

# 内置被动阻尼器减振铣刀的实验测试\*

杨毅青, 骈亚威, 王云飞

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京, 100191)

**摘要** 提出一种长径比接近 8 的内置被动阻尼器减振铣刀结构。开展阻尼器模态测试, 确定最优结构设计方案。对内置被动阻尼器减振铣刀进行周向模态测试, 研究减振铣刀在不同方位的动力学特性。选取铝合金和钛合金工件材料, 开展多组切削参数组合下的切削实验测试。在铝合金切削时, 减振铣刀的加工噪声、切削力和表面粗糙度比无阻尼铣刀平均下降了 52.1%, 49.5% 和 73.4%; 在钛合金全槽铣削时, 能够在无阻尼铣刀出现明显颤振的切削条件下实现平稳切削。

**关键词** 减振铣刀; 被动阻尼器; 模态测试; 切削实验

**中图分类号** TH212; TH213.3

## 引言

切削颤振导致切削效率、零件表面精度和刀具寿命降低。在深腔、深孔零件加工过程中, 大长径比铣削刀具由于刚性不足, 极易引发颤振。设计基于内置被动阻尼器的减振铣刀, 可以有效提升铣刀动态特性, 从而提升切削稳定性。

Tobias<sup>[1]</sup> 经过研究发现导致切削颤振发生的主要原因是切削过程中的再生作用, 并由此提出了再生颤振理论。Dai 等<sup>[2]</sup> 研发了一种长径比接近 10 的碳纤维环氧旋转镗杆。Ziegert 等<sup>[3]</sup> 根据库伦摩擦原理, 研究出一种阻尼铣刀, 临界稳定切削深度提高 53%。Hahn 等<sup>[4]</sup> 使用 Lanchester 阻尼器来减小镗杆在工件加工时产生的振动。吴石等<sup>[5]</sup> 基于球形支持向量机分类器对平稳铣削、颤振孕育和颤振发生进行识别, 识别准确率达 98.0%。Liu 等<sup>[6]</sup> 提出一种约束层阻尼刀柄, 其动刚度和临界轴向深度比传统的钢合金单体刀架高 6 倍。山特维克公司通过在镗杆内部安装高密度硬质合金质量块增加镗杆刚度来减小振动。被动阻尼器抑振频带窄, 需要对其设计参数进行精确设计方能达到最优减振效果。Zuo 等<sup>[7]</sup> 基于  $H_2$  和  $H_\infty$  准则, 发现两自由度被动阻尼器的减振效果比两重单自由度被动阻尼器的减振

效果更加明显。Yang 等<sup>[8]</sup> 研究了各优化准则下不同阻尼器的抑振性能, 实现了单自由度被动阻尼器抑制车削颤振。

笔者先后开展了两自由度阻尼器建模及参数优化<sup>[9]</sup>, 基于两自由度阻尼器的减振铣刀设计<sup>[10]</sup>, 在上述工作基础之上, 重点进行减振铣刀实验测试工作。首先, 开展减振铣刀结构优化设计以及内置被动阻尼器模态测试; 其次, 对所设计减振铣刀进行周向模态测试, 研究其在不同方位动态响应, 分析减振性能; 最后, 通过对比多组切削参数组合下的铝合金和钛合金切削实验, 验证减振铣刀在实际铣削加工时的减振性能。

## 1 减振铣刀设计

减振铣刀具体结构设计方案如图 1 所示。其中, 3 段刀杆之间采用螺纹加锥面配合, 以增加铣刀的同轴度; 内置阻尼器的端盖直径略小于刀杆内壁直径, 安装时通过旋入螺钉使端盖胀开, 将阻尼器固定在刀杆内部; 质量块为钨。

笔者拟设计长径比为 7.8 的减振刀具, 刀杆直径为 40 mm。根据有限元仿真, 该刀具具备明显的弯曲振动模态, 可简化为单自由度结构。内置阻尼器后, 与其共同组成两自由度系统, 如图 2 所示。

