

薄壁零件高速铣削的振动问题分析*

李亮, 查文伟

(盐城工学院 优集学院, 江苏 盐城 224003)

摘要:对薄壁件加工过程中切削振动的影响因素进行了初步的分析和探讨,并提出了在高速铣削下薄壁零件的加工铣削力模型。通过选用不同的铣削加工用量对铣削力模型进行了验证,得出在不同切削转速、不同的轴向和径向切深、不同进给量条件下的预防变形的工艺措施。

关键词:薄壁件; 变形; 切削振动; 高速铣削

中图分类号: TG506.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-5322(2006)02-0009-05

在航空薄壁零件的加工过程中,除了加工变形难以控制以外,还会产生切削振动问题。刀具与工件间的切削相对振动,不仅恶化零件的加工表面质量,降低机床、刀具的使用寿命,还会产生危害操作人员的噪声,严重时使切削加工无法进行。为了避免产生振动或减小振动的强度,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的发挥,限制了加工效率的提高。切削振动是影响机械产品加工质量和机床切削效率的关键技术问题之一,同时也是自动化生产的严重障碍^[1]。因此,深入研究工艺系统的切削稳定性变化规律并提出有效抑振方法,对于提高薄壁零件的加工质量和加工效率具有重要意义。

1 切削振动起因的初步分析

机械振动可以分为自由振动、强迫振动和自激振动3类。其中自激振动是加工中遇到的主要振动形式,下面对其进行重点讨论。

切削过程中产生的自激振动,又称为颤振。颤振是切削加工中比较常见的振动形式,颤振是一个闭环系统,如果不加以抑制,振动会越来越大,给系统带来严重的后果。所以颤振是切削过程中应消除的一个重要问题。

在薄壁件铣削试验过程中发现,当切削用量

不合适时,极易产生振动,在薄壁件表面上留下明显的振纹,严重影响表面加工精度和质量,图1即为切削薄壁试验中因为振动而产生的振纹。加工薄壁零件时,材料去除率由于加工振动的产生而受到限制,这些振动可能为强迫振动,也可能为自激振动。薄壁零件的表面加工精度是刀具和工件静态变形及动态变形共同作用的结果。只考虑静态变形会低估表面误差,动态变形占有很重要的因素。

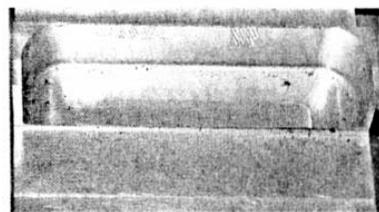


图1 薄壁件铣削振纹

Fig. 1 Milling deformation on the thin-wall components

2 产生颤振的原因

解释产生颤振的理论很多,有再生颤振理论、模态耦合颤振理论及不同材料、刀具引起切削力变化而产生颤振等。

在铣削加工薄壁件时(以加工侧壁为例),由

* 收稿日期:2006-02-28

作者简介:李亮(1981-),男,江苏盐城市人,硕士,盐城工学院助教。

于工件和刀具的弹性变形,在动态铣削力的作用下,同一轴线上不同高度位置处的切削厚度并不相同,有的位置过切,有的位置刀具与工件分离,并未参与切削,这样使加工表面产生振纹。

一个振动系统受到外来的偶然扰动,其振动波形将会有衰减、增强和等幅 3 种状态。第 1 种状态为稳定,第 2、第 3 种状态均为不稳定^[2]。要避免在切削过程中产生振动,就要找出不稳定状态的边界条件。

在高速铣削加工工件时(以加工侧壁为例),由于工件和刀具的弹性变形,在动态铣削力的作用下,同一轴线上不同高度位置处的切削厚度并不相同,有的位置过切,有的位置刀具与工件分离,并未参与切削,这样造成加工表面产生振纹。随着切削的进行,下一刀齿会在前一刀齿产生的振纹处切削,这样,切削厚度不断变化,动态切削力随之不断改变,使工艺系统产生振动。在一定条件下,这种振动会形成颤振。

