

高温合金大型盘类锻件变形均匀性控制的形状拓扑优化方法¹

王梦寒^{1*}, 李鑫¹, 郑圆圆¹, 杜梦龙¹, 李松林², 张海成²

(1 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030)

(2 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司, 四川 德阳, 618000)

摘要:变形均匀性是评价航空航天大型盘类锻件性能的重要指标。论文以透平盘为研究对象, 探明了透平盘锻件低应变区形成的原因, 并提出了基于“子单元数量-体积-子单元数量”的增补和去除规则的适用于大型盘类锻件的拓扑优化设计方法, 该方法采取为每个列单元分配合适的体积, 通过堆叠与调整模块适应各区域的相对高度, 获得目标形状复杂性低的预锻件形状。为验证优化方法的有效性, 论文以变形均匀性为目标对大型透平盘预锻件形状进行了自动化寻优, 优化后的锻件变形均匀性提高了 45%, 且无应变死区。同时, 根据优化所得的预锻件形状进行了生产验证, 生产试制结果表明了论文提出的大型盘类锻件预成形形状优化方法的可靠性。

关键词:大型盘类锻件; 变形均匀性; 拓扑优化法; 预成形设计; 自动化寻优

中图分类号: **文献标识码:** **文章编号:**

引言

在大型盘类锻件成形过程中, 不均匀变形和变形死区的产生给高质量、高性能大型高温合金盘类锻件的制造带来诸多挑战, 如何提高大型盘类锻件在成形过程中的变形均匀性和改善成形过程中存在的应变死区成为制造高性能高温合金大型锻件亟待解决的问题^[1-5]。有研究表明^[6-8], 合理的预成形方案是解决这些问题的有效手段。

传统的优化设计方法依赖于工程师的经验和试错法, 其效率往往较低。随着对塑性流动理论的深入理解, 提出了类势场法^[9]、遗传算法^[10,11]、卷积神经网络^[12-14]等多种预成形优化设计方法。Torabi^[15]等以锻件充填率、锻造载荷及应变均匀性为评价指标, 采用响应面法和多目标遗传算法对涡轮叶片预锻件的形状进行优化, 获得了较优的预锻件形状。Kitayama^[16]以最小化飞边和等效应变分布为目标, 结合响应面法和径向基函数网络对预制坯形状和坯料温度、模具温度等工艺参数进行了优化设计。Meng^[17]等针对货车钩舌复杂锻件, 建立了基于锻件填充能力、变形均匀性和损伤程度的多目标优化方法, 并结合响应面法和有限元模拟得到了预锻件的最佳几何参数。Han^[10]进一步提出了一种结合非均匀有理 B 样条

曲线、有限元方法与遗传算法的预制件自动化设计与优化方法, 获得了变形均匀性优异的锻件。邵勇^[18-20]提出了一种根据等效应变大小进行单元删减的策略, 即在大应变处删减材料、小应变处增补材料, 并在叶片锻件与小型盘类锻件上取得成功。刘岳峰^[21]等采用形状拓扑方法优化了高肋 H 型锻件。这些成功的案例, 在一定程度上验证了形状拓扑优化法对锻件预成形形状优化设计的适用性, 以及以应变为基准进行删减单元的可能性。具体到圆盘类锻件的设计领域, Lu 等^[22]与 Neo^[23]等提出了一种基于净水压力的单元去除和添加准则, 并成功解决了车轮锻件填充率不足以及变形均匀性差等问题。

拓扑优化方法能够比较精准地控制体积转移的量和方向, 在中小型预锻件形状设计领域发挥了重要作用, 但是往往优化后获得的预锻件形状复杂, 难以用于实际生产。因此, 在传统预锻件拓扑优化方法的基础上, 论文提出了一种改进的面向大型盘类锻件的形状拓扑预锻件自动化设计优化方法, 利用该方法所获得的预锻件形状简单, 终锻结果表明该方法能够有效改善大型盘类锻件成形过程中产生的变形死区。

收到初稿日期: ; 收到修改稿日期:

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3705102)

作者简介: 王梦寒, 女, 1975 年生, 工学博士, 副教授, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030, E-mail: cqwmh@163.com

针对大型盘类锻件成形过程中产生变形死区的难题，论文以大型盘高温合金透平盘为研究对象，探明了其锻造过程中变形死区产生的原因；基于传统拓扑设计优化

方法，提出并设计了一种改进的面向大型盘类锻件的形状拓扑预锻件自动化设计优化方法。

1 透平盘原锻造工艺及低应变区形成

原因分析

透平盘是燃气轮机中的重要零件，其锻件示意图如图 1(a)所示。该锻件材料为 GH4706，直径方向上的尺寸超过 2000mm，高度方向上的尺寸大约 500mm，属于大型

盘类件。透平盘的原锻造工艺为墩粗后直接模锻成形，利用 DEFORM-2D 对透平盘锻件的成形过程进行有限元模拟，锻造温度为 1020℃，锻造速度为 5mm/s，其余模拟参数如摩擦系数、传热系数等采用 DEFORM 默认设置，成形过程模拟示意图如图 1(b)所示，观察可知，该盘件应变分布主要呈现出盘心应变低、盘缘应变高的特点。

