

文章编号 1004-924X(2003)06-0591-05

# 超声波振动精密切削 GFRP 的实验研究

高印寒<sup>1</sup>, 于向军<sup>2</sup>, 王连武<sup>3</sup>, 李东旭<sup>4</sup>, 王立江<sup>4</sup>

(1. 吉林大学 测试科学实验中心, 吉林 长春 130025; 2. 长春工程学院 机械工程系, 吉林 长春 130022;  
3. 吉林大学 辊锻件厂, 吉林 长春 130025; 4. 吉林大学 机械工程学院, 吉林 长春 130025)

**摘要:** 为改善玻璃纤维增强塑料(Glass Fibre Reinforced Plastics)的切削加工性, 提高加工精度和质量, 采用超声波振动切削的方式对 GFRP 进行了精密切削加工。介绍了超声波振动切削的特性和 GFRP 的纤维束与切削速度方向的相位参数, 相位参数沿圆周方向成周期性变化, 变化周期为  $\pi$ 。通过实验获得了不同切削条件下表面粗糙度的变化规律, 粗糙度随相位角变化基本呈正弦规律, 但在  $45^\circ$  时粗糙度最大。振幅增大导致粗糙度明显下降。切削速度对粗糙度的变化曲线呈极值状态, 在速度为 100 m/min 时粗糙度最小。进给量小于 0.06 mm 时, 粗糙度呈下降趋势; 大于 0.06 mm 时, 粗糙度增加较快; 而大于 0.09 mm 后粗糙度上升趋缓。切削深度对粗糙度的影响呈单调上升趋势。实验结果表明超声波振动切削可以使 GFRP 的加工表面粗糙度减少 1 倍, 使加工质量得以提高。

**关键词:** 超声波振动; 切削; 玻璃纤维增强塑料; 粗糙度

中图分类号: TG506.5 文献标识码: A

## Finish cutting of GFRP by ultrasonic vibration

GAO Yir-han YU Xiang-jun WANG Lian-wu LI Dong-xu WANG Li-jiang

(1. Center of Test Science, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. Department of Mechanical Engineering,

Changchun Institute of Engineering, Changchun 130022, China;

3. Rolling Forge Factory of Jilin University, Changchun 130025, China;

4. College of Machinery and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** In order to improve the machinability and machining accuracy of glass fibre reinforced plastic (GFRP), GFRP is finish cut using ultrasonic vibration. Experimental results indicate that the phase parameters of GFRP fibres with respect to cutting direction change in the circumferential direction at cycle; the variation of surface roughness with the phase angle under different cutting conditions is sinusoidal with maximum roughness at  $45^\circ$ ; an increase in amplitude causes an obvious drop in roughness; the variation of roughness with cutting speed is extremal, and roughness is minimum at 100 m/min; the surface roughness goes down when the feed is less than 0.06 mm, the roughness increases much faster when the feed is more than 0.06 mm, and the increase in roughness slows down when the feed is more than 0.09 mm; the influence of cutting depth on roughness is a monotonous rising trend. It is concluded from the experimental results that ultrasonic vibration cutting can half the surface roughness and improve the machining quality of GFRP.

**Key words:** ultrasonic vibration; cutting; glass fiber reinforced plastics; surface roughness

收稿日期: 2003-05-12; 修订日期: 2003-10-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 58975173)

## 1 引言

GFRP 是由强度高, 硬度大的玻璃纤维和树脂基体混合而成的二相结构, 是一种新型工程材料。作为增强材料的玻璃纤维是韧而硬的材料, 难以切削、不易切断, 容易产生拉伸或弯曲, 切削时容易产生切削残余或剥离, 切削表面产生毛刺。它的基体是较软的合成树脂, 而且软的基体中夹有硬的纤维, 切削时使刀具承受冲击。在普通车削时, 若用硬质合金刀具容易过早地造成磨损, 导致加工表面加工质量变差, 加工精度不好。再有 GFRP 的热传导率和体积比热小, 与金属材料相比在同样的切削速度下温升高, 且随着切削速度增加使切削温度急剧上升, 直接影响到加工表面质量。针对上述问题, 使用硬质合金刀具对 GFRP 进行了超声波振动精密切削的实验研究。

