DOI: 10.11883/bzycj-2017-0181
文章编号: 1001-1455(2018)06-1317-08

成层式防护结构抗超高速侵彻的数值分析*

刘 峥[1],程怡豪[1],邱艳宇[1,2],邓国强[3],王明洋[1,2]
(1.陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,江苏 南京 210007;
2.南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094;
3.工程兵科研四所,北京 100850)

摘要: 采用 SPH 算法,基于 AUTODYN-2D 开展了钨杆弹对 4 种"花岗岩遮弹层-(空气)干砂分配层-混凝土结构层"形式的成层式防护结构的超高速打击数值计算分析,得到了结构的破坏特征和能量分配情况。结果表明:(1)增加打击速度会加剧遮弹层和分配层的破坏程度,但在一定速度区间内结构层的侵彻深度反而随着打击速度的增加而减小;(2)结构层的能量分配比例具有随着撞击速度增加而减小的趋势,这可以初步归结为竖向冲击动能在遮弹层和分配层的横向传递;(3)一定条件下,通过增加空气隔层可以减小结构层的侵彻深度、结构层分配能量的比例和绝对值。

关键词: 超高速侵彻;成层式防护结构;能量分配;SPH
中图分类号: O385 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

超高速动能武器是一种在研的新兴武器,具有飞行速度快、作战空间大、突防能力强、难以防御等显著优点,其利用自身携带的巨大动能摧毁地下坚固目标,特别适宜快速攻击敏感地区的重要目标[1]。

近十多年来,国内外在超高速动能武器对混凝土和岩石类介质的打击毁伤效应方面开展了广泛的研究。其中 Antoun 等[2]、Wünnemann 等[3]和邓国强等[4-6]开展了超高速打击岩石和砂的数值计算分析,得到了地冲击效应的传播衰减规律和等效荷载计算方法,Dawson 等[7]、牛雯霞等[8]、王鹏等[9]、钱秉文等[10]开展了动能弹对混凝土靶和花岗岩靶的超高速撞击效应实验研究,Cheng 等[11]、Shi 等[12]、李卧东等[13]开展了对岩土类介质超高速撞击侵彻与成坑效应的理论分析,李争等[14]对"上帝之杖"天基武器系统的毁伤效应进行了计算评估。从已有的实验研究和计算结果看,超高速动能武器对地打击效应与已有常规钻地弹差异很大,集中体现在侵彻深度逆减、成坑效应和地冲击效应显著等方面。目前,针对超高速动能武器的工程防护技术还缺乏研究,现有常规防护技术如何适用于对超高速动能武器的打击等问题有待回答。

本文中提出一种"花岗岩-(空气)砂-混凝土"成层式防护结构,并基于 AUTODYN-2D 动力学软件开展该结构抗钨杆弹超高速侵彻的数值计算,研究该结构在超高速打击下的破坏特征以及能量分配,结果可为成层式防护结构抗超高速打击设计提供参考。

1 模型的建立

侵彻和地冲击效应是超高速动能弹毁伤地下结构的主要方式[2,4-5]。基于此,本文中拟采用一种"硬-软-硬"复合结构初步实现"侵蚀破坏弹体-吸收地冲击-抵抗残余侵彻"的抗超高速打击效果。

1.1 弹体参数与撞击条件

弹体材料选用金属钨。钨具有较高的密度、强度和韧度,是超高速动能弹体的理想材料;弹体质量保持为 1 000 kg,取"短弹"(长径比 4,弹体直径 255 mm,弹长 1 020 mm)和"长弹"(长径比 8,弹体直径

* **收稿日期**: 2017-05-23; **修回日期**: 2017-09-08
基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51409258);国家自然科学基金面上项目(11772355);
教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT13071)
第一作者: 刘 峥(1983—),男,博士研究生,助理工程师; **通信作者**: 邓国强,hnjia@sina.com。

202 mm,弹长 1 616 mm)两种情形。撞击速度取为 1 700 m/s($Ma=5$)、3 400 m/s($Ma=10$)、5 100 m/s($Ma=15$)和 6 800 m/s($Ma=20$),且均为垂直入射。

1.2 靶体材料与几何尺寸

计算采用实际工程应用中较为常见的花岗岩、混凝土(单轴抗压强度 35 MPa)和干砂组成成层式防护结构。其中最上层为花岗岩组成的遮弹层,第二层为干砂组成的分配层,第三层为混凝土组成的结构层;当增加空气隔层时,将隔层设置于遮弹层和分配层之间。根据弹体长径比不同、各层厚度不同和是否加入空气隔层,将方案标记为 1A、1B、2A、2B,详细情况如表 1 所示。

