

文章编号:1006-9941(2009)05-0583-05

炸药切削数值模拟研究

张 丘, 黄交虎

(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 LS-DYNA 显式非线性动力分析程序, 针对 HMX 基 PBX 炸药材料的切削加工进行了切削数值模拟及相关模型的研究, 完成了不同切削参数下切削力的数值计算, 与实验测量结果吻合较好。研究表明, 在切削宽度远大于切削层厚度的条件下, 采用平面应变切削模型进行炸药切削数值模拟是可行的, 等效应力失效准则适合于描述炸药切屑的断裂和分离。切削力的计算结果显示, 切削力随切深和进给量的增大而增大, 切削速度对切削力的影响不明显, 其中, 切深对切削力的影响最为显著。

关键词:计算科学; 炸药; 切削; 数值模拟

中图分类号:TJ55; O242.1

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.05.020

1 引 言

切削加工是个很复杂的工艺过程, 涉及到弹性力学、塑性力学、断裂力学、热力学、摩擦学等, 利用解析方法很难进行定量分析和研究, 数值模拟结合实验手段是进行切削机理研究的得力工具。在金属切削的数值模拟方面, 早在 1973 年, B. E. Klamecki 最先应用有限元方法系统研究了金属切削加工中的切屑形成原理^[1], 随后, 各国学者在不同方面做了大量工作并取得显著进展^[2-7]。

炸药材料具有脆性、易爆、低硬度等特点, 其切削过程与材料断裂机理与金属有很大不同, 目前这方面的研究国内尚未见公开报道。本研究采用 LS-DYNA 显式非线性动力分析程序, 针对 HMX 基 PBX 炸药材料的切削加工进行了数值模拟技术及相关模型的研究, 建立了炸药切削数值模拟的理论方法与工具, 该方法也适用于其他炸药材料的切削加工。数值模拟的结果为优化工艺参数提供了参考, 对实现炸药部件的精密制造具有实际意义。

2 数学模型

2.1 平面应变切削模型

切削过程是一个非线性、大变形、材料不断减少的过程, 采用三维模拟计算量非常巨大, 在普通计算机上

难以实现。因此, 国内外学者一般采用二维模型进行切削过程数值模拟的研究^[1-2]。为建立二维切削模型, 需做如下简化和假设:

(1) 假设工件材料是均匀连续、各向同性的;

(2) 在切削宽度远大于切削层厚度的情况下, 忽略切削宽度方向的变形, 切屑的应力应变状态可近似为平面应变状态, 即在切屑变形过程中, 各点位移都发生在垂直于切削刃的平面内;

(3) 假设刀具为具有钝圆的刚性体。

在此条件下建立如图 1 所示的二维切削模型, 并认为工件处于平面应变受力状态。阴影部分表示切削的三个变形区。

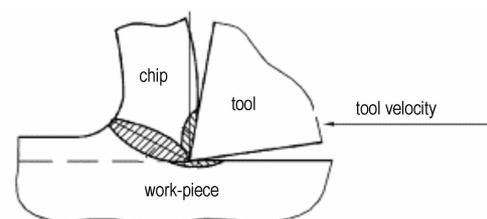


图 1 二维平面应变切削模型

Fig. 1 Plane strain machining model

目前提供的炸药材料力学性能都假定材料是连续均匀、各向同性的, 符合上述假设条件(1)。在炸药车削中, 通常要求进给量 $f \leq 0.4 \text{ mm/r}$, 切深 $a_p \leq 5 \text{ mm}$ ^[8], 符合假设条件(2)。刀具视为刚性体, 切削刃钝圆半径为 r , 符合假设条件(3)。由此可采用二维平面应变模型进行炸药切削的模拟。

图 2a 是外圆车削状态的示意图, 图 2b 是简化后的二维平面应变切削模型。数值模拟时为减少边界效应的影响, 要求 $h \geq 5f$, L 足够长以满足切削长度的需

收稿日期:2009-02-09; 修回日期:2009-05-05

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. 62601080314)

作者简介:张丘(1978-), 女, 硕士研究生, 助研, 从事炸药机械加工及相关技术研究。e-mail: zhangqiu_cn@163.com

求。本次数值模拟均采用以前车削试验所用过的刀具参数和切削参数^[9],以方便把数值模拟结果与试验结果进行对比。切削条件为干切削,不考虑冷却液的影响。采用固定工件、刀具运动的方式。