\* 国家自然科学基金资助项目(51675032); 国家科技重大专项资助项目(2014ZX04012013); 中央高校基本科研业务费资助项目(YWF-18-BJ-Y-34)

收稿日期: 2018-02-24; 修回日期: 2018-05-12

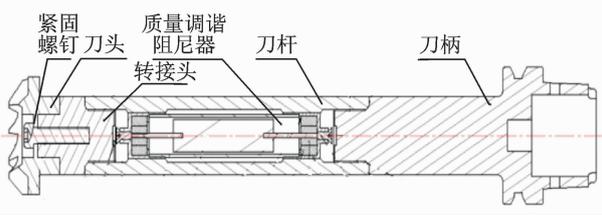


图 1 减振铣刀剖视图

Fig. 1 Section view of the damped cutter

通过引入表 1 中的无量纲参数,主结构  $m_0$  的频率响应函数可表示为

$$\frac{X_0}{F_0} = \frac{1}{k_0} \Phi_0(\beta) = \frac{1}{k_0} (G_0(\beta) + jH_0(\beta)) \quad (1)$$

其中

$$G_0(\beta) = \frac{(\beta_T^2 - \beta^2)((1 - \beta^2)(\beta_T^2 - \beta^2) - \mu\beta_T^2\beta^2) + 4\xi_T^2\beta_T^2\beta^2(1 - \beta^2 - \mu\beta^2)}{((1 - \beta^2)(\beta_T^2 - \beta^2) - \mu\beta_T^2\beta^2 - 4\xi_0\xi_T\beta_T\beta^2)^2 + 4(\xi_T\beta_T\beta(1 - \beta^2 - \mu\beta^2) + \xi_0\beta(\beta_T^2 - \beta^2))^2} \quad (2)$$

$$H_0(\beta) = \frac{2\xi_T\beta_T\beta(\mu\beta^2(\beta_T^2 - \beta^2) - \mu\beta_T^2 - 4\xi_0\xi_T\beta_T\beta^2) - 2\xi_0\beta(\beta_T^2 - \beta^2)^2}{((1 - \beta^2)(\beta_T^2 - \beta^2) - \mu\beta_T^2\beta^2 - 4\xi_0\xi_T\beta_T\beta^2)^2 + 4(\xi_T\beta_T\beta(1 - \beta^2 - \mu\beta^2) + \xi_0\beta(\beta_T^2 - \beta^2))^2} \quad (3)$$

表 1 无量纲参数

Tab. 1 Non-dimensional parameters

质量比	频率比	阻尼比	固有频率
$\mu = \frac{m_T}{m_0}$	$\beta = \frac{\omega}{\omega_0}$	$\xi_0 = \frac{c_0}{2\sqrt{k_0 m_0}}$	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_0}{m_0}}$
	$\beta_T = \frac{\omega_T}{\omega_0}$	$\xi_T = \frac{c_T}{2\sqrt{k_T m_T}}$	$\omega_T = \sqrt{\frac{k_T}{m_T}}$

减振铣刀的减振性能主要取决于阻尼器的频率及阻尼比。基于等峰值法优化方法,实现减振铣刀设计参数的优化。由锤击实验可得无阻尼铣刀的主要模态固有频率为 250 Hz,阻尼比为 1.86%。当  $\mu=2.5\%$  时,通过在 Matlab 中数值寻优可得出阻尼器最优频率比  $\beta_T=0.96$  与阻尼比  $\xi_T=9.85\%$ 。安装阻尼器后,目标模态被分离为幅值相等的两个峰,频响函数幅值下降 74.70%,如图 3 所示。

## 2 模态测试

模态测试采用 PCB 086C03 力锤、KISTLER 8778A500 加速度计和 NI9233 信号采集卡,数据采集和分析软件为 CutPro V9.3,采用苏测 LX-A 邵氏橡塑硬度计测定阻尼单元的硬度。