表 1 数值模型几何参数

Table 1 Geometrical parameters of numerical models

几何模型方案	长径比 L_p/D	岩石遮弹层/m	空气隔层/m	砂分配层/m	混凝土结构层/m	总厚度/m
1A	4	3.0	0	3	4	10.0
1B	4	3.0	3	3	4	13.0
2A	8	4.5	0	3	4	11.5
2B	8	4.5	3	3	4	14.5

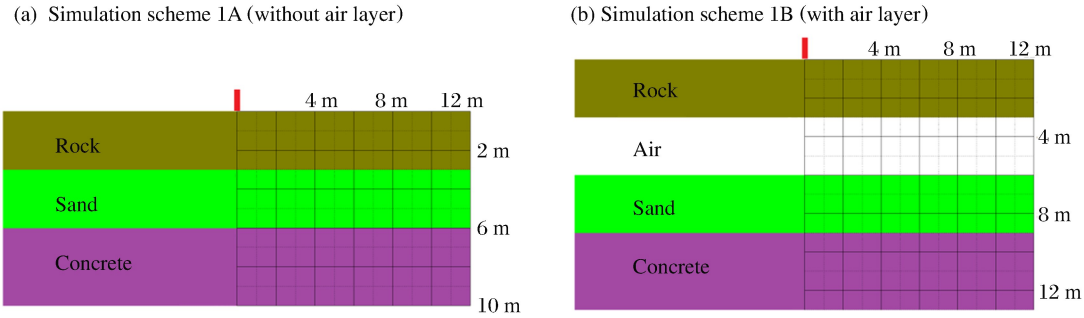


图 1 数值计算模型 1A 和 1B

Fig. 1 Numerical models as 1A and 1B

方案 1A(见图 1(a))和 2A 的设计思路为:

(1)利用遮弹层最大限度地侵蚀、破坏弹体,吸收弹体动能;

(2)利用分配层吸收遮弹层传递的地冲击,阻滞残余弹体及遮弹层破片的侵彻;

(3)利用结构层抵抗残余地冲击效应和残余弹体、遮弹层破片的侵彻。

方案 1B(见图 1(b))和 2B 的设计思路与 1A 和 2A 是基本一致的,其差别在于:利用空气层使残余弹体及遮弹层破片在空间上最大程度地分散,减小其对下部结构的冲击局部作用的集中程度。这与航天器抗空间碎片撞击的“Whipple 防护方案”[17]类似。此时砂层的主要作用在于抵抗剩余弹体的侵彻和花岗岩破片的二次打击。方案 1A 和 2A 中砂层和上方的花岗岩层处于理想接触状态,此时砂层可直接承受并吸收花岗岩层传递过来的地冲击作用。

1.3 材料的本构模型与参数

为了增加分析的可靠性,钨、干砂和混凝土的本构模型与相关参数的取值均来自于 AUTODYN 的内置材料库;花岗岩的本构模型与参数则借鉴文献[4,16]并经过超高速撞击成坑实验的检验[15]。1B 和 2B 算例中空气隔层的主要作用在于利用空间距离分散二次破片对下层结构冲击作用的集度,不考虑空气状态方程对结果的影响。

(1)钨[18]。采用 0~250 GPa 压力范围拟合得到的冲击状态方程以及 Steinberg-Guinan 本构模型。

(2)花岗岩[4,15-16]。采用 Tilltson 状态方程及 Drucker-Prager 准则。

(3)干砂[19]。采用非线性压密-线性卸载的压缩状态方程和与 Drucker-Prager 准则类似的压力相关强度方程。

(4)混凝土[20]。采用适合于侵彻问题 RHT 模型及与之配套的 p-α 状态方程。

1.4　求解设置

模型采用二维轴对称模型。为了克服单元畸变引起的计算困难，采用不需背景网格的光滑粒子流体动力学方法(SPH)，弹体粒子和靶体粒子尺寸相同，其中短弹条件下粒子尺寸 12 mm，长弹条件下粒子尺寸 10 mm。当混凝土层中侵彻深度达到最大时，计算停止。

