

# 铝合金薄壁中空结构件重负荷铣削切削振动研究<sup>\*</sup>

熊文亮<sup>1</sup>,葛英飞<sup>2</sup>,刘畅<sup>2</sup>,郭新<sup>1</sup>,李春广<sup>1</sup>,付细群<sup>1</sup>

(1.南车南京浦镇车辆有限公司,南京 210031;

2.南京工程学院机械工程学院,南京 211167)

**[摘要]** 使用直径为20mm的商用高速钢和硬质合金刀具,在中低切削速度和大切宽条件下对高速列车车体用T5热处理6N01铝合金双壳薄壁W型结构件进行重负荷铣削试验,重点对铣削振动及其影响因素进行研究。结果表明:当铣刀铣削至结构件的筋板交叉处时振幅有突变增加,其值为铣削铝合金薄壁时的3~6倍;在中低速铣削范围内,重负荷铣削该结构件时易发生自激振动和强迫振动。研究同时表明,机床转速和每齿进给量是影响切削振动的显著因素,波刃刀具切削振动幅值显著大于非波刃,螺旋角较大的刀具和齿数较少的刀具其切削振动较小;在剧烈的切削振动下,高速钢刀具易发生刀尖崩刃,波刃刀具则易发生严重粘结。

**关键词:** 铝合金;薄壁中空结构件;重负荷铣削;切削振动

## Cutting Vibration When Heavy Milling of Aluminum Thin-Walled Hollow Structure Parts

XIONG Wenliang<sup>1</sup>, GE Yingfei<sup>2</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>, GUO Xin<sup>1</sup>, LI Chunguang<sup>1</sup>, FU Xiqun<sup>1</sup>

(1.CSR Nanjing Puzhen Co. Ltd., Nanjing 210031, China;

2.School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**[ABSTRACT]** Sintered high speed steel and carbide tools with the diameter of 20 mm were selected to investigate the cutting vibration and the influence factors when heavy milling 6N01-T5 aluminum thin-walled hollow structure. The results showed that the cutting vibration fluctuated tempestuously when cut the intersection of the thin wall. The maximum amplitudes are 3 to 6 times bigger than that of cutting the monolayer thin-walled aluminum. Self-excited or forced vibration easily took place for the tool-workpiece system under the wide range of cutting parameter combination. The results also showed that spindle speed and feed rate are the significant factors that affected the cutting vibration. The use of bigger helical angle, less tooth number or no-wave edge cutter could decrease the cutting vibration effectively. Under the violent cutting vibration, chipping for the high speed steel tool and severe adhesive for the wave edge cutter often could be observed.

**Keywords:** Aluminum alloy; Thin-walled hollow structure; Heavy milling; Cutting vibration

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.110

切削振动长久以来一直是切削加工技术的一项重点研究内容,因为它与零件的加工变形、加工表面质量(特别是表面粗糙度)、刀具磨损等有着重要的联系。对于铝合金薄壁、框体等特殊结构件,加工变形和加工表面质量一直是国内外研究者重点解决的科学和技术难题。

然而,纵观近年来关于铝合金加工表面质量、加工变形方面的研究文献可发现,大多数的研究者通过表面粗糙度信号或切削力信号来间接地研究切削振动对加

工变形、刀具磨损、切削温度、加工表面质量的影响<sup>[1-4]</sup>。在切削振动研究方面,很多研究者仅就振动信号的频谱或功率谱进行研究以辨别引起振动的诸多因素及其显著性<sup>[5-8]</sup>,而对刀具特性(如几何角度、波刃情况等)对铣削振动影响方面给予的关注却很少。

纵观国内外相关文献,关于铝合金及其结构件高速/超高速切削加工方面的研究文献众多<sup>[1-4,9-12]</sup>,而关于铝合金特殊结构件中低速、重载切削加工的研究相对缺乏。而在重负荷切削特别是铣削这些铝材结构件时由于切削振动而引发的严重粘接现象和刀具破损甚至断裂现象频繁发生,从而使得刀具成本显著增加、加工表面质量严重下降,机加工后往往需要大量的时间来对加

