

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2010.01.028

钣金橡皮液压成形过程的研究进展

陈磊^{1,2}, 张亚兵², 李善良²

(1. 江西蓝天学院机械工程系, 江西南昌 330098;

2. 西安飞机工业集团有限责任公司钣金总厂, 陕西西安 710089)

摘要: 阐述橡皮成形技术的基本概念、应用和最新进展。分析钣金橡皮成形技术的特点, 对其主要研究领域及关键问题的研究与进展情况进行了分析与总结, 并预测了这一技术的发展方向与趋势。

关键词: 钣金; 橡皮液压成形; 起皱; 回弹; 进展

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2010)4-082-3

Development of Rubber Fluid Forming of Sheet Metal

CHEN Lei^{1,2}, ZHANG Yabing², LI Shanliang²

(1. Department of Mechanical Engineering, Jiangxi Blue Sky University, Nanchang Jiangxi 330098, China;

2. Sheet Metal Factory, Xi'an Aircraft Industry Group LTD, Xi'an Shaanxi 710089, China)

Abstract: The concept, application and new development of rubber forming were presented. The characteristics of rubber forming process were analyzed, and the main research areas as well as the research and development situation of key problems were analyzed and summarized. The developing direction and trend of rubber forming technology were forecasted.

Keywords: Sheet metal; Rubber fluid forming; Wrinkling; Springback; Development

飞机钣金零件具有产量小、品种多的特点,一架飞机上有上万件钣金零件。橡皮成形是飞机钣金成形的主要方法之一。橡皮成形技术属于金属板料塑性成形的范畴,是指用橡皮垫或者液压橡皮囊作为通用的凸模(或凹模),将金属板料按照刚性凸模(或凹模)加工成形的办法。在成形过程中,橡皮既是传压介质,也起半模的作用,橡皮作用在模具上的载荷具有多向性,使刚性半模处于三向受压状态,模具在工作台上不需精确定位,压边力在变形过程中随液压力的增加而增加。与常规的冲压生产相比,橡皮成形不是靠冲压设备和冲模的简单直线往复运动或回转运动完成零件的制造过程,而是利用橡皮半模向刚性半模的逐渐包裹或流动充填实现零件的制造。因此,运用橡皮成形方法可制造出形状更加复杂的零件,减少或简化模具,减少成形工序次数,缩短生产准备周期,提高贴模精度及改善零件表面质量,能够更好地解决零件强度、刚度、尺寸和精度之间的矛盾。同时,它也是一种能耗低、噪声低和污染少的加工方法。利用高压橡皮成形的零件可以不经修整或少量修整便可直接用于装配,很适用于中、小批量生产和试生产。

从20世纪30年代起,橡皮成形工艺就成为飞机制造业中的一种非常重要的加工方法。国外现代化

的飞机制造厂,橡皮成形零件已占飞机钣金零件总数的50%以上,国内也占35%~40%。橡皮成形和其他的板料成形方式一样,也存在着回弹、起皱和破裂问题,其中回弹问题是橡皮成形的难点。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。目前飞机橡皮成形工装设计均不考虑回弹修正,采用原始检验模进行制造,橡皮成形后,由于回弹,板料不贴模,需要大量的人工校形才能达到设计的形状,产品生产率低,劳动强度大,产品的强度和疲劳强度均有一定下降,且板料表面有大量的锤印迹,影响零件的外观。

随着计算机技术、有限元理论和塑性加工理论的发展,板料成形过程的数值模拟技术已经开展起来^[1-3]。它为工序方案的制定和优化提供了一种途径。作者对橡皮成形过程的原理,零件分类和关键技术进行了综述,并对发展趋势进行了展望。

1 零件质量控制

钣金零件制造的质量控制总体上分为两个方面,即外在质量控制和内在质量控制。外在质量主要指零件的几何形状的准确度、表面和边缘的质量。内在质量主要指零件成形后,材料所具备的物理、化学性能及力学性能。

成型件外在质量对于装配问题和最终件的形状

收稿日期: 2009-02-20

基金项目: 江西省教育厅青年科学基金资助项目(GJJ09620)

