

锻造工艺有限元数值模拟应用分析

李晓飞*

庆安集团有限公司, 陕西 西安 710077

摘要: 对有限元模拟系统的组成、发展及各种商业用锻造模拟软件的优点进行了介绍, 简单阐述了 QFORM-V7 有限元模拟软件的原理和使用范围; 利用三维制图软件 CATIA V5 和 QFORM-V7 模拟软件对一些典型锻件的缺陷进行了数值模拟, 对缺陷产生的原理做出了合理的解释, 并提出了改进方案; 模拟结果对实际生产具有较高的参考价值。
关键词: 有限元, 原理, QFORM-V7, 数值模拟

Forging Process Application of Finite Element Numerical Simulation Analysis

Li Xiaofei

Qing'an Group CO. LTD., Xi'an 710077, China

Abstract: The composition and development of finite element simulation and all kinds of business with the advantages of forging simulation software are introduced. Simply expounds the principle of the finite element simulation software QFORM-V7 and use range. Use of 3D graphics software CATIA and simulation software QFORM-V7 to some typical forging defects are simulated. Has made a reasonable explanation to the principle of defects, and put forward the improvement plan. The simulation results of actual production have higher reference value.

Key words: finite element, QFORM-V7, numerical simulation

引言

有限元法是随着计算机技术的发展而出现的一种有效的离散数值计算的方法, 目前在很多领域得到了广泛的应用。从力学领域发展到电磁学、热传导、流体力学和材料科学等领域, 在金属塑性成形领域的应用也得到迅速而深入的发展。我国长期以来, 在塑性成形领域的工艺设计和产品生产都一直采用试生产—工艺参数修正—再试生产的循环迭代的试错方法和经验判断的方式进行。这种传统的方法迄今积累了许多宝贵的经验数据和公式。但是, 随着信息化时代的迫近, 制造全球化与贸易自由化进程的加快, 激烈的市场竞争使得产品的更新更加频繁, 开发的周期越来越短, 使用的新材料更加难

以加工, 用于进行实验研究的时间被大大缩短。如果采用传统的设计方法, 工艺和模具设计的质量和周期很难保证, 因此需要采用有效的研究方法和手段对上述问题进行系统、精确的分析。

近年来, 随着计算机技术的不断进步和有限体积分法的完善和发展, 使得锻造成形过程的计算机模拟成为可能, 并越来越广泛地应用于实际。例如, 通过锻造过程中的金属流动的模拟, 预测金属坯料在模腔中的充填情况, 通过对变形量的控制可得到预期的晶格变形和内部微观结构, 使零件具有良好的性能, 还可以通过改变模具参数使模具的受力更为合理, 提高模具寿命。这些工作都可以在制造模具之前进行, 因此可以减少研制时不必要的人力、物力、财力耗费, 缩短模具制造周期, 降低试制成本。

采用数值模拟具有普遍性、快捷性和准确性。该

* 李晓飞, 1980 年生, 男, 学士, 高级工程师; 研究方向: 材料成型及控制工程。Tel: 029-84636101;
E-mail: 1149803956@qq.com。

方法可以在计算机上虚拟实现成形并反复演示、计算和优化,还可以得到大量任一时刻的变形数据,这是其他手段所无法比拟的。金属塑性成形过程是一个非常复杂的变形过程,材料特性、温度条件、摩擦条件、润滑情况、坯料形状及尺寸和模具形状等因素对变形过程都有一定的影响。这些因素及其作用是塑性加工研究的主要对象。金属塑性成形过程研究的主要任务是结合金属材料的特征,分析金属塑性成形过程中的应力、应变场以及变形条件等因素对变形的影响,在此基础上充分了解和掌握成形规律,从而为解决塑性加工中出现的各种实际问题,确定最佳工艺参数,高效低耗地获得优质产品提供科学依据。

1 有限元模拟系统分析

1.1 有限元模拟系统的组成

成形过程模拟系统的建立就是将塑性有限元、金属塑性成形工艺、计算机图形处理等相关理论和技术进行有机结合的过程。按照实施成形过程模拟的流程(如图1),模拟系统的功能大致可分为前置处理(Pre-processing)部分、有限元求解(Simulation)部分和后置处理(Post-processing)部分。其中,前置处理部分和后置处理部分又是建立在计算机图形处理系统(或平台)的基础之上。

