

文章编号: 1000-6893(2005)06-0764-04

应用基于 FEM 的预成形最优化方法 提高锻件变形均匀性

杨艳慧, 刘东, 罗子健, 闫世成

(西北工业大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710072)

Improving the Deformation Uniformity within Forgings by Applying Preformed Optimization Based on FEM

YANG Yanhui, LIU Dong, LUO Zijian, YAN Shicheng

(College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 锻件变形分布不均匀将导致锻件各部位的组织和性能产生很大差异。应用基于正向有限元数值模拟和最优化方法进行坯料预成形设计的新方法, 可显著提高锻件各部位的变形均匀性。首先介绍了以提高锻件变形分布均匀性为目的的坯料预成形最优化方法的基本原理, 并针对典型的 IN718 合金涡轮盘锻件进行了坯料预成形设计。给出了预成形坯料与普通圆柱坯料的对比结果, 并进行了相应的试验验证。结果表明, 应用这种方法对 IN718 合金涡轮盘锻件进行坯料预成形设计, 可使盘锻件各部位变形均匀性明显改善。

关键词: 预成形最优化; 有限元; IN718 合金; 涡轮盘锻件; 变形均匀性

中图分类号: TG316; TBI15; TBI14.1 **文献标识码:** A

Abstract: Nonuniform deformation within forgings can result in much difference in microstructure and property. The preform design applying the method for preform optimization based on FEM can improve the deformation uniformity within forgings effectively. The fundamental of this method is formulated firstly. As an example, the preform optimization for a typical IN718 turbine disk forging is performed. The results for the optimal billet are presented and compared with those of the cylinder billet. The die forging experiments with different billets are carried out to validate this method. The results show that the deformation uniformity within the turbine disk can be improved evidently by application of the proposed method.

Key words: preform optimization; FEM; IN718 alloy; turbine disk forging; deformation uniformity

由于锻件形状的复杂性, 以及工件- 模具接触面上摩擦的存在, 锻件内部往往会产生比较明显的变形不均匀性, 从而导致锻件内各部位的组织性能出现差异。尤其是对于组织性能非常敏感的难变形材料锻件, 变形不均匀现象是影响锻件质量的重要因素之一。因此, 提高锻件内变形分布均匀性的方法研究具有重要的理论和实际意义。其中, 通过预成形设计确定合适的坯料形状来提高锻件变形分布均匀性是一种应用前景良好的方法。

随着有限元方法(FEM)在塑性加工中的广泛应用, Kobayashi^[1]在80年代提出了所谓的反向跟踪方法来进行预成形工步和预成形设计。这种方法从锻件的最终构形出发, 通过规定的次序或一定的判据, 以获得任一时刻坯料的形状和尺寸, 已应用于一些简单的塑性成形过程。Han^[2]

等将最优化方法引入反向跟踪方法, 以确定应该与模具脱离的节点。Zhao^[3]等提出了反向模具接触跟踪算法, 确定边界节点脱模次序。Badri narayanan 和 Fourment^[4]等根据结构优化设计中的敏感性分析方法, 将正向有限元数值模拟方法和最优化方法相结合, 提出了所谓基于 FEM 的预成形最优化方法。

从上述各种预成形设计方法的目的和应用情况来看, 目前多以获得充填完整、少/无余量的净形或近净形锻件为目的, 因而一般是以变形过程中坯料质点与模具的接触关系为基础构造计算格式。应该指出, 这种预成形设计方法对于控制坯料充填过程和获得净形锻件来说是有效的, 但却难以满足锻件内部变形分布均匀性的要求。因此, 本文借鉴基于 FEM 的预成形最优化方法的基本原理, 提出了控制锻件内变形分布差异的目标函数, 从而建立了以提高锻件内变形分布均匀性为目的的预成形最优化计算格式。