用一次近似法,假设切削过程的传递函数(动态切削力系数)为实数,并假定其值为已知,则可利用尼奎斯特准^[3,4]得到一个简单的方程式。由此,颤振回路的频率特性为:

$$R_e\{G_g(j\omega)\} \begin{cases} < 1 \text{ 稳定} \\ = 1 \text{ 临界稳定状态} \\ > 1 \text{ 不稳定} \end{cases} \quad (1)$$

$$I_m\{G_g(j\omega)\} = 0 \quad (2)$$

$$G_0(j\omega) = -G_g(j\omega)(1 - \mu e^{-j(\omega T_t + 2\pi m)}) kab \cdot b \quad (2)$$

$$\text{若: } e^{-j(\omega T_t + 2\pi m)} = \cos(\omega T_t + 2\pi m) - j \sin(\omega T_t + 2\pi m) \quad (3)$$

其中 $m = 1, 2, 3, \dots, \infty$

$$\text{则 } R_e\{G_0(j\omega)\} = R_e\{G_g(j\omega)\} \{ \mu \cos(\omega T_t + 2\pi m) - 1 \} + I_m\{G_g(j\omega)\} \{ \mu \sin(\omega T_t + 2\pi m) \} \quad (4)$$

其中 $m = 1, 2, 3, \dots, \infty$

$$I_m\{G_0(j\omega)\} = I_m\{G_g(j\omega)\} \{ \mu \cos(\omega T_t + 2\pi m) - 1 \} + R_e\{G_g(j\omega)\} \{ \mu \sin(\omega T_t + 2\pi m) \} \quad (5)$$

其中 $m = 1, 2, 3, \dots, \infty$

由公式(3),令方程式为零,则可得到空转时间 T_t 与转数的关系:

$$T_t = \frac{1}{\pi \cdot f} = \text{arccot} \left(- \frac{I_m\{G_g(j\omega)\}}{R_e\{G_g(j\omega)\}} \right) + \frac{m}{f} \quad (6)$$

其中 $m = 1, 2, 3, \dots, \infty$

这时只要一超过规定的极限切削宽度 a_{por} 机床便立即产生颤振倾向。根据转数与刀刀数同空转时间的关系得铣削中允许的极限转速表示为:

$$n = \frac{60}{Z \cdot T_t} = \frac{60f}{Z \left(m - \frac{1}{\pi} \text{arccot} \frac{R_e\{G_g(j\omega)\}}{I_m\{G_g(j\omega)\}} \right)} \quad (7)$$

其中 $m = 1, 2, 3, \dots, \infty$ 对于定向的柔性频率特性 $R_e\{G_g(j\omega)\}$ 的任何频率 f ,肯定有一系列的机床转速,使得机床当 $a_p > a_{por}$ 时以频率颤振,与各频率相当的极限切削宽度:

$$a_{por} = \frac{-1}{(1+u)k_{ab}R_e\{G_g(j\omega)\}} \quad (8)$$

铣削中允许的极限轴向切深表示为:

$$a_{plim} = \frac{-1}{2K_{a\mu}Re[G]} \quad (9)$$

振动频率与刀具频率之间的关系表示为:

$$\frac{f}{nm} = N + \frac{\varepsilon}{2\pi} \quad (10)$$

其中 f : 振动频率 m : 铣刀齿数 n : 主轴转速 ε : 相邻刀齿波纹相位差 N : 整数 $\frac{\varepsilon}{2\pi} < 1$ 相邻刀齿波纹相位差表示为:

$$\varepsilon = 2\pi - 2 \tan^{-1} \left(\frac{Re[G]}{I_m[G]} \right) \quad (11)$$

上面公式定义了转速与极限轴向切深之间的关系。根据不同的 N 值,得到图 2 的“稳定性图表”。位于实线下面的切削为稳定切削,而位于

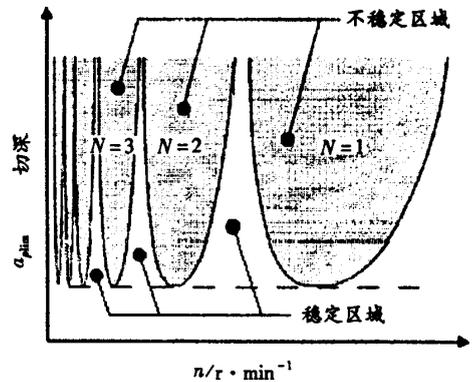


图 2 稳定性图表

Fig. 2 Stability chart

实线上的切削为不稳定切削,将会产生振动^[5]。

3 实验分析研究

目前,许多有关高速切削加工的文章中经常提到“高速切削时激振频率特别高,远离工艺系统的固有频率,因此工艺系统振动小,可以认为是无振动切削,从而使零件的表面粗糙度下降,表面

