DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0489-07

弹体侵彻刚玉块石混凝土复合靶体的数值分析*

方 秦,罗 曼,张锦华,孙志远
(解放军理工大学,江苏 南京 210007)

摘要: 在先前混凝土三维细观模型和块石遮弹层三维模型研究的基础上,研究了小直径炸弹侵彻条件下,刚玉块石遮弹层的抗侵彻性能。重点分析了弹体侵彻条件对侵彻深度和弹体偏转角度的影响以及遮弹层构造参数对侵彻结果的影响;详细探讨了弹体命中速度、命中角度和弹着点位置,以及刚玉块石大小、体积率和填充混凝土强度对遮弹层抗侵彻性能的影响。与普通块石遮弹层相比,刚玉块石混凝土复合遮弹层具有更好的抗弹体侵彻性能。

关键词: 爆炸力学;抗侵彻;三维模型;刚玉块石
中图分类号: O385;TJ012 **国标学科代码**: 1303530 **文献标志码**: A

岩石由于强度较高、抗侵彻性能较好,且具有取材方便、施工工艺简单等特点,作为防护工程材料,一直为人们所关注。C. F. Austim 等[1]、M. D. Gelman 等[2]、B. Rohani[3]对块石遮弹层的抗侵彻性能进行了大量的研究;H. Langheim 等[4]也开展了一系列块石遮弹层抗弹体侵彻实验研究,结果表明,块石遮弹层对抵抗弹体侵彻具有很好的防护效果。唐德高等[5]对刚玉块石靶体的抗侵彻性能进行了实验研究,发现刚玉块石是一种很好的抗侵彻材料。刚玉石[6]的主要成分是 AL_2O_3,密度为 3 800 kg/m^3,弹性模量为 400 GPa,与普通石头相比,其硬度和强度极高,且具有抗冲击、耐高温等特点。因此,深入研究刚玉块石混凝土复合遮弹层的抗侵彻性能,对提高防护工程的生存能力具有重要意义。

目前,对于刚玉块石遮弹层抗侵彻性能的研究,主要以实验研究为主,已经取得了一定的研究成果[5]。众所周知,高速侵彻实验研究一方面需要花费大量的人力物力,另一方面实验研究只能获得宏观的结果,无法深入细致地研究侵彻过程的作用机理,且实验过程影响因素较多。由于刚玉块石遮弹层中块石大小、形状以及空间位置分布具有随机性等特点,其对侵彻弹体的作用机理极其复杂,必须借助于数值方法,才能揭示刚玉块石混凝土复合遮弹层的抗侵彻性能。本文中,基于前期的三维随机骨料生成算法和块石遮弹层生成算法[7-8],针对刚玉块石大小、形状以及空间分布的随机性特征,建立在结构方面与实际刚玉块石遮弹层相似的三维分析模型,采用 LS-DYNA 动力学分析软件,研究刚玉块石的随机分布特性对弹体侵彻过程中偏转角度和侵彻深度的影响,讨论刚玉块石体积率、填充混凝土强度、弹体命中角度与位置、弹体命中速度等因素对刚玉块石混凝土复合靶体抗侵彻性能的影响。

1 刚玉块石混凝土复合遮弹层的三维有限元分析模型

1.1 模型的建立

刚玉块石混凝土复合遮弹层在内部结构组成方面有如下特征:一是组成遮弹层的刚玉块石大小及形状具有随机性;二是遮弹层在形成过程中,刚玉块石在复合遮弹层内空间分布位置具有随机性。为了提高计算效率,更真实地模拟刚玉块石混凝土复合遮弹层的组成和构造特性,本文中对三维随机骨料生成算法和普通块石遮弹层生成算法[7-8]进行改进。

(1)改进三维刚玉块石生成算法。如图 1 所示,在圆内接随机四边形生成算法中,引入内角控制参

* **收稿日期**: 2014-02-21; **修回日期**: 2014-06-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51321064,51108457,51378015)
第一作者: 方 秦(1962—),男,博士,教授,博士生导师,fangqinjs@163.com。

