



基于 SPH 的分层钢板抗半球头弹侵彻的数值模拟

强洪夫,孙新亚,王 广,陈福振,石 超,黄拳章

引用本文:

强洪夫,孙新亚,王广,等. 基于 SPH 的分层钢板抗半球头弹侵彻的数值模拟 [J]. 高压物理学报,2018,32(5):055102.

QIANG Hongfu,SUN Xinya,WANG Guang,et al. Numerical Simulation of Anti-Penetration of Laminated Steel Plate by Hemispherical-Nosed Projectile Using SPH [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2018,32(5):055102.

当期更多内容>>

您可能感兴趣的其他文章:

[双硬度靶对球形弹丸的防护性能](#)

周楠,王金相,杨瑞,谢君

DOI: 10.11858/gywlxb.2014.05.009

[长径比对侵彻阻力的影响](#)

吴普磊,李鹏飞,杨磊,赵向军,宋浦

DOI: 10.11858/gywlxb.20170631

[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](#)

徐晨阳,张先锋,刘闯,邓佳杰,郑应民

DOI: 10.11858/gywlxb.20170592

[弹丸超高速撞击防护屏碎片云数值模拟](#)

张伟,庞宝君,贾斌,曲焱喆

DOI: 10.11858/gywlxb.2004.01.009

[动能弹对混凝土靶侵彻深度的 PSO-SVM 预测](#)

潘强,张继春,肖清华,邹新宽,石洪超

DOI: 10.11858/gywlxb.20170577

[基于物质点法的水下爆炸冲击波数值模拟](#)

陈卫东,杨文森,张帆

DOI: 10.11858/gywlxb.2013.06.004

基于 SPH 的分层钢板抗半球头弹 侵彻的数值模拟^{*}

强洪夫, 孙新亚, 王 广, 陈福振, 石 超, 黄拳章

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 随着高强度、高抗冲击特性钢结构在防护装甲、武器库防护门等军事领域得到广泛应用, 钢结构的抗冲击性能成为研究的重点和热点。采用光滑粒子流体动力学方法 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 对半球头弹撞击多层钢板的过程进行了数值模拟, 并与实验对比, 分析了半球头弹撞击后钢板的失效形式, 得到了撞击点处钢板盘式隆起、蝶形破坏等过程, 得到了钢板的 von Mises 应力分布以及半球头弹的剩余速度, 验证了 SPH 方法在模拟钢板侵彻变形问题上的有效性。通过数值模拟, 研究了钢体层数、钢体厚度对其抗侵彻特性的影响, 研究表明: 3 mm 时单层钢板比多层钢板的防护能力强, 9 mm 时多层钢板比单层钢板的防护能力强, 12 mm 时多层钢板和单层钢板的防护能力相当。

关键词: 金属靶板; 靶体结构; 侵彻; SPH

中图分类号: O385

文献标识码: A

现代战争中, 高强度、耐冲击的钢结构是目前坦克装甲、武器库等的主要防护装置。随着高精度、高能量武器的使用, 钢结构在防护过程中可能遭受到高速冲击作用, 为评估和提高钢结构防护装置的抗打击能力, 有必要对冲击载荷作用下钢结构的力学响应过程进行研究, 总结其破坏规律, 从而提高其耐冲击性。

自 20 世纪 40 年代 Taylor^[1] 开展了金属弹体撞击金属靶板实验后, 国内外就不同结构弹体侵彻金属靶板问题进行了大量的实验研究、数值仿真和理论分析工作^[2-10]。Strong^[2] 通过弹体撞击金属靶板, 分析了弹体变形对靶板失效和弹道极限速度的影响。Dey^[3] 对不同形状弹头侵彻不同强度钢板的过程进行实验和数值模拟。实验研究虽能得出具体的实验值, 但耗费严重、危险系数大、难度高。因此数值模拟成为研究此类问题的主要方法和手段^[4-7], 但传统网格法在计算中出现了网格畸变、失效细节描述不清楚等问题。光滑粒子流体动力学方法 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 作为一种纯 Lagrange 的无网格粒子方法, 在数值模拟固体介质的断裂和破碎过程时, 能精确捕捉界面变化、材料破坏等, 因此非常适合该类问题的求解^[8-10]。强洪夫等^[8] 通过 SPH 方法对聚能射流侵彻混凝土靶板的过程进行模拟仿真, 较好地描述了侵彻过程中弹速变化、碎片飞溅等细节问题。但是, 关于 SPH 方法模拟侵彻钢板过程中靶板盘式隆起、冲塞挤压成形、碎片自由飞溅等复杂过程的研究国内外鲜有报道。