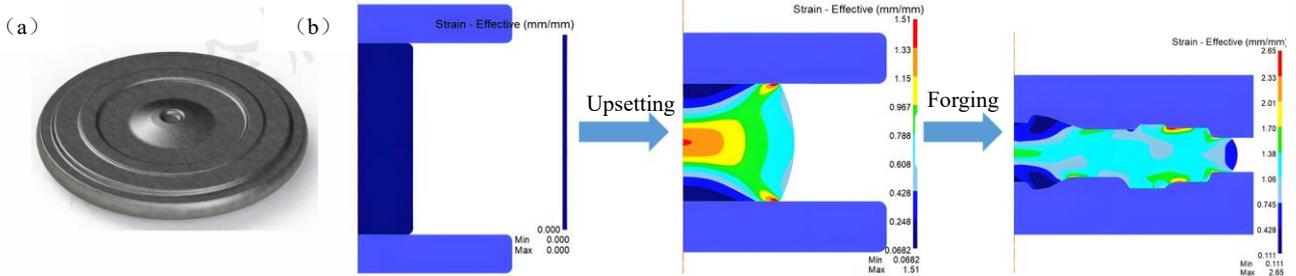


图 1 透平盘锻件及原工艺流程模拟图 (a) 锻件示意图 (b) 原工艺流程模拟图

Figure 1 Turbine disc forgings and original process flow simulation diagram (a) Forging diagram (b) Original process flow simulation diagram

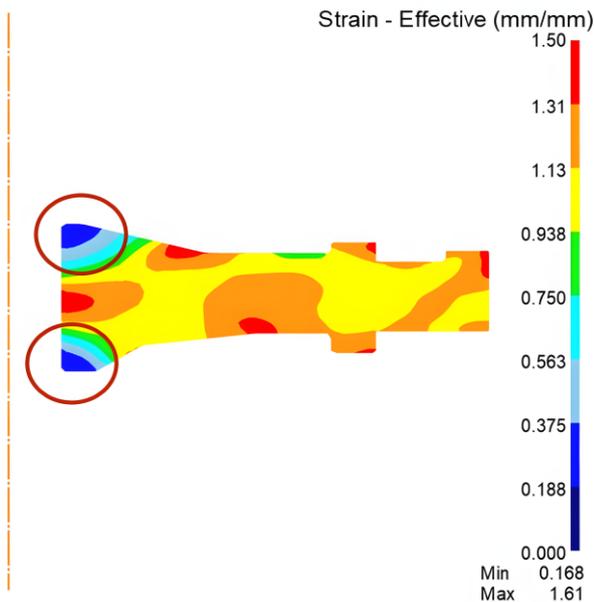


图 2 粗加工交付件的等效应变分布图

Figure 2 Equivalent strain distribution map of rough machining

workpiece

粗加工交付件数值模拟所得的等效应变分布如图 2

所示，其应变分布不均匀，交付件上存在着明显的应变死区，其不均匀的应变分布特征比模锻件更明显，应变分布也呈现为盘心应变低，盘缘应变高，且在中心孔的上下两段（图 2 的圆圈处）存在明显的低应变区。不均匀的应变分布与低应变区会导致材料组织性能的不均匀性，进而严重影响最终产品的服役性能。因此，有必要对该区域的材料流动进行分析，以探明产生不均匀性以及低应变区的根本原因。

图 3 为模锻时欠压 210mm 的材料流动矢量图，由图 3(a)与图 3(b)可知，材料的径向流动比轴向流动更加剧烈，且盘缘处的材料径向流动比盘心处的材料径向流动更为剧烈，这是由于此时盘心已经成形，盘心处材料的径向流动受到模具的阻碍，如图 3(c)和图 3(d)所示。由于此时模具尚未闭合，材料向着阻力最小的方向流动且会受到盘心部分材料的挤压，因此盘缘处在模锻结束时应变较大。由图 3(e)(f)可知，此时轴向部分难以发生比较剧烈的材料流动。因此，本文认为径向材料流动的限制以及轴向持续处于小变形区域，是盘心形成应变死区的主要原因。

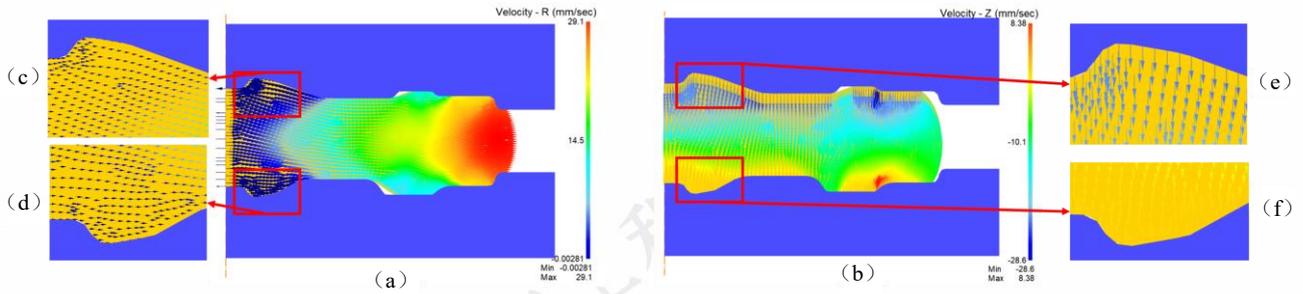


图3 欠压为210mm时材料流动矢量图(a)径向材料流动矢量图(b)轴向材料流动矢量图(c)上应变死区径向材料流动矢量图(d)下应变死区径向材料流动矢量图(e)上应变死区的轴向材料流动矢量图(f)下应变死区的径向材料流动矢量图

Figure 3 Diagrams of material flow vectors when the underpressure is 210mm(a) radial material flow vector diagram (b) axial material flow vector diagram (c) radial material flow vector diagram in the upper strain dead zone (d) radial material flow vector diagram in the lower strain dead zone (e) axial material flow vector diagram in the upper strain dead zone (f) radial material flow vector diagram in the lower strain dead zone.

