

# 复杂钣金件多工序成形仿真技术

## Multi-Process Forming Simulation Technology for Complex Sheet Metal Parts

■ 门明良 孟宝 / 北京航空航天大学 朱宇 / 中国航发研究院 石佩珏 刘红梅 / 中国航发西航

复杂薄壁钣金件在航空发动机中占有较大比例，传统的物理试错与单工序成形已经不能满足复杂钣金件的生产制造需求，可以通过基于有限元法的多工序仿真，来优化成形工艺和工艺参数，从而提高效率，生产高质量的钣金零件。

**钣金**件在航空发动机中的应用十分广泛。新型航空发动机对钣金件提出了更高的要求：形状更复杂且尺寸精度更高；使用新材料且厚度更薄；具有优异的抗疲劳性能等。这些都给钣金件的成形制造技术带来了新的挑战。传统的通过不断地修改工艺参数或修模来确定最佳工艺方案的钣金成形，所需时间长、成本高、效率低，且单工序成形一般难以实现复杂外形的钣金件成形，不能满足当前发展的需求。随着理论和实践的不断深入以及计算机科学技术的快速发展，有限元仿真技术和计算机辅助设计甚至人工智能技术被用来模拟复杂钣金件的多工序成形过程，为优化板料成形工艺提供理论指导，预防和消除成形缺陷，提高产品质量，减少钣金件的开发周期，降低成本。

### 钣金件成形仿真的主要方法

目前用于航空领域金属板料成形过程的计算机辅助工程（CAE）技术主要依赖于有限元分析（FEA），几乎所有的CAE软件都是用有限元来进行计算求解，也称为有限元仿

真技术。有限元的基本求解思想就是把要计算的区域划分为若干个互不重叠的微小单元，在每个单元内选择合适的节点作为求解函数的插值点，将作用在单元上的力等效到节点上，结合数值分析方法对其进行求解。随着计算机软件 and 硬件的飞速发展，以及多学科的交叉和结合，基于CAE的数值模拟已广泛应用于航空发动机的复杂钣金件成形过程，在提高钣金件的质量、降低研究开发成本、缩短开发周期方面都发挥了重要作用。

在有限元技术刚提出时，其应用范围仅在航空航天领域，且研究的对象也只局限在线性问题与静力分析。随着有限元仿真技术不断成熟，市场上不断有新的公司成立并推出CAE软件，从各个角度出发，如板材成形过程中的破裂问题、起皱问题以及回弹问题等，从简单零件到复杂钣金件，考察有限元仿真技术在预测这些问题方面的能力。针对这些问题，研究人员提出了很多有价值的方法，并推动了有限元仿真技术在复杂钣金件成形的多物理场耦合与全工序仿真分析的发展。

### 钣金成形仿真软件的发展与应用现状

目前，国际上存在诸多集工艺设计、成形分析、数据管理等于一体的钣金成形仿真软件系统，影响比较大的有FastForm、DynaForm、ABAQUS、LS-Dyna、AutoForm、Pam-Stamp 2G、QForm 3D、HyperForm、Deform、OpenForm 和 Stampack 等。这些商业软件的应用促进了板料成形数值模拟技术的发展，成熟的商品化软件陆续提供了钣金成形全工序模拟的解决方案。针对钣金件成形中的几何非线性、材料非线性问题，以及复杂的接触与摩擦问题，这些软件简化了操作，并且能够准确地预测钣金件在单工序和多工序成形过程中的起皱、破裂、回弹行为，为航空发动机中钣金件的生产以及模具设计提供了有力的支持，也进一步推广了有限元在航空领域的应用。

随着数字化产品设计的概念逐渐深入人心，自主知识产权CAE软件的重要性也日益凸显，一些具备一定工业使用价值的钣金成形模拟软件完成了开发，并逐步开展了市场化尝试：如北京火箭软件有限公司推出的FEPG、郑州机械研究所推

