

文章编号: 1006-9941(2009)03-0307-05

PBX 切屑的细观特征及形成机理研究

唐 维, 李 明, 闫 斌, 赵永忠, 张 丘, 刘 维, 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:采用激光粒度仪测试高聚物粘结炸药(PBX)切屑的粒径,表明相同工艺参数下加切削液的切屑平均粒径大于干车削的,同时粒径随进给量增大而增大,随机床主轴转速提高而减小,未体现出与车削深度相关的明显关系。利用 SEM 观测发现 PBX 切屑主要有针状、块状和鳞片状三种细观形态,切屑的形成体现为裂纹的成核扩展导致的宏观断裂,并主要表现为炸药颗粒的穿晶断裂。使用工业 CT 探测试样亚表面表明裂纹的扩展路径和刀具工件相对运动状态以及工件结构边界条件有关,方向指向较为薄弱的工件表面。建立的切屑形成过程唯象模型有助于理解切屑的形成机理。

关键词:材料科学;高聚物粘结炸药(PBX);切屑;裂纹;细观特征;切屑形成机理

中图分类号: TJ55; TQ021.5

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.03.014

1 引 言

高聚物粘结炸药(PBX)是一种由粘弹性的粘结剂和硬脆性的炸药粒构成的颗粒复合材料。PBX 切屑的形成总是伴随着裂纹的成核扩展,研究其形成机理可提高对炸药部件在机加过程中的掉块质量事故的认识。同时,PBX 切屑的断裂脱落及其细观特征影响着加工过程的安全性,决定着加工表面的形成过程和质量(微观几何形貌、粗糙度等)。因此研究 PBX 切屑的细观特征和形成机理又对增强炸药机械加工过程的理论认识,保证和提高加工安全性和加工表面质量具有现实意义。

目前,虽尚无对炸药切屑研究的相关报道,但其它材料切屑形成机理的研究已取得了长足的进展,主要方法有马天颖^[1]提出的“宏切屑”方法,赵迎祥^[2]、陈建岭等^[3]采用的有限元仿真方法,陈志雄^[4]、武文革等^[5]、李昕等^[6]采用的运动学模型推导的方法以及金成哲等^[7]、孙杰等^[8]、王晓霞等^[9]、吴湘柠等^[10]广泛采用的试验观察的方法。本文则结合 PBX 材料的细观结构特点,采用激光粒度仪分析切屑粒度和工艺参数的关系,利用国内外学者^[11-14]广泛采用的扫描电子显微镜(SEM)观测切屑主要细观形态,分析其断裂方式,最后结合工业CT探测到的试样亚表面裂纹扩

展路径及形貌,总结 PBX 切屑的形成机理并建立其形成过程的唯象模型,以期能增强对 PBX 切削过程的理论认识。

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,CM0620 卧式普通车床,激光粒度分布测试仪(LS Particle Size Analyzer 3.02.20),扫描电子显微镜(KYKY-2800B),工业 CT。高速钢圆弧刃车刀,刀尖半径约 $R 0.2$ mm,前角约 5° ,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),以进行切屑取样。干车削采用 CKA6136 卧式数控车床,加切削液车削采用 CM0620 卧式普通车床;考虑到 PBX 车削过程中的安全问题,车削参数取值较小,如表 1(其中 1#、4#及 5#是保持进给量和机床主轴转速不变而改变切深;同理 2#、4#和 6#只改变进给量,3#、4#和 7#仅改变机床主轴转速)。试验得到切屑 14 份(约 10 g/份)和含微裂纹试样数发($\Phi 8$ mm \times 10 mm)。

接着采用激光粒度分布测试仪测试切屑粒径,采用扫描电子显微镜观察切屑细观形貌及主要形态;最后使用工业 CT 探测试样亚表面裂纹扩展情况。

收稿日期:2008-06-19;修回日期:2008-09-23

基金项目:中国工程物理研究院化工材料研究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

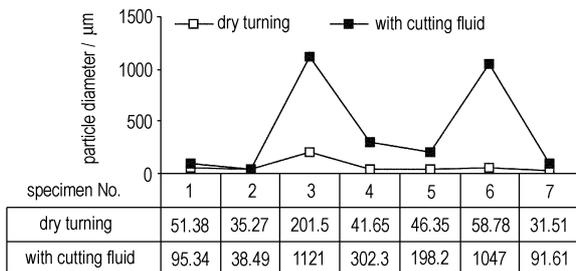
表1 PBX车削试验参数
Table 1 The parameters of PBX cutting test

samples	depth/mm	feed/mm · min ⁻¹	revolution/r · min ⁻¹
1 [#]	1	20.2	280
2 [#]	2	11.6	280
3 [#]	2	20.2	112
4 [#]	2	20.2	280
5 [#]	4	20.2	280
6 [#]	2	41.7	280
7 [#]	2	20.2	450