利用 SPH 方法对半球形弹头侵彻钢板的过程进行数值模拟, 并与实验对比, 验证 SPH 算法在模拟钢板侵彻变形问题上的有效性; 分析钢板失效变形模式机理, 并得到各层钢板 von Mises 应力分布情况。进一步通过大量有效的数值模拟探讨钢板板层数和钢板厚度对抗侵彻特性的影响。

^{*} 收稿日期: 2017-10-22; 修回日期: 2017-11-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51276192); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 基金项目 (61338)

作者简介: 强洪夫 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构强度、固体发动机等方面的研究。

E-mail: Qiang@263.net

通信作者: 孙新亚 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸冲击等方面的研究. E-mail: 1430167246@qq.com

1 模型与算法

1.1 控制方程和状态方程

1.1.1 控制方程

中低速半球形弹头(弹头端头为半球形)撞击钢板的过程可以当作具有材料强度的流体动力学问题解决,Lagrange 框架下的控制方程组表述为

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{1}{\rho} [-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{de}{dt} = -\frac{p}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{v} + \tau \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (3)$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v} \quad (4)$$

式中: d/dt 表示物质导数, ρ 、 $\mathbf{v}$ 、 p 分别为密度、速度、压强, $\boldsymbol{\tau}$ 为偏应力张量, $\mathbf{g}$ 为单位质量体积力。

1.1.2 状态方程

为计算撞击过程中的各向同性压力 p ,引入 Mie-Grüneisen 状态方程

$$p(\rho, e) = \left(1 - \frac{1}{2}\Gamma\eta\right)p_H(\rho) + \Gamma\rho e, \quad \eta = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (5)$$

$$p_H = \begin{cases} a_0\eta + b_0\eta^2 + c_0\eta^3 & \eta > 0 \\ a_0\eta & \eta < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $a_0 = \rho_0 C_s^2$, $b_0 = a_0[1 + 2(S_s - 1)]$, $c_0 = a_0[2(S_s - 1) + 3(S_s - 1)^2]$ 。 Γ 为 Grüneisen 参量, $\Gamma = 2.0$; $C_s = 5328$ m/s, 为冲击速度与粒子速度的线性相关常量; $S_s = 1.338$, 为斜率^[8,11]。

1.2 本构方程

半球形弹头以中低速(小于 1.3 km/s)碰撞金属靶板时,弹体几乎无变形产生,弹道近似为直线,弹体的质量消耗可以不计,这时侵彻过程可以看作刚性侵彻,弹体可以看作刚性弹^[12],其运动方程由牛顿第二定律的质点方程确定。

靶板本构方程采用 Johnson-Cook^[8]本构模型,其流动应力可表示为

$$\sigma_{eq} = [A + Br^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (7)$$

式中: $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$, T_0 是室温, T_m 是材料熔点; A 、 B 、 C 、 n 和 m 是材料常数, r 是累积损伤塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}$ 是累积塑性应变, $\dot{\epsilon}_0$ 是自定义参考应变率。

为了表征分层钢板之间的粘结锚固作用,引入 Nilson^[13]粘结滑移关系式,其粘结应力表达式为

$$\sigma_e = 9.78 \times 10^2 s - 5.72 \times 10^4 s^2 + 8.35 \times 10^5 s^3 \quad (8)$$

式中: $s = \sqrt{\delta\alpha^2 + \delta\beta^2 + \delta\gamma^2}$, $\delta\alpha$ 、 $\delta\beta$ 、 $\delta\gamma$ 分别表示 α 、 β 、 γ 3 个方向上的相对位移。

1.3 SPH 算法基本理论

SPH 算法是模拟流体流动的一种拉格朗日型粒子方法,通过使用一系列任意分布的粒子来求解具有各种边界条件的积分方程或偏微分方程。SPH 方法通常通过核函数插值实现场变量或场变量梯度的插值,通过粒子近似实现对核函数估计积分表达式的粒子离散^[11]。