数β_i和边长控制参数l_i(i=1,2,3,4),避免薄片状和尖角状空间随机八面体的产生,在此基础上生成的三维随机多面体,能够更真实地模拟刚玉块石颗粒。

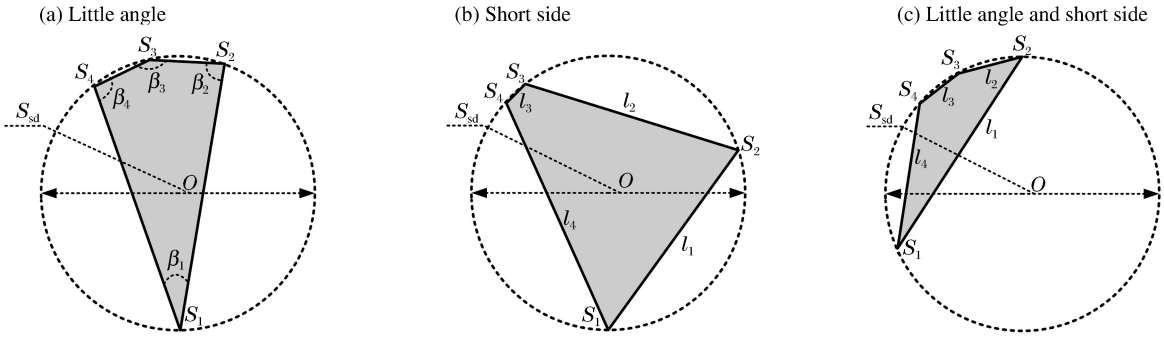

图 1 应避免的圆内接随机四边形

Fig. 1 Bad random quadrilateral inscribed

(2)优化三维随机多面体空间投放算法。根据 take & place 投放算法基本流程,在每一个刚玉块石颗粒投放过程中,引入投放次数控制参数,当某一待投放颗粒达到一定投放次数后,仍不满足边界条件和无重叠条件时,舍弃该颗粒,开始计算下一个颗粒的投放。投放次数控制参数对提高投放算法的效率,起到了很好的效果。

(3)综合运用密实算法,提高刚玉块石颗粒投放密度和投放效率。随机投放模型生成后,为了进一步提高刚玉块石的投放密度,本文中进一步提出密实算法。通过引入刚性块体间接触算法,分别采用重力自密实和模型底部施加正弦振动机械密实的方法,进一步提高刚玉块石的投放密度和计算效率。

(4)优化网格剖分和材料属性判定算法。为了提高网格剖分和材料属性判定计算效率,节省建模时间,本文中提出了区域剖分判定算法。首先,将靶体模型划分为Ω_m个大的区域(m<100),Ω_i和Ω_j($i\neq j$)容许有小部分重叠;其次,建立区域链表数组,存放各个区域内所包含的刚玉块石颗粒;再次,在进行网格材料属性计算时,Ω_i域内的网格只需要与该域内包含的颗粒进行位置关系判定即可,大大缩短了每一个循环步的计算时间;最后,合并各个区域计算结果,清除重叠网格,输出有限元模型。计算结果表明,本文中提出的刚玉块石遮弹层模型生成算法,比文献[7-8]的算法更可靠,且计算效率显著提高。

1.2 有限元模型

本文中选用小直径炸弹(small-diameter bomb, SDB)作为侵彻弹体,弹头曲率半径为 3,弹体质量为 113.4 kg,弹体长度为 182.88 cm,弹体直径为 15.24 cm。建模时按照总质量相等原则,视弹体为均质实体,等效密度为 3 862.5 kg/m^3。有限元计算中,采用三维六面体单元进行网格剖分,共计 8 000 个单元。弹体的单元尺寸为 1.8 cm,与靶体单元尺寸接近。

