

钛合金薄壁件圆角数控铣削 质量控制

Quality Control of Corner Rounding Milling for Titanium
Thin-Walled Part

上海航天精密机械研究所 孙程成 王 亮 侯吉明 张俊强



孙程成

毕业于南京航空航天大学,主要从事数控工艺及 CAD/CAM 研究工作。

钛合金由于比强度高、热稳定性好、抗腐蚀性强等诸多优点,被航空航天领域广泛运用。然而由于减重等需要,钛合金零件多设计为薄壁,给机加工带来了很大的难题,特别是圆角数控铣削的质量难以控制。圆角走刀由直线段进入曲线段过程中,径向切削深度和真实进给量发生了突变,且该变化对切削力的影响很

大,使加工过程无法顺利进行。相关文献已对型腔圆角的切削力进行了相应的研究^[1]。

钛合金由于比强度高、热稳定性好、抗腐蚀性强等诸多优点,被航空航天领域广泛运用。然而由于减重等需要,钛合金零件多设计为薄壁,给机加工带来了很大的难题,特别是圆角数控铣削的质量难以控制。

圆角数控铣削一般方法

现在圆角铣削采用最多的是等半径靠刀法。例如:最终将要加工 R6 的圆角,一般先采用 $\phi 20\text{mm}$ 刚性较好的刀具将侧壁加工到最终尺寸或留少量的精加工余量,再分别换较小的刀具来接圆角,所需换的刀具的数量及大小根据实际情况制定。

等半径靠刀法的优势在于:先通过刚性较好的大直径刀具去除了大部分金属材料,留给刚性较弱刀具加工的部分仅是圆角处较小的一部分,避免了直接采用细长刀具在大切

削用量情况下的加工变形和切削振动现象。该方法在一定程度上解决了圆角加工的拉刀难题,但频繁的换刀和对刀会造成加工周期延长等问题,更重要的是该方法也没有彻底解决拉刀和振纹等加工问题。

钛合金薄壁件圆角数控 铣削难点分析

钛合金薄壁件在航空航天领域应用较广,具有侧壁和腹板是这类零件的典型特征,结构复杂,相对刚度较低,故加工工艺性差。加工变形和加工效率低等已成为约束钛合金薄壁零件加工的重要问题^[2]。在切削力、装夹力、切削振颤等因素作用下,易发生加工变形特别是圆角处加工

质量和精度不易控制等现象。研究发现,刀具从直边切入圆角以后,在圆角处存在明显的切削力超值突变现象^[3],常常发生欠切、过切、振颤等现象,因而出现明显的过切、欠切痕迹或振纹,这不仅严重地影响了零件的加工质量,降低了刀具使用寿命,而且降低了生产效率。钛合金薄壁件圆角数控铣削存在以下加工难点。

(1) 钛合金导热系数低,薄壁件圆角加工前后受热变形。

钛合金材料导热导温系数仅为铝及铝合金的 1/15、钢的 1/5,并小于不锈钢和高温合金。低的导热率使钛合金薄壁件在切削加工中产生较大的温差和热应力,造成切削热量不易散发,产生刀具粘粒磨损、薄壁受热变形,圆角数控铣削时此现象尤为严重。

(2) 钛合金切削过程中刀刃部位应力大,影响薄壁件圆角加工质量。

钛合金的切削力虽然只有 45 号钢的 1/3~1/2,但是钛切屑与前刀面的接触面积小,只有 45 号钢的 1/2~2/3,单位接触面积上的切削力大大增加,所以切削刃所承受的应力是碳钢的 1.3~1.5 倍,刀刃应力集中,极易造成崩刃现象。圆角数控铣削过程中,数控程序一般采用恒定的进给速度,但实际瞬时进给速度发生了突变,刀具在切削钛合金薄壁件圆角处更容易发生崩刃现象,一旦产生刀具崩刃,很有可能会划伤加工表面,严重影响加工质量。

(3) 钛合金在高温切削时化学活性高,大大降低了薄壁件疲劳强度。

钛合金的化学活性大,在切削温度高、单位面积切削力大的条件下,很容易吸收空气中的氧气和氮气形成硬而脆的外皮,同时切削过程中会产生塑性变形,也会形成非常坚硬的氧化层,导致发生表面硬化,在圆角数控铣削时由于切削力的突变,且瞬

