DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0416-07

三维自适应 FE-SPH 耦合算法在多层间隔金属靶侵彻问题中的应用*

胡德安[1],孙占华[1,2],朱 婷[1]
(1. 湖南大学特种装备先进设计技术与仿真教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082;
2. 94647 部队, 福建 福州 350026)

摘要: 鉴于有限元算法不能有效地模拟侵彻过程所产生的金属碎片,本文中基于三维自适应 FE-SPH 耦合算法的基本理论,自主开发了模拟多层间隔金属靶侵彻问题的三维 FE-SPH 耦合计算程序。该程序采用四面体单元对多层间隔金属靶侵彻模型进行初始离散,计算过程中,当四面体单元等效塑性应变超过某一设定值时,单元自动转化为 SPH 粒子,并引入有限单元-粒子接触算法和耦合算法,实现大变形和破碎区域采用 SPH 方法计算,克服有限元法单元畸变存在的问题。多层间隔靶侵彻算例分析表明,三维 FE-SPH 耦合计算程序采用等效塑性应变作为转化判据计算结果较稳定,并且能够有效地再现侵彻过程中所产生的碎片,能够模拟侵彻碎片对后层靶的毁伤效应。

关键词: 爆炸力学;FE-SPH 耦合算法;侵彻;等效塑性应变;多层间隔金属靶
中图分类号: O383.3 **国标学科代码**: 1303530 **文献标志码**: A

弹靶侵彻问题具有广泛的应用背景,在武器射击防护领域通常都需要研究材料或结构在强冲击载荷作用下的物理特性和相应规律。M. J. Forrestal 等[1]和 T. Bφrvik 等[2]研究了子弹侵彻多层间隔铝靶实验,得出多层间隔靶具有很好的抗侵彻性能。由于弹靶侵彻问题的实际发生过程非常短暂,涉及了变形、应力以及破坏等参考量随时间的变化规律难以通过实验手段获取,因此数值模拟成为研究此类问题的重要手段。N. K. Gupta 等[3]、董永香等[4]对不同金属材料的多层间隔靶侵彻响应进行了分析,得出了弹丸与间隔靶作用过程的物理图像和演变规律。朱锡等[5]、岳小兵等[6]对舰舱舰壁金属间隔结构的抗侵彻性能进行了实验和数值模拟研究。实验研究表明,多层间隔金属靶在侵彻过程中,由于前层靶撞击产生的碎片具有足够的动能,将继续撞击并毁伤后层靶。所以数值模拟在研究多层间隔金属靶侵彻问题时,要求能够有效的再现侵彻过程中所产生的碎片以及碎片对后层靶的毁伤过程。

拉格朗日有限元方法(FEM)具有计算效率高、适用范围广的特点,但在模拟侵彻问题时材料大变形容易导致网格畸变,从而终止计算。为了避免网格畸变,商用软件中引入单元侵蚀算法,该算法将畸变单元直接删除,无法模拟侵彻过程中所产生的碎片。T. Bφrvik 等[7]在采用有限元法模拟脆断问题时,也指出有限元法难于再现侵彻过程中所产生的碎片。光滑粒子流体动力学方法(SPH)能有效地避免网格畸变,并且能自然地模拟材料的大变形、飞溅等现象,但其计算效率相对较低成为其应用于三维建模分析的瓶颈。有限元方法与 SPH 方法在模拟强冲击问题时各有优缺点,为了集两者优势于一体,近年来,诸多学者[8-18]对 FE-SPH 耦合算法及其在高速冲击问题中的应用进行了系统的研究,但还未开展 FE-SPH 耦合算法在多层间隔金属靶侵彻问题中的应用研究。

本文基于 G. R. Johnson 等[8-10]的研究工作,在方法研究的基础上开发了三维自适应 FE-SPH 耦合计算程序,并应用于多层间隔金属靶侵彻问题模拟中,能够有效地再现侵彻过程中所产生的碎片,并模拟对后层靶的毁伤效应。

