

高温合金材料高精度薄壁盘环类零件加工变形控制研究

Research on Deformation Control of High-Precision Superalloy Disk and Baffle With Thin-Wall

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 李成武 魏 军

[摘要] 航空发动机盘环类件结构的突出特点是形状复杂、壁薄、刚性差,加工时容易产生变形,因此对该类零件加工变形进行深入研究并提出相应的变形控制措施十分重要。本文以航空发动机高温合金材料盘环类件为研究对象,对其加工残余应力和变形的特点以及控制方法进行了探讨。为了减小或避免薄壁盘环类零件的变形,保证零件的尺寸偏差、形状与位置偏差及技术条件满足设计要求,本文在工艺路线的安排、工艺方法和设备的选用、工艺装备的结构设计、加工余量的划分及切削用量的选择等方面均采取了相应的控制应力与变形的措施,实现了对高温合金材料薄壁盘环类件加工变形的控制。

关键词: 高温合金 加工应力 失稳变形 工艺方法

[ABSTRACT] The structure characteristics of the aeroengine discs and baffles are complex shape, thin wall and low rigidity, the deformation is very common in processing, so it is very important to study how to control the deformation in processing. The machining residual stress and deformation characteristics and the control method based on the aeroengine superalloy disks and baffles with thin-wall are studied. In order to avoid or reduce the deformation of disks and baffles with thin-wall, to ensure the dimension deviation, shape and position deviation and technical conditions meeting the design requirements, it takes steps to control stress and deformation in process arrangement, equipment selection, equipment structure design, process redundancy distribution and the choice of cutting parameters. All the methods make the deformation controlling of superalloy disks and baffles with thin-wall come true.

Keywords: Superalloy Processing stress Buckling deformation Process method

加工变形是航空发动机高温合金材料盘环类件制造中面临的难题,目前国内相关院校和企业对航空发动机薄壁盘环类零件加工变形控制还缺乏有效的方法,更

多的是研究变形预测,对于解决方案的研究却很少。涡轮转子部件是航空发动机最重要的核心热端部件之一,涡轮部件的材料必须具有高的屈服强度、拉伸强度和足够的塑性储备,能适应高温下可靠工作的要求,也就是它要有足够的高温强度和良好的热稳定性以及耐腐蚀能力。高温合金在切削加工时,切削负荷重,单位切削力可比中碳钢高 50%;切削温度高,在相同的切削条件下,切削温度约为 45 钢的 1.5~2 倍;刀具磨损剧烈,刀具寿命明显下降,在高切削温度(750~1000℃)下,刀具产生严重的扩散磨损和氧化磨损;加工硬化现象严重,已加工表面的硬化程度可达 200%~500%。因此高温合金的可切削加工性能低,加工过程中产生的切削力大,零件中残余应力值较高,导致零件变形。

航空发动机的涡轮盘环类零件结构复杂,型面点多,最小处壁厚只有 1.5mm。在车削加工过程中,由于从毛料到成品有较大的加工余量,因而会产生较大的切削力,同时随着余量的去除,残留在毛坯中的锻造残余应力也得到释放。由于受到残余应力的影响,零件极易产生加工变形,从而造成零件壁厚难以保证,技术条件达不到设计要求。

随着材料改变,其材料机加工特性的研究变得日趋迫切。本文针对发动机高温合金涡轮盘环类零件的加工,研究高温合金材料的加工特性、加工方法、加工路线和加工余量分布等,展开对加工应力与变形控制方法的研究。

1 加工变形的分析与控制

1.1 加工变形的分析

应力与变形成对孪生、互为因果。零件的加工变形主要是由存在于零件内部的内应力造成的。工件上一旦产生内应力之后,就会使工件金属处于一种高能位的不稳定状态,这种状态本能地要向低能位的稳定状态转化,并伴随有变形发生,影响工件原有的加工精度。工件在加工中其内应力主要有两种:一是毛坯在锻制和热加工中产生的内应力,即在热处理工序中由于工件壁厚不均匀、冷却不匀和金相组织的转变等原因,使工件产生内应力;另一种是由机械加工中工件切削加工残余应