### 2.1 内置被动阻尼器模态测试

将 5 种不同材料丁腈橡胶(NBR)、硅橡胶(Q)、

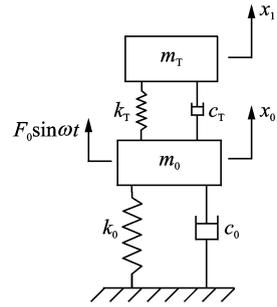


图 2 单自由度被动阻尼器动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of passive damper with single degree of freedom

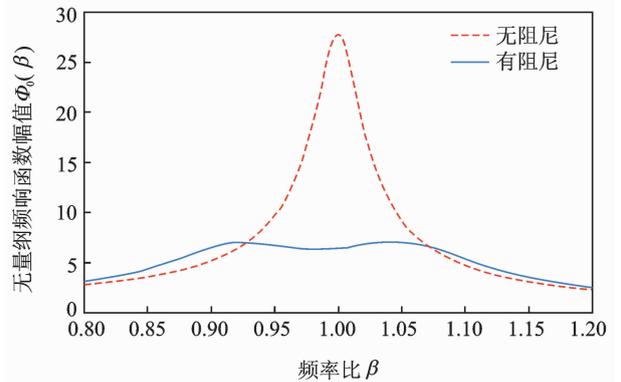


图 3 有阻尼及无阻尼频响函数对比 ( $\mu=2.5\%$ ,  $\xi_0=1.86\%$ ,  $k_0=1$ )

Fig. 3 Comparison of frequency response function before and after damping ( $\mu=2.5\%$ ,  $\xi_0=1.86\%$ ,  $k_0=1$ )

软聚氨酯(SPU)、硬聚氨酯(HPU)和聚酰胺树脂(PA)(见图 4)的阻尼单元装入阻尼器,进行模态测试,如图 5 所示。辨识后的动力学参数如表 2 所示。

表 2 阻尼器参数辨识

Tab. 2 Parameters of the embedded dampers

材料	硬度/HA	频率/Hz	阻尼比/%
NBR	50	243	2.58
Q	55	185	4.05
SPU	73	235	5.65
HPU	83	240	7.97
PA	>90	299	1.20

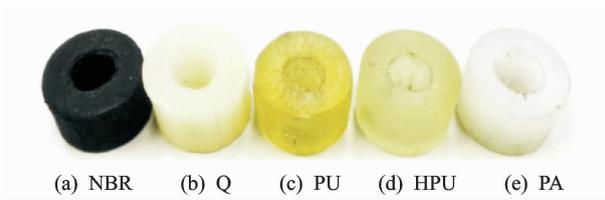


图 4 阻尼单元材料

Fig. 4 Materials of the damping element

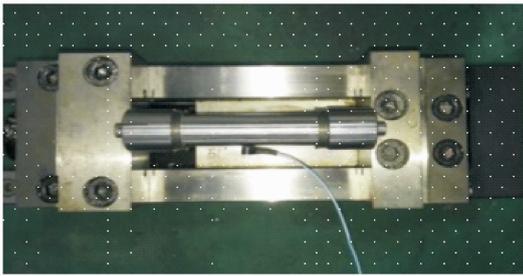


图 5 阻尼器模态测试

Fig. 5 Modal tests of the embedded damper

由表 2 可得,在 50 ~ 83 Hz 之间阻尼器的阻尼比与阻尼材料的硬度成正比,但阻尼材料的硬度太高会导致其弹性大大降低。PA 的硬度值超过 90 HA 导致其阻尼比仅有 1.20%,装有 Q 阻尼单元的阻尼器频率与最佳频率 240 Hz 相差太大,因此 Q 与 PA 均不适合作为阻尼材料。将分别装有 NBR,SPU 和 HPU 的阻尼器装入刀杆中进行减振铣刀模态测试。

### 2.2 减振铣刀模态实验

测试无阻尼铣刀和分别装有 NBR,SPU,HPU 这 3 种阻尼材料减振铣刀的刀尖频响函数,如图 6 所示。由于铣削加工时刀具高速旋转,铣削力会沿各个方向对刀具产生冲击,因此需要通过锤击实验来测量铣刀 0°~150° 的 6 组方向的频响函数,如图 7 所示。