2 基于形状拓扑的大型盘类件预锻件

设计优化方法的提出与建立

2.1 形状拓扑预锻件设计优化方法的提出

通过上述对透平盘锻造成形过程研究发现,终锻成形时盘心处材料径向流动受阻导致了锻件变形不均匀和产生变形死区,因此有必要设计合理的预锻件来解决这个问题。预锻件设计的本质就是坯料体积的重新分配,结合上述成形过程的分析,如果将高应变区的材料转移至低应变区,使得变形量基本一致,进而改善锻件的变形不均匀性,即高应变区域不需要过多材料即可产生较大的变形,而低应变区域则需要比原来更多材料以维持较长时间的变形,从而积累更多应变。

为此,论文提出一种基于形状拓扑的大型盘类预锻件设计优化方法,其结构如图4所示,由预处理模块、子单元分配模块,堆叠与调整模块,自动寻优模块四个模块组成。该优化方法以终锻件的应变分布为起点,采用微元法将该锻件分割成若干个小单元,随后根据不同的应变分布重新移动堆叠这些子单元,以实现应变的均匀分布和避免低应变区的产生,并控制其形状的复杂程度,以便适用于实际生产。

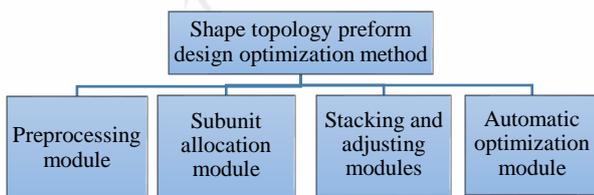


图4 形状拓扑预锻件设计优化方法及其子模块

Figure 4 Shape topology preform design optimization method and its submodules

论文设计的形状拓扑法的工作流程及各模块的作用如图5所示。该方法先由预处理模块进行尺度的划分并进行各尺度信息的计算;随后根据所建立的单元增补与删减准则在子单元分配模块中为各个尺度分配不同的体积,并解决体积转移时不匹配以及形状复杂性难以降低的难题;接着在堆叠与调整模块中调整预锻件初始形状各部的相应位置;最后在自动寻优模块将其所产生的预锻件通过 DEFORM 文本模式与 DEFORM 耦合,并配合 NSGA-II 算法以实现自动寻优。

2.2 形状拓扑预锻件设计优化方法的建立

在预处理模块中,终锻件被分成了四个尺度,由小到大分别为子单元尺度、列单元尺度、应变单元尺度、终锻件尺度,尺度划分将从最小的子单元尺度开始划分,且更大的尺度由小一级的尺度组成。为了划分子单元,需提取终锻件上的应变信息,随后在整个空间内划分子单元网格。然后,通过不断检验每个子单元是否位于终锻件内部,从而进行筛选,只要子单元的任意一个角落在终锻件内,该子单元即被保留,这种方法的优势在于确保了子单元组成的体积不会小于终锻件的体积。在完成子单元的划分后,对每个子单元内的散点的等效应变取平均值,以此作为该子单元的代表性应变值。接着,将位于同一列的子单元结合成为列单元,并计算了这些列单元的平均应变值。根据列单元的平均应变值结果将锻件分成了低应变区、中应变区、高应变区及飞边区四个区域,如图6所示,以便于后续实现子单元由较高应变区域向较低应变区域的动态转移。

