

# 整体壁板成形评述

王秀凤<sup>1,2</sup> 郭晓丽<sup>1</sup> 陈光南<sup>2</sup> Jürgen Silvanus<sup>3</sup>

( 1.北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083; 2.中国科学院力学所表面改性实验室, 北京 100080;

3.EADS Innovation Works, 德国慕尼黑 81663)

**摘 要:** 介绍了整体壁板的概念和分类, 总结了传统和现代的整体壁板成形工艺方法, 如滚弯成形, 增量压弯成形, 蠕变时效成形, 喷丸成形和激光弯曲成形, 比较了它们之间的优、缺点及适应范围, 简述了各成形工艺目前的应用状态及发展前景。提出针对不同外形形状和筋条高度的整体壁板的成形, 可以采用不同的成形方法, 必要时还可将几种成形方法进行复合。

**关键词:** 整体壁板 筋条 整体壁板成形

整体壁板是由厚蒙皮和长桁等骨架零件组成的一个整体。具有强度重量比高、总体和局部稳定性好、疲劳寿命长、外形准确、表面光滑等特点<sup>[1]</sup>, 使其成为现代飞机普遍采用的高效率结构, 也是提高战斗机综合性能的主要途径和措施。随着现代飞机的飞行速度和载荷等性能的不断提高, 对整体壁板的强度等要求也越来越高, 同时增加了整体壁板成形的难度。采用传统的方法进行加工, 壁板的成形量的掌握完全依赖于工艺人员的经验, 无法保证壁板的成形质量。为了改进壁板的成形工艺, 学者们纷纷致力于整体壁板成形的先进方法的研究。本文介绍了整体壁板的概念和分类, 总结了传统和现代的整体壁板成形工艺方法, 如滚弯成形, 增量压弯成形, 蠕变时效成形, 喷丸成形和激光弯曲成形, 比较了它们之间的优、缺点及适应范围, 简述了各成形工艺目前的应用状态及发展前景。

## 1 整体壁板的分类及优势

### 1.1 分类

根据整体壁板在飞行器上的位置及作用, 按曲率形状的不同将其分为柱形壁板, 锥形壁板, 凸峰壁板, 马鞍形壁板和折弯壁板, 其外形形状如图 1 所示<sup>[2-3]</sup>。

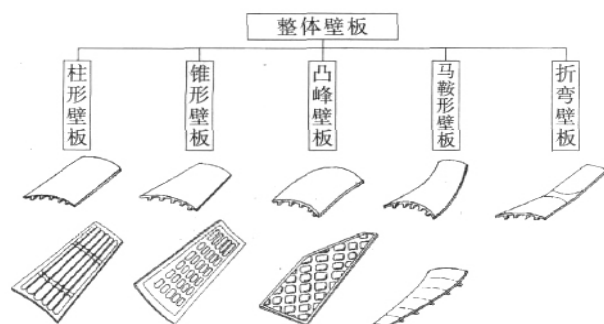
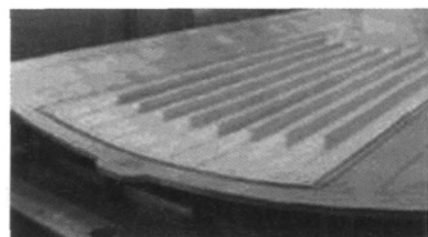


图 1 整体壁板的分类及形状

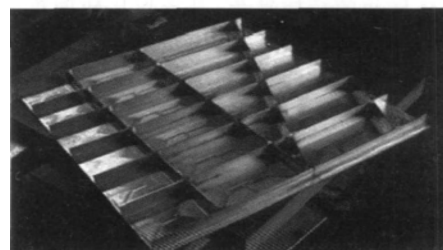
按加工方式来分, 整体壁板又可以分为整体铣切式壁板和焊接式壁板。

### ( 1) 铣切式壁板

如图 2 所示, 铣切式壁板是将整块板料在数控铣床上雕刻式的铣去多余的材料而形成筋条结构。对于筋条较浅的壁板, 还可用化学铣切的方法。目前国内整体壁板的加工主要采用铣切的方法, 在加工过程中会造成大量材料的浪费, 同时铣切后的壁板由于内应力的释放, 存在不同程度的变形。为了校形, 多采用手工敲修的方法, 对零件局部进行收、放料, 这种校形方法难度大, 对操作工人的技术水平依赖性高、效率低且难以保证质量。



