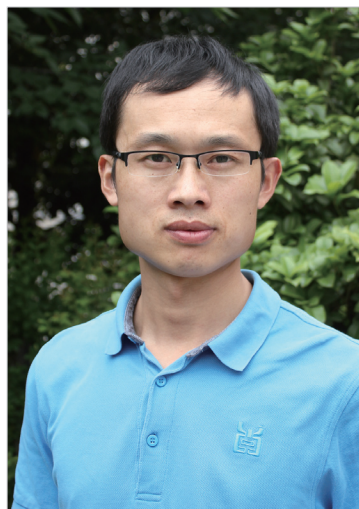


# 蒙皮拉伸成形装备及其 数值模拟研究

## Research on Skin Stretch-Forming Equipments and Numerical Simulation Technology

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 王 强 吴建军 张 深 王 苞



王 强

西北工业大学航空宇航制造工程硕士研究生,主要从事精密制造成形工艺、装备技术与板料塑性成形工艺研究。目前主要参与的企业项目有蒙皮拉伸成形工艺和型材下陷成形技术研究。

拉伸成形是飞机蒙皮零件的主要成形方式之一,而拉形过程中选用合适、先进的拉形设备对成形质量影响很大。在工艺技术中,加载轨迹的设计、回弹现象以及多点柔性模拉形中弹性垫层的影响是蒙皮拉形工艺中的关键因素。在有限元仿真软件中,通过对主要工艺参数进行仿真分

析,验证工艺方法的有效性,可提前预测蒙皮成形质量。拉形过程中选用合适、先进的拉形设备对成形质量影响很大。在工艺技术中,加载轨迹的设计、回弹现象以及多点柔性模拉形中弹性垫层的影响是蒙皮拉形工艺中的关键因素。在有限元仿真软件中,通过对主要工艺参数进行仿真分析,验证工艺方法的有效性,可提前预测蒙皮成形质量。

析,验证工艺方法的有效性,可提前预测蒙皮成形质量。

飞机设计中普遍采用的蒙皮类零件如飞机机身、机翼和整流罩等部位的零件均由拉形设备加工,其成形质量除受拉形工艺影响外,拉形设备的先进程度也影响拉形的成形质量。目前先进的数控拉形设备主要集中在美法等国,国内各大航空企业都在一定程度上引进了国外先进的拉形设备,从而提高了蒙皮的生产效率和成形质量。国内拉形装备技术经过几十年的发展,其设计与制造水平都有很大进步,形成了一套完整的体系,但与国外的拉形装备相比,仍有较大差距。为了满足航空工业的发展要求,亟待设计和制造更先进的拉形装备。

拉形过程中采用数值模拟技术,可以用较小代价在较短时间内获得最优设计方案。自从1960年Clough教授提出“有限元”概念<sup>[1]</sup>以来,经过几十年的不断发展和完善,板料成形的基础理论与数值模拟逐渐走向成熟,开始应用于拉形过程的研究当中。对实际拉形过程进行数值模拟,可以深入、全面地掌握板材内部的应力与应变分布规律和成形区域的厚度减薄情况,预测成形过程中可能产生的成形缺陷,通过工艺参数的优化进行定量控制,为新工艺开发和新产品的研制提供科学依据。在拉形过程中引入数值模拟技术可避免由于制造物理样机而进行的大量反复试验,从而节省试验费用,提高生产效率,降低了生产成本。

## 蒙皮拉形装备技术

### 1 蒙皮拉形成形机床

蒙皮拉形机是制造航空航天领域蒙皮类零件的关键设备,传统蒙皮拉形设备按其作用原理可分为台卧式拉形机和台钳双动式拉形机2类。台卧式拉形机用于横向拉形,而台钳双动式拉形机主要用于纵向拉形<sup>[2]</sup>。蒙皮拉伸成形力主要由拉形机钳口的运动和拉伸作筒伸缩产生,同时还涉及模具的垂直运动,相对于其他冲压工艺,拉形参数及运动方式更为复杂。