3 PBX切屑微观特征

3.1 切屑的粒度分析

采用激光粒度分布测试仪对试验获得的14份切屑进行粒度测试,各工况下切屑的平均粒径如图1所示(车削过程中3[#]及6[#]加切削液车削出现了较大面积的掉块,粒径的分布超过了粒度测试仪的量程2 mm,但整体上不影响粒径分布规律)。



Note: This datasheet corresponds to the points in this picture as the above.

图1 PBX切屑平均粒径比较

Fig. 1 The average size comparison of PBX chips

由图1可定性地看出,加切削液车削的切屑粒径均在一定程度上大于对应参数下的干车削切屑粒径。这在很大程度上是受切削温度影响的结果,研究表明该型PBX干车削下刀尖周围温度最高可达约160℃^[15],粘结剂由此出现的软化将有助于PBX车削过程中的切屑脱落。

据表1中预先设定的车削参数变化规律,结合图1中数据,可以发现:不论是干车削,还是加切削液车削,PBX切屑粒径均随进给量增大(2[#]、4[#]和6[#])而增大,随机床主轴转速提高(3[#]、4[#]和7[#])而减小,未体现出与车削深度(1[#]、4[#]和5[#])相关的明显简单关系。关于这一点,笔者认为这与本次PBX车削试验的车削参数,特别是刀具角度参数的选择不无关系:全燕鸣、周泽华^[16]对硬脆颗粒复合材料(PBX属于这类材料)的

研究表明该材料的切削形成主要受切削过程中裂纹的形成扩展影响,而本次试验刀具角度的选择使得车削层的受力主要体现为车削主运动方向上的压缩应力,对切深方向上裂纹形成扩展的影响规律不明显,不利于体现车削深度和切屑粒径的关系,明确该关系需要进一步开展工作。

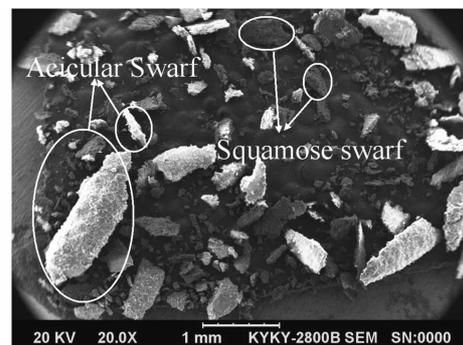
3.2 切屑的微观形貌与基本形态

PBX切屑的扫描电子显微镜(SEM)观测(图2和图3)表明:切屑的微观基本形态主要有针状、块状和鳞片状(图3),车削参数不同,各基本形态的组分也不同,但基本都由这三种切屑组合而成。图2a是加切削液车削的1[#]切屑微观形貌,主要由块状和部分针状切屑组成;图2b是加切削液车削的5[#]切屑,随车削深度增加,块状切屑减小,针状、鳞片状切屑增多。切屑的不同微观形态反映出车削层刀尖局部不同的受力状况,影响切屑最终脱落时形态的因素很多,但都与车削过程中切屑形成时的裂纹成核扩展有关。



a. 加切削液车削1[#]切屑

a. The 1[#] chip sample prepared by turning with cutting fluid

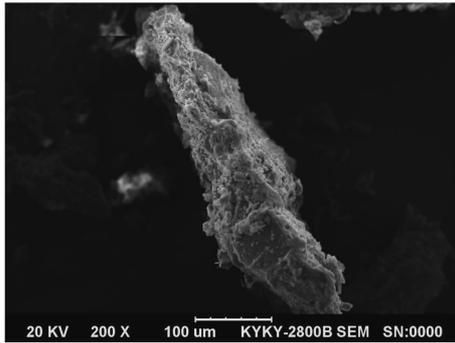


b. 加切削液车削5[#]切屑

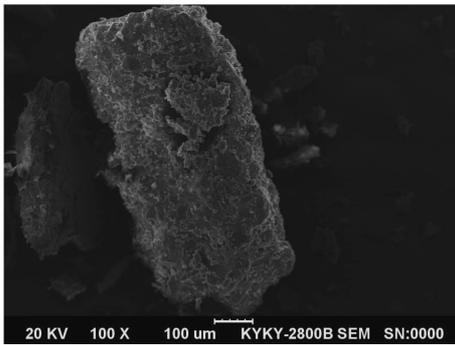
b. The 5[#] chip sample prepared by turning with cutting fluid