* **收稿日期**: 2013-03-06; **修回日期**: 2014-05-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(10902038)
第一作者: 胡德安(1977—),男,博士,教授,博士生导师,hudean@163.com。

1　三维自适应 FE-SPH 耦合算法

三维自适应 FE-SPH 耦合方法采用四面体单元对侵彻模型进行初始离散，并采用拉格朗日有限元法计算。计算中，设定单元向粒子的转化判据，实现单元向光滑粒子自动转化，其计算流程见图 1。

拉格朗日有限元法在计算强冲击问题时碰撞面两侧的单元容易发生大变形。为了防止大变形导致的单元畸变终止计算，在 FE-SPH 自适应耦合法中设定判据，当畸变单元达到判据设定值时则自动转化为 SPH 粒子，同时加入了 SPH 算法、有限单元-粒子接触算法和有限单元-粒子耦合算法，所转化单元的变量如应力、应变、内能、损伤等传递给粒子点。粒子的质量、速度及重心与原单元相同，粒子速度由原单元的动量计算得到。粒子的当前直径 d 及初始直径 d_0 由公式 $d=\sqrt[3]{A}$ 及 $d_0=\sqrt[3]{A_0}$ 得到，其中 A 与 A_0 是单元当前与初始体积。采取单元的等效塑性应变值为单元自动转化为 SPH 粒子的判据，将在算例中研究该判据对计算效率和结果精度的影响。

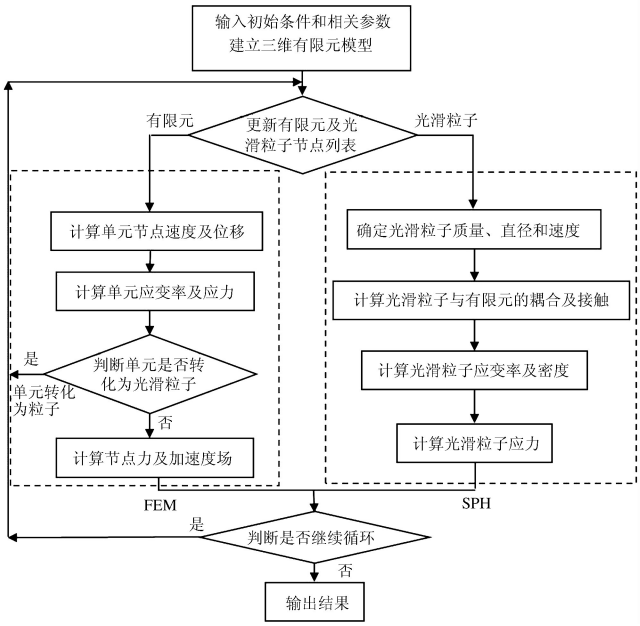

图 1 FE-SPH 自适应耦合算法计算流程

Fig. 1 The flow chat of adaptive FE-SPH coupling method

在自适应 FE-SPH 耦合算法计算过程中，当达到等效塑性应变值判据的单元自动转化为 SPH 粒子后，有限单元-粒子接触算法用于计算 2 个物体界面间的相互作用，其中一个物体采用单元离散计算，另一个物体采用 SPH 粒子离散计算。

1.1　有限元-粒子接触算法

首先确定与每个 SPH 粒子可能发生接触的所有主面。然后对每个 SPH 粒子进行穿透检测，确定粒子与单元间是否发生接触，并将每个粒子和 1 个主面或主面节点构成 1 个接触对。对于每个接触对，根据线动量守恒、角动量守恒来调整粒子和主面节点的法向速度和位置，以消除粒子对主面的穿透。光滑粒子及主面节点的法向速度变化量为：

$$\Delta v_s=\frac{-\alpha(\delta/\Delta t)}{1+R_1^2 m_s/m_1+R_2^2 m_s/m_2+R_3^2 m_s/m_3} \tag{1}$$

