

面向微观组织优化的锻造工艺预成形优化设计*

王广春**, 管 婧, 李 玲

(山东大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 以锻件晶粒尺寸细小均匀为目标, 以预成形形状设计为对象, 提出了锻造成形过程微观组织优化设计方法, 构建了锻造成形过程微观组织优化目标函数, 并确定锻造成形预成形形状作为优化过程的设计变量, 给出了优化设计的具体步骤, 采用微观遗传算法和有限元模拟方法开发了锻造过程微观组织优化程序, 并对典型的圆柱体锻粗进行了面向微观组织优化的预成形设计, 取得了较好的效果。

关键词: 锻造; 微观组织; 优化; 预成形; 遗传算法

中图分类号: TG311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2007) 01-0010-03

Microstructure optimal design of the forging process preform

WANG Guang-chun, GUAN Jing, LI Ling

(College of Materials and Engineering, Shandong University, Ji' nan Shandong 250061, China)

Abstract: An optimization design method of the microstructure in forging process is proposed. The optimal objective is to obtain the fine and symmetrical grain size. The optimal object is the preform shape. The grain size objective function are put forward. The preform shape is used as the optimal design variables. Using the genetic arithmetic and FEM simulation, the software for optimal design method of the microstructure in forging process based on preform design is developed. The preform design of the cylinder upsetting process realizes the optimization of the final microstructure.

Keywords: forging; microstructure; optimization; perform design; genetic arithmetic

1 引言

随着制造业竞争的日益加剧, 高效、精密、低耗、优质的产品已经成为制造业提高产品竞争能力的主流追求。锻造工艺作为机械制造业重要的加工工艺之一, 少无飞边的精密成形技术及控制和提高锻件性能已经成为锻造工艺研究的热点。有限元等数值模拟技术经过工艺过程的仿真, 为锻造工艺方案制定和锻模结构设计提供了有效的验证手段, 但是, 根据模拟结果进行工艺方案和模具结构设计的改进仍需要人工来确定。为此, 人们将工程优化设计方法与有限元数值模拟方法相结合, 对锻造成形过程进行了优化设计。目前的锻造过程优化设计, 大部分都是以终锻件的形状为优化目标, 其优化目的是获得净形或近净形锻件^[1~4]。形状固然是设计需要考虑的主要方面, 但是, 锻件微观组织均匀且细致, 锻件的力学性能等就会更加优越。因而, 对锻造过程的研究不应局限于形状模拟和优化控制, 而应在形状模拟基础上同时进行微观组织的优化控

制。

为了在锻造过程中合理地分配金属, 使金属在终锻时完全达到形状要求且不出缺陷, 往往在终锻前进行一次或多次预锻, 即预成形, 预成形也直接影响着锻件的最终形状和微观组织性能。

本文以直接设计预成形模具形状为优化目标, 将有限元和遗传优化算法结合起来, 自行开发锻造成形过程微观组织优化软件, 并对典型的热锻粗工艺进行晶粒度细小均匀的优化控制。

2 目标函数构建

锻件晶粒尺寸细小均匀是决定锻件组织性能的重要因素, 因此将晶粒尺寸作为优化的目标函数。优化设计的目标是通过设计预成形模具型腔形状使终锻后锻件所有单元体的名义晶粒尺寸与终锻件名义晶粒尺寸的平均值之差最小。其数学表达式为^[5]:

$$\min \left[\frac{\sum_{i=1}^{NE} \int (D_m^i - D_{ave})^2 dV_i}{\sum_{i=1}^{NE} \int dV_i} + \beta_i (D_{ave} - D_{des})^2 \right] \quad (1)$$

式中 NE——模拟坯料的单元体总数

D_m^i ——模拟中每个单元体的实际晶粒尺寸

β_i ——权因子

D_{des} ——所要求获得的名义晶粒尺寸

* 国家自然科学基金资助课题 (50475130) 及教育部新世纪优秀人才支持计划资助课题 (教技司 [2005] 290 号)

** 男, 40 岁, 博士后

收稿日期: 2006-03-20

D_{ave} ——最终锻件的名义晶粒尺寸的平均值，计算式为：

$$D_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{NE} \int D_m^i dV}{\sum_{i=1}^{NE} \int dV_i}$$

目标函数值越小，设计获得的最终成形件晶粒尺寸就越细致和均匀。

3 设计变量选取

设计变量是能影响设计质量或结果的可变独立参数。在优化问题中，合理的选取设计变量是优化建模的一个重要问题。根据设计变量的确定原则，设计变量的数目应该适中，太多使问题复杂化，难于求解；太少，不能求得最佳的结果。因而，应对影响设计指标的所有参数进行分析、比较，从中选择对设计质量有着显著影响且能直接控制的独立参数作为设计变量。