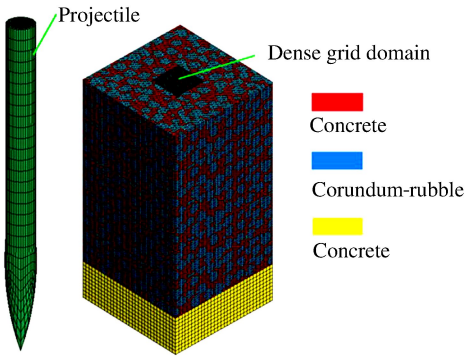

图 2 弹体和刚玉块石遮弹层有限元模型

Fig. 2 Finite element models for a projectile and a corundum-rubble target

遮弹层靶体分为 2 层:上层为刚玉块石混凝土层,下层为混凝土底座(取波阻抗与上层相同,目的是减小计算量)。上层尺寸取为 150 cm×150 cm×250 cm,下层尺寸取为 150 cm×150 cm×30 cm,有限元模型见图 2。在遮弹层四周设置透射边界,吸收膨胀波和剪切波,上表面自由,底面固支。选用三维六面体单元,采用单点积分和沙漏控制以更好地描述大变形和材料失效等非线性问题。为了提高运算速度,减少单元的数目,同时保证计算精度,在对靶体进行有限元网格剖分时,在靶体中心 2.5 倍弹径范围内划分较细,中心细化区域网格尺寸为 1 cm,其他范围的网格尺寸为 2 cm。划分后,遮弹层模型的实体单元为 1 089 000 个。

1.3　计算参数

SDB 材料为 4340 钢，计算时采用 Johnson-Cook 模型及 Grüneisen 状态方程描述其力学性能[9-11]，材料参数见表 1[11]。对靶体中填充的混凝土材料，采用 Johnson-Holmquist-Concrete 模型描述[12-13]，材料参数按文献[12-14]选取，见表 2。对刚玉块石材料采用 Johnson-Holmquist-Ceramic 模型描述，材料参数见表 3[15-16]。

表 1 小直径炸弹材料的计算参数[11]

Table 1 Computational parameters for small-diameter bombs[11]

符号	意义	值	符号	意义	值
$\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	密度	3 862.5	$c_v/(\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}})$	质量定容热容	477
G/GPa	剪切模量	77	$\dot{\varepsilon}_0$	参照应变率	1.0×10^{-6}
A	屈服应力常数	792	D_1	第一断裂参量	0.05
B	应变硬化常数	510	$c/(\mathrm{km\cdot s^{-1}})$	u_s-u_p 曲线截距	4.569
N	应变硬化指数	0.26	s_1	第一斜度系数	1.49
C	应变率相关系数	0.014	s_2	第二斜度系数	0.0
M	温度相关指数	1.03	s_3	第三斜度系数	0.0
T_m/K	熔化温度	1 793	γ_0	Grüneisen 系数	2.17
T_r/K	室温	293	a	γ_0 的一阶修正	0.46

表 2 混凝土材料的计算参数[12-14]

Table 2 Computational parameters for concrete[12-14]

符号	意义	值			符号	意义	值		
		C30	C50	C80			C30	C50	C80
$\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	密度	2 440	2 440	2 440	$\dot{\varepsilon}_0$	参考应变率	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
G/GPa	剪切模量	12.3	14.1	16.7	ε_{min}	最小断裂塑性应变	0.01	0.01	0.01
A	黏性强度系数	0.79	0.79	0.79	p_c/MPa	压碎压力	8	13.7	23.33
B	压力硬化系数	1.60	1.60	1.60	$\mu_c/10^{-5}$	压碎体积应变	54	86	123
C	应变率参数	0.007	0.007	0.007	p_l/GPa	压密压力	1.05	1.05	1.05
N	压力硬化指数	0.61	0.61	0.61	μ_l	压密体积应变	0.1	0.1	0.1
f_c'/MPa	单轴抗压强度	24	41	70	D_1	损伤常数	0.04	0.04	0.04
σ_t/MPa	拉伸强度	2.7	3.6	4.65	D_2	损伤常数	1.0	1.0	1.0

