

# 复合材料制件Invar钢光顺 模具型板冲压成形回弹性能研究\*

李玉杨<sup>1</sup>,赵安安<sup>1</sup>,张礼康<sup>1</sup>,杨超<sup>1</sup>,黄朝炎<sup>2</sup>,胡勇<sup>2</sup>

(1. 中航飞机股份有限公司, 西安 710089;

2. 武汉理工大学交通学院, 武汉 430063)

**[摘要]** 针对双曲面板材回弹难以预测,对成形效率和质量存在不利影响的问题,对基于活络方形压头非对压技术的Invar钢模具型板冲压成形的回弹问题进行了系列试验研究。试验主要针对不同形状的帆形板和鞍形板进行,结果表明,由于该设备成形力学状态的复杂性,回弹具有一定的不确定性,但也存在明显规律。针对试验板有以下规律:至边缘位置距离的大小对回弹有重要影响,中间位置的板材回弹明显比板边缘处小;板的曲率越大,回弹越小;鞍形板比帆形板回弹小。研究结果可用于指导使用可变模具成形较均匀光顺的型板零件。

**关键词:** 复合材料; Invar钢模具型板; 回弹; 活络模具; 成形试验

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.04.095



李玉杨

高级工程师,主要从事复合材料工装的研制、生产、组织管理工作。主持研制了型板多点压力成形辅助工艺装备,并得到应用。负责Invar钢气密焊、真空管路制造等项目工作。获专利2项、发表论文章1篇。

Invar钢由于其低膨胀性能,越来越多地被应用于复合制件模具的制作中<sup>[1-2]</sup>。其中,模具型面是由Invar钢中厚板通过压力机等弯曲设备预成形后焊接,再用数控机床加工而成<sup>[3]</sup>。传统的压力机成形方法具有型面切割较小、精度低、效率低等问题,而切割较小又会导致焊缝长度大,出现缺陷的概率也增大;精度低会导致需要用较厚的板来预成型,数控加工工作量大,且型面厚度不均匀,影响总体质量。在此背景下,更高效和质量的Invar钢板材成形方法十分必要。

方形压头可调活络模具非对压技术<sup>[4-6]</sup>是一种新型的双曲面板材成形加工技术。实际生产表明,该技术能够显著提高双曲面板材的成形加工效率。该技术在抑制压痕、起皱方面具有良好的作用,压制的双曲面板材表面光顺,消除了光滑曲面离散化成平面后导致加工工件不光顺的问题。

但是,板材成形过程中存在的回弹现象,严重影响了板材的成形质量、加工效率和成本<sup>[7-10]</sup>。该装置原有的解决回弹的方法是多次冲压,反复测量、补偿,直至满足精度要求,实践证明,该方法是可行的,但补偿效率较低。由于回弹问题本身的复杂性,至今没有适用性较广、准确性较高的回弹理论出现。本项目旨在通过试验研究,针对武汉理工大学研发的数控弯板机的特定板材成形环境和Invar钢材料,分析其回弹规律,以期能够提高回弹补偿效率。

## 加工方法及加工对象介绍

### 1 活络方形压头非对压技术

活络方形压头非对压技术是一种新型的双曲面板材成形加工方法,依托该技术研制的三维数控弯板机已在船舶建造领域应用,并取得了良好的效果。大幅提高加工效率,并有效地保证了加工质量,克服了之前的

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51379167)。

可重构模具和多点成形技术易产生压痕和皱折的问题,特别适合于双曲度中厚、厚板的成形加工。下面将对该装置及其原理作简要介绍。

三维数控弯板机的工作原理如图1所示。通过电机推动螺杆实现单个下压头的上下运动,下模调型完成后,放置板材并定位,液压装置推动上模下压,上下压头都可根据目标曲面形状旋转,所构成的包络面能够很好地拟合板材曲面形状。

单元体为控制板材形状的基本单位,由方形压头、支柱和螺杆构成,电机驱动螺杆控制压头高度,以拟合曲面形状。方形压头表面为四边形平面,在边缘和四角有一定的倒角和切削,倒角和切削能改善压头与板材表面的接触状况,更有效地限制压痕。压头下部分为半球形,以便于压头表面随着板材形状作一定的旋转,更好地贴合曲面;底端与弹簧相连,固定在支柱上,当一次冲压完成后,弹簧可保证压头恢复到水平状态。