$$\Delta v_1=-R_1 m_s \Delta v_s/m_1 \tag{2}$$

$$\Delta v_2=-R_2 m_s \Delta v_s/m_2 \tag{3}$$

$$\Delta v_3=-R_3 m_s \Delta v_s/m_3 \tag{4}$$

式中：Δv_s、Δv_1、Δv_2 和 Δv_3 分别是分别是粒子点和单元主面上 3 个节点的第 n 次迭代时的速度增量，m_s、m_1、m_2 和 m_3 分别为粒子点和单元主面节点的质量，R_1、R_2 和 R_3 分别是粒子点传递给单元主面节点的动量的比例，δ 为 $n-1$ 次迭代时粒子的穿透距离，Δt 为迭代时间步长。α 衡量速度及位置变化的比例，在每次迭代过程中：

$$\alpha = 1/\sqrt{n-N+1} \tag{5}$$

式中：N 为总的迭代次数，一般取 2～5 次，n 为当前迭代次数。当 $n=N$ 时，$\alpha=1.0$。

1.2 有限单元-粒子耦合算法

耦合算法即将粒子粘合在单元面上，依据粒子在面内的移动距离 $\bar{\delta}$ 及动量守恒原理，建立了类似接触算法的平面内粒子及节点的速度变化公式：

$$\Delta u_s = \frac{-\alpha(\bar{\delta}/\Delta t)}{1+R_1^2 m_s/m_1 + R_2^2 m_s/m_2 + R_3^2 m_s/m_3} \tag{6}$$

$$\Delta u_1 = -R_1 m_s \Delta u_s / m_1 \tag{7}$$

$$\Delta u_2 = -R_2 m_s \Delta u_s / m_2 \tag{8}$$

$$\Delta u_3 = -R_3 m_s \Delta u_s / m_3 \tag{9}$$

式中：u_s、u_1、u_2 和 u_3 分别是粒子点和单元主面上 3 个节点的平面内速度增量。求解过程一般需要迭代 3～5 次。主面 3 个节点的法向速度改变量计算公式：

$$\Delta v_1 = -m_s h \Delta u_s l_y / m_1 y_1 \tag{10}$$

$$\Delta v_2 = -(m_s h \Delta u_s l_x + m_1 x_1 \Delta v_1)/m_2 x_2 \tag{11}$$

$$\Delta v_3 = -m_1 \Delta v_1 + m_2 \Delta v_2 / m_3 \tag{12}$$

式中：x_1、y_1 为主面 3 个节点中第 1 个节点 x 和 y 坐标，x_2 为第 2 个节点的 x 坐标，l_x、l_y 是粒子点中心到主面的法向距离。

综合以上计算，可以得到有限单元与光滑粒子耦合时需要调整的参量值。

2 多层间隔金属靶侵彻模拟

2.1 4 层间隔金属靶正侵彻问题

文献[6]中的实验模型建立了子弹正侵彻 4 层间隔金属靶数值分析模型，该模型通过多发侵彻实验获得了子弹穿透每层金属靶的剩余速度。共设置了 4 层同样的金属靶，每层靶间隔 0.03 m。采用等比例建立了 1/2 的三维数值分析模型，如图 2 所示，简化分析模型在保证子弹质量及长径比不变的情况下，忽略了实验子弹存在的小尾翼。侵彻用子弹材料为 1020 钢，尺寸如图 3(a)所示，入射速度为 1 300 m/s。金属靶材料为 A36 钢，尺寸如图 3(b)所示。子弹和金属靶均采用 Jonhson-cook 强度本构模型进行描述[19]，其材料主要参数可查阅文献[21-22]。

