

43" 汽轮机叶片材料热变形行为及制坯工艺参数优化

钟杰, 郭成, 岳朋, 刘明文

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对制造高质量叶片锻件的材料热变形问题, 采用热模拟试验及数据回归拟合的方法建立了某 43" 汽轮机叶片材料的高温流变应力方程. 采用所建立的方程, 使用软件 DEFORM3D 对叶片锻造过程进行了数值模拟和正交试验分析. 应力方程计算结果表明, 所用材料在高温压缩下的流变应力符合双曲正弦函数关系. 试验分析结果表明, 凸台直径对叶片锻造质量的影响最为显著, 叶根过渡处圆角与摆料位置的影响其次, 叶冠过渡处圆角的影响最小, 据此对锻造工艺参数进行了优化. 生产实践表明: 采用优化后的参数可降低载荷, 使尺寸公差保持在 3 mm 之内, 从而提高了产品质量, 减小了材料成本, 降低了锻造次数, 提高了材料利用率和生产效率, 这对叶片材料及模锻件的国产化具有重要意义.

关键词: 叶片材料; 锻造; 流变应力方程; 参数优化

中图分类号: TG317 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)01-0094-05

Thermal Deformation Behavior of 43" Turbine Blade Material and Forging Parameters Optimization

ZHONG Jie, GUO Cheng, YUE Peng, LIU Wenwen

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the problem of thermal deformation in high-quality blade forging, a high temperature constitutive equation for a 43" turbine blade material was established by thermal simulation experiments and data regression. Using the established equation, the forging process was analyzed by orthogonal test and numerical simulation software DEFOEM-3D. The calculation results show that the elevated temperature flow stress of the material accords with hyperbolic sine function. The analysis results show that the effects of the boss diameter, the fillet near blade root, the distance between the center line of blank and mold, and the fillet near blade shroud on the forging quality is successively from large to small. The practical production shows that the forging process using the optimized parameters can not only lower the load, hold the tolerance within 3 mm, and reduce forging times, but also save material and increase the economic efficiency of the enterprise. This study may benefit the nationalization of the blade materials and die forgings.

Keywords: blade material; forging; constitutive equation; parameter optimization

汽轮机叶片形状复杂, 工作条件恶劣, 材料为不锈钢等, 所以锻造工艺性差, 流动规律难以掌握^[1]. 运用数值模拟技术可预测成形中金属的流动规律及应力、应变、温度的变化, 从而减少试制及生产周期,

提高材料利用率和生产效率.

70 年代国外将数值模拟技术引入到了叶片锻造过程, 如利用有限元软件对叶片成形进行二维有限元模拟并分析温度对不锈钢叶片叶身尺寸精度的

影响^[2];80 年代国内开始将数值模拟技术应用于叶片锻造过程,如对带阻尼台的航空叶片及单榫头叶片进行了有限元模拟,并得到了材料充填模具时流动成形的规律^[3].

本文对某企业超超临界机组 100 万 kW 43"汽轮机叶片的锻造成形进行了研究,对 1Cr12Ni3Mo2VNbN 材料进行了热模拟试验,并为之建立了高温流变应力方程,用 DEFORM-3D 就叶片的锻造制坯工艺参数对锻件质量影响的敏感性进行了分析,对优化的工艺参数进行了实践验证.

1 热模拟试验

试验材料为 1Cr12Ni3Mo2VNbN 合金,其化学成分见表 1. 对棒料进行改锻,始锻温度为 1 150 ℃,终锻温度大于 950 ℃,锻件沿棒料轴向均匀拔长,锻后加盖保温棉空冷. 加工时保证流线与轴向垂直,线切割将锻件加工成 $\varnothing 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的圆柱体试样,表面经磨床打磨(如图 1a),以保证端面粗糙度为 1.6、圆面粗糙度为 3.2,保证两端面平行,防止由于表面缺陷的存在而影响周向变形的等效性.