2　计算结果与分析

2.1　破坏现象分析

在所有工况下，弹体均发生严重侵蚀，弹体碎片与破碎的遮弹层材料混杂在一起向后方飞散，弹体先后贯穿遮弹层和分配层，最后在结构层中侵彻一定深度后停止。当没有空气隔层时(图 2(a)、2(c))，遮弹层和分配层出现纺锤形的空腔并在遮弹层中形成向四周密集扩展的裂纹，空腔附近的花岗岩破碎并发生大范围运动，其中上半部分向上方自由面飞散，下半部分则伴随弹体向下运动并与分配层发生撞击；当撞击速度从 $Ma=10$ 增加到 $Ma=20$ 时，空腔直径增加近 1 倍；相同撞击速度下，长弹形成的空腔直径要小于短弹，这主要和长弹直径较小有关。当加入空气隔层时(图 2(b)、2(d))，由于失去底部砂层的约束，遮弹层下方的破坏范围显著增加，向下飞散的碎片以更大的接触面积与分配层撞击，在遮弹层底部碎片和残余弹体的冲击下，分配层被贯穿并在空腔周围发生压缩变形。所有工况下，混凝土结构层被侵彻但未发生贯穿。

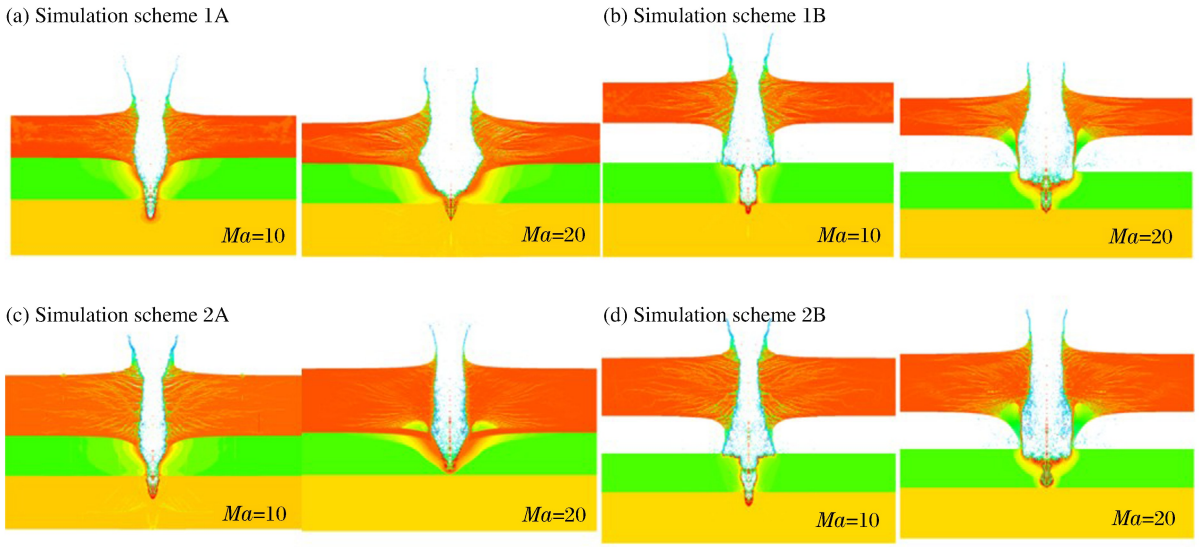


图 2　结构的整体破坏现象

Fig. 2　Structure's general damages

需要指出的是，尽管超高速侵彻深度具有弹靶密度控制流体动力学极限[2]，即：

$$h_{\lim}=L_{\mathrm{p}}\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{p}}}{\rho_{\mathrm{t}}}}=L_{\mathrm{p}}\sqrt{\frac{19.3}{2.63}}=\begin{cases}2.76\ \mathrm{m} & \text{算例 1A、1B}\\ 4.39\ \mathrm{m} & \text{算例 2A、2B}\end{cases} \tag{1}$$

式中：L_{p}为弹体长度，ρ_{p}为弹体密度，ρ_{t}为靶体密度，且式(1)的计算结果小于各算例中对应的花岗岩厚度，但从图 2 来看花岗岩层均发生了贯穿，这主要是由于式(1)未考虑有限厚度靶板的背部自由面对抗侵彻能力的削弱效应和弹体的强度效应。

