

结合数值模拟与物理实验的叶片锻造预成形拓扑优化设计研究

郭平义¹, 陆彬², 邵勇¹

(1. 江苏科技大学 先进焊接技术省重点实验室, 江苏 镇江 212003)

(2. 上海交通大学 模具 CAD 国家工程研究中心, 上海 200030)

摘要: 利用所提出的拓扑优化方法, 对复杂形状叶片锻造的预成形形状进行了优化设计。详细给出了该方法在三维模式下的优化策略、优化目标、单元增删准则、几何模型处理等关键技术。以合理精简毛坯、提高模腔充填性为综合优化目标, 利用自行开发的优化程序, 经过十余次的优化迭代, 获得了理论上的优化结果。研制了叶片锻造模具, 对优化后的预成形件进行了锻造成形实验; 利用激光测量设备采集了叶片锻件型面的几何数据, 并与数值模拟结果进行了比对。对预成形件制备工艺的可行性进行了详细讨论。结果表明: 基于拓扑优化方法所获得的叶片预成形设计结果较为理想。

关键词: 叶片锻造; 预成形优化; 拓扑算法; 锻挤成形技术

中图分类号: TG312

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)02-0461-07

预成形设计在复杂形状叶片锻造成形过程中的作用十分重要, 合理的预成形设计是提高锻件成形质量, 减少生产周期及成本的关键。近年来, 针对锻造成形设计及优化方面的研究吸引了较多关注, 特别是数值模拟技术的不断发展, 促进了复杂锻造成形设计由反复试模、修模的传统方式逐渐向基于计算机软件平台上的成形模拟、工艺优化的方向转变, 但是相关设计过程仍然依赖人工经验。为了实现预成形的“智能化”设计, 一系列优化设计理论及方法被相继提出。如研究较为深入的反向模拟法^[1, 2], 该方法结合数值模拟技术, 从理想锻件状态出发, 逐渐前推其成形过程各阶段形貌变化, 并最终确定较优的预成形形状; 而基于类势场相似理论, 利用静电场内分布的等势线来设计预成形形状的电场模拟法在近些年来也取得了一定进展^[3, 4]。然而, 此类方法的预成形优化往往仅满足于成形, 在多目标优化层面上则欠缺灵活性。为了获得更为理想的预成形形式, 一些最优化理论及算法被逐渐引入预成形设计问题中, 如: 灵敏度分析^[5, 6]、遗传算法^[7, 8]、代理模型技术^[9-11]等。尽管这些算法与预成形设计的有效结合突破了多目标优化问题的瓶颈, 并促进了预成形优化技术的快速发展, 但受各自的局限性^[12], 针对复杂形状锻造成形优化设计问题仍未得到有效解决。

近年来, 本作者基于拓扑优化思想, 率先提出了渐进结构优化设计方法以用于锻造成形优化设计^[13], 并相继在单元增删准则设计^[14]、三维复杂形状问题^[15]等预成形优化设计方面取得了积极成果, 但相关研究仍需进行系统的实验验证, 对优化后预成形件的制备问题也未进行深入探讨。本实验介绍了基于拓扑优化的锻造成形设计方法及相关技术, 并对复杂形状叶片锻造成形形状进行优化设计; 研制开发相关的叶片锻造及配套成形模具, 对优化的预成形件进行锻造成形实验验证, 并利用激光测量设备对叶片锻件翼型截面进行几何精度检测; 最后针对预成形件的制备问题进行详细分析及论述。

1 预成形设计的基本理论及方法

1.1 优化策略

图 1 给出了叶片锻造成形优化设计的拓扑优化策略。背景网格采用的是六面体单元网格系统, 其中的所有激活网格构成了预成形的拓扑结构, 背景网格单元在整个优化过程中结构及尺寸均不发生变化。优化过程进行之前, 首先定义一个初始的预成形拓扑结构模型做为原型。利用开发的型面拟合处理技术对拓扑结构模型进行几何曲面重构, 并引入有限元系统对成形过程进行数值模拟。原型模拟以及随后每次迭代