上模施压时,板材与压头局部区域面接触。非对压方式,使得每个上压头由4个下压头支撑;每个下压头由4个上压头支撑,这样能够更好地限制板材的面外变形,防止变形区域过于集中形成折痕,包络面更为光滑。在冲压时,为防止皱折的产生,下模形状一般凹面朝上,上模下压时,板材边缘区域先被压住(类似板料冲压时的压延边),板材在冲压过程中,面内具有较大拉应力,可有效防止板材局部失稳起皱和减少回弹。

生产实践表明,数控弯板机(图2)板材成形效果良好,不会出现压痕和局部不光顺等成形缺陷。

对于长板的冲压,采用分段逐段冲压成形工艺,在两段之间设置重叠区与过渡区,以保证纵向线型的连续性。在板材一段加工完成后,上模抬起,调节下模形状,继续压制下一段。两段之间的过渡区域可减弱加工区域对已成形区域的影响,过渡区的大

小根据实际形状和经验确定。这样,可以逐段加工,逐步测量,加工长度远大于模具的板材。

## 2 Invar钢型板

本文研究对象材料为Invar36,标称厚度20mm,实际厚度19.05mm。其主要机械性能见表1<sup>[11]</sup>。

由表1可知,Invar钢具有良好的塑性,强度不高,适合于冷弯成形加工。与Q235相比,弹性模量小,屈服强度相近,从材料的角度看,便于使用活络模具加工。

Invar钢模具型板在形状上通常具有曲率较大,且分布不均匀,板材

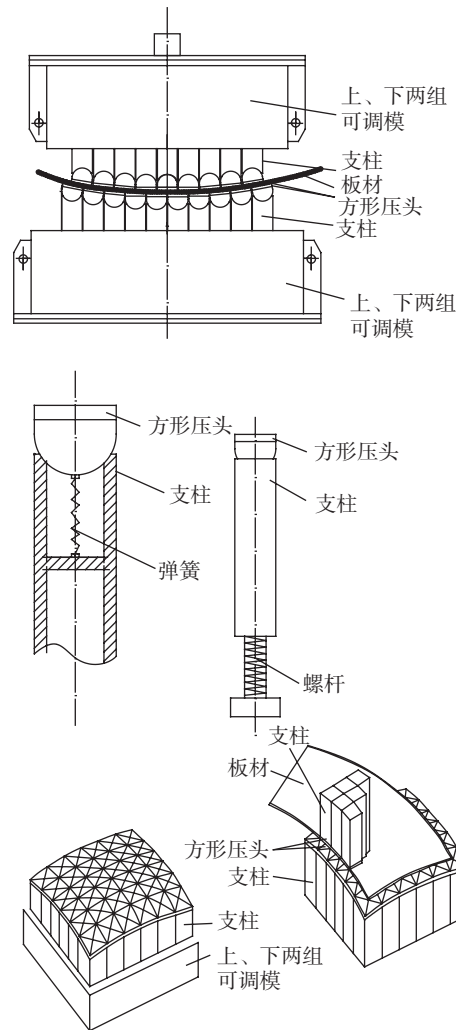


图1 方形压头可调活络模具板材曲面成形装置

Fig.1 Square pressure head adjustable flexible die sheet surface forming device



图2 500t船舶三维数控弯板机

图2 500t 3D CNC ship plate bending machine

大小相差较大等特点。此外,模具框架较船体框架密集,故装配时对精度的要求较高。从加工要求看,加工难度较船体外板高。

### 试验研究方案

由理论分析可知,回弹主要与工件形状、材料性质、板材厚度等因素有关。实际板材弯曲影响因素更为复杂,与成形速度、载荷,摩擦情况、下压力的加载形式、分析点在板材的位置等都密切相关。由于试验条件和分析手段所限,本文主要分析曲面形状和距边缘距离对回弹量的影响,即弯曲程度和位置对回弹的影响。

#### 1 回弹描述

本文采用回弹后的曲率  $K_1$  与回弹前的曲率  $K_0$  之比,即  $K_1/K_0$  来描述回弹量,称之为成形比,成形比越大,则成形效果越好,回弹越小。