通过对混凝土结构层破坏效应的集中观察可以更加准确地比较不同工况下复合防护结构的最终防护效能。从图 3 可以看出，不同工况下混凝土层的侵彻深度随着撞击速度增加而呈现复杂的变化趋势。其中 1A 条件下侵深呈现“增-减-增”的过程并在 $Ma=10$ 时取得最大侵深(1.75 m)，1B 条件下侵深不断减小并在 $Ma=5$ 时取得最大侵深(1.25 m)，2A 和 2B 条件下侵深均呈现“增-减”的过程并在 $Ma=10$

时取得最大侵深(分别为 1.9 m 和 1.25 m)。因此从本文中采用的 4 种模型来看,加入空气隔层对减小最终侵彻深度是有利的。从图 4 可以直观地看到,当撞击速度从 $Ma=10$ 增加到 $Ma=15$ 时,所有工况下混凝土结构层的侵彻深度减小且裂纹数减少,而 2A 和 2B 在 $Ma=20$ 时的破坏甚至小于 $Ma=5$ 时。对 1A 而言,$Ma=5\sim10$ 时侵彻深度较大且冲击震塌趋势明显,$Ma=15\sim20$ 时侵彻深度较小,裂纹发育程度高并呈现出一定的整体变形趋势。可见,混凝土层的侵彻深度等冲击局部破坏效应并非随着撞击 Ma 的提高而单调增加,具体情况与结构配布密切相关。对于本文中采用的 4 种配布方案及工况而言,$Ma=10\sim15$ 为侵彻深度随撞击速度增加而减小的“逆减区间”。

