

工艺优化设计

复杂构件锻造预成形坯料设计综述

张大伟

(西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘要: 锻件预成形坯料设计是保证成形工艺顺利进行、获得无缺陷锻件、降低锻造载荷的关键环节。对于大型复杂构件, 其预成形坯料形状影响到制坯工艺的周期、成本、预成形组织性能。分别从基于反向模拟技术的预成形坯料设计、基于优化设计方法的预成形坯料设计、基于正向过程分析的预成形坯料设计等方面, 评述了复杂构件锻造预成形坯料设计的国内外研究现状, 指出了大型筋板类构件的预成形坯料形状要求以及设计方法。

关键词: 复杂构件; 大型筋板类构件; 预成形; 锻造; 反向模拟; 正向模拟; 优化设计

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.026

中图分类号: TG316 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0143-14

Review on Preform Design of Complex Component in Forging Process

ZHANG Da-wei

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

ABSTRACT: Preform design of forging is the key link to ensure smooth forging running, obtain forging without defects, and reduce forging loading. The shape of preform for large-scale complex component influences time, cost, microstructure and property in preforming process. In this paper, the research status at home and abroad on preform design was summarized from the aspects such as preform design based on backward simulation technique, preform design based on optimized design method, and preform design based forward analysis of forming process. Then, the suitable shape of preform for large-scale rib-web component and the corresponding designed method were presented in detail.

KEY WORDS: complex component; large-scale rib-web component; preform; forging; backward simulation; forward simulation; optimal design

合适的锻件预成形坯料可有效改善材料流动、避免成形缺陷、降低锻造载荷, 是大型复杂构件锻造工艺设计的重要环节。航空航天、汽车等工业不断追求高性能、轻量化、高可靠性, 使构件日益大型整体化、薄壁轻量化、结构复杂化, 材料性能高、难变形^[1-3]。对于形状复杂的构件, 需要采用合理的预成形坯料形状进行初步的材料体积分配, 以避免成形缺陷、降低成形载荷、实现近净成形, 并缩短成形周期、减少成本, 预成形坯料设计的重要性更加突出。

为了实现预成形坯料设计的高效化、数字化和智

能化, 在 20 世纪 80 年代, 美国加州大学伯克利分校小林史郎(S. Kobayashi)团队^[4]提出了塑性成形过程反向模拟技术, 从最终给定形状和条件出发, 沿成形过程相反的方向模拟得到预成形坯料。反向模拟的难点在于如何处理反向模拟的动态边界条件以及脱模准则的确定, 而目前二维边界问题还没有通用的处理方法, 对于三维问题边界条件处理和节点脱模准则确定更为复杂。

把预成形坯料形状设计问题转化为优化问题, 将优化理论和正向模拟技术相结合, 实现预成形坯料形

收稿日期: 2017-10-03

作者简介: 张大伟(1982—), 男, 博士, 副教授, 博导, 主要研究方向为先进加工工艺及设备。

状设计,减少预成形坯料形状设计的盲目性。其本质是基于所建立的优化设计目标(充填性能、实际锻件形状与理想锻件形状的一致性)和优化设计变量(坯料形状、预锻模具形状等)之间的函数关系,通过优化设计方法(包括灵敏度分析法^[5]、遗传算法^[6]、神经网络^[7]等)获取最优的预成形坯料形状(或预锻模具形状)。其难点在于目标函数的建立和设计变量的选取,此外,灵敏度分析法在实际应用中还存在灵敏度方程推导复杂等问题;遗传算法还存在迭代次数多、计算量大等问题;神经网络法还存在如何提高样本数据获取效率等问题。

基于复杂构件体积成形的正向过程分析,采用长期积累的经验^[8]、经典解析法^[9]、相似理论法^[10]等设计一个或多个预成形坯料,然后采用实验方法(工业实验^[11]、物理模拟实验^[12]、有限元模拟虚拟实验^[13])修改预成形坯料形状或选择一个较优的预成形坯料形状。基于正向过程分析的预成形坯料形状设计的关键和难点,是如何快速设计初始坯料形状,以减少试错的次数或选择坯料形状的范围。

目前金属体积成形中,预成形坯料设计的方法大体可分为三类:基于反向模拟技术的预成形坯料设计、基于优化设计方法的预成形坯料设计、基于正向过程分析的预成形坯料设计。文中评述了这三类预成形坯料设计的研究现状,在此基础上,阐述了大型复杂构件(如筋板类构件)的预成形坯料形状要求以及设计方法。

1 基于反向模拟技术的预成形坯料设计

体积成形过程反向模拟的数值方法有上限元技术(UBET, Upper Bound Element Technique)和有限元法(FEM, Finite Element Method)。上限元法把构件和模具的边界简化为直边界,建立模型较为简单,计算量小,其精度也较有限元法差些。有限元法可全面考虑构件和模具的边界形状和复杂的边界条件,但是也带来了计算量大、效率低等问题。

1.1 基于上限元技术反向模拟的预成形坯料形状设计

早在20世纪80年代初,外国学者Osman等^[14]就提出了基于上限元反向模拟的预成形设计技术,并指出将反向模拟分析和正向模拟分析结合使用是非常重要的。稍后90年代初,国内学者孙胜等^[15-16]提出并解决了上限元反向模拟面临的自由边界收缩技术、接触边界脱模准则、反向模拟结束位置确定等3个关键技术,并成功应用于锻件预成形坯料设计。杜忠友等^[17]采用上限元反向模拟技术对H型锻件预

成形坯料进行了优化设计。

针对有限元反向模拟复杂、计算量大,而上限元反向模拟精度较有限元法差的问题,刘庆斌等^[18-19]提出了上限元技术和有限元法相结合的预成形坯料设计方法,即采用上限元反向模拟设计预成形坯料,然后采用有限元正向模拟验证修正预成形坯料形状,并成功设计出H型和齿轮坯等轴对称锻件的预成形坯料。栾贻国^[20]也提出了基于上限元技术和有限元法相结合的混合正/反向预成形模拟技术。

王真等^[21-22]处理了叶片锻造过程上限元反向模拟中脱模准则、边界速度场确定、分流线定义、畸变单元调节等关键问题,开发了叶片锻造过程上限元反向模拟系统;通过对叶片纵向5个典型横截面的反向模拟研究,设计了叶片预成形坯料形状,并采用铅进行了物理模拟实验,实验结果表明叶片完全充满,没有缺陷。

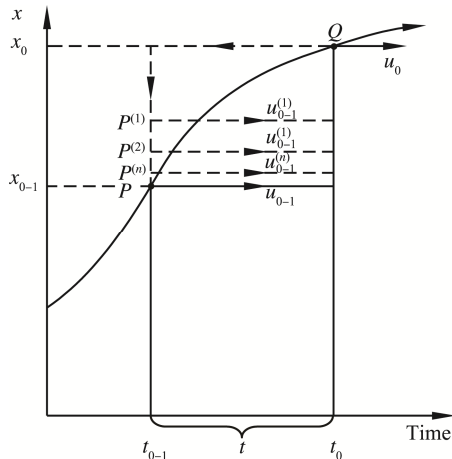
Lee等^[23]应用上限元反向模拟技术对非对称锻件进行预成形坯料形状设计,具体地,根据锻件几何结构,将锻件分为平面应变部分和轴对称部分,分别应用上限元反向模拟技术设计坯料形状,并通过塑性泥物理模拟实验验证坯料。

为拓展上限元技术在三维复杂成形过程中的应用,Pitt-Francis等^[24]提出了TEUBA(Tetrahedral Elemental Upper Bound Analysis)分析方法,并探讨在反向模拟中的应用。随后Chang和Bramley应用基于TEUBA的反向模拟技术对带有复杂圆弧边界的平面应变锻件进行了预成形坯料形状设计优化^[25-26]。

采用上限元技术反向模拟法设计预成形坯料形状主要存在预测精度不高,一般通过同有限元正向模拟相结合的办法,设计较合适的简单坯料形状,广泛用于二维问题的预成形坯料设计。对于复杂三维问题,一般抽取典型横截面^[21-22]或将构件分为几个二维问题^[23],然后分别对横截面或部分区域(二维问题)应用上限元反向模拟,根据模拟结果设计预成形坯料形状,也取得了理想的效果。

1.2 基于有限元反向模拟的预成形坯料形状设计

20世纪80年代,在Battelle Columbus实验室开发的有限元分析软件平台上,小林史郎团队^[4]提出了有限元反向模拟技术,从最终给定形状和条件出发,沿成形过程相反的方向模拟计算获得初始坯料形状。反向追踪方案的概念见图1,在 $t=t_0$ 时刻,变形体在Q点的几何构形为 $\mathbf{x}_0$,Q点是由P点($t=t_{0-1}$)通过 Δt 时间增量变形而来。P点的几何构形为 $\mathbf{x}_{0-1}$,速度场为 $\mathbf{u}_{0-1}$,并有 $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{0-1} + \mathbf{u}_{0-1}$ 。反向模拟就是基于Q点的已知信息(几何构形为 $\mathbf{x}_0$)求解P点的速度场为 $\mathbf{u}_{0-1}$,并确定P点的几何构形为 $\mathbf{x}_{0-1}$,这一过程要

