

文章编号: 1006-9941(2009)01-0059-05

## PBX 车削表面的细观形貌与粗糙度研究

唐 维, 李 明, 黄交虎, 赵永忠, 张 丘, 尹 锐, 赵小东

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**利用三维视频光学显微镜和扫描电子显微镜对某奥克托今基 PBX 试样干车削和加切削液车削产生的表面进行观测,发现存在明显的刀尖划过和未划过的螺旋状车削纹,并在相同车削参数下加切削液车削的较干车削的明显。刀尖划过区域比较平整,切屑脱落后残留的微裂纹和破碎的炸药颗粒在未划过区域清晰可见,区域整体显得极不平整。采用轮廓仪对这种不平整的检测表明车削表面的粗糙度随车削深度、进给量和机床主轴转数的增大而均呈现增大趋势。推导的表面粗糙度经验公式可预测不同工艺参数下的实际表面粗糙度。

**关键词:**材料科学;高聚物粘结炸药(PBX);机械加工;车削表面;细观形貌;粗糙度;经验公式

**中图分类号:**TJ55

**文献标识码:**A

### 1 引 言

车削是高聚物粘结炸药件机械加工成型的主要技术手段之一,相关研究表明,粘弹性的粘结剂和硬脆性的炸药颗粒复合而成的 PBX 在受到冲击载荷(车削力等)作用时通常产生脆性断裂,这种脆性断裂具体体现为拉伸载荷下的沿晶断裂和压缩载荷下的穿晶断裂<sup>[1-4]</sup>。炸药部件的断裂方式决定了已加工表面的微裂纹分布、细观形貌和粗糙度等表面质量指标,不仅影响产品美观,而且对产品装配储运过程中接触面摩擦、粘结成复杂炸药部件时的强度等诸多方面都有直接影响,因此研究 PBX 车削表面的细观形貌和表面粗糙度对于优化工艺参数,从而提高产品表面质量具有重要现实意义。

国内外学者<sup>[5-9]</sup>采用扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)等手段对不同尺度下炸药材料的细观形貌进行了观测,这为本试验对 PBX 已加工表面细观形貌的研究提供了重要的方法指导。试验通过三维视频光学显微镜、扫描电子显微镜及表面轮廓仪检测 PBX 车削表面的细观形貌和粗糙度,推导与工艺参数(切削液、车削深度、进给量和机床主轴转数等)相关的粗糙度经验公式,以期预测 PBX 车削表面粗糙度提供数据参考和理论支持。

### 2 试 验

#### 2.1 材料与仪器

材料:某奥克托今基 PBX 试样 14 发( $\Phi 16$  mm  $\times$

10 mm,在 CM0620 卧式普通车床上加切削液车削而成)。

仪器:CKA6136 卧式数控车床,三维视频光学显微镜(KH-2700STD),扫描电子显微镜(KYKY-2800B),表面轮廓测试仪(Veeco Dektak<sup>®</sup> 6M Stylus Profiler)。刀具统一采用高速钢圆弧刃车刀,刀尖半径约 R0.2 mm,加工时主偏角 85°,副偏角 15°。

#### 2.2 试验方法

首先对 14 发 PBX 试样开展干车削和加切削液车削试验(本研究以水作为切削液,有无切削液均统一采用表 1 车削参数,每发试样车削一次),以进行车削表面取样。考虑到 PBX 车削过程中的安全问题,车削参数取值如表 1(其中 1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>及 5<sup>#</sup>是保持进给量和机床主轴转数不变而改变切深;同理 2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>只改变进给量,3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>和 7<sup>#</sup>仅改变机床主轴转数)。试验得到车削后的试样 14 发(12 mm  $\times$  10 mm)。采用三维视频光学显微镜和扫描电子显微镜观察 PBX 试样车削表面的细观形貌,最后使用表面轮廓测试仪检测车削表面的粗糙度情况。