<sup>\*</sup> 基金项目:南京市科技发展计划项目(201306024)、江苏省教育厅2014年度“青蓝工程”资助项目、南车南京浦镇车辆有限公司重大项目(C017)。

工表面进行人工打磨,生产率显著下降。

本文对高速列车车体用经 T5 热处理的 6N01 铝合金大型双壳薄壁中空结构件进行强力铣削加工试验,研究刀具特性、切削用量组合、冷却润滑条件等对铣削振动的影响。

## 1 试验条件及方案

试验所用工件材料为经 T5 热处理的 6N01 铝合金双壳薄壁中空结构件(图 1),尺寸为 550mm×400mm×60mm(长×宽×厚)。在工件上钻 3 排直径为 4mm 的孔(孔中心间距为 23mm),并攻丝成 M5 的螺纹孔,以便与加速度计前端用于固定的 M5 螺纹连接。工件如图 1 所示,振动测量现场如图 2 所示(图示为红外测温仪测温和振动测量同时进行的试验现场)。测量振动时,先将加速度计安装固定在工件上从左至右第一排的第一个孔中,在某一组切削用量组合下,刀具切削行程 180~190mm(至图 1 中的位置 1 处切削),采集完一组数据后加速度计向后挪一个孔并固定,在另一组切削参数组合下采集新的一组数据,以此类推,一排孔用完后,换第二排、第三排孔。



图1 振动测量试件

Fig.1 Workpiece for the cutting vibration tests

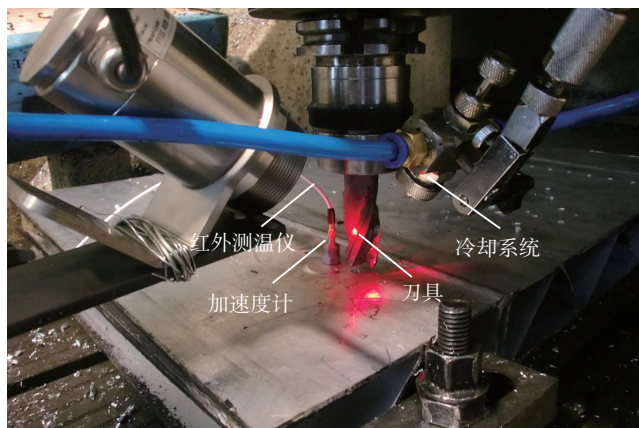


图2 切削振动和切削温度测量现场

Fig.2 Experimental work for the cutting vibration and cutting temperature tests

加速度计为 PCB352A60,测量所得的电势信号与加速度之间的标定关系为  $mV/m/s^2=1.043$ ,与之相连的采集卡为 NATIONAL INSTRUMENTS NI9233(量程: -5~+5V)。振动测量时,采样频率设定为 25kHz。分别使用 Optris CT 8081137 红外测温仪和 Kistler 9272 测力仪对铣削温度和铣削力进行测量。

在 DMC70V 五坐标加工中心上进行铝合金结构件的重负荷铣削试验,试验所用刀具的几何参数及切削条件汇总如表 1 所示。

表1 刀具几何参数及切削条件

刀具牌号	前角 $\gamma$ (°)	后角 $\alpha$ (°)	螺旋角 $\beta$ (°)	齿数	冷却方式
瓦尔特	8	12	40	2	干切
	8	12	40	2	常温气动喷雾射流冲击
	8	12	30	2	干切
	8	12	30	3	干切
蓝帜非波刃	5	10	30	3	干切
蓝帜后波刃	5	10	30	3	干切
陕硬前波刃 ( $VB=0mm$ )	0~5	10	25	3	常温气动喷雾射流冲击
陕硬前波刃 ( $VB=0.16mm$ )	0~5	10	25	3	

为建立铣削振动振幅的经验公式并获得切削参数(机床转速  $n$ 、轴向切深  $a_p$ 、进给量  $f_z$ 、径向切宽  $a_w$ )对铣削振动幅值的影响显著性,使用四因素三水平正交试验表安排试验,如表 2 所示。