传统的蒙皮拉形机操作控制方式一般以手动来调整,因此蒙皮零件的成形质量不仅受各种工艺条件因素的影响,还与操作人员的技术水平和熟练程度有很大关系,且一致性、重复性差,零件质量难于保证。20世纪40年代,欧美等国开始研究拉形工艺及其技术装备,在拉形机的设计和制造方面积累了雄厚的技术基础,研制出了先进的数控蒙皮拉形机。这些公司主要集中在美法等国,如ACB公司、Cyril Bath和Hufford公司等,其生产的拉形机基本可分为4类:横向拉形机、纵向拉形机、纵横综合拉形机及转臂式拉形机<sup>[3]</sup>。型号有FET型、FEL型和VTL型。这些型号的拉形机按夹钳钳口的可调性可分为整体钳口拉形机和可调钳口拉形机。

以法国ACB公司生产的FET1200T横拉机为例来说明整体钳口拉形机,其模型如图1所示,有4个独立水平油缸和4个独立垂直油缸控制一对夹钳进行板材拉伸。拉形时,要将拉伸成形的板料夹持在钳口中,然后由4个水平拉伸缸将板料拉伸超过材料的屈服点,最后在水平缸和垂直缸的共同作用下,板料包覆模具。水平缸和垂直缸可以分别控制,根据需要形成不同的轨迹。钳口轨迹的运动是由ACB公司开发的

控制—监视系统管理控制的,该系统通过油缸位置编码器和压力传感器保证对4个水平缸和4个垂直缸的伺服控制功能进行同步闭环控制的,并控制油缸的极限位置。另外,法国ACB公司研制的FEL纵拉机的最大成形力达到20000kN,其夹钳包括多个夹钳块,每个夹钳块可以相对转动,以使夹钳顺应零件外形。美国Cyril Bath公司生产的VTL型纵横合一综合拉形机除了可以进行横向拉伸成形和纵向拉伸成形外,还可以通过更换夹钳实现型材的拉弯成形。

我国在拉形机方面的研究相对较晚,20世纪五六十年代从苏联

引进PO-250型蒙皮纵拉拉形机;80年代中后期从法国ACB、美国Cyril Bath公司引进了一些数控蒙皮拉形机,如FET600t、FET1200t、FEL2×350t、VTL1000等。这些公司生产的拉形机性能稳定、故障少且专业化程度高,呈系列化,具有良好的人机界面<sup>[4]</sup>,但这些拉形机控制系统比较复杂,价格昂贵,一般企业难以承受,而且一些关键技术被国外垄断。随着国内制造技术和装备技术的不断提高,国内一些科研院所和高校在蒙皮拉形机的设计和制造方面进行了探索性研究。北京航空航天大学自行研制了1000kN多功能