力造成的。

机械加工工艺系统在切削力、夹紧力、惯性力和重力传动力等的作用下,会产生相应的变形,从而破坏刀具和工件之间正确的相对位置,使工件的加工精度下降。工艺系统中如果工件刚度相对于机床、刀具、夹具来说比较低,在切削力的作用下,工件由于刚度不足而引起的变形对加工精度的影响就比较大,其最大变形量可按材料力学有关公式估算。

航空发动机的盘环类件毛坯与制成的件重量比一般可达4~10倍以上。加工过程中,由于从毛料到成品有较大的加工余量,因而会产生较大的切削力,随着余量的去除,残留在毛坯中的锻造残余应力同时也得到释放,当零件残余应力峰值高于材料的屈服强度就会产生失稳变形。内应力的释放过程,一是时间过程,零件加工的时间越长,内应力释放的越充分,变形就越小,零件加工时间越短,内应力越不容易得到释放,变形就越大;二是去除的材料打破了材料原有的应力平衡,引起内应力释放,残余应力峰值高于材料的屈服强度就会产生失稳变形,一次性去除的材料多,引起的变形量就大,去除的材料少,变形量就小。零件产生加工变形造成零件精度难以保证,技术条件达不到设计要求。为了减小或避免薄壁盘环类零件的变形,必须在工艺路线的安排、工艺方法和设备的选用、工艺装备的结构设计、刀具材料的选用、切削用量的选择等方面采取一系列的工艺措施。

1.2 加工变形的控制

控制高温合金材料盘环类件的加工变形主要采取以下工艺措施:

(1) 合理划分盘环类件的加工阶段。

盘环类件零件机械加工余量大,加工过程分粗加工、细加工和精加工三个阶段。粗加工阶段主要目的是分担细加工一部分余量和保证以后工序余量均匀。细加工阶段可以修正粗加工应力引起的变形,进一步保证精加工余量均匀。该阶段零件的刚性差,加工过程易变形,工艺上要采取一些措施,以减少变形。在精加工阶段零件刚性差,加工余量少,加工精度要求高,加工过程中易变形,选择合理的工艺装备和优化的工艺参数非常重要。

(2) 采用工序集中的原则。

采用工序集中的原则可以减少定位次数和定位误差,有效提高零件加工精度,尤其是提高各表面之间的位置精度。

(3) 合理选择定位基准。

当毛坯开始加工时,选用锻件的外圆为径向基准,端面为轴向基准。此时基准为粗基准,采用径向夹紧。

粗加工时选用已加工外圆表面、端面为径向和轴向基准,端面为轴向基准。此时基准为粗基准,采用径向夹紧。细、精加工时采用基准重合原则,用零件配合圆面(内、外表面)为基准,使工艺基准与设计基准重合,一次装夹,采用轴向压紧。应多次修正零件端面基准平面度,在规定范围内(75~80%),避免基准面变形,影响零件加工精度。

(4) 合理安排变形后修复加工

一些刚性差的盘环类零件的加工变形不能彻底避免。通过合理估算变形量,预设修复余量和修复工序的方法,可以在精加工后进行修复因变形产生的超差。当零件的表面要求喷丸强化时,因喷丸强化影响配合尺寸精度,保证喷丸强化层的厚度要求前提下,为精加工时留少许余量,最终修复配合表面满足尺寸精度。

(5) 适当安排热处理工序位置。

在粗加工和细加工阶段,需要去除80%~90%的金属余量,因而产生的加工应力比较大。为了消除盘的加工应力引起的变形,在粗加工以后细加工以前,或者在细加工以后精加工以前,安排消除应力的热处理工序,使大部分零件内的加工残余应力得到释放,为最终精加工控制变形作出保障。