表2 重负荷铣削振动正交试验表

(瓦尔特40刀具,常温气动喷雾射流冲击冷却)

振动加速度值 /V	因素的组水平				水平数值			
	$n_1$	$a_{p1}$	$f_{z1}$	$a_{w1}$				
5.46	$n_1$	$a_{p1}$	$f_{z1}$	$a_{w1}$	8000	20	0.2	5
2.43	$n_1$	$a_{p2}$	$f_{z2}$	$a_{w2}$	8000	10	0.1	10
1.66	$n_1$	$a_{p3}$	$f_{z3}$	$a_{w3}$	8000	5	0.05	20
2.44	$n_2$	$a_{p1}$	$f_{z2}$	$a_{w3}$	5000	20	0.1	20
0.91	$n_2$	$a_{p2}$	$f_{z3}$	$a_{w1}$	5000	10	0.05	5
3.01	$n_2$	$a_{p3}$	$f_{z1}$	$a_{w2}$	5000	5	0.2	10
0.72	$n_3$	$a_{p1}$	$f_{z3}$	$a_{w2}$	3000	20	0.05	10
1.56	$n_3$	$a_{p2}$	$f_{z1}$	$a_{w3}$	3000	10	0.2	20
1.25	$n_3$	$a_{p3}$	$f_{z2}$	$a_{w1}$	3000	5	0.1	5

以下文中如未加注明,试验条件为  $n=5000r/min$ ,  $v_f=1000mm/min$ ,  $a_p=20mm$ ,  $a_w=20mm$ 。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 典型切削振动测量及分析

铝合金薄壁中空结构件重负荷铣削典型切削振动信号如图3所示,可见刀具切削铝合金结构件不同位置时,振动信号幅值有明显变化,切削筋板交叉处时振动幅值最大,为切削单层铝合金时振动幅值的3~6倍。

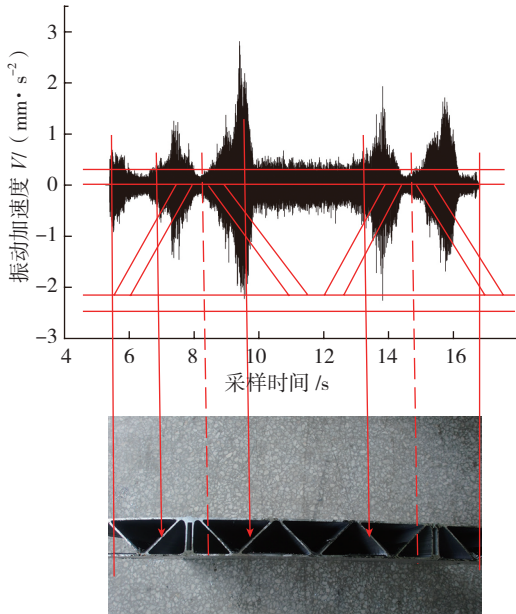


图3 典型切削振动信号及其分析(蓝帜非波刃刀具,干切)

Fig.3 Typical milling vibration signal and the analysis (LMT no-wave edge cutter, dry cutting)

将切削振动信号按其下半部(纵轴负方向)变化的轮廓线用粗细描绘勾勒出来,如图3所示,对比图3中铝合金结构件实物可发现,勾勒出来的轮廓与结构件实物的结构轮廓基本相同。由此可见,铝合金结构件的切削振动及其变化与结构件本身的结构形状密切相关。当刀具从左至右铣削时,当铣削单层铝合金壳板时,切削振动幅值较小且基本稳定不变;而到铣削至筋板交叉处(图3中的虚线处附近)时,刀具实际既与结构件上层壳板接触,同时也壳板下方的筋板相接处,从而刀具的实际切削深度在此处逐渐增加,此时振动幅度也逐渐增大。由图3还可看出,刀具切入和切穿筋板时振动幅值最大,这是因为此时结构件的完整结构被破坏且整体刚度有显著下降。

