

文章编号:1006-9941(2020)02-0151-06

# PBX炸药模拟材料正交切削的切削力响应规律

谢凤英,张中伟,黄交虎,刘 维,肖才伟

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为了分析炸药材料切削加工过程中切削力响应规律及加工特性,采用低速正交切削试验的方法,结合显微摄像、三向测力仪和三维表面轮廓仪表征测试,分析高聚物粘结炸药(PBX)炸药模拟材料瞬时切削力特性,研究PBX炸药模拟材料的切削过程中切削力响应规律及其关键影响因素。结果表明,不同的切削深度PBX炸药模拟材料的动态切削力变化规律不同,切深为0.1 mm时的切削力峰值变化主要由颗粒切屑成型引起,切屑呈蜷曲喷射状,切削力曲线呈微细锯齿状动态特征变化,切深为0.3 mm和0.5 mm时的切削力峰值主要由材料脆性断裂裂纹扩展引起,切削力呈周期性的大锯齿特性变化, $f_x$ 在过切凹坑处降至零。 $f_x$ 标准偏差在0.4 mm切深处产生显著变化,反映了炸药模拟材料切削状态由连续去除到脆性去除的转变。低速正交切削下,切削宽度对切削力影响大于切削速度对切削力的影响,切削速度对切削力的影响较小。

**关键词:** 炸药模拟材料;正交切削;瞬时切削力;切削深度;切削力响应

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2019030

## 1 引言

高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)作为武器系统爆轰和毁伤能量的关键材料,需要通过切削加工成结构部件。PBX炸药材料在切削加工过程中,切削刀具作用在炸药材料上的切削力直接影响切削过程的安全性,对炸药部件的加工质量、表面完整性及综合性能具有重要影响<sup>[1]</sup>。PBX炸药材料是一种颗粒高度填充的非均质、多相复合材料,密度和抗拉强度远远低于常见金属<sup>[2]</sup>,其切削去除过程明显区别于金属材料和其他颗粒填充复合材料。为了准确获取炸药材料加工切削力及其响应规律,提升对PBX炸药材料切削过程中材料断裂去除的认识,有必要开展PBX炸药材料切削过程的微观过程动态切削力变化规律分析和研

究,提升炸药材料切削过程的加工安全性和机理认知。

监测切削力是目前国内外研究与应用最多也是最有效的分析材料切削加工过程特性的方法之一<sup>[3]</sup>,20世纪80年代,唐新初<sup>[4]</sup>开展了炸药切削力的动态测试与研究,获得了主切削力数据。随着测试技术的发展及其精度的提升,逐渐出现炸药切削加工三向切削力研究。谢印国<sup>[5]</sup>研制了适用于高能材料切削加工的切削力测试系统,实现了高能炸药材料三向切削力的测试。刘维等<sup>[6]</sup>开展了三向石英压电式测力仪在炸药切削中的应用研究,为炸药切削过程的动态监测、切削力的数值模拟与预测研究提供实验条件<sup>[7-9]</sup>。上述关于PBX炸药材料的切削力测试研究主要针对切削加工过程的安全性问题来进行切削力获取和分析,未能通过切削去除过程微观领域分析切削力大小及其动态变化规律,来分析炸药材料加工的切削去除过程,缺乏对炸药材料在瞬时去除过程中断裂过程和表面形成机理的认识。

PBX炸药模拟材料具有非爆炸安全特点及其与PBX炸药材料相似的切削加工特性,广泛应用于替代炸药材料开展切削加工相关研究<sup>[10-12]</sup>。为了保证研究过程的安全,本研究以PBX炸药模拟材料为研究对象,采用低速正交切削试验方法,结合显微摄像装置、三向测力仪和三维表面轮廓仪联合表征测试,研究了

收稿日期: 2019-02-01; 修回日期: 2019-04-26

网络出版日期: 2019-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51505441), 国家科技重大专项(2017ZX04011001)

作者简介: 谢凤英(1986-),女,工程师,主要从事炸药材料切削加工技术研究。e-mail: xiefengying@caep.cn

通信联系人: 肖才伟(1984-),男,高级工程师,主要从事炸药材料精密加工技术研究。e-mail: xiaocaiwei@caep.cn

引用本文: 谢凤英,张中伟,黄交虎,等. PBX炸药模拟材料正交切削的切削力响应规律[J]. 含能材料,2020,28(2):151-156.