表 3 刚玉块石的计算参数[15-16]

Table 3 Computational parameters for corundum-rubble[15-16]

符号	意义	值	符号	意义	值
$\rho/(\mathrm{kg\cdot m^{-3}})$	密度	3 800	$\dot{\varepsilon}_0$	参考应变率	1.0×10^{-6}
G/GPa	剪切模量	152	σ_t/MPa	最大拉伸强度	262
A	无损伤强度参数	0.88	σ_{HEL}/GPa	Hugoniot 弹性极限	6.75
B	断裂强度参数	0.431	p_{HEL}/GPa	Hugoniot 弹性极限处的压力	3.65
C	应变率常数	0.007	D_1	损伤系数	0.012 5
M	断裂强度参数	0.6	D_2	损伤指数	1.85
N	无损伤强度参数	0.64	F_s	失效判据	1.5

2　计算结果及讨论

数值模拟中，编号为 No.0001 的靶体为标准靶体，其参数取为：刚玉块石-弹径比 $D_{rk}/D=1.5$，填充混凝土为 C30，刚玉块石体积分数 $V_{rk}=50\%$。所有的计算工况如表 4 所示，其中考虑了不同侵彻位置、侵彻入射角 α、撞击速度 v、刚玉块石体积分数 V_{rk} 以及填充混凝土强度 f_c 等对侵彻结果的影响。

表 4 计算工况

Table 4 Computational cases

工况	靶体	D_{rk}/D	撞击位置	f_c/MPa	α/(°)	V_{rk}/%	v/(m·s^{-1})
1	0001	1.5	中心	30	0	49.5	300
2	0001	1.5	中心偏左 0.5D	30	0	49.5	300
3	0001	1.5	中心偏右 0.5D	30	0	49.5	300
4	0001	1.5	中心偏上 0.5D	30	0	49.5	300
5	0001	1.5	中心偏下 0.5D	30	0	49.5	300
6	0001	1.5	中心	30	5	49.5	300
7	0001	1.5	中心	30	10	49.5	300
8	0001	1.5	中心	30	20	49.5	300
9	0001	1.5	中心	30	0	49.5	200
10	0001	1.5	中心	30	0	49.5	450
11	0001	1.5	中心	30	0	49.5	600
12	0002	1.5	中心	30	0	29.1	300
13	0003	1.5	中心	30	0	82.9	300
14	0004	1.5	中心	50	0	49.5	300
15	0005	1.5	中心	80	0	49.5	300
16	0006	2.0	中心	30	0	49.5	300
17	0007	3.0	中心	30	0	49.5	300

2.1 弹着点位置的影响

计算工况 1～5 中考虑了弹着点位置对侵彻结果的影响，计算结果见图 3。从图 3 可以看出：与计算工况 1 相比，侵彻深度 H 和弹体偏转角 β 的变化幅度分别为 12% 和 35%。由此可见，不同的侵彻位置对计算结果有一定的影响，其主要原因是刚玉块石的随机不均匀分布所致。

