

旋转对卵形弹侵彻钢板影响的FEM-SPH耦合模拟

肖毅华 吴和成 朱爱华 董晃晃 平学成

Effect of Rotation on Penetration of Steel Plate by Ogival Projectile Using Coupled FEM-SPH Simulation

XIAO Yihua, WU Hecheng, ZHU Aihua, DONG Huanghuang, PING Xuecheng

引用本文:

肖毅华, 吴和成, 朱爱华, 等. 旋转对卵形弹侵彻钢板影响的FEM-SPH耦合模拟[J]. 高压物理学报, 2019, 33(5):000000. DOI: 10.11858/gywlxb.20180675

XIAO Yihua, WU Hecheng, ZHU Aihua, et al. Effect of Rotation on Penetration of Steel Plate by Ogival Projectile Using Coupled FEM–SPH Simulation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(5):000000. DOI: 10.11858/gywlxb.20180675

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180675

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于SPH的分层钢板抗半球头弹侵彻的数值模拟

Numerical Simulation of Anti-Penetration of Laminated Steel Plate by Hemispherical-Nosed Projectile Using SPH 高压物理学报. 2018, 32(5): 055102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170664

基于FEM/SPH算法弹丸侵彻多孔陶瓷板的数值模拟

Numerical Simulation of Projectile Penetration into Porous Ceramic Plates Based on FEM/SPH Algorithm 高压物理学报. 2017, 31(1): 35 https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.01.006

立方体弹高速侵彻防护液舱剩余特性的数值模拟

Numerical Simulation of Residual Characteristics of Protecting Liquid Cabin Penetrated by High Velocity Cube Fragments 高压物理学报. 2019, 33(1): 015103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180576

破片模拟弹侵彻船用钢靶板的计算模型

Numerical Calculation on Penetration of Ship Steel Plate by Fragment Simulated Projectile 高压物理学报. 2019, 33(1): 015105 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180614

大着速范围长杆弹侵彻深度变化及其影响因素的数值模拟

Depth of Penetration and Its Influence Factors of Long Rod Projectile Impacting on Semi Infinite Target with Elevated Velocity 高压物理学报. 2018, 32(2): 025103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170592

混凝土薄板侵彻贯穿问题的SPH数值模拟

Numerical Simulation of Penetration in Concrete Sheet Based on SPH Method 高压物理学报. 2019, 33(2): 024101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180634 DOI: 10.11858/gywlxb.20180675

旋转对卵形弹侵彻钢板影响的 FEM-SPH 耦合模拟

肖毅华1,吴和成1,朱爱华1,董晃晃2,平学成3

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 杭叉集团股份有限公司,浙江杭州 310000;

3. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300457)

摘要:建立了卵形弹侵彻钢板的 FEM-SPH 耦合计算模型,研究了弹靶间摩擦系数对弹体剩 余速度计算结果的影响,根据实验结果确定了合理的摩擦系数,使耦合计算模型能准确地预测 弹体剩余速度和靶板弹道极限。以该模型为基础,在两种不同着靶速度下,研究了弹体的旋转 对其正侵彻和以不同入射角斜侵彻钢板时剩余速度和弹道偏转的影响。正侵彻下:旋转对弹体 剩余速度的影响大,而对弹道偏转的影响很小;随着转速的增加,剩余速度增大,弹体侵彻能力 提高。斜侵彻下:旋转对弹体的剩余速度和弹道偏转都有明显影响,但弹体转速的增大并不总 使其侵彻能力提高,与入射角和着靶速度有关;同时旋转使弹体沿入射面外发生偏转,其偏转方 向与弹体的旋转方向相关。

