

# CF6-80C/E 航空发动机低压涡轮静子封严件 工艺优化技术

## Process Optimization for Sealing Components Static of Low Pressure Turbine Aeroengine CF6-80C/E

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 杨树余 李伟红 刘春伟 申 童

**[摘要]** 介绍了航空钣金件加工工艺的优化过程。用 CAD/CAM 及激光切割技术,对冲压弯曲件进行精确展料,达到冲压弯曲毛料无余量定形、提高材料利用率的目的;用冲压的方法代替激光下料,研究无余量弯曲成形工艺,以取消后续余量加工工序,降低加工费用;通过对冲压工艺和钎焊工艺的技术改进,提高了一次钎焊合格率。

**关键词:** 工艺优化 精确展料 无余量弯曲 降低成本 一次钎焊合格率

**[ABSTRACT]** The optimization process of aviation sheet metal is introduced. Through CAD/CAM and laser cutting technology, the stamping bends are exactly unfolded for near end shape and to increase the utilization rate of the materials. To cancel the allowance process and decrease the manufacturing cost, the near end shape bend forming technology is investigated with stamping instead of brazing. And the percent of pass for once brazing is increased through the technical increase of stamping and brazing process.

**Keywords:** Process optimization Exactly unfolding Near end shape bend Decrease cost Percent of pass for once brazing

CF6-80C/E 是美国 GE 公司 20 世纪 80 年代中期在 CF6-80A 基础上改进发展起来的先进大推力、高涵道比涡轮风扇发动机,以低油耗、低噪音、低成本和高可靠性赢得了在国际大型宽体客机市场上的重要份额,成为当今波音公司 B747-400 和空客公司 A300-600 等大型客机享有盛名的动力装置。

2083 系列产品是 CF6-80C/E 发动机的低压涡轮静子扇形封严件,安装于低压涡轮机匣上,与各级低压涡轮转子叶尖形成级间径向燃气封严,由 4~5 种高温合金冲压成形扇形环件和高温合金蜂窝件经真空高温钎焊组合加工而成。2003 年,中航工业黎明公司开始承接

GE 公司的 CF6-80C/E 发动机低压涡轮静子封严件,并且订单逐年递增,最高达 1 万余件/年。

研制初期,为满足交付周期短的要求,利用现有先进激光下料设备的快捷、灵活、高效特点,综合采用了激光下料、冲压弯曲成形、机械加工、无损检测、真空钎焊和磨削蜂窝等工艺的总方案,对新件试制和顺利交付起到了很好的作用。

但是随着产品批量的增加和价格的逐年递减,该系列 7 种产品面临着加工成本居高不下的压力,特别是采用的激光下料加工费用几倍于普通冲切下料费用,同时,激光下料造成的断面重熔层需要去除带来了机械加工费用的增加,而且钣金弯曲成形尚需进一步完善,以提高质量和效率。因此,从 2007 年开始了旨在降低该类封严组件加工成本,提高效率和产品质量的优化工艺技术研究,工艺优化技术研究情况介绍如下。

## 1 产品结构、材料及工艺特点分析

### 1.1 结构特点

2083 系列扇形封严件是 CF6-80C/E 系列涡扇发动机低压涡轮部件重要件。由于要在长期高温高压燃气冲刷,并承受涡轮叶片叶尖高速摩擦的恶劣环境中实现稳定可靠工作,结构设计要求十分严格。图 1 为不同级



图1 不同级别的封严件照片

Fig.1 Photo of sealing components at different stage

别的封严件照片,图 2 为不同级别封严件对应的剖面示意图,图 3 为第三级低压涡轮扇形封严件的结构设计简图,该结构是由小弯边弧段 P01、蜂窝底板 P02、大弯边弧段 P03、搭接板 P04 以及蜂窝组件 P06/7/8 通过高温

真空钎焊工艺连接成为不可分的刚性结构扇形块构件,其主要结构特点是:

(1) 大小弯边弧段、蜂窝底板及搭接板等零件均为带有周向圆弧,轴向弯曲成型的复杂结构钣金件,形状复杂。

(2) 结构尺寸大。弧段的圆弧半径在  $R485\sim R625$ ,扇形弧长  $160\sim 253$ 。

(3) 成形及加工精度高,大小弯边弧段成形及蜂窝底板内环的面轮廓度不大于  $0.25$ ,圆弧半径公差  $\pm 0.25$ ,扇形端头对圆弧基准垂直度不大于  $0.2$ 。