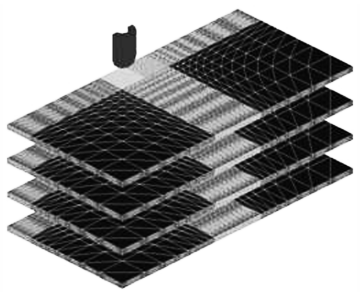

图 2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

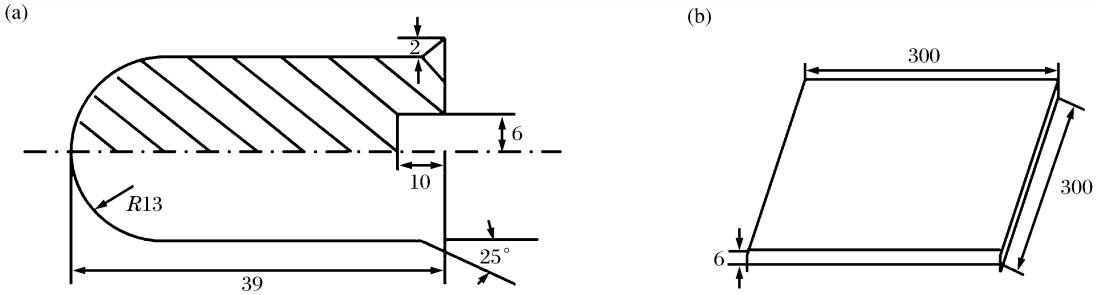

图 3 实验用弹靶尺寸

Fig. 3 Geometries of the targets and projectile

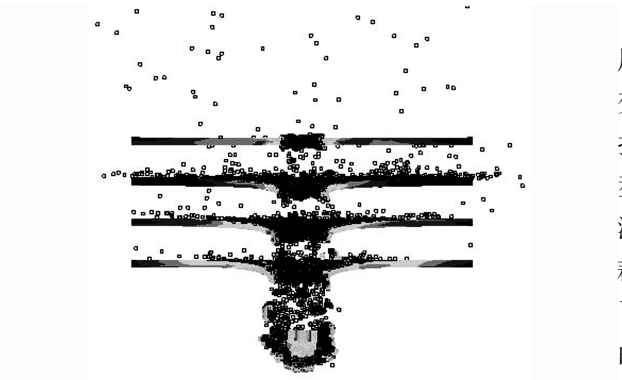

图 4 FE-SPH 耦合算法计算结果

Fig. 4 Computional result by using FE-SPH method

图 4 所示为 FE-SPH 耦合方法对子弹侵彻多层间隔金属靶的模拟结果，计算过程中等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}_p$ 取为 0.4。从图中可以看出，该方法有效的模拟了侵彻过程中所产生的碎片，并且发现该侵彻模型子弹和靶板都产生了侵彻碎片。表 3 所示为实验测得的子弹穿透各层靶的剩余速度[7]与 FE-SPH 耦合算法、有限元算法计算结果的比较。表中给出了 9 发侵彻实验测得的子弹穿透每层靶时剩余速度的平均值，“—”表示该发侵彻实验没有测得穿透该层金属靶的剩余速度，v_0 为子弹的入射速度，v_1～v_4 依次为子弹穿透 1～4 靶的剩余速度。从表中可以看出，9 发侵彻实验数据本身具有一定的离散性，并且实验测试获得的穿透第 3、4 层靶的剩余速度仅有 1 发。穿透第 1～4 层靶的模拟结果与实验结果都比较接近，但相对误差有放大的趋势，这与第 3、4 层靶实验测试数据较少以及测试存在的离散性有关。本文中方法与有限元法比较，本文算法计算得到的子弹剩余速度与实验数据符合地更好，从而验证了算法的有效性。

表 1 实验数据[6]与计算结果比较

Table 1 Comparison between experimental and simulation results

	$v/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$						$\bar{v}/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	FEM	$\delta/\%$	FE-SPH	$\delta/\%$
No.	工况 2	工况 3	工况 4	工况 6	工况 8	工况 9					
v_0	1267.0	1269.0	1308.0	1341.0	1286.0	1280.0	1291.8	1300.0	−0.63	1300.0	−0.63
v_1	1092.0	1150.0	954.0	1088.0	1196.0	1080.0	1093.3	1065.2	2.57	1119.1	−2.36
v_2	968.0	—	—	822.0	961.0	878.0	907.3	861.4	5.06	917.2	−1.09
v_3	—	—	—	—	750.0	—	750.0	651.1	13.19	741.1	1.15
v_4	—	—	—	—	—	551.0	551.0	457.3	17.01	571.5	−3.72