作者简介: 陈磊(1979—),男,博士,主要研究钣金精密成形技术。电话: 0791-8136150, E-mail: ujs_cl@163.com。

方面是非常重要的。关于成型件的外在质量主要考虑的是成形性和尺寸精度。在成形过程中材料成形性与承受起皱（由过量压缩导致）和破裂（由过量拉伸导致）的能力有关，即零件在成形过程中的厚度增厚或者减薄。另一方面，尺寸精度包括成型件卸载后的回弹最小化。回弹影响成型件的几何形状。在成型件中尺寸变化影响最终件装配过程，导致配合和表面抛光性能差、风隙噪声高和漏水等问题。成形过程的连续性也影响随后的装配。过程干扰（如材料参数不稳定、润滑）引起的尺寸变化与连续性相关。目前对于飞机装配质量的要求日益提高，公差要求严格控制在较小的数值范围内，这对外在质量提出了更高的要求。

零件经过塑性变形后，材料的理化性能和力学性能将发生明显的变化，强度和硬度提高，塑性和韧性下降，电阻率增加，抗腐蚀性能降低，同时在材料内部产生了一定的残余应力。保证钣金零件的内在质量是飞机使用安全可靠的前提条件之一。内在质量受外在质量的影响较大，要提高内在质量，需要开展精密成形技术的研究，国外飞机公司已经严格限制零件的手工校形量以提高钣金零件的质量。

2 橡皮成形原理与零件分类

2.1 橡皮成形原理

橡皮成形或高压橡皮成形，对于中小批量的钣金零件来说，是一种经济的现代成形方式。橡皮成形采用橡皮胎（包括内胎和外胎）及唯一的由价格低廉的材料制成的刚性半模成形，模具生产准备周期短。在橡皮成形过程中，经加压流体的液压作用使板料通过柔性胎受压，并迫使坯料成为刚性半模的形状。橡皮成形过程的设备目前主要有两种类型，一种是橡皮垫成形，另一种是橡皮囊成形。橡皮囊成形由于压力大，可调范围大，在航空工业中迅速得到了广泛的应用，橡皮囊成形过程原理如图1所示。

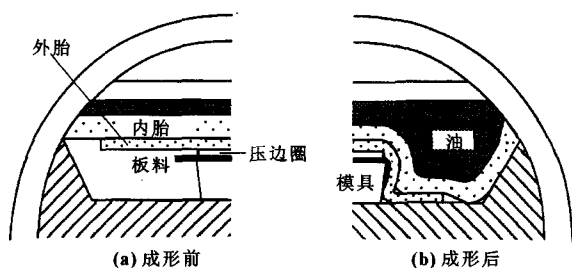


图1 橡皮囊成形过程示意图

将坯料放置在成形半模上，此半模可以方便地放在压力机工作台内。将工作台开入压机内，另一半模具，即带有内部加压油的内胎已处于压机内。

将油打入压机，并迫使橡皮胎将坯料覆盖在整

个半模上。高而均匀分布的成形压力允许零件的内凹及翻边部分在一次压制中成形。

卸压后，压机工作台从压机中退出，并可取出成形零件。然后，压机处于一个新的操作过程的准备状态。

图2显示了瑞典ABB公司生产的橡皮囊液压成形设备，目前最新型液压机的最大成形单位压力达到140 MPa。

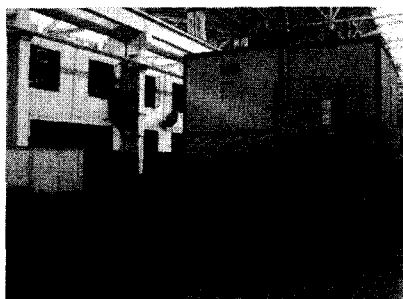


图2 橡皮囊液压机

2.2 橡皮成形零件类型

橡皮成形是利用橡皮垫或液压橡皮囊作为凹模（或凸模），将金属板材按刚性凸模（或凹模）加压成形的方法。基于上述特征，橡皮成形零件主要为翻边类零件，也包含有一些浅拉深和压窝类零件。图3显示了几类零件的图形。