(4) 组合件采用真空高温钎焊工艺技术,将各种零件连接成稳定可靠的整体。钎焊面积率要求  $80\%$  以上,并要用 X 光、毛细等无损检测方法进行检验和验收。

### 1.2 材料特点

扇形封严件的单件 P01~P04 所用毛料均为薄壁钴基高温合金板材,牌号 HS188,技术条件 AMS5608,料厚分别为  $0.96, 1.27, 0.96, 0.6$ 。其合金元素含量见表 1,力学性能见表 2。

钴是一种重要的战略资源,世界上大多数国家缺钴,因此钴基高温合金非常昂贵,HS188 冷轧薄板的价格在  $160$  美元/kg 左右。钴基高温合金在  $730\sim$

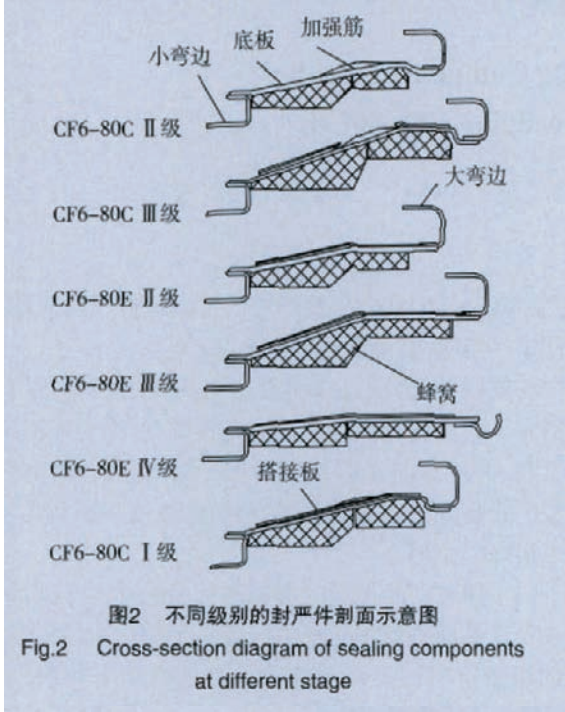


图2 不同级别的封严件剖面示意图  
Fig.2 Cross-section diagram of sealing components at different stage