关键词:旋转;侵彻;剩余速度;弹道偏转 中图分类号:0385 文献标识码:A

钢板在各类防护结构中具有广泛的应用,常用于构造轻型装甲车、坦克等军用车辆的基体装甲或 复合装甲。目前虽有很多研究分析了弹体侵彻钢板过程,但较少考虑弹体旋转对侵彻过程的影响。实 际中,许多弹体是高速旋转的,依靠陀螺效应保持在空中飞行的稳定性,弹体的旋转速度可高达十万以 上转每分钟。因此,研究旋转对弹体侵彻过程的影响具有重要的实际意义。国内一些研究者开展了相 关的研究。李晓杰等[1]模拟了高速旋转弹侵彻运动金属薄板,研究了弹体转速和薄板运动速度对弹体 最终速度和翻转角度以及弹道偏移的影响。李勇等^[2]采用LS-DYNA 对旋转弹侵彻钢板进行了模拟, 研究了转速对垂直侵彻和斜侵彻下弹体速度、加速度以及弹体质量损失的影响。赵海龙和王华[3]通过 数值模拟研究了旋转战斗部侵彻多层间隔靶过程,分析了旋转速度等因素对战斗部剩余速度、弹道偏 移角等的影响。庞春旭等[4]采用试验和数值模拟研究了旋转刻槽弹侵彻铅靶过程,发现旋转能有效地 提高弹体的侵深。庞春旭等為还研究了旋转刻槽弹对混凝土靶的侵彻。潘绪超等的通过试验研究了旋 转助推钻地弹侵彻混凝土靶,建立了侵彻速度与弹体转速及火箭发动机推力间的关系。赵子龙等^[7]建 立了考虑旋转效应的长杆弹侵彻土壤介质的动力学方程,通过数值求解得到了撞击力和侵入位移。在 国外,一些研究者^[8-9]也报道了钢、陶瓷等靶板在弹体侵彻下的性能,但公开文献中很少见关于弹体旋 转影响的详细研究。现有的研究大部分考虑正侵彻条件下弹体旋转的影响,对不同人射角斜侵彻情况 下弹体旋转的影响仍缺乏系统的研究。同时,现有研究主要采用试验方法和有限元方法(Finite Element Method, FEM)模拟。试验方法的成本非常高,单一的试验平台通常只能对应特定的转速。而 FEM 在 侵彻模拟方面存在一定困难,精度不高。

^{*} 收稿日期: 2018-11-07;修回日期: 2018-11-28

基金项目:国家自然科学基金地区基金(11862005);江西省青年科学基金(20181BAB211012);天津市高校 "中青年骨干创新人才"培养计划(津教委人函[2017]23号)

作者简介:肖毅华(1984—),男,博士,副教授.主要从事防护材料/结构设计与分析、机械结构强度与破坏 研究. E-mail: xiaoyihua@ecjtu.edu.cn

本研究考虑卵形弹侵彻 12 mm 厚 Weldox 460 E 钢板,讨论弹体旋转对其侵彻过程的影响。采用 FEM-SPH 耦合模拟技术,利用光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)模拟靶板大 变形和破坏的优势,同时方便处理弹靶间的接触界面。先根据无旋转弹体侵彻钢板的实验数据确定合 理的摩擦系数,对 FEM-SPH 耦合模型进行验证。然后考虑弹体具有不同转速的情况,通过数值模拟研 究旋转和不旋转弹体以不同着靶速度正、斜侵彻钢板过程,分析旋转对弹体剩余速度和弹道偏转角的 影响。

1 卵形弹侵彻钢板的 FEM-SPH 耦合计算模型

基于 LS-DYNA 建立了如图 1 所示的卵形钢 弹侵彻钢板的 FEM-SPH 耦合计算模型。弹体的 直径为 20 mm, 总长度为 95 mm, CRH(Caliber Radius Head)为 3, 总质量为 0.197 kg, 材料为 Arne 工具钢。钢板的厚度为 12 mm, 周边被夹 持, 中心留有直径 500 mm 的圆形自由变形区, 材 料为 Weldox 460 E 钢。上述模型设置与 Dey 等^[10]



开展的侵彻实验相同,其实验结果为模型验证提供参考。由于弹体强度远高于靶板强度,实验发现弹体在侵彻过程中变形很小。因此,采用 FEM 将弹体离散,而采用 SPH 粒子将钢板离散,从而有效地模拟钢板在弹体冲击下的大变形和破坏。为了约束钢板的周边,其边缘部分的上、下方都布置了额外的固定粒子。这些粒子与靶板粒子的材料性能相同,参与靶板粒子的 SPH 近似计算,同时对其各方向的位移施加约束,实现对靶板的夹持。弹体与钢板间的接触通过*CONTACT_NODES_TO_SURFACES 定义。钢板和弹体的材料模型分别采用*MAT_MODIFIED_JOHNSON_COOK 和*MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型。弹体和钢板材料的本构参数采用 Børvik 等^[11]的研究结果,具体的材料参数见表1和表2。