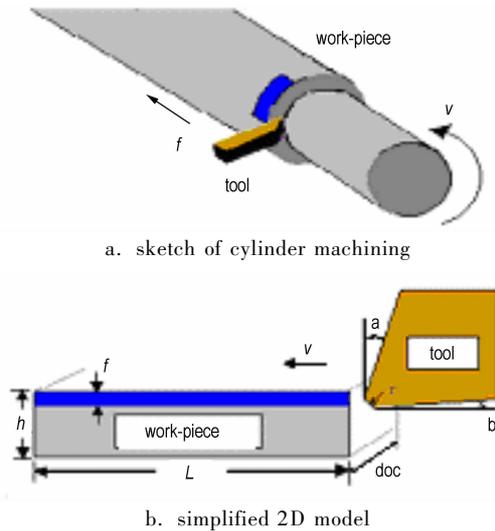


图2 外圆车削的简化模型

Fig. 2 Simplified 2D model of cylinder machining

2.2 材料模型

炸药在常温下的本构关系为弹塑性本构,其应力应变曲线的拟合方程如下^[10]:

表1 材料模型参数

Table 1 Parameters of materials model

materials	density/t · mm ⁻³	Young's modulus/MPa	Poisson's ratio	yield stress/MPa	tangent modulus/MPa
HMX based PBX explosive	1.85E-9	1.01E+04	0.3	45.0	0.6
W18Cr4v	7.85E-9	2.13E+05	0.3		

2.3 切屑分离准则

炸药切屑在宏观上呈现粉末状或块状,对断屑现象的有限元模拟需建立相应的失效断裂准则,当材料达到临界损坏值时,即认为发生了裂纹形成与扩展。在 LS-DYNA 程序中,材料的失效断裂准则主要包括以下几种^[12]:

(1) 压力准则: $p \leq p_{\min}$ 其中, p 是压力(为负值), p_{\min} 是失效压力;

(2) 主应力准则: $\sigma_1 \geq \sigma_{\max}$, 其中, σ_1 是最大主应力, σ_{\max} 是失效主应力;

(3) 等效应力准则: $\sqrt{3/2 \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \geq \bar{\sigma}_{\max}$, 其中, σ'_{ij} 是偏应力分量, $\bar{\sigma}_{\max}$ 是等效失效应力;

(4) 主应变准则: $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{\max}$, 其中, ε_1 是最大主应变, ε_{\max} 是失效主应变;

(5) 剪应变准则: $\gamma_1 \geq \gamma_{\max}$, 其中, γ_1 是剪应变,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + A\sigma^m \quad (1)$$

式中, ε 为应变; σ 为应力, Pa; E 为弹性模量, Pa; A 、 m 为待定拟合系数。

试验表明^[11], 在 20 ~ 70 °C 以内的范围内, 该本构关系可以较好地描述炸药应力应变之间的关系。在更高的温度下其组分可能发生相变或软化, 但目前缺乏并且很难建立一个从低温到高温的统一材料本构模型。

对于炸药材料, 尽管切削过程刀尖温度一般超过 80 °C, 干切削可达 100 ~ 300 °C^[9], 但经分析可知该区域是刀尖附近非常局部化的微小区域, 对于远场的材料性能影响甚微, 实际加工中形成的断裂型切屑也可以证明这一点, 说明切削过程炸药材料的断裂主要还是脆性断裂。因此采用常温下的材料本构关系进行切削模拟其误差是可以接受的。数值模拟采用双线性各向同性材料模型, 该模型用两个斜率(弹性和塑性)来表示材料的应力应变特性, 能较好地表达炸药材料的应力应变曲线。炸药材料选择为 HMX 基 PBX, 因为该材料具有大量的切削试验数据可供参考及与数值计算结果进行对比^[9]。刀具材料为高速钢, 切削过程不考虑刀具变形, 故采用刚性体材料模型。输入的材料参数见表 1。

γ_{\max} 是失效剪应变;

$$(6) \text{ Tuler-Butcher 准则: } \int_0^t [\max(0, \sigma_1 - \sigma_0)]^2 dt \geq K_f,$$