图1 反向追踪方案的概念^[4]Fig.1 Concept of backward tracing scheme^[4]

通过反复的几何迭代和正向模拟验证。

反向模拟技术的关键问题主要有: 如何考虑材料属性的影响, 如加工硬化; 如何修正边界条件变化(脱模准则); 解的唯一性问题。很明显, 反向模拟中对边界条件处理不同, 会获得不同的预成形坯料形状。小林史郎团队^[4]在提出反向模拟方法后, 将其应用于设计壳体缩口的预成形坯料, 以避免壁厚不均匀问题。采用控制预成形件的几何形状来处理反向模拟中的动态边界条件建立脱模准则, 这种准则本质是人为规定反向模拟过程中节点脱模的时间和位置, 一般仅适用于几何形状较简单的构件。具体地针对壳体缩口, 采用了外径不变和内径不变两种方法, 相应获得了两种预成形坯料形状。接着将反向模拟方法用于平面应变轧制过程分析, 设计预成形坯料形状以避免轧制过程中出现的鱼尾和折叠等缺陷^[27]。发展了控制工件变形处理反向模拟中的动态边界条件建立脱模准则, 并用于圆盘锻造过程中的预成形坯料设计, 以获得变形均匀的锻件^[28]。具体地, 假设终锻件内等效应变为 $\bar{\varepsilon}_0$, 并均匀分布(在文献^[28]中 $\bar{\varepsilon}_0=0.9$, 根据有限元正向模拟结果确定), 反向模拟从最终等效应变 $\bar{\varepsilon}_0$ 出发, 减去 $-\Delta t$ 时间增量内的增量等效应变后得到残余应变, 根据厚度方向残余应变差值确定是否脱模。

Kang 等^[29]对翼型截面叶片无飞边闭模锻造过程的预成形坯料设计进行了研究, 将成形过程处理为二维平面应变问题, 通过有限元正向模拟确定成形参数和初步预成形坯料形状, 如果该预成形坯料形状不能满足要求, 采用有限元反向模拟确定合适的预成形坯料形状。反向模拟所用的动态边界条件是通过调整、修正初步预成形坯料正向模拟结果而得到的。采用同样的方法, Kim 和小林史郎^[30]运用正向模拟和反向模拟技术对 H 型截面轴对称锻件进行预成形坯料形状设计, 以实现该锻件的少无飞边锻造。

赵国群等^[31]提出了根据边界接触点受力特征, 来

确定反向模拟过程中接触节点脱离模具的判断准则方法, 并采用控制预成形件的几何形状和边界接触点受力特征建立脱模准则, 对 H 型锻件锻造过程进行反向模拟, 设计预成形坯料形状, 并通过有限元正向模拟进行验证。Zhao 等^[32]利用工件形状复杂系数来建立反向模拟过程中接触节点的脱离准则, 应用该脱模准则对涡轮机转子圆盘锻件锻造过程进行预成形设计, 并通过有限元正向模拟对预成形坯料进行验证。

赵国群课题组提出并发展了一种反向模具接触跟踪方法, 来处理反向模拟中的动态边界条件建立脱模准则^[33-37]。具体的方法和步骤为: 初步设计预成形坯料形状, 并进行正向有限元模拟; 在正向模拟过程中记录模具表面与工件表面的接触时间及其变化情况; 适当调整上述记录的边界条件, 用于反向模拟动态边界条件的确定。该方法已应用于涡轮机盘、链轨节等锻件的锻造过程的反向模拟以及预成形坯料和模具设计。

以上研究主要针对二维平面问题, 即使针对三维构件也是根据多个截面上的二维预成形坯料设计结果设计三维预成形坯料形状。有限元反向模拟技术在三维问题上也有应用, Kang 和小林史郎^[38]对圆环轧制过程采用三维有限元法反向模拟技术进行研究, 分别对矩形截面及 T 形截面的圆环轧制过程进行了预成形设计, 并采用有限元正向模拟进行验证。

目前的有限元反向模拟方法, 如图 1 所示, 在每一个时间增量步内, 需要繁琐的几何搜索和迭代以及反复正向模拟验证, 计算效率低。杨合课题组提出并建立了不需要几何搜索和迭代的有限元反向模拟新方法: 反向载荷法, 大幅度提高了计算效率^[39-42]。针对刚粘塑性有限元特点, 用反向载荷直接迭代生成反向模拟初始速度场, 在 $-\Delta t$ 时间增量内直接用反向速度场进行计算, 不需要几何搜索和迭代, 采用脱模轨迹判断接触点的脱模时间, 其脱模轨迹仍然是通过调整有限元正向模拟过程记录的接触轨迹而确定的。

大型复杂构件锻造过程的三维有限元正向模拟分析需要较长的计算时间。目前大部分的有限元反向模拟都存在计算效率低、计算时间远大于正向模拟时间等问题, 虽然反向载荷法不需要几何搜索和迭代, 但该方法不适用于成形过程中会交替出现脱模和接触情况的凹形件预成形设计。

2 基于优化设计方法的预成形

为了减少预成形设计的盲目性, 优化设计方法被引入到预成形设计, 将优化设计方法同有限元数值模拟相结合, 实现预成形坯料形状的设计。基于优化设计方法的预成形坯料设计方法一般要先建立目标函

数和选取设计变量,然后采用一定的优化设计方法(灵敏度分析法^[5]、响应面法^[43]、遗传算法^[6]、拓扑优化法^[44]等)进行优化,最终获得预成形坯料形状或预成形模具型腔形状。

2.1 典型梯度型优化方法

灵敏度分析是一种广泛应用于计算目标函数梯度的方法,其计算方法一般有有限元逼近法、伴随变量法、直接求导法等3种^[45]。Badrinarayanan等^[46]提出了一种用于超弹粘塑性材料大变形过程的灵敏度分析方法,并应用于铝合金圆柱镦粗过程的预成形坯料设计,以减少圆柱侧面的鼓起程度。Shim^[47]以实际成形后形状同目标形状差别为目标,建立灵敏度方程,对自由镦粗过程进行预成形设计,以获得所需的锻造后的形状。亢战等^[48]采用灵敏度分析法针对圆柱镦粗过程进行预成形坯料设计,以减少圆柱镦粗的桶形效应(自由表面鼓起)。其采用实际锻造后工件表面形状同指定边界表面之间的位置误差为目标函数,并采用凝聚函数法构造目标函数。

Fourment等^[49-50]也提出了一种用于预成形设计的灵敏度分析方法,目标函数为理想锻件形状和实际锻件形状之间的距离,分别以预成形坯料形状和预成形模具形状为优化对象,对一次成形和二次成形的二维问题进行了优化设计。赵国群等^[5,51-53]采用理想终锻件形状与实际终锻件形状不重合区域面积的大小作为目标函数,优化对象不是预成形坯料,而直接是预成形模具型腔形状,优化的目标是减少实际终锻件形状与理想终锻件形状之间的差异。用这种方法分别对H型轴对称锻件和圆柱压缩等成形过程进行预成形坯料形状优化设计,以实现少无飞边近净成形和无侧面鼓起。张麦仓等^[54]采用同样的方法,对FGH95合金涡轮盘锻件用预成形坯料进行预成形设计。

赵新海等同样采用灵敏度分析法,直接优化设计预成形模具形状,分别发展了以整个工件上任意单元的等效应变与所有单元平均等效应变的差值平方和为目标函数,控制锻件均匀性的优化设计^[55-56];以锻造载荷为目标函数,降低锻造成形力的优化设计^[57];通过加权函数法建立了包括锻件均匀性和锻造成形力的目标函数,控制锻件均匀性和变形力的多目标优化设计^[58]。

2.2 典型非梯度型优化方法

基于灵敏度分析的优化方法属于梯度型优化方法,实际应用中存在灵敏度方程推导复杂、灵敏度计算针对特定的目标函数和设计变量并嵌入到有限元程序中等问题,针对这些问题,Kusiak^[59]率先将非梯度型优化方法引入金属体积成形过程优化设计。该方法采用商业有限元软件求解目标函数值,用近似函数表示目标函数和设计变量之间的关系,通过求近似函数的极值,最终获取优化结果。Kusiak采用这种方法以锻件奥氏体晶粒大小分布均匀为目标,以预成形模具型腔形状为优化对象,对轴对称闭模锻造进行了预成形优化设计。

同样的基于这一思想,将正交设计和数值模拟相结合,构件锻件充填率和变形均匀性的综合目标函数,优化了航空发动机中对开机匣锻件预成形坯料形状^[60]。此外,另外一种非梯度型方法——响应面法(RSM, Response Surface Method)也逐渐在金属体积预成形设计中得到广泛应用。该方法是采用响应曲面近似模型,描述目标函数和设计变量之间的关系。

Thiyagarajan和Grandhi^[43,61]采用响应面法和有限元正向模拟相结合的方法,分别对H型平面应变、轴对称毂盘、三维弹簧座和转向连杆等构件进行预成形坯料形状设计。其基本思想是将最佳预成形坯料形状定义为多个基本形状的线性组合,通过有限元数值模拟提供样本数据,采用二次多项式模型建立描述目标函数(如应变方差和型腔未充满等)和设计变量(基本形状组合成预成形坯料形状的系数/加权值)之间关系的响应面模型,然后进行优化设计。