1.3 盘环类件加工变形解决方案分析

(1) 榫槽拉削加工变形分析

盘类件的榫槽拉削加工是待去除材料被逐渐去除的过程,随着拉削加工过程的进行,拉削层的残余应力得到释放,平衡状态遭到破坏,工件自身的刚度发生变化,只有通过变形来达到新的平衡,这是残余应力释放引起加工变形的基本原理。而我们可以通过对带有初始残余应力的毛坯材料进行有限元模拟,预测加工变形。

涡轮盘是典型的航空结构零件,为便于将来施加初始残余应力及单元的去,将模型采用全六面体单元划分。考虑结构形式及残余应力变化情况,将毛坯结构进行简化,忽略了个别变化较大的特征。按照加工过程,将要剥去的单元按拉削切槽去除顺序分组,逐个去除,每切去一个槽单元,将其作为一个载荷步计算一次。

通过对拉削去除各槽时的最大变形量的分析,在前几次材料去除过程中,变形量逐渐增大,中间变形过程较平稳,刚度分布较均匀,从而各部分变形相互协调,相互制约,相比以前变形量有所减小。随材料继续去除,工件刚度继续减小,变形量有一定增加。

通过分析可以得出如下结论:

①结果分析表明,按目前的初始残余应力状态,顺序拉削方式时,残余应力对加工变形的影响较大。控制加工变形的关键是减小初始残余应力。

②对比顺序拉削与对称拉削方式,在对称拉削方式下,残余应力和加工变形量变化都更为平稳,这与此方式是将材料对称去除,刚度分布较均匀有关。

(2)划分加工阶段,合理分配加工余量,提早释放应力。

零件内部复杂的应力情况是零件变形的重要原因。切削过程中的切削热和切削力是导致零件残余应力的重要因素,合理控制切削热和切削力的产生对控制零件变形有重要的作用。在加工前针对易于变形尺寸和位置合理分布加工余量,安排加工工序,预防可能会出现变形。

采用划分加工阶段,合理分配加工余量工艺措施,提早释放应力。由于盘环类件需要进行超声波探伤,超声波探伤工序要求单边 4mm 以上的盲区厚度,这样造成零件的外轮廓轴向厚度就有 8mm 以上的加工余量,为了避免精加工时去除大余量所产生切削热和切削力所造成的残余应力变形,尽可能在粗加工时去除更多的余量,使零件早一些释放应力,早一些产生变形,以便在后续加工中控制和修复。如图 1 所示零件新工艺余量分布采用了在粗加工后增加细车加工工序的方法,尽可能使精车加工工序加工余量减小且保证余量均匀,有效的控制了精加工中产生的结构变形。