## 2 超声波振动切削特性

### 2.1 分离特性

Z 向 (切削速度方向) 分离型超声波振动车削时, 车刀前刀面与切屑之间不像传统车削过程那样总是紧密接触, 而是周期性的分离。长期以来, 普通车削时切屑与前刀面不分离接触形成了高温高压区, 对切削液和空气来说是很难进入的禁区, 给切削过程带来了一系列恶劣影响。而振动车削的分离特性终于打开了这个禁区, 从根本上改善了车削条件<sup>[1-3]</sup>。

在忽略进给运动的条件下, 振动车刀刀刃与工件之间的相对速度  $V_r$  为:

$$V_r = V_0 + \omega_u A \cos \varphi, \quad (1)$$

式中:  $V_0$  为工件回转的线速度, 即普通车削速度;

$\omega_u$  为车刀刀刃的振动角速度;

$\varphi$  为振动的相位角,  $\varphi = \omega_u t$ 。

刀具切削刃振动的正弦曲线  $V_u$  与水平线  $V_0$  合成得相对速度曲线  $V_r$ , 见图 1。当  $V_0 < \omega_u A$  时, 在  $\varphi_1$  到  $\varphi_1'$  区间  $V_r$  为负值, 其意义是刀具前刀面由  $\varphi_1$  点开始脱离与切屑的接触, 并逐渐加大与切屑之间的距离, 到  $\varphi_1'$  又开始接近切屑, 直到  $\varphi_2$  点刀具才重新与切屑接触, 进入切削过程。

$V_r$  的最大值为  $\omega_u A$ , 故当  $V_0 \geq \omega_u A$  时, 将

不出现上述的前刀面与切屑分离的过程, 令  $k = V_0 / \omega_u A$ , 称之为速度系数。当  $k \geq 1$  时为不分离超声波振动车削, 其切削速度曲线是连续函数, 见图 1 中的虚线, 其表达式如公式 (1)。当  $k < 1$  时为分离型的超声波振动车削, 其切削速度曲线是具有第 1 类间断点的分段连续的周期函数, 见图 1 中的实线, 其表达式如下:

$$V_r = \begin{cases} 0 & 2n\pi + \varphi_1 < \varphi < 2n\pi + \varphi_2 \\ & n = 0, 1, 2, \dots \\ V_0 + \omega_u A \cos \varphi & 2n\pi + \varphi_2 \leq \varphi \leq 2(n+1)\pi + \varphi_1 \\ & n = 0, 1, 2, \dots \end{cases}, \quad (2)$$

因为  $V_r$  是周期函数, 所以区间  $[0, \varphi_1]$  与区间  $[2\pi, 2\pi + \varphi_1]$  完全相同。

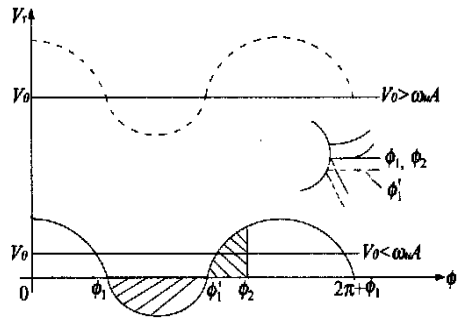


图 1 振动切削的相对速度曲线

Fig. 1 Relative velocity curves of vibration cutting

分离型的超声波振动切削完全脱离了传统的连续切削过程, 刀具的前刀面与切屑之间存在着完全分离的现象。应该指出, 虽然在微观上分离型的超声波振动切削是一种时切时不切的断续切削过程, 但是在宏观上它仍是连续切削。分离特性彻底改变了车削时前刀面的接触条件, 使前刀面与切屑间摩擦时间缩短, 摩擦系数明显下降, 剪切角增大, 变形减小, 特别是高频的分离使被切材料间的亲和作用和黏结作用显著减弱, 切屑底层材料很难粘贴于前刀面上, 从而使积屑瘤无法生成。因此, 切削过程比普通车削稳定得多, 出现了切削力下降, 表面质量和加工精度提高等一系列的加工效果。

### 2.2 冲击特性

振动车削过程是宏观上连续, 微观上高频断续的冲击切削。当  $F = 20 \text{ kHz}$  时, 每秒钟冲击切削 20 000 次, 每次冲击的期间极短, 但其动能比普通车削的动能要大得多。冲击特性引起振动车削

过程中切屑形成机理发生很大变化, 使切削的能量集中, 切屑变形减弱, 切削力下降, 即使是在低速切削时也可以得到稳定的带状切屑, 提高了加工表面质量<sup>[4-5]</sup>。