汤禹成等^[62-63]以理想终锻件形状与实际终锻件形状之间差别为目标函数,以预成形模具形状为优化对象,通过有限元数值模拟提供目标函数值,应用神经网络法生成响应面模型,优化设计获得预成形模具形状;采用有限元正向模拟验证,若不满足要求,将优化结果加入样本数据集,重新训练神经网络,然后优化,直至满足期望要求。并根据优化结果进行再设计,以简化模具形状,如图2所示,在此基础上分别以平均等效应变最小和损伤值最小为目标,再次进行优化设计,该方法成功应用于H型轴对称二维锻造问题。

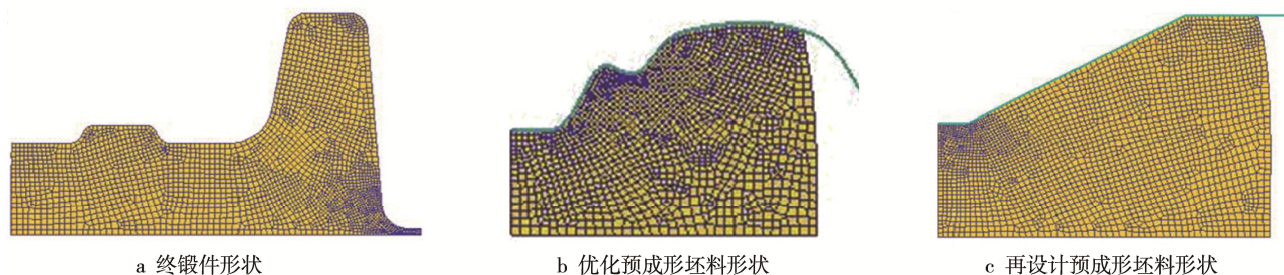


图2 预成形坯料形状优化与再设计^[63]
Fig.2 Optimization and redesign of preform shape^[63]

杨艳慧等^[64-65]以提高型腔充填和锻件均匀性为优化目标,以预成形坯料形状为优化对象,通过有限元数值模拟提供样本数据,采用多项式建立响应面模型,对 IN718 合金涡轮盘锻造过程进行了预成形设计,在此基础上,以降低成形载荷为目标再次进行优化设计。Wei 等^[66]尝试采用响应面法,优化设计钛合金筋板类构件等温局部加载成形过渡区的不等厚坯料形状,以提高型腔充填、减少折叠缺陷。成功应用于某一特征结构的过渡区坯料优化,其结果得到采用铅的物理模拟实验验证。

2.3 智能优化方法

遗传算法、神经网络等智能优化算法也被引入预成形设计。Roy 等^[6]指出传统简单遗传算法的群规模一般为 30~200,而微观遗传算法的群规模可少至 5;遗传算法用于金属成形过程分析时,其目标函数通过有限元分析获取,为了减少数值模拟的规模和时间,一般采用微观遗传算法用于预成形优化设计。同时 Roy 等分别对线拉拔、管型截面拉拔以及汽车零件冷锻过程进行了优化设计,获得了优化的模具形状和成形工步数。

Chung 和 Hwang^[67]采用微观遗传算法,以获得终锻件内温度均匀分布为目标,对 H 型轴对称锻件预成形模具形状进行了优化设计。罗仁平等分别采用理想终锻件形状与实际终锻件形状不重合区域面积^[68]和体积^[69]的大小作为目标函数,以预成形模具形状为优化对象,应用微观遗传算法分别对平面应变方坯墩粗和 H 型轴对称零件的锻造进行了预成形优化设计。王广春等^[70-71]采用锻件晶粒尺寸和用理想终锻件形状与实际终锻件形状不重合区域体积作为目标函数,以预成形模具形状为优化对象,应用微观遗传算法,分别对圆柱墩粗和 H 型轴对称零件的锻造进行了预成形优化设计。

Kim 等^[7,72]提出神经网络结合有限元正向模拟进行预成形设计,其主要思想是通过有限元正向模拟获得不同设计变量下的目标函数值,用所获得的样本数据训练神经网络模型,训练完成后预测最佳设计变量;并通过有限元模拟验证预测结果,若不满足要求,将优化结果加入样本数据集,重新训练神经网络,然后优化,直至满足期望要求。具体地, Kim 等用该方法来确定平面应变和轴对称筋板类构件单工序锻造的预成形坯料形状,以型腔未充满区域的体积 ΔV 或体积比 $\Delta V/V$ 为目标函数,初始坯料的高宽比 h/w 或高径比 h/r 为设计变量。同样地,基于这一思想, Ko 等^[73-74]分别以终锻件最大韧性断裂值和成形过程中最大载荷为目标函数,对螺钉墩锻过程进行预成形设计。

2.4 其他优化方法

近年来,在结构轻量化设计中广泛应用的拓扑优

化方法也被用于金属体积成形预成形坯料形状优化设计。根据有限元正向模拟结果计算单元应力值,从而决定下一优化迭代步中预成形坯料形状拓扑单元的增删^[44]。与轻量结构设计中拓扑优化不同,预成形坯料设计的拓扑优化中单元增删只能在坯料边界进行,并且其判断准则中要考虑到拉、压变形状态的不同。陆彬等以反映拉、压变形状态的静水应力为单元增删判断准则^[44],随后又在判断准则中增加了应变分量^[75]。前者以锻件充填率为优化目标,后者同时优化充填和变形均匀性。基于拓扑优化的预成形设计,由二维截面拓展三维叶片锻造预成形坯料设计^[76-77]。

类似于拓扑优化中删除边界区域材料的方法, Yang 和 Nagile^[78]发展了一种根据几何相似性,通过删除预成形坯料边界材料的预成形设计方法。该方法根据零件 X_a 形状,构造一系列体积逐渐增大、外形类似并逐渐过渡的简单零件 X_d ,给出零件 X_d 的预成形坯料 P_d 正向数值模拟,根据零件 X_d 中 X_{d-1} 的边界反向追踪材料流动,删除预成形坯料 P_d 多余材料获得预成形坯料 P_{d-1} ,反复迭代获得零件 X_a 的预成形坯料形状。

将优化方法同正向数值模拟相结合用于预成形坯料形状设计,大都用于二维问题,在三维问题上的应用,一般是较为简单的构件。并且目标函数都是在给定条件下建立的,改变目标函数和设计变量,需要重新推导灵敏度方程或重新获取样本数据构建预测模型。对于大型复杂具有极端尺寸配合特征的三维构件的预成形优化设计,复杂型腔结构多、大小尺度极端配合、参变量个数大大增加,加大了设计变量选取和目标函数建立的难度。此外,灵敏度分析法实际应用中,还存在复杂灵敏度方程推导的问题,非梯度型优化方法存在如何通过有限元正向模拟高效地获取一定量的适用样本数据的问题。

3 基于正向模拟过程分析的预成形设计

无论是采用反向模拟方法或优化方法获得的预成形坯料形状,都还需要进行正向成形过程验证,并且根据分析结果可能需要,进一步地修正调整,而且通过反向模拟方法或优化方法获取的预成形坯料形状一般都比较复杂或接近终锻件形状,为了便于加工、降低成本,可能会进行再设计,修改简化坯料形状。直接基于正向过程分析结果,设计预成形坯料形状,然后通过实验等手段试错,会比较简单明了,基于专家知识和理论分析修改调整,比较方便易于掌握,但可能会费时费力。

基于正向过程分析的预成形坯料设计的关键和难点是如何快速设计初始坯料形状,以减少试错的次

数或选择坯料形状的范围。实际上在反向模拟中,初始选择的预成形坯料,对动态边界条件和反向模拟结果产生较大的影响;结合优化方法的预成形设计中,初始选择的预成形坯料(或一组坯料)对迭代次数/时间以及优化结果也会产生较大的影响,因此,确定设计初始坯料形状是一个共性问题,基于正向过程分析试错的预成形设计仍具有一定的应用价值和范围,特别是对一些反向模拟和数学优化方法暂时还做不到的问题。

最初的坯料预成形设计来源于长期生产实践积累的经验性知识,根据丰富的经验知识总结归纳出一定的设计准则,根据这些准则和个人经验,设计预成形坯料形状,然后在生产中调整修正,获得满足要求的形状。随着滑移线法和主应力法等金属成形过程解析分析方法的出现,结合正向成形过程的解析,分析设计预成形坯料,然后根据正向成形过程分析结果调整修正坯料形状。根据相似理论,通过适当的构造,金属塑性成形过程中的速度场和静电场具有相同的场方程,可以根据静电场中的等势线,快速设计多个预成形坯料形状,通过正向成形过程分析选择找出合理的预成形坯料形状。早期实验过程采用真实的工业实验,不仅带来严重的设备损耗、材料浪费,并且高温成形操作困难,时间周期长、费用高。为了减少这一现象,人们采用廉价的、所需成形载荷小的、能在室温下模拟高温塑性变形的材料(如铅、塑性泥、蜡等),进行物理模拟实验。随着计算机和CAE(Computer Aided Engineering)技术的发展,数值模拟方法已成为求解复杂问题的强有力工具,可以虚拟实现复杂成形过程,将大量反复实验在计算机上完成,从而减少制造费用、缩短研发周期,因此采用数值模拟方法进行虚拟研究成为塑性成形研究的发展趋势。基于正向成形过程分析的预成形坯料形状设计过程见图3。