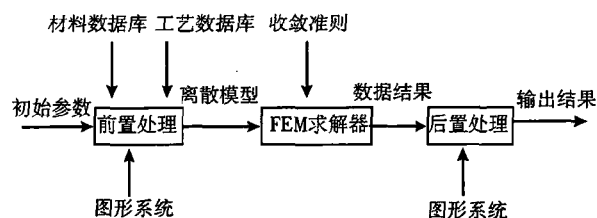


图1 有限元分析过程流程图

1.2 有限元模拟系统的发展

有限元分析技术是最重要的工程分析技术之一。规范应用于弹塑性力学、断裂力学、流体力学、热传导等领域。有限元方法是20世纪60年代发展起来的数值计算方法,是计算机时代的产物,遍及宇航工业、机电、化工、建筑等多个领域。早在20世纪70年代就有人提出:有限元法在产品结构设计中的应用使机电产品设计产生革命性的变化,理论设计替

代了检验类比设计。目前,有限元法仍在不断发展,理论上不断完善,各种有限元分析程序包的功能越来越强大,越来越方便。

近15年为有限元分析软件的商品化发展阶段,有限元分析软件的功能、性能,特别是用户界面和前、后处理功能,进行了大幅度扩充;软件的部分结构和部分软件模块,特别是数据管理和图形处理部分,进行了重大的改造。目前市场上知名的有限元分析软件在功能、性能、可靠性以及对运行环境的适应性方面,基本满足了用户当前的需求,这些有限元分析软件可以在超级并行机,分布式微机群,大、中、小各类计算机和各种操作系统平台上运行。应用于体积模拟成形的商用软件主要有美国的DFEORM和MARC/Auto forge、法国的FORGE3以及俄罗斯的QForm等,这些软件以其友好易用的界面和可靠的性能在世界各地的科研院所及生产企业中得到广泛应用。

与金属塑性成形问题的其他分析方法相比,大量分析研究表明,塑性有限元法功能更强、精度最高、解决问题的范围最广,其主要优点有:

(1) 适合于分析各类金属塑性成形过程,不受具体成形问题的限制。

(2) 能够较全面考虑多种因素对成形过程的影响,如温度、摩擦润滑条件、材料特性、变形速度及模具几何形状等。

(3) 能够获得有关成形过程的多方面信息,如成形力、应力、应变和温度场的分布,金属的塑性流动规律等,这些信息为加工工艺过程的优化和控制提供了参考。

(4) 在计算机上模拟成形的全过程,并可反复演示、计算和优化,在开模之前就能够预测成形过程中可能出现的缺陷,并通过对影响参数的修改,消除可能出现的缺陷,从而节约昂贵的试模、修模费用,在保证工件质量、减少材料消耗、提高生产率以及缩短生产周期等方面具有显著的优越性。

有限元模拟在成形中的应用是近十几年来各种有关成形的国内和国际会议的重要论题。毋庸置疑,三维模拟是锻造成形模拟未来的发展方向,随着计算机技术和有限元技术的发展,三维模拟将在工业生产中得到越来越广泛的应用。

2 QEFORM 有限元模拟在生产中的应用

本文采用CATIA V5R18进行有限元模拟三维造

型,以 QEFORM-V7 为工作平台,完成对厂内零件锻造成形工艺的模拟分析和参数优化。

2.1 降低某杠杆锻件缺陷产生率有限元模拟

有限元模拟锻件图如图 2,锻件结构为两头大,中间连杆部分较细小,分模面为曲面分模,且一头弯曲;锻造难度在于高度落差大的两个头部不易充满模腔,且由于曲面分模造成锻件错移量不易保证。该杠杆锻件的原锻造工艺是通过 3 或 4 遍反复锻造才能成形,有时锻 4 遍后,在锻件的弯头处仍不能充满模腔。这样的锻造工艺不仅使锻件产生大量的氧化皮,造成非加工表面出现较深的氧化皮凹坑,而且不均匀的金属流动使得模具受力不均匀,导致模具寿命下降。

