

基于 PAM-STAMP 的进油管成形有限元分析

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 蒋佳华 黄乐 李松 王帅

航空发动机加力总管的进油管结构较为特殊，发动机导管成形时由于受设计结构、材料等因素影响，常常产生难以成形、加工质量较差等问题。本文以某型发动机的加力燃油总管的进油管为例，借助专业金属板料成形的有限元模拟分析软件 PAM-STAMP，对其弯曲成形过程进行数值模拟分析，对软件计算得到的成形结果进行分析，为实际加工工艺的制定和模具的设计提供了重要的指导。

一、引言

导管弯曲成形是管子完成所需形状尺寸的二次塑性加工，是一种典型的材料非线性、几何非线性、边界条件非线性的多重非线性耦合变形，其弯曲过程属于三维非稳定变形。弯曲时管子大部分形面为无约束自由表面，沿弯曲半径方向材料中断而失去相互约束和支撑，材料流动变形易于形成壁厚减薄、波纹度超差及圆度超差等弯曲缺陷。加力总管的成形质量直接关系到后续装配质量以及使用性能。以某型加力总管的进油管为例，利用专业金属板料成形的有限元模拟分析软件 PAM-STAMP 对其弯曲成形过程进行了数值模拟分析，以得到工艺可行性、工装可行性以及成形危险区域等结果，为后续的工艺制定提供了重要的指导作用。

二、有限元仿真分析在导管弯曲中的应用

采用传统的导管弯曲成形工艺设计经验，或根据简单的成形极限规则能够预估弯管生产中出现的质量问题如管子拉裂、褶皱、圆度超差和回弹等，但此类质量问题是否发生、何时发生或发生程度等都需要大量的重复实操实测得来。但这样不仅导致生产周期延长，还导致大量废品产生，造成不必要的成本浪费。

目前，在导管成形工艺的评审编制阶段引入有限元仿真分析技术，可以快速模拟分析出成形过程中可能发生的缺陷，通过将分析结果和实际生产经验结合，可以合理有效地调整工艺参数和成形条件以保证产品的质量，从而很大程度上减少模具调试和产品试制周期，不仅节约了大量的开发成本，也更符合现代产品开发技术发展的需求，随着导管弯曲理论研究的不断深入，以及各种仿真软件中弯管成形模块的建立，导管弯曲成形的仿真精度也越来越高。有限元仿真技术已经嵌入到弯管零件的前期开发和后期改进中，对弯管类零件的生产制造工艺发挥着越来越重要的辅助分析和指导作用。

三、进油管的成形特点分析

进油管位于加力筒体内，是连接加力泵与加力总管的重要零件。为了提高进油的稳定性以及后续的使用强度，进油管必须具有良好的圆度以及力学强度。

进油管的成形工艺特点：（1）两个折弯半径不一致，分别为 40mm、60mm，如图 1 所示。（2）两个折弯连续相切，折弯之间无直线段。基于以上成形特点，传统的弯曲手段无法实现，因此需要开发专用模具进行制造。

四、工艺方案的制定

该进油管导管外径尺寸为 $\Phi 14\text{mm}$ ，壁厚为 1.1mm ，材料牌号为 GH536，使用伊顿公司的数控弯管机 VB25 进行弯曲，工艺流程为首先对折弯半径 40mm ，圆心角度 $61^\circ 28'$ 的折弯进行弯曲。再重新装夹，对折弯半径 60mm ，圆心角度为 $71^\circ 28'$ 的折弯进行弯曲。