表 1 1Cr12Ni3Mo2VNbN 合金的化学成分 %

$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Ni})$
0.08~0.18	≤ 0.25	≤ 0.06	≤ 0.02	≤ 0.015	2.00~3.00

$w(\text{Cr})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{V})$	$w(\text{N})$	$w(\text{Nb})$
11.0~12.5	2.0~2.5	0.20~0.35	0.03~0.09	0.05~0.15

试验在 GLEEBLE1500 热模拟机(见图 1b)上进行,变形摄氏温度 t 为 980、1 030、1 080、1 130、1 180 ℃,应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为 0.01、0.1、1、10 s^{-1} . 利用试样自身电阻进行加热,加热速度为 10 ℃/s,加热到 1 150 ℃后保温 3 min,再以 5 ℃/s 的速度降温或加热到相应的变形温度,保温 1min,然后以恒定速率

进行压缩(见图 2). 每个试样的工程应变控制在 60%,热压缩后试样加盖保温棉空冷或淬火. 整个试验过程全部由计算机控制并自动采集相关数据.

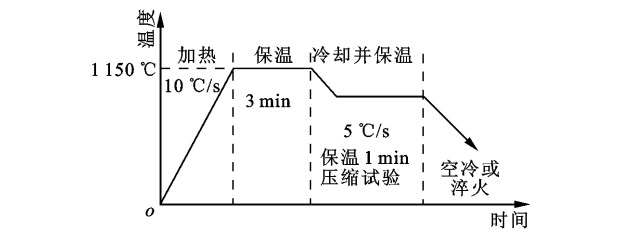


图 2 热模拟试验加热曲线图

2 试验结果与分析

2.1 真实的应力-应变曲线

材料在 4 种变形温度和应变速率条件下压缩变形的真实应力-应变(σ - ϵ)曲线如图 3 所示.

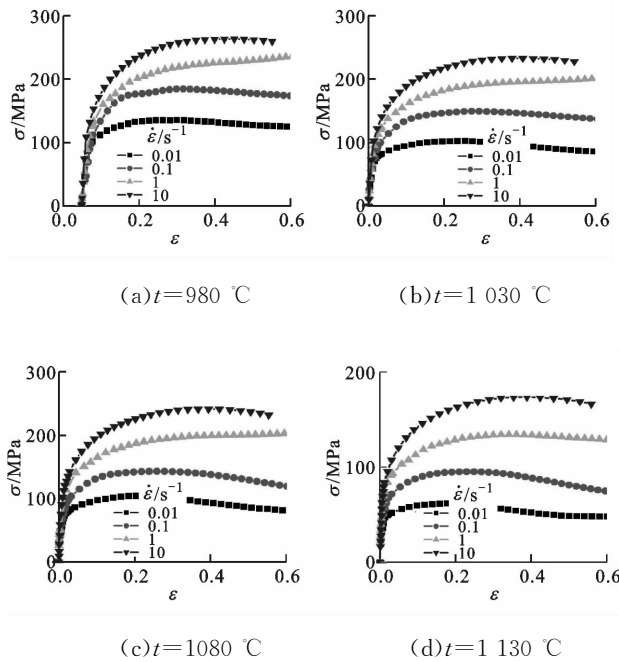
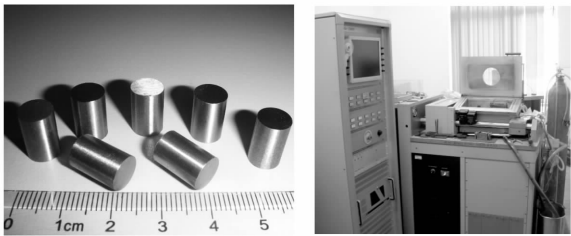


图 3 1Cr12Ni3Mo2VNbN 合金高温下的真实应力-应变曲线

从图 3 可见,材料在热压缩变形时真实应力的变化规律为:先随 ϵ 增加迅速增大,达到峰值后逐渐减小; $\dot{\epsilon}$ 相同时,随着温度升高, σ 峰值减小; σ 随温度的变化趋势与峰值应力的变化相同,当 ϵ 达到一定值时,真实应力基本上保持不变且与 ϵ 无关, σ - ϵ 曲线基本上呈水平线. 此外,随着温度的升高,合金变形表现出越来越明显的动态软化现象.