双曲面板材某点处的曲率有无数个,根据回弹的机理,本文将选择两个主曲率作为研究对象。

#### 2 测量装置及测量方案

为保证数据精度,本项目将采用两种测量方案,并对两种方案的测量结果进行对比综合,用较好的数据来进行回弹分析。

(1) 基于激光位移传感器的随动点扫描测量。

试件冲压加工前,在试件测量面上划上纵横间距均为 100mm 的网格线,冲压完成后,对网格上的节点进行测量,通过节点及其周围数据计算回弹量。采用随动测量的原因在于保持传感器与板材表面处于最佳的测量距离,确保测量精度(图 3)。

(2) 基于计算机视觉的手持式激光扫描仪测量。

板材冲压完成后,在其测量面粘贴一系列标定点,通过手持式激光扫描仪对板材局部进行扫描(图 4)。一个扫描视图只能涵盖较小的区域,通过标定点间的相对位置特征,可将不同视图拼接为完整的曲面。

### 3 板材形状设计

形状对板材回弹的影响是本文考虑的重点,同时为了分析数据的方便及分析回弹点离板材中心位置的不同带来的回弹差别,本文设计的形状均为等曲率的形状。

试验板材共 14 块,其中帆形板 7 块,鞍形板 7 块,部分板材形状方程为:

$$1\# \text{ 为 } z = -\sqrt{1800^2 - x^2 - y^2} + 1800;$$

$$4\# \text{ 为 } z = -\sqrt{1800^2 - x^2 - y^2} + 1800;$$

$$8\# \text{ 为 } z = \sqrt{(3600 - \sqrt{1800^2 - y^2})^2 - x^2};$$

$$14\# \text{ 为 } z = \sqrt{(3000 - \sqrt{1800^2 - y^2})^2 - x^2}。$$

帆形板(1#)、鞍形板(8#)形状分别如图 5、6 所示。

### 4 冲压及成形效果

对 14 块试件进行了冲压试验,试验用三维数控弯板机完成(图 7)。冲压成形效果良好,没有压痕和皱折产生(图 8),根据观察,回弹明显较 Q235 钢大。

### 回弹值确定

板材压制过程中,下压头要发生滑移,由于下压头转角的存在,实际

表1 INVAR钢(国产4J36)主要机械性能

Table 1 INVAR steel (domestic 4 J36) main mechanical performance

力学性能	数值
抗拉强度 $s_p$ /MPa	440
屈服强度 $s_y$ /MPa	241
伸长率 $d$ /%	40
密度 $\rho$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	8.1
硬度 HB	124
弹性模量 $E$ /GPa	123



图3 基于激光位移传感器的点扫描随动测量装置

Fig.3 Point scan follow-up measurement device based on laser displacement sensor



图4 手持式激光扫描仪

Fig.4 Handheld laser scanner

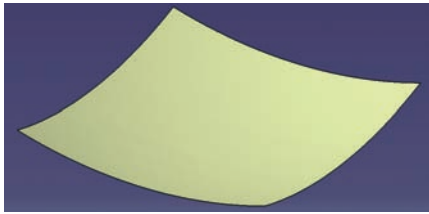


图5 试验冲压件(1#)的目标形状(帆形)  
Fig.5 Target shape (sail shape) of experimental stamping part (1#)

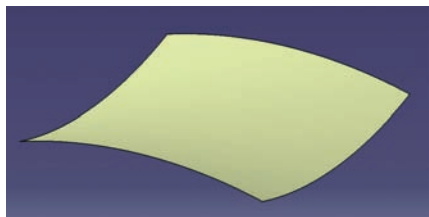


图6 试验冲压件(8#)的目标形状(鞍形)  
Fig.6 Target shape (saddle shape) of experimental stamping parts (8#)



图7 三维数控弯板机冲压  
Fig.7 Stamping by 3D CNC plate bending machine



图8 冲压成形效果  
Fig.8 Forming effect

下压头群包络面并不是设计要求的曲面,且转角越大误差越大。为消除影响,在板材压制后,对压头再进行一次测量,参考该数据和设计压头数据,拟合出下压头包络面的形状,再对板材包络面进行插值和坐标转化,即可得到板材下表面的型值数据:

$$r_{中} = r_{下} - \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

式中,  $r_{下}$  为板材下表面某点的曲率半径,  $r_{中}$  为板材几何中心层某点的曲率半径,  $\delta$  为板材厚度,设曲率中心在板材以上为正。由于冲压板料的曲率不会过大,因此,假设板材弯曲过程中中性层不发生内移。

