

综 述

多工位高速锻造工艺优化技术研究现状

吴彦骏, 赵震, 胡成亮, 高崇晖

(上海交通大学 模具 CAD 国家工程研究中心, 上海 200030)

摘要: 简要介绍了多工位高速锻造工艺及其特点, 阐述了基于有限元模拟的锻造工艺优化技术的发展现状, 并在此基础上根据多工位高速锻造工艺的特点, 阐明了多工位高速锻造工艺优化技术研究中存在的主要问题, 探索了多工位高速锻造工艺优化技术研究的方向。

关键词: 多工位; 高速锻造; 有限元模拟; 优化技术

中图分类号: TG316.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2009)02-0044-04

**Research Status Review on Optimization Technology
of Multi-station High Speed Forging Process**

WU Yan-jun, ZHAO Zhen, HU Cheng-liang, GAO Chong-hui

(National Eng. Research Center of Die & Mold CAD, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: Multi-station high speed forging process is a kind of advanced near net-shape forging process. The forging process and its feature are briefly introduced in this study. Development status on optimization technology of forging process based on finite element simulation is discussed. Based on the development status and feature of multi-station high speed forging process, main problems about the optimization technology of multi-station high speed forging process are given, and the guideline of this optimization technology is pointed out.

Key words: multi-station; high speed forging process; finite element simulation; optimization technology

多工位高速锻造是一种先进的锻造成形新技术, 在国外发达国家已得到广泛应用。随着我国汽车等装备制造业的快速发展, 锻件在汽车、工程机械中的使用量越来越大, 锻件生产向着复杂、精密、大批量、多品种和交货期短的方向发展。国内企业通过引进多工位锻造设备来应用该项技术生产精密锻件, 然而相关的工艺及模具设计大多依靠国外的设备制造商, 自主研发能力较弱。与传统的单工位多工序锻造不同, 多工位高速锻造工艺因高速成形、高速传递以及

材料加工硬化的滞后效应减少了热处理工序, 减少了设备, 节省了能源、场地与人员, 是一种节能减耗的先进成形技术。其工艺和模具的设计理念与一般的锻造工艺及模具设计存在很大的差别, 较单工位多工序锻造的工艺要复杂得多。传统的基于设计者经验的“设计-试模-再设计”的“试错法”设计模式, 很难得到十分合理的设计方案, 需要反复修改工艺和模具才能生产出合格的产品, 造成资源和时间的浪费, 无法适应现代生产的要求。如何根据多工位高速锻造工

收稿日期: 2009-05-06

作者简介: 吴彦骏(1981-), 男, 浙江义乌人, 博士生, 主要从事多工位高速锻造工艺智能设计与优化等方面的研究工作。

艺特点,快速高效地完成多工位高速锻造工艺优化设计,是目前迫切需要解决的问题。

1 多工位高速锻造工艺及特点

多工位高速锻造工艺,通过高速剪切下料来保证毛坯的表面质量和精度,各工位间以机械手夹钳自动送料,可调机械手可以把任意形状的工件很好地夹持并在恰当的时间传送到下一工位,在同一台机床上完成多个工位间高速传递和锻造成形,获得了各类精密锻件。主要包括以下几类:外径为圆形或接近圆形(如六角、正方)的带孔锻件,如齿轮、轴承环、螺母等;轭形锻件,如转向联轴节、连杆盖;非回转体法兰锻件和带爪锻件,如万向节凸缘、十字轴;大高度复杂挤压锻件,如法兰轴套类锻件,如图1所示。



图1 多工位高速锻造工艺适用锻件(由 HATEBUR 公司提供)

Fig.1 Products produced by high-speed multi-station forging (picture provided by HATEBUR)

多工位高速锻造工艺具有以下特点^[1]。

1) 料损只有原材料的料头和冲孔料芯,其中料头约为毛坯质量的2.5%~5.5%,冲孔料芯约为毛坯质量的3%~10%,材料利用率高;

2) 锻件加工余量、公差及模锻斜度都比较小,锻件精度高;

3) 班产小时平均生产率为1800~3000件/h,约为普通压力机的5倍,自动化程度和生产率高;