图 5 所示为 FE-SPH 耦合方法与有限元算法计算得到的弹体速度时程曲线。从图中可以看出，采用耦合算法，当转化判据（等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}_p$）取为 0.1、0.4 和 0.8 时，计算结果都趋于一致，说明该转化判据对弹体速度计算结果影响不敏感。不同等效塑性应变取值下，侵彻过程都计算到 0.361 s 时刻终止。随着转化判据值的减小，计算用时增加，即计算效率降低了。主要是转化判据值减小后，转化生成的粒子数量增多，导致 SPH 方法计算用时更长，从而降低了 FE-SPH 耦合方法的计算效率。所以，在确保避免网格畸变终止计算以及畸变单元影响计算精度的前提下，转化判据取值不宜过小，以提高耦合方法的计算效率。

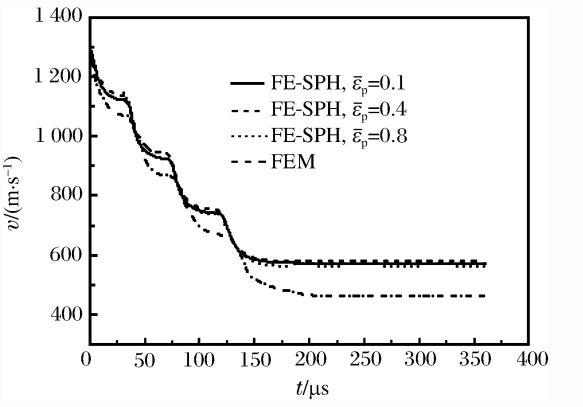

图 5 计算得到的子弹速度时程曲线

Fig. 5 Histories of the projectile velocities by simulation

2.2 2 层间隔金属靶斜侵彻问题

为了分析侵彻碎片对后层靶的侵彻破坏，参考文献[4]中的实验模型建立子弹斜侵彻 2 层间隔金属靶模型，如图 6 所示。模型中侵彻用子弹材料为 30CrMnSiNi2A，弹头直径为 14.2 cm，弹长为 43.6 cm，弹质量为 21 kg，子弹质心距离弹头 19.8 cm。金属靶材料为 RHA 装甲材料，第 1、2 层靶的厚度依次为 27 和 7 mm，间隔 65 cm。子弹的入射速度方向与靶板法线方向的夹角为 25°，入射速度为 665 m/s。子弹和金属靶均采用 Jonhson-Cook 强度本构模型进行描述，其材料主要参数分别可见参考

