

非规则薄壁类零件的一体化加工技术

张永智，豆永鹏，郭颖，董冲，朱航，高媛，汪东东

西安现代控制技术研究所 陕西西安 710065

摘要：针对非规则薄壁曲面零件在数控加工中的难点，从工艺方案、切削策略及程序设计上进行创新，在加工中心上制定从毛坯到成品的一体化加工方案，简单快捷、安全可靠，不需要额外制作工装夹具，解决了零件的装夹和变形问题，大幅提升了工艺刚性和加工精度。

关键词：非规则；薄壁零件；一体化加工；装夹；变形

1 序言

薄壁曲面类零件被广泛应用于航空、航天和兵器等飞行产品领域，是控制飞行器稳定飞行、提高飞行品质的重要部件。某项目产品稳流盖为曲面薄壁结构零件，如图1所示，零件整体壁厚约为0.5mm，边缘最薄处仅为0.2mm，各面的加工要求为：外形最大轮廓尺寸 $(197 \pm 0.08) \text{ mm} \times (106 \pm 0.08) \text{ mm} \times (23 \pm 0.1) \text{ mm}$ ，内、外圆弧面半径分别为 $(94.4 \pm 0.10) \text{ mm}$ 和 $(94.9 \pm 0.10) \text{ mm}$ ，尾部3处凸台与圆弧面的向心角度为 $40^\circ \pm 5'$ 。通过对图样和结构初步分析，可知零件刚性较差，容易发生加工变形。进一步分析判定该零件的加工难点主要有：①零件内、外圆弧面上的特征需多次装夹才能完成加工，而非规则的零件外形没有可直接利用的装夹面，装夹和找正不易。②零件材料为铝合金，两曲面壁相对较薄，加工中材料去除率较高，极易产生热变形而无法满足图样设计尺寸及表面质量要求。必须在工艺方案、切削策略及程序设计等方面进行工艺创新，以解决零件生产中的加工难题^[1, 2]。

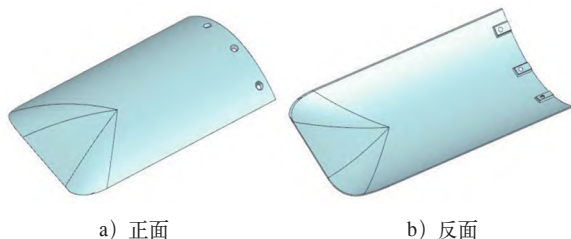


图1 稳流盖产品示意

2 确定加工方案

经过调研，此类薄壁壳体零件通常有两种加工方式：一是通过预留工艺台，先加工一侧曲面，再制作工装，用已加工好的曲面进行定位，最后加工另一侧曲面的方式；二是采用3D打印直接成形的方式。这两种方式各存在以下弊端：①第一种方式预留工艺台难以实现基准统一，导致多次装夹定位精度差，加工精度不易控制，加工周期长，不利于科研任务顺利进行。②第二种方式，目前精度较高的激光选区熔化（SLM）3D打印技术，其加工精度为0.1~0.2mm，且零件打印后极易发生变形，无法满足该零件尺寸精度和几何精度要求，同时其加工成本较高，不适于产品后续的批量生产。针对上述问题，提出了将工装和零件合二为一的一体化加工思路，如图2所示，以预留的零件包容块兼作装夹工艺台和定位基准，在粗、精加工工序中多次修正包容块轮廓尺寸，以满足零件正反两面加工过程中的定位精度要求，解决零件难以装夹的问题。再通过对零件加工程序设计、对称切削策略的优化来解决零

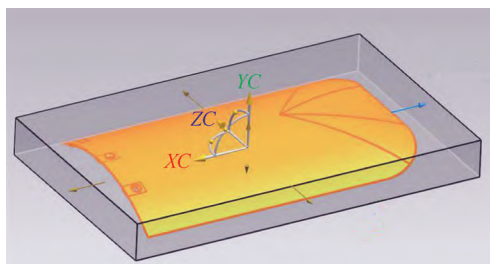


图2 一体化加工方案示意

件变形问题^[3, 4]。

3 方案的实施

3.1 工艺设计

根据零件的结构特点，确定稳流盖的加工工艺流程为：下料→粗铣毛坯至包容块轮廓尺寸→粗铣反面内部型腔→粗铣正面外部轮廓各面→人工时效→精铣包容块轮廓尺寸→精铣反面内部型腔→精铣正面外部轮廓各面→修整连接区域→线切割分离包容块与零件→钳工修整连接区域→终检。

3.2 “一体化”毛坯的确定

根据稳流盖零件实际结构特点和最大包络尺寸，在综合考虑装夹方式、余量及工序间的找正基准后，用NX软件将零件沿外轮廓进行延伸和整体覆盖，构造一个适合的包容块，并建立三维几何模型（见图3）。考虑到零件整体刚性差，在加工后易因材料本身及切削产生的应力释放而发生变形，决定选用经预拉伸后的高强度7075-T651铝合金板材作为毛坯。此种板材内部应力相对较小，可显著减小零件加工后的变形，提高加工精度^[5]。