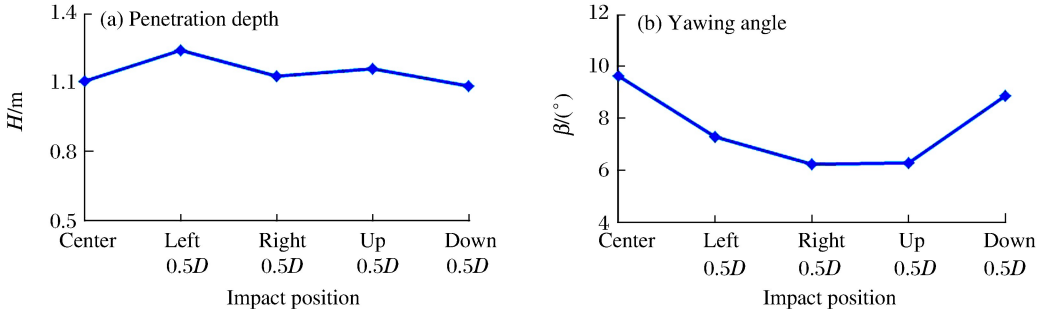

图 3 弹着点对侵彻结果的影响

Fig. 3 Effects of impact position on penetration

2.2 侵彻速度的影响

以下考虑弹体速度分别为 200、300、450、600 m/s 等 4 种情况下的计算结果，对应表 4 中工况 1 以及工况 9～11，计算得到的侵彻深度和弹体偏转角如图 4 所示。

从图 4 可以看出：侵彻速度为 200～450 m/s 时，侵彻速度与侵彻深度呈线性关系，偏转角与侵彻速度也呈现相同变化的趋势；侵彻速度大于 450 m/s 后，偏转角的增加减缓。弹体的变形和终点弹道如图 5(a)所示。由此可见，刚玉块石遮弹层对弹体的偏转作用显著，这大大减小了弹体的侵彻深度。

2.3 入射角的影响

不同入射角条件下的计算结果如图 6 所示，对应表 4 中的计算工况 1、6～8。从图 6 可以看出：侵角从 0°(正侵彻)增长到 15°，侵彻深度由 1.018 m 减小到 0.791 m，弹体偏转角从 9.63°增大到50.89°。弹体的变形和终点弹道的形状如图 5(b)所示。由此可以看出，入射角对侵彻结果有较大的影响。