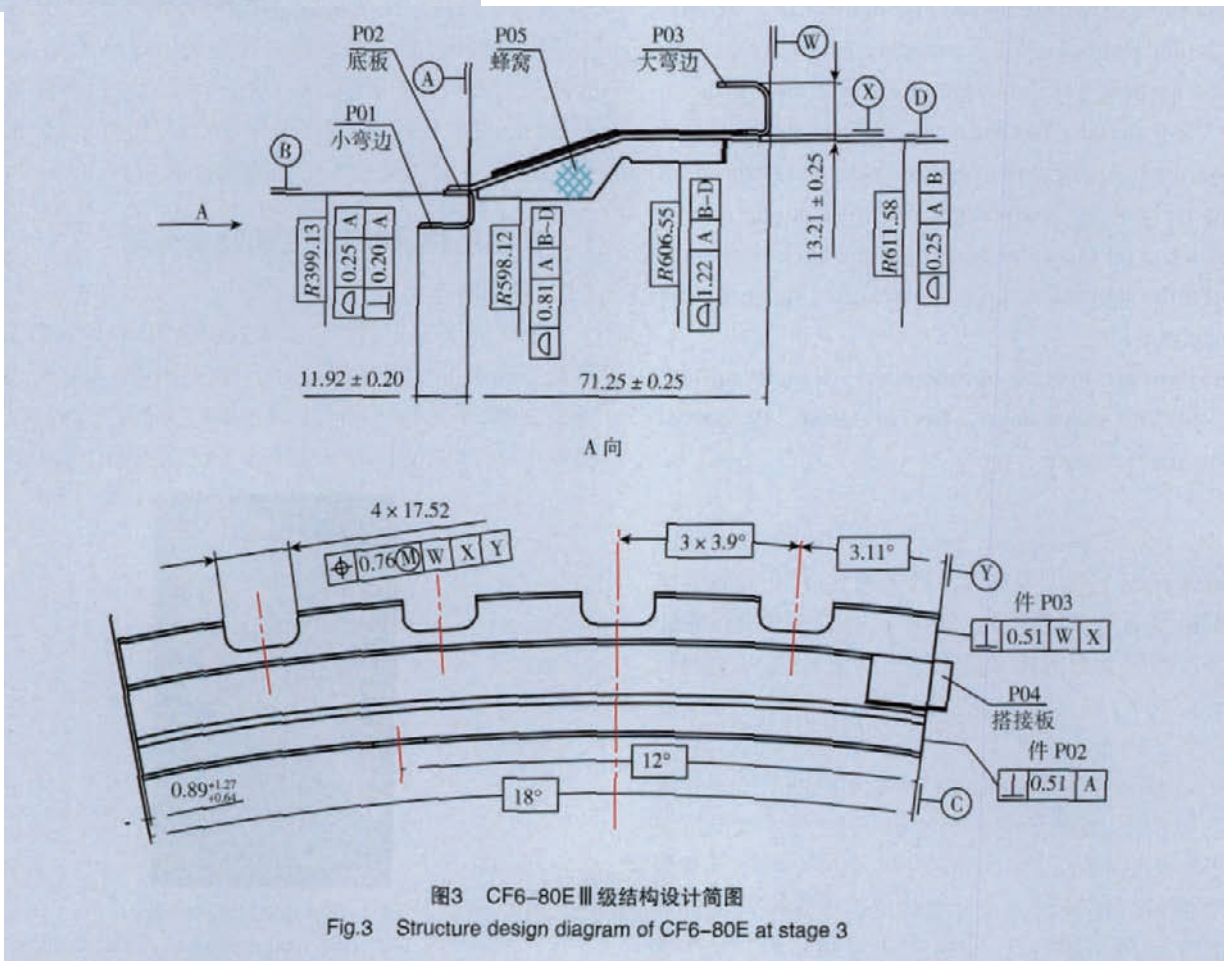


图3 CF6-80E III级结构设计简图  
Fig.3 Structure design diagram of CF6-80E at stage 3

表1 HS188合金含量

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	W	La	B	Fe	Co
0.05~0.15	≤ 1.25	0.2~0.5	≤ 0.02	≤ 0.015	20~24	20~24	13~16	0.02~0.12	≤ 0.015	≤ 3	余量

表2 HS188力学性能

板厚 / mm	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa		屈服强度 $\sigma_s$ /MPa		延展率 / %	
	室温	649℃	室温	649℃	室温	649℃
≤ 0.51	862	621	379	248	40	40
> 0.51	862	621	379	248	45	50

1100℃条件下具有一定的高温强度、良好的抗热腐蚀和抗氧化性能,含碳量高,是一类以碳化物为主要强化相的高温合金。一般钴基合金缺少共格的强化相,虽然中温强度低(只有镍基合金的50%~75%),但在高于980℃时具有较高的强度、良好的抗热疲劳、抗热腐蚀和耐磨蚀性能,且有较好的焊接性。由表2可以看出,其冷冲压性能优良。

P06/7/8为蜂窝成件,由厚度为0.071的镍基高温合金Hastelloy X箔材(技术条件为AMS5536)经叠压拼焊成型加工而成。蜂窝与扇形底板真空钎焊用料为GE公司的钎料B50TF81 A类粉和粘带,及B50TF217 B类箔带和镍粉,钎焊温度 $1175 \pm 10^\circ\text{C}$ 。

### 1.3 工艺技术难点分析

依据该扇形封严件的结构和材料特点,其加工工艺主要包括各钣金件的冲压成形加工、组合焊接和组合加工3个阶段。其各阶段的主要工艺技术难点如下。

#### 1.3.1 钣金件加工

(1)各钣金件的准确快速下料。由于大小弯边、蜂窝底板、搭接板均为带弧度的弯曲面,数量又多,材料为价格昂贵的HS188钴基合金,因此下料必须精确地展开计算,减少余量。通常采用精密冲切下料或者平面激光下料2种工艺方法。前者需设计制造冲裁落料模,材料切口没有重熔层,后者不需任何专用工装,下料方便快捷,并可根据研制生产情况随时进行尺寸调整,但材料断面存在重熔层,需要安排专门工艺去除。

