

飞机框肋零件橡皮囊液压成形回弹研究综述^{*}

Springback Research Assessment of Rubber Pad Hydraulic Forming for Aircraft Frame and Rib Part

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 闫红勇 刘 闯 王俊彪

[摘要] 回弹是影响飞机框肋零件成形质量的主要因素之一,通过分析影响框肋零件回弹的主要因素,对框肋零件橡皮囊液压成形工艺的回弹预测及控制研究情况做了综述,并将预测方法归类为解析法、有限元法、人工神经网络法和试验法4种,最后总结分析了框肋零件橡皮囊成形零件回弹控制方法的发展方向。

关键词: 回弹 框肋零件 橡皮囊液压成形

[ABSTRACT] Springback is one of the main problems which influence the quality of aircraft frame and rib part. By analyzing the main factors of affecting frame and rib parts' springback, the springback predict and control methods are summarized. And the springback predict methods are classified into four categories including theoretical method, finite element method, artificial neural network method and experimental method. Finally, the development direction of springback control method is analyzed.

Keywords: Springback Frame and rib part Rubber pad hydraulic forming

框肋零件常常用做翼肋、机身隔框或其他骨架零件,直接影响着飞机的外形准确度和结构承载能力,在飞机的整体框架中起着重要的作用。框肋零件主要采用橡皮囊液压成形。橡皮囊液压成形工艺是利用橡皮囊作为弹性凹模(或凸模),用液体作为传压介质使金属板料随刚性凸模(或凹模)变形的一种软模(凸模或凹模)成形方法,如图1所示。在橡皮囊成形过程中,橡皮既是传压介质,也起到半模的作用。橡皮囊液压成形具有许多优点,它可以实现落料、弯边、拉深、成形和切边等多种冲压工艺^[1]。

框肋零件橡皮囊液压成形的主要缺陷有破裂、起皱和回弹等^[2],其中回弹是影响框肋零件成形质量的突出问题。因板料的塑性成形过程中存在着弹性分量,因此成形力卸载后必然会产生回弹。

目前,企业在设计橡皮囊液压成形模具时尚未完全

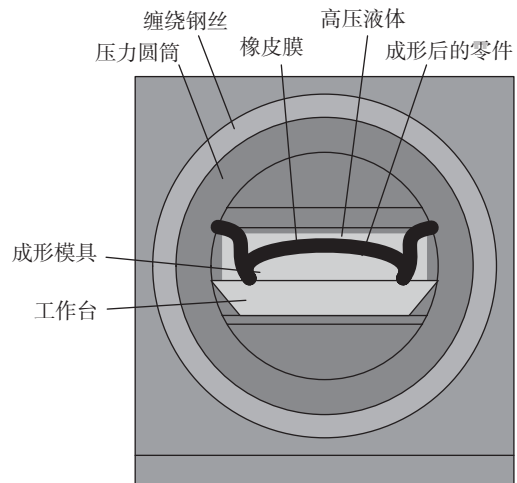


图1 橡皮囊液压成形原理

Fig.1 Principle of rubber pad hydraulic forming

考虑零件成形后的回弹因素影响,模具外形设计以零件的内型面为主要依据。为了满足装配要求以及防止发生干涉现象,只在下陷结构处加深 0.3mm 左右作为回弹补偿^[3]。由于飞机零件产量小和品种多的特点,采用试错法进行回弹修正成本高。零件采用原始检验模进行制造,橡皮囊液压成形后,由于回弹不能贴模,需要大量的人工校形才能达到设计的形状。生产效率低、劳动强度大,产品的强度和疲劳均造成一定的下降,且板料表面会留有大量的锤印迹,影响零件的外观。

1 弯边回弹影响因素分析

飞机框肋零件的结构复杂,通常是平面带弯边、变斜角,外缘为变曲率的复杂形状零件,并且在零件上一般分布有减轻孔和加强梗(图2)。而影响框肋零件成形质量的回弹主要表现为弯边结构处的回弹。