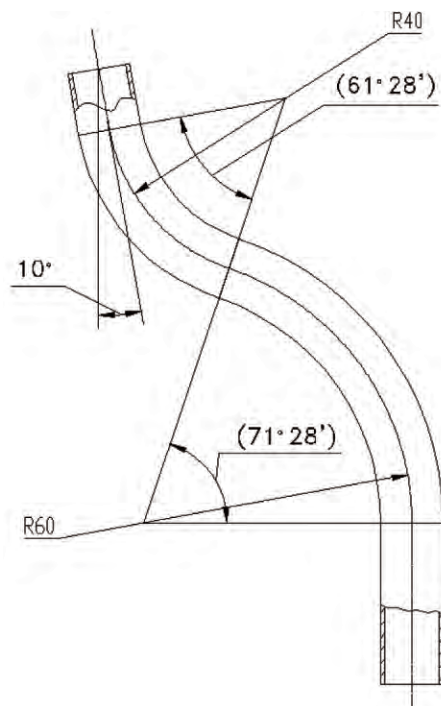


图 1

根据成形顺序及零件结构特点，结合弯曲顺序以及半成品状态，设计了两套数控弯模，使用 UG 软件对工装进行建模如图 2、图 3 所示。

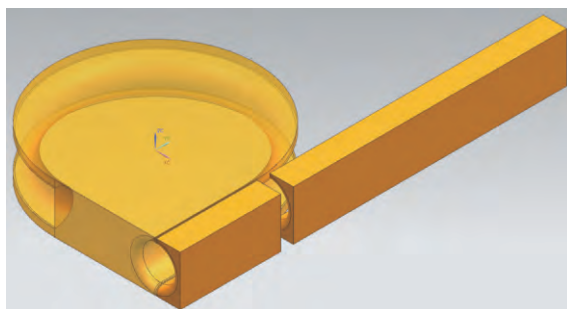


图 2

使用图 2 所示结构弯模对第一个折弯进行弯曲，再使用图 3 所示结构弯模对第二个折弯进行弯曲。

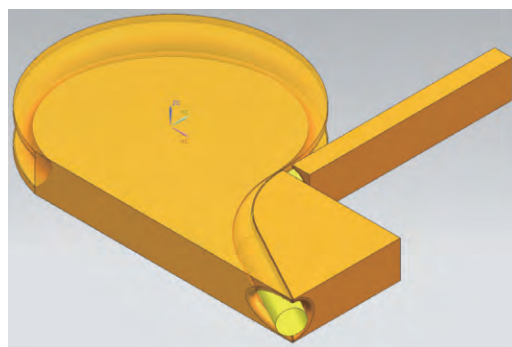


图 3

五、弯曲成形仿真模拟

1. 模型的导入及网格划分

在完成了模具及直管料的创建后，将模型从 UG 中以 IGS 格式导出，导出时注意坐标系的选定。

在 PAM-STAMP 中将模具模型及导管模型分开导入。网格划分是有限元分析过程极其重要的环节，合理控制网格密度是合理划分网格的关键，划分的网格越密，计算结果的精度就越高，但也同时会增加计算时间。这本例中，网格划分时模具网格比例系数设定为 0.5，直管料的比例系数设定为 0.1，管子网格最大自适应划分系数为 2。如图 4、图 5 所示。

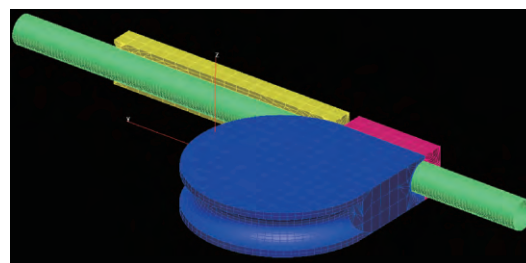


图 4

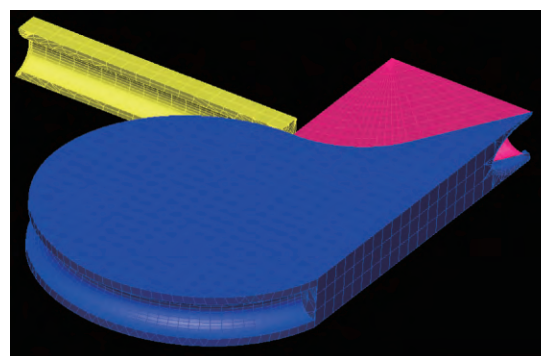


图 5

2. 精确成形模拟

弯曲过程采用回转牵引弯曲方式。摩擦条件对导管弯曲工艺具有重要的影响，因此在仿真过程中有必要引入合理的摩擦模型，在导管成形过程中，各模具与导钢管胚的接触主要有以下几种：导管-弯模、导管-钳夹、导管-压力模等。在本例中将导管与模具之间的摩擦系数设置为 0.2。