2.2 高温流变应力方程

Sellars 和 Tegart 于 1966^[4] 年提出了一种包含



(a) 试样 (b) 热模拟试验机
图 1 试样与热模拟试验机

变形激活能 Q 和热力学温度 T 的流变应力方程,即

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式(1)也称为 Arrhenius 方程,它具有以下 3 种常用的形式

$$\dot{\epsilon} = A_1\sigma^{n_1}\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2\exp(\beta\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon} = A_3[\sinh(\alpha\sigma)]^n\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

式(2)~式(4)中: A_i ($i=1, 2, 3$)、 n_1 、 β 、 α 为常数; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为真实应力或流变应力, MPa; n 为应力指数, $n=\beta/\alpha$; Q 为形变激活能, kJ/mol; R 为气体常数。

在低应力和高应力状态且 Q 与 T 无关时, 式(2)和式(3)可简化为

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^{n_1} \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon} = B_1\exp(\beta\sigma) \quad (6)$$

对式(5)和式(6)分别取自然对数得

$$\ln\dot{\epsilon} = \ln B + n_1 \ln\sigma \quad (7)$$

$$\ln\dot{\epsilon} = \ln B_1 + \beta\sigma \quad (8)$$

对不同 t 和 $\dot{\epsilon}$ 下的稳态变形真实应力 σ 取对数, 绘制出的 $\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 和 $\ln\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 曲线分别见图 4a 和图 4b。

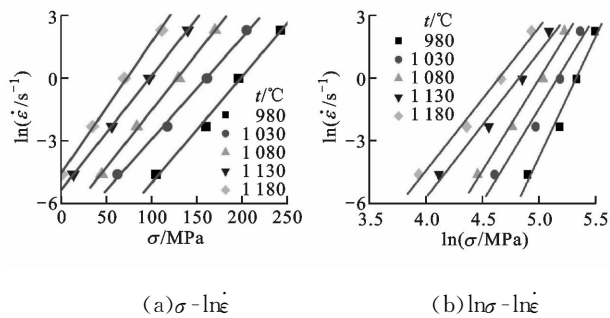


图 4 $\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 和 $\ln\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 曲线

图 4 中的 $\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 和 $\ln\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 曲线基本上呈直线, 说明 Arrhenius 模型适用于建立该合金的塑性流动方程。回归分析得到 β 、 n_1 和 α 的平均值分别为 $\beta=0.068$ 、 $n_1=8.627$ 和 $\alpha=\frac{\beta}{n}=\frac{0.068}{8.627}=0.008$, 则有

$$Q = Rn \frac{d\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{d(1/T)} = Rnn_2 \quad (9)$$

$$Z = \dot{\epsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (10)$$

由式(9)可见, 当激活能 Q 与 T 无关时, $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1/T$ 的关系为直线关系。在热力学温度下, 相同应变速率的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与 $1/T$ 的关

系曲线如图 5 所示。由图 5 可见, t 在 980~1 180 °C 范围内曲线为直线, 说明该合金在 980~1 180 °C 范围内的热变形激活能相同, 变形过程只有一个激活系统被启动^[5]。

由图 5 可求出 $n_2=6.360$, $\ln A=41.210$, $Q=Rnn_2=487.054$ kJ/mol, 由此建立的、合金的 t 在 980~1 180 °C 范围内的流变应力方程为

$$\dot{\epsilon} = \exp(41.210)[\sinh(0.0079\sigma)]^{6.312} \cdot \exp\left(-\frac{487.054 \times 10^3}{8.314T}\right) \quad (11)$$

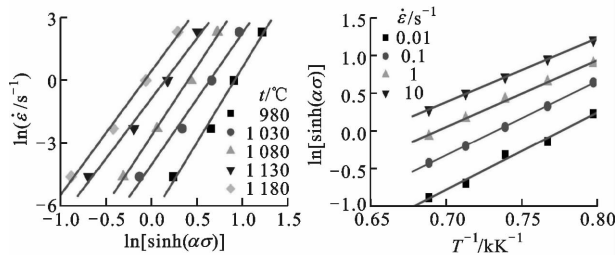


图 5 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln\dot{\epsilon}$ 和 $1/T-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 曲线