弯边的回弹是弯曲过程中的弹性变形和残余应力释放的过程,受到诸多因素影响。

(1) 材料的机械性能^[4]。

主要是屈服强度 σ_s 、弹性模量 E 和硬化指数 n 。

$\frac{\sigma_s}{E}$ 大的材料在总应变中弹性应变分量,因此卸载时

^{*} 国家 863/CIMS 主题资助项目(2007AA04Z139); 国防基础科研资助项目(D0620060428)。

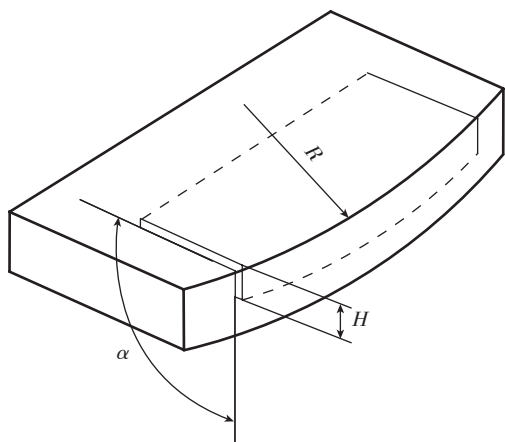


图2 飞机框肋零件
Fig.2 Aircraft frame and rib part

弯曲回弹大。 n 表示材料变形的强化能力, n 越大, 板料的变形能力越大, 回弹量越小。

(2) 零件的几何尺寸。

主要是相对弯曲半径 $\frac{R}{t}$ 和弯曲角度 α 。相对弯曲半径表示弯曲变形的程度。相对弯曲半径越小, 断面中塑性变形区越大, 切向总应变中弹性应变分量所占的比例越小, 回弹量随相对弯曲半径的减小而减小。弯曲角度越大, 则变形区越大, 回弹累计值越大, 回弹角也越大, 所以回弹角随弯曲角度的增大而增大, 如图 3 所示。另外, 成形时沿弯边轮廓线方向凸弯边受压缩, 凹弯边

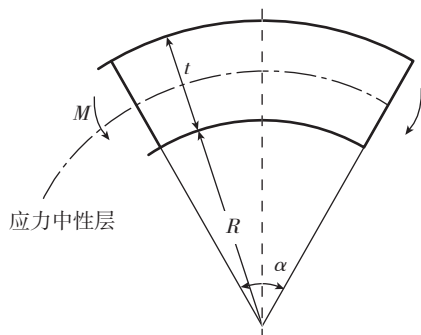


图3 零件弯曲几何尺寸
Fig.3 Bend parameter

受拉伸, 其回弹量不相同。

(3) 成形工艺参数。

主要是成形压力和保压时间。提高成形压力能提高零件的贴模度, 从而显著提高零件的形状清晰度。过小的成形压力会使零件得不到充分成形。保压时间对回弹的影响和成形压力类似, 适当延长保压时间, 可以减小成形后的回弹。影响框肋零件弯边回弹的参数还有机床型号、润滑条件和橡皮硬度^[5]等。

在实际生产中, 零件的材料和尺寸是根据使用要求

决定的。零件材料类型确定后, 其性能参数为一组固定的数值。在几何参数中, 零件外形因使用功能要求在零件设计时即已确定。所以这 2 类参数都不可调整。可通过调整成形压力和保压时间实现对回弹的控制。

框肋零件的塑性成形本身是一个连续的非线性过程, 实际成形过程中, 不同参数引起的回弹变化的规律不一致, 且各参数之间存在相互耦合作用, 单一参数的影响规律不足以判断回弹量的变化趋势。不同参数对回弹影响的权重也不同, 部分参数对回弹的影响大, 部分参数对回弹的影响较小。

2 弯边回弹的预测

弯边回弹预测的研究方向可分为 4 个方面: 解析法、有限元法、人工神经网络法以及试验法。

2.1 解析法

解析法主要基于塑性力学对弯曲成形的回弹过程进行适当简化, 建立一些描述和预测回弹的力学模型, 以揭示成形中回弹现象的本质, 对回弹的过程等进行理论预测。解析法有变分法、最小势能、余能方法等。