有限元仿真模型中的边界条件主要为约束，约束模型保持固定不变即为零位移，或非零位移时仅能移动规定量的位移，在导管弯曲成形里，管子实际完全处于自由状态，约束均定义在模具上，有限元模型中各模具的运动方式要依据实际弯曲加工时进行设置。其中，弯模只具有围绕弯曲旋转中心的转动运动，具有一定的旋转速度。钳夹在加工时与弯模保持一致，即随着弯模一起旋转。压力模在只进行压紧时，不具有任何自由度，但当其具有助推作用时，应具有助推一侧的运动自由度，并具有一定的助推速度。需要特殊注意的是，不管弯模、钳夹的旋转角速度还是压模的助推移动速度，都应尽量使用参数曲线进行定义，以便保证在速度加载过程中不会发生惯性效应。

在本例中我们参照伊顿公司的 VB25 型数控弯管机的实际的运动状态结合以往的弯曲成形过程经验参数对 PAM-STAMP 内相对应参数进行赋值，将弯模、钳夹的回转速度设定为 0.124rad/s，压力模移动速度设定为 4mm/s。成形过程分为两个阶段，分别对应折弯半径 40mm，圆心角度 61° 28' 以及对折弯半径 60mm，圆心角度为 71° 28' 的两个成形过程，如图 6 所示。

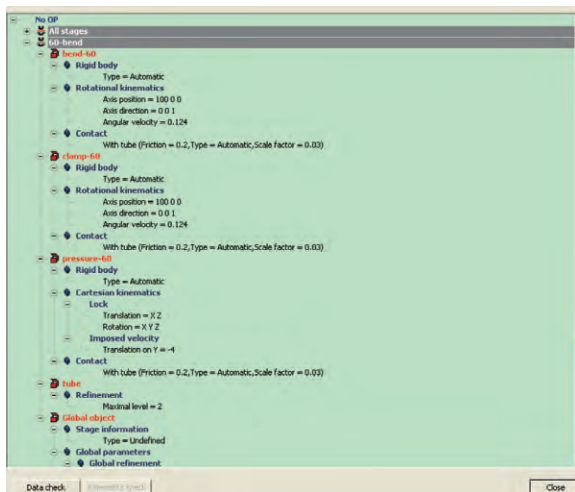


图 6

使用求解器对弯曲过程进行求解，本例使用 PAM-AUTOSTAMP 显示算法求解器，能够提供在实际工业环境下，如考虑重力影响、压料过程、多步成形、各种拉延、切边、翻边和回弹等复杂情况下可视化的冲压成形模拟。能够提供非常精确的成形结果，帮助技术人员在公差范围内对模具进行全面质量控制，有效地解决了昂贵而又耗时的修模调试时间。

而在成形分析中我们一般选用罚函数接触算法，该方法在成形模拟中是最为有效、最为稳定的接触问题处理方法，具有允许初始穿透、能够适应模具网格质量低等特点。

3. 仿真结果分析

使用求解器对弯曲过程进行求解，求解后分别得到两个过程的仿真结果。通过软件的后处理分析功能，我们可以很方便地得到导管形变后弯曲部位的圆度值、弯曲部位的壁厚减薄情况，以及应力、应变等物理量的变化情况。通过分析我们可得，在完成第一个折弯（折弯半径 40mm，圆心角度 61° 28'）后，导管的圆度值为 0.45mm，符合标准规定（不大于 0.75）如图 7 所示。

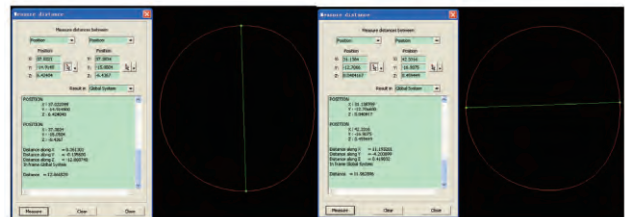


图 7

从壁厚变化分布云图我们可以查知导管背侧壁厚减薄量为 0.08mm，符合标准规定（不大于壁厚值的 20%）如图 8 所示。对管子截面进行剖视后，未见可测量褶皱产生，