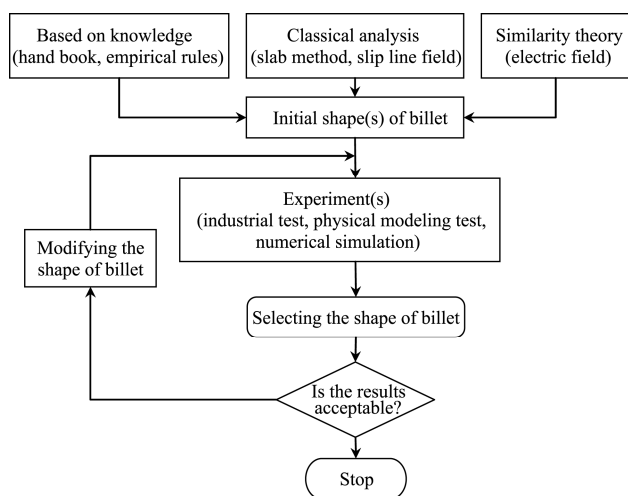


图3 基于正向成形分析的预成形坯料形状设计过程
Fig.3 Preform design based on forward analysis of forming process

3.1 基于知识和解析方法

阿尔坦等^[79]总结了筋板类锻件预成形设计经验准则,针对不同的成形材料(铝合金、钛合金、碳钢等),给出了预成形坯料的腹板厚度、筋宽、圆角半径等定量尺寸,并将筋板类构件分解为包括腹板和筋条的L型子结构,采用计算机辅助设计技术进行预成形设计。李云等^[80]根据阿尔坦等总结的预成形设计准则,在Pro/E平台上开发了一套筋板类构件预成形设计软件。Choi等^[81]也根据已知的经验、理论和相关手册,总结了筋板类构件预成形坯料形状设计准则,将筋板类构件分解为筋截面和腹板截面两个子结构,分别进行预成形设计,以此为基础,基于AutoCAD环境开发了二维问题(轴对称或平面应变)预成形坯料形状的计算机辅助设计系统。郭良刚等^[81]根据体积不变原则,通过理论分析,提出了一种基于轧比和径轴向变形量分配的矩形截面环件径轴向轧制坯料尺寸的设计方法,开发了相关设计软件。

关绍臣和刘昱虹^[11]基于经验和理论分析,对多个曲轴锻件进行预成形设计,并根据工业实验结果对坯料形状进行了改进,满足了型腔充填,实现了曲轴锻件坯料生产。刘彦国和张红岩^[9]应用主应力法,结合体积不变原理,确定了齿轮坯锻件圆柱坯料的高度,在2t锤上的模锻表明,采用设计的坯料减少了打击次数、提高了材料利用率。

Biswas和Knight^[82]根据经验知识对筋板类构件进行了预成形设计,并采用塑性泥进行物理模拟实验,比较了不同预成形坯料锻造成形中的材料流动情况。阿尔坦等^[79]介绍了一种采用物理模拟实验对筋板类构件进行预成形坯料形状设计的方法,先采用塑性泥获得预成形坯料形状,然后采用铅作进一步调整,采用所设计的预成形坯料成功锻造出了Inconel 718合金和AISI 4340钢制锻件。Dutta和Rao^[83]采用塑性泥和铝合金作为钛合金等温成形过程的模拟材料,通过物理模拟实验确定了IMI-685钛合金压气机盘锻件预成形坯料尺寸。

Kim和Chitkara^[84]用上限元技术分析了冕状齿轮闭模锻造成形过程,并根据数值模拟结果,设计了多组预成形坯料形状,并采用铅和塑性泥进行了物理模拟实验,确定最终的坯料形状。

Kang等^[85]应用二维有限元法对平面应变的H型筋板类件无飞边闭模锻预成形进行研究,为了使H型平面应变锻件两侧筋条容易成形,Kang等提出用V型模具对矩形坯料侧向进行预成形,实现无飞边模锻,随着筋高宽比 h/b 增大,模具倾角也随之增大。Park和Hwang^[86]采用有限元数值模拟方法,对水平投影为梯形(上、下底边和高分别为14.9, 35, 49 mm)带纵横筋的非对称构件的预成形设计进行了研究。基

于二维有限元模拟典型截面的充填行为,设计基本预成形件,然后应用三维有限元模拟对基本预成形件进行反复修正,最终预成形件在筋条-腹板对应的区域为空间曲面,增加了制坯工艺的困难。

Sheu 和 Yu^[87]对一上部带有套筒的齿轮锻件进行了预成形研究,基于锻件几何结构特征,根据不同结构的材料体积分配,设计了多组预成形坯料,采用二维和三维有限元相结合的方法,研究了成形过程中的材料流动和缺陷,确定了适合的预成形坯料。

Ou 和 Balendra^[13]采用二维有限元正向模拟技术,对翼型截面叶片锻造过程进行了研究,分析三种形状坯料在成形过程中材料流动、成形载荷、模具接触面上的压力,指出预成形设计对提高材料利用率、降低生产成本、提高锻件性能起着重要作用。刘郁丽等^[88-90]采用三维有限元模拟,对单榫头叶片锻造过程进行了研究,结合变形补偿原理,实现了合理预成形坯料形状设计以及坯料放置位置的确定,并采用塑性泥物理模拟实验进行验证。

3.2 基于相似理论

以上研究中的初始预成形坯料形状都是根据积累的经验知识、塑性理论、解析分析等设计确定的,而近年来一种基于相似理论,利用金属塑性成形过程中的速度场和静电场具有相同的场方程,采用静电场中等势线作为预成形坯料形状的新方法逐渐得到应用。其主要原理是给终锻件边界赋以 0 V 电压值,坯料边界赋以 1 V 电压值,得到坯料和锻件之间的等势线,选择恰当的等势线作为预成形坯料形状。

王晓娜等^[91-92]采用静电场模拟法对粉末高温合金盘件进行了预成形设计,从等势场中选出 6 组等势线作为预成形坯料形状,并采用有限元正向模拟分析,获得不同预成形坯料锻造结束时的应变分布、成形载荷、模具受力情况,通过分析优选出最佳预成形坯料,以上应用都是基于二维静电场。蔡军等^[93-94]建立三维静电场,通过对构件不同部位多个截面选择等势线,然后进行三维坯料的预成形设计,并通过有限元数值模拟验证,该方法已用于钛合金叶片和长轴类锻件的预成形设计。

Lee 等^[10]采用该方法对盘类锻件进行了预成形设计,采用神经网络法选择最佳的等势线作为预成形坯料形状,其中训练神经网络的样本数据由有限元数值模拟结果提供。类似的方法拓展应用到了三维构件的锻造预成形坯料设计中^[95]。

Guan 等^[96]将静电场法和响应面法相结合,以预成形等势线对应电压和坯料体积为设计变量、充填率为目标函数进行预成形坯料形状设计,样本数据由数值模拟提供。

利用 MATLAB 中的 CAGE 工具箱将预成形坯料

形状(等势线电压)和工艺参数进行过目标优化设计,样本数据仍然由有限元正向模拟提供^[97-98]。其中等势线电压作为局部变量,而加载速度、摩擦因数、成形温度等工艺参数作为全局变量。

4 大型筋板类构件锻造坯料形状及设计方法

大型筋板类构件具有高筋薄腹的结构特征,不仅物理尺寸大、结构形状复杂、材料难变形(钛合金、铝合金、镁合金),并具有极端尺寸配合特征。如图 4 所示构件,其长大于 1300 mm,宽接近 1000 mm,而筋宽不足 20 mm,筋腹板处的过渡圆角半径仅有 5 mm。一般其成形工艺采用闭式模锻工艺。在成形过程中由于已成形筋条的“钉扎”作用,使得跨越已成形筋条的远程材料流动十分困难,并且越过已成形型腔的材料流动会产生成形缺陷^[79]。为了保证型腔充填、避免成形缺陷,需要改变坯料厚度分布,以获得初步的体积分配。一般地,为了减少无益的材料流动,坯料在水平面内的投影形状应当接近于锻件投影形状,并根据体积分配,改变局部坯料厚度,以保证型腔充满、不产生成形缺陷。



图4 TA15 钛合金锻件^[99]
Fig.4 TA15 titanium alloy forging^[99]

对于筋板类构件,一般其预成形坯料形状类似于终锻件,往往是对终锻件筋条的高、宽、圆角半径进行放缩来设计预成形坯料^[8,79]。目前预成形优化设计所获得的坯料形状一般是复杂、接近终锻件形状。对于构件尺寸巨大、合金材料锻造温度窄、成形工艺复杂的大型钛合金筋板类构件,复杂的预成形坯料需要多个火次的预锻,而且为了保证预锻件形状,可能需要采用等温成形。图 4 所示,TA15 钛合金隔框构件局部加载等温成形工业实验中,模具升温时间大概在一个星期左右。钛合金等温锻造中模具材料一般为高温镍基合金,价格十分昂贵并且难加工。不仅费用高周期长,多火次还会影响最终构件的组织性能。