(a) 纵向筋条



(b) 网格筋条  
图 2 铣切式壁板

### ( 2) 焊接式壁板

如图 3 所示, 焊接式壁板是将筋条通过激光焊接的方

作者简介: 王秀凤, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院副教授。

基金项目: 欧洲宇航防务集团德国( EADS Innovation Works) 资助课题( 2006.3~2009.3) 。

法焊接到腹板上形成整体壁板的一种方法。焊接式壁板实现了材料的合理有效利用,并且提高了成形的效率,空客公司已经将这种壁板加工技术应用到 A380 飞机的制



图 3 焊接式壁板

造中。但是在焊接过程中,由于局部受热使壁板内部产生非均匀的热应力,导致加工完成后的壁板常带有一定的初始变形及内部残余应力,不利于后期整体壁板的成形。

## 1.2 整体壁板的优点

与传统装配式壁板相比,整体壁板主要有以下优点<sup>[2]</sup>:

(1) 可以灵活选择几何构型,实现复杂的空间曲面,以满足飞行器光滑过渡的气动外表面的需求或空间飞行防护的要求;

(2) 可以减重 10%~30%,减重效果明显;

(3) 扩大自动化设备的使用规模,从而大大减少手工装配劳动量,将装配工序的周期和工作量缩减 80%~90%;

(4) 加强筋可以做成多种截面形状,筋条在蒙皮上的分布可以呈平行、三角形、梯形、网格形和点辐射形等;

(5) 蒙皮和筋条之间采用圆角过渡,可显著降低应力集中程度,将部件和组合件的疲劳性能提高 20%~30%;

(6) 既提高壁板内部分强度和刚度,又提高其气动表面与外形的装配质量。

## 2 整体壁板的成形方法

由于整体壁板的结构复杂,其成形比较困难,不仅需要较大的成形力,而且在加工过程中筋条容易失稳,壁板本身也容易发生较大回弹。目前国内、外用于整体壁板成形的工艺主要有:压力成形,蠕变时效成形,喷丸成形,以及激光弯曲成形,也可以将其中的多项工艺组合起来成为复合成形方式。

### 2.1 压力成形<sup>[4-6]</sup>

常见的用于整体壁板成形的压力方法主要包括滚弯成形和增量压弯成形。对于壁厚小、易于成形的圆柱面和圆锥面壁板可采用滚弯成形方法。滚弯成形的原理如图 4 所示。对于厚壁板、部分变截面壁板及外形复杂的壁板等,则可以采用增量压弯成形的方法。增量压弯成形是采用专用压力机构驱动压头在整体壁板表面上按一定的轨迹分段逐点进行局部三点弯曲变形,通过逐次的变形累积使整个壁板表面成形为所需的曲率。若压头部分采用

多点柔性组合,则可以大大扩大增量压弯成形的适用范围。增量压弯的原理如图 5 所示。

#### 2.1.1 采用压力成形具有如下优点

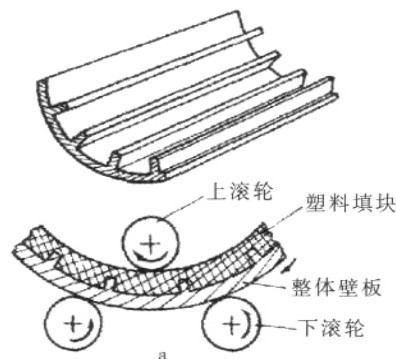


图 4 滚弯成形原理图

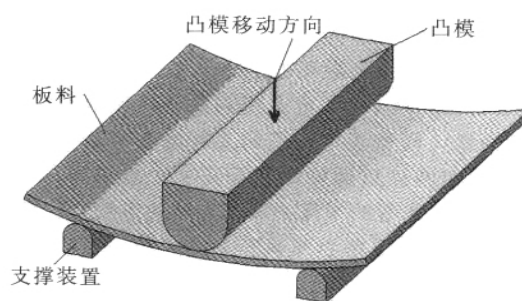


图 5 增量压弯成形的原理图

- (1) 变形力大,适用范围广,可成形各种壁板结构;
- (2) 模具的通用性强,对产品外形尺寸的适应性强;
- (3) 由于是局部增量成形,所需设备吨位小。

#### 2.1.2 采用压力成形也有一定的缺点

(1) 由于整体壁板主要由纵横交错的加强筋条和腹板组成,而腹板的厚度与壁板总的厚度相比很小(一般为 1:100 左右),当筋条过高时,筋条及其根部易发生应力集中而产生屈曲甚至开裂如图 6 所示,因而加工时需要采取防止筋条失稳的措施;