Mass density/ (kg·m ⁻³)	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	Taylor-Quinney coefficient χ	Specific heat $C_p/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Thermal expansion coefficient α/K^{-1}	Damage coupling parameter β
7850	210	0.33	0.9	452	1.2×10 ⁻⁵	0
Johnson-Cook (JC) strength model parameters						
A/MPa	<i>B</i> /MPa	n	С	$\dot{oldsymbol{arepsilon}}_0/{ m s}^{-1}$	m	$T_{\rm r}/{ m K}$
499	382	0.458	0.0079	5×10 ⁻⁴	0.893	293
JC strength mo	odel parameters	JC damage model parameters				
T _m /K	T_0/K	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
1800	293	0.636	1.936	-2.969	-0.014	1.014
JC damage mo	odel parameters	Voce hardening parameters Critical temperatur				
D _c	$p_{\rm d}$	Q_1	C_1	Q_2	<i>C</i> ₂	parameter $T_{\rm c}/{\rm K}$
1	0	0	0	0	0	1800

表 1 钢板的材料参数^[11] Table 1 Material parameters for steel plate^[11]

表 2 弹体材料参数[11]

 Table 2
 Material parameters for projectile^[11]

Mass density/(kg \cdot m ⁻³)	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	Yield stress $\sigma_{ m y}$ /MPa	Tangent modulus E_{TAN} /GPa
7850	204	0.33	1900	15

2 摩擦系数的确定

摩擦是侵彻过程中的不确定性因素。目前,关于弹靶间摩擦作用的研究还不够透彻,通常假设摩擦作用很小,甚至忽略摩擦^[12]。Børvik 等^[13]指出:对于平头弹侵彻钢板,摩擦可忽略不计;而对于锥形 弹和半球形弹,则需要考虑摩擦。这主要由于平头弹侵彻导致靶板发生冲塞失效,弹体头部与靶板间 的相对滑移较小;而尖形弹体侵彻主要导致靶板发生塑性扩孔失效,弹体头部在侵彻过程中向周围挤 压靶板材料,弹靶间相对滑移较大。

为了得到合理的摩擦系数,先在较大的区间 [0,0.1] 内对摩擦系数进行敏感性分析,然后通过局部 加密取样点对摩擦系数取值进行优化。在敏感性分析中,取0、0.025、0.050、0.075 和0.100 共 5 种不同 摩擦系数。针对每个摩擦系数,计算弹体着靶速度为 298.2、324.6、346.6 和 365.0 m/s 共 4 种工况。定 义任意摩擦系数下弹体剩余速度的计算结果与实验结果^[10] 的总体相对误差为

$$r_{\nu} = \sum_{i=1}^{4} \left(v_{ir}^{\rm c} - v_{ir}^{\rm e} \right)^2 \left| \left(v_{ir}^{\rm e} \right)^2 \right|$$
(1)

式中: v_t^a和v_t^a分别表示第*i*种着靶速度下计算和实验得到的剩余速度。弹体的剩余速度取其穿透靶板后 的刚体速度,其分量大小等于弹体总动量除以弹体总质量,通过在 LS-PrePost 中后处理时选取 Resultant Rigid Body Velocity 得到。图 2(a) 给出了不同摩擦系数下的剩余速度总体相对误差。可见,总体相对误 差随摩擦系数变化明显,说明剩余速度计算结果对摩擦系数敏感,摩擦作用不可忽略。摩擦系数为 0.05 时,剩余速度的总体相对误差最小,该值与 Børvik 等^[13]所采用的一致。考虑到在前述摩擦系数范 围内相对误差变化较大,为了进一步优化摩擦系数取值,在 0.05 的邻域范围 [0.04, 0.07] 区间内加密摩 擦系数取样,每隔 0.005 进行取样。图 2(b) 给出了在这些摩擦系数下计算得到的剩余速度总体相对误 差。当摩擦系数为 0.055 时,总体相对误差最小。表 3 给出了该摩擦系数下计算的剩余速度和弹道极 限。其中,弹道极限由剩余速度结果按以下解析模型拟合得到。