对于大直径薄壁盘类零件,其复杂的型腔加工对零件的变形影响很大,采用在精加工前预开槽的方法,在

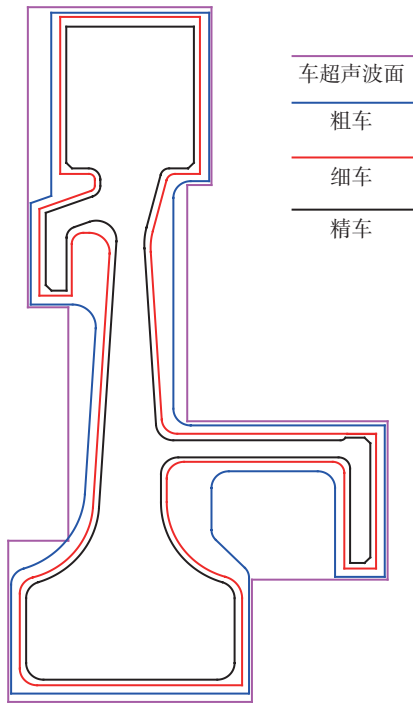


图1 新工艺余量分布图
Fig.1 New process redundancy distribution

粗加工时去除更多的余量,使零件提早释放应力,有效地减小了零件轴向尺寸的变形。通过试验发现预开槽槽的深度大、宽度窄,转接圆角部位圆角比最终尺寸小,效果较好。

(3)增加加工工序,预设修复工序。

图 2 所示为发动机的挡板,其特点是壁薄,外径为 $\phi 599\text{mm}$,最薄处仅为 1.8mm。设计基准的开放性差,对加工、装夹、测量的影响都很大。在加工挡板的过程中,精加工完第一面的尺寸后,在第二面加工过程中发现,随着余量的一层一层的去除,背面(第一面)逐渐地向正面移动,第二面完成加工后,第一面边缘部分轴向尺寸 7.15 已经超差了 0.5mm,变形方向与第二面的切削力方向相反。

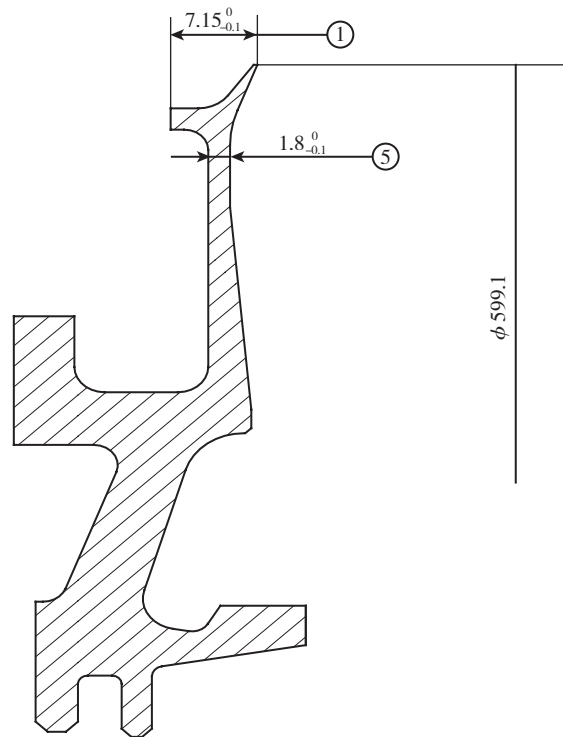


图2 挡板示意图
Fig.2 Diagram of baffle

对于一些刚性差的盘环类零件的加工变形无法彻底避免,若采用传统的工艺方法,零件在加工过程中变形累积到精加工工序,最终产生的变形由于无加工余量而不可修复。而通过合理估算变形量,预设修复余量和修复工序的方法,可以在精加工后进行修复因变形产生的超差。

采用合理安排变形后修复加工工艺措施,通过合理预估变形量,精加工预设修复余量和修复工序的方法,可以方便的在精加工后修复大部分的结构变形,而由于此时余量的控制,二次加工的变形量也可以有效的控制在公差范围内。

(4) 优化车加工数控程序,改善切削力。

盘环类零件为回转件,大部分切削加工为车加工。车加工轮廓的特征主要是直线和圆弧,根据这两类特征进行分析,可以按以下原则进行数控程序的优化:

直线:刀轨为水平或垂直方向直线,在余量均匀、切削参数恒定的情况下,理论上切削载荷均匀。可根据零件刚性情况,通过减小进给速度和切削深度来减小载荷,从而减小零件变形。斜线走刀的时候,需要把余量留的均匀,这样切削力比较稳定,斜线走刀时,还要考虑零件的刚性来选择合理的走刀方式。

圆角:圆角分为凸圆和凹圆。在圆角的部分,由于切削量及切削角度的变化,切削力会发生很大的变化,在凹圆角处加工时,轴向力较大,对刚性较弱的悬伸较长结构影响较大。在制定加工方案时应先对圆角处的余量进行处理,使余量尽量变小,在圆角处把进给量设定小。在其他切削条件不变的情况下,在凹圆弧部分会产生切削力突变增大的现象,其突变幅度随圆弧半径的减小而增大,针对不同的圆弧半径和刀具半径,选择不同的切削方式和进给速度。如图3所示,设零件上凹圆弧半径为 R ,刀具切削半径为 r 。