回弹解析的理论研究主要基于 2 种理论: 一种是 Ludwik 塑性弯曲工程理论, 其采用平截面假设, 忽略横截面的径向应力, 建立了梁塑性弯曲的工程理论。另一种是 Hill 塑性弯曲精确数学理论, 其假设材料是理想刚塑性材料, 认为板材在弯曲变形时的应变是平面应变, 提出了中性层移动的概念, 建立了塑性弯曲成形的精确数学理论^[6]。文献 [7-8] 等对回弹的理论研究进展情况进行了详细的评述。

橡皮囊液压成形会受到大量不同参数的影响, 增加了其回弹现象的复杂性。而由于力学模型对实际情况都进行了相应的简化, 按这些公式计算得出的回弹量与试验数据结果存在一定的差别, 故只能对复杂的成形回弹问题做出定性的判断。

2.2 有限元法

有限元法即数值分析法。有限元法是根据由试验和理论方法所得到的材料本构关系、摩擦定律及有关力学原理和简化假设, 建立利用计算机求解成形过程的数学模型, 从而计算出工件在成形过程中各瞬间的位移、应变和应力分布, 预测工件的回弹等。

回弹发生于板料的卸载过程, 因而其有限元模拟包括回弹前板料成形过程的模拟和回弹后板料残余应力释放过程的模拟。影响回弹模拟精度及计算效率的因素有材料的本构关系、单元的类型及尺寸、有限元算法(包括成形过程模拟算法和回弹过程模拟算法)、接触算法及摩擦模型、回弹计算方法(有模法和无模法)等, 尤其是流过模具圆角部位材料变形的模拟, 不仅接触摩擦

最为严重,而且非线性问题最为突出^[6,9]。

目前,板材成形的模拟技术已开始进入应用阶段。依据求解方法可将数值模拟软件分为动力显式和静力隐式。动力显式软件采用中心差分算法,不需要刚度矩阵的集合,不存在收敛性问题,适合于大型覆盖件的模拟计算。但其回弹、起皱计算能力较差,如 LS-DYNA3D、PAMSTAMP、ABAQUS-Explicit、DYNAFORM 等。静力隐式软件适合于车身覆盖件的冲压成形问题,计算结果也是无条件稳定的。但是,由于接触状态等的改变,容易引起收敛速度变慢或发散,计算效率低,如 AUTOFORM、MARC、ABAQUS-Standard 等。对于回弹分析,目前一般采用动静联合算法求解^[10],以动力显式算法求解成形过程,然后将其结果作为静力隐式算法的输入进行回弹计算,能极大地提高回弹计算效率和精度。一些有限元软件如 ABAQUS、PAMSTAMP 等均提供了橡胶类材料的有限元模型,可以在合理的假设上建立橡皮模型,较为真实地模拟框肋零件橡皮囊液压成形过程^[11-12]。

橡皮囊液压成形属于软模成形方法,可以成形半球形件、半管、头盔等特殊形状的零件^[13-15]。通过有限元模拟已经对橡皮囊液压成形过程的多种工艺参数进行了分析^[5,16],但是由于该方法的特殊性,影响橡皮囊液压成形模拟精度的因素还有很多,包括加强筋^[13]和侧压块^[17-18]的使用、橡皮硬度^[19]、橡皮垫厚度等参数。针对橡皮囊液压成形回弹的研究较少。陈磊等选取材料为铝合金 2024-T3 的翼肋零件,对其翻边回弹进行了数值模拟。数值模拟与试验结果吻合较好,模拟与试验间的偏差是板料发生加工硬化所致^[20]。

框肋零件的回弹是一个非常复杂的物理过程,有限元模拟过程中的材料模型、单元技术等许多问题都还有待于进一步的探索,因此,其模拟技术的研究有着广阔的发展前景。发展针对橡皮囊成形工艺问题的有限元数值模拟专业系统,克服对人的依赖性,是未来有限元模拟技术发展的一个趋势。

2.3 神经网络法

回弹是材料性能、零件尺寸、工艺参数等多因素反应的结果,是典型的多参数耦合非线性问题,符合人工神经网络的特点。利用神经网络可以开发专门的回弹预测程序。首先依据参数等确定网络的结构,然后利用输入输出样本集对网络进行训练,从而使网络实现指定的输入输出的映射关系。网络训练过程是一种对网络的权值和阈值不断进行学习和修正的过程。人工神经网络法已应用于槽形件^[21-22]、U 形件^[23]、蒙皮拉形^[24]、型材拉弯^[25]、薄板的翻边^[26]、汽车钣金件^[27]等的回弹预测中。文献^[28]将人工神经网络应用于框肋零件的回弹

