# 有限元模拟技术在航天钣金成形中的应用

白金鑫 李旭东 朱 达 (首都航天机械公司,北京 100076)



摘要:以典型的盒类零件为研究对象,以板料三维成形分析软件 PAM-STAMP 2G 为 平台,研究了板料与凸模、凹模的摩擦力、压边力等因素对成形的影响。通过 PAM-STAMP 2G 的成形仿真,预测了板料成形过程中减薄、拉裂、起皱等缺陷,同时分析了缺陷产生 的原因,进而优化板料成形工艺参数和改进模具结构。 关键词:有限元模拟;钣金成形;冲压;优化

## Application of Finite Element Simulation Technology in Aerospace Formation of Sheet Metal

Bai Jinxin Li Xudong Zhu Da (Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

**Abstract:** Taking the typical box parts as the objects, the influence of factors like friction between sheet metals, punches and die, and blank holder force, on the formation of aerospace stamping is studied by using 3D analyzing software PAM-STAMP 2G. Defects like thinning, fracture and wrinkling in the process of sheet metal forming are predicted and the causes are investigated. Furthermore, the process parameters are optimized and the die structure is modified.

Key words: finite element simulation; formation of sheet metal; stamping; optimization

1 引言

冲压成形具有易加工成形、生产效率高、材料利 用率高等优点,因此钣金类零件在航空航天领域有着 广泛的应用。从力学角度分析,板料成形是一个几何、 材料和边界接触条件等因素参与的典型非线性过程, 涉及板料在拉深和胀形的复杂应力状态下,材料的塑 性流动、塑性强化,及起皱、破裂的防止,回弹预测 的问题<sup>[1]</sup>。随着板料成形数值模拟技术和计算机技术 的发展,相关行业积极利用有限元模拟仿真技术模拟 板料成形过程,指导和优化板料成形工艺,减少模具 的试模次数,降低成本,缩短模具制造周期。

本文以一个典型拉深件的成形过程为例,使用 PAM-STAMP 2G 建立虚拟板料成形过程,比对模拟成 形计算结果和实际成形过程,验证了此设计方法的正 确性和可行性,为冲压工艺和模具设计提供参考。

#### 2 有限元模拟技术的发展及应用

钣金成形过程比较复杂,涉及材料、几何、边界 条件等非线性问题,影响因素很多,成形规律难以用 定量的方式给予表达,一直都是在经验的基础上,采 用试错法进行工艺设计、模具设计,一般需要经过多 次试模和修模才能投入生产;同时航天钣金件批量 小、种类多,部分零件可以经过手工修制成形,因此 一直以来定量研究钣金成形参数较少。

近几年,随着中国航天事业的蓬勃发展,新材料、 新工艺大量应用于新型航天器中,模具设计与制造的

作者简介:白金鑫(1983-),工程师,飞行器制造工程专业;研究方向:非标设备 及钣金成形模具的设计开发。 收稿日期:2010-04-01

难度和工作量急剧加大,航天领域的工程技术人员对 冲压成形分析及模具现代化设计手段的需求日益迫 切,积极寻求从根本上解决板料成形参数难以定量表 达的问题,希望在设计初期,解决板料成形过程中可 能出现的多种工艺缺陷,如:板料的起皱、局部减薄 和破裂,以及回弹补偿等问题。

冲压成形数值模拟技术主要以有限元方法为主。 国内广泛应用的板材冲压成形数值计算软件主要有 LSDYNA3D、 DYNAFORM 、 PAM-STAMP 、 AUTOFORM 等<sup>[2]</sup>。本文以 PAM-STAMP 软件为平台, 以一个典型的拉深件为例,对钣金成形过程进行仿真 计算。

#### 3 成形特点分析

单件零件在拉深成形时受不对称力,成形效果不 好,同时考虑到零件批量和机床设备因素,采取对称 布置,一模两件的成形方案,同时为将来一模四件提 供参考。此零件拉深深度较深,传力区存在严重变薄, 甚至破裂的可能,同时变形区材料堆积严重,材料可 能失稳叠边。根据理论计算,可能无法拉深成形<sup>[3]</sup>。

4 基于仿真软件的钣金成形分析

#### 4.1 基于 INVERSE 模块的板料展开

毛坯形状对板料拉深成形结果有着较大的影响, 当毛坯形状不合适时,拉深件容易产生破裂和起皱等 缺陷,甚至根本不能成形。当其它拉深条件比较合适 时,通过改善毛坯的形状有可能使原本失败的拉深件 获得成功。