### 3 PBX 车削表面的细观形貌

#### 3.1 三维视频光学显微镜观察

采用三维视频光学显微镜对试样车削表面进行观测,干车削和加切削液车削 4<sup>#</sup>试样(放大倍数为 20 倍,其它试样车削表面形貌与此类似,仅在尺度上不同)的表面细观形貌如图 1 所示。由图 1 可见:PBX 试样车削表面有明显的刀尖划过和未划过的螺旋状车削纹,这种现象在相同车削参数下加切削液车削的(图 1b)较干车削的(图 1a)明显。分析其原因,主要是受车削温度的影响,该型 PBX 干车削下刀尖周围温度最

收稿日期:2008-06-19;修回日期:2008-09-23

基金项目:中物院化材所所长基金资助项目(No. 626010922)

作者简介:唐维(1981-),男,硕士,主要从事 PBX 机械加工研究。  
e-mail: Will\_Ton@126.com

高可达  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[10]</sup>, 这有助于炸药件在车削过程中切屑的断裂脱落和已加工表面在残余应力和残余温度下的回复变形和蠕变流动。图中较暗条纹是刀尖未划过区域, 较亮较连续条纹是刀尖划过的区域。这是由于刀尖未划过区域切屑断裂后未经刀尖挤压摩擦, 比较粗糙, 在光学显微镜入射光的作用下反射较弱; 而刀尖划过区域在切屑断裂脱落后还经过了较大强度的刀尖挤压和摩擦, 相对比较平整, 反射较强。

表1 PBX 车削试验参数

Table 1 The parameters of PBX cutting test

samples	depth/mm	feed/mm · r <sup>-1</sup>	revolution /r · min <sup>-1</sup>
1#	1	0.10	400
2#	2	0.05	400
3#	2	0.10	200
4#	2	0.10	400
5#	4	0.10	400
6#	2	0.20	400
7#	2	0.10	600



a. dry turning



b. turning with cutting fluid

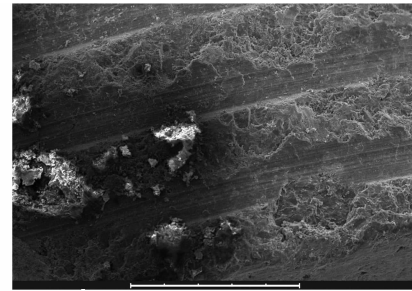
图1 4#试样微观形貌

Fig. 1 Micro-morphology of sample 4#

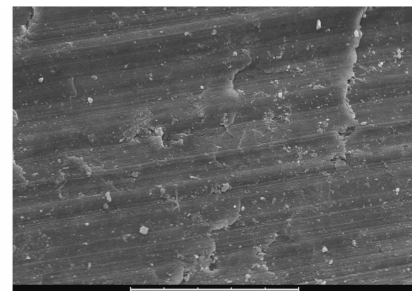
### 3.2 SEM 观察

加切削液车削 6# 试样的加工表面(其它试样加工表面特征与此类似, 仅尺度不同)。扫描电子显微镜照片如图 2 所示, 由图 2 可以清楚地发现, 车削过程中刀尖划过的区域和未划过的区域区别明显(图 2a)。刀

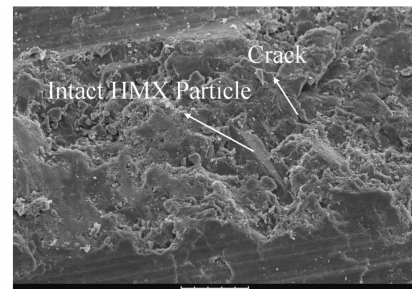
尖划过区域(图 2b)显得格外平整, 完全看不到炸药颗粒, 可见车削表面的形成包括切屑的断裂脱落, 也包括工件刀具的相互作用; 刀尖未划过区域可以清晰地看到切屑脱落后残留的微裂纹和破碎的炸药颗粒, 以及少数沿晶断裂后的完整颗粒(图 2c、图 2d), 区域整体显得极不平整。这种微观几何形状的高低不平所形成的峰谷高低程度即称为表面粗糙度<sup>[11]</sup>。