其中, σ_0 是规定的极限应力, $\sigma_1 \geq \sigma_0 \geq 0$, K_f 是应力冲量值。

其中, 压力、最大主应力、最大主应变、Tuler-Butcher 准则描述材料破坏主要为拉伸破坏; 剪应变准则描述材料破坏主要为剪切破坏; 等效应力准则描述材料破坏主要为压缩变形的破坏。

对于炸药这种脆性材料, 在前刀面的挤压和刀刃的剪切作用下, 材料主要发生机械滑移, 裂纹一般发生在刀尖区, 并形成崩碎切屑。因此可以认为材料破坏主要为压缩变形的破坏。选择合适的材料失效准则并确定一个合适的阈值对于切削模拟非常重要。在单轴压缩条件下, 高聚物粘结炸药在极小的形变下就破坏了, 断

裂强度小于屈服极限。在三轴压缩条件下,试件会有较大的塑性变形。因此通过简单应力状态得到的材料破坏阈值,对于复杂应力状态不一定合适,需通过数值模拟进行修正。本模拟主要对常用的最大主应力准则、最大主应变准则和等效应力准则进行试验和考察。

为给数值模拟提供实验数据参考,作者采用激光粒度分布测试仪(LS Particle Size Analyzer 3.02.20)对炸药的切屑进行了粒度测试。结果发现,不同切削参数下切屑的峰值粒径比较固定,约为 46 μm ,其值基本不受切削参数改变的影响,因此,可把粒径大小作为选择切屑分离准则的一个参考依据。以文献[9]中某切削参数下的切削力测量值和切屑峰值粒径作为两个参考依据,通过多次数值模拟来确定材料的失效准则及阈值。具体为:选择某一切削参数条件进行有限元模拟,切屑分离准则分别采用最大主应力失效、等效应力失效和最大主应变失效准则,以单轴压缩试验获得的材料破坏阈值为基准,通过逐渐调整阈值,使计算出的切削力与该切削参数下的测量值相接近。然后,将不同失效准则下的切屑尺寸与切屑峰值粒径相比较,选两者最接近的失效准则及其阈值确定为最合理的切屑分离准则。图 3 是采用不同失效准则进行数值模拟的切屑形态对比。

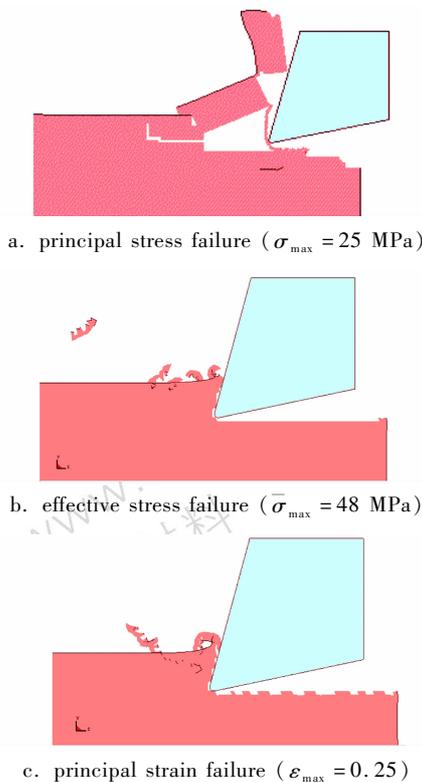


图 3 不同失效准则的比较

Fig. 3 Comparison of failure criteria

分析图 3 可知,选择等效应力失效准则(图 3b)进行炸药切削的数值模拟比较合适,数值计算结果显示其切屑尺寸约为 50 μm ,与实验所测峰值粒径(46 μm)较为接近,并且其阈值 $\bar{\sigma}_{\max}$ 与单轴压缩试验所得的材料断裂强度(约 45 $\text{MPa}^{[10]}$)相差不大。主应变准则的切屑尺寸略大,约为 75 μm ,但其阈值 ε_{\max} 与单轴压缩试验的材料断裂应变($< 0.01^{[10]}$)相差很大。主应力准则形成的大崩块切屑与实际切削状态则完全不符。