同理,对于板材回弹后测量的数据点进行曲面拟合,也可求出回弹后板材的上表面曲率半径  $r'_{上}$ ,则

$$r'_{中} = r'_{上} + \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

式中,  $r'_{中}$  为回弹后,板材几何和中心层的曲率半径。

图9显示了两组数据的拟合结果。根据图9的拟合曲线可以求出各点的曲率半径,并计算出各点的成形比(图10)。可以看出,板材在中间处成形比较大,原因是中间部分弯矩更大,且轴向拉伸比较严重,导致材料变

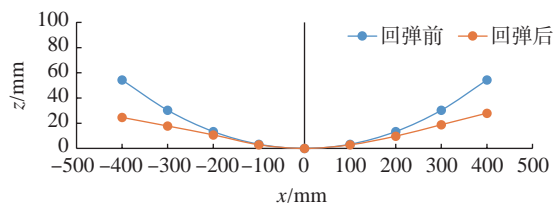


图9 R=1500mm帆形板 y=200mm截线回弹前后的形状  
Fig.9 R=1500mm sail sheet y=200mm cut-line shape before and after springback

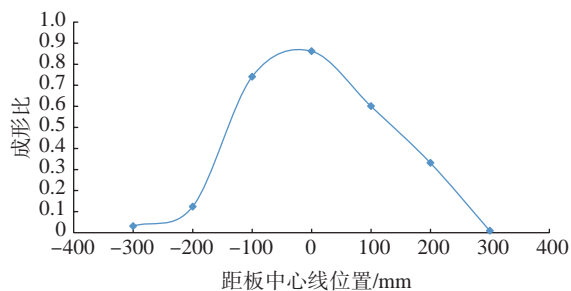


图10 R=1500mm帆形板 y=200mm截线成形比  
Fig10 R=1500mm sail sheet y=200mm cross section forming ratio

形中塑性变形成分比较大,回弹较小。

性,可能在局部存在不对称的情况,这对板材宏观形状的影响是有限的。

## 结果分析

### 1 回弹的不确定性

所有形状的板材都是沿 X 向中心线和 Y 向中心线对称的,但是观察回弹量并不完全相等,甚至差别还比较大。这与回弹是局部性质有关,加工过程中,宏观上,板材形状基本对称,由于压头与板材表面接触的复杂

以 2# 板 -400 截线为例, (-400, -100) 处的横向曲率半径为 2560mm, (-400, 100) 处横向曲率半径为 1941mm,在跨距为 200mm 的范围内,两处的拱高差别仅为 0.63mm,这也导致另外一个问题,即测量精度对局部曲率及回弹量的计算有重要影响。正是基于此,我们将

不对单个点的回弹进行详细分析,而是对某一形状或某一截线上多个点的平均曲率进行分析。

总之,回弹值的不确定性由两点决定的,一是加工过程中,局部受力不均匀导致;二是测量误差导致的计算误差。这种局部的不均匀性是不可避免的,但对整体影响不大。

## 2 距板材边缘距离对同向回弹的影响

对 14 块板的测量结果进行分析可知,距板材边缘越近回弹越大,板材中心处回弹较小。表 2 给出了 1# 板 ( $R=1800\text{mm}$  的帆形板) 与 8# 板 ( $R=1800\text{mm}$  的鞍形板) 的纵横向同向平均成形比数据。

计算 14 块板的纵横向成形比,并取平均值,可得到如图 11 所示平均成形比与距板同向边缘的关系。

由表 2 及图 11 可知,最大成形比(即最小回弹处)均为板材靠中间的位置,主要原因在于中间部位弯矩更大,且有径向拉应力,拉应力的存在也会导致回弹量减少。

其次,还可以看到对于单块板而言,板材成形并不对称,但增加样本量后,可以看到,左右相同距离处的板材回弹非常接近,说明通过大样本来确定回弹系数是可能的。

## 3 距板材边缘距离对垂向回弹的影响

表 3 给出了 1# 板 ( $R=1800\text{mm}$  的帆形板) 与 8# 板 ( $R=1800\text{mm}$  的鞍形板) 的纵横向垂向平均成形比。

