

# 复杂薄壁零件加工的辅助刚性增强方法

## Auxiliary Stiffening Method for Processing Complicated Thin-Wall Component

中航工业洛阳电光设备研究所 庄纪纲 董晓 张伟伟

**[摘要]** 刚性差是薄壁零件加工领域的一个难题,采用包裹或填充辅料提高薄壁零件刚性的方法对解决薄壁零件加工变形问题、提高工艺性、控制尺寸变化有良好的效果,是提高薄壁件加工性能的有效途径,对提高加工质量和生产效率有着积极的意义。

**关键词:** 刚性 增强 薄壁零件

**[ABSTRACT]** Weak rigidity is a big challenge in thin-wall component processing. The method in which wrapping or stuffing auxiliary materials is used to improve the rigidity of thin-wall components is ideal for solving the problem of deformation arising in the component processing, controlling dimensional and enhancing the technology, it is an effective method for thin-wall component processing, and is of great significance for increasing the processing quality and productive efficiency.

**Keywords:** Rigidity Enhancing Thin-wall component

机械加工中,刚性差会导致很多零件加工中出现加工变形、精度不能保证的现象,而导致刚性差的主要原因是零件壁厚不足、长径比或宽厚比过大所致。复杂薄壁零件是典型的低刚性零件,改善这类零件加工的工艺方法对提高工艺质量有着积极的意义。

随着技术的发展,薄壁整体复杂零件对机械加工技术提出了新挑战。结构复杂的飞机薄壁板、薄壁肋、整体梁、整体框、整体缘条等各类航空结构件如何高效率、高质量、低成本地完成机械加工是我国航空制造业亟待解决的难题之一。其中,有效控制航空薄壁整体复杂零件的加工变形是保证航空产品质量的关键技术<sup>[1]</sup>。

航空机载产品对结构件要求越来越苛刻:结构越来越复杂、壁厚越来越薄、精度越来越高、悬伸越来越长、刚性越来越低(加工过程中)、制造要求越来越高。这类零件加工工艺的共性是:装夹困难甚至无法装夹、加工易变形(含撕裂)、零件精度指标难以保证。

薄壁结构在制造过程中由于其相对刚度较低、加工工艺性差;在切削力、装夹力、切削振颤等因素作用下极易发生变形、失稳和振动等问题,制造难度极大。加工

变形已成为现代制造技术中影响加工精度与质量的关键因素,严重地阻碍了相关制造业的发展<sup>[2]</sup>。采用优化切削参数的方法降低切削力来满足低刚性零件的加工已经不能满足薄壁零件加工的要求。

镜筒是生产中遇到的复杂薄壁零件,零件精度高、刚性差、外形不规则、无合适的装夹表面,采用包裹辅料的刚性增强方法后,这些问题得到了解决,保证了产品质量,满足了生产和批量交付的需要。

### 1 复杂薄零件镜筒的工艺分析

#### 1.1 零件特点及加工难点

镜筒零件外形如图1所示,材料为铝合金,外表面已经成形,为近锥面的不规则表面,大部分壁厚在1mm以下,局部只有0.5mm。零件内腔孔及端面定位孔需要精加工,尺寸精度为6~7级,孔圆度等形位公差达6级。

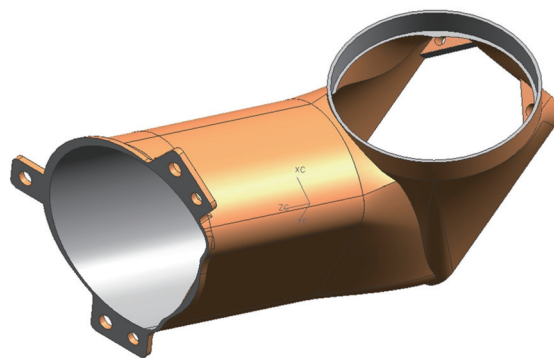


图1 镜筒结构示意图

Fig.1 Diagram of lens barrel structure

镜筒是典型的复杂薄壁结构零件,不仅刚性差,而且还没有合适外表面供装夹使用,内腔精加工时无法提供合适的装夹定位、支撑和着力点,属于难加工类型的零件。主要问题如下:

(1) 零件壁厚不足1mm,刚性差,在夹紧力或切削力的作用下,工件的壁厚不足以抵抗夹紧力的作用,极易产生变形,尺寸精度和形位精度严重降低,无法达到设计指标。

(2) 零件外形复杂,外表面为近锥面的不规则表面,

不易采用专用工装定位且无合适的装夹点。

(3)在切削力(特别是径向切削力)的作用下,很容易产生振动和变形,影响工件的尺寸精度、形状、位置精度和表面粗糙度。

(4)试制采用逐件配铣外形装夹,不仅效率低下,零件合格率也很低,不能保证生产需求。

## 1.2 薄壁低刚性零件特点及常用解决措施

薄壁特征的零件由于薄壁或者薄腹板的局部刚性不足,切削过程中的切削力、切削热以及机床夹具系统的夹紧力会引起零件局部变形,将导致零件局部尺寸超差和形貌超差。整体轮廓变形主要表现为切削加工完成后(如卸除夹具工装后)的整体弯曲、扭曲以及零件放置过程中的伸长和缩短等,其尺度与结构件外形轮廓尺寸相当。控制薄壁零件加工变形的主要问题在于处理好切削力和零件局部刚度的关系<sup>[1]</sup>。

为了保证零件的加工质量,制造过程中产生了一系列增强刚性的办法,主要包括刚性辅助增强、弹性夹紧与胀紧装夹、预留辅助工艺柄等辅助增强方法来提高生产过程中零件的加工刚性。

(1)刚性辅助增强方法:主要采用螺纹千斤顶等调整形式,对薄弱点给予支撑,提高刚性,主要是把支撑点选择在切削力和夹紧力的作用部位,增强零件刚性,达到抗切削力变形的目的。一般情况下,螺纹辅助支撑需要一定的预紧力,对消除夹紧力有良好的效果。

优点:刚性增强方法直接,刚性增强部位选择简单。

缺点:适合零件结构特征比较简单的零件,不易实现曲面类零件辅助增强;辅助支撑的调整不易,受操作人员水平的影响较大,不适合高精度零件的辅助支撑。

(2)弹性夹紧与胀紧辅助增强方法:加工轴类、圆环类、筒类薄壁零件时,可采用均匀弹性变形原理的自动定心夹具,如液性塑料、弹性膜片、弹簧筒等自动定心夹紧装置<sup>[2]</sup>。

优点:装夹拆卸方便,定位精度较高。

缺点:适用范围有限,仅适合旋转定位类型的零件。

(3)工艺柄辅助增强方法:在工件上预留工艺柄,提供装夹位置,避免装夹变形,对零件刚性也有适度提高,待零件加工完成后,切除工艺柄。

优点:装夹部位增强刚性效果很好,能有效防止装夹变形,加工完成后切除工艺柄,可保持较高的加工精度。

缺点:使用范围受限,复杂零件不易实施,不能消除切削力变形的影响。

(4)粘接法辅助增强:使胶粘剂将零件与刚性夹具粘接呈有机的整体,以提高零件整体刚性,一般适合于结构简单,需要有较大的平面供粘接,尤其适合平板类

零件的加工。

优点:操作方法简单,零件与夹具形成一体,提高刚性效果好,能很好地解决不易装夹的问题。

缺点:使用范围有限,胶粘剂应具有容易拆除的能力。

根据镜筒的自身特点,以上常规的增强刚性方法,不能解决零件装夹变形和无合适装夹表面的问题,还需要采用其他更有效的措施来保证零件的加工。

## 2 包裹辅助增强方法

针对常规薄壁零件加工工艺方法的局限性,经过分析,考虑在镜筒外周包裹辅助材料,使辅助材料与工件成为有机的整体,以提高零件整体刚性,这样既可以提高零件刚性又能够提供良好的装夹定位基准。它具有不受零件外形影响、辅料与零件形成一体、提高刚性效果好优点。其主要缺点是辅料使用过程需要增加适当的辅助工具。