收稿日期: 2016-01-02

基金项目: 国家自然科学基金 (51005150)

作者简介: 郭平义, 女, 1978 年生, 博士, 副教授, 江苏科技大学, 江苏 镇江 212003, E-mail: 32615000@qq.com

过程中的成形模拟结束以后，程序都将分析模拟结果并判断优化目标函数是否满足收敛条件。如满足，则优化进程结束，输出当前的预成形优化结果；如不满足，则执行以下的拓扑优化程序：

1) 单元场量跟踪：建立背景网格与有限元变形单元之间的映射关系，将成形数值模拟物理场信息传递给拓扑背景网格上的激活单元。

2) 拓扑操作：基于单元增删准则和约束条件对当前状态背景网格执行拓扑增删操作，得到刷新后的拓扑激活网格构成的预成形形状。

3) 几何近似：采用非均匀 B 样条曲线构造方法对拓扑模型边界进行光顺化拟合处理，再通过标准的 STL 图形生成技术，重新构建有限元模拟程序可识别的几何模型。

4) 有限元模拟：将生成的预成形几何模型导入有限元系统，重新划分网格并执行成形模拟，最后根据模拟结果判断是否满足收敛条件。

重复上述过程，直至目标函数收敛，迭代进程结束。

1.2 优化目标

锻造预成形优化的目标是在保证材料充满模腔的前提下，尽量减小飞边体积，改善锻件整体的变形均匀性。但是，提高锻件的充填性与改善锻件的变形均匀性在拓扑进化策略方面往往并不一致。因此，较为方便的建模方法是从模腔充填性及毛坯减重的角度出发，而锻件整体变形均匀性可作为评判优化效果的指标，则优化目标可表示为：

$$R = (1 - \frac{V_U}{V_D}) \times 100\% \tag{1}$$

$$\psi = \frac{V_D}{V_A} \times 100\% \tag{2}$$

$$\bar{\epsilon}_{S.D.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\bar{\epsilon}_{e,i} - \bar{\epsilon}_e^a)^2 \cdot V_i]}{\sum_{i=1}^n V_i}} \tag{3}$$

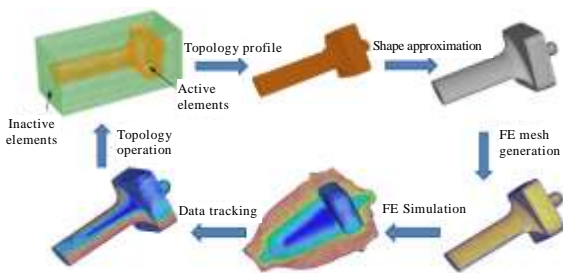


图 1 优化策略

Fig.1 Optimization strategy

式中， V_D 为理想的锻件体积，属于已知条件输入； V_A 为实际锻件体积， V_U 为当前模腔未充满部分的体积； $\bar{\epsilon}_{S.D.}$ 为等效应变均方差， $\bar{\epsilon}_{e,i}$ 为单元 i 的等效应变， $\bar{\epsilon}_e^a$ 为单元总体平均等效应变， V_i 为单元 i 的单元体积， n 为单元数量。公式(1)用以评估锻件的模腔充填效果，公式(2)则反映了材料利用率，而公式(3)则表征了锻造总体变形均匀性。

1.3 拓扑单元增删准则

根据先前基于充填性与变形均匀性的多目标增删准则内容^[15]，引入了加载方向上的应变分量以及平均应力作为单元增删准则的组成参量。该分量组合形式既可以表征单元的拉压应变状态，进而促进模腔的填充；又能在一定程度上减少单元的应变状态差异，从而改善单元总体的应变均匀程度。根据以上分析，并分别考虑两部分的单元增删相关性，其表达式可表示为：

$$C^F = u_1 \cdot \frac{\sigma_{m,i} - \sigma_{m,\min}}{\sigma_{m,\max} - \sigma_{m,\min}} + u_2 \cdot \frac{\epsilon_{z,i} - \epsilon_{z,\min}}{\epsilon_{z,\max} - \epsilon_{z,\min}} \tag{4}$$