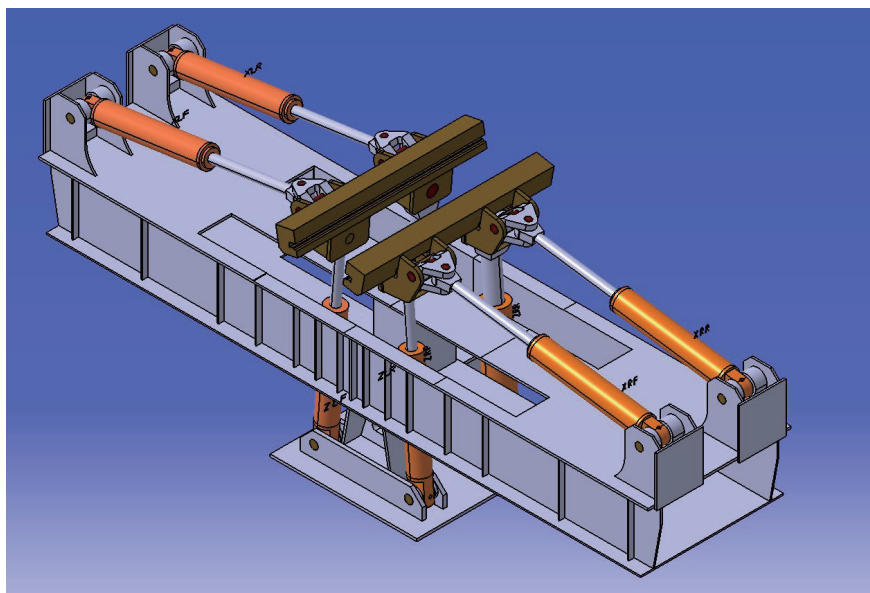


图1 FET1200蒙皮横拉机模型简图



图2 离散夹钳柔性拉形机

数控蒙皮拉形试验机,机身两侧分别使用两个水平缸和两个垂直缸来控制夹钳的运动。控制系统采用电液闭环伺服控制,配以PID控制算法,结合高精度光栅尺以及载荷传感器一起使用,形成以计算机动态采集实时控制为主的数控蒙皮拉形系统<sup>[5]</sup>,该设备拉形件最大成形尺寸为1600mm×800mm,适用于成形曲率变化平缓的工件。吉林大学无模成形开发中心为了解决双曲率蒙皮拉形件成形困难的问题,开发了SF-1200型离散夹钳柔性拉形机,见图2。该设备两侧分别设置两组离散化夹钳,这些离散夹钳机构是由多个水平液压缸、垂直液压缸和倾斜液压缸组成的空间闭链并联机构,每个单支机构是1个平面多杆机构,每个夹钳都由1组液压缸(分别为水平缸、垂直缸和倾斜缸)组成。3个液压缸铰链连接,液压缸与夹钳之间采用万向节连接<sup>[6]</sup>,其拉形机的工作面长×宽为1600mm×1200mm;夹钳机构共有20个。其中,水平和垂直方向布置的液压缸行程为500mm,倾斜方向布置的液压缸行程为750mm,其额定拉形力为1200kN,最大拉形力为2000kN。

## 2 可重构柔性多点模具

可重构柔性多点模具拉形技术是将柔性制造和计算机技术结合为一体的先进制造技术,其核心是将传统整体拉形模具离散成规则排列的

基本单元体,形成多点式、可数字化控制的模具。模具单元体的高度可由计算机自动控制,通过调整每个基本单元体的高度,可构造出不同型面的多点模具。在拉形中采用可重构柔性多点模具可以解决传统整体模具无法考虑回弹补偿或修正的问题。在生产中,通过调整可重构柔性多点模具基本单元体的相对高度,形成新的模具型面,进行回弹补偿或修正。由于它适合小批量多品种的产品制造领域,从而在实际生产中可有效缩短零件的研制周期,降低零件的制造成本。

在可重构柔性多点模具设备研究方面,美国麻省理工学院(MIT)首先进行了探索性研究。20世纪80年代,美国Hardt等<sup>[7]</sup>最先开始可重构拉形模具的研究,制造了实验室原型机。1999年美国Grumman Aerospace公司(现在的Northrop Grumman公司)、MIT、Cyril Bath公司等进行了合作,共同研制了可重构柔性多点模具拉形样机。该样机由2688个基本单元体组成,基本体排列数为64×42,成形面积为1828.8mm×1219.2mm,每个基本体为28.575mm×28.575mm,长为533.4mm<sup>[8]</sup>。其蒙皮零件型面的包络面由可调单元体阵列构成,以柔性橡胶垫层来拟制零件的表面缺陷,用柔性模具代替传统的实体模具,实现了蒙皮的柔性化拉形制造。后来,Cyril

Bath公司又制造了基本单元体排列数为40×28的可重构模具,采用闭环控制技术。美国Warner Robbins空军后勤基地将该设备用于飞机机身与机翼蒙皮的制造<sup>[9]</sup>。

在柔性多点模具成形设备研究方面,国内一些研究机构如北京航空制造工程研究所、北京航空航天大学、吉林大学等机构对可重构柔性多点模具的拉形进行了系列研究。北京航空制造工程研究所在掌握可重构柔性多点模具蒙皮拉形工艺关键技术的基础上,自主研发了用于飞机蒙皮拉形的柔性多点模具。该模具采用新型的调形驱动机构,减少了驱动电机的数量,并采用模块化的设计思想,这些模块分为冲头群组、模具围板、调形单元、驱动单元、制孔单元、分布式控制箱几个模块<sup>[10]</sup>;另外,北京航空航天大学在可重构柔性多点模具研发中也有一定突破,研制的模具型面尺寸为600mm×420mm<sup>[11]</sup>。吉林大学在可重构柔性多点模具方面取得了重大突破,其研制的SM25-1200型多点模具由48×32个基本单元体组成。如图3所示,该模具成形面积为1200mm×800mm,基本体的横截面积为25mm×25mm,可承受的最大拉形力为6000kN,采用混合调形方式,即当调形机械手移动到一个位置后,多个基本体高度被同时调整到计算值,从而节省了调形时间<sup>[12]</sup>。