XIE Feng-ying, ZHANG Zhong-wei, HUANG Jiao-hu, et al. Cutting Force Response of Orthogonal Cutting of Polymer Bonded Explosive Simulants[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(2): 151-156.

PBX炸药模拟材料在低速正交切削过程中的切削力响应特征和变化规律,从切削力动态变化的角度分析切削断裂过程,为炸药及其模拟材料切削加工表面成型特性分析提供理论基础,对认识炸药切削机理及其切削加工安全性具有重要意义。

## 2 实验部分

### 2.1 材料与仪器

**材料:** PBX炸药模拟材料,用于模拟 HMX 基 PBX 的切削加工性能,由中物院化工材料研究所提供,炸药模拟晶体颗粒质量占比约为 95%。

**仪器:** 三轴加工中心, KISTLER 三向测力仪, NANOVEA PS50 三维光学轮廓仪。显微摄像装置由 GC-P100 型摄像机和上海长方光学仪器的 ZOOM-650E 型体式显微镜组装构成。刀具采用刀尖角为  $60^\circ$  的三角形刀片,前角  $10^\circ$ ,后角  $11^\circ$ ,刀具材料为硬质合金。

### 2.2 实验方法

切削实验采用刀具固定、工件随工作台运动的正交切削方式,摄像装置透过体式显微镜实时记录放大后的切削区域工件材料在刀具作用下去除情况,测力仪同步记录材料去除过程的瞬时切削力,正交切削试验装置组成如图 1 所示。结合炸药材料切削加工的工艺过程特点<sup>[7]</sup>,工件通过预先制样加工后采用专用压板进行固定,并通过百分表找正调平,保证工件切削表面水平,选取表 1 所示的正交切削试验参数,在干切削状态下工作台沿 x 方向运动,进行切削表面加工,采用光学轮廓仪对正交切削表面进行三维表征。

### 2.3 数据处理方法

经三向测力仪测试获得的实时切削力  $f_i$  是有方向的动态力信号。按照公式(1)计算平均切削力  $f_{ave}$ ,公式(2)计算最大切削力  $f_{max}$ ,公式(3)计算切削力的标准偏差  $f_{stdev}$ ,公式(4)计算最大切削力与平均切削力的比值  $R$ 。

$$f_{ave} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n f_i \right|}{n} \quad (1)$$

表 1 炸药模拟材料正交切削试验参数

Table 1 Cutting parameters of orthogonal cutting of explosive simulants

No.	H / mm	W / mm	v / mm · min <sup>-1</sup>
1	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.8	0.5	50
2	0.1, 0.3, 0.5	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	50
3	0.1, 0.3, 0.5	0.5	50, 100, 150, 200

Note: H is the cutting depth, W is the cutting width, v is the cutting speed.

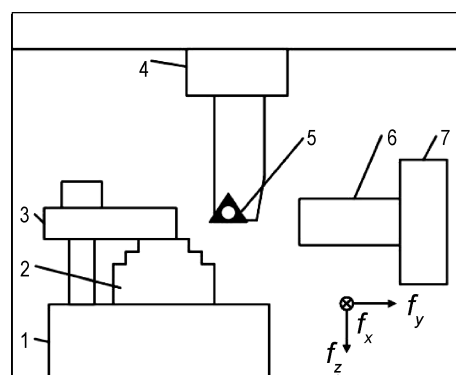


图 1 正交切削试验装置示意图

1—测力仪, 2—工件, 3—压板, 4—机床刀柄, 5—刀具, 6—体式显微镜, 7—摄像机

Fig. 1 Schematic of orthogonal cutting experiment system  
1—dynamometer, 2—workpiece, 3—platen, 4—tool shank, 5—cutting tool, 6—stereomicroscope, 7—camera

$$f_{max} = \max(|f_1|, |f_2|, \dots, |f_n|) \quad (2)$$

$$f_{stdev} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( f_i - \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n} \right)^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$R = \frac{f_{max}}{f_{ave}} \quad (4)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 典型切削过程的瞬时切削力特性分析