为验证方程的有效性, 采用 DEFORM-3D 有限元软件, 以式(11)为材料模型, 对热模拟试样的压缩过程进行了数值模拟, 并将模拟所得数据与工程应变为 0.5 的试验数据进行比较。图 6 是 $\dot{\epsilon}$ 分别为 1、10 s^{-1} 时模拟和试验所得结果的对比, 该锻造温度范围内的平均相对误差在 8% 以内。

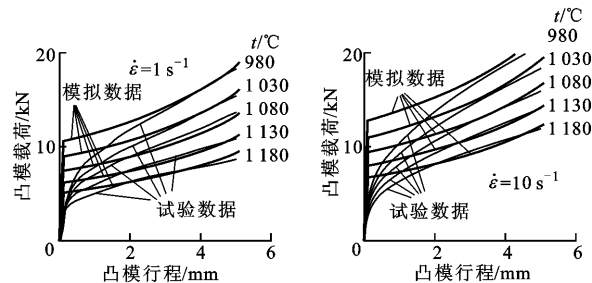


图 6 DEFORM-3D 模拟数据与试验数据对比

3 叶片模锻数值分析

43"汽轮机叶片如图 7 所示, 锻件长为 1 382 mm, 叶身由 13 个型面(A、B、C、D、E、E-F、F、G、H、J、K、Z、L)表达, 扭角为 69°, 总质量约 96 kg。

利用所建流变应力方程并将其输入 DEFORM-3D 中对叶片锻造过程进行模拟, 通过正交

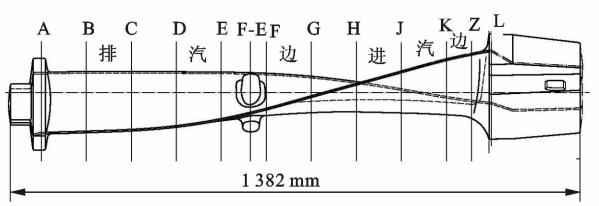


图 7 43"汽轮机叶片锻件简图

试验方法分析坯料结构尺寸及摆料位置对锻造成形质量的影响.图 8 为所建刚塑性有限元模型,坯料划分网格数为 10 万^[6].

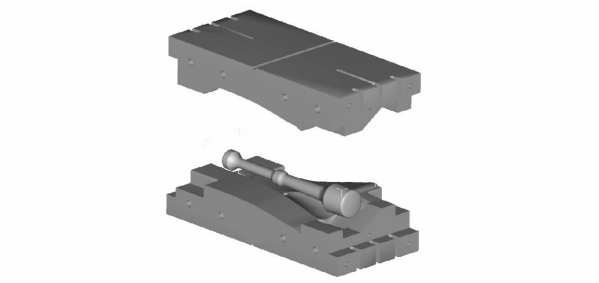


图 8 叶片坯料和模具有限元模型

3.1 正交模拟试验关键因素确定

在试制过程中,大多数缺陷发生在叶根和叶冠过渡处及凸台处.如图 9 所示,初始坯料形状与尺寸为: $R_1=100\text{ mm}$ (叶根过渡处弧长), $R_2=100\text{ mm}$ (叶冠过渡处弧长), $d=122\text{ mm}$ (凸台直径).坯料在模具型腔内时,坯料中心线与模具中心线的距离 e 为摆料位置.摆料时,坯料中心线可以偏离模具中心线而向排汽与进汽两侧靠近,在生产中该中心线有时需要偏向排汽侧,有时则要偏向进汽侧.本文定义,坯料中心线偏向模具型腔排汽侧为正值.根据生产经验,可将 R_1 、 R_2 、 d 、 e 作为 4 个关键因素进行正交试验分析.

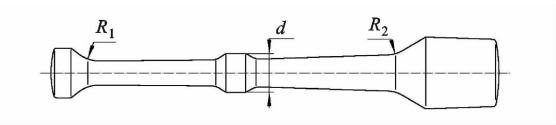


图 9 叶片坯料简图

3.2 正交模拟分析

表 2 为试验因素变化表,其中取值范围分别为 $R_1=50\sim150\text{ mm}$, $R_2=50\sim150\text{ mm}$, $d=112\sim122\text{ mm}$, $e=0\sim20\text{ mm}$.