为了解决板料毛坯预测的问题,人们提出了很多 方法,如经验图解法、滑移线法和几何映射法等<sup>[4]</sup>。 由于这些计算方法忽略了材料各向异性和加工硬化 等影响成形的重要参数,因此这些方法在计算量和精 确度方面存在一些问题。随着计算机技术和数值模拟 技术的发展,人们逐渐将目光转移到应用有限元方法 计算板料展开。

PAM-STAMP 2G 下料量的估计主要使用 INVERSE 模块完成,采用有限元一步成形逆算法, 从而可以得到成形零件的厚度、应变、应力大小和分 布的初步计算值,同时也确定了成形零件所需要的初 始毛坯形状和尺寸。

4.2 有限元分析前处理

基于 PAM-STAMP 2G 软件平台进行仿真分析, 首先是进行分析建模,包括几何建模和有限元建模。 几何建模主要是通过通用 CAD 软件,如 ProE 等来完成。主要是冲压模具的凹模的几何建模。

有限元建模包括:通过 DeltaMESH 工具完成对 几何模型的有限元单元划分,通过 tool builder 工具生 成相应的模具及板料有限元模型,划分网格时,板料、 凸模、凹模型面的圆角处网格划分细一些,其它位置 适当放大,有利于提高数值计算速度。建立的有限元 分析模型见图1。



图1 建立的有限元分析模型

数值模拟前参数的设定:具体包括材料参数及性 能参数,如板料厚度、冲压坐标系、质量缩放系数、 摩擦系数、速度比例因子等影响冲压过程的主要参 数。PAM-STAMP 提供了一个基于真实冲压过程的快 速设定宏。其中对成形结果影响较大的参数主要是材 料参数(包括材料厚度、各向异性、应变强化指数、 屈服准则、强化准则等),成形过程中的参数(质量 比例系数、网格最大细化等级、摩擦系数、压边力等)。

整个模拟过程包括两个主要阶段,即压边阶段和 拉深阶段,根据各阶段特点结合工程实际经验,利用 PAM-STAMP软件的快速设定宏,设置两个阶段的相 应参数,完成有限元分析的前处理。

## 4.3 有限元分析后处理

#### 4.3.1 厚度分析

软件提供了丰富的有限元后处理分析结果, 拉深 过程中的两大类主要问题是变形区的起皱和传力区 的破裂。零件在拉深过程中, 毛坯料在模具的作用下, 传力区处于双向拉伸状态, 材料减薄严重, 当超过材 料强度时,拉深件破裂,拉深失败。变形区处于双向 挤压状态,材料厚度增加,当压力达到一定程度,材 料失稳,出现叠边,材料厚度显著增加。如图 2、图 3 所示,计算结果真实地反映了以上成形过程,并且 定量地给出了成形后零件的厚度分布。图 4 为实际拉 深过程中出现的破裂与起皱现象。



图 2 变形区起皱和变形区减薄现象



图 3 成形过程结束时的厚度分布



图 4 实际拉深过程中的破裂和起皱现象

## 4.3.2 主应力分析

变形区的起皱主要是切向压应力引起板料失稳 而产生弯曲; 传力区的拉裂是由于拉应力超过板料的 抗拉强度。拉深过程中板料变形区的增厚, 传力区的 减薄, 根本上都是由拉深过程中板料内各区的应力状 态不同所决定的<sup>[5]</sup>。对应力状态进行分析,可以指导和优化成形工艺与模具设计。成形过程结束时的应力分布如图 5 所示。



公 ) 成形过程结果时的应力分

## 4.3.3 结论

根据仿真计算结果,比对实际拉深过程,板料在 拉深过程中确实出现了变形区圆角处起皱,传力区底 部圆角处拉裂的现象。数值模拟的结果非常接近真实 冲压状态。

根据有限元计算结果,通过优化板料毛坯外形、 模具间隙、润滑条件,较好地改善了成形条件,得到 了满意的成形零件,设计完成的模具结构如图6所示。



图 6 模具结构图

1-螺钉 2-圆柱销 3-模柄 4-圆柱销 5-上模 6-上模板 7-导套 8-导柱 9-下模板 10-圆柱销 11-下模 12-退料板 13-定料销 14-顶杆 15-螺钉 16-导柱 17-导套 18-起重螺栓