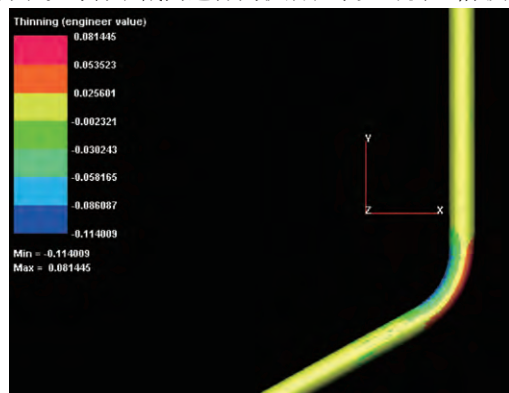


图 8

弯曲内侧过渡光滑，未产生褶皱堆积，波纹度合格，如图 9 所示。

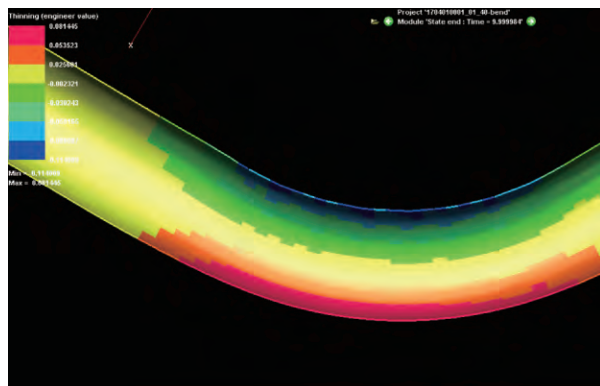


图 9

依据以上分析结果，我们可得第一个折弯弯曲后，管子三项检验指标均合格。

对第二个折弯进行同样的三项检验指标进行分析。第二处折弯圆度值为 0.25mm，壁厚减薄量最大值为 0.8mm 如图 10 所示，剖视图未见可测量褶皱产生，弯曲内侧过渡光滑。

通过对成形极限图进行分析可知，整根导管均处在安全区域内如图 11 所示。

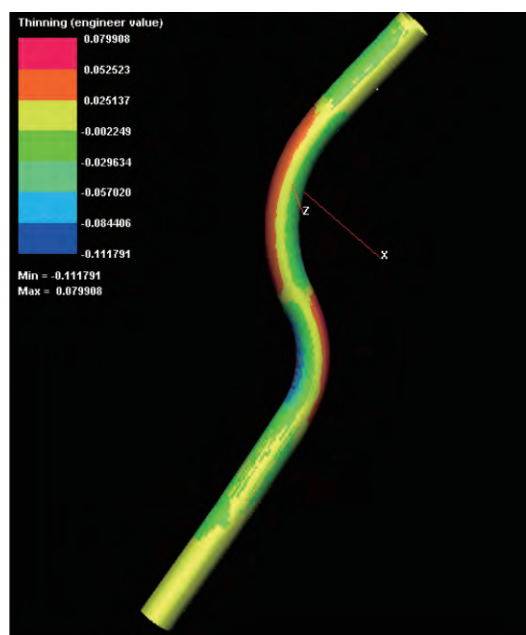


图 10

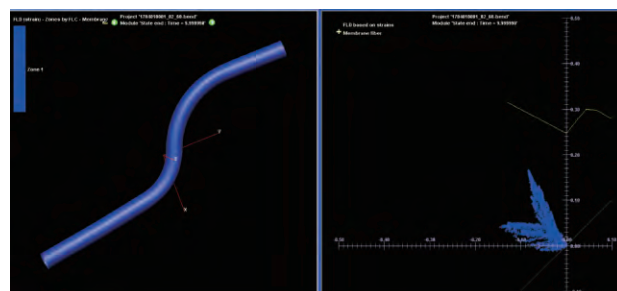


图 11

六、结语

从以上的仿真结果分析我们可得出结论，对于该型进油管，采用特殊结构的成套数控弯模进行分步数控弯曲，能够满足弯曲要求，其各项质量检验内容均符合相关的质量标准。后续的模具设计可按仿真时的模具结构进行设计、制造。相应的工艺内容参数亦可参照前处理设置的参数。

目前，我国的航空产品研制、批产周期不断地缩短，这就需要相关的设计人员、工艺人员对出现的问题做出快速的反应，这也突显了有限元分析技术在产品研发阶段的重要作用。通过采用有限元分析法在对零件成形的工艺进行评判，来提出相应的改进方案，设计、工艺人员能够快速准确地敲定设计结构以及工艺制造方案，也能够地缩短工装调试、零件试制周期，进而有效地提高工艺稳定性、降低生产成本。

利用有限元分析法可以有效地解决导管弯曲变形中的各种复杂问题，但其依托的导管弯曲理论仍发展缓慢，只有完善相应的工程理论才能将有限元分析法在弯曲模拟中发挥到极致。IM