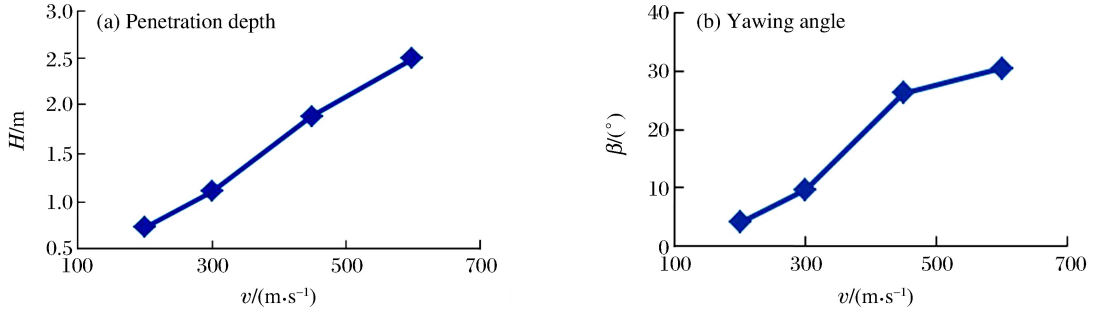

图 4　侵彻速度对侵彻效应的影响

Fig. 4　Effects of impact velocity on penetration

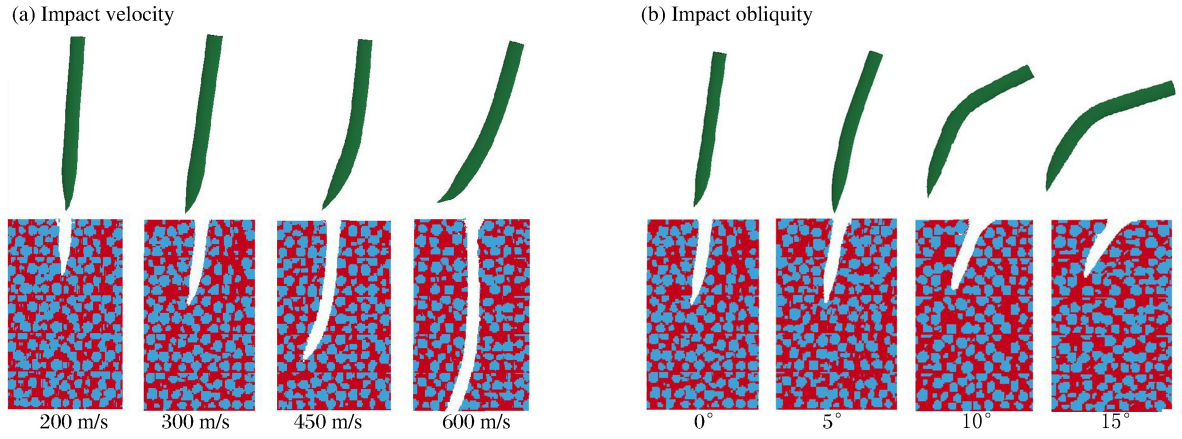

图 5　弹体撞击速度和入射角对弹体变形和靶体终点弹道的影响(横截面)

Fig. 5　Effects of impact velocity and impact obliquity on projectile deformation and trajectory (vertical section)

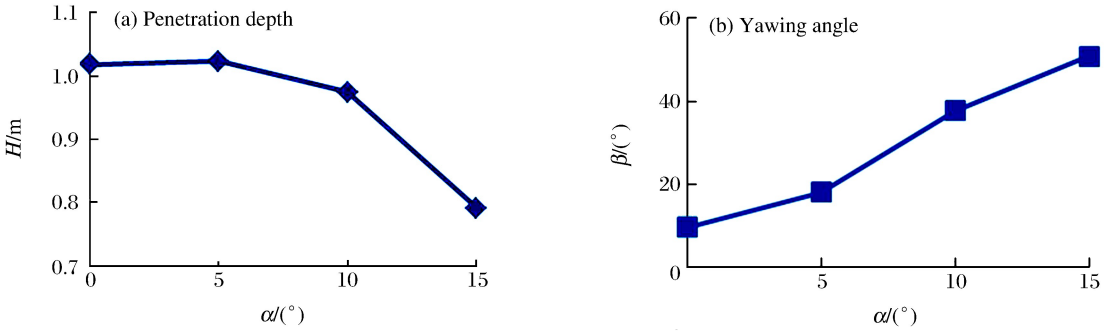

图 6　弹体入射角对侵彻效应的影响

Fig. 6　Effects of impact obliquity on penetration

2.4　刚玉块石大小的影响

刚玉块石大小对侵彻效应影响的计算结果如图 7 所示，当刚玉块石的大小从 1.5D 增加到 3.0D 时，侵彻深度从 1.108 m 减小到 0.783 m，弹体侵彻偏转角从 9.63°增加到 18.79°，由此可见，刚玉块石的大小对弹体的侵彻深度和偏转角都会产生较大影响。

2.5　与块石混凝土遮弹层计算结果的对比

刚玉块石与普通块石相比，强度更高，硬度更大，是一种更好的抗侵彻材料。为进一步掌握刚玉块石混凝土靶体的抗侵彻性能，本文中将刚玉块石的计算结果与普通块石混凝土遮弹层的计算结果[8]进行了对比，见图 8。从图 8 可以看出：在侵彻速度为 300 m/s、$D_{rk}/D=1.5$ 的情况下，虽然弹体对刚玉块石遮弹层和普通块石遮弹层的侵彻深度都随填充混凝土强度和块石体积分数的增加而减小，但刚玉块石混凝土遮弹层的抗侵彻能力是普通块石混凝土遮弹层的 2 倍以上。