(2)钣金件的精密冲压成形技术。大小弯边弧段需要在精确外形的平板材上实现拉伸、弯曲、翻边等复合冷成形工艺技术,加之板材为全新的钴基合金HS188材料,使得成形模具的设计与制造有较大难度,需要反复试验、修正工装和工艺,且需要安排合适的校正工序和消除冷成形应力的热处理工序。

#### 1.3.2 组合及焊接

(1)零件的正确组合装配是组合加工的一大技术难点。由于多种复杂钣金零件按组合件位置尺寸要求

组合在一起难以实现,且钣金件的尺寸位置容差造成各件相互之间位置存在较大错移,难以进行定位焊和真空钎焊。因此,必须设计合理的装配夹具,将各钣金件正确地固定在一起。

(2)真空钎焊。首先,采用定位焊方法,将定位在正确位置的各种零件暂时固定成为一个组合件。

定位焊采用储能点焊的方法。定位焊的电流、焊点位置、风压都必须通过试验确定,严格控制。

钎料的预置、涂敷技术同样十分关键,所采用的全新高温钎料为美国GE公司的B50TF81 A类粉状、粘带状钎料和B50TF217 B类箔带钎料,预置、涂敷的质量是关系到高温钎焊后连接部位质量的关键环节,必须准确、细致。高温真空钎焊是将组合件连同夹具置于真空度小于 $1 \times 10^{-3}$  托(0.133Pa)的真空炉内进行的焊接,在 $(1000 \pm 10)^\circ\text{C}$ 条件下保温15~30min,在 $(1175 \pm 10)^\circ\text{C}$ 条件下保温3~5min,升温 and 降温均需按照规定的速率进行控制。这是保证扇形封严件结构刚性、材料性能、连接可靠性的关键工艺。为确保焊接质量,焊接后必须用摄像显微镜和异丙醇浸泡毛细法对蜂窝钎焊质量进行检查。对蜂窝底板和大小弯边、搭接板的连接质量进行X光检查,空穴、疏松、未焊上区域等缺陷不得超过总焊接面积的20%。如果超出,需进行补充钎焊,且零件在 $1149^\circ\text{C}$ 以上的累计时间不得超过25min,否则予以报废。

#### 1.3.3 组合件的蜂窝加工

这是保证扇形封严件功能的最后加工工序。由于蜂窝结构不宜采用机械加工,一般采用电火花磨削或电化学磨削方法。加工时要确保封严件的蜂窝内圆弧尺寸及公差,需设计制造精密夹具,以准确定位安装同级的扇形封严件。同时需严格控制电火花加工参数,保证加工质量,加工表面不允许出现微裂纹。

## 2 原工艺方案及其存在的问题

依据零件设计结构工艺和现有设备条件,研制初期所采用的工艺方案如图4所示。

原工艺采用的钣金下料为平面激光切割方法,该方法成为后来影响技术和生产成本的主要问题之一。同时,由于冲压成形、钎焊工艺工装等技术不够完善,影响到该产品进一步扩大产量。这里所说的“问题”是该系