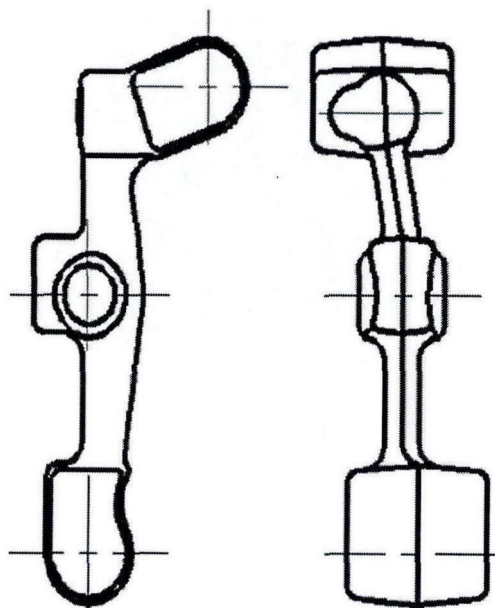


图2 锻件结构简图

为了降低锻造次数,提高锻件表面质量、模具寿命,故优化锻造工艺为:下料、制坯、锻造、切边。制坯主要为先成形弯曲角度,使用制坯与终锻集于一体的模具,如图 3 所示。

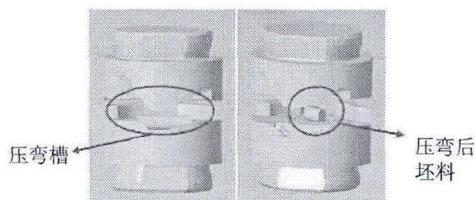


图3 优化结构后的模具

2.1.1 模拟参数选择

(1) 不考虑模具变形,模具类型选刚性,模具预热温度为 300℃。

(2) 由于软件材料库中无 1Cr12Ni3MoVN,所以模拟材料选接近材料,选择锻造初始温度为 1200℃。

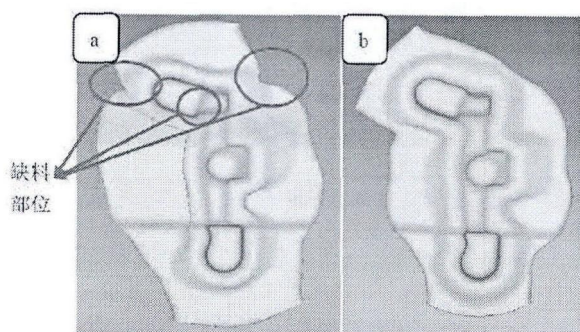
(3) 坯料网格数由系统自动划分,在计算过程中网格畸变超过 0.4 进行网格自动重新划分,以保证计算的精度和收敛性。

(4) 摩擦类型选择剪摩擦模型,摩擦系数设置为 0.3,坯料与空气和模具的热交换系数分别设置为 0.02 和 5N/sec/mm/C。

(5) 依据实际生产条件,选择设备为 300T 摩擦压力机。

2.1.2 模拟结果

图 4 为原工艺与优化工艺模拟结果的对比图,从图中可以看出:原工艺在弯曲处的头部及飞边部位缺肉,而优化工艺中不仅锻件完全充满模腔,而且飞边分布非常均匀。图 5 为锻件等效应力应变分布云图,从图中可以看出原工艺方案最大应力为 271MPa,在型腔多个部位出现应力集中(圈出部位);最大应变为 5.02,在杆部及头部拐弯内侧存在最大应变区(圈出部位);优化后工艺方案最大应力为 186MPa,最大应力比方案一降低 31.6%,应力集中区域不明显;杆部和头部拐弯处等效应变得到明显改善,最大应变为 3.3,比方案一减少 34%;说明变形程度减少,能起到延缓模具变形的作用。

