

薄壁零件铣削加工变形控制工艺研究

白 宇

宁夏天地奔牛实业集团有限公司 宁夏 石嘴山 753000

摘 要:薄壁零件结构特殊、刚性弱,铣削时容易变形,这会严重影响加工精度和使用效果。本文针对薄壁零件铣削加工的变形控制问题,分析了工件自身、加工工艺、装夹方式等因素对变形的影响,提出了对应的控制方案,包括优化装夹方式、调整铣削参数、优化刀具选择与使用,同时完善质量控制体系,通过分层铣削、合理控制装夹力等办法,把变形降下来。

关键词:薄壁零件;铣削加工;变形控制;工艺

引言

薄壁零件重量轻、结构紧凑,在航空航天、汽车制造、电子设备等领域用得很多,它的加工精度直接关系到产品的整体性能。不过,薄壁零件壁薄、刚性差,铣削时受到切削力、装夹力、温度变化等因素的影响,很容易出现弯曲、扭曲等变形问题,导致加工精度下降,满足不了设计要求,严重的还会报废零件,增加生产成本。现在工业生产对零件精度的要求越来越高,怎么通过科学的工艺优化来减少薄壁零件铣削过程中的变形,成了必须解决的一个问题。

1 薄壁零件铣削加工变形影响因素分析

1.1 工件自身因素

(1)材料力学性能是影响薄壁零件铣削变形的关键自身因素之一,不同材料的硬度、韧性、弹性模量这些力学性能差别不小,这些差别直接决定了零件在承受切削力时抗变形能力有多强。弹性模量低的材料,受到相同切削力时,更容易发生弹性变形,而且变形后很难完全恢复,导致加工后的零件尺寸出现偏差。同时,材料的韧性和硬度也会影响切削过程中的受力状态:韧性太高会增加切削阻力,让零件承受更大的切削应力,进而引发变形;硬度不均则会导致切削力忽大忽小,加剧局部变形,影响零件的整体精度。(2)零件结构刚度不足,是薄壁零件跟普通零件不一样的地方,也是导致加工变形的主要结构原因。薄壁零件的壁厚普遍较薄,结构比较单薄,整体刚性差,铣削时就算受到较小的切削力或夹紧力,也容易弯曲、扭曲^[1]。而且零件的结构形状也会影响刚度分布,一些结构复杂的薄壁零件,存在局部刚性薄弱的区域,这些区域在加工时就成了变形的集中点,进一步加剧整体变形,导致零件形位误差变

大,难以满足设计要求。(3)毛坯残余应力也是引发薄壁零件铣削加工变形的一个重要因素,它的影响常常被忽视,但其实很关键。毛坯在制造过程中,由于冷却不均、加工工艺不当等原因,内部会留下一些残余应力,这些应力处于一种不稳定的平衡状态。铣削加工时,零件表面材料被切掉,原有的应力平衡被打破,残余应力重新分布,进而带动零件发生变形。这种变形大多是塑性变形,一旦产生就很难通过后续矫正完全消除,直接影响零件的加工精度和尺寸稳定性,严重的还会导致零件报废。

1.2 加工工艺因素

加工工艺因素是薄壁零件铣削加工变形的重要影响因素,跟工件自身因素比起来,加工工艺因素有个好处——可以调、可以优化。把加工工艺细节把控好,能有效减少加工变形,提升零件加工精度。(1)切削参数选得合不合理,直接决定了铣削时切削力和切削热的大小,进而影响零件变形程度。切削速度、进给量、切削深度这三个核心参数,怎么搭配很关键。切削速度太高或太低都会加剧零件变形:速度太高会产生大量切削热,让零件热胀冷缩,引发热变形;速度太低则会增加切削力,让刚性不足的薄壁零件承受过大的应力,产生弹性或塑性变形。进给量和切削深度的选择也要兼顾精度和变形控制:进给量太大容易让切削力猛增,引发零件振动和变形;切削深度太深则会增加单次切削负荷,破坏零件受力平衡,加剧局部变形。(2)走刀路径和加工顺序怎么规划,对薄壁零件铣削变形的影响也很大^[2]。不合理的走刀路径和加工顺序,会导致零件局部受力集中,破坏受力平衡,进而引发变形。要是走刀路径老往零件的刚性薄弱区

域跑,那个区域就会一直承受切削力,局部变形越来越严重;加工顺序乱糟糟的,零件内部应力就会不断累积,最后引发整体变形。(3)刀具类型选什么、刀具磨损到什么程度,也会间接影响薄壁零件的铣削变形。不同类型的刀具,切削性能、刚性、切削力分布都不一样。适合薄壁零件的刀具,得具备刚性强、切削阻力小的特点。要是选的刀具刚性不够,切削时就会产生振动,振动传到零件上就会引发变形。