图2 PBX切屑的微观形貌

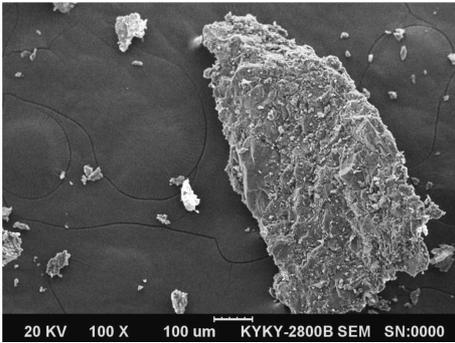
Fig. 2 The micro-morphology of PBX chips



a. 针状
a. acicular



b. 块状
b. massive



c. 鳞片状
c. squamose

图 3 PBX 切屑的主要微观形态

Fig. 3 The main micro-shapes of PBX chips

4 PBX 切屑形成机理

4.1 切屑的断裂方式

图 4、图 5 是扫描电子显微镜在 200 倍和 500 倍下观测到的加切削液车削 3[#] 试样所得的某切屑局部, 图中显示出了切屑脱落前的断裂方式。图 4 中基本完整的炸药颗粒很少, 所能看到的十余个颗粒及残余, 比较完整的只有图 5 所示的一个, 其余都有一定程度的破裂。这表明: 在 PBX 部件的车削过程中, 炸药颗粒主要以穿晶断裂为主, 并伴随少量的沿晶断裂(或称界面断裂)。Field J F^[17]、罗景润^[18]、傅华^[19] 等在对 PBX 的材料性

能研究中发现: 拉伸载荷下 PBX 材料中的粘结剂易破坏失效, 而炸药晶体很少破裂, 破坏模式主要是炸药晶体间沿晶断裂; 压缩载荷下 PBX 的破坏模式既有炸药晶体的脆性断裂, 也有粘结剂与炸药颗粒的脱粘以及粘结剂的断裂, 但以炸药的脆性断裂为主, 即穿晶断裂。由于 PBX 在车削过程中刀具和工件之间的作用力主要体现为压缩/剪切应力, 因此出现以穿晶断裂为主的现象是科学合理的。另外, 加工过程中的掉块质量事故和切屑断裂脱落都是因为裂纹的成核扩展最终导致的宏观断裂, 图 5 中可看到切屑表面分布的微裂纹, 这对于深入研究 PBX 部件机械加工过程中的掉块破裂具有积极意义。

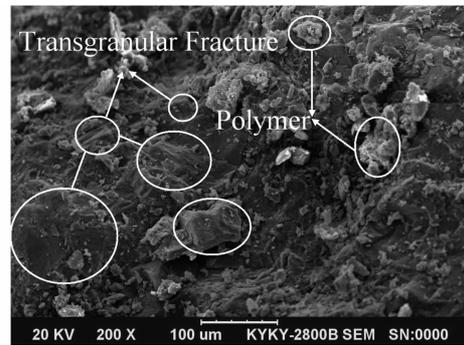


图 4 切屑的穿晶断裂

Fig. 4 The transgranular fracture

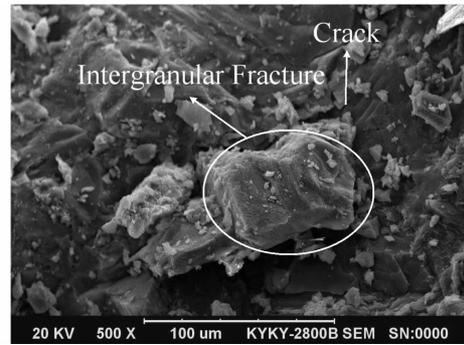


图 5 切屑的沿晶断裂

Fig. 5 The interfacial failure

4.2 亚表面裂纹的形貌和路径

采用工业 CT 的断层图像三维重建方法对获得的 3[#]、6[#] 试样亚表面(微)裂纹的路径和形貌进行探测(图 6)。图示 6a 为工件旋转刀具向上运动至药柱端部时的内部裂纹情况, 裂纹最宽处约 0.07 mm, 若该处裂纹扩展致使切屑脱落, 则会产生截面约 0.1 mm × 0.3 mm 的切屑, 图示因挤压已有一块截面约 0.73 mm × 0.6 mm 的掉块产生; 图 6b 为工件旋转刀具向下运动产生的裂纹情况, 由于与刀具接触区域受冲击载荷挤压所以裂纹宽度较中部小许多, 中部裂纹较宽, 约在 0.053 mm, 裂纹向较为薄弱的表面扩展, 在距离表面 0.8 mm 左右处中止,