## 蒙皮拉形数值模拟技术的研究

随着计算机技术的飞速发展以及有限元技术的不断完善,数值模拟技术已广泛应用于蒙皮拉形过程,并成为先进数字化设计制造的核心支撑技术。在拉形过程中采用数值模拟可以方便快速地确定各种参数对金属塑性流动的影响,预测成形件在成形中的一些缺陷如起皱、破裂等,并分析计算回弹在拉伸成形过程中

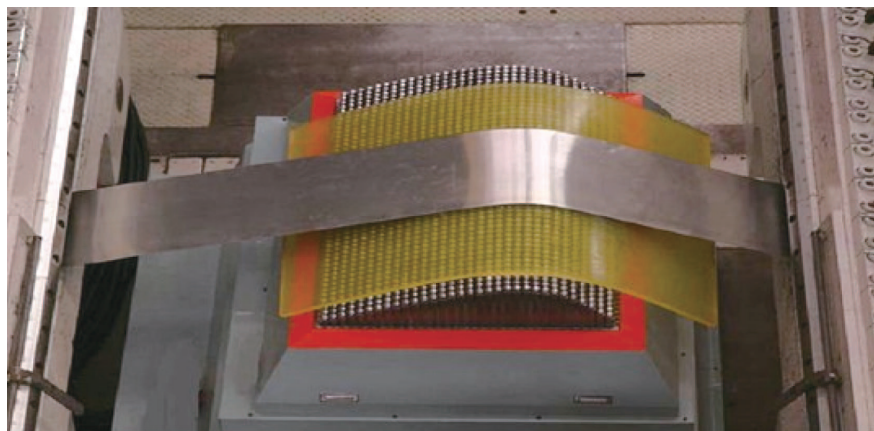


图3 吉林大学研制的可重构拉形模具

对零件、尺寸的影响,为模具设计和工艺分析提供科学依据,减少或消除了试拉和调形次数。

蒙皮拉形数值模拟分析中涉及到几何非线性、材料非线性以及边界条件非线性。板材拉形数值模拟中的关键技术包括板壳单元模型、材料模型、非线性算法和接触摩擦边界条件等,国内外学者在板料成形相关的塑性成形数值模拟基础理论中进行了相关研究。而在拉形过程中,加载轨迹、回弹问题以及多点柔性模拉形中弹性垫层的影响是蒙皮拉形过程中亟待解决的关键技术。

### 1 机构分析与加载轨迹设计

加载轨迹描述的是拉形机夹钳与模具相对位置随时间的变化,而两者的相对运动形式与具体拉形机有关。对同一个零件,不同拉形机的加载轨迹不同。通过理论解析,结合数值模拟技术与最优化理论可获得拉形过程中拉形机钳口或工作台运动轨迹与成形质量的关系,以便获得优化的钳口和工作台运动轨迹。对特定的拉形机机构进行运动分析,了解其机构的运动原理,掌握拉形机夹钳和工作台的运动方式,将优化后得到的加载轨迹转化为某个具体拉形机夹钳和工作台的运动参数,将这个轨迹用于指导生产,可充分发挥数控拉形机的功能。图4为蒙皮拉形加载轨迹设计流程图。

北京航空航天大学刘益成<sup>[13]</sup>、李卫东等<sup>[14]</sup>对法国ACB公司生产的FET型横向拉形机进行机构运动分析,并给出了并联机构的运动正解和反解算法。