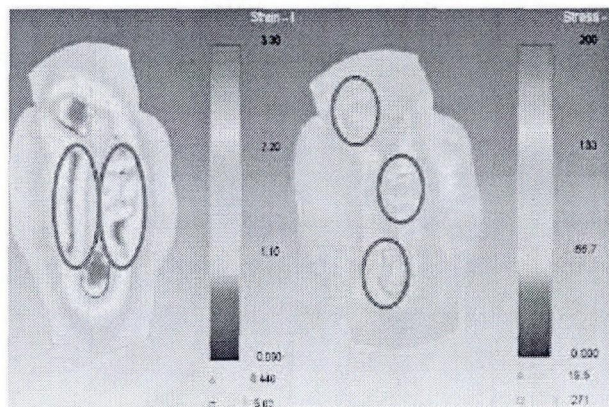


(a) 原工艺模拟成形图 (b) 优化工艺模拟成形图

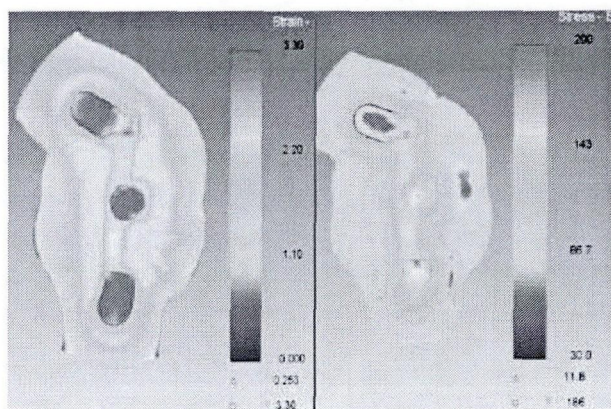
图4 模拟充满情况对比

2.1.3 生产验证

按模拟方案进行锻造模具设计,并进行锻造试制。图 6 为试制锻件的实际图片,从图中可以看出,实际锻造结果与模拟结果相似——在杠杆的弯曲头部锻件明显已充满,且锻件毛边分布比较均匀。



(a) 原工艺方案



(b) 优化工艺方案

图5 锻件等效应力应变分布云图

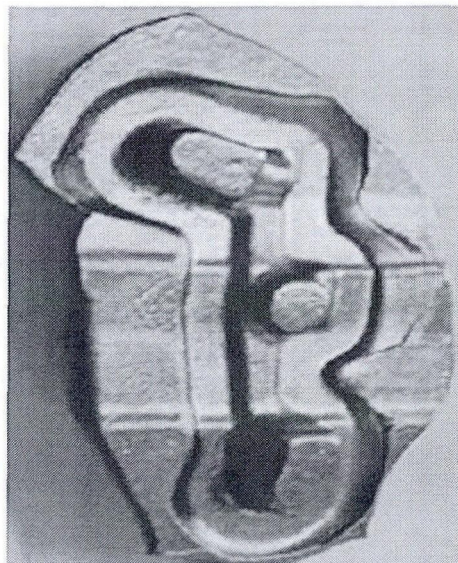


图6 工艺优化后锻件

2.2 提高某盖板锻件模具寿命有限元模拟

图7所示为某航空用发动机外筒端盖锻件,由于外形较复杂、截面变化大,所以成形难度大,模具寿

命低。工艺改进前在报废了4套模具的情况下仅仅交付了72件合格锻件。模具报废的原因均为模腔发生严重屈服变形,且产生裂纹,导致锻件尺寸严重超出工艺要求范围而无法继续生产。

通过工艺分析认为锻件易变形部位(分模面处)最窄尺寸为30,工艺改进前用 $\phi 50$ 的棒料直接锻造成型,型腔分模面处不仅有向下的压力 F_1 ,还有向外的挤压力 F_2 [图8(a)所示],挤压力 F_2 造成模具局部应力集中而屈服变形。如果将棒料压扁至29.5,然后直接立直放入型腔,向外的挤压力 F_2 已被整个分型面均匀承受,不存在局部应力集中[图8(b)所示],则模具型腔局部剧烈变形的情况得到控制。