1.3.1 人工黏度

为了能利用流体动力学方法解决冲击问题,Monaghan^[14]提出了人工黏度模型

$$\Pi_{ij} = \begin{cases} \frac{-\alpha_1 \bar{c}_{ij} \mu_{ij} + \beta_1 \mu_{ij}^2}{\rho_{ij}} & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij} < 0 \\ 0 & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{ij} = \frac{h_{ij} \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|^2 + \eta^2}, \bar{c}_{ij} = \frac{1}{2} (c_i + c_j), \bar{\rho}_{ij} = \frac{1}{2} (\rho_i + \rho_j),$$

$$h_{ij} = \frac{1}{2} (h_i + h_j), v_{ij} = v_i - v_j, x_{ij} = x_i - x_j$$

式中: h 为光滑长度, c 为粒子声速, α_1 和 β_1 为常数, 取值与应用的问题有关, α_1 相关的项是体积黏度, β_1 相关的项是用于在高马赫数时用于防止粒子的相互穿透。

1.3.2 控制方程的 SPH 离散

中低速半球形弹头撞击金属薄板过程属于 SPH 方法在具有材料强度的冲击动力学方面的应用。为了解决冲击域内求解结果的非物理振荡, 且将冲击面内的动能以热能的形式耗散, 引入人工黏性^[10], SPH 离散的控制方程可写作

$$\begin{cases} \frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \\ \frac{dv_i^a}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{a\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{a\beta}}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} \\ \frac{de_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) v_{ij} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^a} + \frac{1}{\rho_i^2} S_i^{a\beta} \bar{\epsilon}_i^{a\beta} \\ \frac{dx_i}{dt} = v_i \end{cases} \quad (10)$$

式中: 应力张量 $\sigma^{a\beta} = -p\delta^{a\beta} + S^{a\beta}$, 应变率张量 $\dot{\epsilon}^{a\beta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^a}{\partial x^\beta} + \frac{\partial v^\beta}{\partial x^a} \right)$, 应力偏量 $S^{a\beta} = S^{a\beta} Y_{JC} / J_2$ 。 N 为求解区域内粒子总数; $X_i, X_j (X: v, m, p, \rho)$ 分别表示 i 粒子和 j 粒子的量; W 是光滑函数, 一般选用三次样条函数; α, β 表示空间坐标轴方向。

2 数值模拟

邓云飞等^[6]使用空气炮发射装置, 在一级气炮上, 用半球头弹分别撞击厚度为 6 mm 的单层靶和 3 层 2 mm 厚度钢板叠加的 3 层靶, 靶板材料采用 Q235 钢。弹体材料为特殊热处理的 38CrSi 合金钢, 其名义质量(产品上标定的质量)为 34.5 g, 直径为 12.3 mm。本研究设计的算例条件与该实验实施条件相同, 将靶板的厚度的计算范围由 6 mm 扩大到 3~12 mm。基于易分网格的原则, 数值模拟中弹体直径取为 12 mm, 弹体的质量取 35 g。半球形弹体几何模型见图 1。

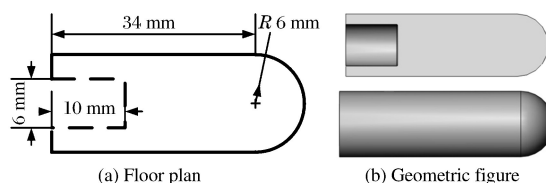


图 1 半球形弹体几何模型图

Fig. 1 Geometric model of hemispherical-nosed projectile

2.1 半球头弹体侵彻钢板数值模型

算例中, 弹体速度中等, 是典型的中速弹体侵彻钢板问题, 弹体及钢板的几何模型如图 2 所示, 图中黄、红、绿分别代表第 1、第 2 和第 3 层钢板。由于弹体的尺寸远远小于钢板尺寸, 可以认为钢板是无限大。在这种情况下, 钢板和弹体都是轴对称图形, 为了简化计算, 将实验中原来的方形钢板简化为直径为 120 mm 的圆板, 钢板由厚度值为 2 mm 的 3 个等厚板无间隙粘结锚固而成。具体的粒子配置如图 2 所示, 粒子间距为 1 mm, 其中弹体粒子数为 4 060, 钢板粒子数为 37 040。

2.2 半球头弹体侵彻钢板数值模拟

侵彻过程中弹体变形非常小, 计算中弹体按刚体处理, 弹体密度为 7.98 g/cm³, 弹体初始速度为 434.93 m/s。钢板材料为 Q235 钢材料, 钢板密度值为 7.8 g/cm³, 使用 Johnson-Cook (J-C) 本构模型, 具体材料参数见表 1。钢板的层与层之间通过 Nilson 粘结滑移关系式施加粘结应力。