炸药模拟材料的切削表面成型过程受切削深度影响显著,在不同切深范围内的瞬时切削力动态变化曲线如图 2 所示。由图 2 可见,当切深为 0.1 mm(图 2a)时,切削力曲线表现较为平稳,切屑呈蜷曲喷射状,具有连续细小锯齿状特性,这表明该过程极少有较大的脆性断裂现象发生,切削力曲线中的小波峰主要由 PBX 模拟材料组分中晶体颗粒切屑生成引起;由图 2b 和图 2c 可见,随着切深的增加,瞬时切削力曲线上波峰与波谷较为明显,切削力曲线具有明显大锯齿状特性。当

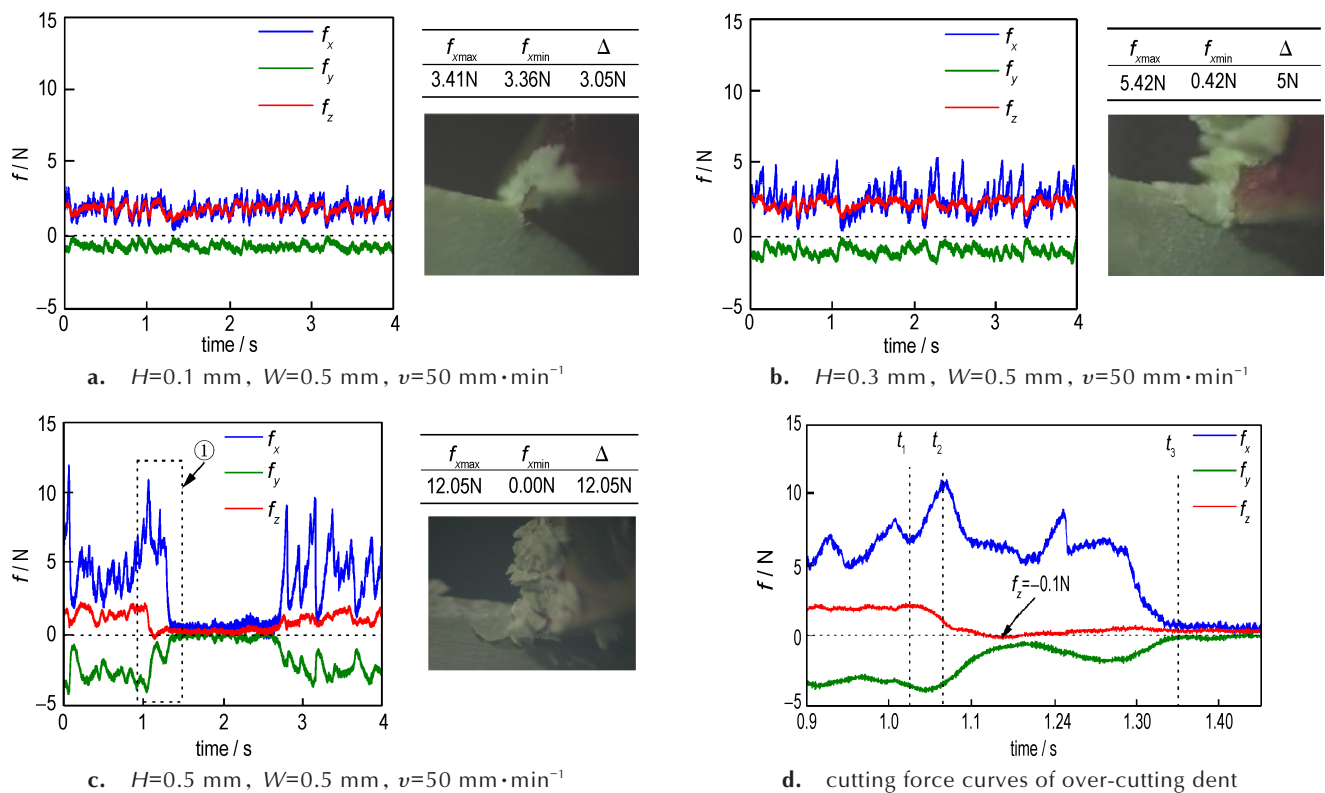


图2 炸药模拟材料典型切削过程的切削力曲线

Fig.2 Cutting force curves of typical cutting process of explosive simulants

切深为 0.3 mm 时,切削力发生周期性变化,PBX 模拟材料在切削区发生明显的周期性断裂,裂纹失稳扩展时形成周期峰值,断裂裂纹由刀尖延伸至待加工表面。切屑剥落后,刀具前方的实际切削深度明显减小,形成连续切削过程,实际切深逐渐增大,切削力曲线变为小锯齿状,当切深增大到一定范围时又发生脆性断裂去除过程,进而周期性的交替以“名义切深”与“实际切深”切削去除。由图 2c 可见,当切深为 0.5 mm 时,切削力波动幅值显著增加,形成明显的脆性断裂去除过程。切深从 0.3 mm 增至 0.5 mm 时,水平分力  $f_x$  的波动幅值从 5.0 N 增至 12.05 N,垂直分力  $f_z$  多次减小至零点,这是由于切深增大后,脆性断裂去除产生了过切凹坑,在切削时刀具与材料形成局部接触甚至空切,实际没有材料的切削去除,引起切削力急剧下降的切削过程。

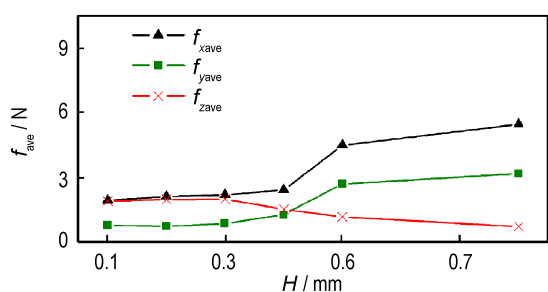
图 2d 为过切凹坑形成时的切削力响应曲线。由图 2d 可见,在时刻  $t_1$  之前,  $f_y$  与  $f_z$  较为平稳,刀具与材料之间应为连续挤压作用,产生粉末与颗粒切屑。而  $f_x$  呈增大趋势,是粉屑压实成核代替刀尖作用,引起的剪切应力集中,压实核的剥落、破裂引起  $f_x$  小幅波动。在时刻  $t_2$ , 断裂裂纹向工件内部扩展至过切深点,  $f_x$  达到最大峰值,  $f_y$  和  $f_z$  逐渐减小,之后切削达到过切深点,刀