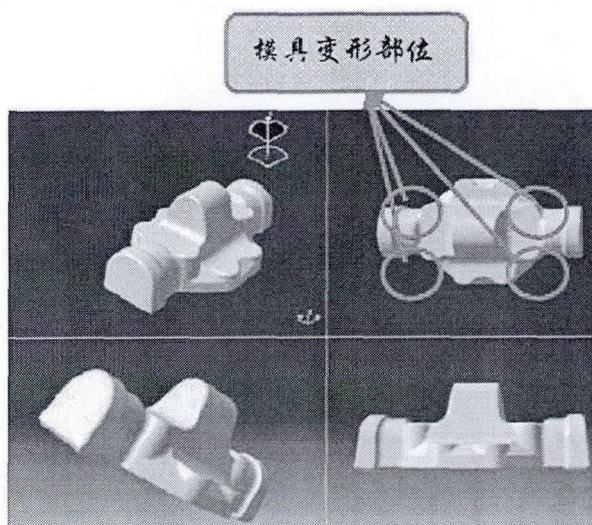


图7 某盖板锻件图

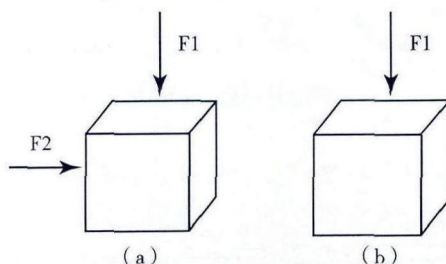


图8 某盖板锻件受力分析

2.2.1 模拟参数选择

(1) 不考虑模具变形,模具类型选刚性,模具预热温度为 300°C 。

(2) 模拟材料选接4340钢,选择锻造初始温度为 1200°C 。

(3) 坯料网格系统自动划分,在计算过程中网

格畸变超过 0.4 进行网格自动重新划分, 以保证计算的精度和收敛性。

(4) 摩擦类型选择剪摩擦模型, 摩擦系数设置为 0.3, 坯料与空气和模具的热交换系数分别设置为 0.02 和 5N/sec/mm/C。

2.2.2 模拟过程及结果

在模拟时, 先模拟制坯过程将棒料压扁到 $29.5 \pm 0.3\text{mm}$, 如图 9 (a), 再把模拟结果导入到终锻模具中进行最终模拟, 如图 9 (b) 所示。

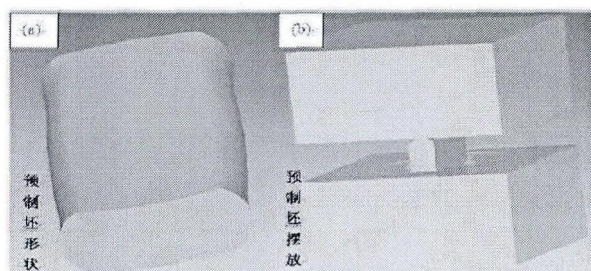
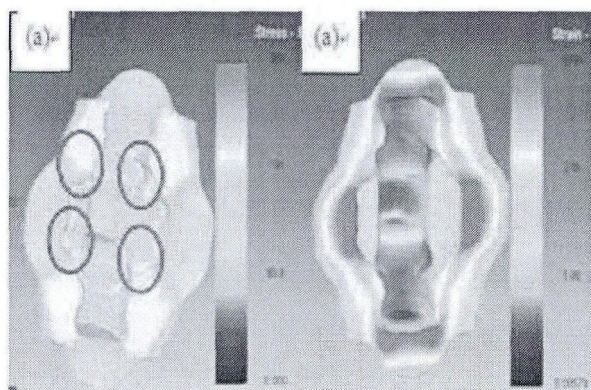
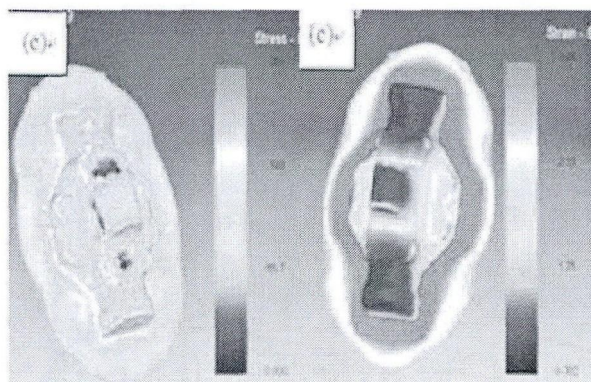