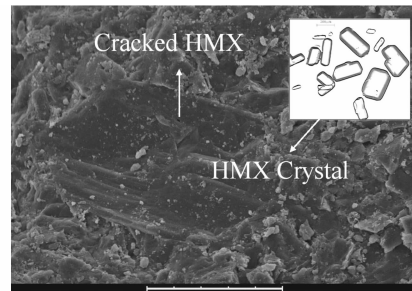
a. turning surface



b. knife-point-extrusion region



c. non-knife-point-extrusion region



d. cracked HMX particle

图2 6#试样的车削表面微观形貌

Fig. 2 Turning surface micro-morphology of sample 6#

## 4 PBX 车削表面的粗糙度

### 4.1 车削表面的粗糙度测试

采用表面轮廓测试仪对 14 发试样的车削表面粗糙度进行测试,整理得各试样的表面粗糙度如图 3(表中数据与图中柱高对应)所示。可以看出:加切削液车削的表面粗糙度大于干车削时的,具体数值在 2.1% (1#试样:加切削液车削与干车削的粗糙度之差,与干车削表面粗糙度之比,下同)到 28.5% (4#试样)不等。这主要是因为干车削下较高车削温度<sup>[10]</sup>导致的回复变形和蠕变流动,致使车削表面微观几何形状峰谷差的降低。

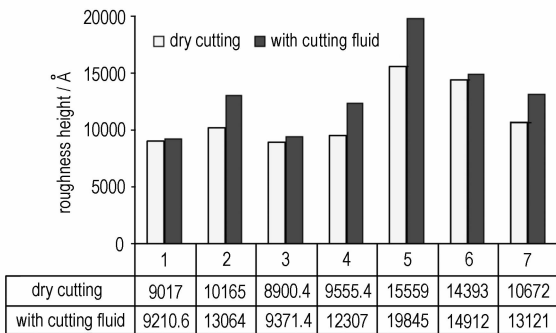


图 3 干车削和加切削液车削表面粗糙度比较

Fig. 3 Surface roughness comparison of dry turning and turning with cutting fluid

综合比较图 3 中各发试样的表面粗糙度,可以发现:1#、4#和 5#试样是在保持其它车削参数不变的情况下逐渐增大车削深度的,对应的表面粗糙度呈现逐步增大趋势,特别是车削深度由 2 mm (4#)增加到 4 mm (5#)时,表面粗糙度在干车削和加切削液车削时均增大了约 50%,可见车削深度对表面粗糙度的影响很大;2#、4#及 6#试样是仅增加进给量的情况,试验表明试样表面粗糙度随进给量增大而呈一定程度的增大,进给量从  $0.05 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$  (2#)增加到  $0.1 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$  (4#)时增幅较小(约 6%),由  $0.1 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$  (4#)增加到  $0.2 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$  (6#)时,表面粗糙度增幅较大(干车削增大约 40%,加切削液车削增大约 14%);同理,由 3#、4#和 7#试验数据可以看出,表面粗糙度随机床主轴转数的增加也呈增大趋势(最大约 15%),分析其原因:随机床主轴转数的增大,车削时的线速度呈  $2\pi r$  倍增大,又 PBX 是由粘弹性的粘结剂和硬脆性的炸药颗粒均匀粘结而成,冲击载荷加载速率越大,粘结剂与加载时间相关的粘弹性越难体现出来,切屑的断裂脱落就越多地依赖炸药颗粒的脆性断裂,故而刀尖未划过区域的不平整情况就会越发的明