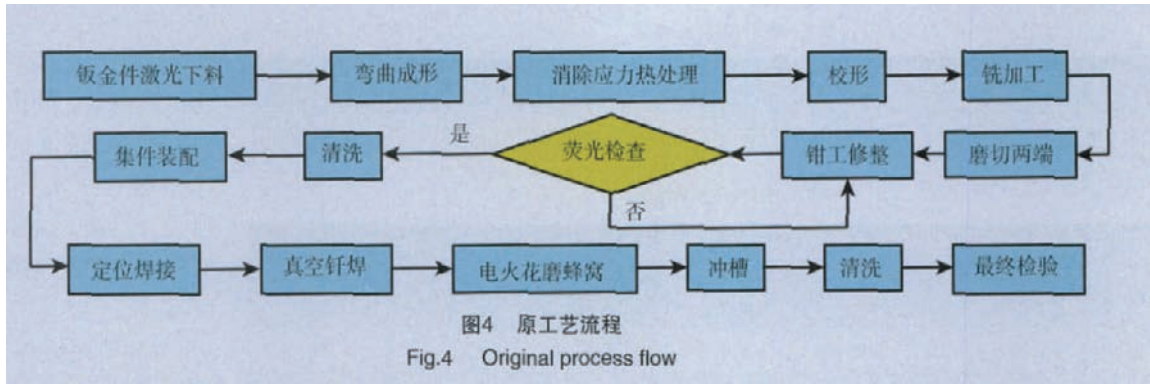


图4 原工艺流程

Fig.4 Original process flow

列产品形成批量生产之后,受国际市场影响而逐渐显现出来的:一方面,产品价格逐年递减,该系列7种产品面临加工成本居高不下的压力;另一方面,产量需求增大,去除余量加工逐渐成为瓶颈;此外,因一次钎焊合格率过低,严重影响产品质量和生产进度,并造成了无谓的浪费。

### 2.1 激光下料成本居高不下

钣金下料采用意大利二维气体激光切割设备,激光发生器用气体  $\text{CO}_2$ 、He、 $\text{N}_2$  的纯度要求在 99.995% 以上,价格较贵;辅助切割气体 Ar 的纯度也要在 99.99% 以上,要求输入压力不小于 2.0MPa,每小时需 0.1~0.15 $\text{m}^3$ ,每班生产用氩气 1.2 $\text{m}^3$ ,消耗量巨大。加之设备投入成本较高,导致小时加工费用高达 280 元。同时,激光加工属特种工艺,在航空领域的应用尚属摸索阶段,限制严格,客户每年都要指派专人或第三方进行技术、质量审核,各类年度审核的管理成本和加工试片的理化检测费用都相当大。此外,还会导致激光下料造成的辅助工序加工成本的增加,原工艺流程中的“铣高度”、“磨切两端”工序就是要将零件周边的激光切割断面所产生的重熔层完全去除。

### 2.2 毛料利用率较低

如上文所述,两道辅助工序“铣高度”、“磨切两端”所去除的是工艺余量,是造成毛料利用率低的原因之一。另外,在下料排样方面,受激光切割需预打孔和切入、切出距离的制约,其搭边值需在 5mm 以上,而冲切搭边仅需 2mm。激光下料的工艺余量是冲切下料的 2.5~3 倍。

### 2.3 机械加工效率低

封严件的蜂窝底板、大小弯边等扇形件在下料弯曲成型后均需机械加工去除重熔层,并保证零件尺寸和形位公差符合要求。由于薄壁钣金件装夹定位保证加工刚性比较困难,因此机加效率很低。典型件小弯边(P01)“铣高度”见图5。因受  $R599.31$  曲率轮廓影响,铣加工装夹很难实现整轮廓的面接触,加工过程中零件震颤强烈,只能小进给、低速切削,因此加工效率非常低。“磨