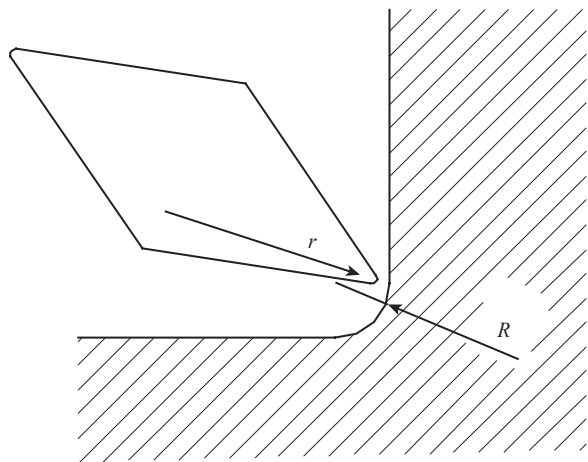


图3 车加工特征尺寸示意图

Fig.3 Diagram of feature size in machining

①当 $R \leq 2r$ 时,加工时该部分切削力急剧增大,增大幅度根据拐角处刀具与零件接触面积变化。在该处半精加工和精加工加工前,应先去除部分余量,使之后的加工过程受力平稳,减小加工变形,提高加工质量。

②当 $2r < R \leq 20r$ 时,加工时凹圆弧部分切削力增大,应减小该部分加工时的进给速度30%~50%,使加工过程受力平稳。

③当 $20r < R < 50r$ 时,加工时凹圆弧部分切削力增大幅度减小,应减小该部分加工时的进给速度10%~30%,使加工过程受力平稳,进给速度调节幅度应随着圆弧半

径增大而减小。

④当 $R > 50r$ 时,圆弧形状对切削力影响较小,为编程方便,可不作调节。

而在凸圆部分会产生切削力减小的现象,但由于车加工中凸圆部分多为过渡。区域较小对切削变形影响不大,可不考虑。

(5) 表面强化加工变形的控制。

高温合金盘环类零件表面通常采用喷丸强化。喷丸强化是用金属或非金属弹丸打击使涡轮盘环类零件表层产生循环塑性应变,形成强化表面,从而提高抗疲劳断裂、应力腐蚀、氢脆断裂和腐蚀疲劳断裂等性能。喷丸强化效果与喷丸参数、喷丸材料和零件表面状态有关。经喷丸强化的盘环类零件,其表层金属经过多次循环变形发生晶粒破碎和高密度的位错,使裂纹扩展困难。喷丸对材料的力学性能产生两种不同的影响:一种为强化因素,使力学性能改善;另一种为弱化因素,使力学性能下降。在一定的条件下,塑变层内的微细亚晶粒、高密度位错及残余压应力等,表现为强化因素;而喷丸引起的表面粗糙度的增高、高强度喷丸导致的表面微裂纹等,为弱化因素。一般来说强化因素又可分为组织结构强化和残余应力强化,对于变形高温合金,喷丸产生的残余应力在一定时间内便松弛殆尽,但塑变层内的组织基本保持其喷丸后的状态,属于组织强化。对于高温合金材料,其强度较高,故喷丸不易改变其粗糙度,弱化效应较低,但如果喷丸强度过高,引起表面微裂纹,会加剧弱化效应。

经过喷丸强化的表面,由于丸粒对零件表面的撞击作用,在零件表面层产生压应力,同时在喷丸强化过程中零件加工应力会进行一定释放,不可避免地使零件发生变形,造成零件尺寸发生变化。为了摸索出喷丸后尺寸变化规律,在加工零件前对试件进行了喷丸前后尺寸检测,得出如表1中所示尺寸变化结果。可以看出外圆直径增大了0.08~0.30mm。针对试验结果,零件加工过程中在喷丸前采取了“尺寸补偿法”进行修正。