显,最终致使表面粗糙度的逐步增大。

### 4.2 车削表面粗糙度经验公式推导

车削表面的形成其实就是刀具的进给和工件的旋转致使材料被挤压摩擦而最终断裂脱落形成切屑的过程,一方面由于材料的变形和加工过程中的振动等因素,另一方面因为各自轨迹的交叉,势必留下刀刃未能车削到的区域,即残留面积<sup>[12]</sup>,图 4 图 5 分别为直线刃车刀和圆弧刃车刀车削时的加工表面形成示意图,图中阴影的最大高度即为理论粗糙度<sup>[12]</sup>,实际的粗糙度因为切屑的脱落不可能完全按照刀刃的轨迹断裂而总是小于理论粗糙度,并与车削参数和材料特性直接相关。

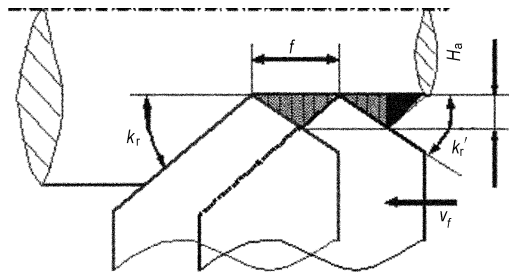


图 4 直线刃车削的残留面积和理论粗糙度

Fig. 4 Residual area and theoretical roughness when turning by linear cutting edge

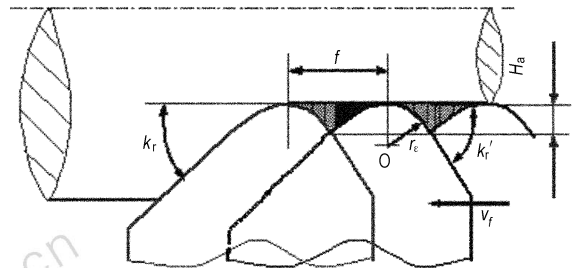


图 5 圆弧刃车削的残留面积和理论粗糙度

Fig. 5 Residual area and theoretical roughness when turning by arc-edge

图 4 中阴影部分三角形即为直线刃车削时的残留面积,可得其理论粗糙度表达式为:

$$H_a = \frac{f}{\cot k_r + \cot k'_r} \quad (1)$$

式中,  $H_a$ 、 $k_r$ 、 $k'_r$  和  $f$  分别表示理论粗糙度、主偏角、副偏角和进给量。

同理图 5 阴影部分为圆弧刃车削时的残留面积。车削过程中车刀圆弧刃的尖端半径约  $R0.2 \text{ mm}$ ,进给量一般不会超过  $0.2 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$  ( $60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ),为此刀具进给后几何外形的交点通常在圆弧段上,即加工后的残留面积由两段圆弧和一条直线封闭而成。显然,交点到相邻圆弧刃几何圆心距离相等(等于圆弧

刃半径),由此可以推出理论粗糙度表达式如下:

$$H_a = r_e - \sqrt{r_e^2 - \frac{f}{2}} \quad (2)$$

式中,  $r_e$  和  $f$  分别表示车刀圆弧刃半径和进给量。

根据上面的分析,车削表面实际粗糙度小于理论粗糙度并与切削液、车削深度、进给量和机床主轴转数车削参数都有直接关系,在此分别引入对应的相关系数和修正系数,假定实际粗糙度为  $H_s$ ,与理论粗糙度有如下关系式:

$$H_s = \frac{H_a}{k_y k_x k_h k_f k_z} \quad (3)$$

式中,  $k_y$ 、 $k_h$ 、 $k_f$ 、 $k_z$  和  $k_x$  分别表示切削液、车削深度、进给量和机床主轴转数的相关系数以及修正系数。

采用式(2)计算图3中1#~7#试验样本在各进给量下的理论粗糙度(车刀圆弧刃半径  $R0.2$  mm),有:

$$H_{a0.05} = 15686.5 \text{ \AA}; H_{a0.1} = 63508.3 \text{ \AA}; \\ H_{a0.2} = 267949.2 \text{ \AA} \quad (4)$$