本文采用 3 次 B 样条曲线来描述二维的模具及预成形模具形状，用 B 样条曲线的控制点作为设计的变量，变化 B 样条曲线的控制点坐标，可得到不同的 B 样条曲线形状。对于每个控制点，有两个自由度。为便于控制形状及简化模拟过程，本文假设控制点的横坐标不变，只选取控制点的纵坐标进行优化设计。

4 优化方法选取

目前常用的预成形优化设计方法主要 3 种：基于有限元的正向模拟方法；反向追踪法；近年比较热门的基于灵敏度分析的优化方法。与以上算法相比，遗传算法具有全局优化和隐含并行性的优点，尤其适用于设计灵敏度可能是不连续的或者目标函数具有多个极值点，可以处理任意形式的目标函数和约束，设计迭代只依赖于目标函数的情况，不用计算导数值。故优化模块可与数值模拟模块相对独立，灵活性好，且可以很好地实现 CAD 软件和 CAE 软件的双向集成。基因遗传同时搜索解空间内的许多点，因而可以有效的防止搜索过程过早地收敛于局部最优解，而有较大把握求得全局最优解。因而，本文采用微观遗传算法对锻造过程微观组织优化进行预成形优化设计，为确保具有较好的自适应性和较高的效率，优化中群体规模选定为 5。

5 优化设计步骤

(1) 首先进行基因编码，将设计变量转化成二

进制字符串（即染色体），随机生成一组数据，作为初始种群，形成一个预成形模具型腔形状（即给定 3 次 B 样条曲线控制点的初始坐标值），即最初的父代。这组数据的范围应在优化对象的最大值和最小值之间。

(2) 用初始种群中生成的参数值替换所要优化的参数（B 样条曲线控制点的坐标值）的原始数值，形成一个新的有限元模拟软件的输入文件，以供有限元模拟软件进行模拟。

(3) 调用有限元模拟软件进行预成形工步的模拟。

(4) 预成形工步结束后，调用有限元软件进行终锻过程模拟。经过有限元仿真之后，计算出锻造过程中的应力、应变、等效应变、等效应变速率以及温度场等的信息以及节点坐标等形状信息。

(5) 利用上述模拟所得到的场量信息，计算出晶粒尺寸目标函数。

(6) 进入微观遗传算法评价模块，读入目标函数值，进行优选，找出种群中目标函数值的最小者，计算出本代目标函数的平均值，如果两代平均值的相对误差小于设定的较小数值 ϵ ，就认为优化过程收敛，结束循环；如果大于 ϵ ，就随机调出父代中的两个字符串进行交叉，生成新的字符串，再对新的字符串进行突变；最后，将生成的新字符串重新写入父代数组中，替换原来的父代，生成新生代，重复 (2) ~ (6) 步骤，重新进行循环，直到目标函数值满足要求，退出循环，程序结束。

6 应用实例

采用自行开发的基于遗传算法的优化软件，结合有限元数值模拟技术，对非等温状态下的圆柱体镦粗过程进行了面向微观组织优化的预成形优化设计。

非等温锻造过程采用的坯料为 $\Phi 4.0 \times 4.0$ 的圆柱体，模具的初始的预热温度是 300°C ，模具与工件之间的热传导系数和模具材料的热传导系数取值为 $4.0 (\text{N}/^\circ\text{C} \cdot \text{s} \cdot \text{mm})$ ，模具材料的热容为 $50.0 (\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，锻件始锻温度是 1100°C 。模具与工件之间的摩擦因子为 $m=0.3$ 。在优化中，采用 5 个 B 样条控制点来描述预成形模具的形状，由于 3 次 B 样条曲线段仅由 4 个顶点矢量确定，因此共有 2 条 B 样条曲线和 5 个优化设计变量。

图 1 所示为晶粒尺寸目标函数随优化迭代次数的变化情况。晶粒尺寸目标函数由最初的 0.0227 下降到最终的 0.0017，表明在优化的过程中锻件的晶粒尺寸得到较显著的细化和均匀化，实现了预期的

