

基于振动控制的薄壁零件高速铣削刀具结构优化与试验研究

Structure Optimization and Experiment Study of Thin-Wall Parts' High Speed Milling Tool Based on Vibration Control

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 罗育果 蔡延波



罗育果

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司数控机加主管工艺师。长期从事航空产品数控加工工艺与数字化制造相关技术研究工作。

随着高速、超高速切削技术的发展和應用,航空整体薄壁结构零件的加工工艺技术日益提高。由于在高切削速度条件下具有相对较低的切削力、较小的热变形以及高的材料去除率等优点,使得整体薄壁结构件的加工余量大、加工变形大等难题逐步得到缓解,薄壁结构件的高效精密

加工振动问题严重制约了高速、超高速切削技术在薄壁结构零件加工中的应用,限制了薄壁结构零件加工精度的保证和加工效率的提高,是目前航空航天制造技术中非常迫切而又难以解决的关键问题。

加工成为可能。但在薄壁结构零件的高速加工过程中,随着零件壁厚的降低,零件的刚性亦随之下落,极易产生切削振动,不仅恶化了零件的加工表面质量,还降低了刀具的使用寿命。为了避免产生切削振动或减小振动强度,有时不得不降低切削用量,致使机床、刀具的性能得不到充分发挥,限制了加工效率的提高。加工振动问题严重制约了高速、超高速切削技术在薄壁结构零件加工中的应用,限制了薄壁结构零件加工精度的保证和加工效率的提高,是目前航空航天制造技术中非常迫切而又难以解决的关键问题。

本课题从典型薄壁结构零件的高速铣削加工着手,通过优化选择刀具结构参数,进行典型薄壁结构零件的高速铣削试验,从而减小或抑制切削振动的影响,以提高零件表面质量和加工效率。

薄壁结构零件的结构与工艺特点分析

航空薄壁结构零件不仅要满足航空产品的设计性能要求,而且在保证同样强度和刚度的情况下,结构重量还要轻。因此,该类零件一般由侧壁和腹板构成,结构复杂、体积较大、相对刚度较低。图1为某航空薄壁结构零件示意图,该零件使用牌号为7075-T735的铝合金材料,零件的最小毛坯包容尺寸为 $1500\text{mm} \times 1350\text{mm} \times \delta 75\text{mm}$,零件最终重量要求为 $(9.068 \pm 0.2)\text{kg}$ 。材料去除率达到了90%以上。图1(b)为该零件某局部小框示意图,腹板及侧壁厚度仅为1.2mm厚,公差为 $\pm 0.125\text{mm}$,零件表面粗糙度要求达到 $R_a 3.2$ 。薄壁零件的结构特点,决定了其机械加工的工艺特点不同于其他零件,主要包括以下几个方

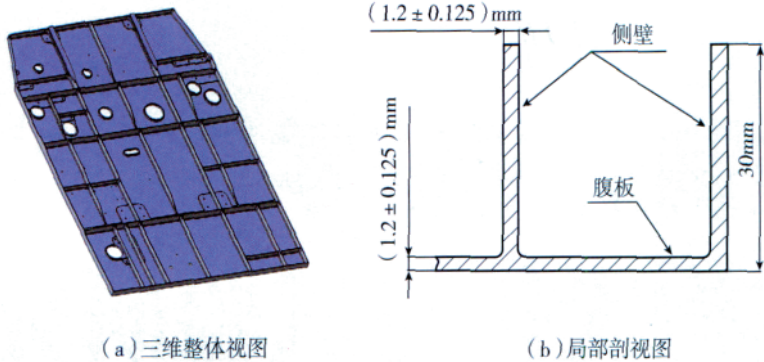


图1 某航空薄壁结构零件示意图

面:(1)薄壁结构零件的整体尺寸较大,结构比较复杂,并且工件壁厚较薄,零件在壁厚方向的刚性很差,在加工过程中极易产生变形,零件变形难以控制;(2)薄壁结构零件的截面较小,而外轮廓相对于截面尺寸较大,随着加工工程中材料的不断去除,零件在壁厚方向的刚性逐渐降低,易发生切削颤振现象,严重影响着零件的加工质量;(3)薄壁类零件不仅公差等级严格,具有较高的尺寸精度要求,而且对零件的位置精度也有非常高的要求,在加工过程中极易出现尺寸超差的情况甚至导致零件报废;(4)在薄壁结构零件加工过程中,已加工部位的弱刚性区,极易与刀具后端切削刃发生干涉,(如图2(a)所示)造成二次切削,形成明显的振纹,导致加工表面质量变差,零件尺寸超差甚至报废。因此,对于此类零件加工,一般采用特殊的锥度刀具结构(如图2(b)所示)。然而,目前