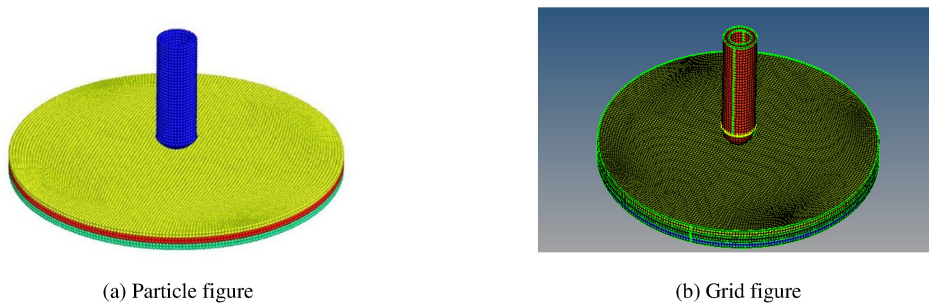


图 2 数值模拟模型图
Fig. 2 Numerical simulation model

表 1 Johnson-Cook 本构模型参数
Table 1 Johnson-Cook constitutive model parameters

$A/$ MPa	$B/$ MPa	n	C	m	$T_m/$ K	$\dot{\rho}_0/$ s^{-1}	$c_V/$ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$T_0/$ K	r
300	426	0.34	0.015	1.0	775	1.0	875	300	0.1

数值模拟中,光滑长度取 1.5 倍粒子间距,时间积分采用蛙跳格式,时间步长通过 Monaghan^[11] 提出的时间步长公式求得。

下面主要以初速度为 434.93 m/s 的长杆弹为例,对整个侵彻过程进行详细分析。图 3 表示半球形弹头侵彻 3 层钢的数值模拟过程。(a) 弹体撞击钢板瞬间,材料界面和弹靶自由表面还未反射稀疏波,弹靶接触点附近产生高压并向钢板四周传播应力波;(b) 开坑阶段,弹体向前运动,钢板在应力波的作用下开坑,钢板背面产生盘式隆起,弹坑也不断向四周延扩;(c) 侵彻贯穿阶段,钢板背表面隆起部位开裂,产生冲塞,弹顶穿出钢板背面,冲塞随着弹体运动;(d) 贯穿脱离阶段,弹体完全穿过钢板,钢板背面盘式隆起,并产生蝶式变形失效,冲塞随弹体继续运动。

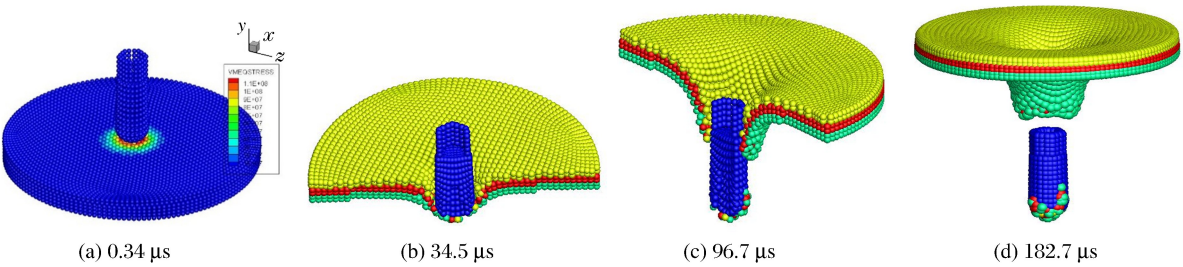


图 3 半球形弹头侵彻 3 层金属靶板数值模拟
Fig. 3 Numerical simulation of 3-layer plates impacted by hemispherical-nosed projectile

图 4 给出了采用实验和 SPH 方法数值模拟过程中每层钢板失效变形的对比,图 5 表示的是钢板中 von Mises 应力的分布情况。由图 4 可以看出,第 1 层钢板的失效模式主要是盘式隆起,类似于延性孔洞的扩展,弹孔周围的材料在应力波的作用下,不断向四周扩张,最终发生花瓣形卷边破坏,产生冲塞;第 2 层和第 3 层薄板的失效模式主要是蝶形变形,弹孔周围的材料沿着撞击方向向前扩张,形成显著的盘式隆起,顶部发生花瓣开裂。由图 5 可以看出,在盘式隆起的部位 von Mises 应力最大,第 2 层靶板盘式隆起部位的 von Mises 应力比其他两层钢板的大;第 1 层钢板边缘区域产生 4 条裂纹,第 2、第 3 层钢板没有出现裂纹,相比,第 3 层的 von Mises 应力较小。