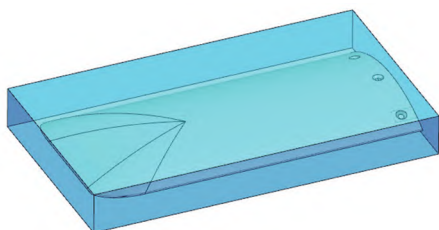


图3 稳流盖一体化毛坯三维几何模型

3.3 粗加工

选用精密平口钳沿长度方向装夹，以粗加工的包容块轮廓尺寸实现定位，选用铝材专用立铣刀进行层切加工，采用高转速、高进给速度和小切削深度的加工策略，程序则选用UG型腔铣，进行粗加工、二次粗加工，各表面留余量1mm。一面完成后，翻转另一面进行类似加工。主要工艺流程如下。

1) 粗铣毛坯外形轮廓，尺寸为 $(210 \pm 0.02) \text{ mm} \times (150 \pm 0.02) \text{ mm} \times (24 \pm 0.02) \text{ mm}$ ，作为粗基准。

2) 找正平口钳误差 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 内，以上一工步外形各面作为粗基准定位，调用程序粗铣反面内形圆弧面及轮廓，留余量0.3mm。

3) 翻转另外一面，加工正面圆弧面，步骤同上。

4) 粗加工零件与包容块结合部，留余量0.3mm，为后期线切割切断分离减少余量，同时释放应力。粗加工后的零件如图4所示。



图4 稳流盖粗加工实物

3.4 人工时效

将零件加热至时效所需温度并保温一定时间，去除切削残余应力。

3.5 精加工

采用组合夹具、压板夹紧的方式，精修包容块外部轮廓各面作为精基准进行定位装夹，程序选用UG固定轴曲面区域轮廓铣进行精加工。一面完成后，翻转另一面进行类似加工。主要工艺流程如下。

1) 精铣包容块外部轮廓，尺寸为 $(209 \pm 0.02) \text{ mm} \times (149 \pm 0.02) \text{ mm} \times (23 \pm 0.02) \text{ mm}$ ，作为精基准。

2) 找正、夹紧，精加工反面圆弧曲面，并层切加工3处凸台及钻凸台部位各小孔。

3) 翻转另一面，加工正面圆弧曲面。

4) 修整零件与包容块工艺台的连接区域，以便后续工序去除包容块时余量较少，不易损伤零件^[6]。精加工反面圆弧曲面后的工件实物如图5所示。



图5 精加工反面圆弧曲面后的工件实物

3.6 后续工序加工

后续加工工序如下。

1) 线切割工序。以精修后的包容块六方体各面定位,按图样尺寸要求沿外形轮廓切割,完成包容块与零件的分离。

2) 钳工工序。利用软材质辅助装夹支撑,沿零件纹理方向进行外轮廓表面的局部修整。

4 关键工艺难点及解决方案

4.1 零件不易装夹

整流罩零件不易装夹,主要表现在以下几点。

1) 该零件外形不规则,且整体呈薄壁状,四周没有可利用的装夹基准面,装夹刚性较差,传统装夹方式较难满足加工要求。

2) 采用周边制作工艺台的方式,较难找到合适的位置,且两圆弧面形成的外轮廓较薄,即使建立工艺台,后期的工艺台去除也需要专门安排额外工序。

针对此问题,采取毛坯和零件一体化加工思路,具体实施过程如下。

1) 沿零件轮廓周边和厚度方向依次延伸5mm、2mm,加工出规则、易装夹的包容块六方体,且保证各面平行度、垂直度 $\leq 0.02\text{mm}$,作为粗、精加工的装夹、定位基准。

2) 粗、精加工工序前,应对作为基准的包容块六方体进行精修,以保证定位的稳定性、一致性。

3) 考虑到零件周边存在多处尖棱(见图6),无法与零件外框形成有效连接,故在外壁增加3处长条凸台,以提高零件与包容块工艺台的连接刚性^[7]。最终确定零件的装夹方案如图7所示。

4.2 加工中零件变形

由于整流罩零件材料为铝合金,且属于典型的薄壁件,其表面由多个不同角度的斜面和圆弧面构成,两端结构差异化明显,去除余量过程中会产生应力变形,因此从装夹、铣削策略等方面进行