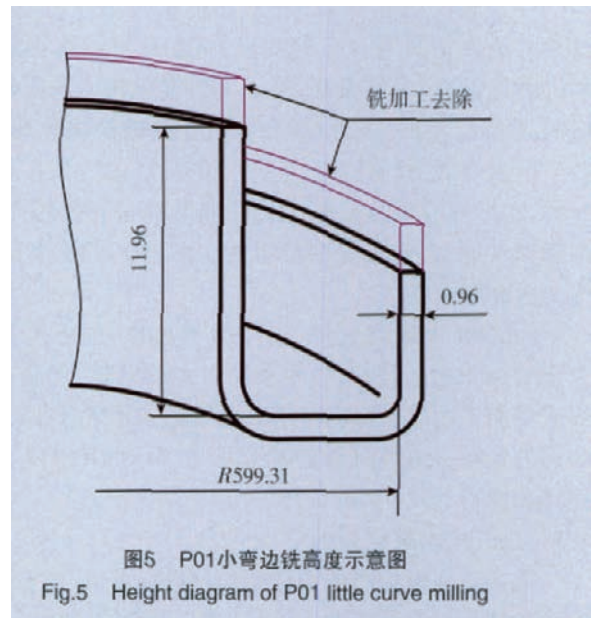


图5 P01小弯边铣高度示意图

Fig.5 Height diagram of P01 little curve milling

切两端”要求两端面向心,即保证图3所示的  $18^\circ$  和端面垂直度,需要在专用工装和专用切割砂轮设备上完成,加工精度低,加工环境差。

工艺优化着眼“弯曲成形”工序,通过研究无余量曲面弯曲,并用冷冲落料代替激光下料,实现取消后续机械加工工序,达到提高效率的目的。

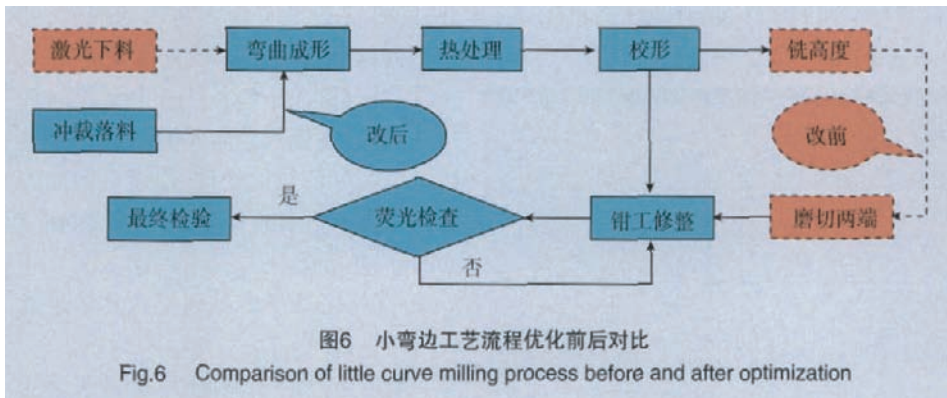
### 2.4 钎焊合格率低

批生产初期,CF6-80C 的 I 级、II 级、III 级一次钎焊合格率一般在 50% 以下,返工(补焊)率、废品率很高。原因是这几个件号的小弯板 P01 和蜂窝底板 P02 的形状复杂,冲压加工后的轮廓度、曲率容差差异大,在储能焊定位时通过夹具施压约束使其贴合,定位焊易产生虚连和内应力,常出现定位焊点开裂的现象;高温钎焊时,由于蜂窝底板与蜂窝局部钎焊间隙过大,造成熔融钎料流失,不能填充蜂窝芯格底部,时常出现局部未焊上的技术质量问题,需进一步完善工艺,提高产品质量。

## 3 工艺优化方案及试验

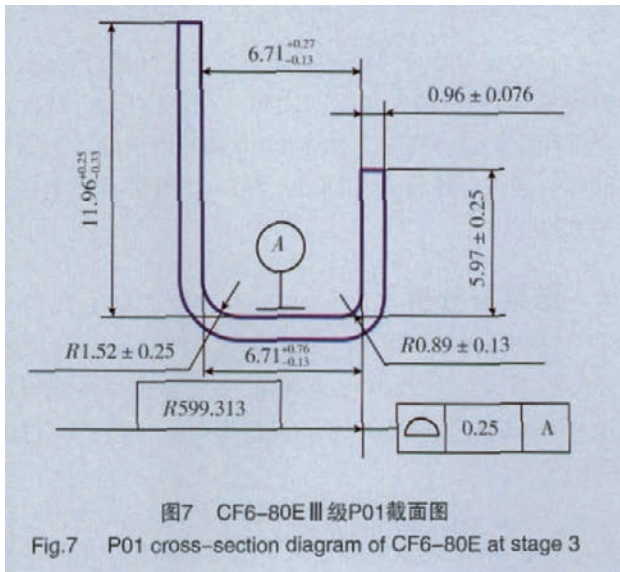
### 3.1 优化流程

以 CF6-80E Ⅲ级小弯边 P01 为例,其工艺调整前、后的工艺流程对比如图 6 所示。流程中以“冲裁落料”代替“激光下料”,降低加工成本,提高材料利用率;通过精确展料和曲边弯曲的工艺试验研究,实现无余量,这样便可取消“铣高度”和“磨切两端”两道工序,提高生产效率,并进一步提高材料利用率。