收稿日期: 20040903; 修订日期: 200501221

基金项目: 国家自然科学基金(59905021)、航空科学基金(02H53062)资助项目

1 基于 FEM 的预成形最优化方法的基本原理

与控制坯料的充填过程,使其充填完整并且不产生毛边的预成形最优化方法不同,以提高锻件内变形分布均匀性为目的的预成形最优化所采用的目标函数,必须能够定量反映锻件内部变形的分布情况及其与预期达到的应变量的差异。本文以整个锻件内各个单元的等效应变与预期达到的等效应变 E 差值的平方和作为目标函数,其形式如下

$$\leq = \sum_{i=1}^m (E_i - E)^2 \quad (1)$$

式中: E 为单元 i 的平均等效应变; E 为等效应变的期望值; m 为单元总数。

对于轴对称等二维成形问题,预成形坯料形状可用样条函数表示,其控制点坐标记为 6_p 。若以 6_p 作为控制变量,则不同的预成形坯料形状将对应不同的目标函数值。因此,以提高变形分布均匀性为目标的预成形最优化问题可表述为:确定最优的预成形坯料形状,使其对应的控制变量 6_p ,能够使目标函数 \leq 取最小值。

式(1)是一个典型的二次型目标函数,可以应用最优梯度法求解。为此,首先应该确定目标函数对控制变量的梯度。根据复合函数求导法则,目标函数的梯度可以按下式计算

$$\frac{\partial \leq}{\partial X_p} = 2 \sum_{i=1}^m (E_i - E) \frac{\partial E_i}{\partial X_p} \quad (2)$$

由式(2)可知,求目标函数对控制变量梯度的关键是,确定各个单元的等效应变对控制变量的梯度。在刚-黏塑性有限元求解过程中,一般采用显式 Euler 方法对单元的等效应变 E 和节点坐标 X 进行刷新。

$$E = E_{t-\Delta t} + \dot{E} \Delta t \quad (3)$$

$$X_t = X_{t-\Delta t} + V \Delta t \quad (4)$$

式中: $E, E_{t-\Delta t}$ 分别为 t 时刻和 $t-\Delta t$ 时刻单元的等效应变; \dot{E} 为 t 时刻单元的等效应变速率; X_t 和 $X_{t-\Delta t}$ 分别为 t 和 $t-\Delta t$ 时刻单元的节点坐标矢量; V 为 t 时刻单元的节点速度矢量。

将式(3)、式(4)的两边分别对控制变量求导有

$$\frac{\partial E}{\partial X_p} = \frac{\partial E_{t-\Delta t}}{\partial X_p} + \frac{\partial \dot{E}}{\partial X_p} \Delta t \quad (5)$$

$$\frac{\partial X_t}{\partial X_p} = \frac{\partial X_{t-\Delta t}}{\partial X_p} + \frac{\partial V}{\partial X_p} \Delta t \quad (6)$$

式(5)、式(6)均为递推公式,并且当 $t=0$ 时,有

$\frac{\partial E}{\partial X_p} = 0$ 和 $\frac{\partial X_0}{\partial X_p} = 0$, 因此只要确定了单元的等效

应变速率对控制变量的梯度,就可以根据式(5)求出单元的等效应变对控制变量的梯度。而对于任意一个单元,其等效应变速率可表示为

$$\dot{E} = B \# V \quad (7)$$

式中: B 为单元的应变速率矩阵; V 为单元各节点的速度矢量。

将式(7)两边对控制变量 X_p 求偏导得

$$\frac{\partial \dot{E}}{\partial X_p} = \frac{\partial B}{\partial X} \# \frac{\partial X}{\partial X_p} \# V + B \# \frac{\partial V}{\partial X_p} \quad (8)$$

式(8)中 $\frac{\partial B}{\partial X}$ 可由 B 矩阵的表达式求出显式,单元

节点坐标对控制变量的梯度 $\frac{\partial X}{\partial X_p}$ 可以由递推公式

(6)确定。因此,式(8)所示单元应变速率对控制变量的梯度计算也就转化为了求解节点速度对控制变量的梯度 $\frac{\partial V}{\partial X_p}$ 。