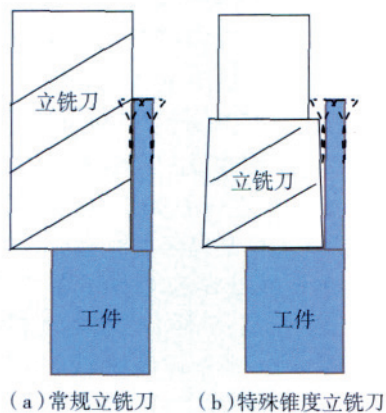


图2 薄壁结构零件(侧壁)铣削加工示意图

对于锥度刀具结构的参数设置仍然缺乏相应的工艺技术指导,往往抑振效果不甚明显。

刀具结构参数分析与改进

在利用带锥度切削刃刀具进行薄壁结构零件的铣削加工过程中,刀具切削刃结构参数对薄壁结构零件加工振动及已加工表面质量的影响主要体现在2个方面,即切削刃的锥度和长度。如图3(a)所示,即为一种常用的薄壁结构零件加工用 $\phi 20\text{mm}$ 立铣刀。对于此类刀具,锥度的选择非常重要。若锥度过小,则

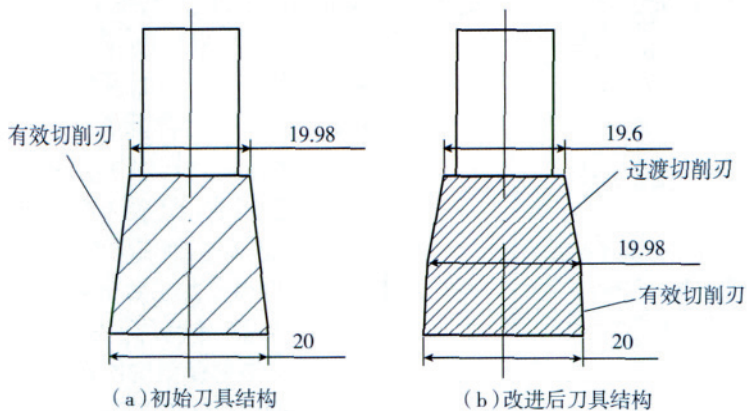


图3 薄壁结构(侧壁)铣削用锥度立铣刀结构示意图

无法避免已经加工过的表面与未参与切削的切削刃接触;若锥度过大,虽可避免已经加工过的表面与未参与切削的切削刃接触,但过大的锥度会无法保证零件的尺寸精度,使得加工后表面质量较差,并且增加后续工序的工作量。此外,刀具有效切削刃的长度对薄壁结构零件已加工表面

质量也有重要的影响。有效切削刃的长度过短,使得刀杆变长,刀具的刚性变差,刀具自身颤振会加大;刀具切削刃的长度过长,会使已经加工过的表面与未参与切削的切削刃接触,易使零件发生颤振现象并且损坏零件的已加工表面质量。

基于以上分析,本文提出采用将小锥度有效切削刃与大锥度过渡切削刃进行组合的方法,即刀具参与切削的部分使用正常锥度的切削刃,未参与切削部分采用大锥度的切削刃(图3(b))。这样既避免了切削刃的锥度过小造成零件的已加工表面与未参与切削的切削刃接触造成的二次切削及表面质量差的问题,也避免了因刀具切削刃长度过短而造成的刀具整体刚性差的问题。使零件加工过程中的切削振动问题得到较好的解决,表面质量也得到了保障。

高速铣削加工试验与分析

1 试验条件

高速铣削加工试验的试验条件如下所示:(1)机床:选用

POWERMILL-230HS/3-2型高速铣削加工机床。最大功率为70kW;最大主轴转矩为60N·m;最高转速为24000r/min。(2)工件材料与结构为铝合金7175-T7351,结构尺寸为750mm×140mm×55mm。结构模型如图4所示,共包含4类特征:1类为闭口特征长侧壁;2类为开口特征长

侧壁;3类为闭口特征短侧壁;4类为半开口特征短侧壁。其中:壁厚为1mm,高度为50mm。(3)刀具:选用 $\phi 20 \times 24 \times 60R3$ 两齿硬质合金整体立铣刀。其中:1#刀具为结构优化前的倒锥为0.2mm的加大倒锥刀具;其余3类刀具均为带有过渡大锥度切削刃的改进型刀具,其中2#刀具的有效切削刃长为5mm,3#刀具的有效切削刃长为8mm,4#刀具的有效切削刃长为12mm。