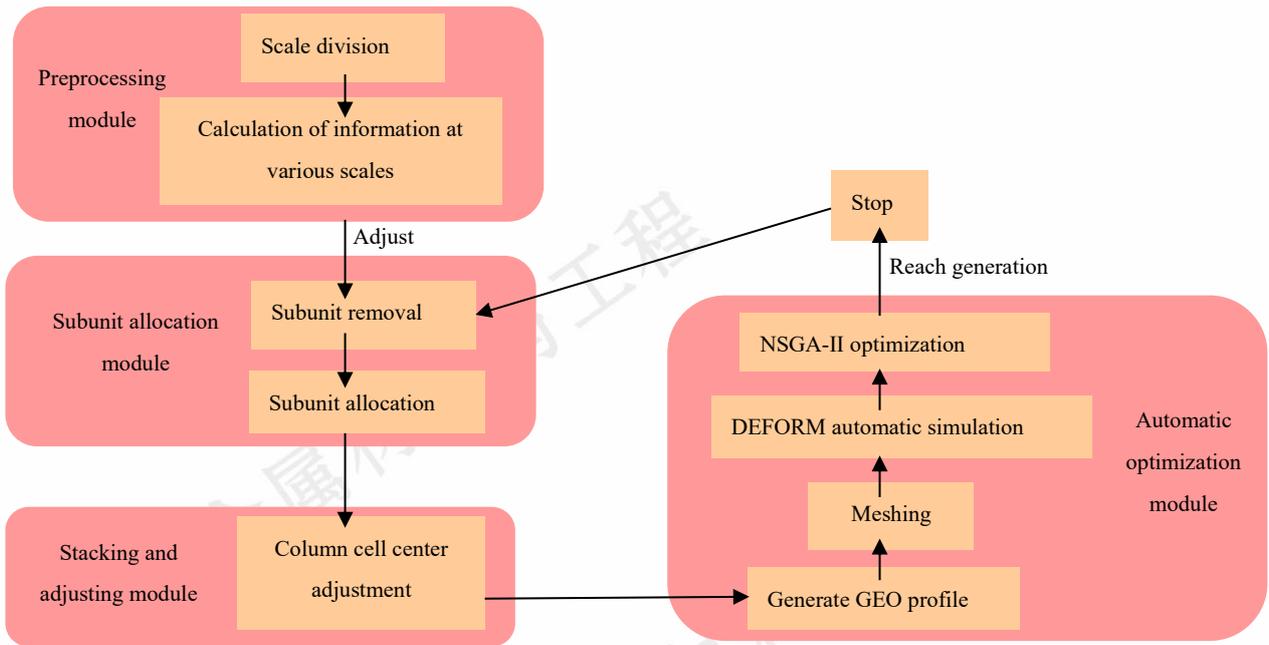


图5 形状拓扑法工作流程

Figure 5 Workflow of shape topology method

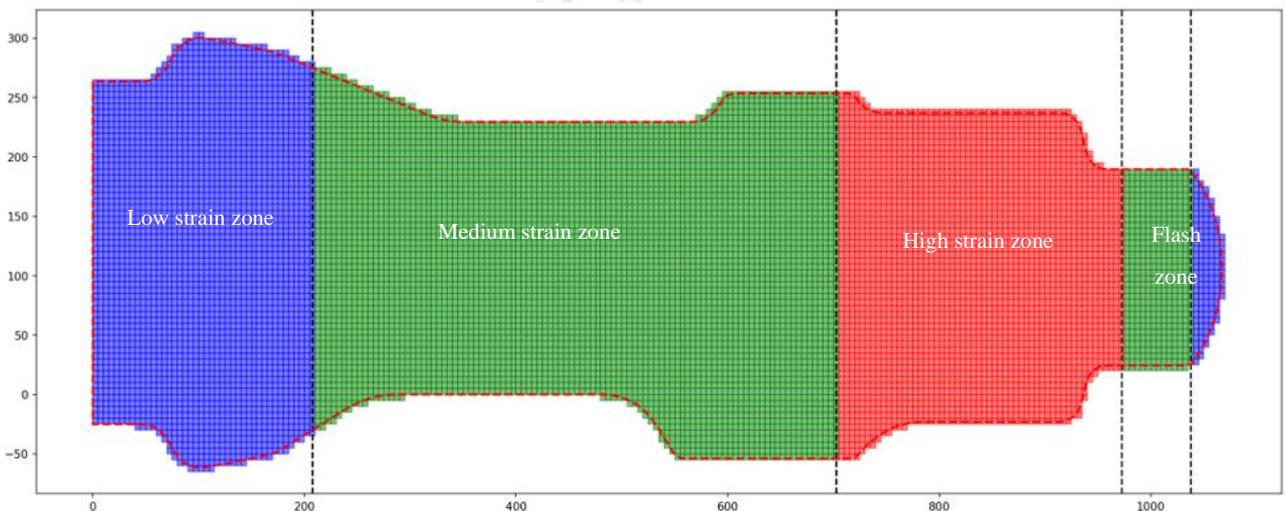


图6 列单元以及应变单元的划分图

Figure 6 Diagram of the division of column units and strain units

在各应变区中,中应变区的作用尤为重要,它允许去除与分配操作适当的“溢出”,从而为拓扑形态的生成提供了更多的可能性。应变区域划分不仅指明了子单元转移的方向,更重要的是它界定了去除与分配的优先级。具体而言,去除操作的优先级顺序是:高应变区、中应变区、低应变区,即优先去除最应该去除的区域;分配操作的优先级顺序则是:低应变区、中应变区、高应变区,即优先满足最需要子单元的区域。

在子单元分配模块,论文基于体积不变原理与各应变区的去除与分配优先级,提出了“子单元数量-体积-子单元数量”的增补和去除准则,即通过计算去除的体积,然后将这一体积转换为相应数量的增加子单元,并允许

体积适当的溢出。该方法将增补和去除操作限制在列单元中,这一操作可以避免体积转移时不匹配的难题,也可以避免预锻件内部产生空洞。该准则对传统形状拓扑优化方法进行了改进,有效避免了体积转移时出现的体积不匹配的问题。同时,该准则还考虑了预锻件不同区域的体积溢出问题,对于不同盘类锻件也会有具有较强的适应性。

在堆叠与调整模块,论文采用了分配算法来为每一列的列单元分配合理的子单元数量,得到各列单元应当被分配的体积。为了在产生拓扑形状时增加更多的变化性,并合理控制预锻件各部分的触摸时间,论文对各个区域进行了Y轴方向的调整。在得到中心坐标散点信息

之后，还需要将其恢复为子单元堆叠的状态，并且为子单元绘制外轮廓线以得到预锻件拓扑形状。论文以中心坐标信息、子单元边长信息为依据恢复子单元堆叠的状态，并将散点排序以生成 GEO 文件供 DEFORM 读取。随后以 DEFORM 文本模式的形式与 DEFORM 耦合以实现自动寻优。