4) 一般热锻的凹模寿命为5万~10万件,凸模为3万~5万件,模具寿命高。

2 基于有限元模拟的锻造工艺优化技术的发展现状

有限元模拟可仿真金属锻造成形的过程,获取

应力应变场、载荷曲线和填充情况,并能预测折叠等成形缺陷,已成为锻造工艺设计分析强有力的工具。Shiau等^[2]对多工位模锻工艺进行了有限元模拟,并根据模拟结果建立数学模型来控制成形过程。Kim等^[3]用有限元法对H型截面锻件进行预成形设计,取得了满意的预成形形状。Kang等^[4]用有限元法进行了多工位冷锻工艺设计。随着优化理论与方法的发展,一些嵌入优化算法的工艺设计方法被相继提出,其中基于灵敏度分析的优化方法引起了广泛关注。Badrinarayana等^[5]提出适用于弹塑性大变形的灵敏度分析方法,并用于优化圆柱体锻粗的预锻毛坯形状以消除鼓形缺陷。Fourment等^[6]采用B样条曲线描述预锻模具形状,将B样条的控制点坐标作为优化设计变量。Gao等^[7]使用基于灵敏度分析的优化方法,对涡轮圆盘等非温锻造过程进行了锻造工艺过程中锻件的微观组织优化。赵国群以变形后组织均匀和少、无飞边为优化目标,建立灵敏度方程,对圆盘件锻造成形进行了优化设计^[8]。赵新海等^[9-10]提出了新的无量纲的锻件形状子目标函数和变形均匀性子目标函数,给出了总目标函数和各子目标函数的表达形式,详细推导了各目标函数相对于优化设计变量的灵敏度,应用该方法对H形锻件进行了预成形优化,取得了良好的效果。

对于复杂零件,基于灵敏度分析的优化方法在实际应用时,目标函数与优化变量之间的灵敏度方程推导困难,很难进行数学描述;灵敏度信息一般都针对特定目标函数,并假定目标函数和约束函数是连续光滑的,该假设条件实际较难满足;灵敏度计算代码需嵌入有限元程序,而一般商业有限元软件不支持修改核心源码。Kusiak等^[11]提出了一种基于通用有限元分析软件的锻造工艺优化方法,该法将优化算法和有限元算法分开,采用非梯度优化算法,利用有限元程序模拟的结果,以终锻件的奥氏体晶粒均匀分布为目标,通过优化两工序模锻工艺预成形模具形状来得到组织均匀的最终零件。

根据将优化算法和有限元算法分开思想,ROY等^[12]将遗传算法与有限元模拟软件结合应用于汽车零件多工序冷挤压工艺的优化。JO等^[13]采用贝塞尔曲线来描述模具的形状,通过优化贝塞尔曲线上的控制点来控制模具形状,来获得微观组织均匀分布的热锻终成形件。Chung等^[14]对H形锻件预锻模用集成有限元模型表示优化目标和优化变

量,并将遗传算法用于优化,取得了良好的优化效果。罗仁平等^[15]以获得变形尽可能均匀和少、无飞边的锻件为目标,用遗传算法对锻造预成形进行优化设计。

为减少优化过程中调用有限元程序计算目标函数值的次数,近年来,基于试验设计技术的近似响应模型得到了迅速发展^[16]。基于近似模型的优化技术,利用已有工艺设计的有限元模拟结果建立自变量与响应值之间的关系,并通过此关系模型找到最优的工艺参数。Berti等^[17]在响应曲面法的基础上建立了热锻模具寿命评估模型并分析了热锻工艺参数对于模具寿命的影响。Repalle等^[18]运用响应曲面法建立了关键工艺参数与终锻件应变分布之间的关系,并以某汽车零部件为例,结合优化算法求得最佳工艺组合。陈学文等^[19]应用正交试验对整个设计空间进行探索,再用二次响应曲面模型对设计样本进行近似建模,优化时在初始点附近构建子空间,应用序列二次规划算法在子空间内进行寻优计算,并用信赖域系数评价近似模型的近似程度,调整子空间和近似模型,逐步逼近最优解。

结合知识工程与系统开发技术,Rowe等^[20]开发了基于有限元模拟的锻造工艺设计系统,对新设计用有限元软件进行模拟,并将成功结果作为知识添加到知识库中,实现知识的重用。Im等^[21]应用锻造模拟软件和商业CAD软件构建冷锻设计系统,通过应用模板、设计知识库和设计规则等,系统自动完成冷锻成形工艺工序设计和详细设计,并利用模拟软件修正设计过程。Yang等^[22]开发了包括专家系统、FEA有限元程序和CAD接口模块的锻造工艺智能设计与分析系统,强大的数据库和智能用户界面使得即使不了解有限元和其他相关知识的设计者也能很好地应用此系统完成锻造工艺设计。Kim等^[23]开发了针对热锻件和冲压件的计算机辅助工序设计系统,系统包含有限元校验模块用于校验设计结果,设计者不需要太多经验就可进行热锻件和冲压件的工序设计。Aziz^[24]等开发了一套基于知识的正齿轮精锻模具智能设计优化系统。借助基于特征的参数模型,结合知识库,完成正齿轮的预成形形状和成形工艺的设计,利用有限元模拟结果,优化中间工序的模具形状,降低成形全过程的载荷,实现成形工艺的柔性再设计。左旭等^[25]提出了基于知识的、集成工具化的汽车锻件模具设计仿真系统。