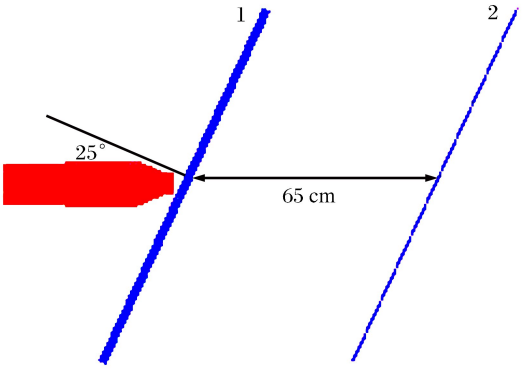

图 6 2 层间隔金属靶斜侵彻示意图

Fig. 6 Sketch of two-layered metallic targets under oblique penetration

文献[23-24]。转化判据等效塑性应变值取为 0.4。

图 7～8 分别给出了实验获得的第 1、2 层金属靶的破坏图像与自适应 FE-SPH 耦合算法、有限元算法模拟结果的比较。从图中可以看出，第 1 层靶受到子弹高速侵彻后，靶面形成很大孔洞，孔洞边缘有撕裂现象，FE-SPH 耦合方法与有限元算法都获得了与实验破坏图像一致的结果。第 2 层靶破坏图像中除了子弹侵彻形成的孔洞外，在其边缘还有一个的孔洞，该孔洞是由前层靶侵彻碎片撞击产生的。有限元算法模拟结果只得到子弹侵彻后的唯一孔洞，没有模拟出碎片的侵彻破坏现象；而 FE-SPH 耦合算法不仅模拟出了子弹的侵彻破坏图像，还得到了第 1 层靶侵彻碎片对第 2 层靶的破坏图像，获得了与实验相吻合的模拟结果。所以 FE-SPH 耦合方法在模拟碎片对后层靶的破坏问题中具有明显优势。

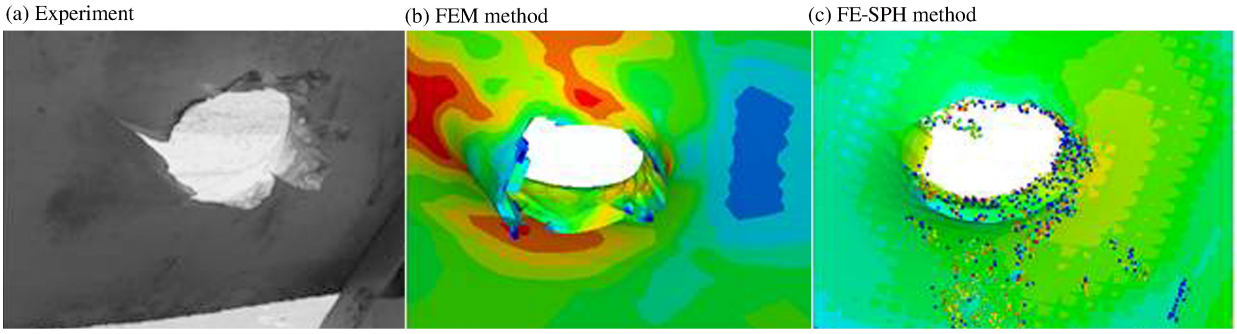

图 7 第 1 层靶侵彻破坏图像

Fig. 7 Results of experiment and simulation in the first target

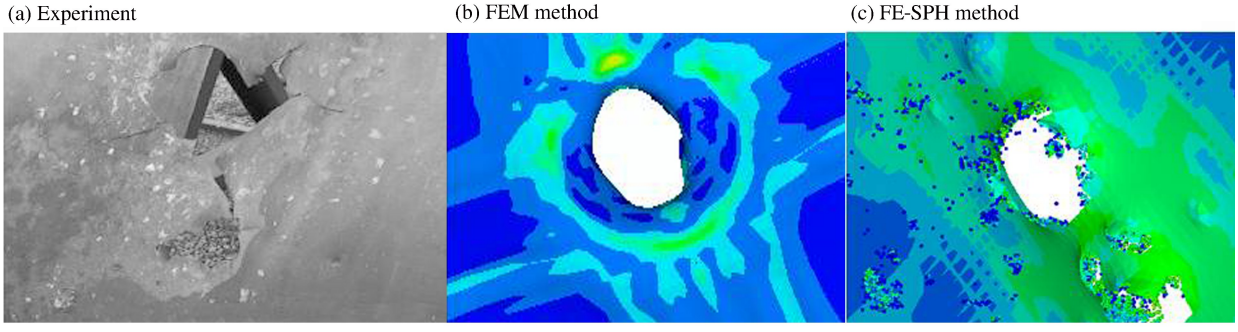

图 8 第 2 层靶侵彻破坏图像

Fig. 8 Results of experiment and simulation in the second target

3 结 论

本文中在开发三维自适应 FE-SPH 耦合计算程序的基础上，对三维多层间隔金属靶侵彻毁伤问题进行了研究，研究结果表明：

(1)自适应 FE-SPH 耦合算法有效的综合了有限元方法与 SPH 方法各自的优势。在侵彻毁伤问题分析中，模型中小变形区域占整个分析模型的大部分区域，采用有限元方法可以有效的提高模型的计算效率。而针对大变形特别是发生破坏的区域，采用 SPH 算法可以有效的再现侵彻产生的碎片，避免有限元发存在的网格畸变问题。