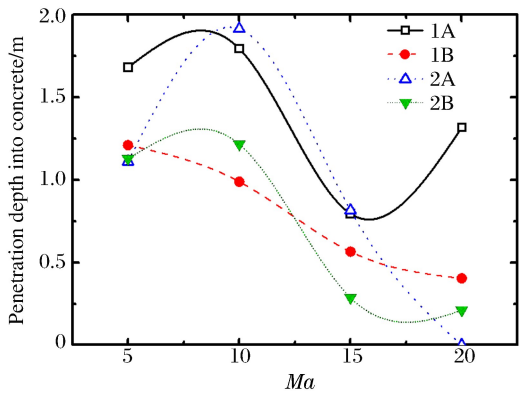


图 3 混凝土层的侵彻深度变化

Fig. 3 Penetration depth of concrete layers

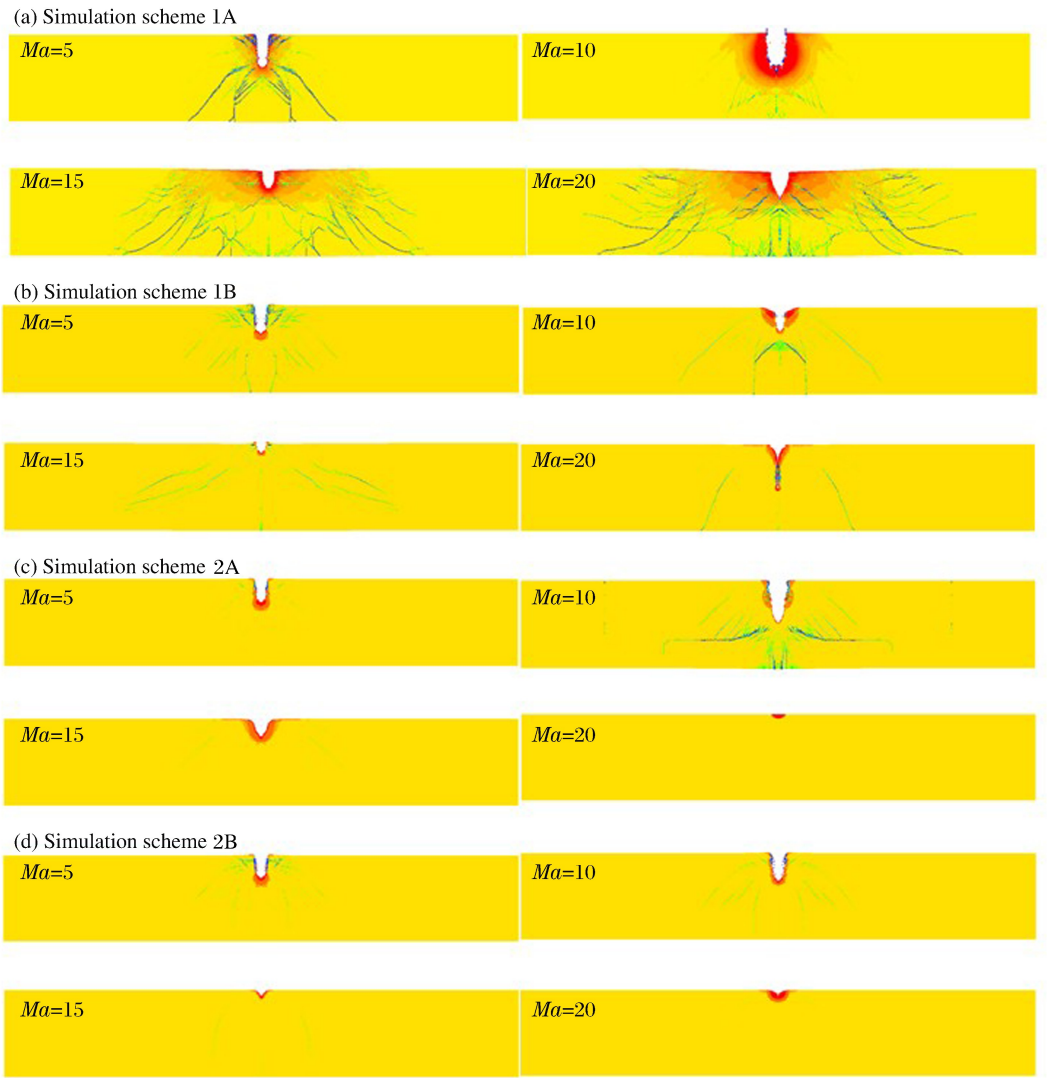


图 4 混凝土层的破坏现象

Fig. 4 Damage phenomena of concrete layers

2.2　撞击能量分配

从能量的角度来说，合理的防护设计应尽量降低结构层获得的能量：一是在一定的结构配布条件下寻求结构层获得能量的最小绝对值的打击条件，二是在一定的打击条件下通过结构配布设计尽量减小结构层分配能量的比例。为此在图 5 中绘制不同撞击速度下结构各部分最终分配得到的能量比例及混凝土结构层的能量绝对值变化。可见，在不同工况下，花岗岩分配的总能量比例最多(50%～85%)，砂层分配的能量比例其次(15%～50%)，混凝土层的能量比例最少(0～13%)。从图 5(d)可见，不同方案下混凝土结构层分配得到的能量绝对值并非随着撞击马赫数增加而单调增加。例如：当分别采用方案 1A、1B、2A、2B 时，结构层能量的最小值分别在 $Ma=5,15,20,15$ 时取得，最大值分别在 $Ma=20,5,10,10$ 时取得。其中当 $Ma=10\sim15$ 时，混凝土层最终分配的能量的比例和绝对值均有下降趋势，这和 2.1 节中“逆减区间”一致。另一方面，从图 5(c)可以看出，当撞击 $Ma=5,10,15,20$ 时，混凝土层能量分配比例的最小值分别为工况 2B、1B、2B 和 2B，这说明一定条件下增加空气层有助于减小结构层的能量分配比例。此外，无论何种方案下，随着撞击速度的增加，混凝土层所占的能量比例逐渐减小；空气隔层使得花岗岩层的能量比例显著提高，而砂层和混凝土层的能量比例相应减小。