从车削过程的安全出发,实际的PBX加工过程均需加切削液,以加切削液车削4#试样的车削参数为基准(除修正系数  $k_x$  外,其余系数此时均取1),采用式(5)和图4中的试验数据先求出干车削基于单次试验的切削液相关系数  $k_{yi}^{\text{dry}}$ :

$$k_{yi}^{\text{dry}} = \frac{H_{si}^{\text{watering}}}{H_{si}^{\text{dry}}} \quad (5)$$

$$k_{y1}^{\text{dry}} = 1.0215; k_{y2}^{\text{dry}} = 1.2852; k_{y3}^{\text{dry}} = 1.0529;$$

$$k_{y4}^{\text{dry}} = 1.2879; k_{y5}^{\text{dry}} = 1.2755;$$

$$k_{y6}^{\text{dry}} = 1.0361; k_{y7}^{\text{dry}} = 1.2295$$

通过最小二乘法求出干车削时的切削液相关系数,误差值在10%以内(代入式(5),再把计算结果和试验数据进行比较)。把4#加切削液车削的各相关系数代入式(3),求出修正系数,接着依次求出,对应表1车削参数的相关系数见表2。

按照线性插值的方法,采用圆弧半径为0.2 mm的圆弧刃车刀车削PBX工件的实际表面粗糙度的计算公式为式(2)式(3),相关系数的取值或表达式如下:

$$k_y^{\text{watering}} = 1, k_y^{\text{dry}} = 1.1698; k_x = 5.16; \\ k_h = 1.3363 - 0.3363(h - 1), (h \leq 2 \text{ mm}); \\ k_h = 1 - 0.1899(h - 2), (h > 2 \text{ mm}); \\ k_f = 0.2327 + 15.346(f - 0.05), (f \leq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}); \\ k_f = 1 + 24.822(f - 0.1), (f > 0.1 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}); \\ k_z = 1.3133 - 1.5665 \times 10^{-3}(z - 200), (z \leq 400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}); \\ k_z = 1 - 3.1 \times 10^{-4}(z - 400), (z > 400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1})$$

表2 车削参数相关系数取值

Table 2 Turning parameters' correlation coefficient values

item	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
$k_h$	1.3363	1	1	1	0.6202	1	1
$k_f$	1	0.2327	1	1	1	3.4822	1
$k_z$	1	1	1.3133	1	1	1	0.938

## 5 结论

PBX试样的车削表面有明显的刀尖划过和未划过的螺旋状车削纹,并在相同车削参数下加切削液车削的较干车削的明显。刀尖划过区域比较平整,切屑脱落后残留的微裂纹和破碎的炸药颗粒在未划过区域清晰可见,区域整体显得极不平整。

对这种不平整的检测表明不论是否加切削液,车削表面的粗糙度随车削深度、进给量和机床主轴转数的增大而均呈增大趋势。根据试验数据和车削表面形成过程的分析,建立的表面粗糙度经验公式及其参数,可用于预测不同车削工艺参数下的实际表面粗糙度,验证优化该经验公式和参数的工作需要进一步开展。