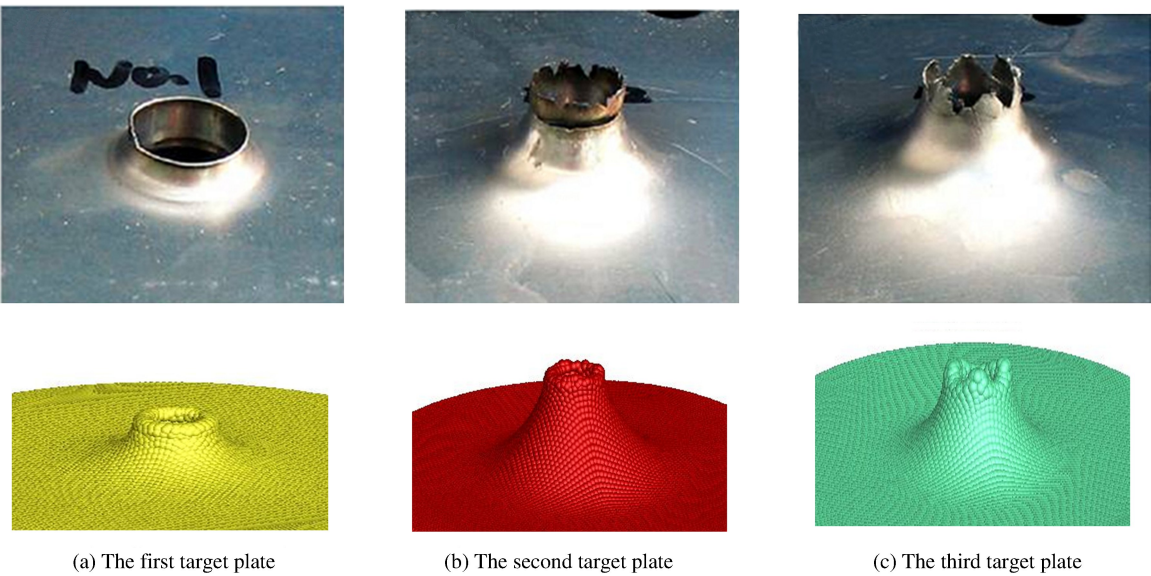


图 4 半球形弹头撞击靶板实验和数值模拟对比

Fig. 4 Experiment and numerical simulation of plates impacted by hemispherical-nosed projectile

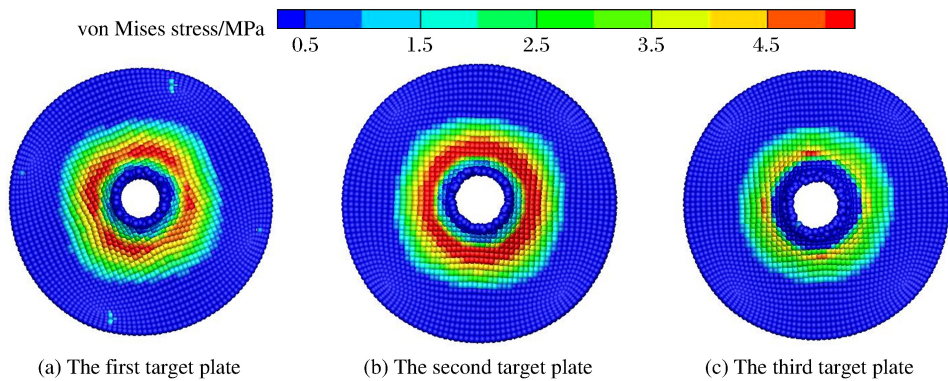


图 5 半球形弹头贯穿金属靶板后金属靶板中 von Mises 应力的分布

Fig. 5 von Mises stress distribution in metal target after hemispherical-nosed projectile penetration

图 6 给出了半球形弹头撞击 6 mm 单层钢板实验和数值模拟对比,可以看出,单层钢板的主要失效模式是剪切作用引起的盘式隆起。通过对比验证发现,数值模拟得到的结果符合钢板的侵彻物理规律,与实验结果吻合较好。



图 6 半球形弹头撞击 6 mm 单层靶板实验和数值模拟对比

Fig. 6 Experiment and numerical simulation of 6 mm plates impacted by hemispherical-nosed projectile

半球形弹头撞击多层钢板的算例中,弹体剩余速度实验值为 337.66 m/s,数值模拟中弹体的剩余速度为 361.3 m/s。数值仿真与实验剩余速度的相对误差为 6.54%,产生误差的原因主要是实验中提供的名义质量与实际质量之间存在误差、半球形弹头试验件的尺寸存在测量误差、实验中存在空气阻力等因素的影响,验证了 SPH 数值模拟半球头弹体侵彻钢板过程中的有效性。同时数值计算得到,等厚 6 mm 的单层钢板工况条件下,弹体的剩余速度数值计算值为 367.24 m/s,该值大于多层钢板的值,说明多层钢板的防护能力高于单层钢板的防护能力。