3 数值模拟结果及实验对比

3.1 切屑的形成过程

采用上述平面应变切削模型,切屑的断裂分离按照等效应力失效准则,材料失效阈值为 48 MPa ,对不同切削参数下的炸药切削过程进行了数值模拟。

图 4 显示了切屑形成的情况,可以看出,由于炸药材料的脆性,切削过程中形成不连续的颗粒状切屑。

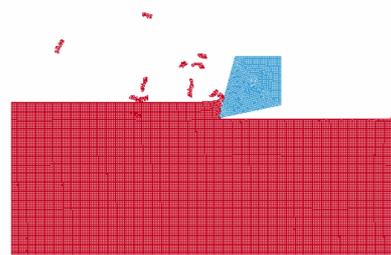


图 4 切屑形成过程

Fig. 4 Chip formation process

3.2 切削力计算结果及与实验数据的对比

图 5a 是切削过程切削力随时间的波动曲线,可以看出,切削力在刀具与工件接触的瞬间急剧上升,材料破坏后下降,接触到新的材料后又上升,随着切屑的不断形成和脱落,切削力发生波动性变化。

采用不同的切削参数进行数值模拟,分别获得了切削力随切深、进给量和切削速度的变化规律,并与文献[7]中的单因素试验数据进行了对比,如图 5b、5c、5d 所示。可以发现,数值模拟结果与试验结果基本吻合;切深越大,计算结果越接近测量值;但进给量较大(图 5c)时,计算结果与实验值相差较大。这是因为平面应变切削模型是在切削宽度(切深)远大于切削层厚度(进给量)的情况下,忽略切削宽度方向的变形而建立的,所以切深越大、进给量越小时数值模拟结果就越准确。这也表明,只有在切深远大于(5 倍以上)进给量的条件下,采用平面应变切削模型进行切削模拟才是可靠的。由图 5 可知,切削力随切深和进给量

