DOI: 10.11883/bzycj-2017-0291

基于 SPH 方法模拟 30 mm 线膛炮波纹罩压垮过程的力学参数研究*

王小峰[1],陶 钢[1],任保祥[1],庞春桥[1],范 强[2],刘 龙[2]
(1. 南京理工大学能源与动力工程学院,江苏 南京 210094;
2. 重庆长安工业(集团)有限责任公司,重庆 401120)

摘要: 为研究高旋转对 30 mm 聚能装药破甲作用的影响机理及自旋补偿原理,采用 LS-DYNA 有限元软件中的 SPH 方法模拟 30 mm 线膛炮波纹罩的压垮过程,得到粒子的实际运动可分解成向心运动与绕中心圆周切线运动,提出压垮过程的 4 个阶段:压垮前期、缓冲期、波纹槽区域粒子速度增大期和中心粒子相互作用期。射流形成层沿逆时针方向旋转,而形成杵体的材料以相反方向旋转。结果表明:波纹罩特殊设计可以补偿旋转扰动对 30 mm 聚能装药侵彻作用的负面影响。

关键词: SPH 方法;聚能装药;波纹罩;自旋补偿;压垮过程;转速
中图分类号: O383; TJ410; TJ413.2 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

内部衬有药型罩的聚能装药被引爆后,在高压爆轰产物的推动下,药型罩各微元加速运动,并向轴线压合,发生碰撞、挤压,被挤压出的材料称为射流,其余部分材料形成杵体[1]。聚能装药在军事上一般用于破甲。

为了使弹丸保持稳定飞行、提高射程和射击精度,有些聚能弹药采用线膛炮发射。由于弹丸发射时沿炮膛膛线旋转前进,出炮口后具有一定的转速,如美军的 M789 弹——30 mm 小口径线膛炮聚能弹药,发射后具有非常大的旋转,为 60 000 r/min 或 1 000 r/s。聚能弹药对目标作用时,旋转进一步增强。在压垮药型罩形成射流时,由于角动量守恒,射流旋转角速度会增大许多,聚能射流自由飞行时,拉伸又造成转动惯量减小,射流旋转角速度又增大,如果离心力超过射流材料的屈服强度,会造成射流径向分散,射流的平均密度减小,导致穿透能力减弱[2]。因此,尤其对小口径聚能弹药来说,最终的旋转对保存射流完整性及良好的穿透能力有着至关重要的作用。

通过自旋补偿的方法可以抵消旋转扰动对聚能弹药侵彻作用的影响,所谓自旋补偿,即通过创造条件,在产生射流时会产生射流自身的旋转,当旋转补偿效应造成的射流旋转在方向上与弹丸旋转方向相反时,射流的最终转速会降低,甚至完全抵消[3-6]。

目前自旋补偿的方法有两种。第一种是改进药型罩加工制作方法,如加工错位药型罩、电铸药型罩、旋压药型罩等[7-8],研究发现,射流自旋的主要原因是药型罩制作过程中结晶组织的塑性各向异性[2,9]。第二种方法是改变药型罩的结构,如波纹罩(非对称的凹槽从药型罩顶部到底部),20 世纪 50 年代,Eichelberger[4]、Simon 等[5]、Pugh 等[6]首先提出了波纹罩的设想,并进行了实验研究。美军阿帕奇直升机上携带的30 mm口径 M789 聚能弹药正是通过利用波纹罩来补偿巨大的旋转。关于这方面的研究国内并未见报道,只关注了旋转爆炸成型弹丸(explosively formed penetrator, EFP)的研究[10-11]。

光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)是一种无网格粒子法,采用带质量、动量、能量的粒子构成离散计算域,不同物质材料的粒子自然地构成界面,材料间的相互作用由粒子间的相互作用来自然地模拟,材料的变形并不依赖于网格而是通过粒子的运动进行描述,因此理论上能够模拟高速碰撞、爆炸冲击等物理现象[12]。SPH 方法最初被应用于天体物理学[13],随后被广泛地应用

* **收稿日期**: 2017-08-06; **修回日期**: 2018-03-05
第一作者: 王小峰(1993—),男,博士研究生; **通信作者**: 陶 钢,taogang@njust.edu.cn。

于连续固体力学和流体力学中。Liu 等[14]采用 SPH 方法模拟了聚能装药的爆轰过程。

本文中采用 LS-DYNA 有限元软件中的 SPH 方法模拟了 30 mm 线膛炮波纹罩的压垮过程，以期为实现小口径高转速聚能弹药的破甲威力提供理论依据和参考。

1　波纹罩结构参数及分类

波纹罩结构参数及分类如图 1 所示，图中：a 为肋深度，T 为药型罩厚度，R 为药型罩外径，Ψ 为肋倾角，δ 为药型罩内外表面相邻波纹槽之间的夹角，ϕ 为同一表面相邻波纹槽之间的夹角，$\phi=360°/n$，n 为肋数目。