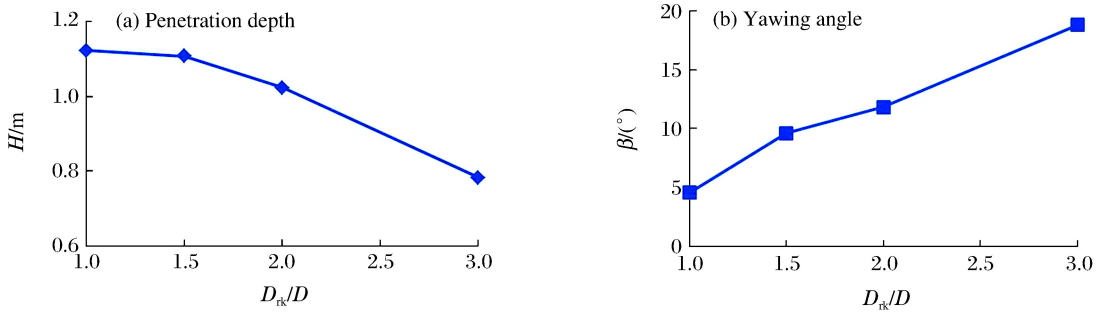

图 7 刚玉块石大小对侵彻效应的影响

Fig. 7 Effects of corundum volume on penetration

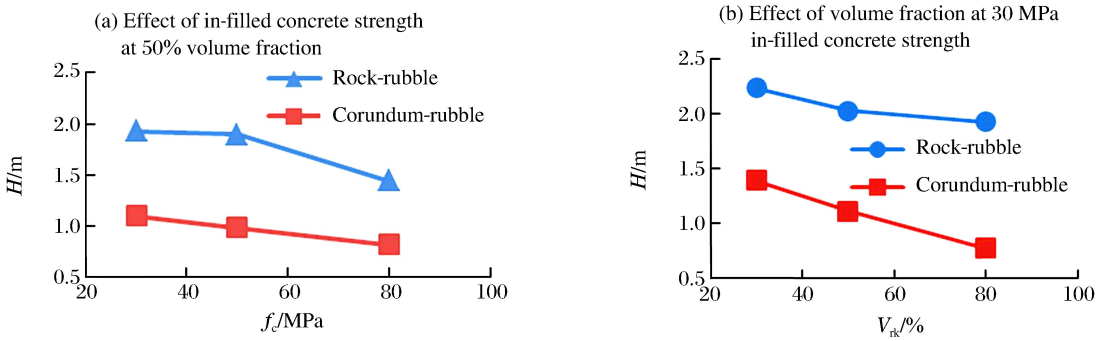

图 8 刚玉块石与块石遮弹层抗侵彻能力对比

Fig. 8 Comparison of penetration effect between rock-rubble and corundum-rubble overlays

3 结 论

(1)刚玉块石的随机分布特性对侵彻结果有一定的影响;(2)随着弹体侵彻速度的增大,侵彻深度以及弹体偏转角度随之增大;(3)弹体侵彻角度的增加可减小侵彻深度,增大弹体偏转角度;(4)刚玉块石的大小对侵彻深度有较大影响,当刚玉块石的直径与弹径比值 $D_{rk}/D=1.0\sim1.5$ 时,侵彻深度变化较小,但当 D_{rk}/D 从 1.5 增加到 3.0 时,侵彻深度呈线性减小;(5)刚玉块石遮弹层的侵彻深度随填充混凝土强度和刚玉块石体积分数的增加而减小;(6)刚玉块石混凝土遮弹层的抗侵彻能力是普通块石混凝土遮弹层抗侵彻能力的 2 倍以上。

参考文献:

[1] Austim C F, Halsey C C, Clodt R L. Protection systems development[R]. Tyndall Airforce Base: Report ESL-TR-83-39, 1982.

[2] Gelman M D, Richard B N, Ito Y M. Impact of armor-piercing projectile into array of large caliber boulders[R]. Waterways Experiment Station, 1987.

[3] Rohani B. Penetration of kinetic energy projectiles into rock-rubbles/boulder overlays[R]. Vicksburg, Mississippi: U. S. army Engineer Waterways Experiment Station, 1987.

[4] Langheim H, Pahl H, Schmolinske E, et al. Subscale penetration tests with bombs and advanced penetration against hardened structures[C]// The Sixth International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures. Panama City Beach, Florida, 1993:12-17.