系统包括工件与模具几何造型模块、工艺设计模块、有限元分析模块和设计及修改模块,用专家系统将这些模块集成,实现各模块间的数据和信息通讯。陈学文等^[26]通过参数化设计实现设计变量与CAD模型的对应关系,并通过有限元模型模板,实现CAD软件SolidWorks与有限元软件DEFORM的集成,开发了锤上模锻工艺设计支持系统。

3 多工位高速锻造工艺优化技术研究中存在的问题

综上所述,众多研究人员对锻造工艺优化技术进行了探索和研究,取得了大量的研究成果,并先后开发了适用于不同零件的锻造工艺设计系统。研究结果一致表明,将优化方法与有限元模拟结合,可以提高锻件质量,提高设计效率,降低生产成本;对多工位高速锻造工艺优化问题的研究很少。目前多工位高速锻造工艺优化技术研究主要存在以下问题。

3.1 建立多工位高速锻造工艺的优化模型

与单工位锻造工艺不同,多工位高速锻造工艺除了降低载荷、充填饱满和无成形缺陷等要求外,还必须考虑各成形工位的载荷平衡和压力机在各工位上的承载能力。多工位高速锻造的工位通常数为37个,必须考虑描述两个及以上成形工位相关性。采用多工位高速锻造技术生产的精锻件形状各异,许多零件在有限元模拟时不能作二维简化,而目前针对三维复杂零件锻造工艺优化的研究并不多。因此,多工位高速锻造工艺优化是典型的多设计变量、多目标、多约束的复杂问题,如何根据此特点建立准确的优化模型是进行多工位高速锻造工艺优化设计的前提。

3.2 提高多工位高速锻造工艺的优化效率

基于有限元模拟的锻造工艺优化通常需要大量的时间。每次有限元模拟计算需要时间,对多工位高速锻造工艺而言,一次全过程模拟花费的时间则更多,优化过程中常需要多次调用有限元程序进行模拟计算,工艺优化效率问题表现更为突出。面对激烈的市场竞争,如果工艺优化花费的时间过长,则很难与高速生产相匹配、满足实际需要。因此,需要在保证精度的前提下,研究高效的优化策略并探寻

合理的优化流程,以实现多工位高速锻造工艺的优化设计。

3.3 开发智能化自动化的工艺集成优化系统

目前尚未有成熟的针对锻造工艺优化的 CAD/CAE 集成系统推向市场,在优化锻造工艺的过程中,多数情况下 CAD 和 CAE 软件只是离散使用, CAD 与 CAE 软件之间的数据交换, CAE 分析结果的提取和反馈,以及优化算法中数据的获取与映射等工作仍需设计人员手动完成,有限元建模等重复性工作量大,而且对于设计人员的要求也相应提高,需要设计人员能同时熟练掌握 CAD 与 CAE 软件。因此开发智能化自动化的工艺优化集成系统是多工位高速锻造工艺优化技术应用的要求。

4 结语

高质量、高效率 and 低成本是现代制造业追求的目标,随着我国汽车等装备制造业的不断发展,汽车锻件的标准化程度越来越高,多工位高速锻造成形技术必然会得到更为广泛的应用。多工位高速锻造工艺及模具的设计理念与一般的锻造工艺及模具设计存在很大的差别,采用传统的依靠经验和试错法修改的设计方式不仅周期长而且很难得到最佳设计方案。因此,多工位高速锻造工艺优化技术研究是先进成形技术领域的重要课题之一。