Eichelberger[4]列出了 5 种类型的波纹罩，图 1 中是较经典的后 3 种：Type Ⅲ、TypeⅣ和 TypeⅤ这 3 种波纹罩，Type Ⅲ内外表面都有波纹槽，Type Ⅳ外表面有波纹槽，Type Ⅴ内表面有波纹槽，由于 Type Ⅳ、Type Ⅴ只有一个表面有波纹槽，因此 Type Ⅳ、Type Ⅴ波纹罩结构参数与 δ 无关。本文针对 Type Ⅴ波纹罩进行计算。

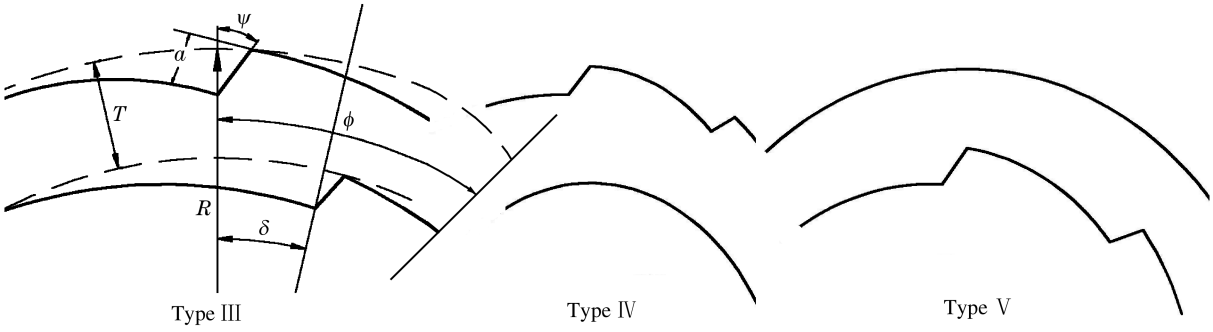


图 1 波纹罩结构参数及分类

Fig. 1 Structural parameters and classification of fluted liner

2　30 mm 聚能弹穿深与弹丸转速关系

射流的旋转频率、药型罩材料特性以及药型罩与目标之间的附加障碍会影响装药的穿透作用。旋转动力学条件下侵彻作用一定程度上取决于罩材料性质，射流临界速度可通过公式 $v_{cr}=0.65\sqrt{Y_0/\rho}$ 计算，Y_0 为动态屈服强度，ρ 为密度，可以发现动态屈服强度越大，抗离心力破坏射流的作用越大[15]。

文献[15]参考以前旋转聚能装药穿透作用的工程计算方法，利用已知的 25 mm 聚能弹参数[16]来预测计算 30 mm 旋转聚能装药的侵彻作用，该弹含有钝化黑索金炸药和铜锥形罩(张角 23°)。计算不同药型罩材料的相对穿深与弹丸转速间的关系，分别选取铜 M_0(俄牌号，对应国标为紫铜 T1，极限速度 $v_{cr}=87$ m/s)、铜 M_1(俄牌号，对应国标为紫铜 T2，极限速度 $v_{cr}=110$ m/s)和镍(极限速度 $v_{cr}=150$ m/s)3 种材料。

预测发现[15]当弹丸转速小于 300 r/s 时，转速对 30 mm 旋转聚能装药的相对穿深影响较小，而当弹丸转速在 300～1 000 r/s 范围内，聚能装药相对穿深随弹丸转速的增大急剧减小；临界速度不同的铜罩侵彻作用的差异达 25%，而动态屈服强度更大的镍侵彻优势超过 2 倍；在不太高的转速下(0～350(或 400) r/s)，所有的药型罩材料符合给出的要求：主靶的侵彻超过 50 mm；在高转速下(600～1 000 r/s)，没有任何方式是可行的。M789 炮弹在工作转速，即 1 000 r/s 时，甚至动态屈服强度高的镍罩主靶板穿深只有 20 mm，2 种铜罩在主靶板的穿深更小，甚至小于 10 mm。

综上，更加确定一点，美军 M789 聚能弹采用了自旋补偿方法，特定的罩材料对应定量的补偿参数。如镍罩，自旋补偿参数至少需要 400 r/s 以抵消弹的工作转速 1 000 r/s 后，从而保证弹的等效旋转速度不超过 600 r/s；但从制造波纹聚能罩来说，尤其在大批量生产条件下，铜不仅便宜，而且制作工艺好、缺陷少。但铜罩的自旋须补偿需达到 600 r/s，保证弹的等效旋转速度不超过 400 r/s。

对于 30 mm 线膛炮聚能弹使用铜波纹罩，尽可能自旋补偿达 600 r/s 的问题，在目前已有的研究工作中，对 57 mm 口径的炮弹，通过波纹罩可以达到自旋补偿 210 r/s 的目标[4]；文献[17]中，40 mm 口径的旋转弹药通过波纹罩补偿转速为 250 r/s。文献[18]中给出的最高旋转频率为 450 r/s，也是 40 mm口径的聚能弹。M789 弹的自旋补偿参数没有公布，但可以评估它，根据文献[4]得出的结论，补偿频率与尺寸大小成反比，假设采用最优的补偿频率 600 r/s，这正是 M789 弹采用铜波纹罩的最小自旋补偿频率。