致谢:对中国工程物理研究院化工材料研究所分析检测岗位的蒋小华、郭菲、王亮及李伟等同志提供的帮助表示衷心的感谢。

### 参考文献:

- [1] 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,2001:24-25.
- [2] 陈鹏万. 高聚物粘结炸药的细观结构和力学性能[R]. 中国科学院力学研究所博士后研究报告,2001.
- [3] Field J F, Parry M A, Palmer S J, et al. Deformation and explosive properties of HMX powders and polymer bonded explosives [C] // Proceedings Ninth Symposium (International) on Detonation, 1989: 886-896.
- [4] 傅华. 材料在冲击荷载下细观变形特征的数值模拟探索研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2006:38-39.
- [5] Bare M R. Modeling heterogeneous energetic materials at the mesoscale[J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 351-367.
- [6] Proud W G, Palmer S J P, Field J E, et al. AFM studies of PBX systems[J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 245-251.
- [7] Li M, Zhang J, Xiong C Y, et al. Fracture analysis of plastic bonded explosive by digital image correlation technique [C] // The 3<sup>rd</sup> Int. Conf. On press. Mech., Proceeding of SPIE, 2002, 4537: 107-110.
- [8] 李明, 张珏, 李敬明, 等. 高聚物粘结炸药压缩破坏的细观力学试验研究[J]. 含能材料, 2005, 13(2): 79-84.  
LI Ming, ZHANG Jue, LI Jing-ming, et al. Experimental investigation to the damage localization of PBX mechanical failure at mesoscale[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(2): 79-84.
- [9] Fang J, Wang J X, Li M, et al. Damage and fracture study of non-

homogeneous materials by image correlation computation [C] // IUTAM symposium on analytical and computational fracture mechanics of non-homogeneous materials, Karihaloo BL (ed.), KLUWER, 2002: 323 - 332.

[10] 柏平, 刘维. JOB-9003 炸药的切削温度经验公式 [J]. 含能材料, 2004, 增刊(A02): 626 - 628.

BAI Ping, LIU Wei. The empirical formula of JOB-9003 cutting

temperature [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, Supplement(A02): 626 - 628.

[11] 李硕, 栗新. 机械制造工艺基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. 127 - 131.

[12] 韩荣第, 周明. 金属切削原理与刀具 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 21 - 33, 91 - 95.

## Study on Turning Surface Micro-morphology and Roughness of PBX Parts

TANG Wei, LI Ming, HUANG Jiao-hu, ZHAO Yong-zhong, ZHANG Qiu, YIN Rui, ZHAO Xiao-dong

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Surface micro-morphology and roughness are considered as the important indexes of PBX turning surface quality. They affect the interface friction in assembly and transportation processes, and affect the adhesive strength of complicated structural PBX components. Different turning manners, such as dry turning and with cutting fluid, and different technological parameters were employed to make samples, which is a type of HMX based PBX. Observation tests of turning surface were established through 3D video optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the turning surface consists of continual spiral barred regions, which include knifepoint-extrusion stripes and non-knifepoint-extrusion stripes. The former are planar, and the micro-cracks and cracked explosive particles can be discovered in the latter stripes. All these phenomena are obvious especially in the manner of turning with cutting fluid. Stylus profiler was used to detect the surface roughness. The results indicate the roughness increases with cutting depth, feed and revolutions of machine spindle. A surface roughness empirical formula was deduced based on experiments, which can forecast practical roughness under different cutting parameters.

**Key words:** materials science; polymer bonded explosive (PBX); machining; turning surface; micro-morphology; surface roughness; empirical formula

(上接 58 页)

## Thermal Behaviors of NTO-Based PBXs and their Compatibilities with Metals

ZUO Yu-fen, NIE Fu-de, YU Wei-fei, TIAN Xin, ZOU Jian-hua, LIU Shi-jun

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The thermal behaviors of three NTO-based PBXs and their compatibilities with aluminum, copper and stainless steel were investigated using TG-DSC and vacuum stability test (VST). Results show that: (1) A small amount of gases are produced from the three PBXs, suggesting their good thermal stability. When the PBXs contact with aluminum, copper and stainless steel, the additional amount of gas is less than  $3.0 \text{ mL} \cdot (5 \text{ g})^{-1}$ , and the decreasing values of peak temperatures are less than  $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , showing their good compatibilities. (2) The peak temperatures of the decomposition of NTO and HMX in PBXs are lower than that of the pure explosives, indicating that the coexisting of these explosive can mutually accelerate their decomposition at high temperature.

**Key words:** analytical chemistry; polymer bonded explosive (PBX); thermal behavior; compatibility