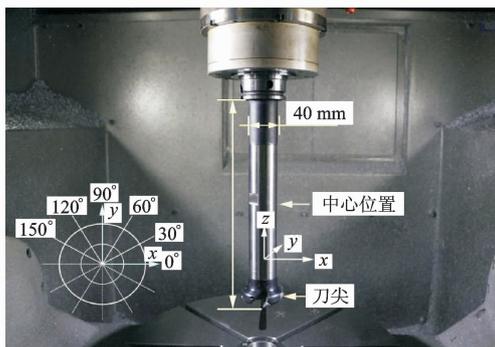
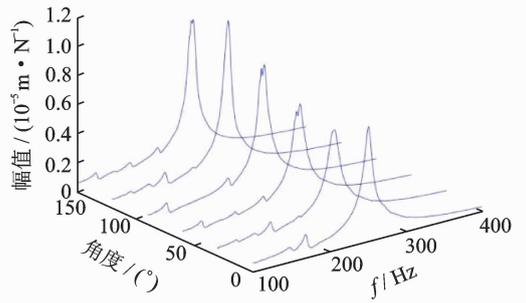


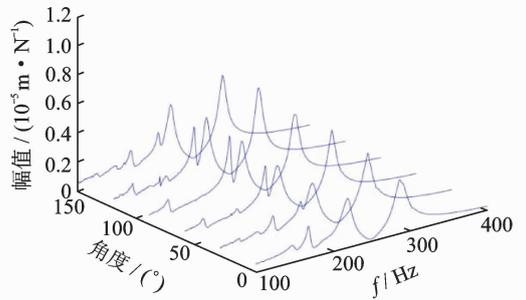
图 6 减振铣刀实验装置

Fig. 6 Experimental setup of the milling cutter



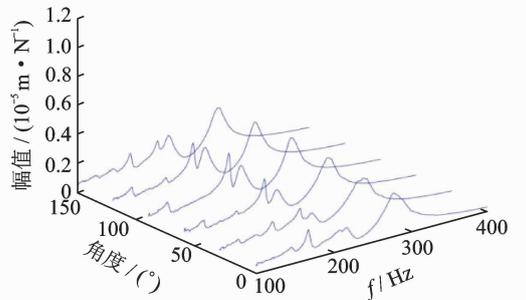
(a) 无阻尼铣刀

(a) The undamped milling cutter



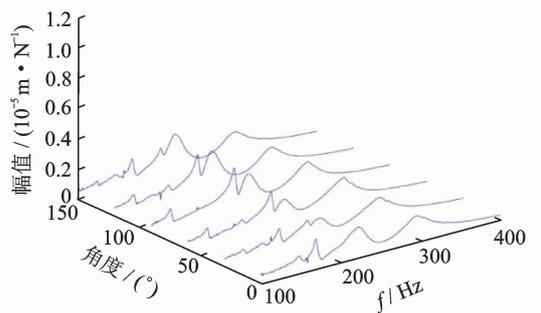
(b) NBR 减振铣刀

(b) The damped cutter equipped with NBR



(c) SPU 减振铣刀

(c) The damped cutter equipped with SPU



(d) HPU 减振铣刀

(d) The damped cutter equipped with HPU

图 7 无阻尼铣刀与 3 种不同阻尼材料的减振铣刀不同方向频响函数对比

Fig. 7 FRFs of the undamped and damped cutters with different damping elements at different orientations

对比发现,笔者设计的减振铣刀在各个方向均

有显著的减振效果,其中 HPU 减振铣刀减振效果最优。3 种减振铣刀频响函数幅值最大的方向与无阻尼铣刀相同,为  $120^\circ$  方向,幅值最低处为  $30^\circ$  方向。相比于无阻尼铣刀,HPU 减振铣刀在  $120^\circ$  和  $30^\circ$  方向的频响函数幅值分别降低 75.7% 和 75.2%,等效刚度提升 109% 和 145%,阻尼比提高 107% 和 179%,这表明阻尼器在各个方向都有稳定的抑振作用。