在自动寻优模块，论文以粗加工件上的标准差 S 和低应变区(0~0.45)的占比为 P 作为评价指标，采用 NSGA-

II 作为优化工具，结合 DEFORM 的文本模式来实现预锻件形状的自动化寻优。自动寻优模块具体流程如图 7 所示，首先使用 DEFORM 软件的命令流格式进行网格的自动划分、模型的自动导入、仿真的自动运行，以及结果的自动提取，并自动计算目标值，然后再利用 NSGA-II 优化不断更新预锻件形状，直至达到迭代次数结束寻优并输出预锻件形状。

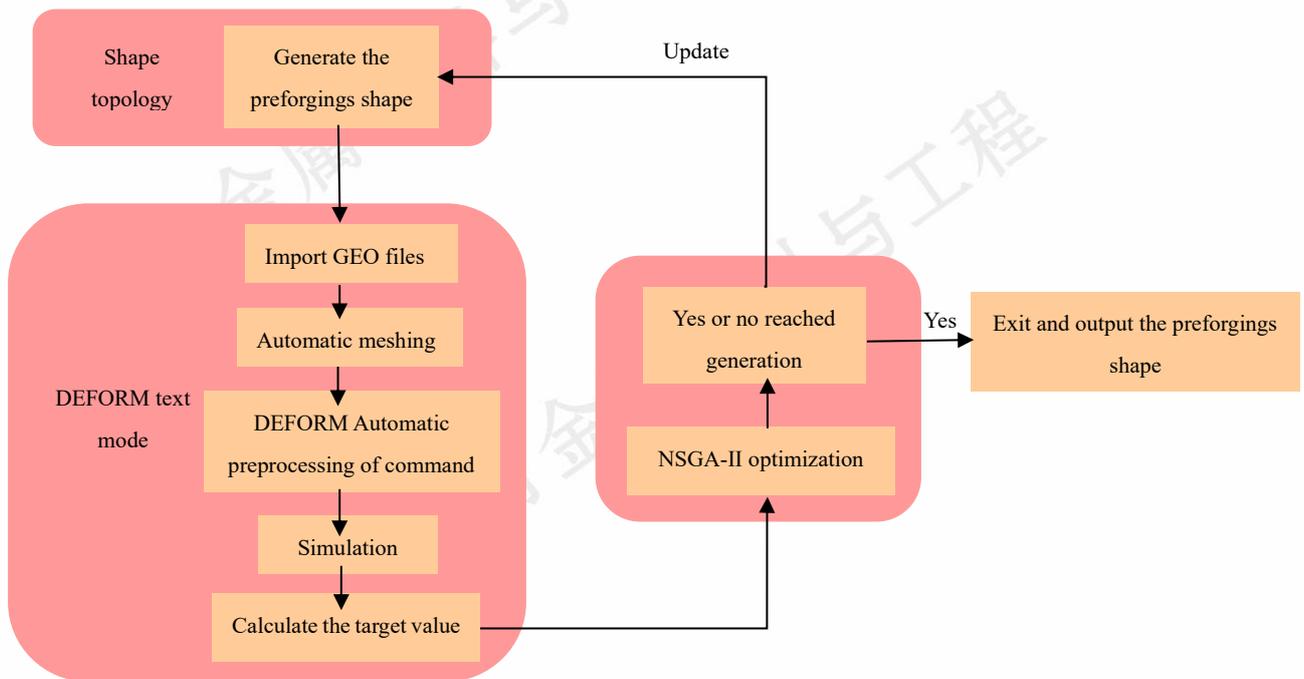


图 7 自动寻优工作流程

Figure 7 Automatic optimization workflow

3 预锻件自动寻优结果及再设计

3.1 预锻件自动寻优结果

论文设置自动寻优试验总次数为 400 代。图 8(a)与图 8(b)分别展示了两个目标 P 和 $S(\epsilon_r)$ 随代数的变化图。从中可以看出， P 在 200 代之后基本趋于稳定，甚至有几代可以做到无低应变区；而 $S(\epsilon_r)$ 波动比较大，但是在 250 代之后也基本趋于稳定，基本可低于 0.2。因此，本设计方法具有良好的鲁棒性，其可以稳定生成预锻件拓扑形状，且可以稳定地进化预锻件形状。

NSGA-II 算法认为第 260 代、262 代、263 代、349 代、366 代、378 代处在帕累托前沿解集上。各代数下的目标值如表 1 所示，可见第 366 代两个目标值都足够小。综合比较之后，选取第 366 代的结果作为本优化的解，该代的 $S(\epsilon_r)$ 为 0.123，而 P 为 0.00153，二者都足够小。

图 9 展示了预锻件的拓扑形状随代数的进化图。可以很明显地看到是，在 100 代之前，预锻件的拓扑形状是明显的“两段式”分布。在 100 代之后，预锻件拓扑形状开始出现了明显的“三段式”，但是其也会出现“两段式”分布的情况，但是在 160 代之后基本趋于稳定的“三段式”分布。而在大概 200 代之后，各应变区所被分配的体积基本被确定，这说明算法认为该体积分配是最合理的。结合前面分析的 200 代之后，低应变区占比与应变均匀性逐渐趋于稳定，可以说明这种“三段式”的结构以及体积分配对于本锻件来说是最优的。在 200 代之后，优化的重点逐渐转向各个区域中心位置的相对调整。