(2)数值模拟结果验证了 FE-SPH 耦合算法在模拟多层间隔金属靶侵彻问题时具有较好的计算精度，同时可以有效的再现侵彻碎片对后层靶的毁伤破坏，这是有限元算法所无法实现的。

参考文献：

[1] Forrestal M J, Bϕrvik T, Warren T L. Perforation of 7075-T651 aluminum armor plates with 7.62 mm APM2 bullets[J]. Experimental Mechanics, 2010,50(8):1245-1251.

[2] Bϕrvik T, Clansen A H, Eriksson M, et al. Experimental and numerical study on the perforation of AA6005-T6 panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,32(1/2/3/4):35-64.

[3] Gupta N K, Madhu V. An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(5/6): 395-414.

[4] 董永香，冯顺山，段相杰. 弹丸斜侵彻多层间隔靶特性研究[J]. 中北大学学报：自然科学版，2010,31(3):221-226.
Dong Yong-xiang, Feng Shun-shan, Duan Xiang-jie. Oblique penetration characteristics of multi-layered spaced targets by steel projectiles[J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2010,31(3):221-226.

[5] 朱锡，梅志远，刘润泉，等. 舰用轻型复合装甲结构及其抗弹实验研究[J]. 爆炸与冲击，2003,23(1):61-66.
Zhu Xi, Mei Zhi-yuan, Liu Run-quan, et al. Warship's light composite armor structure resistibility for ballistic impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):61-66.

[6] 岳小兵，龙源，方向，等. 高速模拟钢质弹丸侵彻多层靶仿真[J]. 解放军理工大学学报：自然科学版，2003(4): 40-44.
Yue Xiao-bing, Long Yuan, Fang Xiang, et al. Numerical simulation of steel projectile penetrating intomulti-layer spaced metal plates[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science, 2003(4):40-44.

[7] Bϕrvik T, Hopperstad O S, Pedersen K O. Quasi-brittle fracture during structural impact of AA7075-T651 aluminum plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010,37(5):537-551.

[8] Johnson G R. Linking of lagrangian particle methods to standard finite element methods for high velocity impact simulations[J]. Nuclear Engineering and Design, 1994(1):265-274.

[9] Johnson G R, Stryk R A. Symmetric contact and sliding interface algorithms for intense impulsive loading computations[J]. Compute Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001,190(35/36):4531-4549.

[10] Johnson G R, Stryk R A. Conversion of 3D distorted elements into meshless particles during dynamic deformation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(9):947-966.

[11] Sauer M. Simulation of high velocity impact in fluid-filled containers using finite elements with adaptive coupling to smoothed particle hydrodynamics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011,38(6):511-520.

[12] Sonia F M, Javier B and Antonio H. Continuous blending of SPH with finite elements[J]. Computers & Structures, 2005,83(17/18):1448-1458.

[13] Vuyst T D, Vignjevic R, Campbell J C. Coupling between meshless and finite element methods[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(8):1054-1064.

[14] 王吉，王肖钧，卞梁. 光滑粒子法与有限元的耦合算法及其在冲击动力学中的应用[J]. 爆炸与冲击，2007,27(6):522-528.
Wang Ji, Wang Xiao-jun, Bian Liang. Linking of smoothed particle hydrodynamics method to standardfinite element method and its application in impact dynamics[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(6):522-528.