式中， $\epsilon_{z,i}$ 为单元 i 的 z 方向(载荷方向)正应变； $\epsilon_{z,\max}$ 、 $\epsilon_{z,\min}$ 为最大、最小的单元 z 向正应变； u_1 、 u_2 为各项权重系数，本研究取 0.5。参照先前给出的单元平均压力、载荷方向应变分量与单元增删的关系， C^F 值大的单元附近考虑增加单元，而 C^F 值小的单元则相应被删除。

1.4 几何转换

预成形拓扑模型更新以后，需要引入有限元模拟系统进行成形过程的仿真模拟。本研究基于非均匀 B 样条曲线生成技术并结合了最小平方拟合约束条件，开发了自由曲面拟合算法。利用该算法程序，通过合理提取拓扑网格表面单元结点为拟合曲面逼近型值点，最终实现对拓扑模型的几何转换。图 2a 为拓扑预成形模型，图 2b 为几何转换后的标准 STL 格式模型。

2 预成形优化过程及结果

所研究的理想叶片锻件外廓尺寸约为 70 mm×28 mm×28 mm，体积为 9204 mm³。为了模拟分析及后

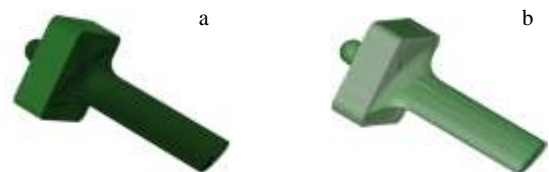


图 2 拓扑曲面几何近似

Fig.2 Surface approximation for topological model: (a) topological preform model and (b) preform model with STL geometric format

续实验的方便，本研究采用了工业纯铝作为叶片锻件的材料，其流动应力模型参考文献[16]，性能参数如表 1 所示。起始锻造温度设定为 400 °C。初始叶片预成形形状如图 3a 所示，工件与模具间摩擦模型采用的是常应力模型，摩擦因子为 0.3。上模打击速度为 200 mm/s，下模不动。叶片锻造有限元模型如图 3b 所示。

图 4 为预成形外形的进化过程以及相应的锻后等效应变结果。由图可见，随着优化的进程，预成形外形逐渐变化，其所对应的锻后飞边明显减小，优化过程显著提高了材料利用率。另外，从锻后的等效应变分布上看，叶片锻件的高应变主要集中在榫头与叶身型面的转接部位，而随着预成形的逐渐优化，其锻后的高应变区域及等效应变峰值均明显减小，这对改善变形材料的塑性流动、减少锻造磨损及缺陷、提高锻件成形质量均有积极作用。

图 5b 给出了模腔填充率 R 与材料利用率 ψ 随迭代优化进程的变化情况。由图可见， ψ 值随着优化进程持续上升，表明材料的利用率不断提高；而截止至 10 次优化结果，相比于初始预成形，毛坯已累积减重约 16.5%，而模腔填充率 R 数值始终保持在 99% 以上，没有出现明显下降。需要说明的是， R 值及 ψ 值的计算主要依据成形过程坯料体积的变化，然而变形体在

有限元模拟过程中无法避免体积损失，因此 R 值无法达到 100%。10 次优化后的 R 值开始出现了快速下降，这表明预成形体积的减少已经开始影响模腔的填充率，锻件出现了明显的欠填充情况。综合分析，10 次优化的预成形结果较为理想。而从等效应变均方差(图 5a)的变化情况来看，该值随着优化进程明显下降，说明材料的均匀变形程度不断提高。