根据实验评估，由于 M789 弹工作转速太大(只是特例)，且最小所需的达到了今天的极限，因此，仅依靠波纹罩还不能完全抵消弹自身旋转的负面影响。

3　计算模型及材料参数

基于波纹罩横截面研究波纹罩压垮过程，图 2 所示为 30 mm 小口径炮弹基本尺寸，用 Solidworks 软件建立二维波纹罩模型(Type Ⅴ)，如图 3 所示，包含波纹罩(内)与炸药(外)两部分，为简化计算，弹体省略，波纹罩外径为 15 mm，与炮弹口径相同，炸药装药简化为与波纹罩同心的圆环，结合图 2 中装药尺寸，模型中炸药半径设置为 21 mm，罩厚度 $T=1.5$ mm，波纹槽尺寸根据文献[4]确定，具体参数为：肋深度 $a=0.5$ mm，肋倾角 $\psi=30°$，肋数目 $n=16$，相邻波纹槽之间的夹角为 22.5°。该模型适用于二维平面，用来模拟波纹罩压垮过程及研究其自旋补偿原理。

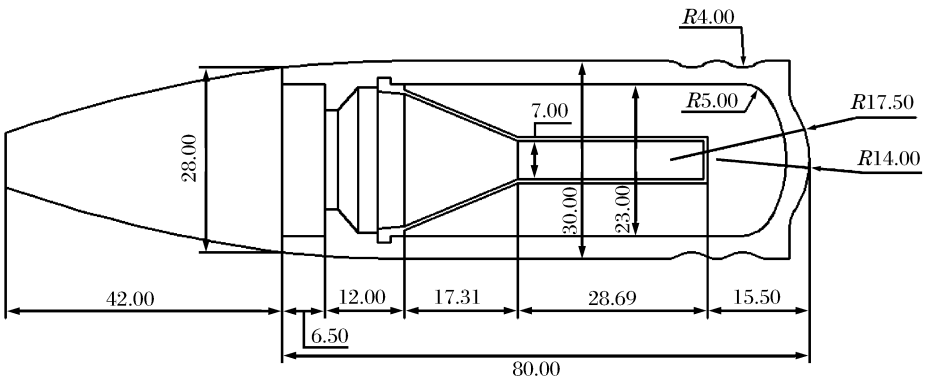


图 2　30 mm 小口径炮弹基本几何参数

Fig. 2　Basic geometric parameters of 30 mm small-caliber shell

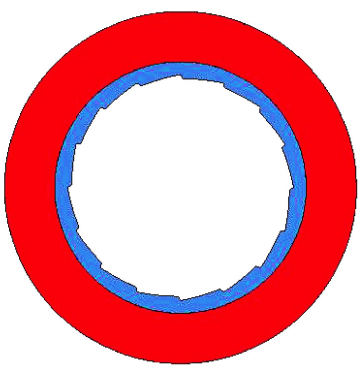


图 3　二维波纹罩模型

Fig. 3　Two-dimensional fluted liner model

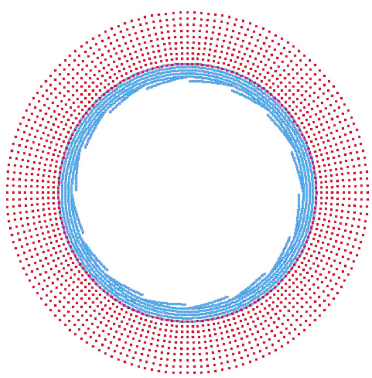


图 4　SPH 节点计算模型

Fig. 4　Calculation model of SPH node

根据实际模型几何尺寸建立计算几何模型，并采用 HyperMesh 软件划分网格，生成 k 文件后导入 LS-PrePost 软件，将二维网格的节点转换成 SPH 质点，因为 SPH 质点是在网格节点处生成的，所以建模长度与实际长度保持一致，图 4 为 SPH 节点计算模型，炸药配置了 1 600 个粒子，药型罩配置了 2 880 个粒子；由于炸药及药型罩变形速度及变形特别大，故采用变光滑长度 $h(t)$，其时间积分格式采用：

$$\frac{\mathrm{d}h(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{h(t)}{D}(\mathrm{div}\boldsymbol{v})^{1/3} \tag{1}$$

式中：D 表示空间维度，本文取 $D=2$；$\boldsymbol{v}$ 为粒子速度。

光滑长度在最大和最小值之间变化：

$$H_{\min}h_0<h<H_{\max}h_0 \tag{2}$$

式中：h_0 为初始光滑长度，$H_{\min}$ 和 $H_{\max}$ 为最小、最大光滑长度比例因子。

对于高速碰撞及冲击问题，粒子初始光滑长度的合理取值范围为 $d_0<h_0\leqslant 1.5d_0$ [19]，其中 d_0 为粒子间距，炸药的粒子间距为 0.06～0.08 cm，初始光滑长度设置为 0.10 cm；药型罩的粒子间距为 0.02～0.05 cm，初始光滑长度设置为 0.08 cm。炸药粒子最小、最大光滑长度比例因子分别是 0.5 和 2.0，药型罩粒子最小、最大光滑长度比例因子分别是 0.01 和 1.5。每个粒子初始相邻粒子数为 600。采用归一化粒子近似公式，炸药与药型罩界面处计算质点近似，两种 SPH 材料之间会发生相互作用，交界面处不需要特别的处理，且两种物质间穿透现象很少发生。

