

# 大型飞机整体壁板板坯数控加工延展变形分析及控制

中航飞机股份有限公司 彭艳敏

数控加工后的零件变形问题直接影响到飞机整体壁板的加工精度，本文从影响大型整体壁板板坯数控加工延展变形的因素出发，阐述了整体壁板板坯数控切削加工引起壁板板坯延展变形的原因，通过对整体壁板板坯数控切削加工延展应变的数值计算和试验数据对比，得出整体壁板数控切屑加工环节的延展变形规律及相应的加工变形控制策略。

飞机机翼整体壁板是现代军用、民用飞机的关键结构件，而大型飞机整体壁板成形技术则是飞机制造的关键技术之一。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、外形准确以及表面光滑等特点，使其成为现代飞机普遍采用的高效率结构，也是影响战斗机综合性能的主要关键部件。壁板类零件属于薄壁零件，在数控加工时，容易因强度刚性不够产生导致变形，且零件长度较大，更容易将零件变形扩大。

## 一、整体壁板制造流程

整体壁板目前最常用的加工流程是先将整体壁板产品数模在三维工程 CAD 软件中进行展开计算，建立整体壁板板坯工艺数模，然后采用 NC 数控机床加工出壁板板坯，最后采用喷丸工艺将其成形到飞机气动所要求的形状。

图 1 为大型飞机机翼整体壁板的制造流程示意图，与传统的直接采用五坐标数控机床进行加工的方法相比，这种方法具有明显的优点：使用的预拉伸板料毛坯较薄，切削量相对较小，铣削加工设备只需要三坐标数控机床即可；喷丸成形后附带的强化工艺，可以大幅度的增强机械加工剥离金

属后微观上的组织缺陷并预留残余压应力，从而能够极大的提高零件的抗疲劳特性。在实际生产中普遍采用这种方法从而节省数控机床资源和避免材料浪费，因而具有成本低、零件表面质量优异等优点。

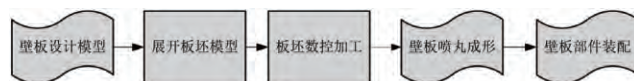


图 1 大型整体壁板数控加工工艺流程示意图

## 二、整体壁板板坯数控加工延展变形产生原因

与大型整体壁板制造相关的应力包括：毛坯残余应力、加工应力、装夹应力等。如图 2 所示，在机械加工过程中，在数控加工过程中，由于切削力及切削热等因素共同作用于零件，使得零件内部的应力平衡被打破，导致零件在加工过后必然要回复应力平衡状态而释放残余应力，从而导致零件变形。

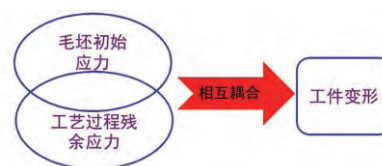


图 2 工件变形示意图

◎ 加工过程中，毛坯初始应力平衡状态被打破，新的应力重分布导致工件变形。

◎ 切削加工过程中，在机械载荷与热载荷综合作用下产生的加工应力导致工件变形。

◎ 另外还存在装夹应力、环境温度变化引起应力等。

### 三、整体壁板板坯数控加工延展变形数值计算

残余应力是在无外力作用时，以平衡状态存在于物体内部的应力。整体壁板为薄壁零件，刚性较差，加工材料的去除率高，通常为 40% ~ 60%。刀具切削过程中的切削力、摩擦力影响零件表层状态，刀具切削的过程会使金属表面的晶粒状态发生变化，产生切削热以及表层应力，在达到一个新的平衡状态时造成零件变形。壁板加工表面产生拉应力，而材料内部产生残余压应力。残余内应力对变形影响往往是最明显的因素，铝合金零件切削加工的残余应力层深度一般在 0.4 ~ 0.5mm 之内，由外向里递减。

假设整体壁板展开板坯的典型截面的平均厚度为  $t$ ，最大厚度为  $t_{\max}$ ，最小厚度为  $t_{\min}$ ，图 3 为 C919 外翼下中壁板板坯模型的典型截面。

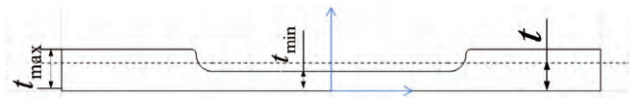


图 3 壁板板坯典型截面示意图

壁板机械加工切削沿翼展方向的应变为  $\Delta\varepsilon$ ，塑性变形层深度为  $\Delta t$ ，切屑应力为  $\sigma_c$ ，弹性模量  $E$ ，塑性变形层面积为  $A_{out}$ ，单位截面的残余应力层面积为  $A_{in}$ ，壁板截面之间的单位长度  $L_i$ ，截面零件平均厚度  $t$ ，截面零件平均宽度  $b$ ，如图 4 所示。

