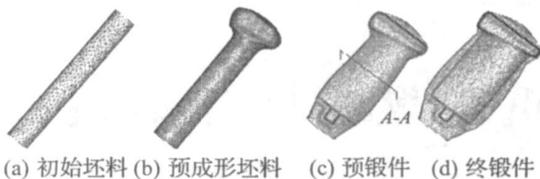


图 2 数值模拟过程中坯料的网格变形图

Fig. 2 FEM mesh of the billet in the numerical simulation

## 3 数值模拟结果与分析

为了清晰地掌握叶片从预成形坯料到最终叶片锻件的整体变形情况, 暂不考虑终锻前的预锻工步, 而将预成形坯料直接放入终锻模中一步锻造完成. 通过分析变形过程中的等效应变以及温度场的分布, 获得了叶片成形整体变形规律, 然后在此基础上进行锻造工艺的优化.

### 3.1 等效应变分析

终锻时随着上模的运动, 坯料金属沿横向向两侧进、排气边缘流动, 沿纵向向叶尖流动以填充整个模腔, 取叶身的典型截面来分析其变形规律. 图 3 给出了终锻完成后叶身 A-A 截面内的等效应变分布等值线图, 可以看出, 终锻完成后叶身发生了较大的塑性变形, 终锻完成 A-A 截面内大部分区域的等效应变在 1.33~ 1.61. 与图 1 钢的热塑性曲线比较可以看出, 终锻变形量已远远超过钢的塑性成形极限, 极有可能导致裂纹的产生. 高温塑性变形的重要特征之一是变形过程中裂纹的损伤和由于再结晶和扩散作用使裂纹修复同时发生<sup>[8]</sup>. 一方面, 在变形条件下夹杂物处形成的微裂纹有扩展和长大的可能; 另一方面, 金属组织再结晶的作用, 使裂纹尖端钝化, 又会抑制其发展, 同时, 在外力作用下裂纹表面开始接触, 接触部分经过再结晶和扩散作用而焊合, 已形成的裂纹有可能得到修复. 为消除锻造过程中产生的夹杂性裂纹, 锻造工艺中可以通过预留变形量, 利用终锻工艺修复缺陷, 即预锻工艺消除孔隙性缺陷, 终锻



图 3 终锻完成 A-A 截面等效应变分布  
Fig. 3 Equivalent strain distribution inside the section A-A at the end of finish forging operation

工艺控制夹杂性裂纹<sup>[9]</sup>. 控制终锻火次的另一目的是保证锻件内晶粒尺寸不粗大和避免混晶现象发生.

### 3.2 温度场分析

温度作为变形的基本参数之一,对锻件的晶粒度、晶粒均匀度、成形工艺和模具寿命产生直接的影响. 由于燃机叶片所用材料对锻造温度极其敏感,叶片锻造时必须严格控制坯料的温度. 图 4 给出了终锻完成叶身 A-A 截面内的温度分布等值线图. 由图可见,温度最高的区域出现在叶身心部和两端,而温度最低的区域出现在与模具接触区. 由于与上、下模具的接触传热,叶身表面温度有所下降,但仍高于材料的停锻温度(950℃). 而叶身心部一方面受模具冷却作用较小,另一方面随着变形过程的进行,塑性功生成的热量对心部温度也有一定的补偿作用,因而叶身心部最高温度达到 1 170℃,叶身两端更是由于剧烈的摩擦作用温度高达 1 190℃. 叶片成形时,表层温度较低,在变形程度小的时候就易处于临界变形状态,出现表面粗晶,使得叶片表层和心部晶粒度不均匀,锻件整体强度下降<sup>[10]</sup>. 因此必须控制终锻变形温度,以减小温差. 并且对于叶片所用马氏体热强不锈钢,温度过高易引起一些脆性相的析出,进而降低叶片的强度、韧性等力学性能,因而应当适当降低终锻温度.