### 3.2 精确展料

上述工艺流程调整的核心是无余量冲压弯曲。实现无余量弯曲的前提是零件毛料的精确展开。P01 为典型的曲面、平底 U 型弯曲线件,其截面图如图 7 所示。



毛料展开,两端为 3 条线段组成的折线,弯曲后分别形成两侧壁和底,并保证形成共同侧面并通过曲率中心;纵向按弯曲中性层进行计算,毛料边缘不再增加修边余量。根据该件结构特点,对弯曲缺陷造成的缺料和突起进行补偿。

无余量展料定形是一个反复试验、调整的过程。综合利用原弯曲模具,通过定位的临时调整进行弯曲试验,并应用 CAD/CAM 技术实现图形编辑到加工程序的转换,实施弯曲试件的精确下料。

#### 3.2.1 折线尺寸的确定

按零件截面尺寸确定折线拐点,中段(底部)为向心线段,另两段(侧壁)可通过做图方式确定。

#### 3.2.2 弯曲模具采用带顶料装置的校正弯曲结构

U 形底部受校正压力的作用,材料受挤压减薄,在两侧自由端底部产生近似弧形的突起。

在突起最高点处取单元体,按体积不变、极限减薄量 10% 假设,突起高度即为原始料厚的 10%,即 0.1mm。该补偿量仅为试验的原始依据,并与设备主缸压力正相关,二者须在零件整体试压过程中共同确定。

3.2.3 弯曲线在  $R1.52$  和  $R0.89$  的两侧端面(共 4 处)出现突起褶皱

产生的原因为:弯曲时中性层内侧的金属纵向被压缩而缩短,宽度方向则伸长,故宽度方向边缘出现突起。以厚板、小角度、小  $R$  弯曲为显著,同样按上节方式初定补偿量。

#### 3.2.4 侧壁顶端的补偿

零件弯曲变形时,外缘(矮壁)受压应力沿周向缩短,内缘(高壁)受拉应力沿周向伸长。由于应力的边缘失衡作用,便会产生弯曲高度渐变的现象。补偿量通过实物测量获得。

按上述调整进行了 10 件的试验加工,效果理想。至此,提高 P01 材料利用率的目的已经达到,见表 3。同时,通过实施无余量弯曲成形,取消了后续铣加工修边工序,降低加工费用的情况对比见表 4。

### 3.3 冲压加工的改进

在取消激光下料、改进完善冲压工艺的同时,改进、增加模具设计制造是采取的重要措施。除设计以试验定型展料数模为基础的冲切下料模具外,对大小弯边的弯曲成形模具也进行了重新改进设计制造,即同样以展料数模为依据,设计槽式定位结构的弯曲成形模,以达到精准定位,实现无余量弯曲工艺;并设计增加控制回弹结构,改善零件面轮廓度,如图 8 所示。

上述工艺改进已经在 CF6-80E Ⅲ级的大小弯边批生产中实施应用。经组合钎焊完成组合加工,各项指标数据满足设计要求。

### 3.4 提高一次钎焊合格率的工艺措施

#### 3.4.1 成形模具结构调整改进

针对 2.4 节所述造成一次钎焊合格率低的原因,首先对大小弯板和蜂窝底板的弯曲成形模具进行调整改进,使零件曲率相互匹配,以避免在储能定位焊时产生

表3 材料利用率对比

序号	件号	用料规格	板重	零件净重	产出零件数		材料利用率	
					改前	改后	改前	改后
1	P01	2438.4 × 914.4 × 0.9652	19.56	0.041	324	384	67.88%	80.50%
3	P03	2438.4 × 914.4 × 0.9652	19.56	0.0369	209	348	39.42%	65.65%

表4 加工费用对比

工艺方法	改前			改后	
	激光下料	铣加工	磨切	剪板机	冲裁落料
小时费用 / 元	280	168	42	70	84
工时定额 / min	4	15	10	5	4
加工费 / 元	18.67	42.00	7.00	5.83	5.60
合计	67.67			11.43	

为双件对称成形,同时在模具工作部分做对消回弹的结构处理。图9为改后的对称成形模下模示意图。

对称成形的目的是平衡轴向分力,同时增加压边装置,改善毛坯受力状态,使其在拉应力状态下流动、贴模;另外,蜂窝底板属宽板大曲率弯曲件,曲率回弹非常显著,并影响截面轮廓尺寸,因此,除将曲率半径给出足够回弹量外,还须在模具径向截面交接R处进行对消回弹的结构处理,即模具截面的凸R取零件标注尺寸的最下限,而相应的凹R须清根。