### 2.1 包裹材料性能要求

为提高零件加工过程中的刚性和强度将零件包裹起来所采用的辅助材料应具备以下特性:

- (1)包裹零件方便;
- (2)包裹材料与零件分离方便;
- (3)零件在加工过程中不产生力学变形;
- (4)包裹紧密,不产生缩缝(即相对零件有微膨胀性);
- (5)包裹后满足工艺系统夹紧力和切削力要求;
- (6)包裹后能适应加工冷却液的喷淋要求;
- (7)包裹材料不与零件产生化学反应。

满足上述特性的材料有3种:低熔点合金、快干粉(改性石膏)、改性石蜡。

### 2.2 低熔点合金的特点

低熔点合金最主要的特点是浇注温度低,包括低比热和熔化潜热,材料熔化包裹零件而不引起相应的热膨胀或畸变;粘度和表面张力低,在固化过程中和固化后的体积变化很小,适于包裹规则与不规则零件,建立定位与装夹面与加工表面间精确的定位关系。

低熔点合金包裹来提高零件的强度,与铸造相似,用工装定位、固定零件,将低熔点合金注入工装内,包裹零件,避免低熔点合金流入零件加工面;利用低熔点合金特有热缩冷胀的特性,在低熔点合金冷却后的微变形会给零件施加相应的包裹力或张力,有效与零件结合成有机的整体。

当精加工内腔时,零件外形有低熔点合金包裹而避免产生变形;当精加工外形时,零件内腔有低熔点合金支撑而限制变形,加工性能将大大提高。完成加工后,加

热使低熔点合金熔化,将零件取出即可。

低熔点合金物理特性如表 1 所示。

表 1 新型低熔点合金机械特性

密度 / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	拉伸强度 / MPa	硬度 / HB	安全载荷 / MPa	30s 内最大 载荷 /MPa	膨胀 系数
9.38	41	9.2	2	70	+0.0057

### 2.3 快干粉的特点

快干粉是一种以石膏为主要原料,加以多种添加剂(羟基甲纤维素,缓凝剂,增稠剂)混合制成的无机粘和材料,外观为白色粉末。常温下具有遇水能快速凝固、凝固后轻微膨胀、强度高的特点,无毒无害,不污染环境;该材料呈弱碱性,对人体有轻微腐蚀,施工时要带橡胶手套,该材料对铝合金有轻微腐蚀(0.001~0.005mm)。

快干粉物理特性如表 2 所示。

表 2 快干粉机械特性

密度 / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	拉伸强度 / MPa	硬度 / HB	剪切强度 / kPa	极限载 荷 /kN	膨胀 系数
2.9~3.1	2	8~9	500	68~74	+0.007

### 2.4 改性石蜡

石蜡熔点和强度低,容易破碎,无法满足夹具装夹、刀具切削的要求。通过在石蜡中加入添加物,可提高其硬度、韧性和抗拉强度,改善力学性能。

首先,提高材料软化和熔化温度。石蜡是无色至白色结晶蜡状固体,无臭无味,相对密度为  $0.82 \sim 0.9g/cm^3$ ,普通硬蜡熔点为  $45 \sim 60^\circ C$ ,加入添加材料后石蜡的熔化温度可以达到  $70^\circ C$  以上。在  $35^\circ C$  以下的环境使用,材料不会发生明显的软化,可以满足机床装夹及加工要求。

使用改性石蜡时,由于改性石蜡本身强度和硬度的限制,主要应用在精密加工或小余量加工等生产环节,不适宜在粗加工和大余量切削时使用。

在石蜡中加入添加材料后,提高了石蜡的硬度,改善了石蜡黏性大、容易粘附的特点,通过调整配方,复合石蜡材料基本满足了包裹增加零件刚度的要求。

经过以上几种材料的对比应用,最终选用低熔点合金作为最终的辅助增强材料。

## 3 包裹法辅助增强在镜筒加工中的应用

### 3.1 低熔点合金的使用

低熔点合金的熔点选择需要考虑以下要求:

- (1) 加工过程中,低熔点合金不会受热熔化;
- (2) 零件是否在熔化过程中受热变形。

零件在精加工时的加工余量很小,一般不大于 0.5mm,而且有冷却液的充分冷却,零件受热温度不大于  $60^\circ C$ ,加工完成后应便于将低熔点合金熔化脱离零件,合金的熔点应控制在  $60 \sim 100^\circ C$  之间。

对于铝合金材料来说,退火温度在  $350^\circ C$  以上,时效的温度也在  $185^\circ C$  左右,脱型溶化的温度控制在  $100^\circ C$  以下,不会影响零件的材料晶相组织的变化,也不会引起材料的变形。根据上面要求,选择采用了  $70^\circ C$  熔化的以铋(Bi)元素为主的低熔点合金。

### 3.2 使用流程

包裹增强镜筒提高薄壁零件刚性的操作流程如图 2 所示。

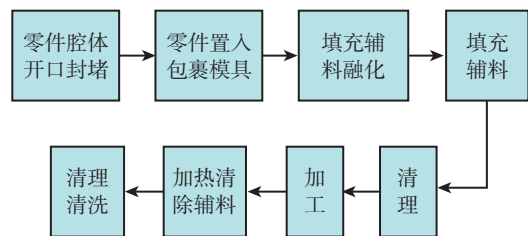


图 2 包裹低熔点合金的使用流程

Fig.2 Process of using package low melting point alloy

## 4 加工与验证

使用低熔点合金包裹的方法进行镜筒的精加工,很好地解决了零件易变形的问题,取得了良好的效果,首批 20 件零件的尺寸精度和形位公差精度全部合格,随后批次的加工合格率也稳定在正常的范围之内。

在应用包裹辅助增强工艺前,加工该镜筒时采用对镜筒外形采样配铰工装等办法来改善壳体的刚性,不仅制造成本高周期长,而且每个零件都需要调整和配作工装,生产周期需要近 30h,而加工合格率极低,不足 30%,无法满足批量生产的需要。

低熔点合金包裹的方法操作简单,不需高精度工装夹具和设备投入,节约了生产成本,精加工尺寸和形位公差合格率从不足 30% 提升到 90% 左右,加工周期也从 30h 缩短为 9h。

经过试应用,该方法已经推广到其他类型的薄壁零件,不仅可以用来包裹外表面实现内腔加工,也在填充内腔完成薄壁零件外形加工方面取得了良好的应用。使用该方法加工零件的合格率已经达到了常规精密零件加工的水平。

## 5 结束语

根据现代航空工业的需求,航空结构件朝着薄壁

(下转第 86 页)

是我国发动机试验平台不完善,很多试验技术领域经验欠缺,这无疑制约着发动机各零部件的试验。

### 2.3 对策

针对发动机预先研发、基础研究不够的事实,我国应该多加强基础学科建设,加强与发动机发展相关的结构力学、材料学、电子学等学科建设,加强学术方面的积累,鼓励各学科专家、教师、学生加强基础研究,为发动机的发展打好基础。在加强基础研究的同时,加强发动机关键技术的研究,着重解决当前所面临的问题。找出发动机自主研制的薄弱环节后,加强研究,早日找出解决问题的答案。基础研究和应用研究相结合才能早日突破发动机自主研制的难点。

国家应该给予发动机项目更多的资金支持,同时设立专门的机构监督这些资金的运用情况,降低大飞机项目成为“名利场”的风险。号召社会各界给予发动机自主研制大力支持,鼓励效益好的民营企业的资金支持,政府、航空工业、公众形成合力,为振兴我国的飞机行业而共同努力。