具与工件之间仅局部接触,  $f_z$  降至 -0.1 N, 负值可能为切削加工导致的刀具-工件系统的振动作用导致,直至时刻  $t_3$  切屑剥离,实际切除切削深度变为零,不发生材料去除过程,三向切削力均降为零点。

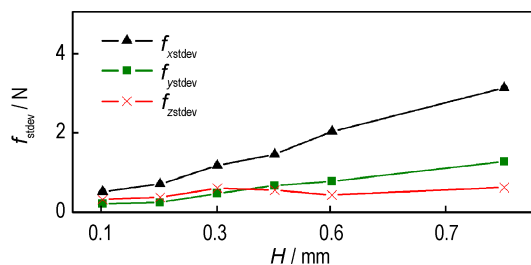
### 3.2 切削参数对切削力响应规律的影响

#### 3.2.1 切削深度的影响

切削力的平均值及其标准偏差随切削深度的变化反映了炸药模拟材料的不同去除过程,如图 3 所示。由图 3a 可见,切深  $\leq 0.3$  mm, 三向分力的平均值随切深的增加缓慢增大,之后随着切深的增加,  $f_x$  与  $f_y$  的平均值上升速率增大,  $f_z$  的平均值逐渐减小。切削力的平均值由波峰、波谷及其分布共同确定,在大切深下,刀具与工件之间空切增多,  $f_z$  为零值和负值的分布增多,使其总体平均值下降。由图 3b 可见,随着切深的增加,炸药模拟材料的脆性去除越发明显,实际切深的交替变化引起切削力幅值的周期性波动,从切削力曲线上体现为切削力标准偏差的变化。对比分析可以发现,三向分力中  $f_x$  的标准偏差对切削状态的变化最为敏感。当切深从 0.1 mm 增至 0.2 mm 时,切削过程从连续挤压去除逐渐产生脆性断裂去除,  $f_x$  的标准偏差从 0.51 N 增大至 0.79 N; 当切深从 0.2 mm 增至 0.3 mm 时,均以实际



a. average of cutting force



b. standard deviation of cutting force

图3 切深对炸药模拟材料切削力的影响 ( $W=0.5\text{ mm}$ ,  $v=50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )

