

文章编号: 1000-6893(2006)05-0989-04

## 多点“三明治”成形及其在风洞收缩段形体制造中的应用

王仲仁<sup>1</sup>, 董国庆<sup>2</sup>, 滕步刚<sup>1</sup>, 张琦<sup>1</sup>, 苑世剑<sup>1</sup>, 沈济全<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 中国航空工业空气动力研究院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

### Multi-point Sandwich Forming and Its Applications in Manufacturing Contraction of Wind Tunnel

WANG Zhong-ren<sup>1</sup>, DONG Guo-qing<sup>2</sup>, TENG Bu-gang<sup>1</sup>,  
ZHANG Qi<sup>1</sup>, YUAN Shi-jian<sup>1</sup>, SHEN Ji-quan<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Chinese Aerodynamics Research Institute of Aeronautics, Harbin 150001, China)

**摘要:** 大型风洞收缩段形体板厚较大, 成形较困难, 而风洞收缩段形体制造精度对气流品质有很大影响, 由于收缩形体中各个瓣片的形状差异较大, 所以采用传统模压工艺需要很多模具, 势必增加成本和制造周期, 因此, 提出了低速风洞收缩段型面制造的一种新方法, 即多点“三明治”成形方法。通过对收缩段曲面坐标变换和曲面离散, 确定出多点“三明治”成形模具顶杆的高度, 为了确保瓣片的尺寸加工精度, 减少实验工作量, 成形前, 需要通过数值模拟对弹复量进行预报, 试压后, 测量瓣片的实际尺寸, 重新调节模具顶杆的高度。研究表明, 多点“三明治”成形适于制造大曲率半径曲面工件。采用此种新工艺已在一套模具上为某风洞收缩段形体制成 200 多种双曲率瓣片。

**关键词:** 收缩段; 多点“三明治”成形; 风洞; 成形

**中图分类号:** V261 **文献标识码:** A

**Abstract:** Thickness of the petals for constructing contraction of low speed wind tunnel is larger and forming the petals is relatively difficult. Precision of manufacturing the petals makes more contribution on the quality of the air flow. Because the shape of these petals is different, it will increase the cost and lead time for manufacturing die set if traditional die forming is adopted. Hence, a new method of manufacturing curved surface in contraction of low speed wind tunnel is presented, which is the multi-point sandwich forming. The heights of adjusted pins in die set are determined by conversion of coordinate and discretized curved surfaces that belong to the contraction during this process. Before forming, the spring-back is predicted by numerical simulation to ensure the forming precision of the petal. After testing, the heights of pin need be adjusted again according to measurement results. Research shows that multi-point sandwich forming is suitable to form the workpieces with large radius of the curvature. Furthermore, more than two hundred hyperboloidal petals with different size and shape have been formed using this process with only one die set.

**Key words:** contraction; multi-point sandwich forming; wind tunnel; forming

随着航空航天技术的发展, 世界上航空航天技术发达的国家, 都建立有种类齐全、速度衔接、尺寸配套、用途广泛的常规试验风洞和特种试验风洞的实验基地。建设风洞的目的是要在风洞试验段获得均匀的试验气流。低速风洞按其结构划分为直流式风洞和回流式风洞两种, 其中回流式风洞的结构如图 1 所示<sup>[1,2]</sup>。

回流低速风洞的收缩段是连接稳定段和试验段之间的一段光滑过渡的管道, 如图 2 所示。收缩段使稳定段的气流均匀的加速后进入试验段。

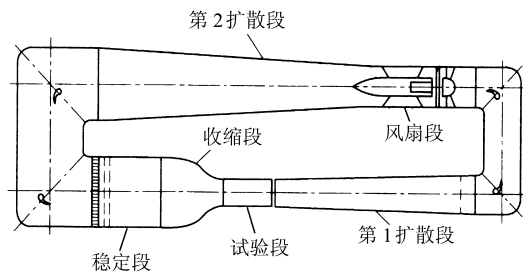


图 1 回流低速风洞<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Returnflow low speed wind tunnel