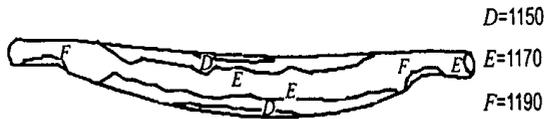


图 4 终锻完成 A-A 截面温度场分布  
Fig. 4 Temperature distribution inside the section A-A at the end of finish forging operation

## 4 锻造工艺的优化

通过对以上数值模拟结果的分析可以看出,

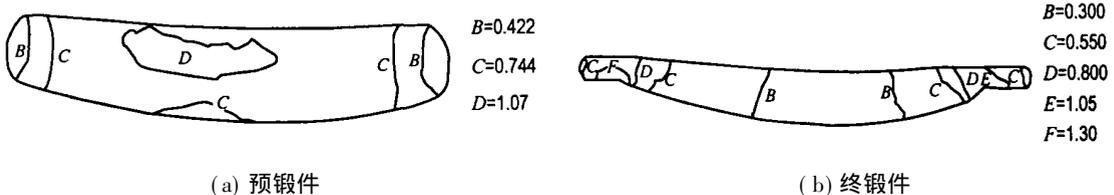


图 5 优化工艺方案下预锻和终锻完成叶身 A-A 截面等效应变分布

Fig. 5 Equivalent strain distribution inside the section A-A after preforming operation and finish forging operation of the optimized process

终锻完成时叶身的变形量过大,超过了叶片材料的临界变形量,并且由于叶片内外温差较大,可能导致混晶现象发生,必须在终锻前增加一道预锻工步. 通过大量的模拟计算,最终本文给出了一种优化的锻造工艺方案,即在终锻尺寸上公差基础上欠压 4 mm 进行预锻. 若欠压量大于 4 mm,则导致终锻变形量过大,从而超过材料的临界变形量;而若欠压量小于 4 mm,则使得预锻变形量过大,并且导致随后的终锻变形量不足,从而不能充分修复缺陷和再结晶.

由以上温度场分析结果可以看出,由于塑性功生成热和摩擦生热的影响,锻造过程中叶身表面温度降低较小,且叶身心部和两端进、排气边温度过高,进而可能导致一些脆性相的析出,影响叶片锻件的性能,因此应该适当降低终锻温度. 叶片材料的变形抗力对温度极其敏感,温度降低,材料的变形抗力急剧增大,从而导致锻造载荷急剧增加,因此终锻温度应保证锻造载荷在设备的额定载荷范围内. 通过对物理模拟和数值模拟结果的分析,最终确定终锻温度为 1 120℃.

### 4.1 优化工艺方案的数值模拟结果分析

图 5 给出了优化工艺方案下(即在终锻尺寸上公差基础上欠压 4 mm 进行预锻),预锻和终锻完成时叶身 A-A 截面内的等效应变分布等值线图,可以看出,预锻完成后叶身 A-A 截面内的等效应变介于 0.422~ 1.0,而终锻完成叶身 A-A 截面内的等效应变介于 0.3~ 0.6. 与原先的锻造工艺方案相比,工艺优化以后的终锻累积应变大大减小,低于材料的临界变形量,同时又达到了一定的变形程度,从而可以充分修复缺陷损伤和充分再结晶,保证了最终叶片锻件的质量. 预锻完成后的等效应变虽然略微偏高,但由于预锻完成后坯料要重新加热保温进行终锻,即使预锻产生了少量微裂纹,随后的终锻也可以对其进行修复,因而并不影响最终锻件的性能.

图 6 给出了优化工艺方案下,终锻完成时叶身 A-A 截面内的温度场分布等值线图.可以看出,由于终锻变形量较小,时间较短,终锻完成时坯料内温度变化不大,大部分区域仍然为 1 120 °C,减小了温差,从而避免了晶粒粗大和混晶现象的发生.并且由于终锻温度降低为 1 120 °C,而塑性变形量较小,并没有引起温度的上升,从而减少了脆性相的析出,保证了最终锻件的质量.飞边部位由于变形量较大,摩擦剧烈,温度略有升高,但由于飞边部位锻后要切除,其对锻件性能没有影响.图 7 为优化工艺方案下,锻造载荷随时间的变化曲线.可以看出,由于预锻时飞边较小,坯料的变形类似于自由锻粗,载荷较小,而终锻时飞