复杂的预成形坯料难以适用于小批量的大型复杂构件。对于难变形材料大型筋板类构件,其预成形坯料应满足如下要求^[100]: ① 坯料形状简单,便于制坯; ② 能够初步完成材料体积分配,改善型腔充填。

而简单不等厚坯料能够满足这两点要求,其水平投影形状应当接近于锻件投影形状,以简单的台阶式结构改变坯料厚度分布。虽然不等厚坯料在变形均匀性等方面欠佳,但采用简单不等厚坯料结合局部加载,可以低成本有效地改善大型钛合金筋板构件型腔充填。

杨合等^[101—102]应用有限元正向模拟方法,根据充填效果,将构件分为难成形区和易成形区两个区域,根据不同部分的材料体积设计坯料厚度,使钛合金大型隔框构件局部加载等温成形过程中的型腔充填得到改善。吕炎等^[103—105]通过对镁合金上机匣成形过程的有限元值模拟和物理模拟试验结果,设计不等厚坯料,保证4个凸耳型腔处有足够的金属量。张会等^[12]采用铅和铝合金作为钛合金等温成形过程的模拟材料,应用物理模拟实验方法确定了“Z”型截面的钛合金筋板类构件等温成形的不等厚坯料形状,两端厚中间薄,投影平面与模具型腔投影平面大小相等。对H型轴对称筋板构件复杂的预成形坯料形状,进行二次优化设计,获得简单形状坯料^[62—63],如图2所示。

对于大型复杂具有极端尺寸配合特征的隔框构件,大小尺度极端配合、高筋薄腹的复杂结构、参变量个数大大增加,反向模拟的动态边界处理困难,设计变量选取和目标函数建立难度较大。并且局部加载等温成形全过程的三维有限元模拟分析需要较长的计算时间,如图4所示构件局部加载等温成形的有限元模拟采用DEFOEM-3D 5.0软件,在CPU3.60 GHz的HP工作站进行,正向模拟所需的CPU时间超过220 h^[100]。反向模拟和正向模拟优化设计大型复杂构件的预成形坯料,不仅面临巨大的技术挑战,而且计算时间长、设计坯料形状复杂。

无论采用何种方法进行预成形设计,初始预成形坯料形状的设计/选择是关键,而这一预成形坯料形状是由经验知识、塑性理论、基本设计原则初步设计的。对于三维预成形坯料形状设计,一般会通过考虑材料流动平面上的流动特征设计典型截面的预成形坯料形状;或者是根据构件的结构特征或成形过程的变形特征,划分为不同的区域,分别设计预成形坯料形状。对于大型复杂构件的预成形设计与优化问题,先从典型横截面和典型变形区域入手,采用理论分析、物理模拟与有限元数值模拟有机结合的方法应该是较为适用、可靠的方法。

这种方法的典型思路为^[106]:以加载特征下材料流动、型腔充填快速预测模型(多为解析模型)为基础,结合考虑几何参数、模具分区、摩擦条件,初步设计初始不等厚坯料;然后以提高充填能力、避免折叠缺陷为目标,根据整体构件全过程的有限元模拟结果,结合局部加载流动特征分析,调整修改坯料几何参数,最终获得较为合理的不等厚坯料。其中也可根据局部加载特征适当调整模具分区、改变局部区域的

摩擦条件同不等厚坯料相配合控制材料流动,达到不均匀变形协调的目的。针对大型筋板类构件的不等厚坯料形状设计流程见图5。

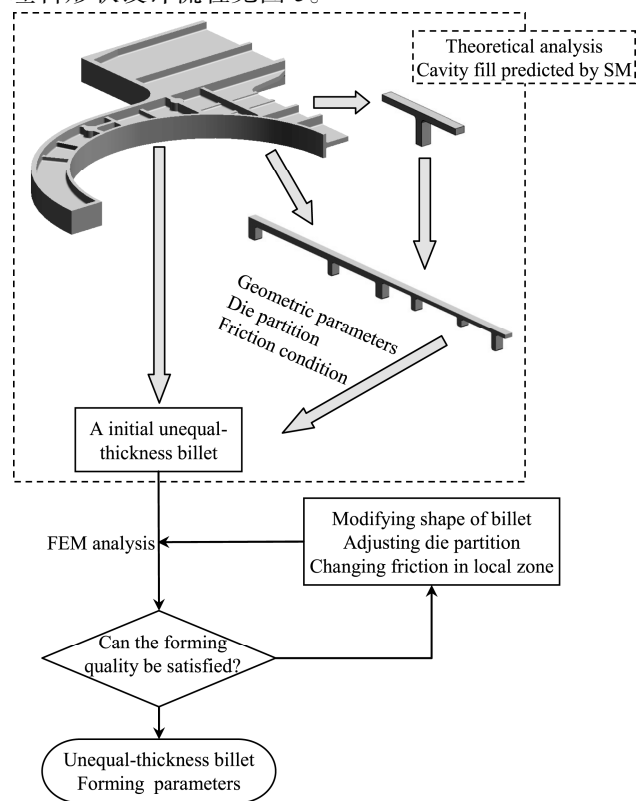


图5 大型筋板类构件不等厚坯料设计流程^[100]

Fig.5 Procedure of designing unequal-thickness billet for large-scale rib-web component^[100]

为此,张大伟等分析了大型筋板类构件,采用不等厚坯料的局部加载成形中可能出现的加载状态,并采用主应力法(SM, Slab Method)分别建立了整体加载状态下的材料流动解析模型式(1)^[107]、模具结构(如模具分区)导致的局部加载状态下的材料流动解析模型式(2)^[108]、坯料厚度变化导致的局部加载状态下的材料流动解析模型式(3)^[109]。进一步还研究了摩擦条件、摩擦模型对不同局部加载状态下的成形影响^[110—112]。

$$x_k = \frac{a_{i,i+1}}{2} + \frac{b_i - b_{i+1}}{4} + \frac{H^2}{4m} \left(\frac{1}{b_{i+1}} - \frac{1}{b_i} \right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_k = \frac{b}{2} & \sigma_x^{\parallel} \big|_{x=x_b} \leq q \\ x_k = \frac{1}{4} \left(l + b - \frac{H^2}{mb} \right) & \sigma_x^{\parallel} \big|_{x=x_b} > q \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_k = \frac{b}{2} & \sigma_x^{\parallel} \big|_{x=x_b} \leq q \\ x_k = \frac{1}{4} \left(l + b \right) - \frac{\Delta H}{2m} \left(1 + \frac{H + \Delta H}{2b} \right) & \sigma_x^{\parallel} \big|_{x=x_b} > q \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_k 是加载区腹板处分流层位置; a 是两相邻筋之间距离; b 是筋宽; l 是局部加载宽度; H 是

加载区腹板厚度; ΔH 是坯料厚度变化区域厚度差; m 是摩擦因数。

在此基础上开发多筋构件局部加载成形快速分析系统^[113], 构建了初始不等厚坯料设计的关键一环。进而采用如图 5 所示的解析-数值混合方法, 设计了某大型筋板类构件局部加载成形用不等厚坯料, 如图 6 所示, 其中基于三维有限元分析的坯料形状修正仅 2 次^[100]。Wei 等^[114]根据构件几何参数采用式(1)确定分流层位置, 结合 CAD 软件和三维数值模拟优化设计了大型筋板类构件不等厚坯料形状。

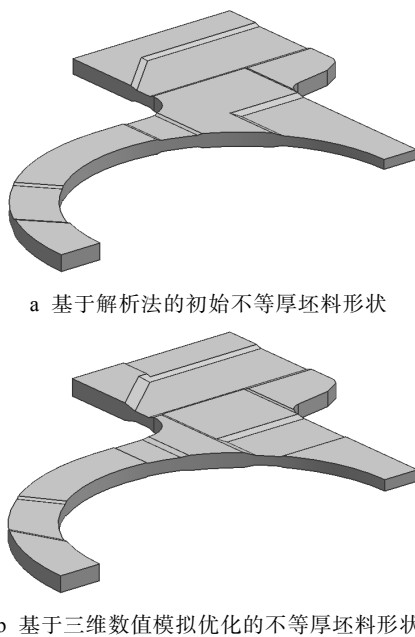


图 6 大型筋板类构件不等厚坯料形状^[100]
Fig.6 Unequal-thickness billet of large-scale rib-web component^[100]

5 结论

初始预成形坯料形状的设计或选择, 是基于反向模拟技术的预成形坯料形状设计、基于优化设计方法的预成形坯料形状设计、基于正向过程分析的预成形坯料形状设计的关键一环, 而这一预成形坯料形状多是由经验知识、塑性理论、基本设计原则初步设计/选择的。数值模拟技术在目前预成形坯料形状优化设计中起着重要作用, 如反向模拟设计的预成形验证、优化设计中样本数据提取以及试错法中实验由有限元数值模拟来完成。

对于小批量大型筋板类构件锻造成形, 采用简单不等厚坯料(以简单的台阶式结构改变坯料厚度分布)结合局部加载可以低成本有效地改善大型钛合金筋板构件型腔充填。基于解析模型结合有限元模拟分析的不等厚坯料设计方法是一种较为适用、可靠的方法。

参考文献:

[1] YANG He, ZHAN Mei, LIU Yu-li, et al. Some Advanced

Plastic Processing Technologies and Their Numerical Simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1/2/3): 63—69.