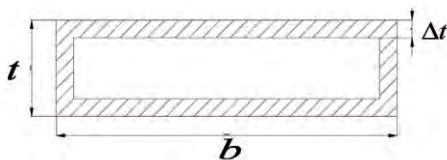


图 4 截面参数说明

$$\Delta\varepsilon = \sum \frac{A_{out}\sigma_c}{A_{in}E} \times L_i \quad (1)$$

当  $b \geq t$  时，截面两侧的面积可以忽略，图 5 为简化后的截面。 $A_{in}=t \cdot b$ ， $A_{out}=2\Delta t \cdot b$ 。

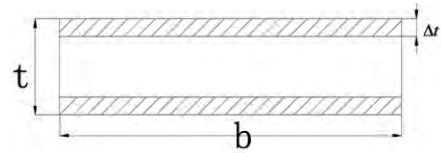


图 5 简化截面参数说明

$$\Delta\varepsilon = \sum \frac{A_{out}\sigma_c}{A_{in}E} \times L_i = \sum \frac{2\Delta t \cdot b \cdot \sigma_c}{t \cdot b \cdot E} \times L_i = \sum \frac{2\Delta t \cdot \sigma_c}{t \cdot E} \times L_i \quad (2)$$

取塑性变形层深度  $\Delta t=0.4-0.5$ ，切屑应力为  $\sigma_c=50-80\text{MPa}$ ，壁板材料的弹性模量  $E=72000\text{MPa}$ 。通过式 (2) 得出整体壁板板坯数控切削加工延展变形量，如表所示，图 6 为切削延展变形量最大、最小趋势图。

表 整体壁板板坯数控切削加工延展变形量（部分数据）

|     | 肋位坐标      | 平均厚度    | 平均间距    | 肋位间最小变形量 | 肋位间最大变形量 | 机加最小延展量 | 机加最大延展量 |
|-----|-----------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|
| 翼根  | \         | \       | \       | 0        | 0        | 0       | 0       |
| 2 肋 | 749.5845  | 8.981   | 749.585 | 0.0464   | 0.09274  | 0.0464  | 0.09274 |
| 3 肋 | 1402.611  | 9.9465  | 653.027 | 0.0365   | 0.07295  | 0.0828  | 0.16569 |
| 4 肋 | 2089.134  | 11.202  | 686.523 | 0.034    | 0.0681   | 0.1169  | 0.23378 |
| 5 肋 | 2692.72   | 12.759  | 603.586 | 0.0263   | 0.05256  | 0.1432  | 0.28634 |
| 6 肋 | 3269.796  | 10.2555 | 577.076 | 0.0313   | 0.06252  | 0.1744  | 0.34887 |
| 7 肋 | 3913.66   | 10.3575 | 643.864 | 0.0345   | 0.06907  | 0.209   | 0.41794 |
| 8 肋 | 4421.4675 | 11.496  | 507.808 | 0.0245   | 0.04908  | 0.2335  | 0.46702 |