在 LS-PrePost 软件中完成前处理，利用 ANSYS/LS-DYNA3D 进行求解分析[20-21]。药型罩材料为紫铜，采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程，主要参数如表 1～2 所示，表 1 中 A、B、n、c、m 为材料常数。

表 1 药型罩材料参数

Table 1 Material parameters of liner

ρ/(g·cm^{-3})	G/GPa	A/GPa	B/GPa	n	c	m	T_{m}/K
8.96	46	0.09	0.292	0.31	0.025	1.09	1 356

表 2 药型罩状态方程参数

Table 2 State equation parameters of liner

C	S_1	S_2	S_3	γ_0	A
0.394	1.489	0	0	2.02	0.47

炸药装药为 8701 炸药[22-23]，采用 MAT_HIGH-EXPLOSIVE-BURN 高能燃烧模型，状态方程为 JWL 状态方程：

$$p=A_1\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V}+B_1\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V} \tag{3}$$

式中：p 为爆轰压力，状态方程参数 $A=612.5$ GPa，$B=13.95$ GPa，$R_1=4.5$，$R_2=1.4$，$\omega=0.25$，E 为炸药的比内能，$E=5.56$ MJ/kg，V 为相对比容。炸药密度 $\rho=1.62$ g/cm^3，爆速 $D=8.425$ km/s，C-J 爆压 $p_{\mathrm{CJ}}=29.6$ GPa。

4　数值模拟结果及分析

4.1　波纹罩压垮过程

图 5 所示为波纹罩压垮过程等效应力云图。由图 5 可知，当炸药装药起爆后，药型罩受到爆炸冲击波作用，迅速向轴向压合，粒子向心运动，但同时药型罩内部波纹槽部分逆时针方向(正方向)旋转，粒子绕药型罩中心的圆周切线方向运动，两种运动合成后粒子路径如图中所示，且波纹槽顶端粒子首先向中心汇合；12 μs 时，粒子到达波纹罩中心，汇聚在中心的粒子发生挤压碰撞。

压垮过程中，波纹罩最大等效应力先上升，在 10 μs 时达到最大 480.5 MPa，内部波纹槽区域的粒子等效应力最大，并且迅速向中心汇聚；随后药型罩最大等效应力减小，药型罩外层的粒子等效应力最大；11.5 μs 时波纹槽部分粒子在中心汇合，药型罩最大等效应力又开始增大，12 μs 时药型罩最大等效应力达到 474.7 MPa。