### 2.3 与 SANDVIK 铣刀对比

由于 SANDVIK Silent Tool 铣刀规格有限,笔者选择长径比约为 7.2 的 SANDVIK Silent Tool 铣刀进行对比。该铣刀刀柄、减振刀杆和刀头型号分别为 C5-390.410-63090C, C5-391.05CD-22 220 和 R245-050 Q22-12M。SANDVIK 铣刀的频响函数响应在不同的方向差别较大,但幅值都较低,见图 8。由于刀具的整体性能由动态参数最差的方向决定,因此选择 SANDVIK 铣刀在  $0^\circ$  方向的频响函数曲线进行分析,对其频响函数进行参数辨识,并与笔者设计的内置 HPU 阻尼减振铣刀进行参数辨识对比,如表 3 所示。

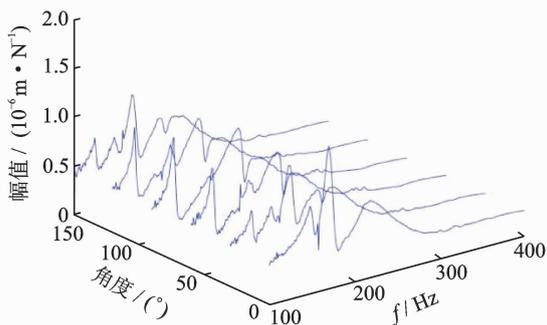


图 8 SANDVIK 铣刀频响函数

Fig. 8 FRF of SANDVIK milling cutter

表 3 铣刀模态参数辨识对比

Tab. 3 Comparison of modal parameter identification

铣刀	$f/\text{Hz}$	幅值/ ( $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{N}^{-1}$ )	等效刚度/ ( $10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	阻尼比/ %
SANDVIK 铣刀	150	0.89	29.80	2.37
	170	1.46	13.60	2.47
	216	0.77	13.30	6.86
HPU 减振铣刀	220	2.59	5.36	3.73
	296	1.80	6.30	5.03

由表 3 可知, SANDVIK 铣刀在各阶固有频率都具有较高的刚度,同时,在第 3 阶固有频率处有较高的阻尼比。SANDVIK 铣刀第 1 阶模态的阻尼比

低于减振铣刀,而第 2 阶模态的阻尼比高于减振铣刀。总体来说,笔者设计减振铣刀与 SANDVIK 铣刀的阻尼比接近。减振铣刀的频响函数幅值低于 SANDVIK 铣刀,这是因为笔者设计的减振铣刀的平均直径为 40 mm,略小于 SANDVIK 铣刀的平均直径 45 mm; SANDVIK 铣刀的质量为 5.2 kg,而笔者设计的减振铣刀为 3.3 kg;此外, SANDVIK 铣刀每段刀杆之间为固连,刚性优于减振铣刀。因此,笔者设计的减振铣刀仍存在提升空间。

## 3 切削实验

### 3.1 铝合金切削实验

选取切宽  $a_e=50 \text{ mm}$ ,切深  $a_p=0.5 \text{ mm}$ ,主轴转速  $n=2000 \text{ r/min}$ ,无阻尼铣刀与减振铣刀的切削实验结果对比如图 9 所示。