[2] 杨合, 孙志超, 詹梅, 等. 局部加载控制不均匀变形与精确塑性成形研究进展[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 6—14.

YANG He, SUN Zhi-chao, ZHAN Mei, et al. Advances in Control of Unequal Deformation by Locally Loading and Theories Related to Precision Plastic Forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(2): 6—14.

[3] YANG He, FAN X G, SUN Zhi-chao, et al. Recent Developments in Plastic Forming Technology of Titanium Alloys[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(2): 490—501.

[4] PARK J J, REBELO N, KOBAYASHI S. A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1983, 23(1): 71—79.

[5] ZHAO G Q, WRIGHT E, GRANDHI R V. Sensitivity Analysis Based Preform Die Shape Design for Netshape Forging[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1997, 37(9): 1251—1271.

[6] ROY S, GHOSHI S, SHIVPURI R. New Approach to Optimal Design of Multi-stage Metal Forming Processes with Micro Genetic Algorithms[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1997, 37(1): 29—44.

[7] KIM D J, KIM B M, CHOI J C. Determination of the Initial Billet Geometry for a Forged Product Using Neural Networks[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 72(1): 86—93.

[8] CHOI J C, KIM B M, KIM S W. Computer-aided Design of Blockers for Rib-web Type Forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 54(1/2/3/4): 314—321.

[9] 刘彦国, 张红岩. 环类锻件制坯尺寸的确定 [J]. 机械研究与应用, 2002, 15(2): 59—60.

LIU Yan-gou, ZHANG Hong-yan. Determination of Blank Size for Ring Forging[J]. Mechanical Research and Application, 2002, 15(2): 59—60.

[10] LEE S R, LEE Y K, PARK C H, et al. A New Method of Preform Design in Hot Forging by Using Electric Field Theory[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(4): 773—792.

[11] 关绍臣, 刘昱虹. 曲轴毛坯预成形工艺的探讨[J]. 热加工工艺, 1995, 24(6): 25—26.

GUAN Shao-chen, LIU Yu-hong. Inquiry into Preforming Technology of Crankshaft Blocks[J]. Hot Working Technology, 1995, 24(6): 25—26.

[12] 张会, 姚泽坤, 戴亮, 等. 金属结构等温成形过程金属流动规律与充填性的物理模拟[J]. 航空制造技术, 2007(1): 73—76.

ZHANG Hui, YAO Ze-kun, DAI Liang, et al. Physical Simulation of Metal Flowing Laws and Filling Ability in Isothermal Forming Process for Metal Structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(1): 73—

- 76.
- [13] OU H, BALENDRA R. Preform Design for Forging of Aerofoil Sections Using FE Simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80/81: 144—148.
- [14] OSMAN F N, BRAMLEY A N, GHOBRIAL M I. Forging and Preform Design Using UBET[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Technology of Plasticity (ICTP1984), Tokyo, The Japan Society for Technology of Plasticity, 1984: 563—568.
- [15] SUN S, GUAN TD. The Reverse Simulation Technique of Die Forging Based on UBET and Its Application[J]. Chinese Journal Mechanical Engineering, 1991, 4(3): 177—181.
- [16] SUN S, LUAN Y G. Preform Design of Axisymmetric Forgings Based on Reverse Simulation Technique of Die Forging Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1992, 34(1/2/3/4): 349—356.
- [17] 杜忠友, 孙胜. 上限元模拟技术在金属塑性加工优化设计中的应用[J]. 中国机械工程, 1993, 4(3): 25—28.
- DU Zhong-you, SUN Sheng. The Simulation Rechnique of UBET and Its Application in Optimal Design of Metal Plastic Working[J]. China Mechanical Engineering, 1993, 4(3): 25—28.
- [18] 刘庆斌, 季忠, 刘马宝, 等. 一种锻件预成形设计的新方法[J]. 西北工业大学学报, 1996, 14(4): 643—644.
- LIU Qing-bin, Ji Zhong, LIU Ma-bao, et al. A New Method for Preforming Design of Complexly Shaped Forging[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1996, 14(4): 643—644.
- [19] LIU Q B, WU S C, SUN S. Preform Design in Axisymmetric Forging by a New FEM-UBET Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 74(1/2/3): 218—222.
- [20] 栾贻国. 基于 UBET 和 FEM 的模锻件预成形设计[J]. 塑性工程学报, 2000, 7(3): 7—9.
- LUAN Yi-gou. Forging Preform Design Based on UBET and FEM[J]. Journal of Plastiety Engineering, 2000, 7(3): 7—9.
- [21] WANG Z, XUE K M, LIU Y W, et al. The Application of UBET in Backward Simulation of a Blade[J]. Journal of Haerbin Institute of Technology, 1996, 3(1): 78—82.
- [22] WANG Z, XUE K, LIU Y W. Backward UBET Simulation of the Forging of a Blade[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 65(1/2/3): 18—21.
- [23] LEE J H, KIM Y H, BAE W B. An Upper-bound Elemental Technique Approach to the Process Design of Asymmetric Forgings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 72(1): 141—151.
- [24] PITT-FRANCIS J M, BOWYER A, BRAMLEY A N. A Simple 3D Formulation for Modeling Forging Using the Upper Bound Method[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 1996, 45(1): 245—248.
- [25] CHANG C C, BRAMLEY A N. A Forging Preform Design Approach Using Reverse Simulation[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 1998, 47(1): 193—196.
- [26] BRAMLEY A N, UBET and TEUBA: Fast Methods for Forging Simulation and Preform Design[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 116(1): 62—66.
- [27] HWANG S M, KOBAYASHI S. Preform Design in Plane-strain Rolling by the Finite Element Method[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1984, 24(4): 253—266.
- [28] HWANG S M, KOBAYASHI S. Preform Design in Disk Forging[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1986, 26(3): 231—243.
- [29] KANG B S, KIM N, KOBAYASHI S. Computer-aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1990, 30(1): 43—52.
- [30] KIM N, KOBAYASHI S. Preform Design in H-shaped Cross Sectional Axisymmetric Forging by the Finite Element Method[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1990, 30(2): 243—268.
- [31] 赵国群, 阮雪榆, 关廷栋. 锻造过程的反向模拟及预成形设计[J]. 模具技术, 1992(5): 1—6.
- ZHAO Guo-qun, RUAN Xue-yu, GUAN Ting-dong. Preform Design and Backward Simulation in Forging Process[J]. Die and Mould Technology, 1992(5): 1—6.
- [32] ZHAO G, WRIGHT E, GRANDHI R V. Forging Preform Design with Shape Complexity Control in Simulation Backward Deformation[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1995, 35(9): 1225—1239.
- [33] ZHAO G, WRIGHT E, GRANDHI R V. Computer Aided Preform Design in Forging Using the Inverse Die Contact Tracking Method[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1996, 36(7): 755—769.
- [34] ZHAO Guo-qun, ZHAO Z D, WANG T H, et al. Preform Design of a Generic Turbine Disk Forging Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 84(1/2/3): 193—201.
- [35] 赵国群, 贾玉玺, 王广春, 等. 基于有限元逆向模拟技术的预成形模具设计[J]. 机械工程学报, 2000, 36(2): 65—68.
- ZHAO Guo-qun, JIA Yu-xi, WANG Guang-chun, et al. Preform Die Design Using Finite Element Based Inverse Siuimulation Technique[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(2): 65—68.
- [36] ZHAO Guo-qun, WANG Guang-chun, GRANDHI R V. Die Cavity Design of Near Flashless Forging Process Using FEM-based Backward Simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121(2/3): 173—181.
- [37] 高军, 赵国群, 李立华. 基于有限元法的正反向模拟技术在链轨节锻造中的应用[J]. 锻压技术, 2002, 27(5): 5—9.
- GAO Jun, ZHAO Guo-qun, LI Li-hua. Application of Forward and Backward Simulation Based on FEM in Track Link Forging[J]. Foring and Stamping Technology, 2002, 27(5): 5—9.
- [38] KANG B S, KOBAYASHI S. Preform Design in Ring