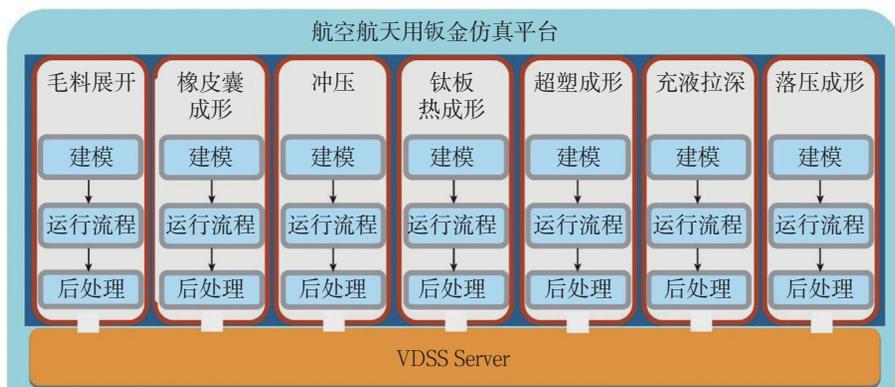


图1 航空航天用钣金仿真平台

出的紫瑞CAE、大连大工安道公司的CAE软件Adopt.Smart、北京航空航天大学开发的一步法冲压成形分析软件SheetForm、湖南大学与吉林大学开发的针对汽车结构的KMAS分析系统、武汉华锋惠众科技公司开发的Fastamp板料成形数值模拟软件等。其中的FEPG采用元件化思想和有限元语言，为各个领域钣金件成形问题的有限元求解提供了一个强有力的工具，作为通用型的有限元软件，能够解决多个领域的有限元计算，实现多物理场任意耦合，在有限元并行计算方面处于领先地位。

但这些软件大多都是针对汽车研发的，航空发动机中复杂钣金件设计制造大多都是借鉴汽车的经验，采用各种商业有限元软件来进行数值模拟分析，不具备专业性。ESI公司中国分公司根据航空航天钣金行业需求，推出了ESI 航空航天钣金仿真集成平台，如图1所示。该平台集成了8种典型的钣金成形工艺，能够满足航空工程人员对复杂钣金件的模拟分析需求，并且定制化模块和标准使用流程也降低了有限元使用软件的门槛。

总的来说，国内对钣金成形全工序仿真方面的研究依旧较少，大

多停留在针对典型构件的拉深、弯曲、修边等单工序模拟阶段，针对多工序连续工艺仿真的研究尚处实验室阶段，缺乏有效的应用验证。

### 多工序成形仿真技术的发展与应用

航空发动机复杂钣金件的成形往往需要经过多个工序，如火焰筒挡溅盘钣金件的成形过程，其中涉及拉伸、切边、车底冲孔、热处理等多个工序，如图2所示。如果根据工艺路线划分工序并逐个开展研究，就会忽略多个工序之间的数据传递和工艺参数的耦合影响。目前对钣金件成形数值模拟的研究大多仍是集中于某一单一工序的分析并积累了

较多的经验，随着有限元仿真技术和计算机性能的不断发展，对钣金件从下料开始到产品的最终成形的整个过程进行仿真逐渐成为趋势。

多工序板料成形仿真技术在钣金件的设计和制造过程中有着广泛的应用。由于一些钣金件的复杂程度高，其模具结构型面复杂，这些零件的冲压成形数值模拟过程存在着复杂的材料非线性和几何非线性，与简单的单工序成形数值仿真相比，不仅需要用到有限元数值计算方法，还需要考虑描述整个成形过程材料弹塑性行为的材料模型等。多工序成形数值仿真需要实现更多的功能，还需要考虑板料信息在不同工序之间的传递以及前后工序中工艺参数的相互影响，需要处理的数据也更加复杂。

一般来说，对于多工序成形的数值模拟技术主要有两种。

一种是多工序连续计算。在有限元分析的前处理过程中，对全工序成形过程中的所有工序的有限元模型进行设置，包括网格、材料模型、接触、载荷、位移边界条件等属性。通过改变接触属性和边界条件来实现不同工艺的变化，不必考虑计算

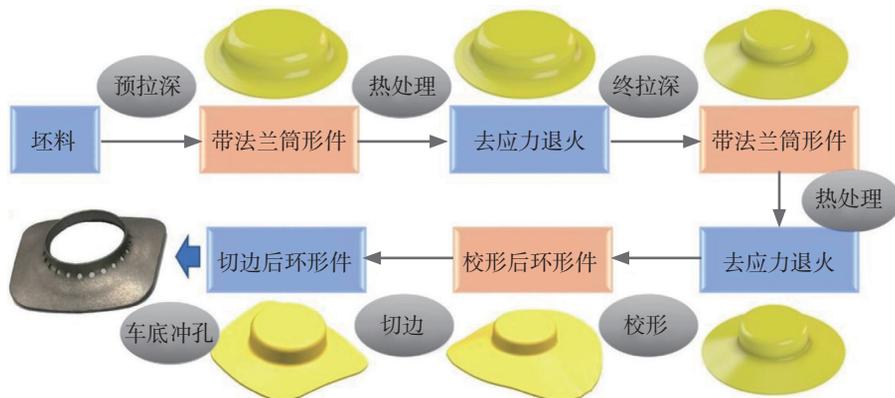


图2 火焰筒挡溅盘多工序成形过程

结果的传递问题。对于求解器来说，只需要计算一次就能实现整个多工序成形的数值模拟。但在前处理时，有限元模型复杂，会增加处理难度，对计算机性能要求较高，也可能造成计算上的不稳定性。