(2) 在成形壁板时,需要进行 4 到 5 次的热处理,因

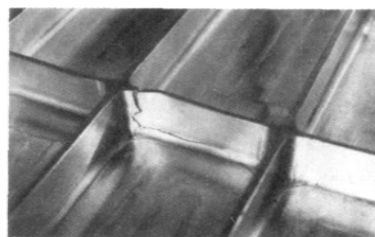


图 6 筋条失稳开裂

而影响材料的性能;

(3) 在压弯过程中蒙皮始终处于弹性变形阶段,筋条既产生弹性变形,又产生塑性变形,因而在成形结束时会产生较大的回弹。当成形较大曲率的壁板时,通常难以通过压下量的控制来达到预期效果,有时需要多次压弯并

保载校形如图 7 所示。尤其对于壁厚较厚的壁板零件,因局部难以成形,从而会增大零件的加工误差,难以满足装配的要求。

## 2.2 蠕变时效成形<sup>[7-8]</sup>



图 7 保载校形

蠕变时效成形是利用合金材料在时效温度下蠕变而产生应力松弛的特性,对试件弹性加载获取初始变形,并通过施加恒定载荷保持试件变形的工艺方法。通过将壁板在恒温中放置一段时间,使其内部的弹性能逐渐转化为塑性能,从而达到成形的目的。其主要优点是回弹小、成形精度高、同时完成时效。其不足主要表现在模具成本高、准备周期长、要求有足够尺寸的热压罐,空客 A380 机翼整体壁板成形时使用的世界上最大的热压罐如图 8 所示。

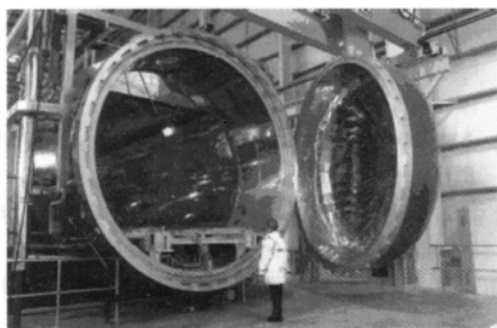


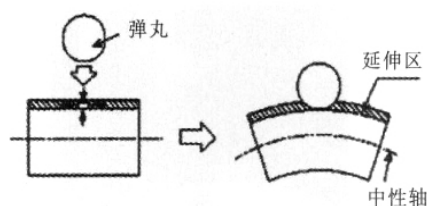
图 8 空客使用的世界上最大的热压罐

蠕变时效成形工艺是解决整体壁板成形、提高零件的制造精度及使用寿命的有效工艺途径之一,该工艺已用在 A380 飞机整体壁板的成形中,但是国内的研究则刚刚起步。

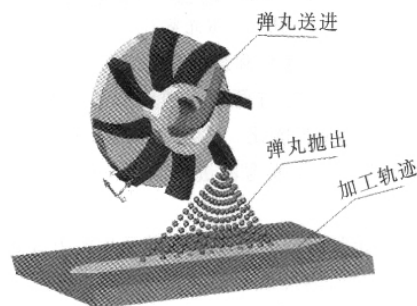
## 2.3 喷丸成形<sup>[9-12]</sup>

喷丸成形是利用高速金属弹丸流撞击壁板的表面,使受喷表面的表层及其下层材料产生塑性变形而延伸,从而逐步使壁板达到外形曲率要求。它是一种无模成形方法,原理如图 9 所示。喷丸成形后壁板有以下特点:

- (1) 外表层产生残余压应力,如图 10 所示;
- (2) 受喷表层的材料组织结构发生变化,位错密度增加,产生晶格畸变,但是受喷表面变得粗糙;
- (3) 工艺参数可实现计算机控制,一定程度上提高了生产效率。但是工艺参数的选择及变形的控制难于掌握,过于依赖经验;