Fig.3 Impact of cutting depth on cutting force of explosive simulants ( $W=0.5\text{ mm}$ ,  $v=50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )

切深不超过名义切深的方式去除为主,  $f_x$  的标准偏差变化较小, 仅从 0.79N 增大至 1.46N; 当切深从 0.4 mm 增至 0.8 mm 时, 切削过程中过切现象逐渐增多,  $f_x$  的标准偏差从 1.46 N 骤增至 3.14 N。切削状态的变化对  $f_y$  与  $f_z$  的标准偏差影响较小, 当切深增加时,  $f_y$  的标准偏差逐渐小幅增大,  $f_z$  的标准偏差值较小, 并且变化幅度也较小。切深变化对主切削力  $f_x$  周期性波动影响较大, 对  $f_y$  的波动影响次之, 对  $f_z$  的波动影响最小。

不同切深下炸药模拟材料切削力最大值与平均值比值  $R$  如表 2 所示, 当切深达到 0.4 mm, 瞬时切削力可以达到平均切削力的 3 倍及以上,  $f_x$  与  $f_y$  的平均值,  $f_x$

表2 不同切深下炸药模拟材料不同方向切削力最大值与平均值比值

Table2 Ratio of maximum value to average value of cutting force of explosive simulants with different directions at different cutting depths

$H/\text{mm}$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
0.1	1.93	1.95	1.46
0.2	2.11	2.19	1.53
0.3	2.70	2.50	1.65
0.4	3.12	2.80	2.13
0.5	2.72	1.73	2.18
0.8	3.24	1.96	4.26

的标准偏差开始剧增,  $f_z$  的平均值开始减小, 切削凹坑缺陷明显, 切削区材料脆性断裂裂纹向工件内部扩展开始增多。综上, 炸药模拟材料切削成型存在一个临界特征切深 0.4 mm, 反映了炸药模拟材料切削状态由连续去除到脆性去除的转变。同时, 在炸药材料进行安全切削加工分析和装夹可靠性分析计算时, 只考虑平均切削力是不全面的甚至是不够合理的, 需要考虑瞬态最大切削力的作用进行炸药材料切削加工过程安全性分析。不同切深下获得的切削表面形貌(图 4)可以验证上述切削过程切削力特性的分析。在切深为 0.1 mm(图 4a)时, 形成表面质量较好, 但由于颗粒切屑的生成和颗粒的拔出, 边缘处有微细崩落; 随着切深的增加, 切削表面开始出现细小的凹坑缺陷; 在中等切深 0.3 mm(图 4b)时, 切削产生的凹坑较少, 说明实际去除深度一般不超过名义切深。对比同样扫面面积下, 0.8 mm 切深下获得的切削表面(图 4c)过切凹坑数量显著增加, 说明超过名义切深的材料去除状态增多, 切削脆性断裂导致切削力的波动必然大于 0.3 mm 切深下切削力的变化。