通过上述推导过程,建立了以提高变形分布均匀性为目的的预成形最优化方法的基本计算格式。只要确定了节点速度对控制变量的梯度,就可以根据式(2)~(8)求得目标函数对控制变量的梯度。然后采用最优梯度法求解,即可确定与锻件最终形状对应的满足变形均匀性要求的最优预成形坯料形状。关于节点速度对控制变量的梯度计算,参考文献[5~8]中已有详细的论述,在此不再重复。

2 应用实例

涡轮盘是航空发动机中的关键热端部件,长期工作于恶劣的服役环境。因而对涡轮盘锻件的性能要求十分严格,尤其是要求锻件具有高的变形均匀性。另一方面,涡轮盘锻件的形状在盘类零件中极具典型性,一般由辐板、轮毂和轮缘三部分组成,各部分的高度也往往存在较大差别。从材料成形角度看,这种形状的锻件内部容易形成较明显的变形不均匀现象。因此,以目前航空发动机中应用最广泛的 IN718 合金涡轮盘锻件为对象,探索通过预成形设计来提高锻件中变形均匀性的方法。锻件形状参照 @ @型发动机用涡轮盘,锻件形状示意图示于图 1。

2 应用实例

为了应用基于 FEM 的预成形最优化方法来确定最佳的坯料形状,同时也为了对比预成形坯

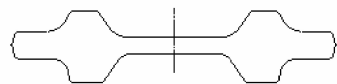


图 1 IN718 合金涡轮盘锻件示意图

Fig. 1 Profile of IN718 disk forging

料与圆柱坯料所得终锻件在变形分布均匀性方面的差异,本文首先对高径比为0157的圆柱坯料终锻过程进行了正向模拟。在正向模拟基础上,应用前述基于FEM的预成形方法即可确定最优的坯料形状。其中,根据IN718合金组织性能与热力参数的对应关系,目标函数中的等效应变期望值取为 $\bar{\epsilon}=1\sim 11.3$ 。同时应该指出,为了工程应用时制坯方便,最优坯料形状确定后需要进行适当简化,简化后的坯料形状示意图示于图2。具体的优化计算过程参见文献[9]。

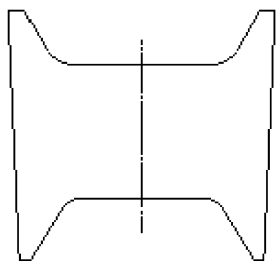


图2 简化后的预成形坯料形状示意图

Fig. 2 Profile of the simplified preform billet

采用圆柱坯料时,终锻件中等效应变分布情况示于图3。图中对称轴右侧为锻件内等效应变分布情况。对称轴左侧为等效应变在期望值范围内的材料体积,其中阴影部分为应变值处于期望值范围内的部分,其余为应变值超出期望值的部分。从图可以看出,应用圆柱坯料,锻件内最小等效应变出现在轮毂部位,仅有0118;最大等效应变118,出现在辐板部位。锻件内辐板和轮缘部位变形量较大,平均应变分别为1145和0195,而轮毂部位的变形量普遍较小,尤其是位于轮毂上下端面靠近模具的区域,平均应变仅有0124。而等效应变在期望值范围内的锻件体积仅占锻件总体积的2017%。整个锻件中,最大最小应变的差值为1162,出现了比较明显的应变分布不均匀现象。尤其是轮毂部位的应变很小,难以保证该部位的晶粒度要求。