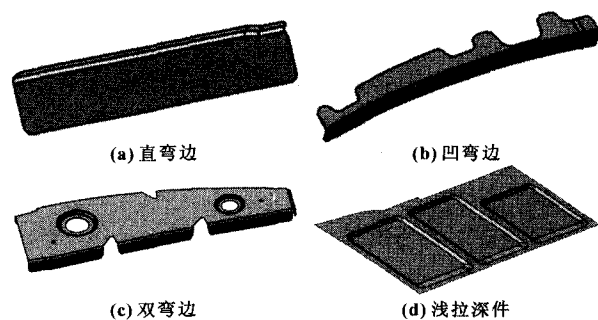


图3 液压成形图片

3 钣金橡皮成形关键技术问题

3.1 回弹控制

钣金精确制造关键技术之一是控制回弹，典型回弹如图4所示。回弹不仅是工业生产中的一个实际问题，也是学术界关注的热点^[1]。关于回弹目前已经进行了很多研究，有很多回弹量描述方法如截面开放角度、侧壁弯曲半径和凸缘角度等。回弹的经验和理论研究表明回弹和材料性能、模具设计、过程变量有

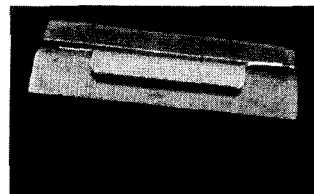


图4 典型回弹

关。材料性能包括屈服强度、杨氏模量、应变强化系数、各向异性等。模具设计包括圆角半径、模具间隙、半径厚度比、模具间隙厚度比等。随着计算机技术、塑性力学和有限元理论的发展,解决回弹问题进入了理论阶段。目前研究集中在 3 种可能方法来解回弹问题。解析法是一种基于塑性力学的理论预测方法;模具试验法是一个预过程来调节模具设计和过程变量;有限元分析法是通过离线分析来模拟成形过程及其回弹变形。解析模型,提供了预测弯曲问题回弹量的闭式解决方案,其中一些用于模具设计,修改模具参数。尽管回弹能够方便地用这些模型预测,但是它们的应用受到限制,难以处理复杂的三维成形过程。不同于理论分析模型,试验模型主要依赖于试验数据建立回弹与不同几何参数和过程的关系。如果缺乏理论背景,就需要很多的数据来建立一个可信赖的模型。试验模型随不同材料而异,所以通常它们仅适合于一种材料。与理论模型相似,经验模型只是对简单的操作如二维拉伸弯曲、压弯机弯曲适用。尽管经验模型看起来比理论模型更实际,但是对于实际生产仍不实用,是一个费时、费力和费用高的过程。由于通用有限元程序的建立,板料成形过程的中心问题已经转移到选择有限元类型模拟板料成形、动态执行变形过程和模拟板料和模具之间的相互作用^[2-3]等方面。数值模拟的优点是数值模拟允许缺陷问题在昂贵的模具制造前确定和分离。然而,由于材料和过程的不同,有限元法的精确度很大程度上依赖于数值解决技术和准确描述材料行为和过程条件模型。采用有限元,建立不同特点的更加复杂的理论模型,大大提高预测的准确性。目前已有很多商业有限元软件(如 LS-DYNA3D/LS - NIKE3D、MSC. Marc、Dynaform、Abaqus、Pam - stamp、INDEED 等)。很多学者采用数值模拟方法,在成形和回弹模拟方面已经做了广泛的研究,研究包括材料、过程因素、不同有限元方法、显隐式方法、从工业应用和试验验证中采用实际方法等。

3.2 起皱控制

钣金精确制造的另一个关键技术是控制起皱,见图 5。从力学分析的角度来看,起皱是板块或壳体在某种局部压应力作用下产生屈曲并出现后屈曲大变形的外部宏观表现^[4]。钣金橡皮成型零件具有凸弯边和下