(a) 原理图



(b) 喷丸过程示意图

图 9 喷丸成形原理图及喷丸过程示意图

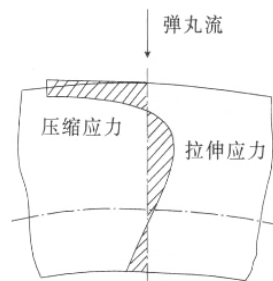


图 10 喷丸成形后残余应力分布

(4) 变形力小,因而只适用于筋条不高的壁板成形。

对于喷丸成形技术,其成形机理的复杂性导致了工艺分析的复杂,加之成形过程中诸多影响因素,使喷丸成形参数的选择主要依靠实验数据和操作经验,采用渐进的方法,耗时费资。要实现精密喷丸成形,必须准确地确定喷丸成形的各工艺参数,如弹丸型号、弹流速度、弹丸流量、喷射角及运动速度等。而随着计算机技术的快速发展,大大促进了喷丸成形技术的研究和开发,出现了预应力喷丸成形技术、数字化喷丸成形技术、新型喷丸成形/强化技术等,大大扩展了喷丸成形技术的加工能力和应用范围,而双面喷丸成形技术、激光喷丸成形技术、超声喷丸成形技术和高压水喷丸成形技术的发展和运用更得到了广泛的重视和关注。国内已将该技术成功地用于支线民机及军机机翼整体壁板的成形中,表明该技术已开始实用化。

## 2.4 激光弯曲成形<sup>[13-16]</sup>

板料激光弯曲成形是一种利用激光扫描金属薄板,在热作用区域内产生明显的温度梯度,导致非均匀分布的热应力,使板料塑性变形的工艺方法,如图 11 所示。相对于上述壁板的成形方法,激光弯曲技术具有如下优势:



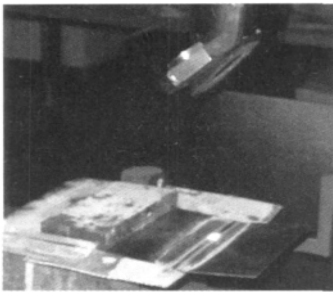


图 11 激光弯曲成形

(1) 激光的单色性和分析性好、能量密度高、无污染、控制精度高,可以很方便地实现成形加工的柔性化、自动化以及数字化和智能化。尤其对于焊接式壁板的成形,可以将激光焊接与激光弯曲进行同工位的复合,从而提高生产效率;

(2) 激光弯曲是通过累积局部变形的方式逐渐实现工件的整体成形,因此成形时无须模具,不存在随之而来的模具制作费、制作周期、磨损、润滑等问题,特别适于变形量不大但用常规方法难以成形和需要局部成形且应变状态复杂的工件以及一些形状复杂、贴模性差的大型工件的精确校形;

(3) 激光弯曲时,由于激光作用区内材料的温度升高,其塑性变形能力提高、变形抗力下降。因此,激光弯曲可以与常规机械成形方法相配合,提高变形能力和成形质量;

(4) 通过揭示并掌握激光/材料的相互作用规律,可以在激光弯曲或激光辅助弯曲时,通过改善材料的组织、结构和/或残余应力分布,优化成形件的硬度、裂纹敏感性和疲劳性能。

板料激光成形是激光非熔凝热加工方法的一个新的应用领域。其独特优点使其工业应用可以遍及航空、航天、微电子、船舶制造、汽车工业等多个领域。目前国际航空界对该项技术很感兴趣,欧洲宇航防务集团德国 EADS Innovation Works 已经开展了激光弯曲技术在大飞机制造中的应用研究。其主要目的是实现焊接式壁板的激光弯曲成形,北京航空航天大学参与了该项研究计划,合作研究正在顺利进展中,初步的试验结果如图 12 所示。研究成果有望为我国大飞机整体壁板成形技术提供新的可行的途径。

### 3 结论

整体壁板由于其自身相对于传统装配壁板的优越性,将逐渐代替装配壁板。但由于筋条的约束作用,整体壁板的成形较为困难,针对不同外形形状和筋条高度的整体壁板的成形,可以采用不同的成形方法,必要时还可将几种成形方法进行复合。

### 参考文献

[1] 唐荣锡、陈鹤峥、陈孝戴. 飞机钣金工艺. 国防工业出版社. 1983.11.