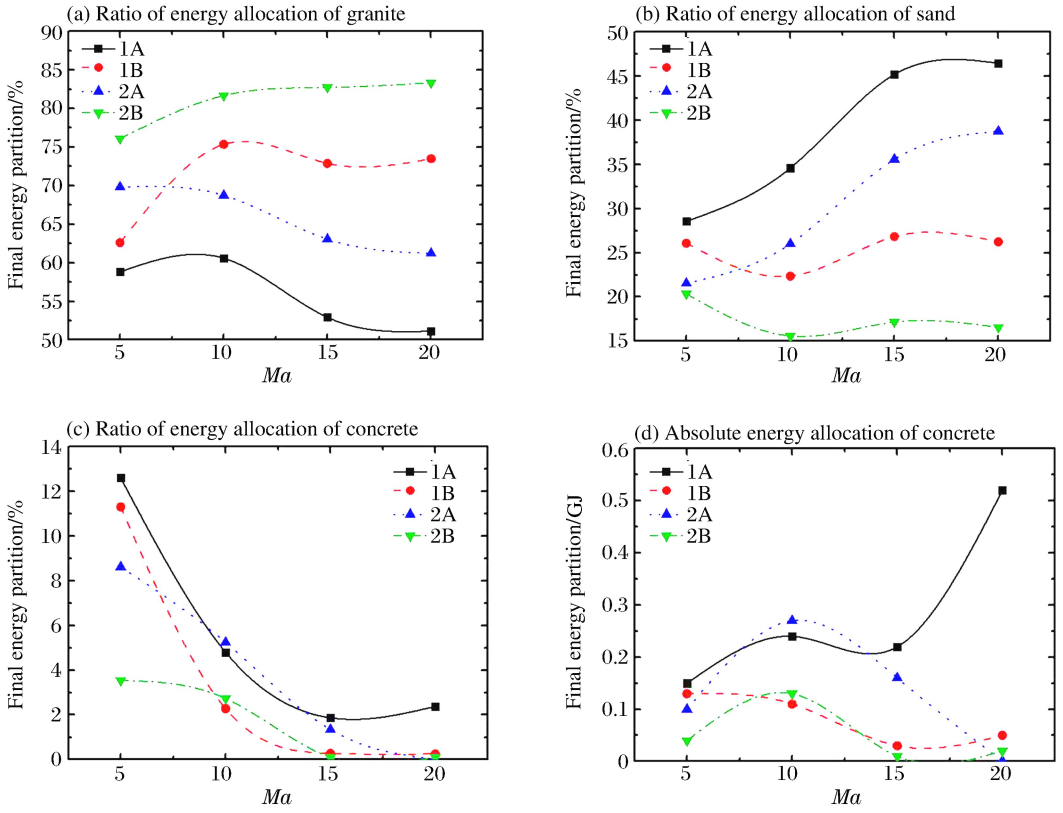


图 5　能量分配的计算结果汇总

Fig. 5　Energy distribution based on calculated results

为了直观地理解上述能量分配比例随速度变化的内在机制，可观察侵彻完成瞬时复合遮弹层各部分的速度分布情况(见图 6)，其中呈现“蝴蝶”形的红色表示介质运动速度大于等于 16 m/s；蝴蝶的“触角”为向外喷射的花岗岩碎片，“前翼”为花岗岩遮弹层的表面开坑破坏部分，“后翼”为花岗岩遮弹层的底面震塌部分和砂的受冲击部分，“尾部”为混凝土结构层的破坏部分。随着撞击速度从 $Ma=10$ 增加到 $Ma=20$，成坑直径显著增加，红色部分的最大半径从 3～4 m 扩大到 6～8 m，这使得“蝴蝶”发生横向膨胀而显得更加饱满；当加入空气层后，上述膨胀有进一步增加的趋势。可见，在本文中设计的结构配布及工况条件下，速度增加带来的竖向冲击动能有向花岗岩层和砂层发生横向转移的趋势，降低了能量向混凝土结构传递的效率，这可以解释图 5(c)的结果。