#### 5 结束语

以 PAM-STAMP 2G 为平台,计算板料展开,对 板料成形过程进行有限元仿真,对仿真与实际冲压的

## 信息化技术

结果进行比对,验证了仿真技术的可行性,将 PAM-STAMP软件应用在工程实际问题中,可以指导 和优化板料成形工艺方案和模具设计,减少模具的试 模次数,降低成本,缩短产品研制周期。

## 参考文献

1 李泷杲. 金属板料成形有限元模拟基础. 北京航空航天大学出版社,

- 2008.7
- 2 宋拥政. 中国金属成形行业的发展. 中国锻压协会, 2009.3
- 3 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册. 航空工业出版社, 1992
- 4 《冲模设计手册》编写组. 冲模设计手册. 机械工业出版社, 1996
- 5 胡世光. 板料冷冲压成形的工程解析[M]. 北京航空航天大学, 2004

(上接第54页)

容,能够进行平面图形与三维曲面间的投影运算,还 要能够在加工前对实际加工过程进行仿真。加工系统 软硬件设计还需考虑更宽的应用范围。

目前国际市场上还没有针对这类加工问题的商品化激光加工设备。已完成的一些实际工程任务,大部分是利用已有的高精度数控加工系统改造而成。常见有多自由度的龙门架结构、六轴机械臂结构等的形式。这种多自由度的机械移动机构使在复杂的曲面上进行刻蚀加工成为可能,控制软件一般为针对数控CNC系统开发的专用软件。在国内兰州空间技术物理研究所已将短脉冲激光刻蚀技术和先进的数控技术结合形成了一种柔性的三维曲面金属薄膜图形整体加工设备与技术,可实现任意复杂型面上三维图形的精确定位和刻蚀加工。图3是镀膜/激光刻蚀技术制作的复合材料基金属薄膜图形的图片。



图 3 激光刻蚀制作的复合材料基金属薄膜图形

#### 4 结束语

从目前技术发展的情况看,激光刻蚀加工在各种 三维曲面薄膜图形制作技术中更具优越性,特别是在 大尺寸、三维曲面、高精度要求方面的跨尺度加工能 力还很难被其它技术替代。在组合材料体系激光刻蚀 加工的基本机理方面已获得了初步的成果,发现并利 用金属薄膜/复合材料基底体系激光刻蚀过程金属薄 膜固态分离的机制提高了刻蚀的精度,这一技术已经 达到了工程实用水平。激光刻蚀技术进一步发展方向 是提高刻蚀厚金属薄膜的能力和拓展在微加工方面 的应用。激光刻蚀是一种干法直接刻蚀的加工技术, 进一步提高激光刻蚀的精度和分辨率,使其在微加工 领域一定程度上替代光刻技术也是有可能的。超短脉 冲的 ps、fs 激光器在刻蚀加工中的应用,将对高精度 要求的精细刻蚀加工更加有利,使激光刻蚀可能发展 为一种通用关键制造技术。

#### 参考文献

- 张博明,刘双. 航天器多功能结构的研究现状及其应用前景[J]. 宇航学报,2007,28(2):493~497
- 2 万顺生,王晓春,周一帆.频率选择表面天线复用副面的研究[J].南京 航空航天大学学报,2005,37(6):787~789
- 3 张晨晖,刘明昌.大口径改型卡氏天线栅状反射面成型工艺研究[J].电 子工艺技术,2005,26(4):232~234
- 4 韦娟芳,冀有志,龚博安.星载蜂窝夹层结构天线复合材料力学性能检测[J]. 宇航材料工艺,2007,37(5):8~12
- 5 王宏杰,郭文刚,董兆辉.激光刻蚀技术的应用[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(5): 469~472
- 6 戚发轫, Laux L, Reindl M,等.东方红三号卫星的机械太阳阵和通信 天线[J].中国空间科学技术.1991,11(5):1~7
- 7 Masao Yamato, Izuru Ntaio, Hiroyuki Shigemasa, et al. Development of dual gridded reflector antenna for Superbird-C, AIAA-98-18926: 332~335
- 8 杨建平,陈学康,吴敢,等.纳秒激光刻蚀复合材料基底金属薄膜机制研究[J].中国激光,2011,38(6):(出版中)
- 9 赵栋才,肖更竭,马占吉,等.复材表面电弧离子镀镀铝膜性能研究[J]. 真空科学与技术学报,2010,30(5):510~513