表 3	剩全速度和弹道极限的数值模拟结果与实验结果对比	

Table 3	Comparison of residual	velocity and ballistic	limit obtained by numerical	simulation and experiment
---------	------------------------	------------------------	-----------------------------	---------------------------

Method					
	$v_{\rm i} = 298.2 {\rm m} \cdot {\rm s}^{-1}$	$v_{\rm i} = 324.6 {\rm m} \cdot {\rm s}^{-1}$	$v_{\rm i} = 346.6 {\rm m} \cdot {\rm s}^{-1}$	$v_{\rm i} = 365.0 {\rm m} \cdot {\rm s}^{-1}$	Ballistic limit/(m·s·)
Experiment ^[10]	91.2	160.3	193.3	239.9	295.9
Simulation	95.3	158.7	197.6	226.2	284.0
Relative error/%	4.5	1.0	2.2	5.7	4.0

$$v_{\rm r} = a \left(v_{\rm i}^p - v_{\rm bl}^p \right)^{1/p} \tag{2}$$

式中: v_i为着靶速度, v_r为剩余速度; a、p和v_{bb}为模型常数,通过拟合得到, v_{bb}即为弹道极限。由表3可见, 剩余速度的最大相对误差为5.7%,弹道极限的相对误差为4.0%,计算模型能很好地预测剩余速度和弹 道极限。图3给出了着靶速度为298.2 m/s时两个典型时刻的弹靶变形情况。模拟结果与实验中的高 速摄像结果^[10]也符合得较好。因此,在后续研究中,摩擦系数采用0.055。





3 旋转对正侵彻和斜侵彻过程的影响

以第2节所述模型为基础,通过在模型中给弹体设定不同的转速,分析弹体正侵彻和斜侵彻钢板 时其转速对剩余速度和弹道偏转的影响。

3.1 旋转对正侵彻的影响

针对弹体正侵彻钢板,考虑弹体转速为 0、 1×10⁵、2×10⁵、3×10⁵、4×10⁵和 5×10⁵ r/min 6 种情况,分析着靶速度为 298.2 和 365.0 m/s 时转速对 弹体侵彻钢板过程的影响。图 4 给出了不同着 靶速度下弹体剩余速度随转速的变化曲线。可 见,旋转对弹体的剩余速度有较大影响。弹体的 剩余速度随转速的增大而增大。着靶速度为 298.2 m/s的剩余速度曲线斜率大于着靶速度为 365.0 m/s的曲线斜率,说明着靶速度较小时转速 对弹体的剩余速度影响较大。图 5 和图 6 分别 给出了着靶速度为 298.2 m/s 和 365.0 m/s 时不同 转速下弹体侵彻钢板的变形图。可见,对于正侵



彻,由于弹体受力较均衡、受到的偏转力矩很小,因此在不同旋转速度下弹道都没有发生明显的偏转。

图 7 为靶板中1个观察粒子在 xz 平面内的运动轨迹。该粒子在靶板上表面, 距弹体轴线约 3.4 mm。 可见, 粒子在弹体对靶板的挤压作用下沿径向运动。当弹体头部全部侵入靶板时, 粒子被挤到弹体边 缘(离弹体轴线约 10 mm)处, 粒子停止径向运动, 主要随弹体沿侵彻方向(y 方向)运动。对比弹体旋转 和不旋转的情况可见, 在弹体旋转的情况下, 由于弹靶间的摩擦力作用, 粒子沿径向运动的同时有明显 的沿弹体表面切向的运动。上述结果说明在旋转弹侵彻作用下靶板材料不仅因挤压而发生径向流动, 而且受剪切作用沿弹体切向流动, 这使靶板材料更容易破坏、失去承载能力, 因而弹体的轴向阻力变 小, 剩余速度变大。