3 叶片锻造实验

为了验证预成形的优化结果，本实验研制了叶片锻造模具及其配套的工装(图 6)，以纯铝为材料加工出了 10 次优化后的预成形制件，用以开展锻造实验。由于形状较为复杂，预成形件在加工过程中对榫头部位

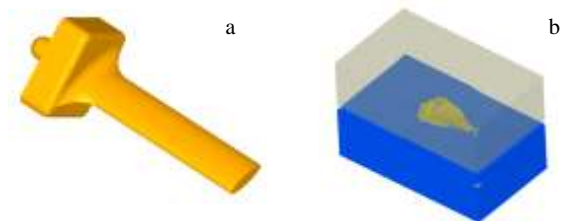


图 3 叶片锻造有限元模型

Fig.3 FE model for blade forging: (a) initial preform model and (b) blade forging model

表 1 工业纯铝性能参数

Table 1 Material properties of pure aluminium

	Young's modulus, E/GPa	Possion's ratio, ν	Density, $\rho/\text{kg m}^{-3}$	Heat capacity, $C_p / \text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Thermal conductivity, $\lambda/\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Thermal expansion/ $^\circ\text{C}^{-1}$
Workpiece	69	0.33	2700	900	247	2.3×10^{-5}

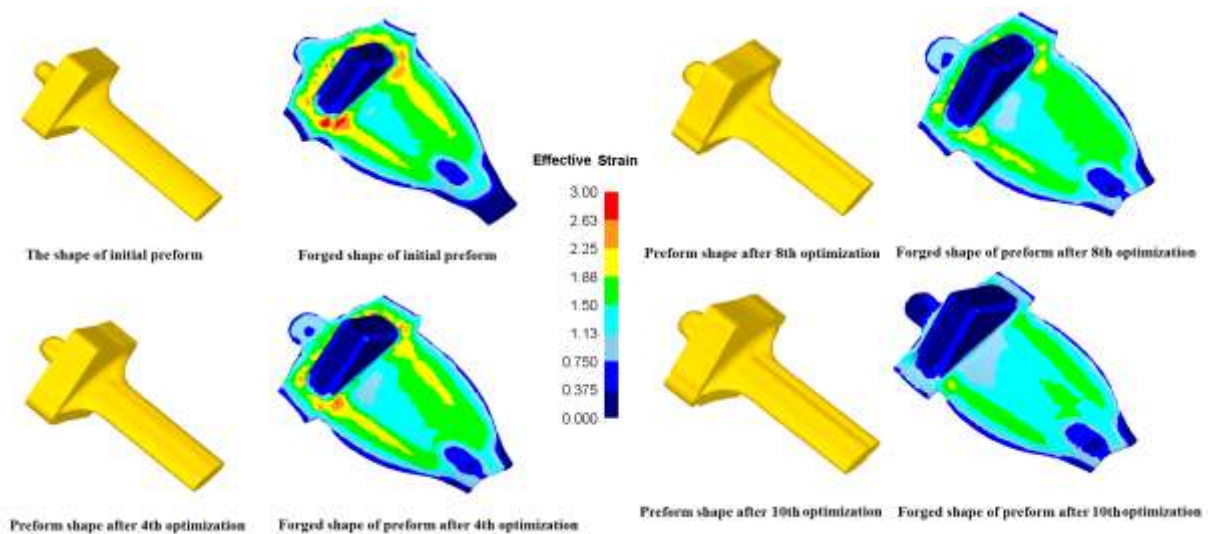


图 4 预成形进化过程及等效应变分布情况

Fig.4 Evolution process of preform profile with corresponding equivalent strain distribution