- Rolling Processes by the Three-dimensional Finite Element Method[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1991, 31(1): 139—151.
- [39] 高涛. 面向复杂精锻预成形设计的三维有限元反向模拟方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2008.
- GAO Tao. Research on 3D FEM Backward Simulation for Preform Design of Complex Precision Forging[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008.
- [40] 高涛, 杨合, 刘郁丽. 有限元反向模拟的新算法[J]. 中国机械工程, 2006, 17(19): 1981—1984.
- GAO Tao, YANG He, LIU Yu-li. Novel Algorithm for Backward Simulation Using FEM[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(19): 1981—1984.
- [41] GAO Tao, YANG He, LIU Yu-li. Backward Tracing Simulation of Precision Forging Process for Blade Based on 3D FEM[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(S2): 639—644.
- [42] GAO Tao, YANG He, LIU Yu-li. Influence of Dynamic Boundary Conditions on Preform Design for Deformation Uniformity in Backward Simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1/2/3): 255—260.
- [43] THIYAGARAJAN N, GRANDHI R V. 3D Preform Shape Optimization in Metal Forming[C]// AIP Conference Proceedings 712, Melville, New York, American Institute of Physics, 2004: 2038—2042.
- [44] LU B, OU H, CUI Z S. Shape Optimization of Preform Design for Precision Close-die Forging[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011, 44: 785—796.
- [45] BADRINARAYANAN S, ZABARAS N. A Sensitivity Analysis for the Optimal Design of Metal-forming Processes[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 129(4): 319—348.
- [46] BADRINARAYANAN S, ZABARAS N, CONSTANTINESCU A. Preform Design in Metal Forming[C]// Proceeding of the 5th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Process (NUMIFORM95), Rotterdam, Balkema, 1995: 533—538.
- [47] SHIM H. Optimal Preform Design for the Free Forging of 3D Shapes by the Sensitivity Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(1): 99—107.
- [48] 亢战, 赵红兵, 顾元宪. 金属预成形优化设计及凝聚函数方法[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 96—100.
- KANG Zhan, ZHAO Hong-bing, GU Yuan-xian. Optimization Design of Metal Preforming with Aggregate Function Method[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 96—100.
- [49] FOURMENT L, CHENOT J L. Optimal Design for Non-steady-state Metal Forming Processes-I Shape Optimization Method[J]. International Journal for Numerical Methods Engineering, 1996, 39(1): 33—50.
- [50] FOURMENT L, BALAN T, CHENOT J L. Optimal Design for Non-steady-state Metal Forming Processes-II Application of Shape Optimization in Forging[J]. International Journal for Numerical Methods Engineering, 1996, 39(1): 51—65.
- [51] 赵国群, 王广春, 贾玉玺, 等. 材料塑性成形过程最优化设计-I 有限元灵敏度分析方法[J]. 塑性工程学报, 1999, 6(2): 1—7.
- ZHAO Guo-qun, WANG Guang-chun, JIA Yu-xi, et al. Optimum Design of Material Forming Process-I Finite Element Sensitivity Analysis Method[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1999, 6(2): 1—7.
- [52] 赵国群, 贾玉玺, 王广春, 等. 圆盘锻件纯形状锻造模具优化设计[J]. 机械工程学报, 1999, 35(4): 81—84.
- ZHAO Guo-qun, JIA Yu-xi, WANG Guang-chun, et al. Optimum Die Shape Design in Netshape Disk Forming Process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(4): 81—84.
- [53] 赵国群, 赵振铎, 贾玉玺, 等. 预锻模具形状优化设计与有限元灵敏度分析[J]. 应用力学学报, 1999, 16(4): 68—72.
- ZHAO Guo-qun, ZHAO Zhen-duo, JIA Yu-xi, et al. Preform Die Shape Optimization Design and FEM Based Sensitivity Analysis[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1999, 16(4): 68—72.
- [54] 张麦仓, 罗子健, 曾凡昌. 基于 FEM 的预成形最优化方法及其应用[J]. 锻压技术, 2000, 25(4): 7—10.
- ZHANG Mai-cang, LUO Zi-jian, ZENG Fan-chang. Method for Preform Optimization Based on FEM and Its Application[J]. Forging and Stamping Technology, 2000, 25(4): 7—10.
- [55] 赵新海, 赵国群, 王广春. 基于变形均匀性的锻造模具形状优化设计方法[J]. 机械工程学报. 2000, 36(10): 64—67.
- ZHAO Xin-hai, ZHAO Guo-qun, WANG Guang-chun. Optimal Preform Die Shape Design through Controlling Uniformity Deformation of Forging in Metal Forging[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(10): 64—67.
- [56] ZHAO X H, ZHAO G Q, WANG G C. Preform Die Shape Design for Uniformity of Deformation in Forging Based on Preform Sensitivity Analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 128(1/2/3): 25—32.
- [57] 赵新海, 黄晓慧, 吴向红, 等. 控制变形力的锻造预成形优化设计研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12): 1496—1499.
- ZHAO Xin-hai, HUANG Xiao-hui, WU Xiang-hong, et al. Research on Optimal Preform Die Shape Design Through Controlling Deforming Force in Metal Forging[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(12): 1496—1499.
- [58] 赵新海, 李剑锋, 黄晓慧, 等. 控制锻件变形均匀性和变形力的锻造预成形多目标优化设计[J]. 机械工程学报, 2000, 45(5): 193—197.
- ZHAO Xin-hai, LI Jian-feng, HUANG Xiao-hui, et al. Optimal Preform Die Shape Design Through Controlling Deformation Uniformity and Deforming Force in Metal Forging[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 45(5): 193—197.
- [59] KUSIAK J. A Technique of Tool-shape Optimization in Large Scale Problems of Metal Forming[J]. Journal of

- Materials Processing Technology, 1996, 57(1/2): 79—84.
- [60] 杨知硕, 刘东, 罗子健, 等. 复杂锻件的坯料预成形优化设计方法[J]. 热加工工艺, 2012, 41(11): 119—123.
YANG Zhi-shuo, LIU Dong, LUO Zi-jian, et al. Optimum Design Approach for Preform of Complicated Forging Blank[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(11): 119—123.
- [61] THIYAGARAJAN N, GRANDHI R V. Multi-level Design Process for 3D Preform Shape Optimization in Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170(1/2): 421—429.
- [62] 汤禹成, 周雄辉, 陈军. 基于神经网络响应曲面的预锻模具形状优化设计与在在在[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(4): 624—628.
TANG Yu-cheng, ZHOU Xiong-hui, CHEN Jun. The Optimum Preform Design and Redesign Based on Neural Network Response Surface Methodology[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2007, 41(4): 624—628.
- [63] TANG Y, ZHOU X H, CHEN J. Preform Tool Shape Optimization and Redesign Based on Neural Network Response Surface Methodology[J]. Finite Elements in Analysis Design, 2008, 44(8): 462—471.
- [64] 杨艳慧, 刘东, 贺子延, 等. 基于响应面法(RSM)的锻造预成形多目标优化设计[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 38(6): 1019—1024.
YANG Yan-hui, LIU Dong, HE Zi-yan, et al. Multi-objective Preform Optimization Using RSM[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 38(6): 1019—1024.
- [65] YANG Yan-hui, LIU Dong, HE Zi-yan, et al. Optimization of Preform Shapes by RSM and FEM to Improve Deformation Homogeneity in Aerospace Forging[J]. Chinese Journal Aeronautics, 2010, 23(2): 260—267.
- [66] WEI K, ZHAN M, FAN X, et al. Unequal-thickness Billet Optimization in Transitional Region During Isothermal Local Loading Forming of Ti-alloy Rib-web Component Using Response Surface Method[J]. Chinese Journal Aeronautics, Online, 2017.
- [67] CHUNG J S, HWANG S M. Application of a Genetic Algorithm to Process Optimal Design in Non-isothermal Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80/81: 136—14.
- [68] 罗仁平, 姚华, 彭颖红, 等. 预锻模形状设计优化的新方法-微观遗传算法[J]. 中国机械工程, 2001, 12(2): 202—204.
LUO Ren-ping, YAO Hua, PENG Ying-hong, et al. A New Approach to Preform Die Shape Design Optimization-micro Genetic Algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(2): 202—204.
- [69] 罗仁平, 姚华, 彭颖红, 等. 微观遗传算法在预锻模优化设计中的应用[J]. 锻压技术, 2000, 25(1): 52—54.
LUO Ren-ping, YAO Hua, PENG Ying-hong, et al. Preform Die Shape Design Optimization with Micro Genetic Algorithm[J]. Forging and Stamping Technology, 2000, 25(1): 52—54.
- [70] 王广春. 基于微观组织优化的锻造工艺预成形及毛坯形状优化设计[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(2): 61—64.
WANG Guang-chun. Shape Optimization Design of the Preform and Billet of the Forging Process Based on the Microstructure Optimization[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(2): 61—64.
- [71] 王广春, 管婧, 郭涛, 等. 面向微观组织优化的锻造工艺预成形优化设计及实验研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 69—72.
WANG Guang-chun, GUAN Jing, GUO Tao, et al. Preform Optimal Design and Experimental Study on the Microstructure in Forging Process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(2): 69—72.
- [72] KIM D J, KIM B M. Application of Neural Network and FEM for Metal Forming Process[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 2000, 40(6): 911—925.
- [73] KO D C, KIM D H, KIM B M, et al. Methodology of Preform Design Considering Workability in Metal Forming by the Artificial Neural Network and Taguchi Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80/81: 487—492.
- [74] KO D C, KIM D H, KIM B M, et al. Application of Artificial Neural Network and Taguchi Method to Preform Design in Metal Forming Considering Workability[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1999, 39(5): 771—785.
- [75] SHAO Y, LU B, OU H, et al. Evolutionary Forging Preform Design Optimization Using Strain-based Criterion[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71: 69—80.
- [76] SHAO Y, LU B, OU H, et al. A New Approach of Preform Design for Forging of 3D Blade Based on Evolutionary Structural Optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 51: 199—211.
- [77] 郭平义, 陆彬, 邵勇. 结合数值模拟与物理模拟实验的叶片锻造预成形拓扑优化设计研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(2): 461—467.
GUO Ping-yi, LU Bin, SHAO Yong. Optimal Design for Preform of Blade Forging by Topological Algorithm Combined with Numerical Simulation and Physical Experiment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(2): 461—467.
- [78] YANG C, NAGILE G. Preform Design for Forging and Extrusion Processes Based on Geometrical Resemblance[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(9): 1409—1423.
- [79] T. 阿尔坦. 陆索, 译. 现代锻造: 设备/材料和工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
ALTAN T. LU Suo, Translated. Modern Forging: Equipment, Material and Process[M]. Beijing: Defense Industrial Press, 1982.
- [80] 李云, 易幼平, 王少辉. 基于 Pro/ENGINEER 二次开发的筋板类锻件预成形设计[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(3): 12—17.