预测中,建立了框肋零件直弯边和曲线弯边的弯边回弹预测模型。通过与试验结果或模拟结果的比较,通过上述人工神经网络模型得到的预测结果都能达到其预测精度的要求。

在利用神经网络精确预测回弹量的基础上,可以进一步对成形的工艺参数进行优化。张彬^[29]针对 V 形弯曲件,将弯曲角作为神经网络的输入项,冲头行程作为输出,实现了冲头行程对回弹的控制。张玉平^[30]针对 U 形弯曲件,采用小步长的搜索方法,在已得到的最值点附近对每个变量增加微小步长,把这些参数搭配成新的参数组合进行回弹量的预测,逐渐缩小工艺参数优化的搜索范围直到得到更小回弹量对应的参数组合。

虽然神经网络在回弹预测中得到了成功应用,但是其具有易陷入局部极小和收敛速度慢的缺点。针对这些缺点,黄智等^[31]利用自适应模糊神经网络(ANFIS)对非线性问题的良好逼近能力,构建了回弹预测的 ANFSI 模型。崔令江^[32]将遗传算法与神经网络结合,建立了遗传神经网络来进行 U 形件回弹的预测。赖欣武^[33]把组合预测方法引入板料冲压领域,提出了基于 BP 神经网络的组合预测回弹方法。采用将神经网络与遗传算法等方法相结合的方式回弹预测,不仅能克服传统神经网络局部收敛的缺陷,并且有助于提高网络的学习速度和预测精度。

利用神经网络进行回弹预测时,用于训练网络的样本大多是通过数值模拟的方法获得的。将神经网络与数值模拟方法相结合,仅使用部分数值模拟结果作为网络训练样本进行网络训练,再利用神经网络对成形件的回弹量进行预测和优化控制,可以大大提高成形数值模拟的效率和预测精度。将人工神经网络技术应用用于板料回弹的预测中是未来发展的方向。

2.4 试验法

试验研究可以验证用解析法、数值方法以及人工神经网络法所得结果的正确性。陈磊等^[34]采用理论分析了不同材料厚度和圆角半径下 90° 直弯边的回弹量,进行试验发现分析值比试验值普遍要高 0.5° 左右。

试验研究还可以直接获得实际结构(或相似模型)在真实工艺条件下回弹前后的数据,进而整理成经验公式或图表,以供生产和设计时参考。航空制造工程手册的飞机钣金工艺分册提供了一个回弹计算公式,模线样板分册提供了一套经验数据,可直接用于回弹模具的修正^[35-36]。ABB 公司给出了当压力为 100MPa 时几种常见材料的回弹量^[2]。

通过试验可同时对某具体材料及工艺条件建立起经验模型并用于回弹的工程控制。Yavari 等将框肋零件的回弹分为 2 种类型分别建立模型:第一种类型的回

弹是由直线弯曲引起的并且可以表示为材料厚度、弯曲半径、弯曲角度以及成形压力的函数；第二种类型的回弹是由曲线弯边引起的并且可以表示为材料厚度、弯曲半径、弯曲角度、轮廓半径以及成形压力的函数^[37]，给出了3种常见材料的计算系数。Kulkarni等^[38]也建立了框肋零件的回弹迭代计算公式，考虑了几何、材料、工艺参数对回弹的影响，并且采用迭代的方法计算直至通过补偿回弹后的模具成形的零件形状逼近零件设计形状为止，提高了计算精度。

不同于理论模型，试验模型主要是通过试验数据建立回弹量与参数之间的关系，所以需要很多的数据。而且经验模型随不同材料而异，所以通常仅适合于一种材料。经验公式若能充分考虑成形中的各种回弹影响因素并且通过大量的实际零件成形数据进行系数的确定，会更加接近实际情况，其回弹预测精确程度会更高。由于经验公式一般建立在大量的试验和生产数据的基础上，因此，回弹预测的精度与大量试验或对生产中的零件成形参数信息及回弹量进行准确记录有关。