另外, 它也有助于提高试验段气流的均匀性、降低湍流度。收缩段的收缩曲线应使流速沿轴向均匀

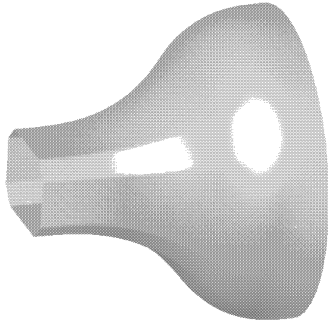


图2 风洞收缩段形体造型

Fig. 2 The model of wind tunnel contraction

的增加,不产生边界层分离现象<sup>[3]</sup>;在收缩段的入口和出口处,壁面平行于风洞轴线,保证在出口界面气流的速度均匀、方向和风洞轴线平行。为了保证收缩段形体的光滑过渡,收缩段将由很多不同的曲面构成,对于大尺寸的收缩形体往往要由几百块弧形板组成,如用压制法成形势必需要很多模具,因此模具的加工时间和成本将给传统的成形方法带来很多困难。

风洞收缩形体制造前首先要将收缩段曲面分割成几百个不同的曲面。其次,对分割好的曲面进行坐标变换。再次,对坐标变换后的曲

面进行离散,确定出经多点“三明治”成形时下模具顶杆要调节的高度。然后,通过该方法制造出曲面符合要求的曲面工件。使用多点“三明治”成形方法可以在不用更换模具的条件下成形出不同曲率的工件,减少了制造时间,降低了制造成本,非常适合于风洞的收缩段形体制造。

### 1 风洞收缩形体曲面坐标的转换

风洞工程中收缩段形体,入口是圆柱形结构,出口是扁八面体结构,大端是旋转抛物面结构,小端是单叶双曲面结构。收缩段的曲面方程在柱坐标下表示,对曲面进行分割,分成几百块不同的曲面。如图3(a)所示,分割后的一个曲面 $S$ 上任一点 $p$ 的坐标可以由数对 $(r, \theta, z)$ 来确定。对分割后的曲面 $S$ 进行坐标转换,从柱坐标系下转换到直角坐标系下,如图3(b)所示。在直角坐标系下再将曲面空间位置进行旋转和移动使曲面的外轮廓线 $l_1$ 和 $l_3$ 中点的连线与局部坐标系的 $X$ 轴重合,该线的中点与原点 $O$ 点重合。对曲面进行旋转,使 $l_2$ 与 $l_4$ 中点的连线与 $XY$ 平面平行,即对坐标系进行平移变换和旋转变换,如图3(c)所示。