(1)运动正解算法要得到夹钳钳口的位置。对FET型横拉机进行机构分析,计算机构的自由度。对机

构合理简化,采用回转变换张量法,在每个杆件上设立 $D-H$ 坐标系,建立坐标变换方程,进而计算出夹钳的位置。

(2)运动反解算法要计算出油缸活塞伸缩量。在夹钳和驱动件上分别建立动、静态坐标系,通过空间坐标变换求得关节的空间坐标,进而计算出驱动件油缸活塞的伸缩量。

实际应用中,对某给定的拉形件设计出优化的钳口运动轨迹,用有限元进行模拟验证,得到钳口的运动轨迹,在反解算法中将钳口运动轨迹转化为拉形机油缸活塞的伸缩数据,实现该数控蒙皮横拉机的数字化控制。

针对VTL型数控蒙皮拉形机机构特征,于成龙等<sup>[15]</sup>对VTL1000拉形机进行机构分析,并针对典型拉形工艺(预拉-包覆-补拉)给出了拉形轨迹计算方法以及拉形轨迹与机床运动参数的转换,开发了VTL1000型数控蒙皮拉形机的运动仿真系统。

在加载轨迹的研究方面,Oding<sup>[16-17]</sup>根据给定的应力应变条件,采用理论解析法给出了一种求解双曲面蒙皮拉伸成形加载轨迹优化的方法。北京航空航天大学张彦敏等<sup>[18]</sup>用解析方法给出了拉形时3种(持续拉伸、预拉-包覆-补拉、包覆-拉伸)不同加载方式下夹钳和工作台的运动加载轨迹,采用有限元数值模拟和优化算法相结合的方法,根据解析方法获得不同加载方式下的初步加载轨迹,从而建立优化数学模型并寻求最优的加载轨迹,但此方法只适用于简单的对称双曲面单凸蒙皮拉形。为了解决复杂双曲面单凸蒙皮包覆拉伸成形的加载轨迹优化问题,何德华等<sup>[19]</sup>采用应变控制方法,通过解析公式建立了成形过程

初始加载轨迹及加载范围计算模型,同样将有限元数值模拟技术和优化理论相结合,建立了蒙皮包覆拉伸成形有限元分析模型和加载轨迹优化数学模型,并通过具体的有限元算例分析验证了成形后成形零件回弹量显著降低,优化的加载轨迹实现了对拉形回弹量的有效控制。

针对加载轨迹的设计,北京航空航天大学李卫东等<sup>[20]</sup>提出了截面分析法,可将复杂的三维变形二维化,即在三维模面上提取二维模面的辅助线来定义和分析板料的变形。李小强等<sup>[21]</sup>应用截面分析法设计出执行钳口运动轨迹,然后将其转化为VTL1000型数控蒙皮拉形机驱动机构运动参数,通过ABAQUS有限元软件进行成形过程模拟,发现试验测量与模拟得到的面内主应变值相近,这验证了轨迹设计的合理性。

### 2 拉伸成形过程中的回弹问题

在蒙皮拉形成形过程中,回弹现象非常显著。了解拉形过程中的回弹规律,深入研究回弹问题,可以很好地控制拉形件的回弹。早期回弹现象的研究主要采用数学解析,由于实际拉形过程是一个同时包含几何、材料和边界条件非线性复杂的力学过程,因此,用传统方法通过大量假设和简化难以解决精确控制拉形过程中的回弹量。而随着计算机技术和塑性成形理论的发展,用数值模拟技术来预测和控制回弹量并提高产品的成形精度和装配质量,是解决拉形过程中回弹现象和进行模面补偿的主要途径。

目前,板料成形数值模拟的主要方法是弹塑性有限元法<sup>[22-23]</sup>,该方法不仅能计算工件的变形和应变、应力分布,而且还可以有效处理回弹问题,计算残余应力。Hessami等<sup>[24]</sup>采用理想弹塑性有限元模型,对板料的预拉、拉弯和补拉进行了数值模拟,研究表明拉力的施加方式对残余应力与回弹的变化有显著影响,并分