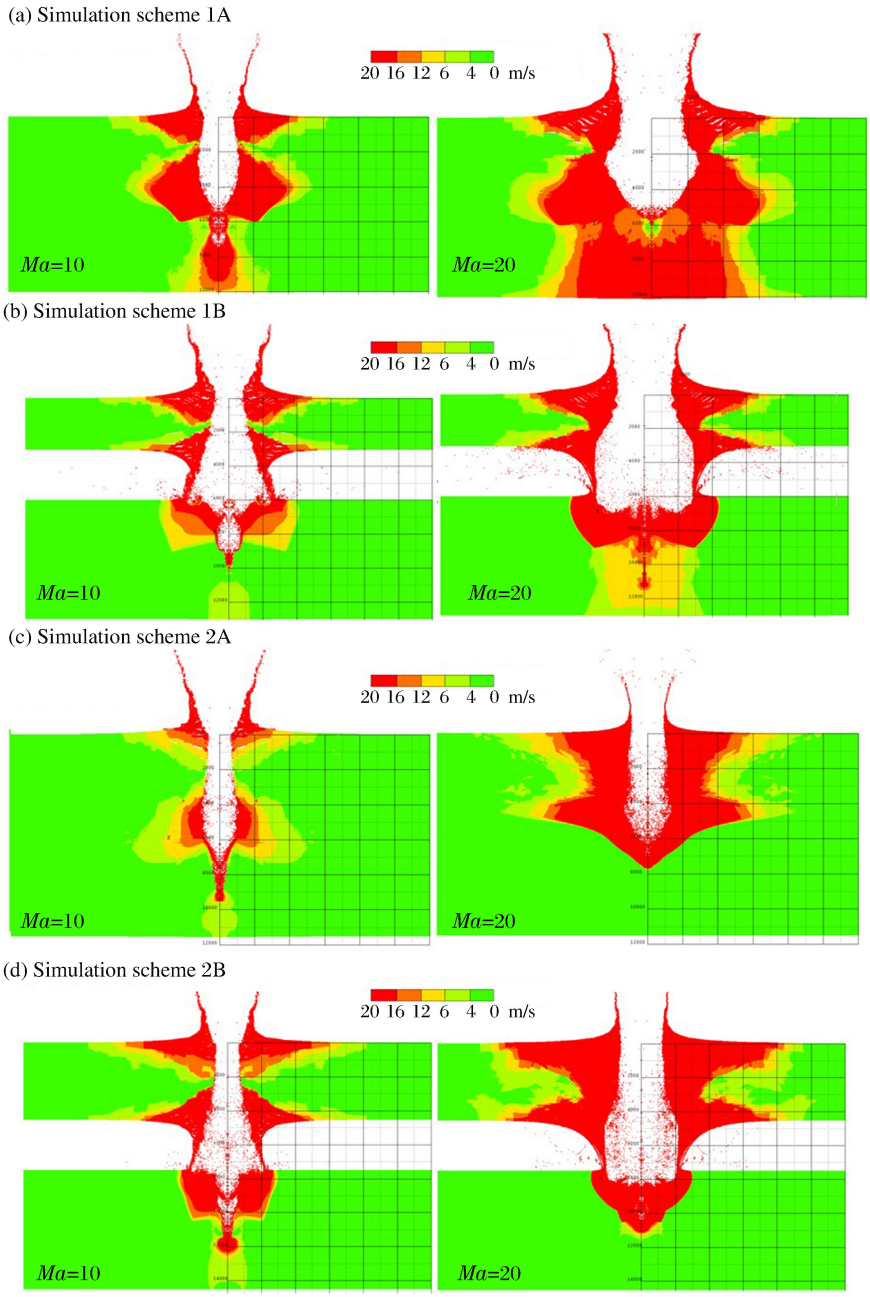


图 6 结构速度场分布云图(相邻粗实线间距 2 000 mm)

Fig. 6 Nephogram of structures' absolute velocity distribution (distance between adjacent bold lines=2 000 mm)

3 结 论

开展了钨弹在 $Ma=5\sim20$ 条件下超高速打击“花岗岩-(空气)干砂-混凝土”成层式防护结构的数值计算分析,设计了 4 种结构配布形式,主要结论如下:(1)增加打击速度会加剧遮弹层和分配层的破坏程度,但在一定速度区间内结构层的侵彻深度会随着打击速度的增加而减小。(2)结构层的能量分配比例具有随着撞击速度增加而减小的趋势,这可以初步归结为竖向冲击动能在遮弹层和分配层的横向传递。(3)一定条件下,通过增加空气隔层可以减小结构层的侵彻深度、结构层分配能量的比例和绝对值。

参考文献：

[1] 杨秀敏，邓国强. 常规钻地武器破坏效应的研究现状和发展[J]. 后勤工程学院学报，2016，32(5)：1-9.
YANG Xiumin，DENG Guoqiang. The research status and development of damage effect of conventional earth penetration weapon[J]. Journal of Logistical Engineering University，2016，32(5)：1-9.

[2] ANTOUN T，GLENN L，WALTON O，et al. Simulation of hypervelocity penetration in limestone[J]. International Journal of Impact Engineering，2005，33(1)：45-52.

[3] WÜNNEMANN K，COLLINS G S，MELOSH H J. A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets[J]. Icarus，2006，180(1)：514-527.

[4] 邓国强，杨秀敏. 超高速武器打击效应数值仿真[J]. 科技导报，2015，33(16)：65-71.
DENG Guoqiang，YANG Xiumin. Numerical simulation of damage effect of hypervelocity weapon on ground target [J]. Science & Technology Review，2015，33(16)：65-71.

[5] 邓国强，杨秀敏. 抗超高速武器最小安全防护层厚度计算[J]. 防护工程，2016，38(1)：39-42.
DENG Guoqiang，YANG Xiumin. Estimation method of safety protective layer depth resisting hypervelocity weapon impact[J]. Protective Engineering，2016，38(1)：39-42.

[6] 邓国强，杨秀敏. 超高速武器流体侵彻与装药浅埋爆炸效应的等效方法[J]. 防护工程，2015，37(6)：27-32.
DENG Guoqiang，YANG Xiumin. Effect equivalent method between fluid penetration of hypervelocity weapon and shallow detonation of explosive[J]. Protective Engineering，2015，37(6)：27-32.