另一种是多工序独立计算。每一工序都定义为一个独立的有限元模型，通过求解器和有限元软件程序接口将前一工序的几何属性，物理场数据（应力、应变、位移等）信息作为后一工序的初始条件。该方法可以为不同工序独立选择隐式或显式求解算法，简化前处理过程，提高效率。但是过程较为繁琐，需要为每一工序分别定义载荷以及边界条件，不同工序之间的衔接，还会涉及同一软件或不同软件之间的数据传递，为了获取前一工序的模型信息，还需要做额外工作。

此外，有限元法与计算机辅助设计（CAD）的联系允许有限元法成为成形过程中工具设计过程的一

部分。与CAD软件的无缝集成演变为当今有限元分析系统的一个趋势，在用CAD软件对钣金件进行造型设计后，自动生成有限元网格并进行求解计算。如果模拟结果不符合要求或出现破裂、起皱等成形缺陷，则需要重新进行造型和计算，直到满足需求为止，从而极大地提高了设计水平和效率，如图3所示。当今所有的商业化有限元系统都开发了对应用广泛的CAD软件的接口。

华中科技大学杜亭在其学校自主研发的求解器FASTAMP的基础上，开发了用于板料成形的全工序模拟系统Multi-Process，并将这个系统嵌入CAD软件UG中，成为面向CAD/CAE全流程设计的FASTAMP-NX，对多工序板料成形数值仿真的推广取得了较好的效果。华中科技大学柳玉起教授课题组专注于CAD/CAE无缝集成的全工序模拟系统开发方面的工作，早在2008年就利用UG二次开发技术，

设计并实现了国内首个真正意义上的钣金成形的全工序集成系统，实现了与UG的无缝集成，随后基于SolidWorks、CATIA、Pro/E和NX等实现了板料成形全工序仿真的CAD/CAE的集成。

随着有限元法在宏观尺度上的发展，数值模拟仿真在宏观尺度上引入了介观、微观和纳观尺度的分析方法，如晶体塑性、元胞自动机、代表性体积单元、分子动力学和第一性原理等。目前，金属成形的数值模拟比以往使用更多的计算机资源，其应用已经大大扩展，未来也有望在不同尺度上进行跨尺度建模，并进行多工序的数据传递，实现探究复杂钣金成形过程中的内在微观变形机理的可能性，从而进行形性协同一体化智能仿真优化制造。

## 结束语

航空航天技术的飞速发展对航空发动机中的复杂钣金件提出了更高的要求，与此相对应，有限元分析技术也已经十分成熟，多工序成形仿真已经成为复杂钣金件设计制造生产过程中不可缺少的一环，可以有效缩短产品研发周期，改善产品质量。针对尚处实验室阶段的多工序连续工艺仿真的研究，应大力开发和完善针对航空发动机的专业仿真技术和工艺集成平台，在不同的尺度层面，将钣金部件生产中涉及的多个过程集成到成形过程和服役行为的虚拟分析中，并简化操作流程，为航空发动机自主研发提供助力。

**航空动力**

（门明良，北京航空航天大学，博士生，主要从事航空发动机复杂钣金件多工序仿真及跨尺度建模研究）

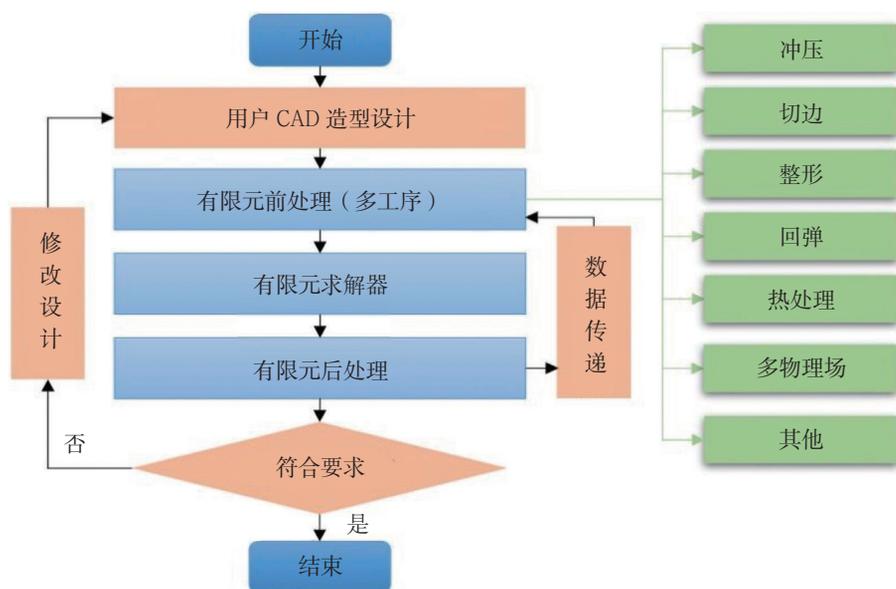


图3 CAD与FEM集成的多工序成形仿真过程