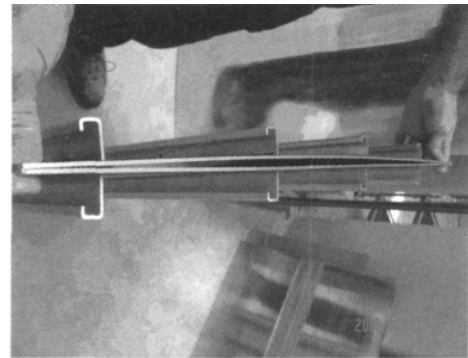


图 12 焊接式壁板激光弯曲成形

- [2] 赵长喜,李继霞,航天器整体壁板结构制造技术[J].航天制造技术,2006 年 04 期: 44-48.
- [3] 王关峰,王俊彪,王淑侠,机翼整体壁板数字化制造技术[J].制造技术与机床,2006 年 05 期: 75-77.
- [4] 刘劲松,张士宏,王忠堂,任丽梅,曾元松,张新华,吴为,整体壁板增量压弯试验与模拟[J].金属成形工艺,2003 年 06 期: 23-25.
- [5] 姜年祥,刘劲松,曾元松,邓子玉,张海渠,张士宏,网格式整体壁板自适应增量压弯预测[J].沈阳理工大学学报,2006 年 03 期: 15-18.
- [6] 张新华,曾元松,吴为,李志强等,某型火箭整体壁板增量压弯成形试验[J].航空制造技术,2004 年 02 期: 92-94.
- [7] 周贤宾,常和生,陈爱雅,张振旺,姚坎元,带筋壁板的时效应力松弛校形[J].航空工程与维修.1998 年 05 期: 19-23.
- [8] 李鹰,季秀升,壁板时效成形技术研究[J].辽宁经济,2007 年 06 期: 54-55.
- [9] 程秀全,张建荣,喷丸成形技术在民航领域的应用[J].锻压装备与制造技术,2007 年 04 期: 77-80.
- [10] 胡凯征,吴建军,王涛,敖志强,基于温度场的喷丸成形数值模拟及参数优化[J].中国机械工程,2007 年 03 期: 292-295.
- [11] 胡凯征,吴建军,王涛,敖志强,板加筋壁板零件的喷丸成形数值模拟与工艺优化[J].CMET. 锻压装备与制造技术,2006 年 03 期: 82-85.
- [12] 曾元松,黄遐,李志强,先进喷丸成形技术及其应用与发展[J].塑性工程学报,2006 年 03 期: 23-30.
- [13] Vollertsen F. Mechanisms and models for laser forming[A]. In: Geiger M, Vollertsen F, eds. Proceedings of the LANE'94[C]. Bamberg: Meisenback, 1994. 345 - 359.
- [14] M.Geiger, M.Merklein, M.Pitz. Laser and forming technology? an idea and the way of implementation. Journal of Materials Processing Technology. 151 (2004) 3-11.
- [15] X. F. Wang, G. N. Chen, Sh. G. Hu, et al. Research on dynamic micro-deformation under laser point source [J]. Machine tools & Manufacture, 2005, 45: 1515-1522.
- [16] Yongjun Shi, Hong Shen, Zhenqiang Yao, Jun Hu. (下转第 7 页)

在这里,我们采用三次 B 样条曲线,令  $n=3$ ,如图 7,曲线由四个点来控制,由式 (7) 可得其矩阵表达式:

$$P_{i,j}(t) = \sum_{k=0}^3 B_{i+k} G_{k,j}(t) = \frac{1}{6} [t^3 t^2 t 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{i+0} \\ B_{i+1} \\ B_{i+2} \\ B_{i+3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于图四中每个侧边的  $i=12$  个型值点,共  $i-3=9$  段曲线,曲线插值的参数化公式如下:

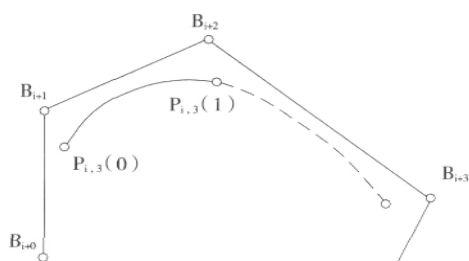


图 7 三次 B 样条曲线拟合示意图

$$\begin{cases} x(i) = \frac{-t^3+3t^2-3t+1}{6}x(i) + \frac{3t^3-6t^2+4}{6}x(i+1) + \frac{-3t^3+3t^2+3t+1}{6}x(i+2) + \frac{t^3}{6}x(i+3) \\ y(i) = \frac{-t^3+3t^2-3t+1}{6}y(i) + \frac{3t^3-6t^2+4}{6}y(i+1) + \frac{-3t^3+3t^2+3t+1}{6}y(i+2) + \frac{t^3}{6}y(i+3) \\ z(i) = \frac{-t^3+3t^2-3t+1}{6}z(i) + \frac{3t^3-6t^2+4}{6}z(i+1) + \frac{-3t^3+3t^2+3t+1}{6}z(i+2) + \frac{t^3}{6}z(i+3) \end{cases} \quad (9)$$