366 代所得预锻件拓扑形状如图 10 所示，该预锻件有着明显的“三段式”结构，该结构可以有效地控制预锻件不同部分参与变形的时机，盘心的位置会更早的接触模具，从而积累更多的应变；而盘缘最后接触模具，可显著减轻盘缘处材料的径向流动，使其变形主要依靠轴向变形，进而实现盘心与盘缘处的应变相当，这种依

照材料流动特征进行的体积分配可以很好的适应不同区

域的变形特征。

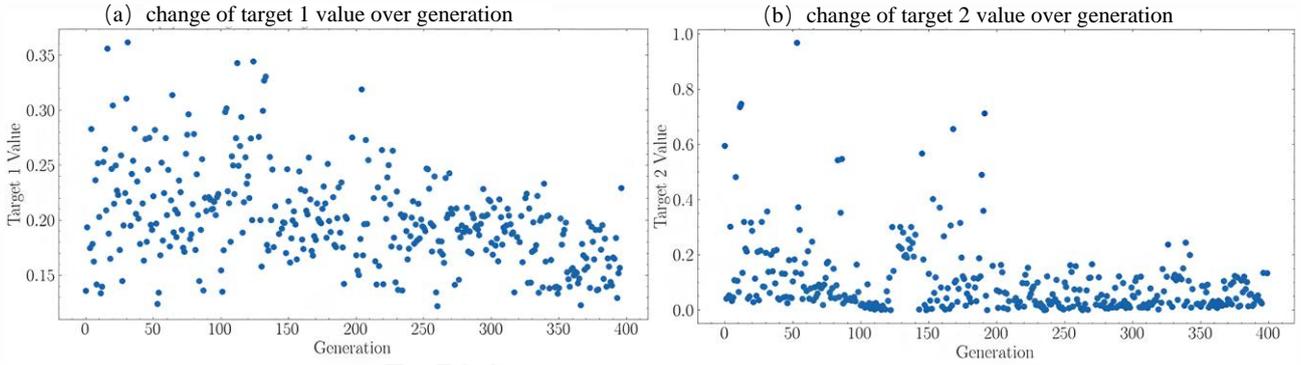


图 8 两目标值随代数变化示意图

Figure 8 Plot of two objective values vs iterations

表 1 帕累托前沿解集上的解以及目标值

Table 1 The solutions and target values on the pareto frontier

solution set		
generation	<i>S</i>	<i>P</i>
260	0.122	0.0221
263	0.171	0
349	0.133	0.0206
366	0.123	0.00153
378	0.136	0.0129

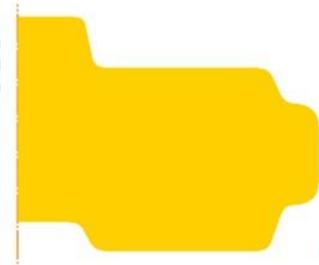


图 10 自动寻优所得最优预锻件

Figure 10 Automatically optimized preform obtained

3.2 自动寻优预锻件再设计

自动寻优所得最优预锻件进行终锻模拟, 模拟过程中发现, 在欠压 310mm 时锻件上产生折叠缺陷, 如图 11(b)A、B 处所示, 其产生根源来源于图 11(a)A、B 处。A 处产生折叠的原因是孔径向方向上过长且轴向方向过矮且圆角过小, 这导致孔上部的某些部分比其余部分更早接触模具; B 处产生折叠的原因是该区域的圆角过小, 且斜度过小, 位置靠下的区域比斜边要更早接触模具。因此, 对自动寻优所得预锻件进行再设计, 结合体积不变原则, 决定对 B 区域采取增大圆角, 提高斜度, 对 A 区域采取改变该孔的径轴比, 再设计后的预锻件形状如图 12 所示。

将调整后的预锻件形状进行终锻模拟, 终锻件应变分布如图 13(a)所示, 其应变均匀性有了很大的提高且无折叠。对终锻件进行粗加工获得粗加工产品, 其应变分布的方差为 0.137, 如图 13(b)所示, 较优化前应变均匀性提高 45%, 且无低应变区。