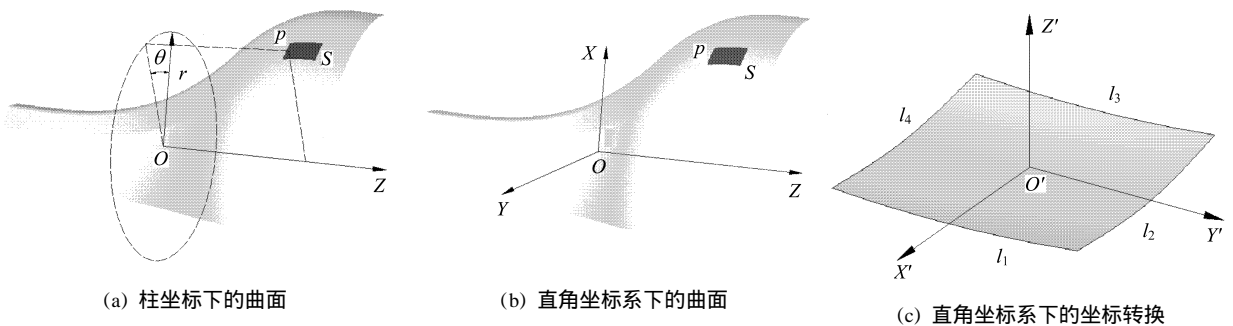


图3 风洞收缩段曲面的坐标变换

Fig. 3 Conversions of coordinate for curved surface in wind tunnel contraction

经过坐标转换后的曲面将采用柔性多点“三明治”工艺成形,该工艺的凹模由多个可以调整高度、排列整齐的顶杆构成。为了确定每个顶杆要调节的相对高度,就要知道曲面上与顶杆相对应的 $Z$ 坐标,如图4所示。由于每个顶杆在 $XY$ 平面中的坐标已知,因此对曲面进行离散通过搜索与 $XY$ 平面中一个顶杆坐标最相近的曲面离散点,就可以确定出该顶杆的 $Z$ 坐标。

### 2 多点“三明治”柔性成形技术

多点“三明治”成形工艺,如图5所示,由五部分组成。凹模由多个分散的顶杆组成,顶杆的高

度可以通过螺纹进行调节。由图可见工件是在上下两层聚氨酯板的夹层状态下进行成形的,即“三

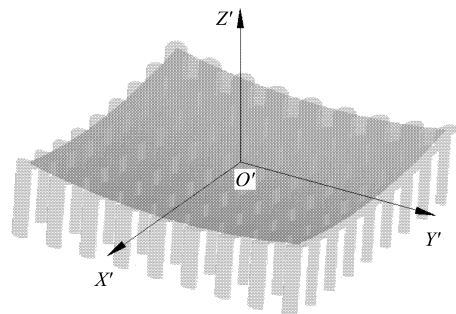
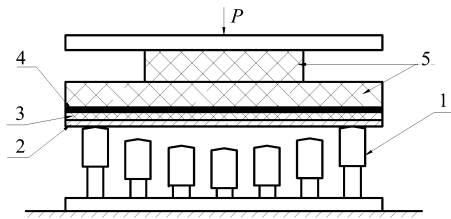


图4 模具中顶杆高度的确定

Fig. 4 Determination of the heights of adjusted pins

明治”成形。“多点”则是指下模不是一个整体模,而是由多个分散的小模组成。



1—凹模顶杆; 2—护板; 3—聚氨酯垫板;  
4—板料; 5—聚氨酯上模

图 5 多点“三明治”成形原理图

Fig. 5 Principal diagram of multi-point sandwich forming

所需工件的曲面先进行离散,然后可以确定顶杆的高度。由于在多点“三明治”成形中顶杆之间的间距较大,因此为了使成形后工件的曲面能平滑过渡,在顶杆上面放置一块厚金属板作为护板,在成形的过程中护板就像一个可以改变形状连续凹模。护板和坯料之间的聚氨酯垫板的作用是避免成形后表面产生凸凹不平的现象,使工件表面更加光滑,如图 6 所示。成形时,压力机上滑块向下运动,弹性凸模发生压缩变形,并将压力机的作用力传递到板料上,使坯料、聚氨酯垫板和护板同时变形。为了对零件的成形精度进行控制,需要利用计算机对成形后零件的形状尺寸进行预报,确定出弹复量。据此调节下顶杆的高度,然后通过实测零件曲面的尺寸,测量可以通过三坐标测量仪进行,但在工程上用截面样板法进行测量更方便。若仍有尺寸不符合要求,可以微调顶杆的高度,直至满足加工要求后取出工件进行下一个工件的成形。这时,护板不再更换,它可随时以各顶杆的端部为依托。如在成形中工件的回弹较明显,可以通过调节顶杆施加回弹补偿,继续进行成形得到高精度的工件<sup>[4]</sup>。