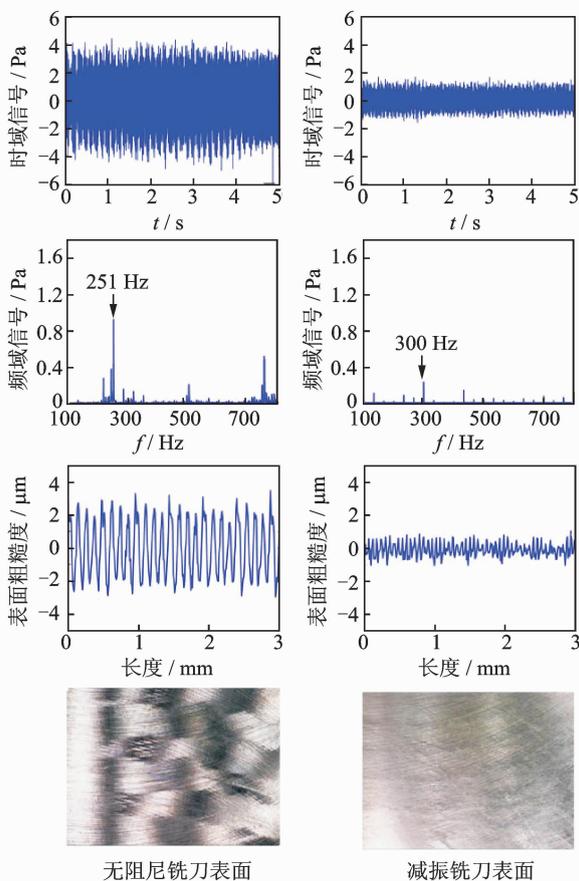


图 9 无阻尼与减振铣刀切削实验对比

Fig. 9 Machining comparison of the undamped and damped cutter

无阻尼铣刀加工过程中噪音幅值为 4 Pa,工件表面粗糙度值为  $1.34 \mu\text{m}$ ,频域信号最大谐波分量

在 251 Hz 处(刀具固有频率为 250 Hz),因此无阻尼铣刀切削过程产生颤振。

同样切削参数下的减振铣刀切削加工过程的噪声幅值为 1.5 Pa,仅为无阻尼铣刀的 37.5%。此时工件表面较为光滑,工件表面粗糙度值为 0.38 μm,相比于无阻尼铣刀降低了 71%。减振铣刀频域信号幅值较低,其最大值为 300 Hz,此时刀齿切削频率为 33.3 Hz,因此 300 Hz 为刀齿倍频,属于平稳切削。综合以上实验结果对比可以得出,安装 HPU 阻尼器后减振铣刀的性能得到较大提升,减振效果非常明显。

为进一步检验减振铣刀在实际切削加工中的减振性能,选取 4 组不同的切削参数组合(见表 4)进行铝合金槽铣加工,分别与无阻尼铣刀进行对比。结果表明,减振铣刀在不同的切削参数组合下均有明显的减振效果,其中对比无阻尼铣刀,减振铣刀的加工噪声幅值、切削力幅值和表面粗糙度平均下降了 52.1%,49.5%和 73.4%,如表 5 所示。

表 4 切削参数组合

Tab. 4 Configurations of milling parameters

组合	主轴转速/ (kr · min <sup>-1</sup> )	切深/ mm	进给/ (mm · min <sup>-1</sup> )
1	5	1.2	500
2	6	1.2	600
3	7	2.0	700
4	8	2.0	800

表 5 加工结果对比

Tab. 5 Comparison of machining results %

组合	噪声降低 比值	切削力降低 比值	粗糙度降低 比值
1	54.5	53.3	67.7
2	52.2	51.1	72.4
3	50.0	46.7	72.7
4	51.7	47.0	80.9
平均值	52.1	49.5	73.4

以切削参数组合 4 为例,此时切削线速度为  $v_c = 1\ 256$  m/min,无阻尼铣刀和减振铣刀的实验结果对比如图 10 所示。

由图 10 可知,无阻尼铣刀与减振铣刀加工噪声平均幅值分别为 29 和 14 Pa,无阻尼铣刀与减振铣刀  $x$  方向切削力平均峰值分别为 1 170 和 620 N,无阻尼铣刀与减振铣刀加工零件的表面粗糙度分别