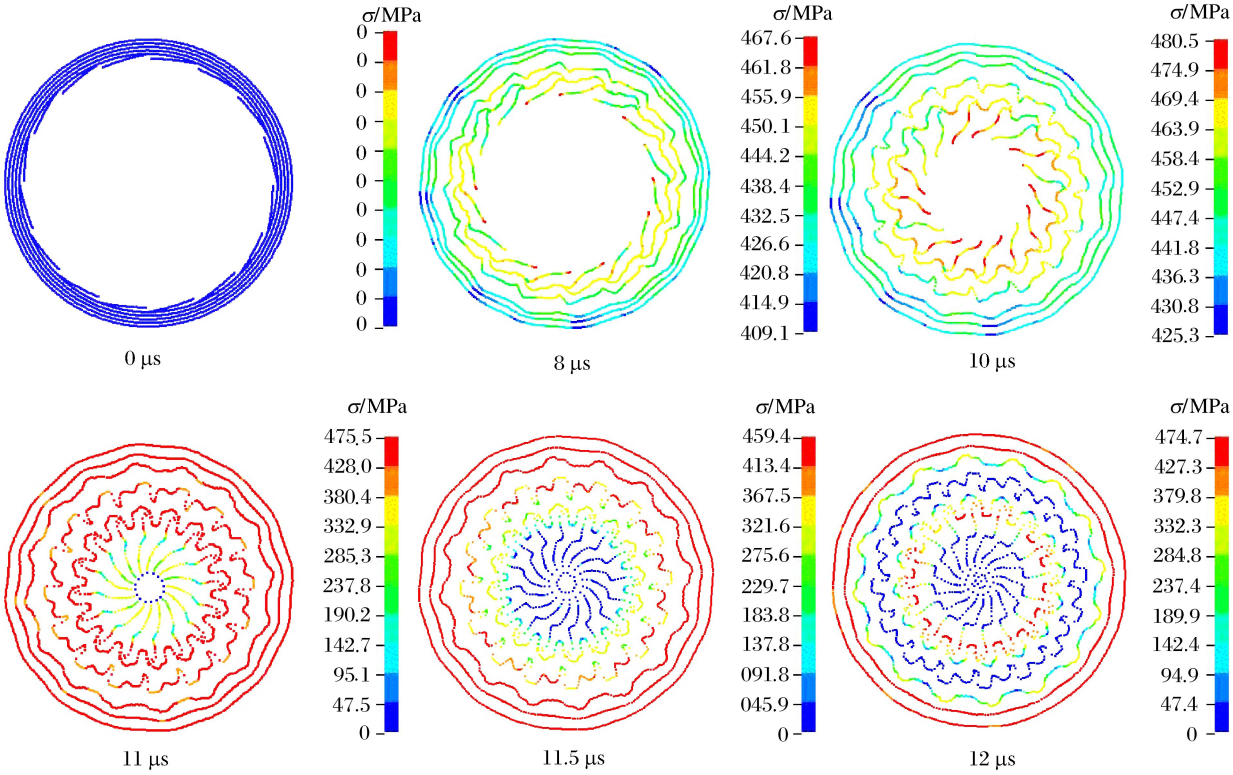


图 5　波纹罩压垮过程等效应力变化云图

Fig. 5　Equivalent stress variation cloud of fluted liner's overwhelm process

4.2　波纹罩整体角速度

在 LS-PrePost 软件中打开 LS-DYNA 求解后生成的 d3plot 文件，再利用 Origin 软件作出波纹罩绕中心的角速度变化曲线图[10]，如图 6 所示，波纹罩压垮到 8 μs 时角速度开始从 0 附近增大，12 μs 时角速度增大到 104.88 rad/s。进一步证实了图 5 中波纹罩发生旋转的判断。

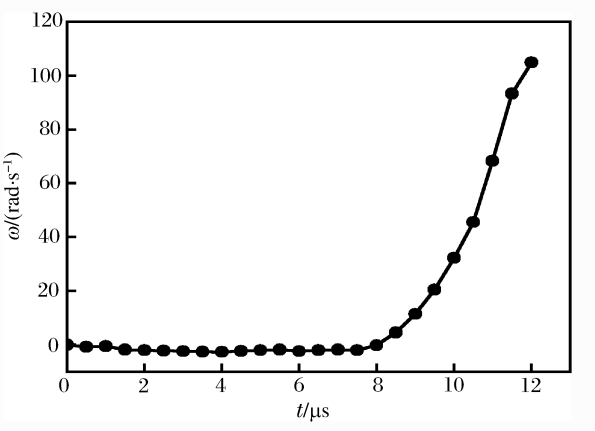


图 6　波纹罩角速度变化曲线

Fig. 6　Curve of fluted liner's angular velocity

4.3　波纹槽区域粒子角速度

假设波纹罩压垮后射流形成层角速度为 ω_j，质量为 m，距离中心点半径为 r_j，因此射流形成层角动量为：

$$L_j = mr_j^2\omega_j \tag{4}$$

药型罩压垮前角速度为 ω_0，且波纹槽顶端离中心点距离为 r_0，质量为 m，压垮前药型罩形成射流的这部分材料角动量为：

$$L_0 = mr_0^2\omega_0 \tag{5}$$

由角动量守恒，即 $L_j = L_0$，可以得到：

$$\frac{\omega_j}{\omega_0} = \frac{r_0^2}{r_j^2} \tag{6}$$

即角速度的增加与半径的平方成正比。

由于形成射流的部分是药型罩材料靠近里层的约 20%部分，沿着波纹槽顶端到尾部方向依次选取粒子，节点号分别是 3 571、3 574、3 581、3 587 和 3 600，如图 7 所示。图 8 是各粒子速度变化曲线。初始时刻，由于受到装药爆轰波作用，各粒子速度迅速增大，2 μs 时增大到约 1 000 m/s，0～2 μs 时间段为压垮前期；然后各粒子速度缓慢增长，且几乎以相同的速度大小向中心压合，2～8 μs 时间段为压垮缓冲期；约 8 μs 以后各粒子速度开始分散，且半径越小的粒子速度增长越快，由于角动量守恒，半径越小旋转角速度越大，造成粒子绕中心圆周切线方向速度增大，波纹槽顶端 3 571 号粒子速度急剧增大，11 μs 时达到最大 2 813.58 m/s，而波纹槽尾部 3 600 号粒子在 8～11 μs 时间内速度并没有增大，和 2～8 μs 时间段持平，说明除波纹槽区域以外，其它粒子速度大小保持稳定，8～11 μs 时间段为波纹槽区域粒子速度增大期；11 μs 以后，由于粒子相互作用、挤压和碰撞，各粒子速度减小，11～12 μs 时间段为中心粒子相互作用期。