- LI Yun, YI You-ping, WANG Shao-hui. Preform Design of Rib-web Forging Based on Secondray Development of Pro/ENGINEER[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(3): 12—17.
- [81] 郭良刚, 杨合, 金坚诚. 环件径向轧制毛坯尺寸设计方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 1—9.
- GUO Liang-gang, YANG He, JIN Jian-chang. Design Method of Blank Sizes for Radial-axial Ring Rolling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 1—9.
- [82] BISWAS S K, KNIGHT W A. Preform Design for Close Die Forging: Experiment Basis for Computer Aided Design[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1975, 15(3): 179—193.
- [83] DUTTA A, RAO A V. Simulation of Isothermal Forging of Compressor Disc by Combined Numerical and physical Modeling Techniques[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 72(3): 392—395.
- [84] KIM Y J, CHITKARA N R. Determination of Preform Shape to Improve Dimensional Accuracy of the Forged Crown Gear Form in a Closed-die Forging Process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(3): 853—870.
- [85] KANG B S, LEE J H, KIM B M, et al. Process Design in Flashless Forging of Rib/web-shaped Plane-strain Components by the Finite Element Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 47(3/4): 291—309.
- [86] PARK J J, HWANG H S. Preform Design for Precision Forging of an Asymmetric Rib-web Type Component[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188: 595—599.
- [87] SHEU J J, YU C H. Preform and Forging Process Designs Based on Geometrical Features Using 2D and 3D FEM Simulations[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(3/4): 244—254.
- [88] 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, 2001.
- LIU Yu-li. 3D FEM Analysis of Forming Laws in Precision Forging Process of Blade[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001.
- [89] ZHAN Mei, LIU Yu-li, YANG He. Influence of the Shape and Position of the Preform in the Precision Forging of a Compressor Blade[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(1/2/3): 80—83.
- [90] 刘郁丽, 杨合, 詹梅. 摩擦对叶片预成形毛坯放置位置影响规律的研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(1): 97—100.
- LIU Yu-li, YANG He, ZHAN Mei. Research on Influence of Friction on Setting Position of Preform Billet in Precision Forming Process of Blade[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(1): 97—100.
- [91] 王晓娜, 李付国, 肖军, 等. 基于类等势场的粉末高温合金盘件预成形设计及有限元模拟[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 238—243.
- WANG Xiao-na, LI Fu-guo, XIAO Jun, et al. Preform Design and Finite Element Simulation of New-type P/M Auoer alloy Disk Based on Equipotential Field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 238—243.
- [92] WANG Xiao-na, LI F u-guo. A Quasi-equipotential Field Simulation for Preform Design of P/M Superalloy Disk[J]. Chinese Journal Aeronautics, 2009, 22(1): 81—86.
- [93] 蔡军, 李付国, 张鹏. 基于三维静电场的 TC4 合金叶片预制坯设计[J]. 航空材料学报, 2009, 29(5): 66—71.
- CAI Jun, LI Fu-guo, ZHANG Peng. Preform Design of TC4 Alloy Blade Based on 3D Electrostatic Fields[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(5): 66—71.
- [94] CAI Jun, LI Fu-guo, LIU T. A New Approach of Preform Design Based on 3D Electrostatic Field Simulation and Geometric Transformation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56(5/6/7/8): 579—588.
- [95] 张哈, 郑志镇, 李建军, 等. 高筋薄腹板类锻件三维预成形设计及优化[J]. 锻压技术, 2014, 39(2): 12—16.
- ZHANG Han, ZHENG Zhi-zhen, LI Jian-jun, et al. 3D Preforming Design and Optimization of Forging with High Rib and Thin Web[J]. Forging and Stamping Technology, 2014, 39(2): 12—16.
- [96] GUAN Y, BAI X, LIU M, et al. Preform Design in Forging Process of Complex Parts by Using Quasi-equipotential Field and Response Surface Methods[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79: 21—29.
- [97] TAO Y, ZHOU J, CAO, J, et al. Optimization Design Preform Billet Shape of 7050 Aluminum Alloy Giant Plane Forging Based on Electric Field Method and MBC Toolbox[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81: 231—240.
- [98] 夏玉峰, 田永生, 杨建兵, 等. 电场法在 7050 铝合金锻件预制坯设计中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 81—84.
- XIA Yu-feng, TIAN Yong-sheng, YANG Jian-bing, et al. Application of Electric Field in Preforging Design of 7050 Aluminum Alloy Forging[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 43(2): 81—84.
- [99] ZHANG D W, YANG H, SUN Z C, et al. A New FE Modeling Method for Isothermal Local Loading Process of Large-scale Complex Titanium Alloy Components Based on DEFORM-3D C[/ AIP Conference Proceedings 1252, New York, American Institute of Physics, 2010: 439—446.
- [100] ZHANG D W, YANG H. Preform Design for Large-scale Bulkhead of TA15 Titanium Alloy Based on Local Loading Features[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9/10/11/12): 2551—2562.
- [101] SUN Z C, YANG H. Forming Quality of Titanium Alloy Large-scale Integral Components Isothermal Local Loading[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2009, 34(1C): 35—45.
- [102] 孙念光, 杨合, 孙志超. 大型钛合金隔框等温闭式模

- 锻成形工艺优化[J]. 稀有金属与工程, 2009, 38(7): 1296—1300.
- SUN Nian-guang, YANG He, SUN Zhi-chao. Optimization on the Process of Large Titanium Bulkhead Isothermal Closed-die Forging[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(7): 1296—1300.
- [103] HAO N H, XUE K M, LYU Y. Numerical Simulation on Forming Process of Ear Portion of Upper Case[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1998, 8(4): 602—605.
- [104] 吕炎, 单德彬, 薛克敏, 等. 大型、复杂形状锻件等温精锻工艺的研究与应用[J]. 机械工人(热加工), 2000(2): 15—16.
- LYU Yan, SHAN De-bin, XUE Ke-min, et al. Research and Application on Isothermal Precision Forging Process of Large and Complex Forging[J]. Machinist Metal Forming, 2000(2): 15—16.
- [105] SHAN De-bin, HAO N H, LU Y. Research on Isothermal Precision Forging Processes of a Magnesium-alloy Upper Housing[C]// AIP Conference Proceedings 712, New York, American Institute of Physics, 2004: 636—641.
- [106] 张大伟. 钛合金复杂大件局部加载等温成形规律及坯料设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.
- ZHANG Da-wei. Forming Regulation and Preform Design of Large-scale Complex Titanium Alloy Component in Isothermal Local Loading Process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2012.
- [107] ZHANG Da-wei, YANG He. Loading State in Local Loading Forming Process of Large Sized Complicated Rib-web Component[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2015, 87(3): 206—217.
- [108] ZHANG Da-wei, YANG He, SUN Zhi-chao. Analysis of Local Loading Forming for Titanium-alloy T-shaped Components Using Slab Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(2): 258—266.
- [109] ZHANG Da-wei, YANG He. Metal Flow Characteristics of Local Loading Forming Process for Rib-web Component with Unequal-thickness Billet[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9/10/11/12): 1949—1965.
- [110] ZHANG Da-wei, YANG He. Numerical Study of the Friction Effects on the Metal Flow Under Local Loading Way[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5/6/7/8): 1339—1350.
- [111] ZHANG Da-wei, YANG He. Analytical and Numerical Analyses of Local Loading Forming Process of T-shape Component by Using Coulomb, Shear and Hybrid Friction Models[J]. Tribology International, 2015, 92: 259—271.
- [112] 张大伟. 钛合金筋板类构件局部加载成形有限元仿真分析中的摩擦及其影响[J]. 航空制造技术, 2017(4): 34—41.
- ZHANG Da-wei. Friction and Influence in FEM Simulation of Local Loading Process for Titanium Alloy Rib-web Component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(4): 34—41.
- [113] ZHANG Da-wei, YANG He. Fast Analysis on Metal Flow in Isothermal Local Loading Process for Multi-ribs Component Using Slab Method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(9/10/11/12): 1805—1820.
- [114] WEI K, YANG H, FAN X, et al. Unequal Thickness Billet Design for Large-scale Titanium Alloy Rib-web Components under Isothermal Closed-die Forging[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81: 729—744.