采用图2所示预成形坯料时,终锻件中等效应变的分布情况以及锻件内应变达到期望值的锻

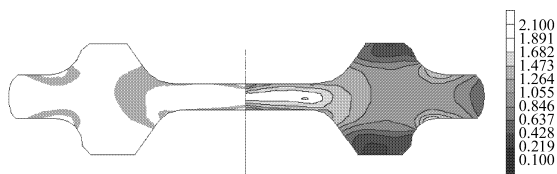


图3 圆柱坯料所得锻件的等效应变分布图

Fig. 3 Equivalent strain distribution in forging for the cylindrical billet

件体积示于图4。比较图3和图4可以看出,采用预成形坯料时,锻件内的等效应变分布规律发生了变化,最大应变不是出现在辐板部位,而是出现在轮缘的上下端面处,其值为1193。最小应变虽然仍出现在轮毂的端面,但应变值有了很大提高,等效应变达到了016,比采用圆柱坯料时相应部位的应变提高了0142。锻件其余部位的应变分布比较均匀。应变达到期望值的材料体积约占锻件总体积的50141%,比圆柱坯料提高了143%。两种坯料变形结束后,锻件内各部位的应变分布情况对比示于图5。从图5可以清楚地看出,采用预成形坯料时,锻件内各部位平均应变的变化幅度明显变小,最大最小应变的差值仅为圆柱坯料的80%,即提高了应变分布均匀性。

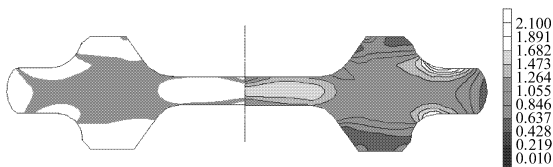


图4 预成形坯料所得锻件的等效应变分布图

Fig. 4 Equivalent strain distribution in forging for the preform billet

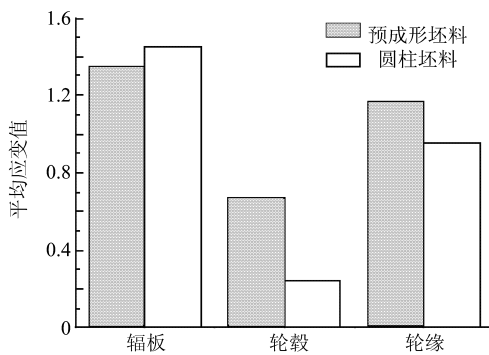


图5 两种坯料所得锻件各部位平均应变对比图

Fig. 5 Comparison of average strains for the two cases

为了更好地衡量优化效果,构造了参数D来定量描述锻件内变形的分布情况, $D = A/A_{\text{总}}$ (A为达到需要考查的应变值的区域面积, $A_{\text{总}}$ 为锻件截面的总面积)。分别考查了最小、最大应变以及应变期望值区域的D值。若考查最大、最小应变,则D越小说明锻件的变形均匀性越好;若考查应变期望值,则D越大说明锻件的均匀性越好。

两种坯料所得锻件的D值对比情况示于图6。从图中可以看出,采用预成形坯料时,最大、最小应变区域的面积都明显降低。尤其是应变期望值区域的面积大幅度增加,D值由圆柱坯料的

2017%上升到50141%。从而表明,采用预成形坯料有效地提高锻件内变形分布的均匀性。

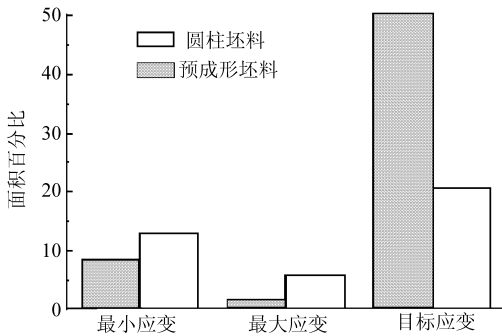


图6 两种坯料所得锻件不同考查区域D值对比图

Fig. 6 Comparison of the D values for the two cases

3 试验验证及结果比较

为了验证所建立的方法及所确定的涡轮盘锻件预成形坯料对改善锻件变形分布均匀性的效果,对采用圆柱坯料和预成形坯料的IN718合金涡轮盘锻件终锻过程进行了5B1的缩比试验。试验时首先将坯料沿子午面切开,在切面上刻划标准正方形网格后,将坯料用特制压敏胶粘合,进行锻造。锻后观察子午面网格的变形情况。采用预成形坯料时,终锻件子午面上网格的变形情况示于图7,对应情况下的有限元网格畸变示于图8。比较试验结果与有限元计算结果可以看出,模拟结果与试验结果吻合较好。