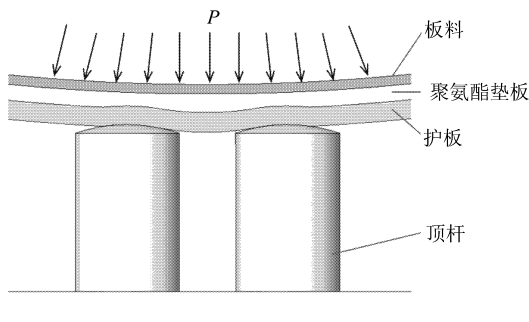


图 6 护板和聚氨酯垫板在成形中所起的作用

Fig. 6 Roles of polyurethane sheet and protect sheet in forming process

### 3 多点“三明治”成形实验研究及数值模拟

图 7 为实验中所用的模具照片。图 8 为采用这种工艺成型的一种制件的图片。风洞工地正在制造的收缩段形体前半部分如图 9 所示。

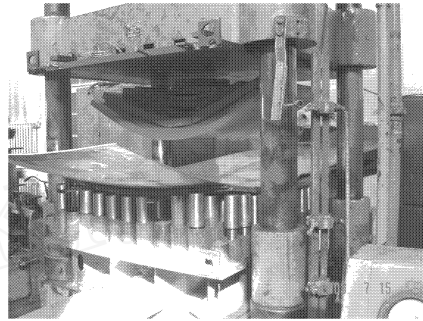


图 7 多点“三明治”成形模具

Fig. 7 The die set of multi-point sandwich forming

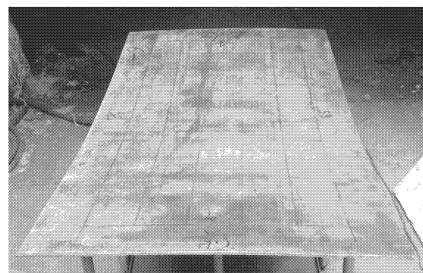


图 8 成形后的曲面工件

Fig. 8 Workpiece with curved surface after deformation

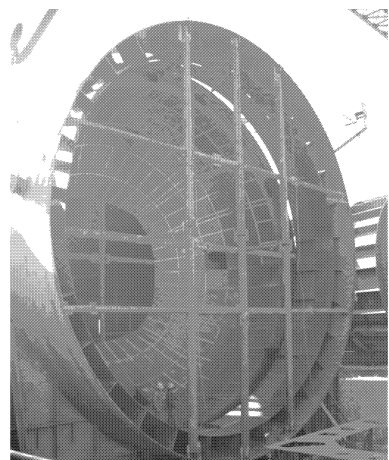


图 9 风洞的收缩段形体的前半部分

Fig. 9 Frontal part of wind tunnel contraction

使用商用有限元软件 ANSYS-LSDYNA 进行多点“三明治”的成形分析,成形工件曲面形状为试验中所采用的非对称的曲面。板料和护板模拟选用 4 节点壳单元,材料模型为 3 参数 Barlat 弹塑性材料;两块聚氨酯板都采用 Mooney-Rivlin 超弹材料<sup>[5]</sup>, 8 节点六面体实体单元;顶杆为

刚体。模拟中板料和护板材料为 16Mn, 聚氨酯橡胶采用邵氏 A 级硬度为 85 的材料。

通过有限元模拟结果可以看出护板在受到聚氨酯和顶杆的作用下产生凸包, 由于护板与工件间有聚氨酯板作用, 所以工件上没有相应的压痕, 如图 10 所示。护板在变形过程中直接与凹模的顶杆接触, 起到使顶杆向上作用力分布均匀的作用, 在成形中看作形状可调节的凹模。由图 11 可以看出, 聚氨酯垫板和护板接触的一面产生了凹坑, 在其与板料接触一侧则基本是光滑的。