多工位高速锻造工艺除了降低载荷、充填饱满和无成形缺陷等要求外,还需充分考虑各成形工位的载荷平衡,压力机在各工位上的承载能力,两个及以上成形工位相关性,以及每次全过程模拟计算时间过长等问题,其工艺优化属于多设计变量、多目标、多约束的复杂优化问题。如何根据这些特点,建立准确的优化模型,研究高效的优化方法,探寻合理的优化流程,开发智能化自动化的工艺集成优化系统,是多工位高速锻造工艺优化技术的主要研究方向。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会. 锻压手册(锻造)[M]. 第3版. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [2] SHIAU Y C, KOBAYASHI S. Finite Element Analysis of Three-dimensional Multistage Forming Operations [J]. AMD, 1987, 88:193-198.
- [3] 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.
- [4] KANG B S, LEE J H. Process Design in Multi-stage Cold Forging by the Finite-element Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 58:147-183.
- [5] BADRINARAYANAN S, ZABARAS N. Sensitivity Analysis for the Optimal Design of Metal-forming Processes [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 129(4):319-348.
- [6] FOURMENT L, CHENOT J L. Optimal Design for Non-steady-state Metal Forming Process- I Shape Optimization Method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(1):33-50.
- [7] GAO Z, GRANDHI R V. Microstructure Optimization in Design of Forging Processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(5):691-711.
- [8] 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.
- [9] 赵新海,赵国群,王广春,等. 锻造预成形多目标优化设计的研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(4):62-65.
- [10] 赵新海,虞松,赵国群,等. 控制形状和变形的锻造预制坯多目标优化设计[J]. 山东大学学报, 2004, 34(4):88-90.
- [11] KUSIAK J. Technique of Tool-shape Optimization in Large Scale Problems of Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 57(1-2):79-84.
- [12] ROY S, GHOSH S, SHIVPURI R. A 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.
- [13] JO H H, LEE S K, KO D C, et al. A Study on the Optimal Tool Shape Design in a Hot Forming Process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1-3):127-131.
- [14] CHUNG J S, HWANG S M. Process Optimal Design in Forging by Genetic Algorithm[J]. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 2002, 124(2):397-408.

(下转第71页)

4 实际生产

根据模拟结果,确定了中心楔块的锻造工艺和锻模设计。实际试制生产非常成功,与模拟结果基本吻合。现在已进入批量生产阶段。实际锻件,如图10所示。



图10 实际生产的中心楔块

Fig.10 Center Wedge in Actual Production

5 结语

利用先进的有限元数值模拟软件模拟锻件成形,优化锻造工艺和锻模设计,在终锻前合理地对材料进行分配,对复杂锻件的锻造成形非常重要。可提高锻件质量,有效缩短开发周期,降低成本。

参考文献:

- [1] 王仲仁,皇甫骅. 锻压手册(锻造)第一卷第2版[M]. 北京:机械工业出版社,2002: 277-280.
- [15] 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,2002,13(2):202-204.
- [16] MYERS R H, MONTGOMERY D C. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments [M]. J Wiley, 2002.
- [17] BERTI G A, MONTI M. Thermo-mechanical Fatigue Life Assessment of Hot Forging Die Steel [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2005, 28(11): 1025-1034.
- [18] REPALLE J, GRANDHI R V. Design of Forging Process Variables under Uncertainties [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005,14(1): 123-131.
- [19] 陈学文,王进,陈军,等. 基于最小损伤值的齿轮毛坯锻造成形过程工艺参数优化设计[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(7): 42-44.
- [20] ROWE G W. Intelligent Knowledge-based System to Provide Design and Manufacture Data for Forging [J]. Computer-Aided Engineering Journal, 1987, 4(1): 56-61.
- [21] M C S, SUH S R, LEE M C, et al. Computer Aided Process Design in Cold-former Forging Using a Forging Simulator and a Commercial CAD Software [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 95(1-3): 155-163.
- [22] YANG D Y, IM Y T, YOO Y C, et al. Development of Integrated and Intelligent Design and Analysis System for Forging Processes [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2000, 49(1): 177-180.
- [23] KIM M S, CHOI J C, KIM Y H, et al. An Automated Process Planning and Die Design System for Quasi-axisymmetric Cold Forging Products [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 20(3):201-213.
- [24] AZIZ E S, CHASSAPIS C. Development of Process Optimization for an Intelligent Knowledge-based System for Spur Gear Precision Forging Die Design [C]. Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference. 2004: 313-320.
- [25] 左旭,卫原平,阮雪榆. 基于知识的、集成工具化的汽车锻件模具设计过程的仿真思想 [J]. 计算机工程与设计,1998(1):22-26.
- [26] CHEN X W, ZUO S Y, CHEN J, et al. Research of Knowledge-based Hammer Forging Design Support System [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 27(1-2): 25-32.

(上接第47页)