时切削量大,产生的切削温度也相对较高。研究表明,在这种冷硬现象下圆角处的疲劳强度大大降低,在今后零件的使用过程中存在巨大的安全隐患。

(4) 钛合金薄壁件圆角数控铣削中切削力突变。

对钛合金薄壁件的圆角加工,一般编程人员会考虑采用等径向切深切削,即在一次走刀过程中径向切深为一定值,当刀具由直线走刀过渡到圆弧走刀的时候,由于切削夹角的增大而使刀具与工件的接触面积增加,从而引起切削力的超值突变并容易诱发切削振动,还会造成刀具和工件的加工变形增大或拉刀现象,切削振动则会在圆角处产生振纹,影响零件的加工质量。采用与圆角相同半径的刀具进行切削时,切削面积比走直线切削时要大的多,会引起切削力的剧增。此外,在加工深型腔的小半径圆角时,采用长径比较大的细长刀具以及薄壁件自身刚性的降低,也是诱发切削振动的原因之一。

将瞬时切削工序的瞬时径向切削深度、瞬时真实进给量代入切削力经验公式,可得到瞬时的切削力。相关文献对此进行了深入研究,证实了圆角数控铣削过程中会产生切削力的突变^[4]。

钛合金薄壁件圆角数控铣削质量控制方法

1 合理选择刀具的材料、结构以及铣削方式

钛合金薄壁件圆角数控铣削一般不使用钨钛钴(YT)类刀具,而采用钨钴(YG)类硬质合金刀具,常用的牌号为 YG3、YG3X、YG6、YG6X、YG8 等,一般钴含量少的用于精加工,含量多的用于粗加工。YG6X 的加工效果最好,YG8 其次,因为 YG6X 的晶粒比 YG8 更细,所以在硬质合金刀具的选择时,应尽量选择细化晶粒的刀具。

在加工过程中,刀具和工件都不允许停留,如果停止,刀刃和被切削的钛合金就会在高负荷下长时间摩擦,容易引起钛合金的加工硬化,产生磨损、烧结和挤裂而损坏刀具。刀具的切削部分尽量要短,以减少温升造成的热膨胀,在容屑足够的情况下尽量加大切削刃厚度(刀具刀口厚度)、提高刀具的强度和刚度等。

2 提高工艺装备系统的刚性

提高工艺装备系统的刚性可以适当减少刀具在圆角切削时发生的振颤,提高圆角加工质量。比如改善装夹方法、提高装夹稳定性等方法可以适当降低振颤。目前大多工厂已在硬件上进行了适当改进以提高表面质量和生产效率。

3 改善冷却方案

由于钛合金的导热、导温系数低,热量不易扩散,导致薄壁件圆角数控铣削时切削力突变,因此必须在加工过程中进行冷却:粗加工时,可采用 3%~5% 的乳化液或 10%~15% 的极压乳化液;精加工时,可采用极压切削油或极压水溶液;有能力的情况下可采用微量润滑技术(MQL),与传统的湿切削相比,该项技术有着更明显的优势,从切削液用量和刀具寿命方面考虑,MQL 技术几乎无污染,节约切削液采购和维护费用,切屑可以直接回收,刀具寿命成倍延长、刀具成本降低,有利于自动加工、检测和监控,最重要的是可以保证圆角加工质量、成倍提高效率。

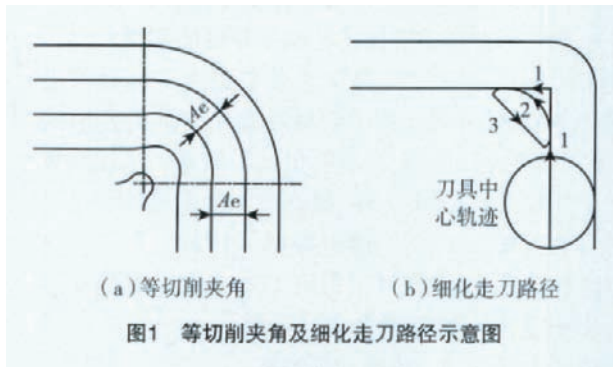
4 优化圆角切削路径

除了硬件设施提高以外,针对圆角加工问题,比较简单有效的方法即是对刀具加工路径进行优化。细化圆角刀具路径的方法早期由 M. D. Tsai^[5] 等人提出,主要解决传统数控加工型腔时在圆角走刀过程中的切削稳定性问题。

由于切削力的大小主要由刀具与工件的接触面积即切削面积确定,

因此保持刀具的切削夹角恒定就可有效避免切削力的突变。细化圆角刀具路径的方法,其思想就是在走刀过程中保持刀具切削夹角恒定,或者附加走刀路径,以减小刀具在圆角处的切削面积,从而避免切削力的超值突变,如图1所示。

按照图1(a)中的曲线路径走



刀,就能保持恒定的铣削夹角,铣削圆角时从直线段进入圆弧段过程中的切削量保持恒定,如图中保持恒定的径向切深 A_e ,有效避免了切削力的瞬时突变,从而提高了圆角的铣削质量。