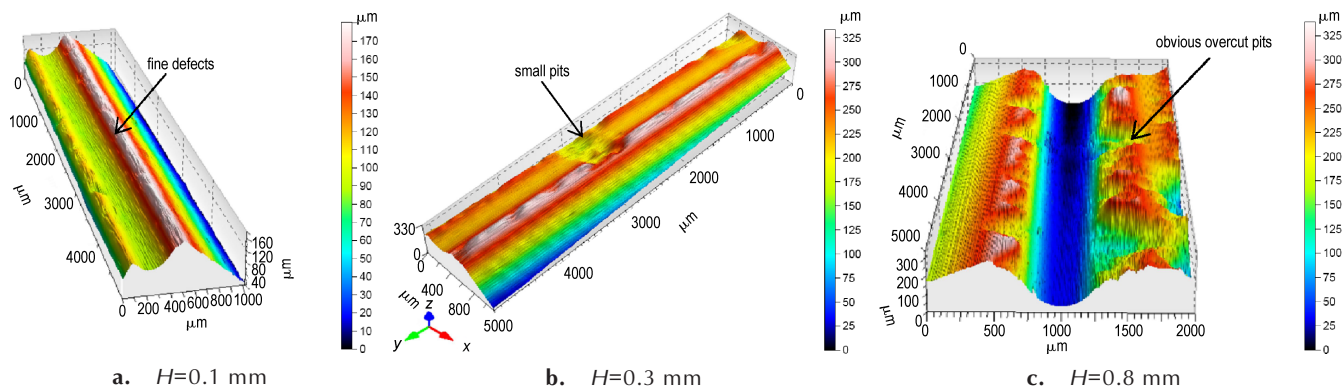


图4 不同切深下炸药模拟材料的切削表面形貌 ( $W=0.5\text{ mm}$ ,  $v=50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )

Fig.4 Impact of cutting depth on cutting surface of explosive simulants ( $W=0.5\text{ mm}$ ,  $v=50\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )

### 3.2.2 切削宽度的影响

切削力变化规律分析表明,切削宽度对炸药模拟材料去除过程的影响与切削深度的变化密切相关,如图 5a 和图 5b 所示。在 0.1 mm 切深下,切削宽度对  $f_x$  的平均值及其标准偏差的影响均较小,在 0.3 mm 及 0.5 mm 切深下,随着切削宽度的增加,  $f_x$  的平均值及其标准偏差均增大。这是由于在 0.1 mm 切深时,脆性断裂去除情况较少,切削宽度的变化对切削力波动的影响相对较小。当切深增大后,切削过程中的脆性断裂逐渐增多,主切削力  $f_x$  波动增加。同时,在切削加工过程中的微裂纹易在有微缺陷和材料损伤的地方产生,实际正交切削试验时,由于材料内部存在的损伤和内部缺陷也使得由于切削宽度的增加导致了裂纹源增多,增大了裂纹成核与扩展的概率,切削力的波动亦会增大。

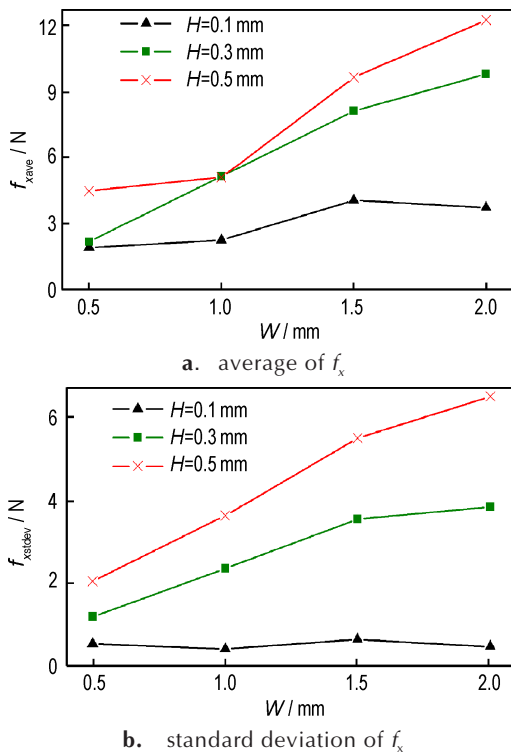


图5 切削宽度对炸药模拟材料切削力的影响( $v=50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )  
Fig.5 Impact of cutting width on cutting force of explosive simulants ( $v=50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )

### 3.2.3 切削速度的影响

如图 6 所示,在试验参数范围内( $v \leq 500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $W \leq 2.0 \text{ mm}$ ),切削速度对炸药模拟材料切削力的影响小于切削宽度。在相同切深下,  $f_x$  的平均值(图 6a)及其标准偏差(图 6b)随切削速度的变化均变化较小,这与金属材料切削力变化规律一致。同时,随着切削速度的增加,切削力平均值及其标准偏差先呈缓慢下降