2 试验方法与切削参数设置

针对图4中的4种典型的薄壁特征分别进行4种刀具的高速铣削加工试验。铣削方式为顺铣、干切削。

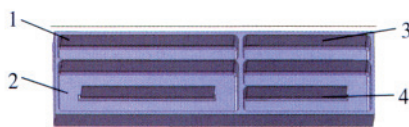


图4 工件结构模型

试验过程中,对切削振动现象和加工表面质量进行详细记录,并进行对比分析。结合车间实际应用切削参数,试验切削参数设置如表1所示。

3 试验结果分析与讨论

典型薄壁结构特征已加工表面质量记录结果如表2所示。

由试验结果可以看出,小锥度有效切削刃与大锥度过渡切削刃相组合的刀具(2#、3#刀具)在轴向切深

加大的情况下,与1#刀具相比,不仅在加工表面质量上要高,而且现场加工时工件振动、切削噪音都要小,尤其是2#刀具在轴向切深达5mm时,加工2类开口特征长侧壁与4类半开口特征短侧壁时,无弹刀(已加工部位与后端切削刃干涉)现象发生。4#刀具由于有效切削刃长度太大,在轴向切深3mm时,在加工2类开口特征长侧壁与4类半开口特征短侧壁时已经出现弹刀现象,其效果不如2#、3#刀具。虽然3#刀具在轴向切深加大时,加工效果没有2#刀具突出,但应用参数范围已有明显扩大。因此,对于 $\phi 20\text{mm}$ 的薄壁结构零件立铣刀的有效切削刃长度可设定在5~8mm。

本课题选取如图1所示整体薄壁结构零件进行了生产验证。采用改进的刀具结构参数,并结合有效切削参数与刀具路径优化,将上述零件的难加工特征区域如转角区的加工质量和侧壁的切削振纹等与常规铣刀加工的效果相比,均得到了明显改善,加工效率提升约20%。

结束语

针对薄壁结构零件高速铣削加工过程中的切削振动问题,本课题的主要结论如下:

(1) 刀具切削刃结构参数如切削刃锥度与有效长度对薄壁结构零件的切削振动及加工质量有重要的影响,采用小锥度有效切削刃与大锥度过渡切削刃的组合优化结构,可以有效降低或抑制已加工弱刚性部位与后端刀具切削刃的干涉,避免了二次切削,零件的加工质量得到了保证;

(2) 在大的轴向切深的条件下,相对较短的有效切削刃长可以实现薄壁结构零件的高质量加工,加工效率亦得到有效提高,对于 $\phi 20\text{mm}$ 的薄壁结构零件立铣刀的有效切削刃长度可定在5~8mm。(责编 泰山)

表1 切削参数设置

切削参数	主轴转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	进给量 $f / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	径向切深 a_e / mm	轴向切深 a_p / mm
参数范围	2000	6000	4.5	1、2、3、4、5、6

表2 已加工表面质量记录表

刀具号	轴向切深 a_p / mm											
	1		2		3		4		5		6	
	特征	质量	特征	质量	特征	质量	特征	质量	特征	质量	特征	质量
1# 刀具	1	良	1	中	1	中	1	弹刀	1		1	
	2	良	2	中	2	中	2	弹刀	2		2	
	3	良	3	中	3	中	3	弹刀	3		3	
	4	良	4	中	4	中	4	弹刀	4		4	
2# 刀具	1	优	1	优	1	优	1	优	1	优	1	
	2	优	2	优	2	优	2	优	2	良	2	
	3	优	3	优	3	优	3	优	3	优	3	
	4	优	4	优	4	优	4	优	4	优	4	
3# 刀具	1	优	1	优	1	优	1	优	1	良	1	良
	2	优	2	优	2	优	2	良	2	轻微弹刀	2	轻微弹刀
	3	优	3	优	3	优	3	优	3	优	3	良
	4	优	4	优	4	优	4	优	4	良	4	轻微弹刀
4# 刀具	1	优	1	良	1	中	1	中	1	弹刀	1	
	2	优	2	良	2	轻微弹刀	2	弹刀	2	弹刀	2	
	3	优	3	良	3	中	3	中	3	弹刀	3	
	4	优	4	良	4	轻微弹刀	4	弹刀	4	弹刀	4	