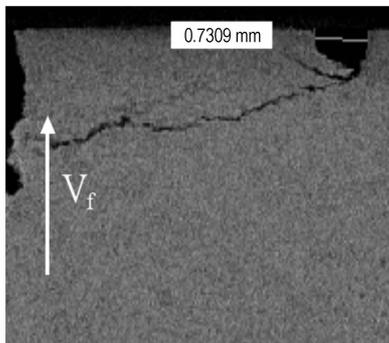
整个裂纹长约7.5 mm。可见,裂纹的扩展与刀具工件的相对运动状态以及车削处工件的结构边界条件都有关,裂纹扩展路径指向较为薄弱的工件表面。

4.3 切屑的形成机理及其过程模型

根据以上试验分析,PBX切屑的形成机理可描述为以下几个要点:切屑的形成主要靠刀具和炸药件之间的压缩/剪切应力;切屑的形成过程就是裂纹成核扩展导致宏观断裂的过程;切屑的断裂主要体现为炸药颗粒的穿晶断裂,沿晶断裂很少,并总向较为薄弱的工件表面扩展;形成的切屑细观形态,主要有针状、块状和鳞片状三种,任何一种车削参数下的切屑形态均不是单一的,而是与车削参数有一定关系的三种形态的组合形式。图7是根据以上机理描述建立的PBX切屑形成过程的唯象模型,图7a主要表征大块切屑形成,图7b主要表征针状鳞片状切屑的形成。

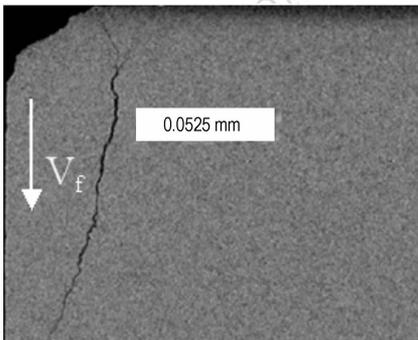
5 结论

在相同的工艺参数下,加切削液车削的PBX切屑平均粒径大于干车削的。切屑粒径随进给量的增大而增大,随机床主轴转数的提高而减小,未体现出与车削深度相关的明显关系。



a. 3[#]加切削液车削试样

a. The 3[#] sample prepared by turning with cutting fluid



b. 6[#]加切削液车削试样

b. The 6[#] sample prepared by turning with cutting fluid

图6 PBX试样的亚表面裂纹分布

Fig. 6 The sub-surface crack distribution

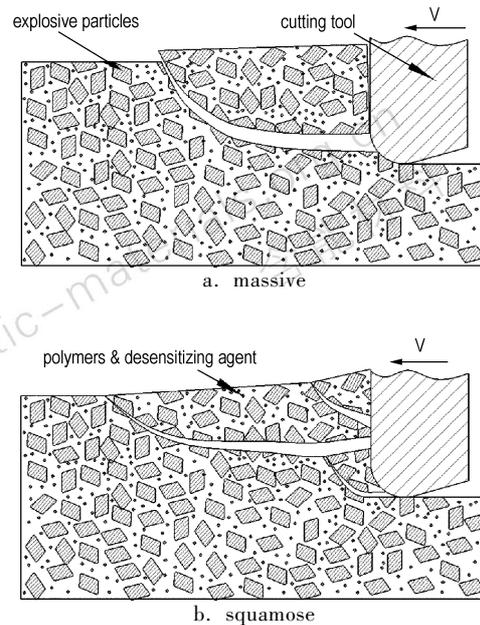


图7 PBX切屑形成过程的唯象模型

Fig. 7 A phenomenological PBX chip formation model

PBX切屑的形成过程就是在刀具工件间压缩/剪切应力下的裂纹成核扩展导致的宏观断裂过程,主要体现为炸药颗粒的穿晶断裂;裂纹扩展的路径和刀具工件的相对运动状态以及工件的结构边界条件有关,方向指向较为薄弱的工件表面;切屑主要有针状、块状和鳞片状三种细观形态。建立的切屑形成过程唯象模型有助于理解切屑形成的上述机理。

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张伟斌、杨占锋、陈娅及李伟等同志提供的帮助表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 马天颖. 一种研究复合材料切屑形成机理的新方法[J]. 工具技术, 1989(7): 7.
MA Tian-yin. A new method for studying chip formation mechanism of composites[J]. *Tool Engineering*, 1989(7): 7.
- [2] 赵迎祥. NC车削加工切屑形成机理的有限元仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003(8): 35-37.
ZHAO Ying-xiang. FEM simulation of chip formation mechanism in NC turning machining [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2003(8): 35-37.
- [3] 陈建岭, 李剑峰, 孙杰, 等. 钛合金高速切削切屑形成机理的有限元分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(1): 25-28, 31.
CHEN Jian-ling, LI Jian-feng, SUN Jie, et al. Finite element analysis on the chip formation mechanism of titanium alloy's high speed machining [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2007(1): 25-28, 31.
- [4] 陈志雄. 车削加工切屑形成机理及其仿真的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2005.