[15] 梁超，刘平，胡德安，等. FE-SPH 自适应耦合方法模拟钢筋混凝土靶侵彻问题[C]//全国强动载效应及防护学术会议暨复杂介质/结构的动态力学行为创新研究群体学术研讨会论文集. 2013:28-39.

[16] 胡德安，韩旭，肖毅华，等. 光滑粒子法及其与有限元耦合算法的研究进展[J]. 力学学报，2013,45(5):639-652.
Hu De-an, Han Xu, Xiao Yi-hua, et al. Research developments of smoothed particle hydrodynamicsmethod and its coupling with finite element method[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013,45(5):639-652.

[17] 杨刚，梁超，刘平，等. 基于三维 FE-SPH 自适应耦合算法的子弹侵彻混凝土靶跳飞问题模拟[J]. 工程力学，2013,30(9):276-282.
Yang Gang, Liang Chao, Liu Ping, et al. Numerical simulation of ricochet problem of projectile penetrating into

concrete target based on 3d FE-SPH adaptive coupling algorithm[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(9):276-282.

[18] 肖毅华，胡德安，韩旭.一种有限元-光滑粒子流体动力学耦合算法[J].计算物理，2011,28(2)：219-225.
Xiao Yi-hua, Hu De-an, Han Xu. A coupling algorithm of finite element and smoothed particle hydrodynamics [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011,28(2):219-225.

[19] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]// Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. Netherlands, 1983.

[20] Gilat A, Wu X R. Plastic deformation of 1020 steel over a wide range of strain rates and temperatures[J]. International Journal of Plasticity, 1997,13(6/7):611-632.

[21] 范志强,高德平,覃志贤,等.20 号钢的冲击拉伸力学性能试验研究[J].燃气涡轮试验与研究,2006(4):35-37.
Fan Zhi-qiang, Gao De-ping, Qin Zhi-xian, et al. Experimental study of 20 steel under tensile impact[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2006(4):35-37.

[22] Schwer L. Optional strain-rate forms for the Johnson-cook constitutive model and the role of the parameter epsion _0[C]// Proceedings of the LS_DANY Anwenderforum. Frankenthal, Germany, 2007.

[23] 吴海军,姚伟,黄风雷,等.超高强度钢 30CrMnSiNi$_2$A 动态力学性能实验研究[J].北京理工大学学报,2010,3(3):258-262.
Wu Hai-jun,Yao Wei, Huang Feng-lei, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties ofultrahigh strength 30CrMnSiNi$_2$A steel[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010,3(3):258-262.

[24] Jutras M. Improvement of the characterisation method of the Johnson-Cook model[D]. Quebec: Laval University, 2008.

Application of 3D FE-SPH adaptive coupling algorithm to penetration analysis of spaced multi-layered metallic targets

Hu De-an[1], Sun Zhan-hua[1,2], Zhu Ting[1]

(1. *State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha* 410082, *Hunan, China*;
2. *Unit* 94647 *PLA, Fuzhou* 340026, *Fujian, China*)

Abstract: As the metal fragments of penetration can not be effectively simulated by finite element method (FEM), a three-dimensional (3D) calculation code was developed to simulate penetration problem of multi-layered spaced metal plates based on theory of 3D FE-SPH adaptive coupling algorithm. Numerical models are approximated initially by tetrahedral elements. When equivalent plastic strain of elements reaches a specified value, they are converted into particles and are calculated by Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method. Then the regions of large deformation and crush are simulated by SPH method, as SPH method overcome the distortion of elements in FEM. Contact method and coupling algorithm are used to calculate the interface between FEM and SPH method. Two numerical examples are presented to validate the 3D FE-SPH code by representing penetration process of spaced multi-layered metallic targets. The numerical simulation results show that good accuracy and stability are compared to experiment, when equivalent plastic strain is used as criterion of conversion.

Key words: mechanics of explosion; FE-SPH coupling method; penetration; equivalent plastic strain; multi-layered metallic targets

(责任编辑 王易难)