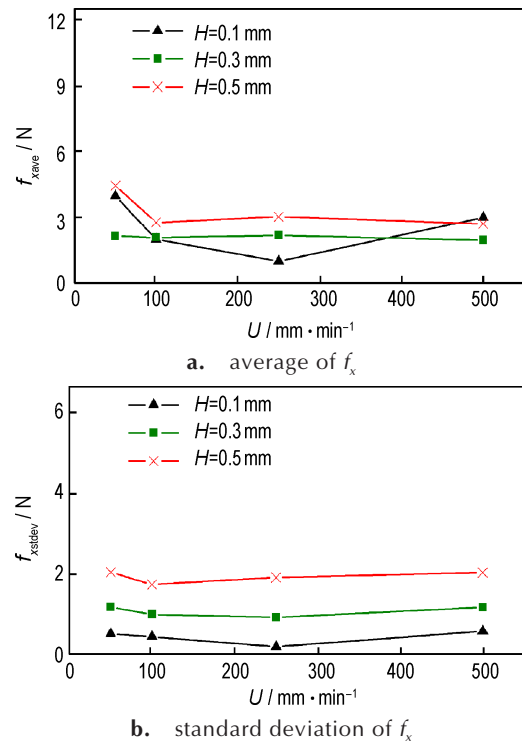


图6 切削速度对炸药模拟材料切削力及表面形貌的影响( $W=0.5 \text{ mm}$ )  
Fig.6 Impact of cutting speed on cutting force and cutting surface of explosive simulants ( $W=0.5 \text{ mm}$ )

然后缓慢上升趋势,可能是随着切削速度的增加也会增加单位时间内摩擦热的产生,一定程度提高了切削过程的切削温度,增强了材料的塑性变形能力。切削速度的进一步增大同时也导致切削断裂区主裂纹失稳扩展时产生分支裂纹数量增多<sup>[12]</sup>,进而引起切削力波动的变化。

然后缓慢上升趋势,可能是随着切削速度的增加也会增加单位时间内摩擦热的产生,一定程度提高了切削过程的切削温度,增强了材料的塑性变形能力。切削速度的进一步增大同时也导致切削断裂区主裂纹失稳扩展时产生分支裂纹数量增多<sup>[12]</sup>,进而引起切削力波动的变化。

## 4 结论

(1)不同的切削深度PBX炸药模拟材料的动态切削力响应的变化规律不同。切深为 0.1 mm 时,切削力曲线呈微细锯齿状动态特征变化,切削力曲线呈微细锯齿状动态特征变化,极少有大的脆性去除和切削凹坑缺陷产生。在切深为 0.3 mm 和 0.5 mm 时,材料切削断裂裂纹失稳扩展产生周期性,切削力呈周期性的大锯齿状特性变化,切削至凹坑缺陷处  $f_x$  降至 0。

(2)由颗粒高度填充的非均质多相复合的PBX炸药模拟材料切削成型存在临界特征切深 0.4 mm,切削状态由连续去除到脆性去除转变的切削深度,导致切削过程中产生凹坑缺陷明显,切削区材料脆性断裂裂纹向工件内部扩展开始增多。

(3)在切深为0.1 mm时,切削加工形成表面质量较好,表面光洁完整,只存在少量颗粒拔出和切削边缘微细崩落。随着切深的增加,切削表面开始出现细小的凹坑缺陷,逐渐出现数量较多的过切凹坑缺陷。切削速度与切削宽度通过影响裂纹形成与扩展影响材料的去除过程,对切削力的影响与切削深度密切相关。

(4)从瞬时动态切削力的角度阐释炸药模拟材料的切削断裂变化过程,炸药材料进行安全切削加工分析和装夹可靠性分析计算时,只考虑平均切削力是不全面的甚至是不够合理的,需要考虑瞬态最大切削力的作用进行炸药材料切削加工过程安全性分析。