如上所述,铝合金薄壁中空结构件本身的结构及其在切削过程中工件局部刚性的变化是造成剧烈切削振动的主要原因,而切屑厚度周期变化和刀具周期进给切削也是重负荷切削铝合金薄壁中空结构件时产生剧烈切削振动的重要机制。铣削时,切屑厚度是变化的,顺铣时切屑厚度从大变小,逆铣时切屑厚度由小变大,满

刀宽铣削时,顺铣和逆铣同时存在,在切屑形成的一个周期内切屑厚度先由小变大再由大变小,这种切屑厚度周期变化必然引起切削力的周期变化,从而引起切削振动。

此外,机床主轴的旋转和刀具的周期进给切削也是引起铣削振动的重要机制。如图4所示,在铣削振动频谱图中对应的 $SF$ (83.2Hz)和 $TPF$ (250.2Hz)即为机床主轴转动频率和刀具周期进给频率。图4中还显示了许多幅值显著的非机床转速和刀具进给频率整数倍的高频分量(666.2Hz、748.3Hz、1003.5Hz、1252.5Hz)。上述事实说明在重负荷铣削铝合金薄壁中空结构件时由机床转动和刀具周期进给所引起的自激振动和强迫振动同时存在。

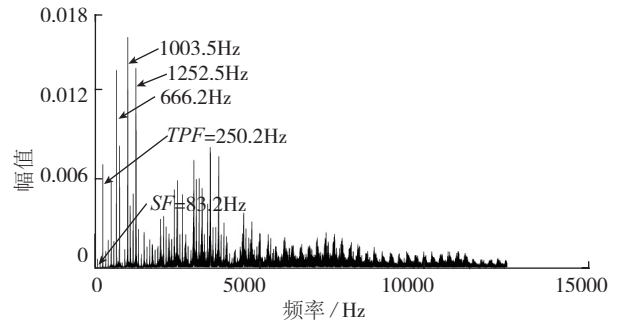


图4 图3中切削振动信号的频谱图

Fig.4 Spectrum of milling vibration signal in Fig.3

### 2.2 影响切削振动的因素分析

#### 2.2.1 切削参数的影响

使用多元非线性回归法对表2中的铣削振动幅值进行分析和处理,可得重负荷铣削铝合金中空薄壁结构件时的切削振动经验公式为:

$$A = e^{-5.87} n^{0.94} f_z^{0.76} a_p^{0.1} a_w^{0.0041}, r^2 = 0.942, F_{\text{观察}}(4, 4) = 16.3 \quad (1)$$

由式(1)看出,机床转速和每齿进给量的指数比其他参数的指数大很多,从而是显著影响因素。同理,轴向切深次之,径向切宽对铣削振动基本无影响。工程实际中可适当降低机床转速和每齿进给量,同时适当增大轴向切深和径向切深,这可有利于切削振动的减小。试验中发现,由此而产生的切削振动的减小有利于抑制刀具严重粘结磨损的发生。