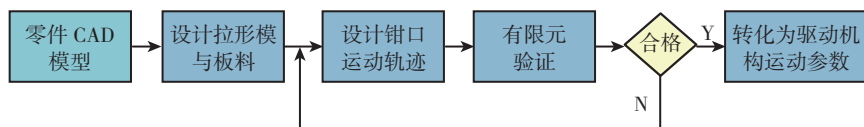


图4 蒙皮拉形加载轨迹设计过程

析了回弹后的残余应力。Socrate 与 Boyce<sup>[25]</sup> 为减少数值模拟的复杂和难度性,对带有垫层的可重构模具进行简化,在此基础上对蒙皮拉形过程中的回弹理论进行研究,将向前回弹法理论应用于可重构柔性多点模拉形过程,并模拟了回弹现象。Kutt 等<sup>[26]</sup> 用 ABAQUS 有限元软件对球形面和马鞍面的多点柔性模拉形过程进行了数值模拟,用试验法测得实际的回弹,通过分析试验法和数值模拟法两者之间回弹产生误差的原因,提出了一种用定量法测量双曲率复杂拉伸件回弹的方法,同时在对鞍形件和球形件蒙皮零件的数值模拟中用这种方法测量了回弹值,结果表明回弹数值随着板料厚度的增加而减少,随着首次屈服时轴向应变的增大而增大。Yan 等<sup>[27]</sup> 首先探讨了拉应变、材料参数(屈服应力  $\sigma_f$  和杨氏模量  $E$ )、板料厚度、板材弯曲曲率、拉形加载路径对多点柔性拉形过程中回弹的影响,然后用有限元软件 SAMCEF/MECANO 对球形件和柱形件蒙皮进行了模拟,分析了以上参数对回弹的影响。陈志红等<sup>[28]</sup> 对球形件和鞍形件的柔性多点拉形过程进行数值模拟,分析了板料厚度、曲率半径对球形件回弹的影响,获得了回弹的趋势和分布规律,即回弹量与板料的厚度成反比,与成形件的曲率半径成正比。

在多点柔性模拉形过程中,弹性垫材料对回弹的影响是一个不可忽视的因素,安丽娜等<sup>[29]</sup> 对具有 4 种本构模型的弹性垫材料的多点柔性拉形过程进行数值模拟,在数值模拟中为了提高计算效率,采用简化的带有弹性垫材料的实体模进行了模拟,结果表明,不同本构模型的弹性垫材料对回弹量的影响在板材不同位置有较大差别,尤其是 mooney-rivlin 模型与 yeoh 模型,在板材两端回弹量平均差高达 50%。为了研究回弹对拉伸件外形的影响情况,白飘雪

等<sup>[30-31]</sup> 根据零件的对称性,取零件的 1/4 建立了单曲率和双曲率蒙皮件的有限元模型,通过数值模拟分析了弹性垫层和板料自身回弹对零件成形精度的影响,并以此为依据修正模具的单元体高度得到优化的模具型面,而工艺试验验证表明了数值模拟的可靠性。

由于拉形过程中影响回弹的因素比较多,可应用神经网络进行参数优化以及回弹量的预测和控制<sup>[32-33]</sup>。张彬等<sup>[34]</sup> 将数值模拟与人工神经网络相结合,建立了用于拉形回弹量预测的人工神经网络模型,在模拟试验中对拉形采用预拉-弯曲-补拉的拉形轨迹,将影响拉形及回弹的主要因素和衡量指标作为网络的输入和输出特征,并分别用神经网络和数值模拟的方法计算和预测了回弹量,通过两组数据的比较,验证了预测模型的有效性。

目前,用数值模拟法对回弹预测进行模面补偿的回弹补偿算法主要有向前回弹法<sup>[35-36]</sup> 和位移调整法<sup>[37-39]</sup>。研究发现,位移调整法在收敛的快速性、准确性及通用性上要优于向前回弹法。王丽丽等<sup>[40]</sup> 根据位移调整法提出了适用于柔性多点模蒙皮拉形的模面补偿算法,建立了数值模拟的等效模型,并采用先进行板料回弹补偿再进行垫层变形补偿的模面补偿算法分别对单曲率和双曲率蒙皮零件进行了模面补偿分析,最后验证了该算法的可靠性。蔡中义等<sup>[41]</sup> 对马鞍形零件进行了数值模拟,结果表明弹性垫层的不均匀变形对零件精度的影响比回弹要大,因此为了获得精确的零件形状,可采取反复修正模具型面来补偿柔性多点拉形中的回弹以及弹性垫层不均匀变形。