质量提高,能加工出非常精密的薄壁零件”。本文认为该说法有失一般性,虽然在高速切削条件下,激振频率远离系统固有频率,但是在薄壁零件的高速切削加工过程中,当零件的壁厚较薄时,常常发生切削振动。

为了有效的分析薄壁零件加工过程中切削振动的起因,本文根据现有的条件下安排实验。加工过程中,机床转速均在 10 000 r/min 以上,激振力频率远高于机床工艺系统的固有频率。通过对薄壁零件的切削加工实验,我们发现,当壁厚较大时(≥ 3 mm),基本上不会发生切削振动,但是随着壁厚的变薄,切削振动发生的几率越来越大。由于工件质量的减少对机床工艺系统固有频率并无多大影响,因此,本文初步推断,零件自身刚性的降低是在加工薄壁零件时产生切削振动的主要原因;铣削过程的间歇切削特性是产生切削振动的决定因素。

根据以上分析、推断,本文把振动体限制在工件-刀具之间,对典型的切削力信号作频谱分析,并利用有限元软件对测试工件作了一定的模态分析。试件长 90 mm,高 30 mm,原始厚度为 5 mm,两边和底部各有 5 mm 余量(如图 3)。

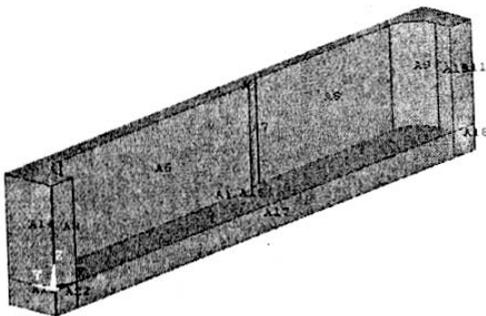


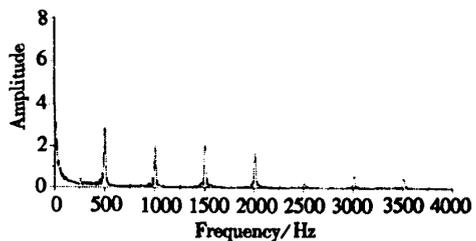
图 3 测试工件示意图

Fig. 3 Sketch map of workpiece configuration

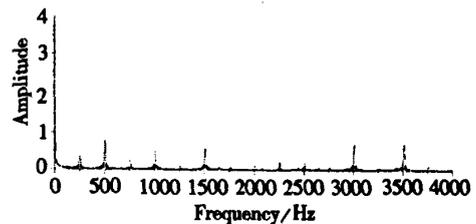
表 1 为不同壁厚时的工件有限元模态分析频率,图 4 为典型铣削力的频谱分析示意图。在激振力的频谱分析中可以看出,除了转速基频处幅值较大以外,转速倍频分量也较大。对于 500 Hz 的激振力,在高达 2 000 Hz 甚至 3 000 Hz 的倍频处,都会有较大的幅值。对于工件来说,随着工件壁厚的降低,工件的刚性随之降低,固有频率相应减小。当壁厚 ≤ 2 mm 以后,工件的固有频率已经与激振力的某倍频分量相接近,从而容易产生切削振动。

表 1 不同壁厚工件的各价模态频率
Table 1 Frequency analysis on different thick workpieces

工件壁厚 mm	前 5 阶模态分析频率/Hz				
	1	2	3	4	5
1.0	21	4	6	7	9
	29.9	764.1	616.9	305.6	729.1
1.5	29	3	4	6	6
	46.9	894.5	211.3	188.1	393.0
2.5	34	5	8	1	1
	11.5	948.3	141.4	2 297	8 913
3.5	34	6	9	1	2
	34.4	327.1	796.0	5 751	1 453



(a) 径向切削力



(b) 轴向切削力

图 4 铣削力频谱分析

Fig. 4 Frequency analyses of cutting force

对于薄壁零件铣削加工中出现的切削振动,本文初步得出以下结论:

铣削加工的间歇切削特点,决定了在铣削加工中存在由切削的断续性所引起的周期性作用的强迫力,以及由断续切削过程中的再生效应所决定的动态切削力,这两种类型的动态切削力是产生切削振动的决定因素。

随着零件壁厚的降低,零件的刚性降低,固有频率降低,当工件的某阶固有频率降低到激振力的倍频分量处附近时,就会诱发切削振动。因此,零件自身刚性的降低是产生切削振动的主要原因。

此外,在激振力的作用下,工件产生让刀变形,在变形没有及时恢复时,下一刀齿切入,此时,由于切削厚度的降低,发生尺寸效用,刀具工件之

间的摩擦力也可以诱发工件和刀具的切削振动。

4 控制切削振动的初步措施

在航空薄壁零件的加工过程中,发生切削振动,既与切削过程有关,又与工件的结构、刚度有关。迄今为止,绝大多数有关切削振动的研究都是以切削振动控制为目的,根据切削振动控制方式的不同,可以归纳分为三种不同的控制方法:以增大机床结构的刚度与阻尼为手段的结构改进与优化设计的方法,采用吸振器或附加装置的控制方法,以及调整切削参数的控制方法^[6,7]。本文仅从工艺的角度出发,浅析通过合理选择切削用量对减小切削振动的作用。

4.1 切削速度的选择

一般认为,切削速度越高,激振频率则越高,特别在高速切削情况下,激振频率远离工艺系统的固有频率,因此工艺系统振动小。但是,随着零件壁厚的降低,刚性下降,当工件的某阶固有频率降低到激振力的倍频分量处附近时,就会诱发切削振动。因此,对于薄壁结构零件的加工,在保证加工效率的前提下,首先选择高速切削方式,以远离工艺系统的固有频率;此外,对不同壁厚的零件作模态分析,了解工件的不同阶固有频率,然后选择合适的切削速度以求避免发生工件的切削振动。当然,变速切削技术的采用也可在一定程度上抑制切削振动。首先,对于不同动态特性的机床切削系统,只需通过软件改变控制系统的变速规律便可进行控制,因此,具有较大的适应性;其次,变速切削可以与切削振动的在线监控有机的联系在一起,是一种较为方便的在线控制方式。

4.2 进给量的选择

研究发现,当增大进给量时,对切削振动有一定的抑制作用。如图 5 所示,为不同进给量(1.8、3.6、5.4、7.2 m/min)下的径向切削力信号频谱分析结果。显然,当进给量为 7.2 m/min 时,各阶频率处的幅值均相对较小。所以我们在加工中可以相应选择大的进给量。

4.3 切削深度 a_e 、 a_p 的选择

在了解薄壁零件切削振动产生的原因以后,选择合适的切削深度以减小振动,实现稳定切削。切削深度包括径向切深和轴向切深,从避免切削振动的角度考虑,在切削过程中,保持被加工零件容易发生切削振动的主振方向的刚性至关重要^[8]。因此,在切削深度的选择方面,综合考虑

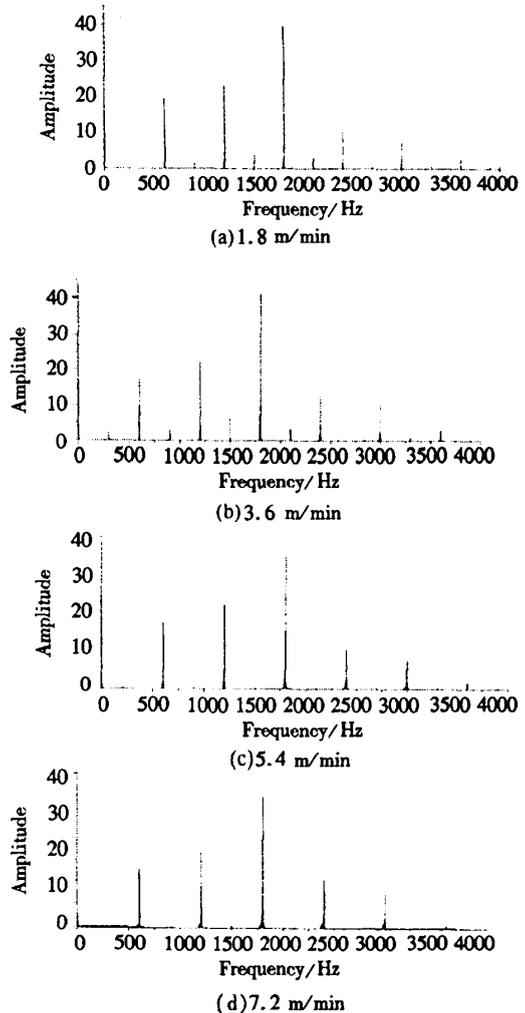


图 5 不同进给量时径向切削力的频谱分析
Fig. 5 Influence of different feed on frequencies analyses of radial cutting force