[5] 唐德高,贺虎成,陈向欣,等.刚玉块石混凝土抗弹丸侵彻效应试验研究[J].振动与冲击,2005,24(6):37-39.
Tang De-gao, He Hu-cheng, Chen Xiang-xin, et al. Experimental study on corundum-rubble concrete against projectile[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005,24(6):37-39.

[6] 唐耀振.刚玉冶炼工艺学[M].北京:国家机械委机床工具工业局,1987:8-10.

[7] 方秦,张锦华,陈力,等.全级配混凝土三维细观模型的建模方法研究[J].工程力学,2013,30(1):14-21.

Fang Qin, Zhang Jin-hua, Chen Li, et al. The investigation into three-dimensional mesoscale modelling of fully-graded concrete[J]. Engineering Mechanics, 2012,30(1):14-21.

[8] Fang Qin, Zhang Jin-hua. 3D numerical modeling of projectile penetration into rock-rubble overlays accounting for random distribution of rock-rubble[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014,63:118-128.

[9] 黄民荣，高永宏，顾晓辉. 刚性弹丸对花岗岩垂直侵彻的理论分析[J]. 南京理工大学学报：自然科学版，2008,32(6):724-728.
Huang Min-rong, Gao Yong-hong, Gu Xiao-hui. Theoretical analysis for rigid projectiles normal penetration into granites[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2008,32(6):724-728.

[10] 许琼萍，王德荣，陆渝生. 测定某种花岗岩静摩擦系数的试验[J]. 解放军理工大学学报：自然科学版，2008,9(3):269-273.
Xu Qiong-ping, Wang De-rong, Lu Yu-sheng. Experimental study on static friction coefficient of granite survey [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008,9(3):269-273.

[11] 高文安. GB 50010-2010 混凝土结构设计规范：钢筋机械连接通用技术规程[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011:11-20.

[12] 王政，楼建锋，勇珩，等. 岩石、混凝土和土抗侵彻能力数值计算与分析[J]. 高压物理学报，2010,24(3):175-180.
Wang Zheng, Lou Jian-Feng, Yong Heng, et al. Numerical computation and analysis on anti-penetration capability of rock, concrete and soil[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010,24(3):175-180.

[13] Holmquist T J, Johnson G R. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[C]// 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada, 1993.

[14] Beissel S R, Johnson G R. An abrasion algorithm for projectile mass loss during penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000,24(2):103-116.

[15] Mclntosh G. The Johnson-Holmquist ceramic model as used in LS-DYNA 2D: ADA357607[R]. Quebec Research and Development Branch Department of National Defence, 1998.

[16] Gazonas G A. Implementation of the Johnson-Holmquist Ⅱ (JH-2) constitutive model into DYNA3D[R]. ADA402347. Army Research Laboratory, 2001.

Numerical analysis of the projectile penetration into the target of corundum-rubble concrete composite overlay

Fang Qin, Luo Man, Zhang Jin-hua, Sun Zhi-yuan

(*PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*)

Abstract: In order to investigate the performances of corundum-rubble overlays subjected to small-diameter bomb penetration, a three-dimensional finite element model is developed. The model is used to study the projectile penetration into the corundum-rubble overlay by taking into account the randomness of corundum-rubble in size, shape and spatial distribution. This paper focuses on the following two aspects. The first is the effects of penetration conditions (such as projectile velocity, impact angle and position) on penetration depth and terminal yawing angle. The second is the influences of the constituted parameters for the corundum-rubble overlay (such as size and volume fraction of corundum-rubble, strength of grouted concrete). The numerical results are compared with the data from rock-rubble overlay, and better performances are found for the corundum-rubble overlay subjected to projectile penetration.

Key words: mechanics of explosion; anti-penetration performance; three-dimensional model; corundum-rubble

(责任编辑　张凌云)