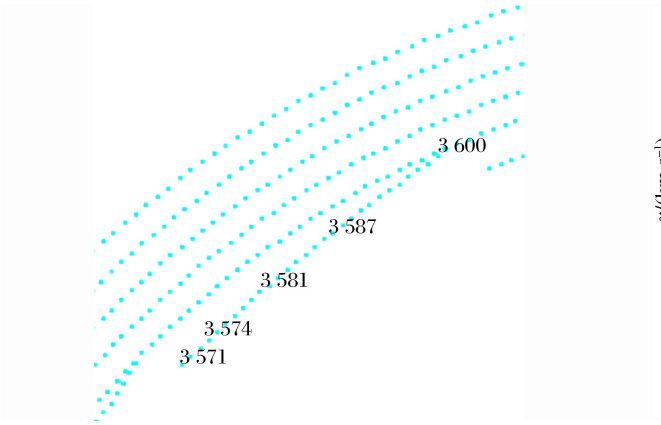


图 7　波纹槽区域选取的粒子

Fig. 7　Particles selected in fluted groove area

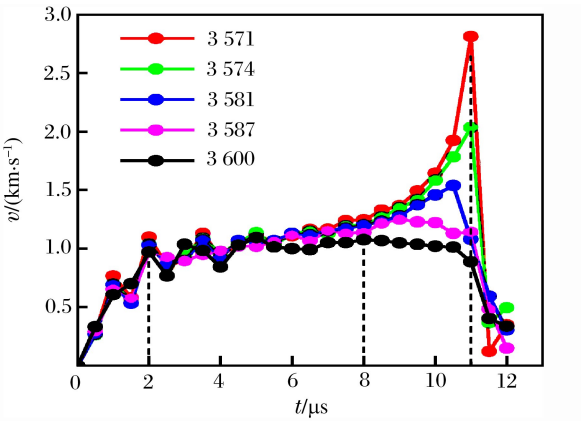


图 8　波纹槽区域粒子速度变化曲线

Fig. 8　Curves of particle velocity in fluted groove area

对粒子密度敏感性进行分析，如图 9 所示，分别作出粒子密度比图 4 中粒子初始密度小(图 9(a))和大(图 9(b))的 SPH 计算模型。图 9(a)中总粒子数为 2 672，炸药配置了 1 072 个粒子，药型罩配置了 1 600 个粒子，炸药粒子间距为 0.07～0.09 cm，初始光滑长度设置为 0.10cm；药型罩粒子间距为 0.03～0.06 cm，初始光滑长度设置为 0.08cm。图 9(b)中总粒子数为 6 880，炸药配置了 2 400 个粒子，药型罩配置了 4 480 个粒子，炸药粒子间距为 0.04～0.05 cm，初始光滑长度设置为 0.06 cm；药型罩粒子间距为 0.015～0.03 cm，初始光滑长度设置为 0.04 cm。其余设置参数均与图 4 中计算模型相同。

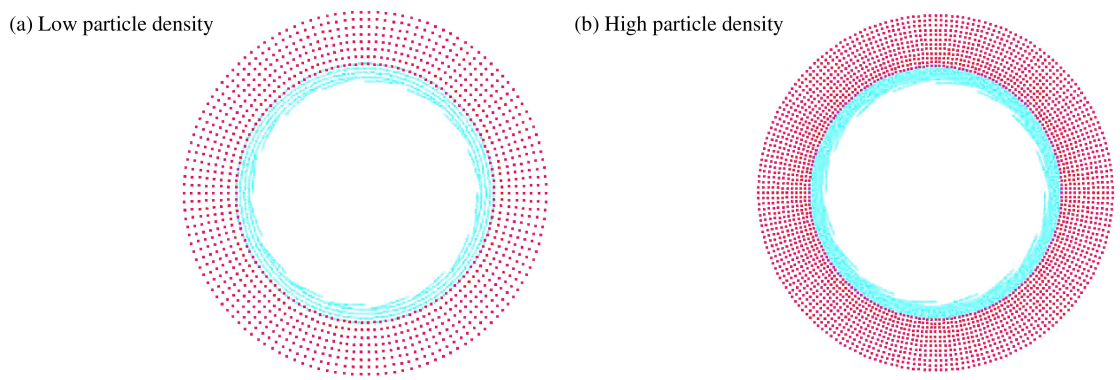


图 9　不同粒子密度时 SPH 计算模型

Fig. 9　SPH calculation model for different particle densities

与图 7 中波纹槽顶端 3 571 号粒子、底端 3 600 号粒子相对应，在图 9(a)中选取 13 292 号粒子(波纹槽顶端)和 13 286 号粒子(波纹槽底端)，在图 9(b)中选取 11 279 号粒子(波纹槽顶端)和 11 240 号粒子(波纹槽底端)，图 10 中作出各粒子速度曲线。可以发现，不同粒子密度时，波纹槽顶端与底端粒子速

度大小及变化趋势与初始密度时几乎相同，说明计算结果与粒子密度无关，与粒子间距相对应的初始光滑长度要在合理取值范围。

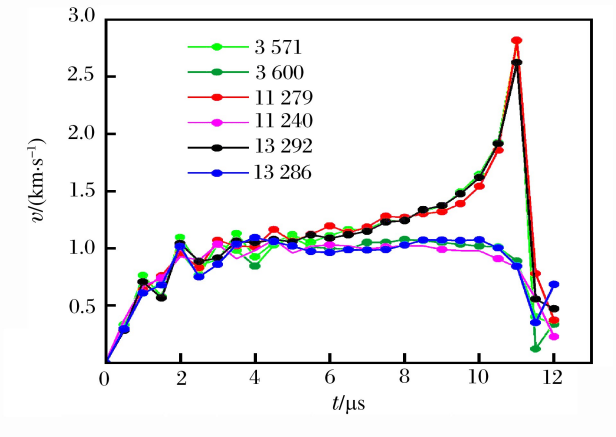


图 10　不同粒子密度时波纹槽顶端与底端粒子速度曲线

Fig. 10　Particle velocity curves at the top and bottom of fluted groove at different particle densities