图 9 预制坯料及坯料放置示意图

图 10 为原工艺与优化工艺模拟结果的对比图, 从图中可以看出: 原工艺方案锻件在分模面处所受的等效应力最大 (圈出部位), 这是由于该部位受到



(a) 原工艺方案



(b) 优化工艺方案

图 10 锻件等效应力应变分布云图

了三种压应力的作用 (即毛边桥阻力、向下的载荷力以及模具的反压力); 最大等效应力为 280MPa, 而改进后的最大等效应力仅为 133MPa, 减少 52.5%, 这是由于扁的坯料形状使得金属减少了向下流动所需的力而导致。应变是由载荷、温度和速度引起的物体局部相对变形。从等效应变图可以看出, 原工艺方案锻件的应变呈梯度变化——应变从顶端到分模面处逐渐增加, 在毛边与锻件连接处达到最大, 即此处的变形程度最大, 同时, 该处的应变速率也大, 反映出变形在这一区域发生较快; 而改进后的方案锻件在毛边处的变形程度较均匀。

2.2.3 生产验证

将优化后的锻造工艺方案进行了试生产验证, 通过试生产和 3 批锻件的批量生产, 模具寿命由原来的 17 件/套增加到 500 件/套, 取得了很好的效果, 实践证明数值模拟能极大缩短工艺改进周期, 节约成本, 并且模拟结果对现场生产有很强的指导作用。

3 结论

(1) 通过模拟优化的锻造工艺方法及参数, 可以解决不同类型锻件出现的折迭、裂纹、充型困难、模具寿命低等多种锻造问题, 极大缩短了工艺优化后的试制周期, 并减少了不必要的工艺验证次数, 为生产保驾护航。

(2) 通过数值模拟可以对锻造工艺方案的好坏进行量化, 通过应力、应变场, 温度场, 流动场等的分析, 为工艺方案的整体改进指明了方向; 数值模拟再现了金属的流动过程, 对实际生产起到了一定指导作用。

(3) 数值模拟技术发展已比较成熟, 利用好这一技术, 可以达到提高设计质量、缩短研制周期、提高材料利用率、降低能耗及成本等目的。

参考文献

- [1] 谢懿. 实用锻压技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 王以华. 锻模设计技术及实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] 汪星莹, 等. 缸头模锻成形过程数值模拟 [J]. 锻压技术, 2012, 37 (1): 158-161.
- [4] 吕彦明, 等. 基于数值模拟的汽轮机叶片锻模设计 [J]. 金属铸锻焊技术, 2011, 40 (21): 194-198.

- [5] 李晓冬, 等. 铝合金控制臂模锻成形工艺设计及数值模拟 [J]. 模具技术, 2011 (6): 36-40.
- [6] 张会. 铝合金连杆锻造工艺设计及模拟研究 [J]. 铸造技术, 2011, 32 (6): 871-875.
- [7] 陈春, 易幼平, 李蓬川. 23Co13Ni11Cr3Mo 超高强度钢模锻件锻造工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (17): 15-18.
- [8] 袁国栋, 等. 推拉杆成形工艺分析及数值模拟 [J]. 大型锻铸件, 2011 (3): 1-5.
- [9] 徐戊娇, 等. 斜齿伞齿轮精锻成形工艺研究 [J]. 锻压技术, 2012, 41 (3): 58-60.
- [10] 栗育琴, 张安明. 基于 Deform 的温挤压模具塑性变形失效分析 [J]. 锻压技术, 2011, 36 (6): 141-145.
- [11] 廖国防, 易幼平, 黄始全. 高筋铝合金航空接头锻件成形工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2011, 40 (17): 78-81.
- [12] 冯文杰, 宋敏敏, 陈莹莹. 摩托车启动齿预制坯锻挤复合成形工艺研究 [J]. 锻压技术, 2011, 36 (4): 23-25.
- [13] 张玉勋, 等. 铝合金机轮轮毂锻造流线仿真与实验研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2011, 42 (7): 1968-1972.