试验结果采用 y_1 、 y_2 这 2 个指标进行考察,如表 3 所示.其中: y_1 为最大凸模载荷,取最小值 427

MN 为 100,最大值 505 MN 为 0,将所得的载荷值转化为 0~100 之间的数值; y_2 为模具的欠压量,取最小值 8.01 mm 为 100,最大值 9.57 mm 为 0.综合指标为

$$y=1.5y_1+y_2\tag{12}$$

表 4 是用 γ 表示的 y_1 、 y_2 、 y 的极差结果, d 的极差最大, R_1 次之, R_2 最小.由表 4 可见,凸台直径 d 对叶片锻造质量的影响为最显著,接下来依次为 R_1 和坯料摆料位置 e ,而叶身与叶冠过渡弧长 R_2 影响最小.

表 2 因素变化表

R_1/mm	R_2/mm	d/mm	e/mm
50	50	112	0
100	100	117	10
150	150	122	20

表 3 最大凸模载荷、模具欠压量及综合指标试验结果

y_1	y_2	y
28.21	89.47	131.79
58.97	26.32	114.78
0.00	38.60	38.60
64.10	43.86	140.01
44.87	10.53	77.84
83.33	64.91	189.91
100.00	0.00	150.00
42.31	100.00	163.47
75.64	21.05	134.51

表 4 各种因素下的最大凸模载荷、模具欠压量、综合指标及其极差结果

因素	y_1	y_2	y	γ
R_1	95.06	135.92	149.33	54.27
R_2	140.60	118.70	121.01	21.90
d	161.72	129.77	88.81	72.91
e	114.71	151.56	114.03	37.54

3.3 锻造工艺参数优化

各因素对锻造综合指标的影响如图 10 所示.由

图 10 可见; d 的大小对成形效果影响最大,取最小值 112 mm 时最好; R_1 越大,成形效果越好, R_1 的优化值为 150 mm;随着 R_2 增大,成形效果降低,最后略有上升,但影响较小, R_2 的最小值为 50 mm 较为合理;摆料位置 e 为中间水平,即 $e=10$ mm 时成形效果最佳.

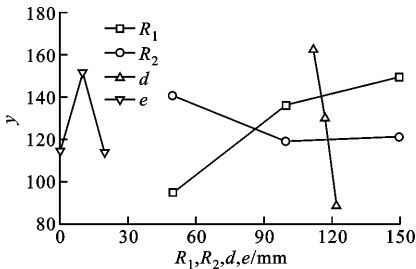


图 10 综合指标与各因素的关系曲线

凸模载荷对设备的影响关系着企业的生产成本,因此将最大凸模载荷作为单一指标进行正交试验分析,结果如图 11 所示. 由图 11 可见,除 d 以外,其他各因素的影响趋势与图 10 基本相同. 最大载荷随 d 的增大先减后增,取值为 117 mm 时最佳. 利用所得结果,保持其他因素为最佳值不变,对凸台直径进行单因素模拟试验,分析成形力及欠压量,得到水平范围内的最佳参数值,模拟试验用因素见表 5.

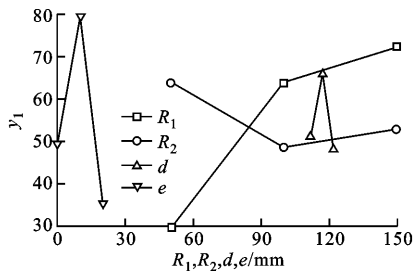


图 11 凸模载荷指标与各因素的关系曲线

表 5 模拟试验因素

R_1 /mm	R_2 /mm	d /mm	e /mm
150	50	112	10
150	50	117	10
150	50	122	10

在模拟试验中,载荷与锻打次数的关系如图 12 所示. 前 3 次锻打的凸模载荷较小且基本相等,而在第 2 火次,也就是从第 4 次锻打开始,载荷出现了较大差异. 由图 12 可见,第 2 组试验的载荷最小,而第 3 组的最大,这与正交试验的分析结果相符.