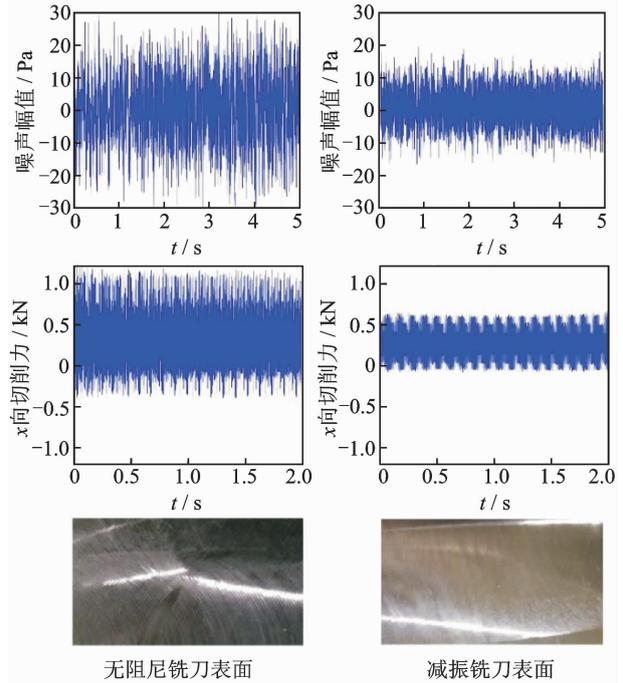


图 10 铝合金切削参数组合 4 结果对比

Fig. 10 Comparison of aluminum alloy machining parameter 4

为 1.83 和 0.35 μm。通过工件表面照片可以明显看出,减振铣刀加工的工件表面非常光滑,而无阻尼铣刀加工的工件表面有振纹。相比于无阻尼铣刀,减振铣刀的加工噪声幅值、切削力幅值和表面粗糙度分别下降了 51.7%,47.0%和 80.9%。

### 3.2 钛合金切削实验

钛合金切削参数为  $n = 400$  r/min,  $F = 160$  mm/min,  $a_p = 0.4$  mm 时,无阻尼铣刀和减振铣刀的实验结果如图 11 所示。此时无阻尼铣刀已出现颤振,加工零件表面有明显颤纹,且工件表面光洁度较差,而减振铣刀切削过程平稳。无阻尼铣刀与减振铣刀加工噪声平均幅值分别为 24 和 12 Pa,无阻尼铣刀与减振铣刀  $x$  方向切削力平均峰值分别为 830 和 420 N,加工零件的表面粗糙度分别为 2.87 和 0.20 μm。加工噪声幅值、切削力幅值和表面粗糙度分别下降了 50.0%,49.4%和 93.0%。

当  $n = 500$  r/min,  $F = 500$  mm/min,  $a_p = 0.8$  mm 时,减振铣刀依旧切削平稳,没有出现颤振,工件表面光洁度良好。切深  $a_p$  增加到 1.2 mm 时,虽然工件表面出现了细微颤纹,但表面粗糙度仅为 0.43 μm。钛合金切削实验测试表明,相较于无阻尼铣刀,减振铣刀的钛合金切削性能得到了较大的提高,减振效果明显且稳定可靠。