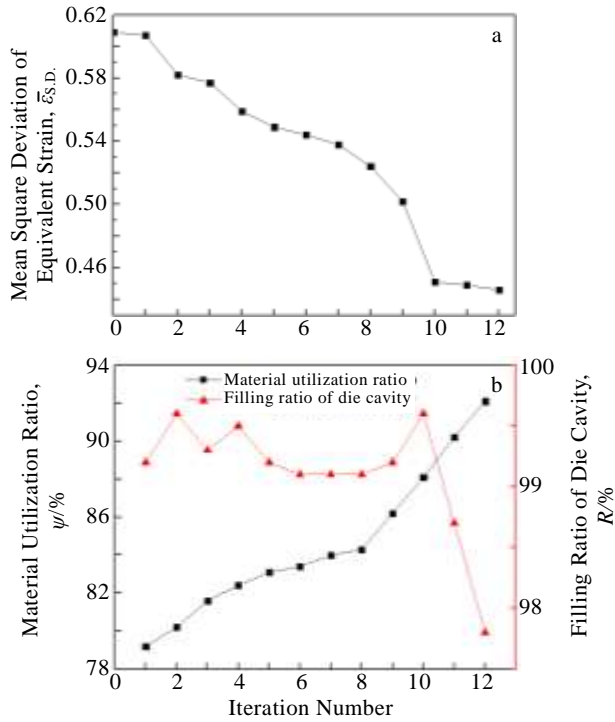


图 5 优化目标随迭代进程变化情况

Fig.5 Changes of optimization objectives with preform iteration process: (a) mean square deviation of equivalent strain and (b) material utilization ratio and die-filling rate

做了适当的简化处理(图 7a)。从叶片的锻后形貌上看(图 7b)，锻件外形完整，模腔充填效果较好，叶身部分形貌与模拟结果基本一致，这表明：结合有限元模拟的预成形优化结果基本满足叶片成形的设计要求。

为了进一步验证叶片型面的几何成形精度，利用 KEYENCE 公司的 LK-G150 激光位移传感器对切边后锻件三处叶身横截面上的型面数据进行了采集，并与数值模拟的外形结果进行了比较，该设备的测量精度为 0.01 mm。图 8 给出了所测横截面位置示意图(A 截面、B 截面、C 截面)以及激光测量设备的照片。

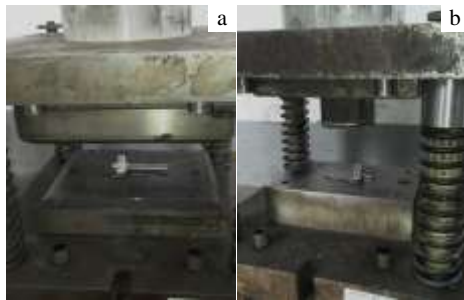


图 6 叶片锻造及切边模具

Fig.6 Blade forging equipment: (a) forging die and (b) trimming die

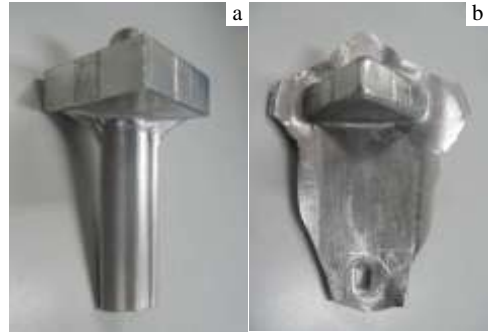


图 7 优化的叶片锻件照片

Fig.7 Photos of optimized forging parts: (a) preform part and (b) forged blade

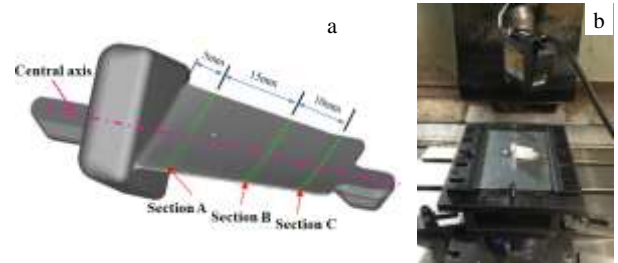


图 8 叶片型面几何精度评估

Fig.8 Evaluations of geometrical accuracy with aerofoil sections: (a) schematic diagram of chosen aerofoil sections and (b) the photo of laser measuring equipment