图 8 给出了着靶速度为 298.2 和 365.0 m/s 时侵彻过程中弹体转速的变化曲线。弹体转速取为弹尾圆周上 4 个均布粒子绕弹轴线的转速的平均值。可见:弹体的初始转速越高,侵彻过程中弹体转速下降得越明显,说明越多的弹体转动动能转化为靶板的内能和动能;相同转速情况下,弹体的着靶速度较高时,侵彻过程中弹体转速的下降要小些。



Fig. 5 Penetration deformations of steel plate with different rotation speeds of projectile at an incident velocity of 298.2 m/s



Fig. 6 Penetration deformations of steel plate with different rotation speeds of projectile at an incident velocity of 365.0 m/s









图 8 转速随时间的变化曲线

Fig. 8 Curves of rotation speed time history

3.2 旋转对斜侵彻的影响

针对弹体斜侵彻钢板,考虑弹体入射角为15°、30°和45°3种情况,并仍取前述两种弹体着靶速度 和6种不同转速,对各工况进行了数值模拟。图9(a)给出了着靶速度为298.2 m/s时弹体剩余速度随转 速的变化:当入射角度为45°、转速为零时,弹体不能穿透钢板,剩余速度记为零;其余工况下弹体都能 穿透钢板。由图9(a)可见,弹体剩余速度随转速增加而单调上升,说明在该着靶速度下弹体旋转始终 使其侵彻能力加强。图9(b)给出了着靶速度为365.0 m/s时弹体剩余速度随转速的变化:所有工况下弹 体都能穿透钢板;当入射角相对较小(15°和30°)时,弹体剩余速度随转速增加而单调上升;但当入射角 增大到45°时,弹体剩余速度在转速为4×10⁵ r/min时达到最大,之后随弹体转速增加反而出现下降。图10 给出了入射角45°、转速5×10⁵ r/min时侵彻过程中典型时刻的变形图。在该工况下,弹体产生了明显的 垂直于轴线方向的横向弯曲,导致弹体在穿透靶板过程中与侵彻通道周边靶板材料的接触碰撞增加, 受到的阻力增大,因而该工况下的剩余速度反而低于低转速情况下的剩余速度。上述结果表明弹体转 速的增高并不总使其侵彻能力加强,而与着靶速度和入射角间有一定的匹配关系。





Fig. 10 Deformations for incident velocity 365.0 m/s, incident angle 45° and rotation speed 5×10⁵ r/min

弹体在斜侵彻过程中受力非对称,发生明显的弹道偏转。为描述侵彻过程中某时刻弹体偏转的程度,取图 11 所示弹身首末两端中心点连线向量*P*₂*P*₁的方向变化进行度量。*P*₂*P*₁(即弹体轴线)在初始时刻位于 *yz* 平面(入射面)内,其相对于 *y* 轴负向的夹角θ即为弹体入射角。在侵彻过程中,*P*₂*P*₁偏转到 *P*₂*P*₁,相对于初始时刻产生图 11 所示的 *yz* 面内的偏转角Δα₁和沿 *yz* 面外的偏转角Δα₂。图示情况下 Δα₁和Δα₂为正值,反之为负。为叙述方便,同时定义图 11 所示的弹体转向为正,反之为负。

图 12 给出了着靶速度为 298.2 m/s 时弹体偏转角Δα₁的变化曲线。可见, 在 yz 面内的弹体偏转角 Δα₁都呈先增大再减小、减小到零后接着反向增大的趋势。最初偏转角增大的过程为弹体头部侵入过 程, 此时与弹体头部上方作用的靶板材料少, 而与其下方作用的靶板材料多, 受力不平衡, 受到偏转力 矩,因而发生正向偏转。当弹体尖端开始穿出靶板背面时,与弹体头部上方作用的靶板材料多,与其下 方作用的靶板材料少,所受偏转力矩方向与侵入时恰好相反,因而弹体沿相反方向转动,偏转角Δα₁反 向增大。在弹体尖端穿出靶板背面到整个弹体头部穿出靶板背面的过程中,各工况下的偏转角Δα₁都 近似线性地增大。在弹体头部全部穿出靶板背面后,弹身与靶板中形成的侵彻通道周边的材料发生摩 擦和碰撞作用,各工况下偏转角Δα₁的变化出现很大的差异。由图 12(a)~图 12(c)可见,随着入射角的 增大,侵入过程中弹体在 yz 面内产生的偏转量也增大。在相同入射角下,随着转速的增加,弹体在 yz 面内正向偏转过程中的偏转量略有增大,而在反向偏转过程中(弹体头部全部穿出之前)的偏转量有 减小趋势。当入射角较大(如 30°和 45°)、转速高(5×10⁵ r/min)时,弹体容易出现类似图 10 所示的较明 显的横向弯曲,因而弹体偏转角Δα₁以及后述的偏转角Δα₂都出现了波浪形变化。