所谓的“尺寸补偿法”是指根据试验得出的零件喷丸强化前后尺寸数据变化,在零件喷丸强化前将零件尺寸加工成小于设计要求尺寸,减小范围在试验得到增大尺寸变化值的1/2~2/3,喷丸后,通过零件变形使自身尺寸增大而满足设计图纸要求。实际加工中难以控制零

表1 喷丸前后尺寸变化

序号	图纸规定	喷丸前尺寸	喷丸后尺寸	变化
1	$\phi 615$	$\phi 615$	$\phi 615.08$	大 0.08
2	$\phi 600$	$\phi 600.2$	$\phi 600.4$	大 0.2
3	$\phi 545.5$	$\phi 545.5$	$\phi 545.8$	大 0.3

件喷丸后尺寸恰好满足设计要求尺寸,但可以在保证喷丸强化的表面硬化层深度要求的前提下,对喷丸后增大大部分尺寸进行修复加工以满足设计要求。

2 结论

高温合金材料切削加工中极易产生变形,高精度薄壁复杂型面盘环件加工变形更为突出。本文通过对高温合金材料高精度薄壁复杂性面盘环类零件车削加工变形实例分析,采用对加工应力与变形规律的量化分析法,找出变形原因,并制订一系列科学合理工艺措施,有效控制了因加工变形引起的零件超差。主要的研究成果如下:

(1)采用采用工序集中的工艺措施,在一次装夹前提下将合理调整加工顺序,有效的减小了在加工过程中因加工应力和因材料失稳引起的变形。

(2)采用划分加工阶段,合理分配加工余量工艺措施,提早释放应力保证余量均匀,有效的控制了精加工中产生的结构变形。

(3)成功的利用变形后修复加工工艺措施,通过合理预估变形量,精加工预设修复余量和修复工序的方法,可以方便的在精加工后修复大部分的加工变形。

(4)优化车加工数控程序,改善切削力,根据盘环类零件车加工轮廓的特征主要是直线和圆弧这两类特

征制定数控程序的优化原则使零件在加工中的受力趋于均衡,并对数控加工程序进行优化,达到了在一定程度控制薄壁零件加工变形量的目标。

(5)采取有效措施通过对零件表面强化后零件变形分析,掌握了表面强化加工变形规律,通过量化变形量,制定了尺寸补偿加工方法。

高温合金材料高精度薄壁盘环类零件结构复杂,制造加工技术难度大。虽然目前研究了一系列的控制措施来减小零件的变形,但就目前来说,我国在发动机薄壁盘环类件制造技术领域与国外相比,仍然存在较大的差距,特别是在加工变形控制方面,仍有很大不足。

参考文献

- [1] 张念准. 难加工材料的切削加工技术. 农业装备与车辆工程, 2008 (7): 46-48.
- [2] 王焱, 王文理. 先进刀具技术与航空零件切削加工. 航空制造技术, 2009 (23): 38-42.
- [3] 赵晓强. 航空难加工材料特点及其特殊加工方法. 航空制造技术, 2009 (23): 50-51.
- [4] 李喜桥. 加工工艺学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] 张宏伟. 航空整体结构件削加工变形机理及变形校正技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

(责编 亿霖)

- WSUT-P是五森研制新一代超声波专用探伤设备,设计先进,选材精良,精工细作的制造工艺。
- 用于航空航天、核电电力、石油石化等重要产品的管、棒材超声波检测。
- 高精度的主机检测系统,采用国际先进的电容耦合技术,旋转头、三辊定心驱动装置集成在同一升降检测平台上,保证探伤区域同心度及产品检测稳定可靠。
- WSUT-P配置计算机控制系统,提供人机交互界面、动画显示、数据存储、报表打印、通讯等功能。





上海五森检测设备研制有限公司

地址: 上海市宝山区大康路325号A-4 邮箱: wusenjiance@163.com

电话: 021-56484445 56484442 网站: www.wusenjiance.com

广告索引号 13-064