### 3.4.2 储能定位焊参数调整及钎料涂敷技巧

扇形封严件钎焊时采取加密储能定位焊点、增加预结合点的措施,保证金属板片间的钎焊间隙均匀一致,同时也增加了定位结合力,有效降低了在高温钎焊焊点的开焊几率。针对因产品结构尺寸限制,原定焊夹具无法实现“加密”点焊的情况,特别制作了紫铜支撑块和异形电极,满足不同产品形状的需要。

对底板与蜂窝间局部钎焊间隙过大区域,预涂膏状镍粉钎料,用以填补过大的间隙。在定位焊后,对检查局部间隙超过0.15mm处也涂膏状镍粉以消除过大钎焊间隙。通过上述改进,扇形封严件一次钎焊合格率提高至85%以上。

## 4 结果与分析

经过工艺优化和完善,每年材料利用率提高8.49%,节省加工费用56.3万元,一次钎焊合格率提高至85%以上,同时解决了该类扇形封严件生产交付的瓶颈。

采用传统的冲切工艺代替激光下料工艺,无论对提高毛料利用率,还是对缩短工艺流程都能起到事半功倍的效果。激光加工的优越性,主要体现在研制期投入少、周期短、灵活高效。但用于大批量生产时,还有一些缺点难以克服。

转包生产的特点是研制周期短,须尽快完成新件研制并转批量生产,以便尽可能多地获得市场份额;同时,外商以每年7%的速度递减产品价格,迫使我们必须在降低成本、提高效率上下功夫,以获得足够的利润。在国际市场竞争激烈的大环境下,工艺技术优化和调整是必须的、经常的,这种随机应变对于追求转包生产的不断发展具有普遍意义。(责编 淡蓝)

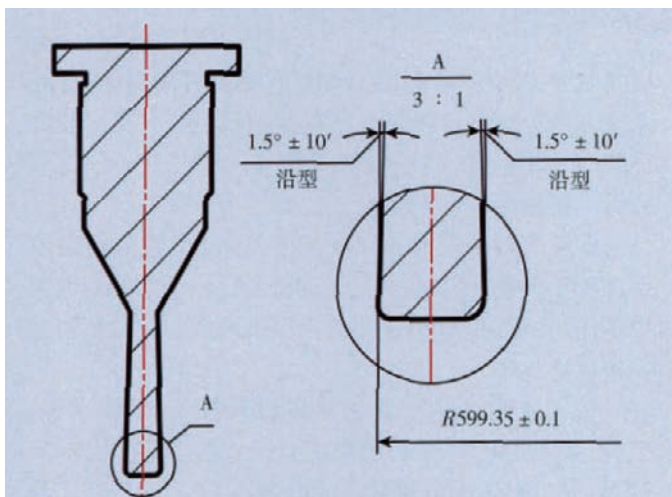


图8 弯曲凸模回弹控制示意图

Fig.8 Resilience control diagram of bending punch force

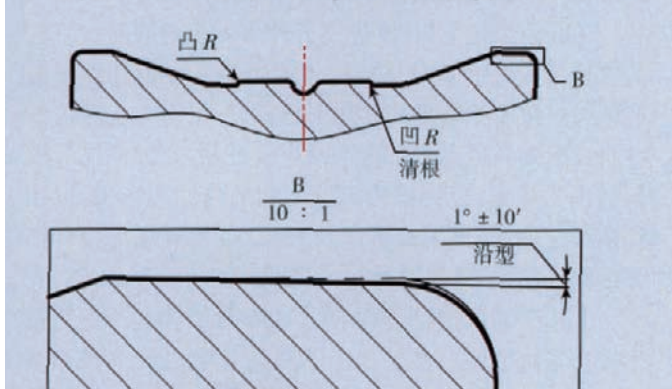


图9 蜂窝底板对称成形模下模示意图

Fig.9 Bottom part diagram of symmetry forming die of honeycomb base plate

内应力。大小弯板的轮廓控制和模具改进如3.3节所述;蜂窝底板弯曲成形模的改进是将原工艺的单件成形改