的增大而增大,随切削速度的增大有轻微减小并稳定的变化趋势。其中,切深对切削力的影响最为显著。

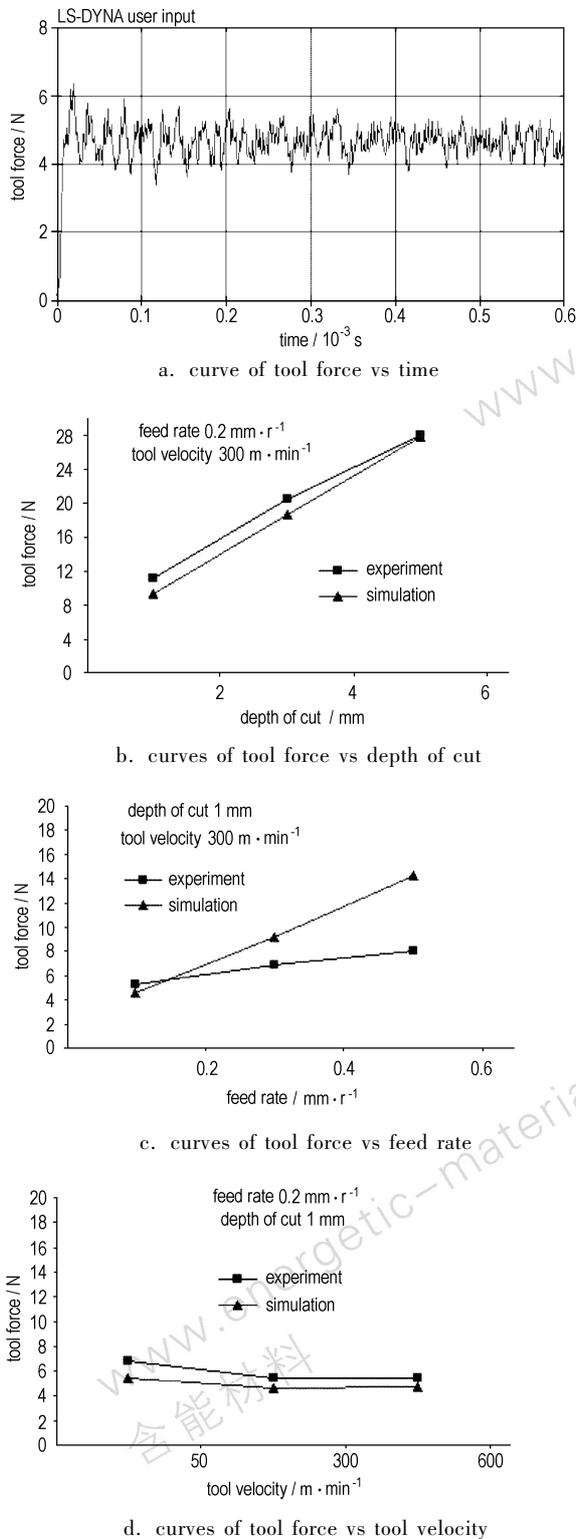


图 5 切削力计算结果与实验结果对比
Fig. 5 Comparison of calculational results and experimental results of tool force

3.3 切削表层残留应变的分布

当切削一定长度后,采用快速卸载的方法,获得了切削表层残留应变的情况,如图 6a、图 6b 所示。图 6c 是以切削终点为原点的坐标系示意图。选取的切削条件为: 切削速度 $v = 300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 切削层厚度 $f = 0.2 \text{ mm}$ 。

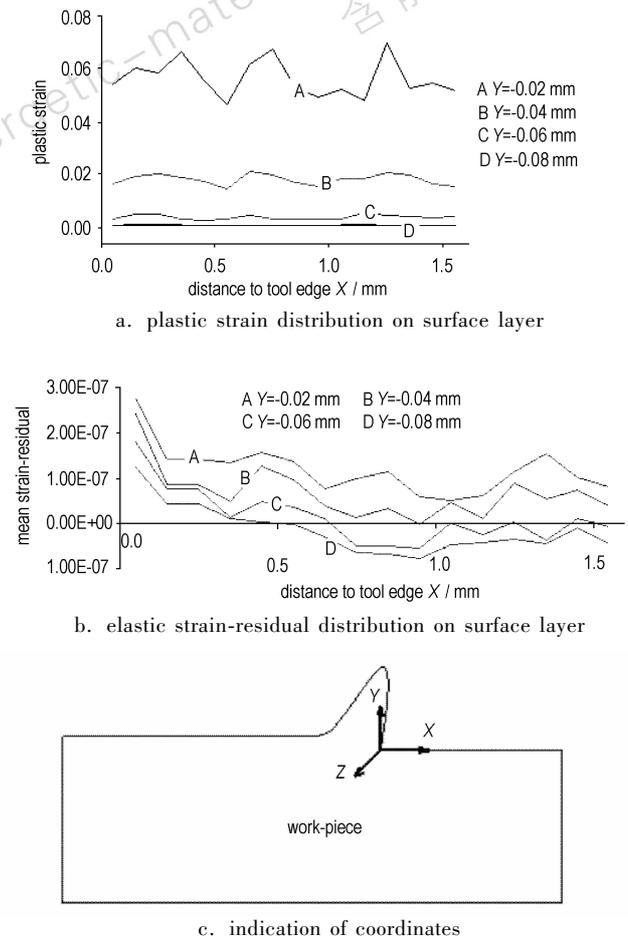


图 6 切削表层残留应变的情况
Fig. 6 Strain-residual on surface layer

图 6a 是切削表层残余塑性应变的分布曲线。由图 6a 可知,在表层相同深度的区域塑性应变基本为均匀分布;随着距离切削表面的深度增加而逐渐减小,距离切削表面以下 0.08 mm 处的塑性变形已基本为零。切削表层塑性应变的最大值不超过 0.1。

图 6b 是切削表层平均残余弹性应变的分布曲线。由图 6b 知,切削表层的残余应变主要为拉伸应变,其最大值数量级为 10^{-7} ,距表层深度由 0.02 mm 增加至 0.08 mm 的过程中,残余应变逐渐减小,最后由拉应变变为压应变。对于距切削表面相同深度的位置,残余应变随着距切削点长度的变远而呈逐渐减小的趋势。这是因