计算 14 块板的纵横向成形比,并取平均值,可得到如图 12 所示平均成形比与距板垂向边缘的关系。

由表 3 及图 12 可知,回弹沿垂向的差别不大,但明显地中间偏大,两侧偏小,并且帆型较鞍型明显,主要原因可能是两侧部分约束小,所以冲压效果更好。

## 4 曲率对回弹的影响

表 4 给出了 8~10# 帆形板的成形比与曲率的关系。

计算 14 块板曲率与成形比的值,可得到如图 13 所示平均成形比与曲率的关系。

由表 4 和图 13 可知,在大体趋势上,曲率越大回弹越小,这与理论分析是相符的,但是由于冲压时的偶然性因素存在,曲率对回弹的影响存在一定的波动。这与上模是否完全压下有关,也即与设备的状态有关。可以明显看到,对同一块板而言,曲率大的方向回弹比曲率小的方向小。

## 5 板材形状对回弹的影响

分析所有板材回弹可知,帆型板的平均回弹比为 0.447,鞍型板为 0.623,鞍形板的回弹明显小于帆型板。

## 结论

由于型板冲压成形的力学状态比较复杂,回弹存在一定的不确定性,准确预测三维数控弯板机的回弹量是非常困难的。但仍有一定规律可循,根据回弹规律对回弹进行补偿,可以取得较好的结果。研究发现:

(1) 对于某一截线而言,中间部分回弹较两端小。因此,在进行回弹补偿时,在横向曲率方向,中间部分补偿量大,板材上下口补偿量小。

(2) 板材边缘的截线较中心的截线回弹稍小,但差别不是很大。

(3) 曲率越大,回弹越小。

(4) 鞍形板(主曲率符号相反)

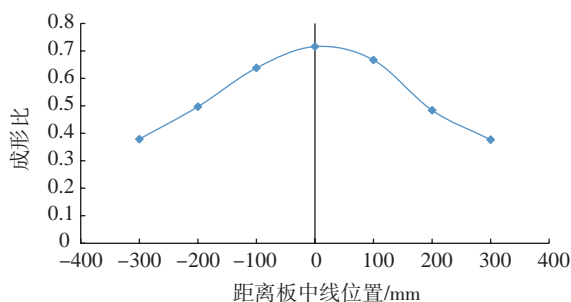


图11 成形比与距同向边缘距离的关系

Fig.11 Relation between the forming ratio and the distance from the codirectional edge

表2 各点纵横向平均成形比(同向对比)

Table 2 Horizontal average each point forming ratio (synthetic)

方向	距中轴线距离						
	-300/mm	-200/mm	-100/mm	0/mm	100/mm	200/mm	300/mm
1# 横向	0.216	0.380	0.447	0.716	0.495	0.356	0.171
1# 纵向	0.123	0.358	0.429	0.479	0.576	0.334	0.264
8# 横向	0.223	0.632	0.616	0.889	0.618	0.669	0.402
8# 纵向	0.217	0.220	0.669	0.767	0.662	0.393	0.224

表3 各点纵横向平均成形比(垂向对比)

Table 3 Horizontal average each point forming ratio (vertical)

方向	距中轴线距离								
	-400/mm	-300/mm	-200/mm	-100/mm	0/mm	100/mm	200/mm	300/mm	400/mm
1# 横向	0.483	0.356	0.407	0.331	0.279	0.307	0.461	0.526	0.427
1# 纵向	0.408	0.357	0.340	0.359	0.364	0.317	0.361	0.452	0.419
8# 横向	0.472	0.580	0.608	0.679	0.623	0.588	0.576	0.563	0.517
8# 纵向	0.471	0.444	0.443	0.418	0.415	0.393	0.472	0.488	0.507
平均	0.590	0.555	0.538	0.511	0.506	0.494	0.528	0.552	0.570