#### 参考文献:

- [1] 柏平, 邹刚, 黄交虎. 影响炸药件机械加工质量的因素[C]//2002年火炸药技术及钝感弹药学术研讨会, 绵阳, 2002: 711-714.
- [2] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 72-76.
- [3] Totis G, Sortino M. Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(1): 34-42.
- [4] 唐新初. 炸药机加安全试验[J]. 火炸药, 1985(1): 38-40. TANG Xin-chu. The safety experiment of explosive machining [J]. *Explosives & Propellants*, 1985(1): 38-40.
- [5] 谢印国, 张军, 孙宝元. 高能材料切削力测试系统的研制[J]. 压电与声光, 2008, 30(6): 769-775. XIE Yin-guo, ZHANG Jun, SUN Bao-yuan. Research on the testing system about the HEM cutting force [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2008, 30(6): 769-775.
- [6] 刘维, 柏平, 黄交虎. 切削测力仪和测温仪在炸药切削中的应用[C]//绵阳: 中国工程物理研究院科技年报, 2002.
- [7] 何铁宁, 成伟, 康仲礼. 炸药切削过程中切削力的数值模拟方法研究[J]. 火工品, 2005(3): 22-29. HE Tie-ning, CHENG Wei, KANG Zhong-li. The research of cutting force simulation in the course of explosive cutting [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2005(3): 22-29.
- [8] 张丘, 黄交虎. 炸药切削数值模拟研究[J]. 含能材料, 2009, 17(5): 583-587. ZHANG Qiu, HUANG Jiao-hu. Numerical simulation of explosive machining [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(5): 583-587.
- [9] 谢凤英, 张丘, 刘维, 等. 炸药模拟材料切削表面成型特征的研究[J]. 火炸药学报, 2015, 38(4): 45-50. XIE Feng-ying, ZHANG Qiu, LIU Wei, et al. An experimental research on cutting formation of explosive simulants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2015, 38(4): 45-50.
- [10] 唐维, 魏智勇, 黄交虎, 等. 高聚物粘结炸药模拟材料的超声振动切削试验研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 31-35. TANG Wei, WEI Zhi-yong, HUANG Jiao-hu, et al. An experimental study on ultrasonic vibration cutting for polymer bonded explosive simulants [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(1): 33-38.
- [11] 罗景润. PBX的损伤、断裂及本构关系研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2001.
- [12] 梁增友, 黄风雷, 段卓平, 等. PBX炸药及其模拟材料冲击损伤的试验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(1): 131-134. LIANG Zeng-you, HUANG Feng-lei, DUAN Zhuo-ping, et al. Experiment study on impact damage of PBX explosive and simulation material [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(1): 131-134.
- [13] 周莉. 高性能石墨铣削加工研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
- [14] Chan K C, Cheung C F, Ramesh M V. A theoretical and experimental investigation of surface generation in diamond turning of an Al6061/SiCp metal matrix composite [J]. *Mechanical Sciences*, 2001, 43(1): 2047-2068.

## Cutting Force Response of Orthogonal Cutting of Polymer Bonded Explosive Simulants

XIE Feng-ying, ZHANG Zhong-wei, HUANG Jiao-hu, LIU Wei, XIAO Cai-wei

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** In order to analyze the cutting force response laws and cutting characteristics during PBX cutting process, the low-speed orthogonal cutting experiments, combined with the microphotography, 3D dynamometer and 3D surface profiler, were used to analyze the characteristics of instantaneous cutting force of PBX explosive simulants, and to study the cutting force response laws and key influencing factors in the cutting process of PBX explosive simulants. Results show that the dynamic cutting forces of PBX explosive simulants with different cutting depths are different. When cutting depth equals to 0.1 mm, the variation of peak cutting force is mainly caused by particles chip with curled up jet, and the cutting force curve exhibits subtle jagged variation. However, when the cutting depth equals to 0.3 mm or 0.5 mm, the peak cutting force mainly comes from the extension of material brittle fracture crack, the cutting force curve shows periodic large saw-tooth shape, and the zero point of  $f_z$  is at the over-cutting dent. The standard deviation of  $f_x$  shows significant variation at the cutting depth of 0.4 mm, which reflects the transition from continuous removal to brittle removal in the cutting state of explosive simulated materials. In low speed orthogonal cutting process, the influence of cutting width on cutting force is greater than that of cutting speed, and the cutting speed has little effect on cutting force.

**Key words:** explosive simulants; orthogonal cutting; instantaneous cutting force; cutting depth; cutting force response

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019030

(责编: 王艳秀)