- [5] 武文革, 庞学慧, 李梦群, 等. 车铣加工的运动学模型与切屑形成机理[J]. 华北工学院学报, 2003(4): 297-299.
WU Wen-ge, PANG Xue-hui, LI Meng-qun, et al. Kinematics model of turning milling processes and mechanism of chip formation [J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2003(4): 297-299.
- [6] 李昕, 李振加, 王志刚, 等. 车铣两用圆刀片切屑形成机理研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007(5): 12-15.
LI Xin, LI Zhen-jia, WANG Zhi-gang, et al. Study on the mechanism of chip form with the round insert used for lathe and mill [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2007(5): 12-15.
- [7] 金成哲, 贾春德. 正交车铣高强度钢切屑形成机理的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006(9): 1610-1612.
JIN Cheng-zhe, JIA Chun-de. Research on mechanism of chip formation in orthogonal turn-milling high strength steel [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006(9): 1610-1612.
- [8] 孙杰, 邵子东, 李剑峰, 等. 硬质合金立铣刀高速铣削铝合金切屑形成机理研究[J]. 工具技术, 2007(11): 20-23.
SUN Jie, SHAO Zi-dong, LI Jian-feng, et al. Research on aluminum alloy chip formation of high-speed milling with carbide end milling cutter [J]. *Tool Engineering*, 2007(11): 20-23.
- [9] 王晓霞, 王洪祥, 李明洪, 等. 超精密车削时切屑形成及表面微观形貌形成机理的研究[J]. 工具技术, 2001(9): 14-16.
WANG Xiao-xia, WANG Hong-xiang, LI Ming-hong, et al. Study on formation mechanism of chip and surface micro-topography in ultra precise turning [J]. *Tool Engineering*, 2001(9): 14-16.
- [10] 吴湘柠, 刘冠民. PCBN 刀具铣削淬硬钢切屑形成机理的探讨[J]. 机械制造, 2006(7): 46-49.
WU Xiang-ning, LIU Guan-min. Discussion about chip forming mechanism in milling of hardened steel with PCBN cutters [J]. *Machinery*, 2006(7): 46-49.
- [11] Bare M R. Modeling heterogeneous energetic materials at the mesoscale [J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 351-367.
- [12] Li M, Zhang J, Xiong C Y, et al. Fracture analysis of plastic bonded explosive by digital image correlation technique [C] // The 3rd Int. Conf. On press. Mech., Proceeding of SPIE, 2002, 4537: 107-110.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 全燕鸣, 周泽华. 硬脆颗粒增强金属基复合材料的切屑形成机理 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1998(8): 27-30.
QUAN Yan-ming, ZHOU Ze-hua. The chip formation mechanism of hard particle reinforced metal matrix composites [J]. *Journal of South China University Technology (Natural Science)*, 1998(8): 27-30.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.

Microstructure and Formation Mechanism of PBX Chips

TANG Wei, LI Ming, YAN Bin, ZHAO Yong-zhong, ZHANG Qiu, LIU Wei, ZHAO Xiao-dong

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

Abstract: Studying on microstructure of PBX chips and its formation mechanism is helpful to understand the forming process of machined surface. It's of a great significance to guarantee and improve machining surface quality. The laser particle size analyzer was employed to detect PBX chips samples. It shows that the average size of chips which prepared by turning with cutting fluid is larger than that prepared by dry turning, the size increases with feed and decreases with the elevation of machine spindle revolutions, and has no obvious relationship to turning depth. Through the observation via scanning electron microscope, we can discover that chips mainly have three types of micro-shapes like acicular, massive and squamose, its formation corresponds to PBX macro-fracture which caused by the nucleation and growth of crack and mainly embodied as transgranular fracture of explosive particles. The detection of PBX samples sub-surface through industrial CT suggests that the crack propagation path points to workpiece surface generally, it relates to relative movement state between cutting tool and workpiece, and relates to structural boundary conditions of workpiece too. The phenomenological chip formation model can help to master its formation mechanism.

Key words: materials science; polymer bonded explosive (PBX); chip; crack; microstructure; chip formation mechanism