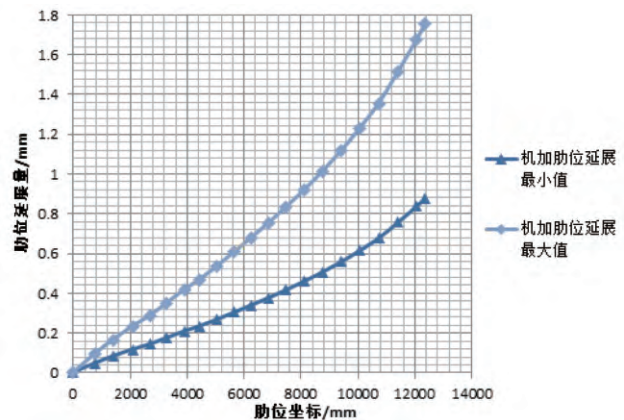


图 6 壁板数控切削加工延展变形量

### 四、整体壁板切削加工延展变形试验验证

通过整体壁板板坯数控加工完后，无约束状态，测量标定点的坐标值，对比板坯数模，得到数控加工延展变形量，

图 7 为下后壁板肋位及测量点分布示意图。

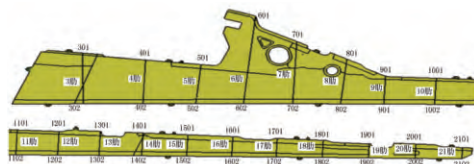


图 7 壁板板坯肋位测量点分布示意图

整体壁板数控加工延展变形试验条件。

◎ 测量对象：整体壁板数控完成后将放置在标准工作平台，无约束状态下放置 3 天左右，目的是为了去除数控加工过程中产生的残余应力。

◎ 测量设备：激光跟踪仪。

◎ 测量方法：利用壁板最近端、最远端的两个定位耳片孔及底平面作为测量坐标系，图 8 为整体壁板板坯测量坐标系示意图，整体壁板放置工作平台，用沙袋压平整体壁板。

◎ 测量内容：整体壁板板坯肋位置基准孔坐标值、外形线坐标值、测量环境（温度、湿度）等。

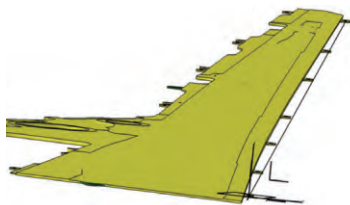


图 8 整体壁板板坯测量坐标系示意图

将壁板的测量数据导入机加坐标系，计算肋位处延展变形量，图 9 为整体壁板肋位处延展图。

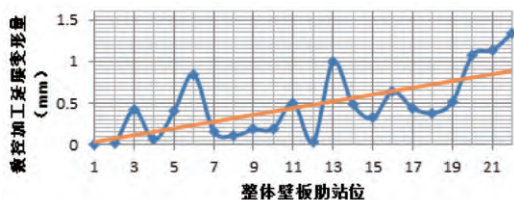


图 9 整体壁板板坯数控加工肋位处延展量分布

由整体壁板数控加工延展数值计算与图 9 肋位延展量测量数据对比得出：激光测量数据除因测量方法、人为因素导致数据个别肋位测量数据偏差较大以外，最终测得的壁板总延展变形量与数值计算的结果基本吻合。

## 五、整体壁板加工变形控制策略

### 1. 调整加工余量分配、尽可能将最终变形控制到最小

通过控制铣平面余量能够在一定程度上控制零件的变形。其次是加工过程中余量的分配。从理论上说，粗加工尽

可能去除更多的余量，所有可能引起变形的部位在粗加工阶段都要加工出来，充分释放变形，才能保证最终的零件变形是最小的，但又必须保证精加工有足够的余量。

### 2. 采用应力分割槽及时释放内应力，减小最终变形

在加工过程中采取措施释放内应力是最有效的变形控制方法之一。这种变形控制方法的原理，就是在零件加工的初期，破坏工件抵抗变形的刚性，使得加工应力在加工的最初阶段得到很好的释放，达到控制变形的效果。通过在壁板零件加工过程中设置应力分割槽，释放零件加工中产生的应力变形，便于壁板零件的装夹吸附，如图 10 所示。

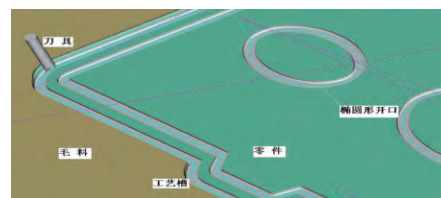


图 10 整体壁板应力分割槽

### 3. 数控加工走刀策略对变形的影响

数控加工策略，即针对具体加工特征的走刀方式对变形程度也有很大影响。例如，在粗加工中，等高线加工方式是一种高效粗加工切削模式，即按照 Z 向等高逐层递减的模式等余量切削去除材料，适合于高速铣削场合，有利于应力的均匀释放。对称加工方式比传统的顺序加工方式更有利于减小变形，即加工中以对称方式加工各区域。

### 4. 优化刀具切削参数，最大限度减少加工中衍生在工件表面的切削应力

切削加工过程中，由于力或热的作用，使工件表面产生塑性变形，也会产生内应力，并在加工后出现变形。切削参数的选择会直接影响变形控制效果，不合理的切削参数会导致切削力过大，刀具磨损严重，零件表面残余应力增加，影响变形。采用高速切削技术是减小加工变形的有效措施。

## 六、结语

在飞机整体壁板的数控加工中，通过加工延展变形产生原因、延展变形的数值计算和试验验证，解决了零件的加工变形问题，从而可以控制零件的加工精度，对类似整体壁板数控加工提供了很好的借鉴作用，能够有效提高壁板类零件的加工质量和批量生产能力。特别是对飞机整体壁板类的大型壁板的加工，降低延展变形的不确定性、缩短壁板研制周期和降低成本，具有一定的指导意义。