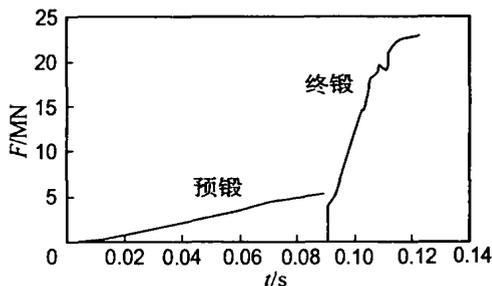


图 7 优化工艺方案下载荷变化曲线

Fig. 7 Curves of load change in the optimized process

边较大,变形阻力增大,并且由于终锻温度较低,金属变形抗力较高,载荷剧增,最大值达到 23 MN,终锻所用曲柄压力机的额定载荷为 25 MN,因而优化工艺方案下的锻造载荷仍然满足要求.

### 4.2 优化工艺方案的试验验证

为了验证优化工艺方案的可行性,现场进行了锻造工艺试验,以实际生产出的叶片锻件对工艺方案进行验证.图 8(a) (b) 给出了锻造工艺试验中终锻模下模和预成形坯料图,图 8(c) (d) 给出了预锻和终锻完成的锻件图.通过对终锻件的微观组织和力学性能的检测得知,其性能达到了工艺要求,从而验证了优化工艺方案的可行性,为该工艺方案的工程应用提供了科学依据.

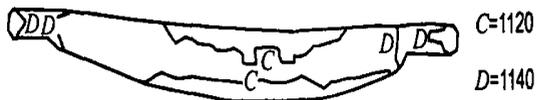
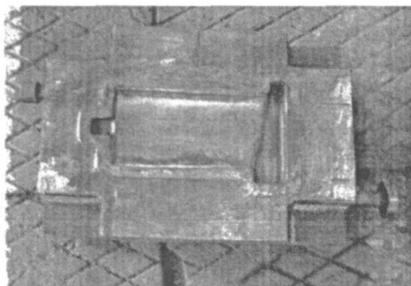
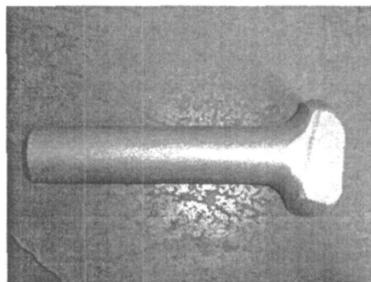


图 6 优化工艺方案下终锻完成 A-A 截面温度场分布

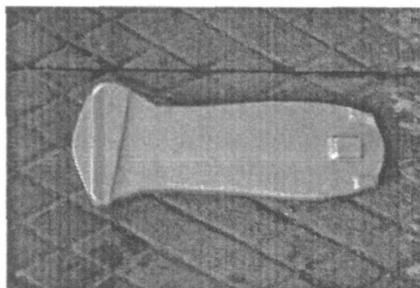
Fig. 6 Temperature distribution inside the section A-A at the end of finish forging operation in the optimized process



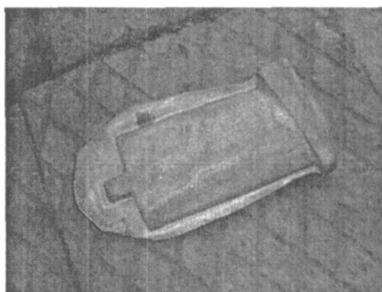
(a) 终锻模下模



(b) 预成形坯料



(c) 预锻件



(d) 终锻件

图 8 优化工艺方案的锻造工艺试验

Fig. 8 Industrial trials of the optimized process

## 5 结 论

(1) 采用刚粘塑性有限元法,对某重型燃机叶片的锻造过程进行了数值模拟分析,得到了变形过程中锻件内的温度场、应变场分布以及载荷变化曲线,为锻造工艺的优化设计提供了依据。