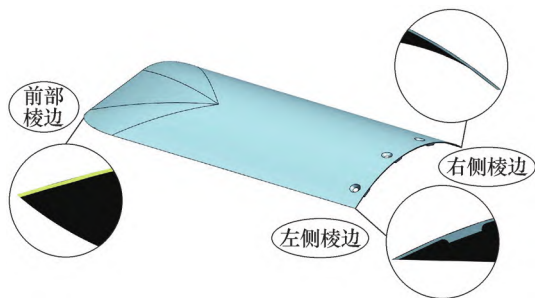


图6 稳流盖四周棱边为尖棱

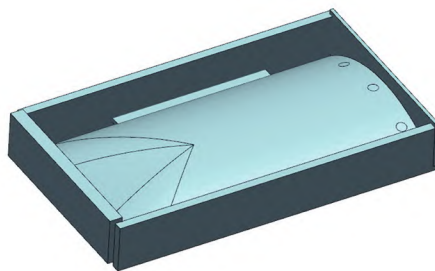


图7 稳流盖装夹方案

控制。

(1) 装夹 零件在粗加工时,夹紧力要适中。若力太小,则夹不紧零件;若力太大,则会将零件顶起。装夹好后,应采用百分表测量上平面进行装夹验证。

精加工装夹时,采取用压板沿Z向压紧零件周边的装夹方法(见图8),避免零件在刚性较弱的X、Y方向受力,最大限度避免零件在装夹过程中发生变形。



图8 精加工装夹

(2) 对称铣削 粗加工完成后,零件单面有余量1mm,采用半精加工0.7mm、精加工0.3mm的分层加工方法,先完成一面的加工后,翻转另一面对称加工,达到对称去除余量、变形相互抵消的效果^[8]。

(3) 冷却 加工全程保持大流量切削液,减小刀具和零件的热变形。

(4) 刀具 选用前角、螺旋角大的铝材料专用刀具,保证刀具切削锋利,刀具抗力小^[9, 10]。

5 方案检测验证

进行上机试切、加工,优化程序实现后续零件的加工。经三坐标测量机测量,内、外圆弧面实测尺寸值分别为:94.36~94.42mm(变形量0.06mm)、94.90~95.00mm(变形量0.10mm),产品各项尺寸、表面质量均满足图样要求。零件的检测如图9所示,三坐标检测报告如图10所示。

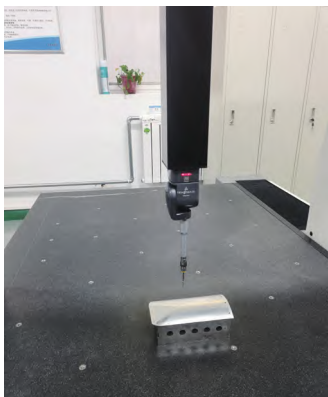


图9 零件的检测

6 结束语

本文针对非规则薄壁曲面零件在数控加工中的装夹和变形难点，在加工中心上制定了从毛坯至精加工的一体化工艺方案，顺利完成产品加工，总结如下。

(1) 加工思路 实现对非规则零件的一体化加工，无需额外制作工装，工件装夹简单快捷，并且提升了产品的加工精度和刚性。

(2) 加工方案 针对非规则薄壁类零件的变形量进行有效控制，制定出更加高效的工艺方案。

pocdmis		零件名: 整流罩				十二月 19, 2023		14:56	
		修订号:			序列号:			统计计数: 1	
母	毫米	位置3 - 圆1							
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL		
半径		94.364	94.364	0.000	0.050	-0.050	0.000		
母	毫米	位置4 - 圆2							
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL		
半径		94.390	94.390	0.000	0.050	-0.050	0.000		
母	毫米	位置5 - 圆3							
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL		
半径		94.420	94.420	0.000	0.050	-0.050	0.000		
母	毫米	位置2 - 圆4							
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL		
半径		94.901	94.901	0.000	0.050	-0.050	0.000		
母	毫米	位置7 - 圆5							
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL		
半径		94.962	94.962	0.000	0.050	-0.050	0.000		
母	毫米	位置1 - 圆6							
AX		NOMINAL	MEAS	DEV	+TOL	-TOL	OUTTOL		
半径		95.005	95.005	0.000	0.050	-0.050	0.000		

图10 三坐标检测报告

参考文献:

- [1] 杨伟群, 张鹏辉. 加工中心操作工 (技师、高级技师) [M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.
- [2] 王志龙, 王宏睿, 王志斌. 不规则台阶孔在加工中心上的加工实践[J]. 新技术新工艺, 2005 (4): 28-29.
- [3] 梁炳文. 机械加工工艺与窍门精选[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 韩鸿鸾, 丛培兰. 数控程序员全技师培训教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [5] 贺琼义. 五轴加工中心操作与编程[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2017.
- [6] 宋放之. 数控机床多轴加工技术实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [7] 邢鸿雁, 陈榕林. 机械制造难加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [8] 韩鸿鸾. 数控铣工加工中心操作工 (技师、高级技师) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [9] 杨叔子. 机械加工工艺师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [10] 李益民. 机械制造工艺设计简明手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

MW 20240729