1.3 装夹系统因素

(1) 夹具结构与装夹方式怎么选,是决定装夹变形程度的核心。夹具结构合适,能给零件提供稳当的支撑,减少装夹过程中的应力集中;要是结构不合理,直接就把零件夹变形了。针对薄壁零件的特性,夹具得有足够的刚性和适配性,能贴住零件结构,别因为接触不当在局部压力过大。装夹方式的选择也关键,传统的单一装夹方式很难适应薄壁零件刚性差的特点,容易让零件受力不均,引发弯曲或扭曲变形。科学的装夹方式应该注重多点支撑、均匀受力,通过合理的支撑布局把装夹力分散开,减少装夹过程中产生的附加应力,避免零件在装夹阶段就变形,给后续铣削加工打好基础。(2) 装夹力的大小和施加位置,直接影响零件的装夹稳定性和变形程度,这是装夹系统里最容易把控、也最容易出问题的地方^[3]。装夹力太大,会超过薄壁零件的承受能力,导致零件产生塑性变形。这种变形一旦出现,后续铣削加工没法消除,直接就把零件尺寸精度毁了。装夹力太小,又保证不了零件在铣削过程中定位稳不稳,零件会在切削力的作用下发生位移和振动,不光加剧加工变形,还会影响加工表面质量。

2 薄壁零件铣削变形控制工艺措施

2.1 工件预处理优化

(1) 毛坯时效处理是工件预处理的核心内容,主要用来消除毛坯在制造过程中留下的残余应力。毛坯在浇筑、锻造这些加工环节里,由于冷却速度不均、受力不均等原因,内部会积攒一定的残余应力,这些应力要是不及时消除,后续铣削时随着材料被切掉,应力会重新分布,进而引发零件变形。通过合理的时效处理,让毛坯在自然或人工调控的环境下慢慢释放内部残余应力,使零件内部应力达到平衡状态,减少后续加工中因应力释放导致的变形,给铣削加工提供一个稳定的工件基础。(2) 合理优化零件结构设计,同样是工件预处理的重要内容,也是减少铣削变形的关键手段。薄壁零件本身刚性就弱,要是结构设计不合理,抗变形能力会更差,铣削力一上来很容易弯曲、

变形。优化零件结构设计,重点是增强零件的整体刚性,比如把壁厚分布调一调,别让局部太单薄,同时把零件形状设计好,少用那些容易产生应力集中的结构,让零件受力时能把力量分散得更均匀,降低局部应力集中带来的变形风险。这种预处理,不是简单的表面处理,而是从工件本身的特性出发,通过消除残余应力、优化结构刚性,从根上减少铣削过程中可能出现的变形^[4]。把工件预处理做好了,后面的铣削加工就能更顺畅,减少因工件自身问题导致的加工偏差,为后续的工艺实施打好基础,确保铣削时零件能扛住一定的切削力,减少变形,把加工精度保住。

2.2 切削工艺参数优化

(1) 基于变形量的切削参数匹配,核心是根据薄壁零件的结构特性、材料性能以及加工精度要求,有针对性地调整切削参数,避免因参数不合理导致变形。不同的薄壁零件,壁厚、结构刚性都不一样,对应的切削参数也得灵活调,不能搞一刀切。切削速度、进给量、切削深度怎么选,要充分考虑零件的抗变形能力,别因为参数太大导致切削力过大,进而把零件顶弯、顶变形。比如合理控制切削深度,别一次切太猛,减少对零件的冲击,同时把进给速度调一调,平衡好切削效率和变形控制,让切削参数跟零件刚性匹配上,从源头减少变形。(2) 采用分层切削工艺,是应对薄壁零件易变形的有效办法。分层切削就是把总的切削量拆开,分好几次切完,每次切掉合理的量,避免一次切太狠产生过大的切削力,减少零件受力变形。这样做能有效分散切削力,降低切削过程中零件的受力程度,同时也方便随时观察零件的变形情况,一旦发现不对劲可以及时调整切削参数,避免变形越闹越大,确保每一层切削都在可控范围内,减少变形累积。(3) 对称切削工艺则是通过优化切削路径和切削方式,让零件受到的切削力互相抵消,减少单侧受力导致的变形。切削时采用对称进给、对称切削的方式,使零件两侧受到的切削力相互抵消,避免因单侧受力太大出现弯曲、变形,同时还能有效减少切削热集中,降低热变形的影响,让零件在加工过程中始终保持受力稳定,进一步把加工精度提上去,减少变形隐患,确保薄壁零件的加工质量符合设计要求。