为切削点附近材料变形最大,类似于不完全卸载状态,距离切削点越远,材料会产生回弹,卸载越充分。

4 结 论

(1) 在切深(切削宽度)远大于进给量(切削层厚度)的情况下,采用平面应变切削模型进行炸药切削的数值模拟是可行的,且切深越大进给量越小时模拟结果越准确。

(2) 等效应力失效准则适合于描述炸药切削过程中切屑的断裂和分离。

(3) 炸药的切削力随切深和进给量的增大而增大,切削速度对切削力的影响不明显。在切削三用量中,切深对切削力的影响最为显著。

(4) 在切削表层相同深度的区域塑性应变大小基本一致,随着距切削表面深度的增加塑性应变逐渐减小为零,切削表层塑性应变的最大值不超过0.1。切削表层残余的弹性应变主要为拉伸应变,距离切削点越远,残余弹性应变越小,距离表面深度增加,残余弹性应变逐渐减小。

参考文献:

- [1] Klamecki B E. Incipient chip formation in metal cutting: A three dimension finite analysis [D]. University of Illinois at Urgan-Champaign, 1973: 1 - 10.
- [2] 方刚,曾攀. 切削加工过程数值模拟的研究进展[J]. 力学进展, 2001, 31(3): 394 - 404.
FANG Gang, ZENG Pan. Research advances in FEM simulation of machining process[J]. *Advances in Mechanics*, 2001, 31(3): 394 - 404.
- [3] 胡创国,张定华,汪文虎. 难加工加工材料切削机理研究的新进展[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 373 - 378.
HU Chuang-guo, ZHANG Ding-hua, WANG Wen-hu. Research advances in machining mechanisms of hardly machinable material[J]. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(3): 373 - 378.
- [4] Sasahara H, Obikawa T, Shirakashi T. FEM analysis of cutting sequence effect on mechanical characteristics in machined layer[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 62: 448 - 453.
- [5] ZHANG Liang-chi. On the separation criteria in the simulation of orthogonal metal cutting using the finite element method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 88 - 89: 273 - 278.
- [6] Huang J M, Black J T. An evaluation of chip separation criteria for the FEM simulation of machining [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1996, 118: 545 - 554.
- [7] Lin Zone-Ching. The study of ultra-precision machining and residual stress for NiP alloy with different cutting speeds and depth of cut[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 97: 200 - 210.
- [8] 柏平,刘维,黄尚诚,等. 两种塑料粘接炸药切削安全性初探[C] // 第八届全国爆炸与安全技术学术研讨会,南京. 2004.
BAI Ping, LIU Wei, HUANG Shang-cheng, et al. Lathe safety of two kinds of PBX [C] // The 8th National Symposium on Explosion and Safety Technology, Nanjing. 2004.
- [9] 柏平. 炸药机械加工切削力和切削温度控制技术[D]. 北京: 北京理工大学, 2004.
BAI Ping. Study of control technology of cutting force and temperature in explosive machining [D]. Beijing: Beijing Science and Technology University, 2004.
- [10] 董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1987.
DONG Hai-shan, ZHOU Fen-fen. Performances of High Energy Explosives and Related Materials [M]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1987.
- [11] 蓝林钢,郝莹,温茂萍,等. JOB-9003 和 JB-9014 热性能参数随温度变化试验研究[C] // 中国工程物理研究院化学与化工年会,绵阳. 2003.
LAN Lin-gang, HAO Ying, WEN Mao-ping, et al. Experimental study of thermal performance parameters changing with temperature for JOB-9003 and JB-9014 [C] // Chemistry and Chemical Engineering Semina of China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 2003.
- [12] LS_DYNA Version 970 Keyword User's Manual.

Numerical Simulation of Explosive Machining

ZHANG Qiu, HUANG Jiao-hu

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

Abstract: Numerical simulation and related models for HMX based PBX explosive machining were performed and studied by using LS-DYNA. Tool forces with various cutting parameters were computed for HMX based PBX explosive, and the calculational results agree well with the experimental results. Results show that the plane strain model is reliable for simulation of explosive machining when cutting width is far greater than cutting layer thickness. Effective stress failure criterion is appropriate for simulating chip separation of explosive. The tool force increases with increasing of depth of cut and feed rate, and cutting speed has no obvious effect on tool force. Depth of cut affects tool force most greatly among the three parameters.

Key words: computation science; explosive; machining; numerical simulation