为了分析 3 个截面的几何轮廓差异，以图 8a 中的中心轴线与三横截面交点为坐标零点，并在各截面平面内，每隔 2 mm 作为一个测量点位来评估截面线间的几何位置偏差。图 9 分别给出了实际叶片锻件三处横截面上型值点与对应的数值模拟外形的几何偏差结果。从图中数值上看，位于截面中间部位的偏差值较小，而靠近边缘的偏差值有所增大，这与叶片锻造型面回弹变形情况较为吻合。总体上看，叶片锻件型面与模拟成形结果较为一致，基于拓扑方法所优化出的预成形件能够满足叶片锻造精度要求。

4 预成型件制备过程讨论

相比于初始的预成形设计，本实验所优化的预成形件在叶身形状上显得略为复杂。因此，在不增加成形工序的前提下，优化后的预成件能否顺利制备是衡量其设计合理性的关键。此类预成形件较为理想的制备方式是采用镦挤复合工艺。然而，由于挤压比较大，挤出件杆部表面常出现裂纹。

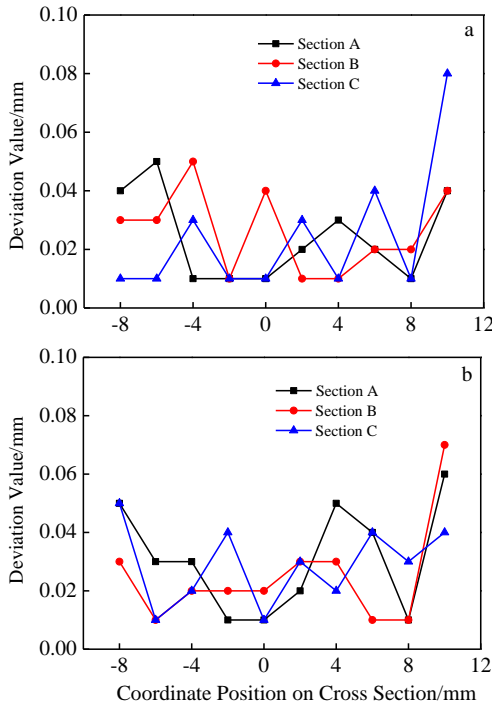


图 9 实际锻件截面线与模拟截面线的几何偏差结果

Fig.9 Shape deviations of aerofoil sections between actual forged part and FE simulation result: (a) shape deviation of concave aerofoil surface and (b) shape deviation of convex aerofoil surface

对优化前后预成形件的镦挤复合成形过程进行了有限元模拟，模拟参数参照先前锻造部分设置，其有限元模型如图 10 所示。为了研究预成形杆部挤出过程的断裂行为，基于 C&L 韧性断裂准则^[17]对杆部挤出过程的损伤情况进行了数值模拟，材料局部积累损伤值 C 的计算形式如下：

$$C = \int \bar{\epsilon}_D \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (5)$$

其中， $\bar{\epsilon}_D$ 为累积的塑性应变； $\bar{\epsilon}$ 为等效应变； σ^* 为最大主应力； $\bar{\sigma}$ 为等效应力。图 11 为不同预成形镦挤过程的损伤累积情况模拟结果。由图所示，传统预成形挤出杆部的局部侧边位置出现极高的损伤值，这一区域与实际裂纹位置基本一致；而优化后的预成形挤出杆部表面整体平均的损伤值要高于传统形式，但极大的 C 值区域并未出现在侧边缘，并且从云图上研判，其极值应小于传统预成形形式。