[7] DAWSON A，BLESS S，LEVINSON S，et al. Hypervelocity penetration of concrete[J]. International Journal of Impact Engineering，2008，35(1)：1484-1489.

[8] 牛雯霞，黄洁，柯发伟，等. 混凝土房屋结构靶的超高速撞击特性研究[J]. 实验流体力学，2014，28(2)：79-84.
NIU Wenxia，HUANG Jie，KE Fawei，et al. Research on hypervelocity impact characteristics of concrete building structures target[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics，2014，28(2)：79-84.

[9] 王鹏，郭磊，余道建，等. 动能棒超高速对混凝土靶板撞击毁伤效应研究[C]// 第一届全国超高速碰撞会议论文集. 四川绵阳，2013：145-150.

[10] 钱秉文，周刚，李进，等. 钨合金弹体超高速撞击混凝土靶成坑特性研究[C]// 第十一届全国爆炸力学学术会议论文集. 广东珠海，2016.

[11] CHENG Y H，WANG M Y，SHI C C，et al. Constraining damage size and crater depth：a physical model of transient crater formation in rocky targets[J]International Journal of Impact Engineering，2015，81(6)：50-60.

[12] SHI C C，WANG M Y，ZHANG K L，et al. Semi-analytical model for rigid and erosive long rods penetration into sand with consideration of compressibility[J]. International Journal of Impact Engineering，2015，83(1)：1-10.

[13] 李卧东，王明洋，施存程，等. 地质类材料超高速撞击相似关系与实验研究综述[J]. 防护工程，2015，37(2)：55-62.
LI Wodong，WANG Mingyang，SHI Cuncheng，et al. Review of similaritylaws and scaling experiments research of hypervelocity impact ongeological material targets[J]. Protective Engineering，2015，37(2)：55-62.

[14] 李争，刘元雪，胡明，等. “上帝之杖”天基动能武器毁伤效应评估[J]. 振动与冲击，2016，35(18)：159-164.
LI Zheng，LIU Yuanxue，HU Ming，et al. Research on damage effection of “Gold sticks” space-based kinetic energy weapons[J]. Journal of Vibration and Shock，2016，35(18)：159-164.

[15] 程怡豪. 超高速弹体撞击混凝土和岩石毁伤机理研究[D]. 南京：解放军理工大学，2016.

[16] AI H A，AHRENS T J. Simulation of dynamic response of granite：A numerical approach of shock-induced damage beneath impact craters[J]. International Journal of Impact Engineering，2006，33(1)：1-10.

[17] 张庆明，黄风雷. 超高速碰撞动力学引论[M]. 北京：科学出版社，2000：121-136.

[18] STEINBERG D. Equation of state and strength properties of selected materials[M]. Livermore，CA：Lawrence Livermore National Laboratory，1996.

[19] LAINE L，SANDVIK A. Derivation of mechanical properties for sand[C]// Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures. Singapore，2001.

[20] RIEDEL W，THOMA K，HIERMAIER S，et al. Penetration of reinforced concrete by RETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes[C]// Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures，1999.

Numerical analysis on hypervelocity penetration into layered protective structure

LIU Zheng[1], CHENG Yihao[1], QIU Yanyu[1,2], DENG Guoqiang[3], WANG Mingyang[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosive and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*;
2. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
3. *No.* 4 *Research Institute of Engineering Corps, Beijing* 100850, *China*)

Abstract: In this study, based on SPH and using AUTODYN-2D, we analyzed the hyper velocity penetration of tungsten rod into four types of layered shielding structures consisting of granite shielding layer, air/sand distribution layer and concrete structure layer, and obtained the structures' damage and energy distribution, with the following results achieved: (1) Although raising the striking velocity increased the damage of the shielding layer and the distributing layer, the penetration depth into the structure layer decreased within a certain velocity range; (2) The ratio of the energy conducted to the structure layer generally decreased with increasing of the striking velocity, and this could be attributed to the transverse propagation of the impact energy within the shielding layer and distributing layer; (3) Under certain conditions, addition of an air layer could reduce the penetration depth into the structure layer, the ratio and absolute value of the energy conducted to the structure layer.

Keywords: hypervelocity penetration; layered protective structure; energy distribution; SPH

(责任编辑 曾月蓉)