图 5 凸弯边起皱

陷特征,经常会发生起皱。起皱的预测和控制是数值模拟的难点。许多学者对塑性失稳起皱问题进行了大量的研究和探讨,这些研究涵盖了从实验研究、理论分析到数值模拟,从薄板拉深成型、液压成型到弯管成型,从起皱、后起皱预测到失稳控制等诸多方面。采用有限元模拟预测起皱是控制起皱的发展趋势。对于橡皮成型过程,控制起皱可采用侧压块方法,对于侧压块的参数优化研究较少,需要进一步研究。就钣金零件的精确制造,国外采用 3 种方法:①对于一些成型机理比较简单的,通过与设备制造厂、专业软件公司进行协作,编制和使用成型模拟软件来减小回弹对成型精度的影响;②对一些成型机理复杂、批量较大的零件,针对具体零件将回弹研究交给专业院校进行研究,并将研究成果应用到生产中;③建立专家数据库,经过长期的数据积累,形成一些经验公式或数据表,应用到生产中去,并根据实际生产充实数据库。目前,波音公司在液压成型方面主要采用的是第三种模式,通过积累的数据库基本解决了 85% 的液压成型回弹问题,剩下的则是通过成立临时的工作队,进行研制攻关。欧洲的一些设备生产厂,为了提高自己设备的市场竞争力,并为用户提高生产效率,实现双赢,积极与一些研究部门进行合作,针对专用设备,编制出有针对性的仿真模拟软件,如:法国 ACB 公司针对蒙皮拉形的 S3F 软件。

3.3 国内外研究

国外对橡皮成形研究主要集中在飞机企业,如麦道公司曾经出版了橡皮成形手册,但是国外标准与国内差异很大,以英寸为单位,不适合国内使用。国际上关于橡皮成形的论文很少,检索 SCI/EI 只有两篇^[5-6]。国内对于橡皮成形的研究较少,南京航空航空大学的李靖谊教授^[7-8]曾在九五支持下进行了橡皮成形的数值模拟软件的开发,并对橡皮成形零件进行模拟。作者曾在某公司从事博士后研究^[9-11],开展橡皮成形过程的精确制造研究,研究主要以试验和统计回弹规律为主,对回弹控制的机理和数值模拟模型研究较少。

4 展望

橡皮成形作为一种特定的钣金成形方式,属于塑性成形的范畴。由于飞机钣金零件产量小、品种多,橡皮成形是飞机钣金生产的主要方式之一^[12]。板料成形有限元数值模拟经过了 30 多年的研究,已经有了专业的数值模拟软件,在国外,所有的模具开发均要经过数值模拟的检验,采用数值模拟方法是板料成形模具设计的发展趋势。对于钣金橡皮成形,

(下转第 63 页)

累误差。例如,图6中若缸11下行先到达行程端点,挡块触动行程开关2S,2S给相对应的换向阀4发信号,使4DT得电,换向阀4处于上位,此时,泵出口处的高压油进入液控单向阀7的控制腔,打开液控单向阀7,液压油由缸10下腔通过液控单向阀7,换向阀4,和液控单向阀8进入缸12上腔,而不再经过缸11,进行补油,使后面的液压缸继续下行,到达行程端点。如有2个或3个缸先后到达行程端点,其工作原理与之相同,相信读者可自行分析,这里不再阐述。这样,下行中积累误差便可消除。

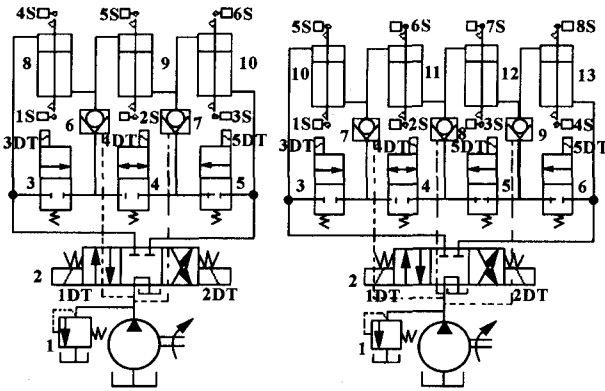


图5 改进后新回路之四

图6 改进后新回路之五

这里需要注意的是,在所有液压缸都到达行程端点后,所有行程开关同时断电,所有二位二通电磁换向阀复位。

3 新同步回路的特点

(1) 可消除双向积累误差。

(2) 新同步回路使用了价格便宜的三位四通电磁换向阀和二位二通电磁换向阀,可避免在缸筒和缸盖上另开油孔,减少加工工序,从而可避免油孔带来的应力集中问题,延长液压缸的使用寿命。