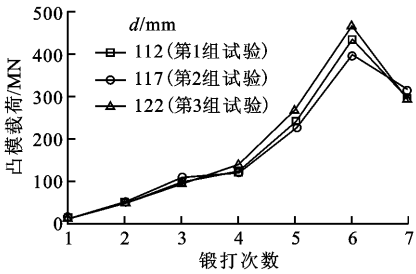


图 12 3 组试验凸模载荷与锻打次数的关系曲线

图 13 为 3 组试验中第 2 火次第 3 次锻打时的叶片外形. 由图 13 可见:第 1、第 3 组试验产品外型存在缺陷,锻件外形出现了“缺肉”与“多肉”现象;第 2 组试验的叶片锻件各处飞边均匀,充填质量较好. 根据上述对比分析,得出第 2 组试验 $d=117$ mm 为较佳选择. 至此,优化值为 $R_1=150$ mm、 $R_2=50$ mm、 $d=117$ mm 和 $e=10$ mm.



(a)第 1 组 (b)第 2 组 (c)第 3 组

图 13 3 组试验叶片成型外观

4 实践验证

优化后,对锻造过程进行数值模拟,得到的叶片锻件如图 14a 所示. 图 14b 为采用优化参数所得的叶片产品,该锻件表面质量较好,锻件飞边均匀.



(a)数值模拟结果 (b)锻造试模结果

图 14 数值模拟与锻造试模结果对比

采用 XJTUOM-II 三维光学测量系统对锻件进行测量,将叶片数模与所得的点云进行比较而自动生成误差云图,如图 15 所示. 从图 15 可见,锻件叶身内弧和背弧以及叶根、叶冠误差都在 3 mm 以内,

满足设计要求. 此外,锻造火次减少了 1 次,由此减少了工序、设备及资源损耗,提高了生产效率. 优化后节省材料 2.3 kg,每锻件叶片可节约材料成本 150.00 元.

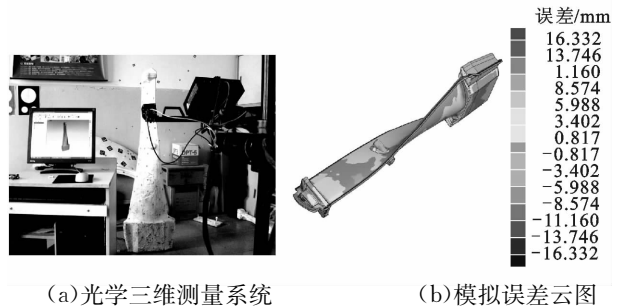


图 15 工艺优化前后锻件光学三维测量系统及模拟误差结果

5 结 论

- (1)建立了叶片材料高温流变应力方程,结果表明:该材料在高温压缩下的流变应力符合双曲正弦函数关系.
- (2)正交试验以及数值模拟分析表明:坯料的凸台直径 d 对叶片锻造质量的影响最大,叶根过渡处弧长 R_1 与坯料在模具型腔内的摆料位置 e 的影响其次,叶冠过渡处弧长 R_2 的影响最小.
- (3)生产试模结果表明,参数优化后的叶片锻件飞边均匀,表面质量较好,锻造载荷较低,由此可节

约 150.00 元/件的材料成本,锻造火次减少了 1 次,降低了设备磨损及资源的消耗,进而提高了生产效率.

参考文献:

[1] 张志文. 叶片锻造[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1987.

[2] LU X,BALENDRA R. Temperature-related errors on aerofoil section of turbine blade[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001,115(2):240-244.

[3] 刘郁丽. 叶片精锻成形规律的三维有限元分析[D]. 西安:西北工业大学材料科学与工程学院,2001.

[4] CHENG Lü, ZHANG Liwen, MU Zhengjun, et al. 3D FEM simulation of the multi-stage forging process of a gas turbine compressor blade[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 198(1/2/3):463-470.

[5] LIN Y C, CHEN M S, ZHONG J. Effect of temperature and strain rate on the compressive deformation behavior of 42CrMo steel[J]. Journal of Material Processing Technology, 2008, 205(1/2/3):308-315.

[6] BARIANI P F,BRUSCHI S, NEGRO T D. Integrating physical and numerical simulation techniques to design the hot forging process of stainless steel turbine blades[J]. Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(9):945-951.

(编辑 苗凌)