优化目的。

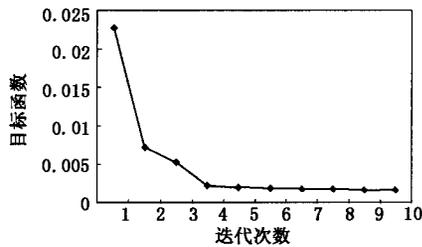


图 1 晶粒尺寸目标函数随优化迭代次数的变化

Fig. 1 Grain size objective function vs. optimization iteration

图 2 所示为优化迭代中预成形模具、预成形件形状、终锻件形状以及晶粒度的变化情况。由图 2 可以看出,优化前,晶粒度的大小在 $49.792\mu\text{m} \sim 142.445\mu\text{m}$ 之间变化,平均晶粒度为 $117.28\mu\text{m}$,经过 10 次优化迭代,晶粒度变化的范围在 $59.044\mu\text{m} \sim 75.734\mu\text{m}$ 之间,而平均晶粒度为 $70.95\mu\text{m}$ 。平均晶粒度下降了约 $47\mu\text{m}$,而且分布均匀性得到了明显的提高。这说明优化后,微观组织更加均匀细致,优化效果明显。

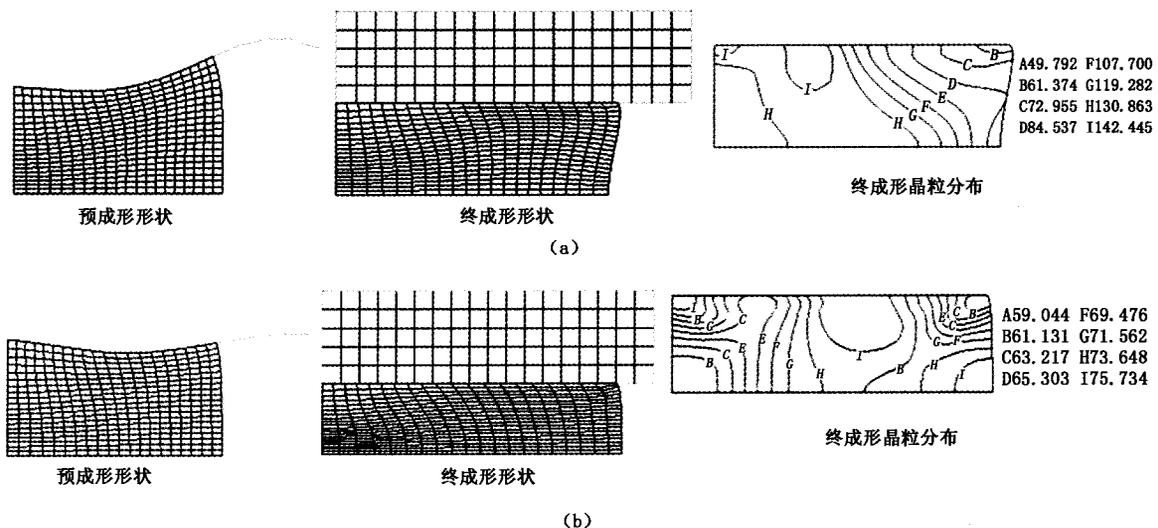


图 2 优化前后的预成形模具型腔形状、预成形件形状、终锻件形状及终锻件晶粒度的分布

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 2 Cavity shape of the preform die, the preform shape, the forgings shape and the grain size distribution of the forgings before and after optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

7 结论

以锻件晶粒尺寸细小均匀为优化目标,以预成形形状设计为优化对象,提出了锻造成形过程微观组织优化设计方法,采用微观遗传算法与有限元模拟相结合,并以自由锻粗为例,进行了预成形优化设计。

(1) 建立了晶粒尺寸细小均匀的锻造成形过程微观组织优化目标函数。

(2) 用 3 次 B 样条曲线来描述预成形模具型腔形状,以 3 次 B 样条的控制点坐标作为设计变量,通过对控制点坐标的优化,使目标函数最小,以实现最终的具有良好微观组织锻件优化。

(3) 采用微观遗传算法与有限元模拟相结合的方法,开发了预成形锻造成形过程微观组织优化程序,并对典型的圆柱体锻粗进行了面向微观组织优化的预成形设计,平均晶粒度下降了约 $47\mu\text{m}$,而且分

布均匀性得到了明显的提高。

参考文献:

- [1] 赵新海. 基于有限元模拟的锻造成形优化设计方法研究[D]. 山东: 山东大学博士学位论文, 2001.
- [2] Kang B S, Kim N, Kobayshi S. Computer-aided preform design in forging of an airfoil section blade [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1990, 30 (1): 43-52.
- [3] Park J J, Rebelo N, et. al. New approach to preform design in metal forming with the finite element method [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1983, 23 (1): 71-79.
- [4] 赵国群, 王广春, 等. 材料塑性成形过程最优化设计-II: 灵敏度分析方法在模具设计中的应用 [J]. 塑性工程学报, 1999, 6 (3): 1-6.
- [5] 王广春, 管婧, 马新武, 等. 金属塑性成形过程的微观组织模拟与优化技术研究现状 [J]. 塑性工程学报, 2002, 9 (1): 1-5.