### 3 多点柔性模拉形过程中弹性垫层的影响

拉形时多点模具的不连续性会导致板材与模具之间形成点接触,产

生局部集中载荷,在两者接触区域发生局部塑性变形,形成压痕,极大地破坏零件表面形态并影响零件的表面质量。为了抑制和消除这种表面缺陷,通常在多点模具与板料之间放置弹性垫层。弹性垫层材料与金属材料相比,有其独特的力学性能:超弹性、不可压缩性和大变形等<sup>[42]</sup>。这种橡胶类材料在产生大的应变时常呈现应力-应变的增强或软化效应,具有高度的几何非线性、材料非线性,能够在极大的应变(通常应变为 100% 或更高)下保持弹性变形。由于橡胶材料具有不可压缩性以及大变形非线性超弹性物理特性,其本构关系的表征、确定及数值实现都较为困难,从而使橡胶结构分析与设计中建立起的本构关系并不成熟,导致数值模拟后的结果与实际差别很大。

在多点柔性拉形过程中选用不同弹性垫材料的本构模型时,拉形结果也会出现差别。安丽娜等<sup>[29]</sup> 通过对 4 种不同本构模型(Mooney-rivlin 模型、Neo-hooke 模型、Ogden 模型、Yeoh 模型)的弹性垫拉形过程进行数值模拟,分析和对比了不同本构模型下 mises 应力、板料厚度、回弹量的不同,结果表明不同本构模型下 mises 应力和板料厚度差别不大,而回弹量最大差别发生在板料两端。

在多点柔性拉形过程中,使用弹性垫层的目的是为了抑制或消除零件上的压痕。Angnostou<sup>[36]</sup> 通过试验和数值模拟方法研究了拉形时弹性垫厚度和压缩量与压痕深度的关系。王丽丽等<sup>[43]</sup> 基于有限元软件 PAM-STAMP2G 平台开发了蒙皮拉形工艺仿真专用系统,针对截面尺寸为 30mm × 30mm 的多点柔性模具,利用所开发的系统研究了不同弹性垫层厚度对成形零件表面压痕的影响。周朝晖等<sup>[44]</sup> 通过对抛物柱面与马鞍面零件的柔性多点拉形过程进行数值模拟,研究了弹性垫层厚度对压痕的影响,研究表明使用合适厚度的弹

性垫层成形件结果与整体模具成形后的成形结果非常接近。在实际生产中,针对常规弹性垫层的不足,汪华等<sup>[45]</sup>提出了一种以橡胶为基体,以金属板条为加强结构的复合结构垫层,并对它进行了有限元建模,计算结果分析表明使用复合结构垫层后零件的成形效果要好于使用普通单纯的橡胶垫层,而且复合结构垫层厚度的变形比较均匀,可以直接使用基于实体模具进行的零件回弹补偿计算结果。Wang等<sup>[46]</sup>研究了弹性垫层厚度和基本单元体数量对柔性多点拉形时成形性能的影响,通过数值模拟,对多点拉形时工件的压痕缺陷和成形精度问题进行了分析。

### 蒙皮拉形过程需进一步解决的问题

(1) 现代飞机普遍采用翼身融合体设计,出现超临界机翼结构,需要大量的S形、马鞍形等复杂形状的蒙皮,这对拉形设备提出了更高的要求。因此,在柔性夹钳拉形机与多点拉压复合成形机的基础上,研制能够满足航空工业生产复杂蒙皮件的数控拉形设备将会变得更加迫切。

(2) 进一步研究可重构柔性多点模具的基本体调形装置,研制调形时间快、精度高的、成本又较低的闭环调形控制系统。

(3) 集CAD工艺设计、CAE仿真分析、可重构柔性工装、CAM数控成形技术为一体的飞机蒙皮数字化制造技术是未来发展的趋势。要实现蒙皮制造的数字化、精准化、柔性化水平,需要充分发挥柔性多点模具中基本单元体可调的特点进行调形补偿,采用数值模拟技术进一步研究成形工艺中各个环节的关键技术。

(4) 进一步对蒙皮拉形数值模拟精度进行深层次研究。建立能够真实反映材料模型的本构方程和选取恰当的屈服准则,尤其是建立弹性垫层材料的超弹性本构关系;建立

能够很好反映弯曲变形的单元模型;进一步研究回弹现象,综合考虑弹性垫层变形与板料自身回弹引起的回弹问题;对拉形模拟过程中复杂的接触问题进行研究,建立能够真实反映拉形过程接触摩擦情况的边界条件。