#### 2.2.2 刀具刃形(波刃和非波刃)的影响

由图5可看出,波刃刀具切削振动幅值显著大于非波刃,这是波刃刀具容易发生严重工件材料粘结现象的重要原因之一(如图6所示)。

#### 2.2.3 刀具齿数和螺旋角的影响

由图7可看出,螺旋角较大(如瓦尔特40)的刀具比螺旋角小(如瓦尔特30)的切削振幅小。由图7还可知,3齿刀具的切削振幅比2齿的高。这是因为在相同

的转速和每齿进给量下,3齿刀相邻刀齿切削的时间间隔比2齿短,刀具进给切入频率增大,从而切削振动增大。

#### 2.2.4 冷却方式的影响

如图8所示,与干切相比,常温气动喷雾射流冲击冷却方式并不能有效降低铝合金薄壁中空结构件重负荷铣削时的切削振动。这是因为引起切削振动的主要

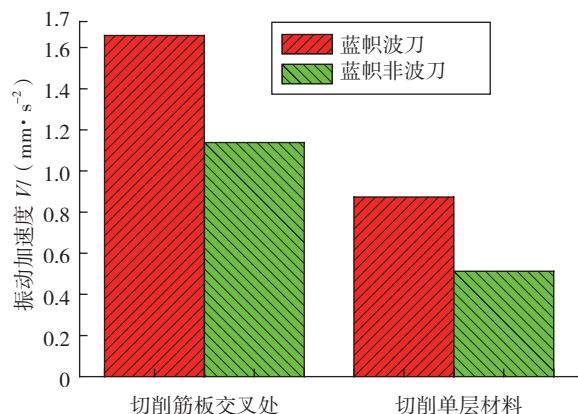


图5 蓝帜波刃和非波刃刀具切削振动对比 (干切)

Fig.5 Milling vibration for LMT wave and no-wave edge cutter



(a) 发生严重粘接的刀具



(b) 加工表面

图6 发生严重粘接的刀具及此时的加工表面形貌 (蓝帜后波刃高速钢刀具, 冷风气动喷雾射流冲击, 切削500mm)

Fig.6 The adhesive workpiece material on the tool and the machined surface for the LMT wave edge cutter (cryogenic pneumatic mist jet impinging cooling cutter 500mm)

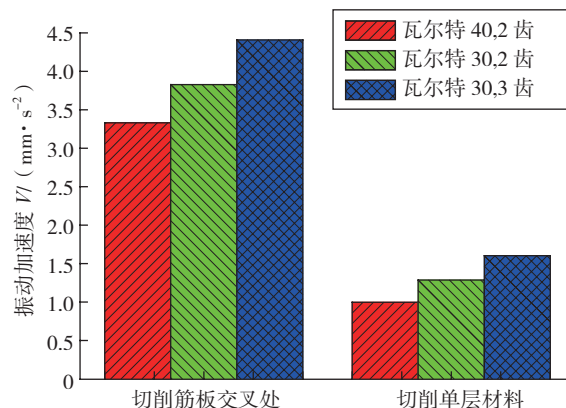


图7 刀具螺旋角对切削振动的影响 (干切)

Fig.7 Effect of tool helical angle and tooth number on the milling vibration (dry cutting)

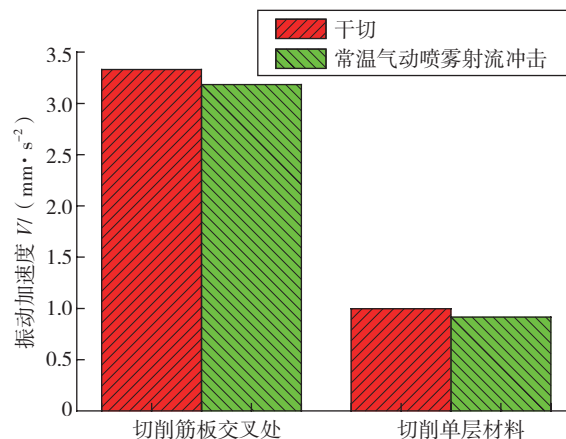


图8 冷却条件对切削振动的影响(瓦尔特40刀具)

Fig.8 Effect of cooling condition on the milling vibration WALTER 40 cutter

机制是工件材料的结构特征以及刀具周期性进给切削行为。

#### 2.2.5 刀具磨损的影响

由图9可看出,切削振动幅值随刀具磨损的增加而显著增加,从而容易发生严重粘结的情况,因此实际切削加工时刀具磨损标准不宜选择过大(应在VB0.5~0.6mm 范围内选择)。

#### 2.2.6 振动对切削力、刀具磨损和温度的影响

由图10可发现,切削振动信号与切削力信号的变化具有同步性,即切削振动幅值比较大时切削力信号幅值也较大。这表明切削振动对切削力信号有显著影响,切削筋板交叉处时切削振动加速度有显著增加,造成此处的切削力信号也显著增加,实际切削区工件变形去除所产生的切削力并没有切削力信号图中显示那么大。因此,切削振动的存在使得刀具上的力显著增加。由图10还可发现,切削振动幅值有突变增加的位置切削温度也会突变增加,因此切削振动可加剧刀具与工件间的