为了对试件表面高损伤区域内 C 值进行量化分析，图 12 分别跟踪了该区域内各 6 个表面积分点上的 C 值随成形过程的累积变化情况。由图所示，所有积分点上的损伤值随成形过程均逐渐增大，未优化预成

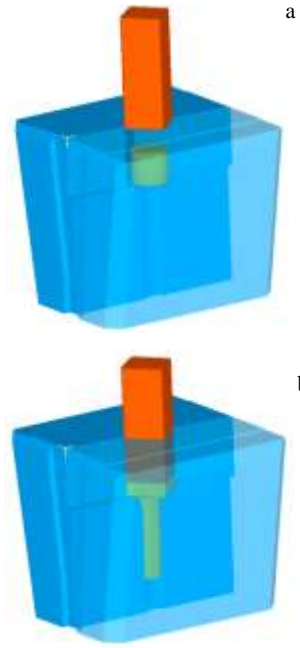


图 10 预成形镦挤复合成形有限元模型

Fig.10 FE model for preform preparation with extrusion-upsetting forming technology: (a) before extrusion-upsetting process and (b) after extrusion-upsetting process

形积分点上的损伤极大值超过 0.7，相比之下，优化后的预成形损伤极大值未超过 0.5，这表明优化后的预成形设计在镦挤过程中的极限损伤程度有所降低，可在一定程度上降低变形材料出现裂纹的几率。另外，优化的预成形各点损伤值差异相对较小，表明韧性断裂损伤在较大区域范围内逐渐发展；而未优化的预成形各点损伤值差异较大，高损伤区域集中在很小的范围内，并且迅速增加到较高程度，这种应力状态易引起裂纹的快速扩展，并造成宏观裂纹。以上结果进一步证明，在相同的镦挤条件下，优化后的预成形在抗韧性断裂成形性方面优于未优化的预成形设计。

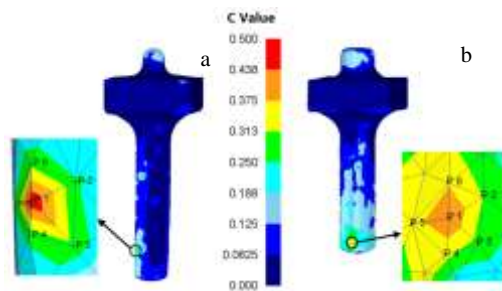


图 11 韧性断裂损伤累积模拟结果对比

Fig.11 Comparison of cumulative damage values of ductile fracture: (a) preform without optimization and (b) optimized preform

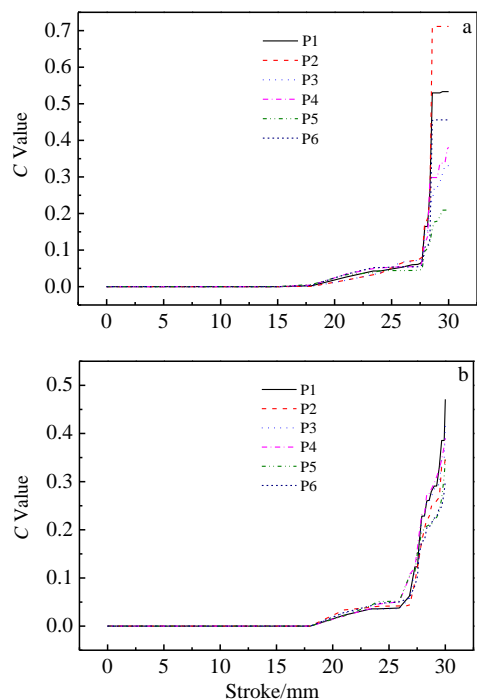


图 12 高损伤区域表面积分点上 C 值随成形过程的变化情况

Fig.12 C value changes on the integral points located in extruded surface with high damage values during the forming process: (a) preform without optimization and (b) optimized preform