### 2.3 变速特性

振动车削是一种周期性的变速度和变加速度切削过程, 而且形态也是多变的。振动车削虽然也是一种断续切削, 但却与传统的断续切削(如铣削)大不相同。振动车削的实质是把切削速度在极短的周期内做了重新分布, 使之在一段时间内的速度减到零, 而把它移到另一段时间内, 提高实际切削速度, 速度的这种分配是振动车削所特有的功能。变速特性的优点是对车削过程中的积屑瘤和颤振现象有抑制作用, 可在低速车削时获得较高速车削的一些效果。这对在低速下车削的零件加工, 例如 GFRP 车削、CFRP 车削、凸轮车削、螺纹车削等是很有利的, 可提高其加工质量和加工精度。

### 2.4 往复熨压特性

振动车削的另一特性是刀具相对于工件的运动不是单方向前进, 而是周期的往复运动。因此, 已加工表面在形成以后又经过刀具后退和再前进的重复熨压作用。后退时的熨压主要是由刀具的后刀面进行的, 前进时的熨压主要是由刀具刃口圆角完成的。振动车削的这种熨压作用与普通的熨压加工不同, 振动切削熨压的特点是: (1) 熨压作用是脉冲的, 非连续的; (2) 熨压速度是变速的; (3) 熨压作用是往复的。振动车削的往复熨压特性使车削的实质变成切削与熨压的联合作用, 能明显提高加工表面质量, 降低表面粗糙度。

综上所述, Z 向分离型振动车削的 4 大特征明显改善振动切削的工艺效果, 使切削力小, 切削温度低, 刀具耐用度提高, 并使加工精度和质量提高, 这些特性非常有利于 GFRP 的切削加工。

## 3 超声波振动切削装置

进行振动切削试验, 首先应该有一套稳定性好且实用性强的振动系统。超声波振动系统是一个复杂的系统, 如图 2 所示, 主要是由刀架体、振子、换能器、变幅杆、振动刀杆等组成。另外还有一些辅助设备: J93025 超声波发生器, XJP-10 转速数字显示器, 磁化电流发生器, 金相显微镜和一套冷却设备。

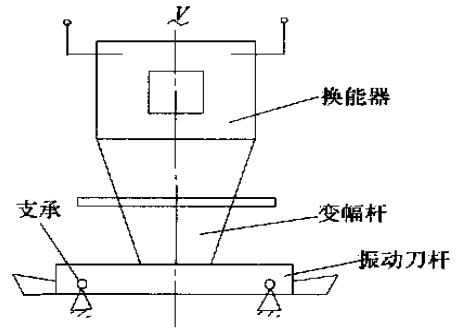


图 2 超声波振动切削装置

Fig. 2 Ultrasonic vibration cutting device

## 4 GFRP 纤维束方向与切削速度方向相位参数

试验中所采用的正交纤维束 GFRP 材料是生产中使用的网状纤维多层板, 板厚为 18 mm, 外径为  $\varnothing 342$  mm, 纤维层间距为 1 mm。这种复合材料的切削加工过程与金属切削完全不同, 切削速度方向与纤维束方向的交角  $\theta$  沿圆周方向成周期性变化, 变化周期为  $\pi$ , 见图 3。

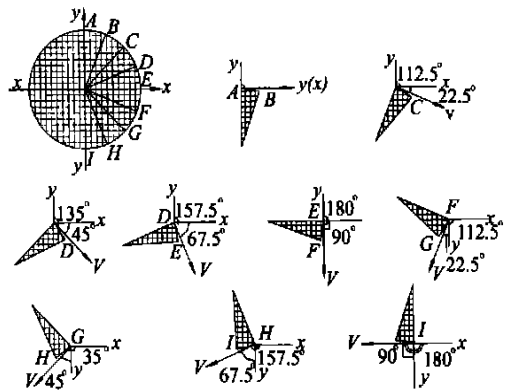


图 3 正交纤维束复合板角度  $\theta$  变化示意图

Fig. 3 Sketch of variable angle  $\theta$  of squareness fusciculus  
dad plate

图 3 表示出横向纤维束与竖向纤维束在各点与切削速度方向的夹角, 板块另一半的角度变化与画出的相同。当刀具在图 3 中 A 点时竖向纤维与切削速度成  $90^\circ$ , 故称为垂直切削; 横向纤维与切削速度成  $180^\circ$  (或  $0^\circ$ ), 称为平行切削; 在 B 点