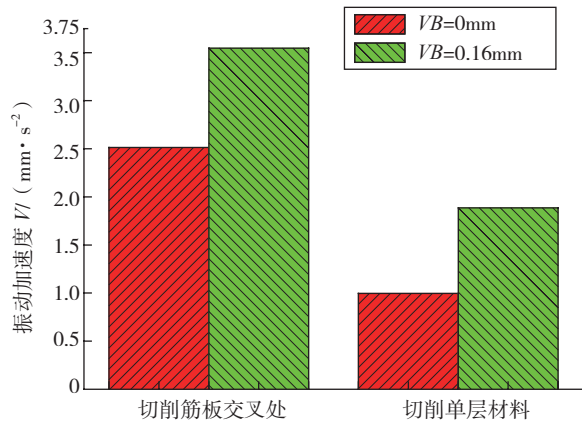


图9 刀具磨损对切削振动的影响 ( 陕硬焊接整体硬质合金前波刃刀具, 冷风气动喷雾射流冲击,  $n=5000\text{r}/\text{min}$ ,  $v_f=1500\text{mm}/\text{min}$ ,  $a_p=20\text{mm}$ ,  $a_w=20\text{mm}$  )

Fig.9 The effect of tool wear on the milling vibration ( Shanying brazed carbide wave edge cutter, cryogenic pneumatic mist jet impinging cooling )

摩擦,从而使切削温度进一步增加,从而重负荷铣削铝合金薄壁中空结构件时刀具容易发生刀尖严重崩刃、刀具严重粘接的现象(如图6所示)。

### 3 结论

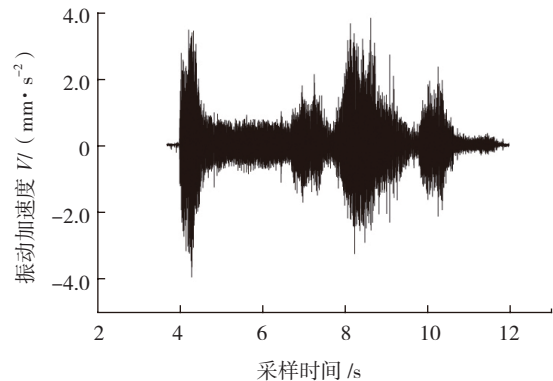
(1) 铝合金双壳薄壁中空结构件中低速、重载条件下铣削时,切削振动及其变化主要决定于结构件本身的形状特征,在筋板交叉处附近切削振动幅值最大,在单层铝合金薄壁处振动幅值最小。轴向切深的周期变化、切屑形成的周期性以及刀具的周期进给切削也是造成剧烈切削振动的重要机制。

(2) 在铣削用量4要素中,机床转速和每齿进给量是影响铝合金双壳薄壁中空结构件切削振动幅值的显著因素,轴向切深次之,径向切宽对切削振动基本无影响。冷却方式对切削振动的影响不显著,切削振动幅值随刀具磨损的增大而显著增大。使用非波刃刀具、较大的刀具螺旋角和较少齿数刀具可有效降低切削振动幅值。

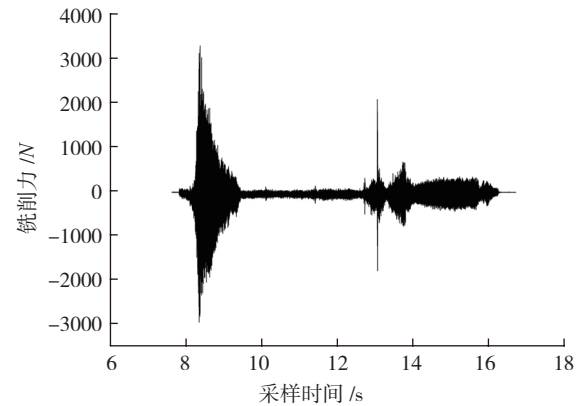
(3) 切削振动的普遍存在使得重负荷铣削铝合金薄壁中空结构件时切削力和切削温度处于较高水平,从而刀具容易发生严重崩刃和严重粘结。