图 13 给出了着靶速度为 298.2 m/s 时弹体偏转角Δα2的变化曲线。当转速为零时,弹体基本不产生 沿 yz 面外的偏转。当弹体存在转动时,会出现一定的沿 yz 面外的偏转。在入射角较小(15°)时,随着 转速的增加,沿 yz 面外的偏转量呈增大趋势。当入射角增大到 30°时,沿 yz 面外的偏转量先随转速的 增加呈增大趋势,而当转速较高时,弹体出现明显的横向弯曲,弹体沿面外的偏转量呈现出波浪形变 化。入射角为 45°时的情况与入射角为 30°时的情况类似,但在较高转速下弹体沿面外的偏转量的波动 更加剧烈。当弹体正向转动时,弹体沿 yz 面外的偏转角最终都为正,弹体头部相对尾部往 x 轴正向偏转。

图 14 和图 15 分别给出了着靶速度为 365.0 m/s 时弹体偏转角Δα₁和Δα₂的变化曲线。弹体的偏转 角变化规律基本与着靶速度为 298.2 m/s 时相同。

为了研究旋转方向对弹体沿面外偏转的影响,在相同入射角和着靶速度的情况下,设定弹体转速 分别为 5×10⁵ 和-5×10⁵ r/min 两种工况进行计算。图 16 给出两种情况下相同时刻的弹体姿态。可见,



弹体旋转方向反向时,弹体沿 yz 面外的偏转方向相应地也反向。图 17 对比了这两种工况下偏转角 Δα₁和Δα₂的变化曲线。可见,在 yz 面内的偏转角Δα₁的变化大致一样;沿 yz 面外的偏转角Δα₂的大小相 近,但方向恰好相反。这种面外偏转方向变化的主要原因是:弹体在旋入靶板和旋出靶板时两侧所受 的载荷不同,因而沿 yz 面外出现偏转;而当弹体旋向改变时,旋入侧和旋出侧正好相反,因而面外偏转 方向变得相反。



图 17 弹体沿相反方向旋转时弹体偏转角的对比



4 结 论

对卵形弹正侵彻钢板的 FEM-SPH 耦合模型的摩擦系数进行了优化,优化后的模型准确地预测了 弹体的剩余速度。基于该模型,引入弹体旋转,开展了旋转卵形弹正侵彻和斜侵彻钢板的数值模拟,分 析了旋转对弹体剩余速度和弹道偏转的影响,得到如下主要结论。

(1)对于正侵彻,旋转对弹体的剩余速度影响较大,随着转速的增大,弹体的剩余速度增大,侵彻能力增强,但旋转不会引起明显的弹道偏转。

(2)对于斜侵彻,旋转对弹体的剩余速度有明显的影响,但旋转并不总使弹体的剩余速度增加、侵 彻能力增强。当侵彻速度较低、入射角较小时,弹体剩余速度随转速增加而单调增加;当侵彻速度较 高、入射角较大时,弹体在高转速下容易出现横向弯曲,弹体剩余速度可能出现随转速增加反而减小的情况。

(3)对于斜侵彻,旋转对弹道偏转也有较明显的影响。旋转会引起弹体沿入射面外发生偏转,偏转 程度随转速增加变得更剧烈;而且,当入射角较大、转速较高时,弹体会出现横向弯曲,沿入射面外偏 转量呈现波浪形变化,并且弹体沿入射面外的偏转方向取决于弹体的转向。

参考文献:

- [1] 李晓杰,姜力,赵铮,等. 高速旋转弹头侵彻运动金属薄板的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(1): 57-61.
 LI X J, JIANG L, ZHAO Z, et al. Numerical study on penetration of a high-speed-rotating bullet into the moving sheet-metal plate [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(1): 57-61.
- [2] 李勇, 于海龙, 芮筱亭. 旋转弹侵彻钢板的数值模拟 [J]. 火力与指挥控制, 2014(12): 31–35.
 LI Y, YU H L, RUI X T. Numerical study on penetration of rotating projectile into steel plate [J]. Fire Control & Command Control, 2014(12): 31–35.
- [3] 赵海龙, 王华. 旋转战斗部侵彻多层间隔靶的终点弹道的数值模拟 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2017, 38(3): 295-301.
 ZHAO H L, WANG H. Numerical simulation of terminal ballistic of rotating warhead penetrating into multi-layer spaced target
 [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2017, 38(3): 295-301.
- [4] 庞春旭, 何勇, 沈晓军, 等. 刻槽弹体旋转侵彻铝靶试验与数值模拟 [J]. 弹道学报, 2015, 27(1): 70-75.

PANG C X, HE Y, SHEN X J, et al. Experimental investigation and numerical simulation on grooved projectile rotationally penetrating into aluminum target [J]. Journal of Ballistics, 2015, 27(1): 70–75.

- [5] 庞春旭,何勇,沈晓军,等.刻槽弹体旋转侵彻混凝土效应试验研究 [J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 46-52.
 PANG C X, HE Y, SHEN X J, et al. Experimental investigation on penetration of grooved projectiles into concrete targets [J].
 Acta Armamentarii, 2015, 36(1): 46-52.
- [6] 潘绪超,何勇,何源,等. 旋转助推钻地弹侵彻混凝土靶试验研究 [J]. 固体火箭技术, 2011, 34(2): 146–149.
 PAN X C, HE Y, HE Y, et al. Experimental study of penetrating concrete target with a spin-boosted earth penetrating weapon
 [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(2): 146–149.
- [7] 赵子龙, 张瑾瑾, 黄晓琼. 长杆弹侵彻半无限厚土的旋转效应分析 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(4): 9–11. ZHAO Z L, ZHANG J J, HUANG X Q. Revolution effect analysis of a long rod penetrating into soil [J]. Journal of Vibration & Shock, 2010, 29(4): 9–11.
- [8] GUPTA N K, MADHU V. Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(3): 333–343.
- [9] MADHU V, RAMANJANEYULU K, BHAT T B, et al. An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1): 337–350.
- [10] DEY S, BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, et al. The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(8): 1005–1038.
- [11] BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2001, 20(5): 685–712.
- [12] ROSENBERG Z, DEKEL E. 终点弹道学 [M]. 钟方平, 译. 北京: 国防工业出版社, 2014: 85-86.
- [13] BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: part II: numerical simulations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(1): 37–64.

Effect of Rotation on Penetration of Steel Plate by Ogival Projectile Using Coupled FEM-SPH Simulation

XIAO Yihua¹, WU Hecheng¹, ZHU Aihua¹, DONG Huanghuang², PING Xuecheng³

School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
 Hangcha Group Co., Ltd, Hangzhou 310000, China;

3. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: A coupled FEM-SPH model for an ogival-nosed projectile penetrating into a steel plate was established. The influence of friction coefficient between projectile and plate on residual velocity estimation for projectile was analyzed. Based on the experimental data, a suitable friction coefficient was determined such that the model can accurately predict residual velocities of projectile and ballistic limit of target. Based on the model, effects of projectile rotation on its residual velocity and ballistic deflection were studied for normal and oblique penetration with two different incident velocities and different incident angles. For normal penetration, rotation has a significant influence on residual velocity of projectile while few effects on ballistic deflection. The residual velocity and penetration capability of projectile increase with the growth of rotation speed. For oblique penetration, rotation has obvious effects on both residual velocity and ballistic deflections out of incident plane are induced by projectile rotation, and the deflection direction is related to the rotation direction of projectile. **Keywords:** rotation; penetration; residual velocity; ballistic deflection