5 结 论

1) 与初始未优化的预成形相比, 优化后的预成形在减重约 16.5% 的情况下, 仍保持了较好的模腔充填性, 并且成形过程中的局部高应变也显著下降, 表明材料的流动充填性得到改善, 这有利于减少成形缺陷。

2) 叶片实际锻造叶身外形以及横截面轮廓的几何精度与有限元模拟结果基本一致, 这表明基于拓扑优化方法的叶片锻造预成形设计结果较好的满足了叶片锻件的成形及精度要求。

3) 虽然优化后预成形件在外形上相比未优化预成形件略显复杂, 但两者在锻造过程中的韧性断裂损伤模拟结果则表明: 优化后的预成形其局部极限损伤程度要低于未优化的预成形, 其在抗韧性断裂成形性方面更为理想, 进而对预成形件的制备更为有利。

参考文献 References

- [1] Gao Tao(高 涛), Liu Yuli(刘郁丽), Yang He(杨 合) *et al.* *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering(机械科学与技术)* [J], 2004, 23(10): 1219
- [2] Gao Tao(高 涛), Yang He(杨 合), Liu Yuli(刘郁丽). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(4): 640
- [3] Wang Xiaona(王晓娜), Li Fuguo(李付国), Xiao Jun(肖 军) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2009(5): 237
- [4] Cai J, Li F G, Liu T Y. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2011, 56(5-8): 579
- [5] Zhao G, Ma X, Zhao X *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 147(2): 217
- [6] Acharjee S, Zabarar N. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*[J], 2006, 195: 6822
- [7] Castro C F, Ant3nio C A C, Sousa L C. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 146: 356
- [8] Guan J, Wang G C, Guo T *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 499(1-2): 304
- [9] Yang Yanhui(杨艳慧), Liu Dong(刘 东), He Ziyang(贺子延) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2009, 38(6): 1019
- [10] Bonte M H A, Boogaard A H V D, Hu Tink J. *Structural and Multidisciplinary Optimization*[J], 2009, 35: 571
- [11] Tang Y, Chen J. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [J], 2009, 39: 531
- [12] Shao Yong(邵 勇), Lu Bin(陆 彬), Chen Jun(陈 军) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2012, 19(6): 1
- [13] Lu B, Ou H, Cui Z S. *Structural and Multidisciplinary Optimization*[J], 2011, 44(6): 785
- [14] Shao Y, Lu B, Ou H *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2014, 71(1-4): 69
- [15] Shao Y, Lu B, Ou H *et al.* *Structural and Multidisciplinary Optimization*[J], 2015, 51(1): 199
- [16] Rezaei Ashtiani H R, Parsa M H, Bisadi H. *Materials Science and Engineering: A*[J], 2012, 545(1): 61
- [17] Oh S I, Chen C C, Kobayashi S. *Journal of Engineering for Industry*[J], 1979, 101(1): 36

Optimal Design for Preform of Blade Forging by Topological Algorithm Combined with Numerical Simulation and Physical Experiment

Guo Pingyi¹, Lu Bin², Shao Yong¹

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

(2. National Die and Mold CAD Engineering Research Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Preform design of blade forging has been optimized by a developed topology method. The key techniques of 3D topology optimization included optimization strategy, optimization objectives, element addition and removal criterion and geometry model treatment. To fulfill the objective of increasing raw material utilizing rate and die-filling rate, a theoretical optimized preform has been obtained after optimization iterations of 10 times based on the self-programmed code. Blade forging experiments were implemented to validate the formability of optimized preform form. Aerofoil section profiles extracted from actual forged blade by the laser measure equipment were compared with that from the FE results. The preparation technique of optimized preform was also discussed. A satisfactory optimal result of preform design has been achieved by using the topological method.

Key words: blade forging; preform optimization; topological algorithm; extrusion-upsetting forming technology

Corresponding author: Shao Yong, Ph. D., Senior Experimentalist, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, P. R. China, E-mail: shy782004@163.com