### 参考文献

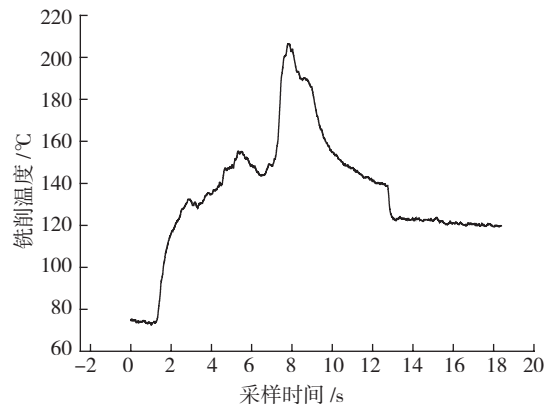
[1] FUH Kuanghua, CHANG Hungyen. An accuracy model for the peripheral milling of aluminum alloys using response surface design[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997(72):42-47.  
 [2] CAMPATELLI G, SCIPPA A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4[J]. Procedia CIRP, 2012(1):563-568.  
 [3] 李亮,何宁,何磊,等. 高速铣削铝合金时切削力和表面质量影响因素的试验研究 [J]. 工具技术, 2002, 36(12):16-19.



(a) 切削振动信号



(b) 切削力信号



(c) 切削温度信号

图10 振动信号与力信号、温度信号的关系 ( 陕硬前波刃刀具, 干切,  $n=5000\text{r}/\text{min}$ ,  $v_f=1500\text{mm}/\text{min}$ ,  $a_p=20\text{mm}$ ,  $a_w=20\text{mm}$  )

Fig.10 Effect of cutting vibration on the cutting force and cutting temperature ( Shanying brazed carbide wave edge cutter, dry cutting )

LI Liang, HE Ning, HE Lei, et al. Experimental research on influence factors of cutting force and surface quality during high speed milling Al-alloy[J]. Tool Engineering, 2002, 36(12):16-19.

[4] 王巧生. 高速铣削切削力变化及刀具轨迹优化 [D]. 广州: 广东工业大学, 2005.

WANG Qiaosheng. Research on high speed milling forces and cutter path optimizing[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2005.

(下转第119页)

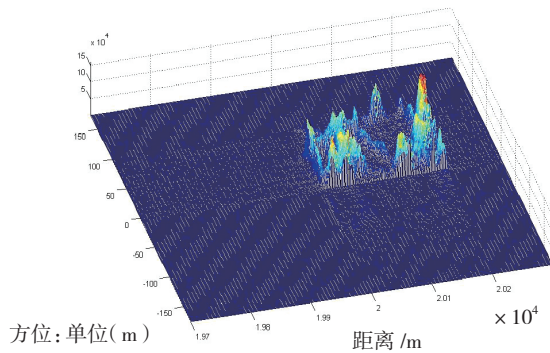


图11 真实场景距离方位压缩图

Fig.11 Distance and azimuth compression of real scene

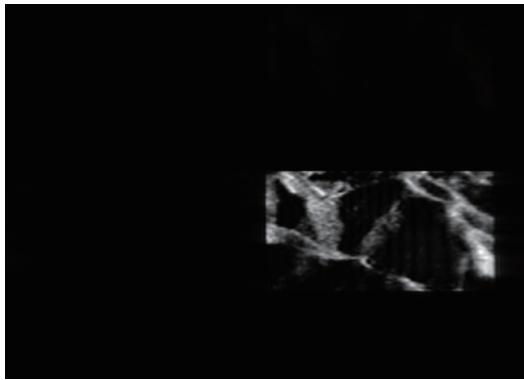


图12 真实场景SAR成像图

Fig.12 SAR imaging of real scene

SAR 回波信号数学模型的推导,在此基础上提出了一种适用于不同类型的合成孔径雷达回波模拟方法。仿真试验表明该方法具有一定的通用性,完全能够满足单点目标、多点目标、面目标、分布目标及真实场景等多种类型的 SAR 回波信号仿真需求,因而本文的研究对于 SAR 系统设计及性能分析具有重要的参考意义。