(3) 在活塞返回运动到位后,换向阀2换到中立,泵可卸荷,降低了能耗,提高了效率。

(4) 由于回路中有泄漏,液压泵供油压力至少是所有液压缸工作压力之和。

(5) 图2、4、5和6结构由于有液控单向阀的存在,密封好,同步精度高,管路连接较安全,可避免外负载突然增大时对液压元件造成的冲击,但造价相对较高,适用于同步精度要求高的中小功率液压系统。

(6) 图3结构由于无液控单向阀,在外负载突然增大时,由于换向阀的密封问题,会有部分油液通过换向阀流失掉,从而影响同步精度,所以该结构只能用于低压、对于同步精度要求不高的液压系统中。

参考文献:

- [1] 汪大鹏,刘白,任水英,等.带补偿装置串联液压缸的新同步回路[J].机床与液压,2000,6:84-85.
- [2] 汪大鹏,吴宪平,夏卿坤,等.对串联液压缸的新同步回路的改进[J].组合机床与自动化加工技术,2003(12):54-55,57.
- [3] 汪大鹏,吴宪平,夏卿坤,等.对单杆串联液压缸的新同步回路的改进[J].机床与液压,2004(4).
- [4] 汪大鹏,刘白,王璐佳.双杆串联液压缸带补偿装置的新同步回路[J].组合机床与自动化加工技术,2000(11):30-32.
- [5] 汪大鹏,戴娟,郝诗明,等.双杆串联缸同步回路补偿新结构[J].建筑机械,2005(12):94-96.

(上接第84页)

与冲压成形类似,但又有本质区别,需要开展专门研究,建立一种可靠的数值模拟模型,以适应我国大型飞机设计制造的需要。

参考文献:

- [1] 朱东波,李涤尘,卢秉恒.板料成形回弹问题研究新进展[J].塑性工程学报,2003,7(1):11-17.
- [2] 钟志华,李光耀.薄板冲压成型过程的计算机仿真与应用[M].北京:北京理工大学出版社,1998.
- [3] 林忠钦.车身覆盖件冲压成形仿真[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 李恒,杨合,詹梅.薄壁件塑性成形失稳起皱的国内外研究进展[J].机械科学与技术,2004(7):837-844.
- [5] Giuseppe Sala. A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies; part II aluminium alloys rubber-forming[J]. Materials and Design, 2001(22):299-315.
- [6] Asnafi Nader. On stretch and shrink flanging of sheet aluminium by fluid forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96(1/3):198-214.
- [7] 李靖谊,王化明,张中元.基于非线性有限元的钣金件成形极限研究[J].机械科学与技术,2002,21(4):517-519.
- [8] 李靖谊,王化明,张中元.弯曲半管橡皮成形工艺过程数值模拟研究[J].计算力学学报,2003,20(1):43-48.
- [9] 陈磊,邱晔,李善良,等.橡皮液压凸弯边成形试验与分析研究[J].锻压技术,2007,32(6):58-60.
- [10] 陈磊,邱晔,李善良,等.新淬火铝合金板材成形回弹试验与数值模拟[J].锻压技术,2008,33(1):44-46.
- [11] 陈磊,邱晔,李善良,等.橡皮液压成形直弯边回弹试验与分析研究[J].塑性工程学报,2008,15(3):47-50,60.
- [12] 《航空制造工程手册》总编委会:航空制造工程手册(飞机钣金工艺)[M].北京:航空工业出版社,1992.