3 弯边回弹的控制

回弹预测是对成形回弹的提前分析，其后需要用这些结果设计一个能达到产生零件目标形状的最优化的工艺参数或模具，即回弹控制。回弹的控制方法分为工艺控制法和几何补偿法。通过调整工艺参数，可以尽量减小回弹，但是由于回弹的不可避免性以及框肋零件橡皮囊液压成形工艺的特殊性，通常采用模具补偿方法。

为了提高模具设计效率，可先对零件数模实施回弹修正，再将修正后的零件型面提供给模具设计，间接实现模具的回弹修正。对于框肋零件的回弹，J.H.Kappert等^[39]将框肋零件弯边回弹分为弯曲半径和弯曲角度回弹2部分。单一补偿角度忽略了圆角部分回弹的影响，而同时补偿2部分回弹会使模具圆角减小，增加了弯边成形难度，不利于保证零件的成形精度。根据框肋零件的承力特点和精度要求，弯边角度的准确度要求较高，而圆角半径部分要求相对较低，可以用过弯补偿弯曲角度的回弹，弯边轮廓线向腹板面偏置一定距离补偿弯曲半径的回弹，而圆角半径保持不变，零件成形回弹后弯边角度与设计模型相符合^[40]。

利用有限元模拟的方法可以对整个模具型面进行精确修正，修正的过程是基于零件设计模型进行反复迭代的过程。基于有限元的模具修正的思路是：首先按零件的设计形状设计初始模具形状，利用有限元软件进行成形和回弹分析，得到回弹后的零件模型以及回弹量，然后根据回弹量反求得到新的模具型面，重新进行成形和回弹分析，再次得到零件回弹后的形状，反复迭代直

到回弹后零件形状满足要求，从而得到修模后的模具型面。

上述思想中关键的算法是回弹量的计算以及基于此回弹量的模具修正方法。Karafillis等^[41]提出了基于面力描述法的修模方法，是在冲压成形结束后算出制件上的分布面力，并以弹性反加载方式施加与此面力等值而方向相反的力来计算回弹量。邵鹏飞等^[42]提出了“位移描述-结点修正”法，是利用动力松弛法计算出制件网格上每个结点的回弹量，按此回弹量对模具网格结点根据插值算法施以一定大小的相反位移，获得新的模具形状。其在迭代过程中无需进行模具型面的几何再造型和网格重划分，模具的最终形状由最后一次修正的网格结点通过曲面拟合完成，但是其收敛速度较慢，且依赖于边界条件的选择。Wei Gan等^[43]开发了位移调整法，是将零件回弹后的形状与目标零件形状进行比较，得到零件每个节点的位移向量。基于此向量往回弹相反的方向移动定义模具型面的结点，该方法可以不依赖于零件的对称性来收敛。李春光^[44]提出了应用交互式的平均偏差因子直接补偿法，其在全局补偿的同时可以对特殊区域进行局部的因子补偿，提高了补偿的精确性。

由于框肋零件的特殊性和复杂性，液压成形模具具有不规则性。在实际的零件制造之前，应用有限元软件进行预先补偿分析，可以大大降低零件的制造成本。

4 结束语

随着航空工业的发展，对框肋零件的成形精度要求越来越高，精密成形成为零件制造的发展趋势。而且飞机框肋零件种类多、批次多、单件数量少，要求必须提高零件回弹修正的效率。因此，回弹问题成为制约模具设计和产品质量的重要因素。

通过以上分析，可以得到回弹的研究与有限元法以及人工神经网络法的结合是未来的一个发展方向。

目前，有限元方法已经开始得到应用，但是，利用有限元方法需要花费大量的时间。而利用人工神经网络法与数值模拟的方法相结合，可以只使用部分数值模拟结果作为网络训练样本进行训练，用训练完成后的网络对回弹进行预测，再利用有限元方法对回弹结果进行预测，可以大大提高数值模拟的效率，大量节省数值模拟所需要的时间。随着计算机性能的不提高和有限元、人工神经网络技术的向前发展，回弹的预测及控制将更加精确和快速。

本文有参考文献44篇，因篇幅所限未能一一列出，读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)