3 半球头弹体侵彻不同层数钢板对比研究

为了进一步探讨靶板结构和钢板厚度对抗侵彻特性的影响规律,采用 SPH 方法对其他 6 种工况(见表 2)的钢板进行数值仿真,计算结果见图 7。

表 2 6 种不同工况的金属靶板尺寸表
Table 2 Six different conditions of metal target board sizes

Example	Number of layers	Total thickness/mm	Body velocity/(m · s ⁻¹)
1	1	3	500
2	3	3	500
3	1	9	500
4	3	9	500
5	1	12	500
6	3	12	500

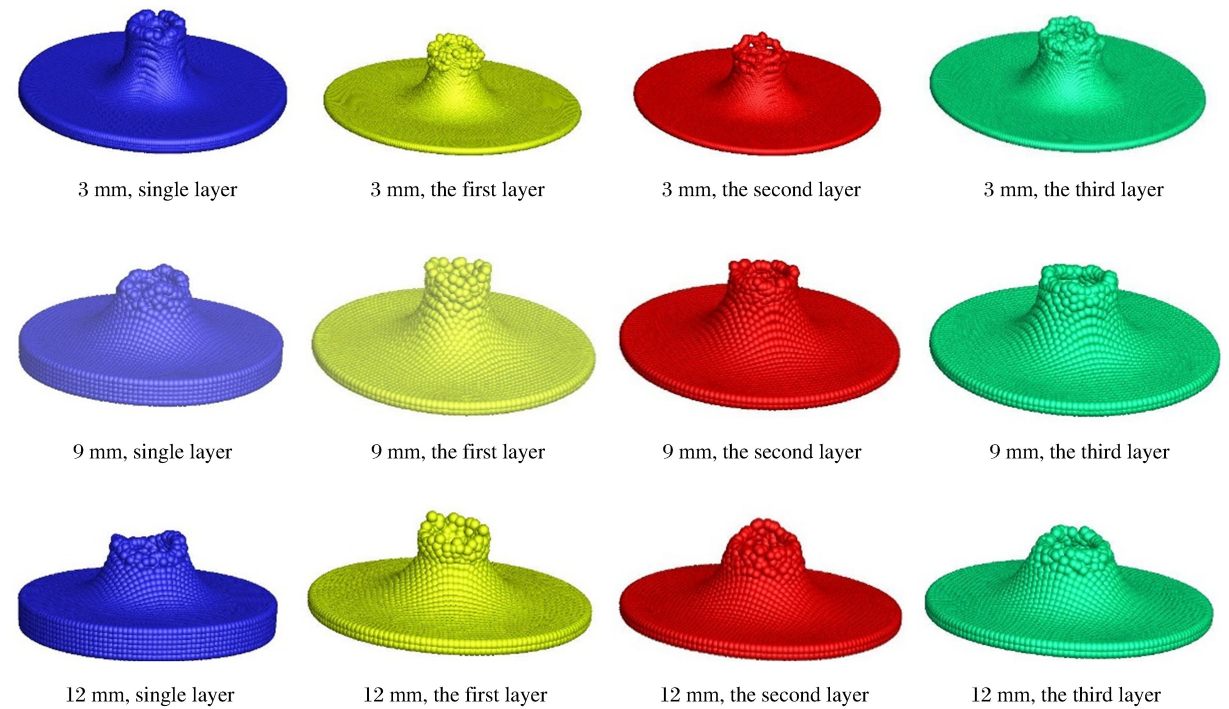


图 7 6 种工况下金属靶板被半球形弹头侵彻贯穿后的损伤
Fig. 7 Damage in other 6 different target plates after impacted by hemispherical-nosed projectile