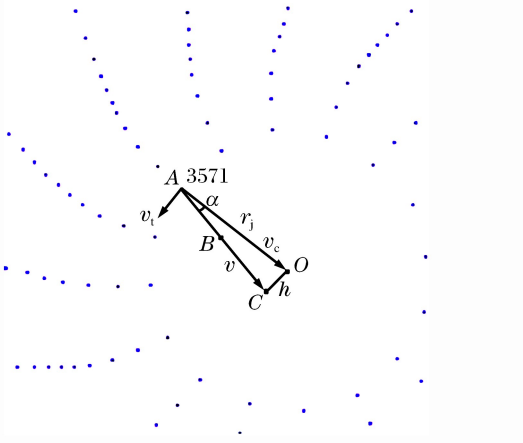


图 11　波纹槽前端粒子速度分布

Fig. 11　Particle velocity distribution at the front of fluted groove area

图 11 所示为 11 μs 时波纹槽最前端 3 571 号粒子的速度分布。图中 A、B、C 三点分别是 3 571 号粒子 11.0、11.5 和 12.0 μs 时所在点，由于粒子在 A 点速度很大，与 B 点间距离极小，可将线段 AB 方向视作粒子在 A 点的速度 v 的方向，将粒子速度 v 分解成切向速度 v_t 和向心速度 v_c，则 v 与 v_c 之间夹角为 α，A 点半径为 r_j，C 点离波纹罩中心 O 点距离为 h，所以切向速度 v_t 的表达式为：

$$v_t = v\sin\alpha = v\frac{h}{\sqrt{h^2 + r_j^2}} \tag{7}$$

粒子在 A 点绕中心 O 点的角速度 ω_j：

$$\omega_j = v_t / r_j \tag{8}$$

波纹罩中心 O 点坐标为(0，0)，由 A、C 点坐标(−0.052 94 cm，0.041 64 cm)、(−0.010 65 cm，0.010 10 cm)可求出半径 r_j 及 h，速度 v=2 813.58 m/s，由式(7)～(8)求出 $\sin\alpha$ =0.212 92，切向速度 v_t=599.07 m/s，角速度 ω_j=889 439.039 rad/s=141 558 r/s。

结合图 6 中波纹罩最大整体角速度只有 104 rad/s，说明形成杵体的材料旋转方向与射流形成层相反，即顺时针旋转(负方向)。

3 571 号粒子在 0 μs 时的坐标为(−0.898 46 cm，0.939 55 cm)，即 r_0 已知，求出 r_0^2/r_j^2 = 372.527 77，由式(6)可得到 ω_0=379 r/s。根据文献[4，17-18]中波纹罩旋转补偿参数的实验数据，该结果在合理范围之内。波纹罩特殊设计可以补偿旋转扰动对小口径高转速聚能装药的负面影响，且补偿转速较大。

当然对于工作转速很大的 M789 聚能弹来说(只是特例)，ω'=1 000 r/s，抵消后弹转速为 $\Delta\omega=\omega'-\omega_0$=621 r/s，由文献[15]可知，M789 弹仅依靠波纹罩不足以完全抵消弹自身旋转的负面影响，且与实验评估结果一致。

5　结　论

基于 SPH 方法模拟了 30 mm 线膛炮波纹罩压垮过程。分析后发现，粒子的实际运动可分解成向心运动与绕中心圆周切线运动，由此提出了压垮过程的四个阶段，分别是压垮前期、缓冲期、波纹槽区域粒子速度增大期和中心粒子相互作用期。射流形成层沿逆时针方向旋转，而形成杵体的材料以相反方向旋转。结果表明：30 mm 线膛炮波纹罩补偿弹丸转速为 379 r/s。波纹罩特殊设计可以补偿旋转扰动对小口径高转速聚能弹侵彻作用的负面影响，且相对其它自旋补偿措施来说，补偿转速较大。

参考文献：

[1] 荀扬，晏麓晖，曾首义. 聚能装药技术研究进展综述[J]. 科学技术与工程，2008，8(15)：4251-4257.
XUN Yang, YAN Luhui, ZENG Shouyi. Process of the shaped charge technique[J]. Science & Technology and Engineering, 2008, 8(15): 4251-4257.

[2] RASSOKHA S S. Performance calculation of shaped charges with shear-formed liners[J]. Journal of Applied Mechanics, 2013, 80(3): 979-985.

[3] 王铁福，石连捷. 旋压药型罩的旋转补偿效应与旋压参数关系的研究[J]. 爆炸与冲击，1996，16(4)：361-366.
WANG Tiefu, SHI Lianjie. Study on the relationship between rotation compensation effect and spinning parameter of rotary-pressed shaped charge liner[J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(4): 361-366.

[4] EICHELBERGER R J. "Spin compensation" in critical review of shaped charge information: Report No. 905[R]. Ballistic Research Laboratories, 1954: 215-253.

[5] SIMON J, DIPERSIO R, EICHELBERGER R J. Shaped charge performance with linear fluted liners[R]. Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1959.

[6] PUGH E M, EICHELBERGER R J. Fluted liners for shaped charges: US3726224[P]. 1973-4-10.