位置竖向纤维束与切削速度成  $112.5^\circ$ ，称为  $112.5^\circ$  钝角切削；横向纤维与切削速度成  $22.5^\circ$ ，称为锐角切削。其他的依此类推。由于纤维束是正交网状结构，同时考虑到横向纤维和竖向纤维之间存在一定的差异，所以决定采用取  $\pi$  为周期做试验，即选用图 3 中 A ~ I 共 9 个点测量表面粗糙度值。

### 5 振动切削 GFRP 试验

根据以上试验条件，对 GFRP 进行了超声波振动切削实验，得出相对应于角度  $\theta$  变化的 9 个正交表(略去)。由正交表经计算得出相对应于振幅 A、切削速度 V、进给量 f、切削深度  $a_p$ 、角度  $\theta$  5 个参数变化情况下对表面粗糙度( $R_z$ ) 的影响规律，见图 4~ 图 8。

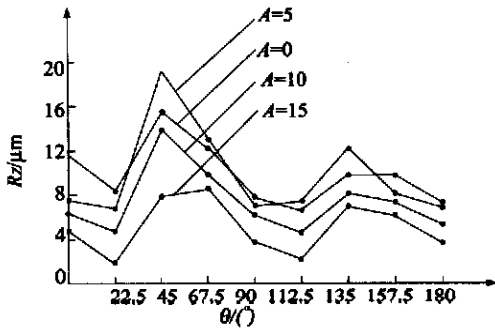


图 4 角度  $\theta$  对  $R_z$  的变化规律

Fig. 4 Changing rules of degree  $\theta$  for  $R_z$

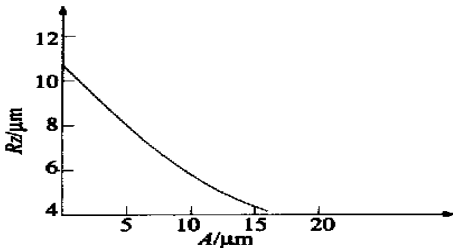


图 5 振幅对  $R_z$  的影响

Fig. 5 Influence of amplitude for  $R_z$

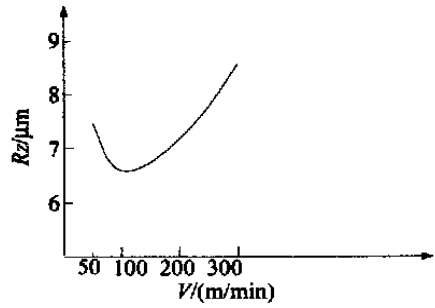


图 6 切削速度对  $R_z$  的影响

Fig. 6 Influence of cutting speed on  $R_z$

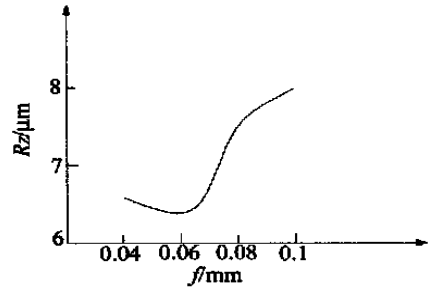


图 7 进给量对  $R_z$  的影响

Fig. 7 Influence of amount of feed on  $R_z$

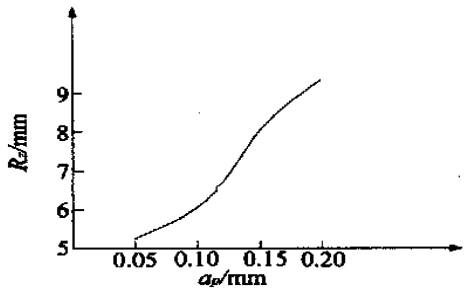


图 8 切削深度对  $R_z$  的影响

Fig. 8 Influence of cutting depth on  $R_z$

### 6 实验结果及分析<sup>[1-5]</sup>

(1) GFRP 与一般金属被切削时的一个重要区别为角度  $\theta$  的变化给 GFRP 的切削性能带来很大差异，见图 4。由于 GFRP 的各向异性，切削效果有很强的方向性。当  $\theta$  接近  $90^\circ$  时其切削类似垂直切削，所用切削力小，使切削容易，切削变形也小，所以表面粗糙度值也较小。 $\theta$  为  $45^\circ$  处的切削性能最差，表面粗糙度值也最大。在  $0^\circ \sim 45^\circ$  的锐角切削比  $45^\circ \sim 90^\circ$  的钝角切削效果好。锐角切