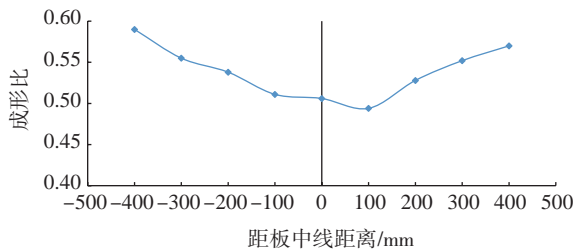


图12 成形比与距垂向边缘距离的关系

Fig.12 Relation between forming ratio and distance from vertical edge

表4 曲率对回弹的影响

Table 4 Influence of curvature on springback

名称	目标曲率	回弹比
10# 横向	1200	0.780
9# 纵向	1500	0.636
10# 纵向	1200	0.610
8# 横向	1800	0.579
9# 横向	1500	0.479
8# 纵向	1800	0.450

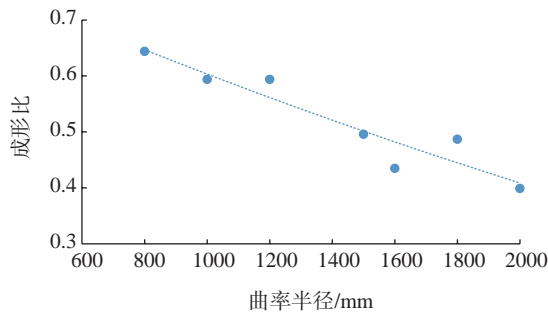


图13 曲率对回弹的影响

Fig.13 Effect of curvature on springback

形状回弹会显著小于帆形(主曲率符号相同),说明在成形过程中,两个方向的回弹存在耦合现象。

本文的研究结果可用于指导使用可变模具冲压成形较均匀且光顺的型板零件。

参考文献

[1] 李细锋,陈楠楠,李佼佼,等. 温度与应变速率对 Invar 36 合金变形行为的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(8): 968-974  
 LI Xifeng, CHEN Nannan, LI Jiaojiao, et al. Effect of temperature and strain rate on deformation behavior of invar 36 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(8): 968-974.  
 [2] 杨博,李宏,曹正华. 殷钢在复合材料成形模具中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(6): 68-69, 44.  
 YANG Bo, LI Hong, CAO Zhenghua.

Application of INVAR in mould for composites[J]. Fiber Reinforce Plastic/Composite, 2010(6): 68-69, 44.  
 [3] 王玉华,陈洁,占小红,等. 复合材料 Invar 模具制造技术分析[J]. 航空制造技术, 2014, 57(11): 93-95,99  
 WANG Yuhua, CHEN Jie, ZHAN Xiaohong, et al. Manufacturing technology research on Invar composites mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(11): 93-95, 99.  
 [4] 王呈方,胡勇,李继先,等. 三维曲面船体外板成形加工的新方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010(3): 431-434  
 WANG Chengfang, HU Yong, LI Jixian, et al. A novel forming method for 3D ship hull forming[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2010(3): 431-434  
 [5] 王呈方,焦和桐,胡勇,等. 方

形压头可调活络模具板材曲面成形装置: ZL200910014794.6[P]. 2009-03-12.  
 WANG Chengfang, JIAO Hetong, HU Yong, et al. Square pressure head adjustable flexible die sheet surface forming device: ZL200910014794.6[P]. 2009-03-12.  
 [6] 苏绍娟,胡勇,王呈方. 船体三维曲面外板成形工艺方法研究进展[J]. 中国造船, 2012, 53(2): 211-216.  
 SU Shaojuan, HU Yong, WANG Chengfang. Research progress of three-dimensional plate forming methods for ship hull[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(2): 211-216.  
 [7] 严仁军,李双印,王呈方. 船体中厚板冷压成形的回弹模拟[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(4): 54-58.  
 YAN Renjun, LI Shuangyin, WANG Chengfang. Numerical simulation research on springback of ship plate in multi-point forming mechanism with square press heads[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(4): 54-58.  
 [8] WAGONER R H, LIM H, LEE M G. Advanced issues in springback[J]. International Journal of Plasticity, 2013(45): 3-20.  
 [9] 刘红生,江开勇,崔俊佳,等. 一种预测板材成形回弹的新的自适应无网格法[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 72-79.  
 LIU HongSheng, JIANG Kaiyong, CUI Junjia, et al. New adaptive meshless method for spring-back prediction in sheet metal forming[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 72-79.  
 [10] 杨燕琴,赵耀. 板材成形回弹的数值仿真方法研究[J]. 船海工程, 2013(5): 43-46.  
 YANG Yanqin, ZHAO Yao. Numerical simulation method of spring-back in plate forming[J]. Ship & Ocean Engineering, 2013(5): 43-46.  
 [11] 刘凯,黄钢华,张博明. Invar 钢性能测试与分析[C]// 第十四届中国科协年会. 石家庄, 2012.  
 LIU Kai, HUANG Ganghua, ZHANG Boming. Invar alloy performance testing and analysis[C]//The 14th China association for science and technology annual meeting. Shijiazhuang, 2012.  
 通讯作者: 胡勇, 博士, 教授, 国务院政府津贴获得者, 从事先进制造技术研究, 主持多项国家自然科学基金项目, 参与国家科技支撑计划、国家重大专项课题研究, 重点研发数控肋骨冷弯机、三维数控弯板机等造船重大基础装备, 获国家科技进步二等奖 1 项、发明专利 5 项, 发表学术论文 30 多篇, E-mail: y.hu@163.com.