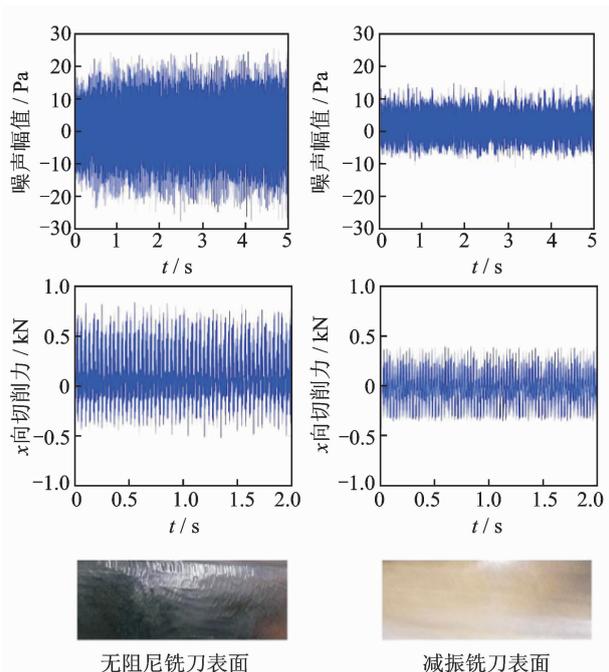


图 11 钛合金切削实验结果对比

Fig. 11 Comparison of titanium alloy machining

## 4 结 论

1) 装有硬聚氨酯的减振铣刀具有最佳减振效果。相比无阻尼铣刀,减振铣刀在各个方位均有稳定的抑振作用。其中,刀尖频响函数峰值在  $120^\circ$  和  $30^\circ$  方向分别下降了 76% 和 83%,等效刚度提升了 109% 和 145%,阻尼比提高了 107% 和 179%。

2) 与 SANDVIK 铣刀动力学特性对比表明,笔者设计的减振铣刀长径比略高,阻尼比接近,但刚度略低。原因在于质量仅为其 63%,而且各部分之间的螺纹连接导致刚性下降。

3) 铝合金切削实验表明,减振铣刀在不同的切削参数组合下均有明显的减振效果,性能稳定可靠。对比无阻尼铣刀,减振铣刀的加工噪声幅值、切削力幅值和表面粗糙度平均下降了 52%, 50% 和 73%。

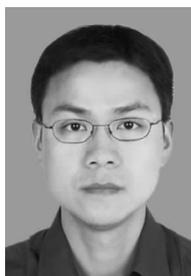
4) 钛合金槽铣切削实验表明,无阻尼铣刀在切深只有 0.4 mm 时发生颤振,而减振铣刀在切深 1.2 mm 时可平稳切削。

## 参 考 文 献

- [1] Tobias S A. Machine tool vibration [M]. Glasgow : Blackie and Sons Ltd. , 1965:1-30.
- [2] Dai G L, Hui Y H, Jin K K. Design and manufacture of a carbon fiber epoxy rotating boring bar[J]. Com-

posite Structure, 2003, 60(1):115-124.

- [3] Ziegert J C, Stanislaus C, Schmitz T L, et al. Enhanced damping in long slender end mills [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2006, 8(1):39-46.
- [4] Hahn R S. Design of lanchester damper for elimination of metal-cutting chatter [J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1951, 73 (3): 331-335.
- [5] 吴石,刘献礼,肖飞. 铣削颤振过程中的振动非线性特征试验[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(6):935-940. Wu Shi, Liu Xianli, Xiao Fei. Experimental study of the nonlinear characteristics of vibration in milling Chatter[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2012,32(6):935-940. (in Chinese)
- [6] Liu Yang, Liu Zhanqiang. Development of constrained layer damping toolholder to improve chatter stability in end milling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016,12 (117):299-308.
- [7] Zuo L, Samir A. The two-degree-of-freedom tuned-mass damper for suppression of single-mode vibration under random and harmonic excitation [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2006, 128: 56-65.
- [8] Yang Yiqing, Liu Qiang, Wang Min. Optimization of the tuned mass damper for chatter suppression in turning[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(6):717-724.
- [9] 杨毅青,代巍. 两自由度被动阻尼器设计及数控加工应用[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(10): 2653-2658. Yang Yiqing, Dai Wei. Design and machining application of two-degree-of-freedom passive damper [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(10):2653-2658. (in Chinese)
- [10] 杨毅青,余玉. 基于两自由度被动阻尼器的减振铣刀设计[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22 (11): 2588-2593. Yang Yiqing, Yu Yu. Design of damped milling cutter based on two-DOF passive damper[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22 (11): 2588-2593. (in Chinese)



第一作者简介:杨毅青,男,1983年4月生,博士、副教授。主要研究方向为先进数控加工技术与装备、新型减振与吸能技术。曾发表《基于电磁感应原理的薄壁件铣削振动抑制》(《振动、测试与诊断》2015年第35卷第3期)等论文。

E-mail: yyiqing@buaa.edu.cn