图 8、图 9 和图 10 分别为半球形弹头侵彻 3、9 和 12 mm 厚的 3 层钢板和等厚单层钢板过程中,弹体速度的变化情况。

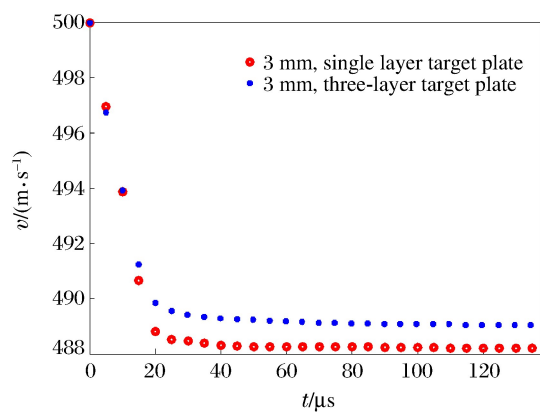


图 8 靶板厚度为 3 mm 时弹体速度变化趋势

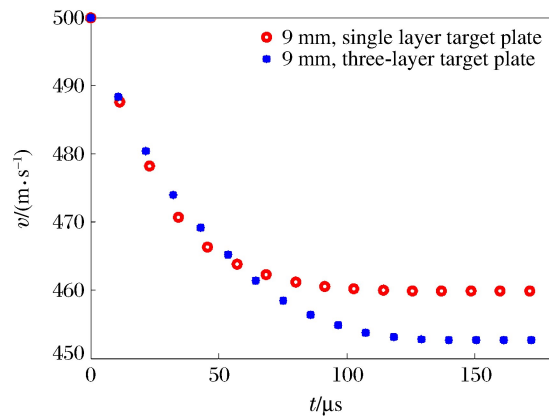
Fig. 8 Missile velocity variation trend
for 3 mm target plate

图 9 靶板厚度为 9 mm 时弹体速度变化趋势

Fig. 9 Missile velocity variation trend
for 9 mm target plate

从图中可以看出:钢板厚度为 3 mm 时,单层钢板的剩余速度值比多层钢板的剩余速度值小;钢板厚度为 9 mm 时,单层钢板的剩余速度值比多层钢板的剩余速度值大;钢板厚度为 12 mm 时,单层钢板的剩余速度值比多层钢板的剩余速度值略大,由图 7 可知该厚度情况下,单层和多层钢板的失效模式相同。基于剩余速度越小,防护效果越好的判断标准^[1],可知:当钢板的总厚度比较小时,单层钢板比多层钢板的防护能力强;当钢板超过一定的厚度值后,多层钢板比单层钢板的防护能力强;当钢板的厚度比较大时,多层钢板和单层钢板的防护能力几乎相同。

钢板的抗侵彻能力主要取决于钢板结构强度、钢板的失效模式等^[6]。钢板厚度较小时,分层使钢板的结构强度减弱^[6],因此分层会降低其抗侵彻特

性;钢板厚度增大时,分层对钢板结构强度影响较小,但分层界面上冲击波的反射使多层和单层钢板的失效模式发生改变,因此分层会提高其抗侵彻特性;当钢板的厚度增大到一定程度后,由于厚度增大冲击波的反射作用减小,因此多层和单层的失效模式基本保持不变^[15]。

4 结 论

采用 SPH 方法对半球头杆弹撞击钢板的过程进行数值模拟,研究了钢板层数和钢板厚度对抗侵彻特性的影响规律,分析了多层钢板和单层靶板的失效模式和防护能力。

(1) 通过比较实验数据与 SPH 方法数值模拟获得的结果,数值仿真与实验所得的剩余速度的相对误差为 6.54%,发现两者之间存在很好的一致性,验证了本研究 SPH 方法在模拟弹体冲击钢板问题上的有效性。

(2) 采用 SPH 方法数值模拟半球头弹体侵彻钢板的过程,得出与实验相一致的结论,即钢板的主要失效模式是剪切引起的盘式隆起,而多层钢板失效模式主要是整体的蝶形变形和局部的盘式隆起,同时也发现第 2 层的 von Mises 应力最大,第 3 层的 von Mises 应力最小。

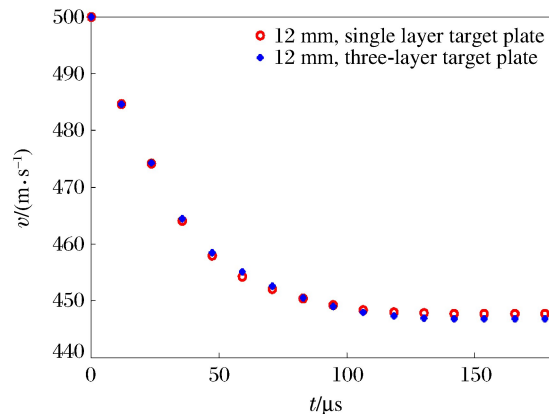


图 10 靶板厚度为 12 mm 时弹体速度变化趋势

Fig. 10 Missile velocity variation trend
for 12 mm target plate

(3) 通过对比其他6种工况下剩余速度值,发现单层3 mm钢板的防护效果比3层1 mm厚度叠加而成的多层钢板的防护效果好,而3层等厚钢板叠加而成的9 mm和12 mm的多层钢板的防护效果比等厚的单层钢板的防护效果好,研究结果能够为防护结构的设计提供参考依据。