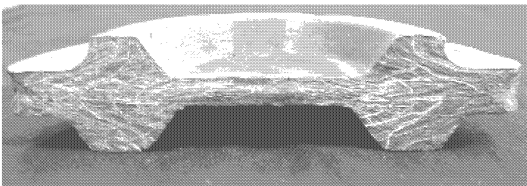


图7 子午面上网格畸变情况

Fig. 7 Mesh distortion on the cross section of the forging

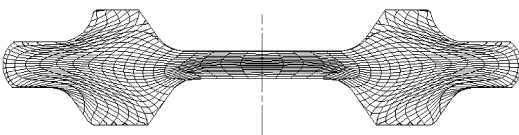


图8 有限元网格畸变情况示意图

Fig. 8 Mesh distortion computed by FEM simulation

4 结论

(1) 提出了可以定量反映锻件内部变形均匀性的目标函数。在此基础上,建立了以提高锻件内部变形分布均匀性为目的的预成形最优化方法的基本计算格式。

(2) 对IN718合金涡轮盘锻件进行的模拟计算和实验验证表明,采用文中给出的预成形坯料可有效提高终锻件变形分布的均匀性。

(3) 尽管对于不同的锻件形状,最佳的预成形坯料形状是不同的,但本文建立的方法具有通用性。

参考文献

- [1] Kobayashi S. Approximate solutions for preform design in shell nosing[J]. Int JMTDR, 1983, 23(223): 111- 122.
- [2] Han C S, Grandhi R V, Srinivasan R. Optimum design of forging die shapes using nonlinear finite element analysis[J]. AIAA J, 1993, 31(4): 774- 781.
- [3] Zhao G, Wright E, Grandhi R V. Computer aided preform design in forging using the inverse die contact tracking method[J]. Int J Mach Tools Manufact, 1996, 36(7): 755- 769.
- [4] Fourment L, Chenot J L. Optimal design for non-steady state metal forming processes—shape optimization method[J]. Int J Numer Methods Eng, 1996, 39(1): 33- 65.
- [5] Zhao G Q, Wright E, Grandhi R V. Preform die design in metal forming using an optimization method[J]. Int J Numer Methods Eng, 1997, 40(7): 1213- 1230.
- [6] Zhao G Q, Huffer A, Grandhi R V. Sensitivity analysis based preform die shape design using the finite element method[J]. J Mater Eng Perform, 1997, 6(3): 303- 310.
- [7] 赵国群,王广春,贾玉玺,等.材料塑性成形过程最优化设计)))有限元灵敏度分析方法[J].塑性工程学报, 1996, 6(2): 1- 7.
Zhao G Q, Wang G C, Jia Y X, et al. Optimum design of material forming process))) Finite element sensitivity analysis method[J]. J Plasticity Eng 1996, 6(2): 1- 7. (in Chinese)
- [8] 赵国群,王广春,贾玉玺,等.材料塑性成形过程最优化设计)))有限元灵敏度分析方法在模具设计中的应用[J].塑性工程学报, 1996, 6(3): 1- 6.
Zhao G Q, Wang G C, Jia Y X, et al. Optimum design of material forming process))) Application of sensitivity analysis method in die design[J]. J Plasticity Eng, 1996, 6(3): 1- 6. (in Chinese)
- [9] 杨艳慧.发动机用GH4169合金盘件热加工过程的数值仿真和数值评价[D].西安:西北工业大学,2005.
Yang Y H. Numerical simulation and evaluation of hot working process of GH4169 alloy disk for aero-engine[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2005. (in Chinese)

作者简介:



杨艳慧(1979-)女(汉族),河北唐山人,西北工业大学2003级硕士研究生,主要从事材料成形最优化方面研究。E-mail: Liu Dong@nwpu.edu.cn

(责任编辑:蔡斐)