[7] 王铁福，石连捷，朱鹤荣. 旋压药型罩不对称织构分析[J]. 弹道学报，1991(3)：71-73.
WANG Tiefu, SHI Lianjie, ZHU Herong. Analysis of asymmetric texture for rotary-pressed shaped charge liner [J]. Journal of Ballistics, 1991(3): 71-73.

[8] 贾万明，张全孝，白志国，等. 药型罩制造技术的发展[J]. 稀有金属材料与工程，2007，36(9)：1511-1516.
JIA Wanming, ZHANG Quanxiao, BAI Zhiguo, et al. Progress of manufacturing technology of shaped charge liner [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(9): 1511-1516.

[9] SCHWARTZ A J, BUSCHE M J, BECKER R, et al. Role of texture in spin formed Cu shaped-charge liners[C]// The 19th International Symposium on Ballistics. Switzerland, 2001: 733-740.

[10] 李惠明，陈智刚，侯秀成，等. 阶梯式旋转 EFP 成形机理的数值研究[J]. 弹箭与制导学报，2010，30(1)：115-118.
LI Huiming, CHEN Zhigang, HOU Xiucheng, et al. Numerical simulation of formation mechanism of ladder-shaped rotational EFP[J]. Journal of Projectiles, Rockets and Guidance, 2010, 30(1): 115-118.

[11] 黄静，张庆明. 滑移爆轰作用下药型罩的变形分析[J]. 北京理工大学学报，2009，29(4)：286-289.
HUANG Jing, ZHANG Qingming. Distortion of a liner under sliding detonation[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(4): 286-289.

[12] 李磊，沈兆武，李学岭，等. SPH 方法在聚能装药射流三维数值模拟中的应用[J]. 爆炸与冲击，2012，32(3)：316-322.
LI Lei, SHEN Zhaowu, LI Xueling, et al. Application of SPH method to numerical simulation of shaped charge jet[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(3): 316-322.

[13] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. Astronomical Journal, 1977, 82 (12): 1013-1024. DOI: 10.1086/112164.

[14] LIU M B, LIU G R, ZONG Z, et al. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology[J]. Computers and Fluids, 2003, 32(3): 305-322.

[15] РАССОХА С С, БАБКИН А. В, ЛАДОВ С В, et al. Об использовании рифленых облицовок в кумулятивных снарядах к 30 mm нарезному орудию[J]. Инженерный Журнал: Наука и Инновации, 2013(14): 96-107.

[16] ДУБОВСКОЙ М А. Особенности формирования струи во вращающихся кумулятивных зарядах и оценка возможности повышения бронебойного действия кумулятивных боеприпасов: Научно-исследовательский институт, по оборонной технике Совета Министров СССР[R]. 1964.

[17] KOCH A, JAGGI P, JAUN W, et al. Study of spin-compensated shaped charges[C]// Proceeding of the 19th International Symposium on Ballistics. 2001: 1501-1508.

[18] COX C M. Warhead mechanisms study[R]. Firestone Tire and Rubber Company, 1964.

[19] 徐金中，汤文辉. 高速碰撞 SPH 方法模拟中的初始光滑长度和粒子间距[J]. 计算物理，2009，26(4)：548-552.
XU Jinzhong, TANG Wenhui. Initial smoothing length and space between particles in SPH method for numerical

simulation of high-speed impacts[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009,26(4):548-552.
[20] 时党勇. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
[21] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京:科学出版社,2005.
[22] 程波,李文彬,郑宇,等. ANPyO 和 8701 的冲击波感度对比研究[J]. 兵工自动化,2014(2):15-17.
CHENG Bo, LI Wenbin, ZHENG Yu, et al. Study on shock sensitivities of ANPyO and 8701[J]. Ordnance Industry Automation, 2014(2):15-17.
[23] 陶为俊,浣石. RDX-8701 炸药二维冲击起爆状态的研究[C]//第八届全国爆炸力学学术会议论文集. 井岗山,2007.

Mechanical parameters of the overwhelm process of fluted liner for 30 mm rifled gun based on SPH method

WANG Xiaofeng[1], TAO Gang[1], REN Baoxiang[1],
PANG Chunqiao[1], FAN Qiang[2], LIU Long[2]
(1. *School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Chongqing Chang'an Industry (Group) Limited Liability Company, Chongqing* 401120, *China*)

Abstract: In order to study the effect of high rotation on the shell-penetration of 30 mm shaped charge and the mechanism of spin-compensation, we simulated the overwhelm process of the fluted liner for the 30 mm rifle gun using the SPH method of LS-DYNA finite element software, and found that the actual movement of particles can be decomposed into centripetal motion and tangential motion around the center circle. We then put forward the four stages of the overwhelm process, those of the early crush, the buffer, the particle velocity increase in the fluted liner area and the central particle interaction. The jet forming layer rotates in a counterclockwise direction, whereas the material forming the pestle body rotates in the opposite direction. The results show that the special design of the fluted liner can compensate the negative impact of the rotating disturbance on the penetration effect of the 30 mm shaped charge. The compensating rotating speed of the projectile is 379 r/s and larger.

Keywords: SPH method; shaped charge; fluted liner; spin-compensation; overwhelm process; rotating speed

（责任编辑　王易难）