本文所提出的 SAR 回波模拟方法还无法实现大场景的 SAR 回波实时仿真,下一步本文将该问题进行研究,利用 GPU 并行计算实现大场景 SAR 回波快速模拟。

### 参考文献

- [1] GIORGIO Fanceschetti, MAUIZIO Migliaccio, DANIELE Riccio, et al. SARAS:A synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sense,1992,30(1):110-123.
- [2] GIEURLL C, RUPPEL M. An end-to-end synthetic aperture radar simulator[C]. EUSAR'96,Konigswinter,Gemrnay,1996:569-572.
- [3] FRANCESCETTI G, IODICE A, RICCIO D, et al. An electromagnetic model for SAR raw signal simulation of urban areas[C]. Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas IEEE/ISPRS Joint Workshop, 2001:10-14.
- [4] KRUPP V H, WAITE W P, MAC Donald. Incidence angle consideration for Spacecraft imaging radar[J]. IEEE Trans.Geoscience and Remote Sensing,1982,20(3):384-389.
- [5] 李凌杰,王建国,黄顺吉.基于真实反射场景 SAR 原始信

号模拟[J]. 电子科技大学学报,1996,25(6):566-568.

LI Lingjie, WANG Jianguo, HUANG Shunji. SAR original signal simulation based on real reflection scene[J]. Journal of Electronic Science and Technology University,1996,25(6):566-568.

[6] 段秋萍,董戈,祁海明.基于真实场景的 SAR 回波模拟方法研究[J]. 遥测遥控,2007,28(7):36-41.

DUAN Qiuping, DONG Ge, QI Haiming. Simulation method of SAR echo based on real scene[J]. Remote Control, 2007, 28(7):36-41.

[7] 于明成,许稼,彭应宁,等. SAR 原始信号的快速仿真[J]. 系统仿真学报,2006,18(2):122-125.

YU Mingcheng, XU Jia, PENG Yingning, et al. Fast simulation of SAR raw signal[J]. Journal of System Simulation,2006,18(2):122-125.

[8] 孙寒冰,曲长文,侯海平.合成孔径雷达原始信号的模拟方法[J]. 光电技术应用,2009,24(2):71-84.

SUN Hanbing, QU Changwen, HOU Haiping. Simulation method for the raw signal of synthetic aperture radar[J]. Optoelectronic Technology Application,2009,24(2):71-84.

(责编 宁宁)

(上接第 114 页)

[5] 吴欣.高速铣削工艺参数优化的试验研究[D].南京:南京理工大学,2004.

WU Xin. Experimental study on the optimization of process parameters for high speed milling[D].Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.

[6] WINFOUGH William R. Issues of dynamics in high-speed milling of aluminum aircraft structures[D]. Gainesville:University of Florida, 1995.

[7] EYNIAN M, ALTINTAS Y. Analytical chatter stability of Milling with rotating cutter dynamics at process damping speeds[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2010, 132:1-14.

[8] DSC Eng. PAWE Twardowski. HSM machining stability during hardened steels milling progress[C]. Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering System Design and Analysis, ESDA,2008:289-294.

[9] 刘东,陈五一,刘强,等. 7075 铝合金高速加工铣削力的试验研究[J]. 航空制造技术,2007(6):83-85.

LIU Dong, CHEN Wuyi, LIU Qiang, et al. Experimental study on milling force during high speed milling of Al alloy 7075[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(6):83-85.

[10] 汪振华,袁军堂,胡小秋,等. 防锈铝合金 LF21 的高速铣削试验[J]. 中国机械工程,2009,20(14):1660-1664.

WANG Zhenhua, YUAN Juntang, HU Xiaoqiu, et al. Experimental study on milling forces in high-speed end milling of LF21 aluminum alloy[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(14):1660-1664.

[11] RAO Balkrishna, SHIN Yung C. Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001(41):1763-1781.

[12] KISHAWY H A, DUMITRESCU M, NG E G, et al. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005(45):219-227.

(责编 宁宁)