2.3 刀具系统优化

(1) 合理选择刀具材质和几何参数,是优化刀具系统最基础的工作。不同材质的刀具,硬度、韧性、耐高温能力都不一样。适合薄壁零件加工的刀具,得兼顾耐磨性和切削顺滑度,能在持续干活时保持自身形态稳定,不会轻易晃动或变形。同时刀具的几何角度也会影

响切削效果,角度设得合理,可以减弱切削时产生的侧向挤压力,减少刀具跟工件之间的硬性摩擦。根据薄壁工件单薄易弯的结构特点来调整几何参数,能让切削过程更平稳,减少刀具对工件的横向作用力,从接触这一层就减少零件弯曲偏移的情况,让铣削过程始终保持平稳。(2)控制刀具磨损速度并及时掌握磨损状态,也是抑制薄壁零件加工变形不可缺少的一环。刀具长时间连续铣削时,切削刃会慢慢损耗,刃口变钝之后,切削阻力会明显上升,原本顺畅的切削动作会变得发涩,额外增加的作用力直接压在薄壁工件表面,很容易引发弹性变形。而且磨损严重的刀具运行起来不稳,干活时容易产生轻微震动,这些震动传到工件上,会进一步放大变形幅度,还会影响工件表面的成型效果。(3)日常加工中,要根据加工时长和加工工况,定时检查刀具的实际使用状态,及时做好维护修整^[5]。条件允许的情况下,合理规划加工节奏,别让刀具长时间高负荷运转,把磨损速度降下来。始终让刀具保持良好状态,能稳住切削力的大小,避免因刀具状态变差带来额外的应力,最大限度减少薄壁零件在铣削过程中产生的各类变形,把整体加工成型精度切实提上去。

2.4 装夹方案优化

(1)改进夹具结构、增大接触支撑面积,是优化装夹方案的核心措施。传统夹具接触面积小,对薄壁零件的支撑不够均匀,容易让零件局部受力集中,进而引发变形。优化后的夹具结构,会结合零件的外形特点,增加与零件的接触点,把接触支撑面积扩大,让零件受到的夹持力能均匀分布在更大的接触面上,避免局部受力过大而变形。同时,通过优化夹具的支撑结构,增强夹具自身的刚性,减少夹具在夹持过程中自身的变形,间接降低对工件的影响,让零件在加工时能保持稳定的姿态,给后续铣削加工打好基础。(2)合理控制装夹力,是避免夹持变形的关键。薄壁零件刚性差,承受外力的能力有限。装夹力太大,会直接让零件发生塑性变形,影响加工精度;装夹力太小,加工时零件又会出现

位移,同样会产生误差。所以控制装夹力要兼顾稳定性和安全性,根据零件的材质、厚度和结构特点,合理调整装夹力的大小,既要保证零件在加工时不乱跑,又要避免压力太大把零件压变形。(3)实际加工中,装夹力的调整要结合加工工况,动态适配不同的零件特性,别搞一刀切。另外,装夹时要确保零件定位准确,减少装夹过程中对零件的碰撞和挤压,避免人为造成的变形。通过优化装夹方案、改进夹具结构、合理控制装夹力,能有效减少装夹过程中产生的应力,从源头控制加工变形,保障薄壁零件的加工精度,让后续铣削加工能顺利干下去,减少因装夹不当带来的质量问题。

结语

综上所述,通过上面这些工艺优化措施,能有效降低薄壁零件铣削过程中的变形量,提升加工精度,满足实际生产中对零件尺寸和形位精度的要求。当然,这项研究也有一些局限。下一步可以进一步探索智能化加工技术在薄壁零件加工中的应用,优化动态调整策略,结合不同材质、不同结构薄壁零件的加工特点,把变形控制方案做得更完善。

参考文献

- [1] 范荻,谷雨薇,李燕菲.基于数控铣削的飞机薄壁零件加工变形控制[J].中国科技期刊数据库工业A,2026,(2):001-004.
- [2] 杨军涛,康明辉,张建明,等.航空薄壁构件高速铣削加工变形控制技术[J].中国科技期刊数据库工业B,2026,(2):093-096.
- [3] 刘国茂,刘源森,崔明佳,等.高速铣削工艺下合金钢薄壁件加工变形控制技术研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025,(10):061-064.
- [4] 刘涛,白贤荣.薄壁零件铣削加工工艺参数优化研究[J].世界有色金属,2025,(9):19-21.
- [5] 刘斌.薄壁类零件数控车加工技术的应用研究[J].造纸装备及材料,2026,55(1):99-101.