图1(b)中的轨迹1为常规走刀路径,采用等半径靠刀法靠出圆角,细化后的刀具路径由轨迹2、3和1组合而成。从图中可以看到,先通过轨迹2去除圆角的部分余量,再空切返回(轨迹3),然后仍按原轨迹1走刀,等同于保持了恒定的切削夹角,从而提高了圆角数控铣削的质量。可以根据实际情况选择细化路径的次数,但也不能过多,否则会导致切削时间增加,降低生产效率。

5 恒定进给速度

进给速度是圆角数控铣削中的一个重要参数,如果在圆角数控加工过程中实际铣削进给速度存在剧烈变化,将对圆角加工质量产生严重影响。为保证圆角切削质量,恒定刀具切削部位进给速度是一种比较可取的方法。

时间倒数模式(G93)进给速度定义如下:

$$F = V/60SL,$$

式中, V 为常规模式(G94)进给速率,单位为 mm/min ; SL 为跨度距离,单位为 mm 。化简得: $F=1/\Delta T$,单位为 $1/\text{s}$,即: $\Delta T=1/F$,单位为 s 。

可以看出,无论程序段有几个轴运动,且不论是移动、转动还是旋转,所有的运动轴都在规定的时间 ΔT 内到达指定位置。

因此,可以根据圆角的大小,选定铣削该圆角需要的切削时间,数控系统会根据给定的进给速度算出单位时间内刀具在圆角过渡处的旋转角度,可以有效减小单位时间内的切削面积,保证圆角

数控铣削质量。

试验与分析

为了验证上述控制钛合金薄壁件圆角质量方法的合理性,分别对某TC4钛合金舱体上的不同部位进行了几种方法的试验。在保持刀具与文中所述选择一致、稳定的工艺装夹系统、持续冷却状态条件下,着重研究了细化走刀路径以及恒定进给速度的方法对提高圆角数控铣削质量所起的作用。

(1)在HAAS-EC1600加工中心上进行了刀具路径细化试验,铣削内容为壳体上的一个窗口,窗口圆角半径为 3mm ,刀具采用 $\phi 6\text{mm}$ 两齿螺旋立铣刀,直边径向切削深度为 3mm ,轴向切削深度为 1.5mm ,机床主轴转速为 $1000\text{r}/\text{min}$,进给速度为 $60\text{mm}/\text{min}$ 。

显然,细化了圆角走刀路径以后,在圆角处最后一刀切削时,切削力的幅值比直接走刀有显著的下降,避免了在圆角处由于切削力的超值变化而导致的欠切、过切或振动的产生,且加工出的圆角质量有了明显的提高。但是细化后的走刀时间明显

大于一般走刀时间,因此必须兼顾加工效率,合理选择细化次数。

(2)在CINCINNATI-15VC加工中心采用恒定进给速度的方法进行试验,数控系统为MICRON850,加工内容为舱体内腔的 5mm 圆角,加工程序采用G93编程,刀具采用 $\phi 10\text{mm}$ 两齿螺旋立铣刀,直边径向切削深度为 1mm ,轴向切削深度为 2mm ,机床主轴转速为 $800\text{r}/\text{min}$,进给速度为 $0.3(1/\text{s})$ 。

加工过程中实际切削进给速度恒定,加工完成后得到的零件经过测量,形位尺寸精度、表面质量均满足设计要求,没有明显的振纹和拉伤痕迹。

结束语

在钛合金薄壁件圆角的铣削过程中,由于圆角处切削面积的变化等原因,会产生切削力剧增的现象,严重时会造成欠切、过切、切削振动等问题,严重地影响了工件的加工质量。除了对刀具、工艺装备系统的刚性、冷却方式等硬件设施进行改善外,可通过细化走刀路径、恒定切削速率等方法,有效解决圆角数控铣削过程中的加工难题,并可解决欠切、过切、振纹等问题,从而提高工件的加工精度。

参考文献

[1] 闫雪,陶华. 难加工材料高速铣削切削力研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.
 [2] 王宗荣,左敦稳,王珉. TC4钛合金高速铣削参数的模糊正交优化. 南京理工大学学报,2005;29(6):709-712.
 [3] 赵威,何宁,李亮,等. 航空薄壁件圆角的铣削加工试验研究. 工具技术,2005(39):16-19.
 [4] 吕苗苗,陶华,李海滨,等. 难加工材料型腔圆角数控铣削的切削力预测. 机械强度,2009,31(3):503-507.
 [5] Tsai M D, Takata S, Lnui M, et al. Operation planning based on cutting process models. Annals of the CIRP, 1991, 1(40): 95-98. (责编 小颖)