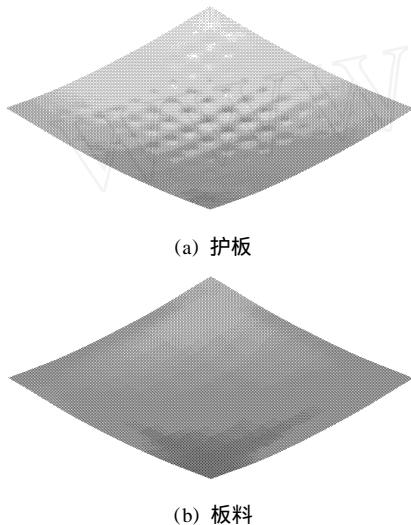
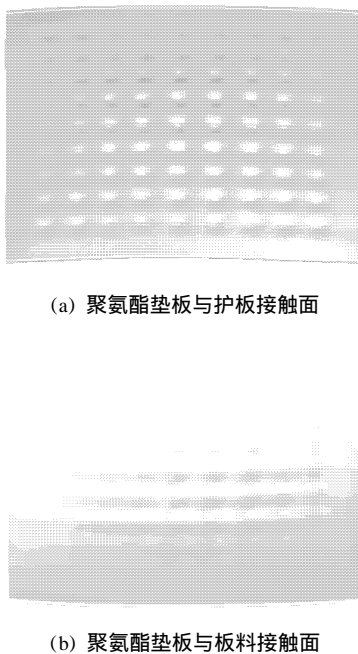


图 10 成形中压痕的模拟结果

Fig. 10 Simulation of dumpling in sandwich forming process



(b) 聚氨酯垫板与板料接触面

图 11 聚氨酯垫板的变形情况

Fig. 11 Deformation of polyurethane sheet

了一种新的柔性成形工艺多点“三明治”成形。其实质是使用多个排列规则、高度可调的顶杆和护板作为凹模, 凸模为聚氨酯橡胶。工件的上下两侧都有聚氨酯板, 是一种夹层式成形。

(2) 成形过程中护板可以充当为一个可改变形状连续凹模, 在护板和工件中间的薄聚氨酯可以消除在工件表面上产生的凸包现象。

(3) 成形前要先对风洞收缩段形体进行分割, 将柱坐标转换成直角坐标, 并在直角坐标系下进行曲面坐标的移动和转动变换, 使曲面离散并确定出模具顶杆高度。

(4) 使用多点“三明治”成形工艺不仅可以显著减少风洞收缩形体的模具数量及制造费用, 由于工件两侧均受聚氨酯板保护, 所以可生产出表面质量很高的曲面工件。

## 参 考 文 献

- [1] 王勋年. 低速风洞试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 37-43.  
Wang X N. Low speed wind tunnel testing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 37-43. (in Chinese)
- [2] 伍荣林, 王振羽. 风洞设计原理[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1985: 1-9.  
Wu R L. Wang Z Y. Fundamental for wind tunnel design [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1985: 1-9. (in Chinese)
- [3] 张连河, 范洁川. 三元收缩段优化设计研究[J]. 空气动力学学报, 2003, 21: 417-423.  
Zhang L H. Fan J C. Research of optimized design of three dimensional contraction [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2003, 21: 417-423. (in Chinese)
- [4] Wang Z R, Yuan S J. New forming technologies used in manufacturing large vessels[C]// Proc of the 1st International Conference on New Forming Technology. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004: 29-39.
- [5] Dirikolu M H, Akdemir E. Computer aided modeling of flexible forming process[J]. J Mater Process Tech, 2004, 148: 376-381.

## 作者简介:

王仲仁(1934 - ) 男, 江苏省阜宁县人, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师。国际塑性加工常务理事, 曾获国家科技进步奖两项, 国家发明专利奖一项。主要研究方向: 液压胀形, 省力成形, 塑性变形过程的数值模拟及塑性力学的实际应用。

董国庆(1964 - ) 男, 山东省陵县人, 中国航空工业空气动力研究院高级工程师。主要研究方向: 气动地面实验设备设计与制造, 风洞试验技术研究。

(责任编辑: 蔡 斐)

## 4 结 论

(1) 针对大型风洞收缩段形体的制造, 提出