到加工效率问题,对于侧壁的铣削加工可以采用大的径向切深,小的轴向切深。

对不同径向切深时径向切削力做频谱分析。当 a_e 较大时,虽然各频率分量的幅值较大,但是高阶频率分量相比较基频分量要小的多;而且采用大的 a_e 以后,工件的刚性要好的多,固有频率则要远离幅值较大的激振力倍频分量。

对不同轴向切深时轴向切削力的频谱分析图。当 a_p 较大时,虽然各频率分量的幅值较大,但是 4 000 Hz 以上的高阶频率分量基本没有。这对采用小的径向切深、大的轴向切深条件的腹板切削是有利的。

4.4 合理选择刀具的几何参数

刀具的几何参数主要指:刀具的螺旋角、齿数、前角、主偏角、后角等。螺旋角过小,在侧壁的铣削加工中,冲击力过大,不利于侧壁的铣削加工,因此,铣刀的螺旋角的推荐值一般为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。前角对振动的影响较大,随着前角的增大,振动幅度也会随之下降,但在切削速度较高时,前角对振动的影响将减弱,所以,高速切削时,即使用负前角的刀具也不致产生强烈的振动。如果是主偏角增大,切削力将会减少,同时切削宽度也减小。随着主偏角的增大,振动的幅度逐渐减小,但当角度大于 90° 以后,振动的幅度又会有所增大。对于后角来说,适当地减小后角对振动的抑制具有一定的效果。此外,采用不等距刀具也是抑制

切削振动的一种有效选择。

当然,减小振动的方法和措施是多方面的,在实际工作中,如果碰到切削振动问题,要进行具体分析,针对主要矛盾,采取有效的减振措施。

5 小结

加工中的振动对铝合金薄壁零件加工的影晌很大,通过控制加工参数的选择来控制振动的影晌。选择合适的加工速度 v ,进给量 f ,切削深度 a_e 、 a_p ,合理选择刀具的几何参数,提高刀具和工件的抗振性,可以有效地减少和抑制振动的产生。通过分析加工速度 v 和切削深度 a_e 之间的关系得出的稳定性图可以控制加工的稳定性范围。

参考文献:

- [1] Insperger T, Mann B P, Stepan G, P. V. Bayly Stability of up - milling and down - milling[J]. part 1: alternative analytical methods, 2001, 24(4): 132 - 165.
- [2] Jer - shyong Tsai, Chung - Li Liao. Dynamic finite element modeling of surface errors in peripheral milling of thin - walled workpieces[J]. Journal of the Chinese society of mechanical engineers, 2000, 21(3): 265 - 282.
- [3] Smith S. Stability chatter by automatic spindle speed regulation [J]. Annals of the CIRP, 1992, 41(1): 433 - 436.
- [4] 周泽华. 金属切削原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993.
- [5] 张幼楨. 金属切削原理及刀具[M]. 武汉: 国防工业出版社, 1990.
- [6] 张维纪. 金属切削原理与刀具[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [7] 杨巧凤, 张明贤, 蔡伟. 铝合金高速铣削温度的动态测量[M]. 航空制造技术, 2000(1): 24 - 27.
- [8] M 韦克, K 泰佩尔. 金属切削机床的动态特性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.

Influence of Chatter on High - speed Milling of the Thin - wall Components

LI Liang, ZHA Wen - wei

(Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, China)

Abstract: Thin - wall components are widely used in aerospace products. However, the thin - wall component with poor machinability is easy to deform during high - speed milling process. This paper introduces briefly the influence of chatter on the thin - wall components and puts forward a milling force model during the high speed milling. We use different marching dosage to validate the model and propose some measures to prevent the chatter during different marching dosage.

Keywords: thin - wall component; chatter; deformation; high - speed milling