如果空间曲线的曲率变化幅度较大,可用曲线的增量方程来近似求解刀距进给量。本次所求曲线曲率变化不大,根据粗精加工的要求合理设置参数  $t$  的步距,并以插值点间的距离近似为刀距进给量进行走刀。这样,我们就可以把插值点作为新的型值点,重复 2.2 中的步骤即可。

#### 2.4 加工模拟仿真

计算出所有的型值点数据后,我们就可以编写加工刀路程序,并将编写好的程序代码输入到加工仿真软件中,验证加工程序的准确性和正确性,并检验加工效果。

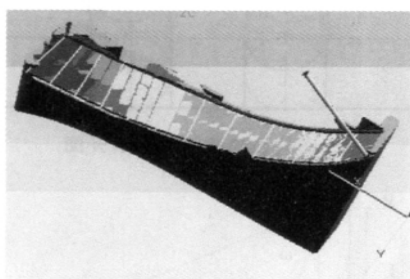


图 8 叶片表面在 UG 中的仿真加工效果图

#### 3 总结

叶片的空间曲面造型给加工造成了一定的困难,以前是通过铸模方法来得到,精度较低,效率也不高。现在在其造型的基础上使用五轴加工,并采用合适的加工方法,很大程度上提高了其加工精度和效率。本文只是介绍了叶轮直纹叶片的一种加工方法,更好更高效的方法有待我们进一步的研究。

#### 参考文献

- [1] 刘敏,傅蔡安.基于 UG CAM 的高速切削技术的研究.制造业自动化.2006,28(11):79~81.
- [2] 兰明.UG 在复杂曲面加工中的应用.模具工程.2006,5(62):62~64.
- [3] 谢国明.基于 UG 的铣加工刀轴插值法及其应用.金属加工技术.2006,(5):33~34.
- [4] 彭芳瑜,邹孝明,丁继东,李斌.面向特征的整体叶轮五轴数控加工技术,数控加工技术,2006.
- [5] 唐文静,魏修亭,刘伟洪.离心泵叶轮数字化造型原理与算法研究.水泵技术.2005,(3):30~33.
- [6] 赵世田,孙殿柱,孙肖霞.基于 UG/POST 五轴联动加工中心专用后置处理器的研发.设计与研究.2006,(1):26~29.

#### Processing method of the centrifugal pump impeller blades

LIU Bing, WEI Xiuting, YIN Lixia

(Shandong University of Technology, Zibo 255091)

Abstract: This paper introduces a manufacture method which about the blade ruled in the 5-axis NC milling. First on the modeling method about blade, the 3D modeling is based on data points which is obtained through the wood-line map and axial projection map. Then make a principle tool path planning according to blade molding. Make work table rotates to the right angle so that the cutting tool can go along the axis cutting line. Then detailed the calculating method about tool distance and the beginning, ending points coordinates of tool. It is calculated through the B-spline curve interpolation methods to seek new coordinates of data points. Final preparation tool path, and processing simulation.

Key words: blade, data points, tool-axis vector, axial cutting line, space curve fitting

(上接第 4 页) Remark of Integral Panel Forming  
WANG Xiufeng<sup>1,2</sup>, GUO Xiadi<sup>1</sup>, CHEN Guangnan<sup>2</sup>, Jürgen Silvanus<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, BUAA, Beijing 100083; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080; 3. EADS Innovation Works, Munich, Germany 81663)

Abstract: The concept and sort of the integral panel was introduced. The traditional and modern forming technological methods were

summarized such as roll-bending, incremental bending, creep aging forming, peening forming and laser bending. Their advantage, disadvantage and their application confined were compared. Their applied situation and progress were recounted. In view of the shape of the integral panel and the height of stiffened strip, the different methods of the integral panel forming were put forward. In order to form the special integral panel, it is necessary to combine the different forming methods.

Key words: integral panel, stiffened strip, integral panel forming