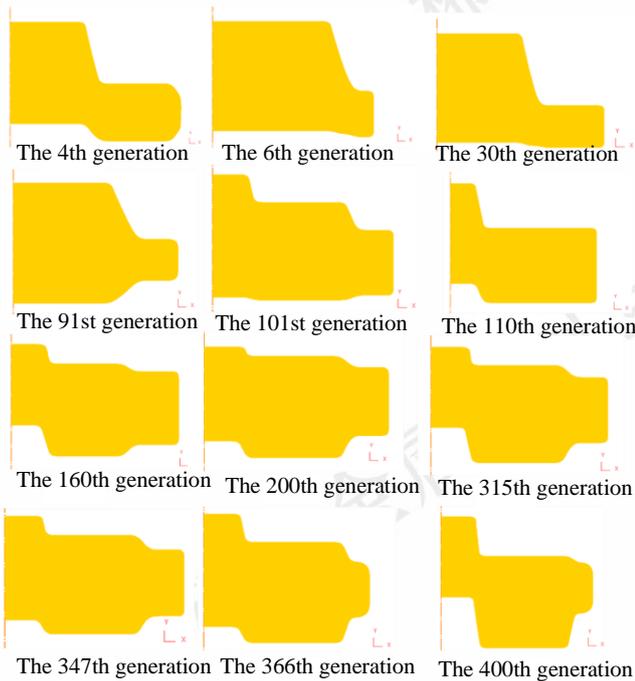


图 9 预锻件拓扑形状随代数进化图

Figure 9 Algebraic variation of topological shape of pre forged parts

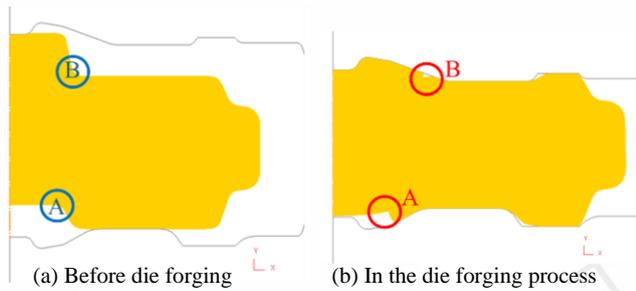


图 11 锻造过程中出现折叠现象示意图

Figure 11 Folding phenomenon occurring during the forging process

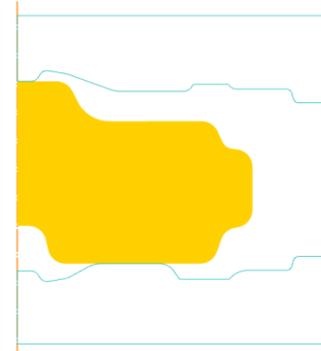
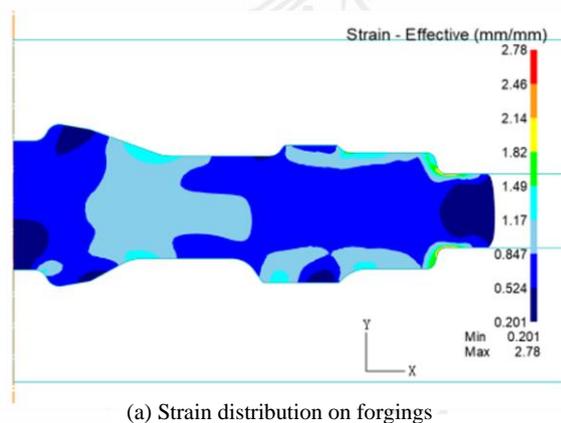
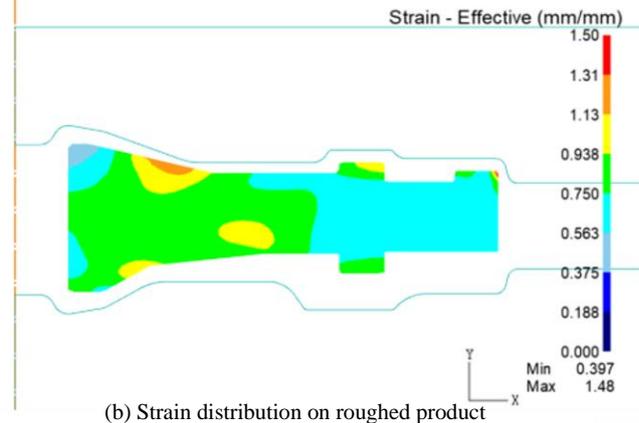


图 12 调整后的预锻件形状

Figure 12 Shape of the Preform After Adjustment



(a) Strain distribution on forgings



(b) Strain distribution on roughed product

图 13 锻件及粗加工产品上的应变分布图

Figure 13 Forging and Rough machining Strain Distribution

3.3 生产验证

为验证形状拓扑预锻件设计优化方法的有效性，进行实际生产验证，预锻件由胎膜锻获得大致形状后进行机械加工获得，终锻结束后进行粗加工获得产品，并在粗加工产品上按照图 14 所示的位置进行取样观察，结果表明产品各个位置的晶粒尺寸分布极为均匀，平均晶粒尺寸约为 $100\mu\text{m}$ ，晶粒度等级接近 2 级，且碳化物分布相对均匀。因此，形状拓扑预锻件设计优化方法能够有效解决透平盘锻件产生变形死区的问题。

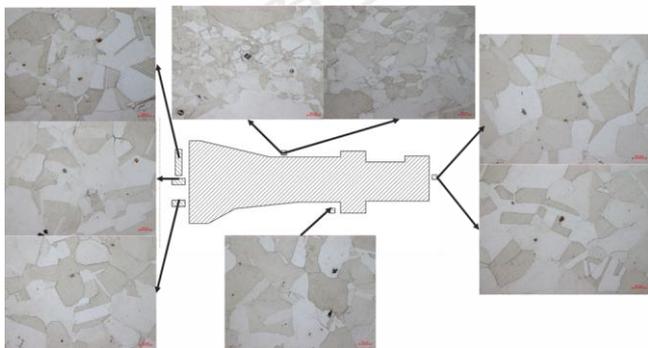


图 14 取样位置以及晶粒形貌图

Figure 14 Sample position and grain morphology diagram

4 结论

论文利用有限元技术对透平盘原有工艺锻造变形过程进行了研究，分析了盘类件锻造成形过程产生变形死区的原因，并提出了一种面向大型盘类锻件的、基于改进的形状拓扑优化的预锻件形状自动化设计方法，以透平盘锻件变形均匀性为目标进行了形状设计和验证，论文的主要结论如下：

(1) 基于透平盘原成形工艺仿真结果，明确了透平盘锻件模锻成形过程中产生变形死区的原因。透平盘锻件低应变区产生的原因是由于盘心处材料径向流动受阻，且轴向变形量较小。