削时,随着角度 $\theta$ 的变化,纤维的弹性恢复量小,获得的表面质量也好。钝角切削时,玻璃纤维几乎完全由前刀面的挤压作用而发生崩裂,从而产生不连续的崩碎状切屑并在切削层以下产生凹陷,使其切削加工性能变差,表面粗糙度值增大,其切削效果明显低于锐角切削。 $\theta$ 为 $135^\circ$ 处其表面粗糙度值最大。在 $135^\circ \sim 180^\circ$ 钝角切削比 $90^\circ \sim 135^\circ$ 的效果差。

(2) 振幅 $A$ 对表面粗糙度值 $R_z$ 的影响取决于临界系数 $K$ 的大小,即速度 $V$ 不变时, $A$ 值越大,临界速度 $V_c$ 越大,临界系数 $K$ 值越小,超声波振动分离效果越明显, $R_z$ 也越小,见图5。

(3) 在振动切削状态下,切削速度 $V$ 对 $R_z$ 的影响,见图6。当振幅不变和速度不高时,加工表面粗糙度值较小,但当 $V$ 过低时,由于切削力和切屑变形都增大,所以导致加工表面粗糙度值略增大。当 $V$ 较大时, $R_z$ 随 $V$ 增大而增大。这是由于随着 $V$ 的增大,切削温度增加,而GFRP耐高

温性能较差,所以在高速下切削时易产生烧伤,从而导致加工表面粗糙度急剧增加。

(4) 在振动切削状态下,进给量 $f$ 对 $R_z$ 的影响见图7。当 $A$ 和 $V$ 一定时,从图中可以看出进给量 $f$ 从 $0.04 \text{ mm/r}$ 变化到 $0.06 \text{ mm/r}$ 过程中 $R_z$ 呈下降趋势。这是因为刀具刃口半径的影响, $f$ 越小则切屑越薄,刀具刃口半径对切削层和已加工表面的挤压就越严重,所以 $R_z$ 增大。当 $f$ 大于 $0.10 \text{ mm/r}$ 时,则 $f$ 增大 $R_z$ 增大, $f$ 增大易导致前刀面挤压作用增大,使已加工表面材料被切裂移开,或在切削层以下产生凹陷,使 $R_z$ 急剧增大。

(5) 在振动切削状态下,切削深度 $a_p$ 对 $R_z$ 的影响见图8。当 $A$ 、 $V$ 和 $f$ 均一定时,由于切削力与 $a_p$ 成正比变化,切削力增大,已加工表面纤维弹性变形的恢复增大,使 $R_z$ 增大,另外 $a_p$ 增大后,切削区产生的热量成正比增加,同样使 $R_z$ 增大,所以当 $a_p$ 增大时, $R_z$ 呈上升趋势。

#### 参考文献:

- [1] 高印寒,沈维华,王立江. 超声波振动镗削“刚性化”的研究[J]. 机械工程学报, 1996, 32(1): 28-32.  
GAO Y H, SHEN W H, WANG L J. A study on stiffness in ultrasonic vibration boring[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1996, 32(1): 28-32. (in Chinese)
- [2] 王立江,赵继,谭庆昌. 超声波振动车削的运动学及其加工表面质量[J]. 兵工学报, 1987, (3): 24-31.  
WANG L J, ZHAO J, TAN Q CH. Kinematics of ultrasonic vibration turning and quality of finished surface[J]. *Acta Armanentarii*, 1987, (3): 24-31. (in Chinese)
- [3] 张雷,王立江,赵继. 超声波振动车削产生超越性加工现象的研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(2): 49-55.  
ZHANG L, WANG L J, ZHAO J. A study on outstanding phenomenon in ultrasonic vibration turning[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(2): 49-55. (in Chinese)
- [4] 尹自强,李圣怡. 超精密车削下刀具相对振动的辨识[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5): 497-503.  
YIN Z Q, LI SH Y. Identification of relative vibration in ultra precision turning[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5): 497-503. (in Chinese)
- [5] 李祥林,薛万夫,张日昇. 振动切削及其在机械加工中的应用[M]. 北京:北京科学技术出版社, 1985.  
LI X L, XUE W F, ZHANG R SH. *Vibration cutting and application on machine* [M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 1985. (in Chinese)

作者简介:高印寒(1951-),男,吉林敦化人,教授,吉林省有突出贡献的中青年专业技术人才,主要研究方向为特种加工技术、精密加工、测控技术与仪器及车辆动态测试。