在人才培养方面,加强校企联合<sup>[6]</sup>,提高在校大学生解决实际问题的能力。学生的创造能力是极强的,如果给予他们相应的培训,提供相应的平台支持,他们的创造力就能充分发挥出来。在校大学生在课余时间和节假日参与到发动机自主研制的项目中来,他们或许可以给予专家灵感,加快发动机自主研制的速度。企业与校方共同建立科研基地,联合申报科研项目,推进校方科技成果转化。校方应该加大对骨干教师、专家、人才的交流和培养力度,使他们切实为我国自主研制发动机做出贡献。

我国商用飞机发动机项目公司的成立为发动机的研制提供了一个平台,但是初步建立的这样一个平台还有很多条件达不到试验的要求。我们应该在硬件设施和软件设施方面不断完善,遇到问题及时解决,使平台的建设不断满足试验的技术要求,同时成立一个高层领导机构保证平台建设的顺利进行,高层领导机构在保证平台建设的同时,应该对发动机平台建设的风险征兆进行及时的识别,并进行纠偏,防止我国由于这方面的技术不先进造成重大后果,建立风险管理体系的结构性支持和非结构性支持,通过企业内部的危机管理体系和与内部结构相连的社会界的共同努力防止风险发生或者减小风险的损失,使我国的发动机试验平台建设顺利进行。

### 3 结束语

本文从提高发动机自主研制能力的目的出发,运用系统工程中的解释结构模型对影响发动机自主研制的

各个因素进行了系统化的分析,然后运用层次分析法给予每个因素权重,在此基础上根据我国发动机发展的现状提出了加强基础研究、培养相关的人才以及加大各种硬件设施建设的建议。利用系统的思想探究各个影响因素之间的联系,可以减少由于主观因素而导致的判断错误,便于企业从最基本的影响因素着手,提高发动机的自主研制能力。但是由于影响发动机自主研发能力的因素有很多,评价指标的选取和方法的选择还需要深入的研究,同时,现代发动机正向着大推力、长寿命、低油耗、低排放等方向发展,我国自主研制的大飞机发动机必须满足这些技术要求,才能在竞争激烈的民机市场中站的一席之地,这对我国自主研制的发动机提出了更高的要求,这就需要发动机自主研制提出更多更好的建议。社会各界积极参与到发动机的研制中来,我国大飞机一定可以适时装配自主研制的先进发动机,具有自主知识产权的大飞机一定可以早日飞向蓝天。

### 参 考 文 献

- [1] 梁春华. 21世纪大飞机发动机的预研计划与关键技术. 航空制造技术,2009(17):40-44.
- [2] 黄春峰,唐丽君. 中国大飞机发动机研制任重道远. 航空制造技术,2010(14):49-52.
- [3] 田秋丽,刘战合. 中国大飞机的自主创新和国际合作探. 长沙航空职业技术学院学报,2009(3):44-47.
- [4] 宁南. 大飞机项目卡在哪里. 商务周刊,2006(5):27-40.
- [5] 柏培. 国产大飞机发动机设计研发人才队伍初具规模. 中国民航报,2010-08-17[6].
- [6] 沈文敏. 我大飞机发动机探索“校企合作”. 中国工业报,2010-06-21[2].

(责编 夏宛)

(上接第76页)

化、整体化、复杂化方向演变,解决其加工变形问题对于提高航空产品质量和加工效率具有重要意义。

在分析了典型薄壁件和整体件加工变形特征的基础上,用低熔点合金作为包裹辅助材料提高零件刚性,材料常温性能稳定,可以很好地控制零件精度,有效解决了薄壁零件加工易变形的问题,提高了零件的工艺性,取得了较好的效果。该方法不仅可以包裹外形,更可以填充零件内腔,实现高效优质地完成薄壁零件的精密加工。

### 参 考 文 献

- [1] 何宁. 航空结构件加工变形及其控制. 航空制造技术,2009(6): 32-35.
- [2] 张虎. 浅谈防止薄壁类零件变形的办法. 科技信息,2010(23): 622,610.
- [3] 汤湘中. 机床夹具设计. 北京:国防工业出版社,1988.

(责编 夏宛)