## Research on Springback of Invar Alloy Smooth Composite Mould Plate Stamping Process

LI Yuyang<sup>1</sup>, ZHAO Anan<sup>1</sup>, ZHANG Likang<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>1</sup>, HUANG Chaoyan<sup>2</sup>, HU Yong<sup>2</sup>

(1. AVIC Aircraft Co., LTD., Xi'an 710089, China;

2. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**[ABSTRACT]** To predict the springback of double curvature plates is difficult. Springback has negative effects on forming efficiency and quality. A series of experiments were carried out to study the springback problem of Invar alloy smooth mould plate forming process based on the flexible square pressure head technique. The experiment aimed at punching different sail and saddle shaped plates. Due to the complexity of the forming mechanical state of the equipment, springback has certain uncertainties, but there are clear rules: The distance from the edge of the plate has an important impact on the springback, the springback of plate at middle position is obviously smaller than the edge; The larger the curvature is, the springback is smaller, but not stable; The springback of saddle shape is smaller than that of the sail shape. The results are useful to guide the forming of smooth sheet products with uniform deformation by flexible die.

**Keywords:** Composite; Invar alloy mould plate; Springback; Adjustable mould; Forming experiment

(责编 大漠)

(上接第94页)

conference on composite materials (ICCM7). New York, 1989.

[34] JOGSNTON A, HUBERT P, FERNLUND G, et al. Process modeling of composite structures employing a virtual autoclave concept[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 1996, 5(3-4): 235-252.

[35] FERNLUND G, POURSAARTIP A.

The effect of tooling material, cure cycle and tool surface finish on spring-in of autoclave processed curved composite parts[C]//12th international conference on composite materials(ICCM12). Vancouver, 1999.

[36] WHITE S R, HAHN H T. Cure cycle optimization for reduction of processing-induced residual stress in composite materials[J]. Journal of

Composite Materials, 1993, 27(14): 1352-1378.

[37] ANDREW A. An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structure [D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1997.

通讯作者: 杨青, E-mail: 45212401@qq.com。

## Effect Factors on Curing-Induced Distortion of C/L Composite Structures in Manufacturing Processing

YANG Qing<sup>1,2</sup>, WEI Yuanping<sup>1,2</sup>, LIU Weiping<sup>3</sup>

(1. Shanghai Superior Die Technology Co., Ltd., Shanghai 201209, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Advanced Automotive Body Manufacturing, Shanghai 201209, China;

3. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**[ABSTRACT]** Curing-induced distortion in manufacturing processing, which is related to many different effect factors, has important influence on the dimensional accuracy of composite parts. The different effect factors can be classified as intrinsic or extrinsic factors. For intrinsic factors, these are with respect to material properties, stacking sequence of plies and geometry of structures, whereas extrinsic factors are generally related to the art of curing process and tooling properties. These factors could bring structures the process-induced residual stresses that will lead to the distortion after parts de-tooling. Through observing the current research results, the effects of these different factors on curing-induced distortion are concluded, then we can use these conclusions as the basis to predict and control the distortion of composite parts.

**Keywords:** Composite structures; C/L; Curing process; Curing-induced distortion; Effect factor

(责编 大漠)