(2) 在不考虑预锻工步的终锻工艺条件下,锻件内的应变值较高,超过了叶片材料的临界变形量,极有可能导致锻造缺陷的产生。并且由于塑性功生成热和摩擦生热的缘故,叶身心部温度较高,表面和心部温差较大,可能引起晶粒粗大和混晶现象的发生,致使锻件性能下降。

(3) 在对以上数值模拟结果和物理模拟试验比较分析的基础上,结合锻造裂纹损伤与修复机制以及再结晶组织演化规律,本文给出了一种优化的锻造工艺方案,即在终锻尺寸上公差基础上欠压 4 mm 进行预锻,预锻温度 1 160<sup>°</sup>C,终锻温度降为 1 120<sup>°</sup>C。数值模拟结果表明,该工艺条件下锻件内的温度场、应变场以及锻造载荷符合工艺要求,实际锻造工艺试验验证了该工艺方案的可行性。

### 参考文献:

[1] 熊爱明,薛善坤,李晓丽,等. 叶片锻造技术的现状与发展趋势探讨 [J]. 机械科学与技术, 2001, 20(6): 806-807

- [2] SOLTANI B, MATTIASSON K, SAMUELSSON A. Implicit and dynamic explicit solutions of blade forging using the finite element method [J]. *J Mater Proces Technol*, 1994, 45: 69-74
- [3] YANG D Y, LEE N K, YOON J H. A three-dimensional simulation of isothermal compressor blade forging by the rigid-viscoplastic finite element method [J]. *J Mater Eng Perform*, 1993, 2: 119-124
- [4] 杨 合,詹 梅,刘郁丽,等. 面向叶片精锻过程的三维有限元模拟 [J]. 材料科学与工艺, 1999, 7: 87-90
- [5] 刘郁丽,杨 合,詹 梅. 摩擦对叶片精锻预成形毛坯放置位置影响规律的研究 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(1): 97-100
- [6] 刘郁丽,杨 合,詹 梅. 单榫头叶片锻造过程成形缺陷分析 [J]. 机械科学与技术, 2003, 22(2): 283-284
- [7] 蔡 旺,杨 合,刘郁丽,等. 单榫头叶片精锻三维热力耦合有限元模拟 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(2): 135-138
- [8] 马庆贤,钟约先,曹起骧. 高温塑性加工过程中裂纹损伤与修复特性研究 [J]. 塑性工程学报, 2000, 7(2): 58-61
- [9] 马庆贤,钟约先,曹起骧. 大型锻件夹杂性缺陷的形成及控制锻造工艺 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(5): 13-15
- [10] 张伟红,刘劲松,张士宏,等. 高强螺栓多工序锻造成形与温度场耦合分析 [J]. 航空制造技术, 2004, 6: 77-80

## Numerical simulation and process optimization of forging process of a gas turbine compressor blade

LÜ Cheng<sup>1</sup>, ZHANG Li-wen<sup>\* 1</sup>,  
WANG Zhao-kun<sup>2</sup>, CHEN Ya-hi<sup>2</sup>, ZHENG Qu-ying<sup>2</sup>, WANG Dan<sup>2</sup>

( 1. School of Mater. Sci. and Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;  
2. Shenyang Liming Aero-Engine Group Co., Shenyang 110043, China )

**Abstract** In high-temperature forging processes, the thermomechanical field variables, such as temperature and strain, have an important influence on the inner crack damage and microstructure in the forging part. The forging process of a gas turbine compressor blade is simulated using 3D rigid-viscoplastic finite element (FE) method. FE analysis provides detailed information on the thermomechanical field variables such as temperature and strain and forging loads, which can be incorporated into process design. On the basis of these results, an optimized process is put forward incorporated with the mechanism of crack damage and recovery and evolution laws of recrystallized structure. The optimized parameters are 1 160<sup>°</sup>C of preforming temperature and 1 120<sup>°</sup>C of finish forging temperature, and the preforming is conducted under 4 mm forging stroke on the basis of finish forging. The feasibility of optimized process is verified through comparisons with industrial trials. The results can provide the scientific basis for engineering application of the process.

**Key words** damage of cracks; microstructure; blade; forging; process optimization; numerical simulation