参考文献:

- [1] TAYLOR G. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress [J]. *Mathematical and Physical Sciences, Series A*, 1948, 194: 289-299.
- [2] LIU D Q, Stronge W J. Basic limit of metal plates struck by blunt deformable missiles; experiments [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37: 1403-1423.
- [3] DEY S. 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(8/9): 1005-1038.
- [4] DEY S, BØRVIK T, TENG X, et al. On the ballistic resistance of double-layered steel plates; an experimental and numerical investigation [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(20): 6701-6723.
- [5] BØRVIK T, LANGSETH M, HOPPERSTAD O S, et al. Ballistic penetration of steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(9/10): 855-886.
- [6] 邓云飞, 孟凡柱, 李剑峰, 等. Q235 钢板对半球形头弹抗侵彻特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(3): 386-392.
DENG Y F, MENG F Z, LI J F, et al. The ballistic performance of Q235 metal plates subjected to impact by hemispherically-nosed projectiles [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(3): 386-392.
- [7] 许宏发, 齐亮亮, 江森, 等. 弹体侵彻钢管注浆遮弹层的数值模拟 [J]. *防护工程*, 2017, 39(2): 38-44.
XU H F, QI L L, JIANG M, et al. Numerical simulation of projectile penetrating shelter covered by steel pipe grouting bursting layer [J]. *Projective Engineering*, 2017, 39(2): 38-44.
- [8] 强洪夫, 范树佳, 陈福振, 等. 基于 SPH 方法的聚能射流侵彻混凝土靶板数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(4): 516-524.
QIANG H F, FAN S J, CHEN F Z. Numerical simulation on penetration of concrete target by shaped charge jet with SPH method [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 516-524.
- [9] 王金涛, 余文力, 王涛, 等. SPH 算法在长杆弹侵彻多层间隔靶中的应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(5): 533-539.
WANG J T, YU W L, WANG T, et al. Smoothed particle hydrodynamics algorithm applied in numerical simulation of layered metal targets impacted by long-rod projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(5): 533-539.
- [10] ZHANG Z C, QIANG H F. A hybrid particle-finite element method for impact dynamics [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 29(1): 78-32.
- [11] 强洪夫. 光滑粒子流体动力学方法及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [12] 王娟. 长杆弹侵彻有限直径金属厚靶的理论与数值分析 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
WANG J. Theoretical and numerical study of long rod penetration into metallic thick targets finite radial extent [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [13] NILSON A H. Bond stress-slip relationships in reinforced concrete [R]. Ithaca, New York: Cornell University, 1971.
- [14] MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics [J]. *Annual Review of Astronomical and Astrophysics*, 1992(30): 543-574.
- [15] CHEN X W, LI Q M. Shear plugging and perforation of ductile circular plates struck by a blunt projectile [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(5): 513-536.

Numerical Simulation of Anti-Penetration of Laminated Steel Plate by Hemispherical-Nosed Projectile Using SPH

QIANG Hongfu, SUN Xinya, WANG Guang, CHEN Fuzhen,
SHI Chao, HUANG Quanzhang

(Rocket Army Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: With the wide application of high strength and high impact-resistant steel structures in armor protection of armor, arsenal protective doors and other military facilities, the impact-resistant properties of steel structures become a major focus and hot spot in defense research. In this paper, we simulated the process of hemispherical-nosed projectile penetration through a multilayer steel plate using smooth particle hydrodynamics, compared its results with those from experiment, and analyzed the failure form of the steel plate after being penetrated by hemispherical-nosed projectile, thereby obtaining the von Mises stress distribution and the residual velocity for the hemispherical-nosed projectile and verifying the effectiveness of SPH in the study of the steel plate penetration by a hemispherical-nosed projectile. We investigated the influence of the number of target plates and the thickness of the steel body on the target's penetration-resistant performance using numerical simulation. The results show that the protective strength of the single-layer steel plate is stronger than that of the multi-layer steel plate with a 3 mm thickness; that when the thickness is 9 mm, the multi-layer steel plate has a better protective capability than the single-layer steel plate; and that when the thickness is 12 mm, the multi-layer steel plate and the single-layer steel plate have similar protective strength.

Keywords: metal target plate; target structure; penetration; SPH