(5) 用数值模拟法对回弹进行预测要综合考虑引起回弹的各种因素。建立回弹数据库,确定回弹的主要影响因素,对拉形过程进行参数优化,建立参数数据库和专家系统,从而快速、准确地实现模面补偿。

### 结束语

飞机蒙皮零件的成形质量依赖于拉形设备和工艺参数,从装备和工艺着手,研制先进的数控拉形设备,制定先进的拉形工艺,可提高材料利用率和零件的成形精度,使能够适应多品种、小批量的零件生产。近年来,国内一些研究机构和航空制造企业都不同程度地对拉形设备进行了研究。其中,蒙皮柔性拉形装配技术因其具有的独特优势已经成为现代制造领域的重要研究方向,具有广阔的研究空间及应用背景。生产中,复杂蒙皮三维曲面的成形过程除受设备的影响外,工艺参数也是一个不可忽视的因素。通过数值模拟技术预测成形缺陷,对工艺参数进行定量控制,结合数字化工装设备可极大提高成形精度,并且对推进国内飞机蒙皮制造技术的数字化、精准化和柔性化水平至关重要。在数值模拟技术方面,尽管研究进展很大,但由于在数值模拟过程中有限元模型的简化和复杂的非线性因素的影响,计算精度会受到限制,得到的计算结果不能令人满意,亟待进一步研究。

### 参考文献

[1] Clough R W. The finite element method in plane stress analysis//ASCE. Proceedings of the second ASCE conference on electronic computation. ASCE, 1960: 345-350.

[2] 周磊,金建新,周瑞武,等. 飞机蒙皮拉形机数字化控制的研究. 机械工程师, 2003, 10:28-30.

[3] 李小强,李东升,杜宝瑞,等. 国外航空钣金专用制造技术与装备发展. 航空制造技术, 2012(15): 32-37.

[4] 侯红亮,余肖放,曾元松. 国内航空钣金装备技术现状与发展. 航空制造技术, 2009(1):34-39.

[5] 张彦敏,周贤宾,罗红宇,等. 双曲度飞机蒙皮拉伸成形轨迹优化与验证. 中国机械工程, 2006, 17(19):2053-2056.

[6] 冯朋晓,李明哲,付文智. 高柔性多夹钳拉形机的结构设计. 锻压装备与制造技术, 2010, 5:21-24.

[7] Hardt D E, Olsen B A, Allison B T, et al. Sheet metal forming with discrete die surface// Proceedings of the 9th NAMRC. 1981: 140-144.

[8] Papazian J M. Tools of change: Reconfigurable forming dies raise the efficiency of small-lot production. Mechanical Engineering, 2002, 124: 52-55.

[9] Papazian J M, Anagostou E L, Christ R J, et al. Tooling for rapid sheet metal parts production//Proceedings of 6th Joint FAA/DoD/NASA conference on aging aircraft. San Francisco, 2002.

[10] 邹方. 新一代飞机蒙皮拉伸成形柔性多点模具. 航空制造技术, 2007(11):30-33.

[11] 张文阳,李东升,李小强,等. 可重构柔性模具蒙皮拉形模面生产方法研究与实现. 锻压技术, 2009, 34(2):145-158.

[12] 刘纯国,李明哲,隋振. 多点技术在飞机板类部件制造中的应用. 塑性工程学报, 2008, 15(2):109-114.

[13] 刘益成,周贤宾. 蒙皮拉形机构运动分析. 航空制造技术, 2004(1):85-88.

[14] 李卫东,万敏,战强,等. 数控蒙皮横拉机运动分析与仿真控制. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(2):105-108.

[15] 于成龙,李东升,李小强等. VTL1000型数控蒙皮拉形机运动仿真系统. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1):87-92.

[16] Oding S S. Controlling the formation of double curvature skin elements on a program-controlled stretch former I. Soviet Aeronautics (English translation of Izvesiya VUZ, Aviatsionnaya Tekhnika), 1987, 30(3): 57-61.

本文共有参考文献46篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)