(2) 设计了一种面向大型盘类锻件的基于形状拓扑法的锻件自动化预成形设计方法。该方法由预处理模块、子单元分配模块、堆叠与调整模块，自动寻优模块组成。为解决“体积转移时易变化”的难题，论文提出了“子单元数量-体积-子单元数量”的增补和去除规则，且规定去除与操作只在列单元上进行。为解决“形状复杂性难以降低”的难题，论文提出了使用分配的策略来为每个列单元分配合适的体积，并通过堆叠与调整模块

来调整每个区域的相对高度。

(3) 利用所提出的形状拓扑预锻件设计优化方法获得了最优的预锻件形状, 并进行了生产验证。自动寻优结果表明, 最优结果出现在第 366 代, 通过再设计解

决掉了终锻件上存在的折叠缺陷, 最终粗加工交付件上的应变方差为 0.137、变均匀性提高了 45%, 且无低应变区。同时, 进行了生产验证, 生产结果表明该方法能够有效解决大型透平盘锻件变形不均匀的问题。

参考文献 References

- [1] Zhou Jie(周杰), Liu Zuofa(刘左发), Qu Zhiyuan(屈志远), et al. Aeronautical Manufacturing Technology (航空制造技术), 2023, 66(5): 14-25.
- [2] Liang Wei(梁伟), Yang Dongdan(杨东丹), Wei Wentao(韦文涛), et al. Forging Equipment and Manufacturing Technology (锻压装备与制造技术), 2016, 51(3): 79-81.
- [3] Hong Xiaoying(洪小英), Li Liangliang(李亮亮), Wang Le(王乐). Journal of Plasticity Engineering (塑性工程学报), 2022, 29(9): 88-94.
- [4] Zhang Rui(张瑞), Liu Peng(刘鹏), Cui Chuanyong(崔传勇), et al. Acta Metallurgica Sinica (金属学报), 2021, 57(10): 1215-1228.
- [5] Yang Yanhui(杨艳慧), Liu Dong(刘东), Luo Zijian(罗子健). Journal of Aeronautical Materials (航空材料学报), 2012, 32(1): 25-29.
- [6] Xiaona W, Fuguo L. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(1): 81-86.
- [7] Fuh Y K, Shih J K, Saputro I E, et al. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 90: 14-27.
- [8] Xiang Xiang(向相). Chongqing University (重庆大学), 2021.
- [9] Cai J, Li F, Liu T. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56(5): 579-588.
- [10] Han Y, Wang M, Chen Y, et al. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2023, 125(3-4): 1845-1858.
- [11] 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), 2009, 38(6): 1019-1024.
- [12] Kim K, Kim Y, Ju Y, et al. Applied Sciences, 2023, 13(14): 8272.
- [13] Lee S, Quagliato L, Park D, et al. APPLIED SCIENCES-BASEL, 2021, 11(17): 7948.
- [14] Han B, Kim K, Park J, et al. JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH AND TECHNOLOGY-JMR&T, 2024, 31: 1644-1654.
- [15] Torabi S H R, Alibabaei S, Bonab B B, et al. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(6): 1409-1419.
- [16] Kitayama S, Saito K, Wang T, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(11): 5409-5420.
- [17] Meng F X, Cai Z Y, Chen Q M. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2019, 105(10): 4359-4371.
- [18] Shao Yong(邵勇). Shanghai Jiao Tong University (上海交通大学), 2016.
- [19] Shao Y, Lu B, Ou H, et al. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51(1): 199-211.
- [20] Shao Yong(邵勇), Yuan Guohui(袁国惠), Wang Yongxin(王永欣), et al. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition) (江苏科技大学学报(自然科学版)), 2023, 37(6): 21-27.
- [21] Liu Yuefeng(刘岳峰). Shandong University (山东大学), 2023.
- [22] Lu B, Ou H, Long H. STRUCTURAL AND MULTIDISCIPLINARY OPTIMIZATION, 2011, 44(4): 529-545.
- [23] Ngo N V, Hsu Q C, Li W H, et al. Procedia Engineering, 2017, 207: 520-525.

Shape topology optimization method for strain uniformity control of large disk forgings of superalloy

Menghan Wang^{1*}, Xin Li¹, Yuanyuan Zheng¹, Menglong Du¹, Songlin Li²,
Haicheng Zhang²

(1 School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China

2. China National Erzhong Die Forging Co., Ltd., De yang 618000, China)

* E-mail: cqwmh@163.com

Abstract: Strain uniformity is an important index to evaluate the performance of large disk forgings in aerospace. Taking turbine disc as the research object, this paper explores the reasons for the formation of low strain zone of turbine disc forgings, and proposes a topological optimization design method suitable for large disc forgings based on the addition and removal rule of "number of subunits - volume - number of subunits". The method

adopts the allocation of appropriate volume for each column element, and adapts the relative height of each region by stacking and adjusting modules. Obtain the shape of the preforming with low complexity of the target shape. In order to verify the effectiveness of the optimization method, the paper takes deformation uniformity as the goal to automatically optimize the shape of large turbine disc preforming. After optimization, the deformation uniformity of the forging is increased by 45%, and there is no strain dead zone. The results of numerical simulation and production test show the reliability of the method proposed in this paper.

Key words: Large disc forgings; Strain uniformity; Topology optimization method; Preform design; Automated optimization

Corresponding author: Wang Menghan, PhD, Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China, E-mail: cqwmh@163.com