DOI: 10.11883/bzycj-2018-0023

小尺寸破片对单兵防护装备的侵彻研究*

周 捷[1],智小琦[1],徐锦波[2],岳中豪[2]
(1. 中北大学机电工程学院,山西 太原 030051;
2. 中国晋西工业集团,山西 太原 030051)

摘要: 为了探究了小尺寸破片是否能有效穿透普通单兵防弹衣与防弹头盔,以球型破片为对象,利用试验得出了 0.2 g 钨合金球型破片侵彻Ⅲ级防弹衣与Ⅳ级防弹头盔的极限穿透速度;通过数值模拟的方法得出了防弹衣与防弹头盔的等效 Q235 靶板厚度,并探究了质量变化对破片极限穿透速度的影响规律。上述研究结论对新型高效反步兵武器与单兵基本防护装备的研制与开发都有重要的参考价值。

关键词: 小尺寸球型破片;单兵防弹装备 ;极限穿透速度;等效靶
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

在现代战争中,单兵武器不断发展的同时,对单兵防护装备的要求也日益苛刻。特别是凯夫拉材料出现以后,对反步兵武器提出了更高的要求[1]。在这方面,学者们作出了很多探索,例如邹渝等[2]研究了单兵防弹衣对穿甲破片的防护效应,采用的破片为美军标准 Mil-P-46593A-2 型破片,质量 1.1 g;王晓强等[3]研究了立方体破片对超高分子量聚乙烯防弹板的侵彻规律,选用的破片为 7.5 mm 棱长的立方体破片;李常胜等[4]研究了制式枪弹对软体防弹衣的侵彻规律,采用的弹丸是 7.62 mm 标准铅芯弹;Freita 等[5]研究了枪弹冲击防弹头盔时头盔对人体的防护效果,分别测试了 NATO 标准 9 mm 手枪弹、7.62×39 mm 中间威力弹与 7.62×51 mm 全威力弹。上述的防护装备侵彻研究均是以传统大尺寸破片或标准口径枪弹为对象,这具有一定的局限性。

为了提高战斗部的杀伤效率,增加破片数量是一个十分重要的手段,但增加破片数量的同时又增大了弹丸重量,对武器射程造成了不利影响。因此为了解决这个问题,使用小尺寸破片是最佳选择途径,可以在保证射程的情况下,在有效的空间内装填更多的破片,提高毁伤威力及威慑力。钨合金破片密度大,强度高,存速能力强,更能使毁伤威力进一步提高,但目前关于小尺寸钨合金破片对单兵防护装备的侵彻研究则鲜有报道。

本文中结合枪击试验与数值模拟,研究小尺寸破片对单兵防护装备的侵彻能力,并探究质量变化对极限穿透速度的影响规律,以期为单兵防护装备与新型反步兵杀伤战斗部的设计提供参考。

1 试验设计

用 12.7 mm 滑膛弹道枪发射钨合金球形破片,出炮口后弹托在空气阻力作用下与破片脱离,靶前与靶后分别设置一对线圈靶,测量破片的着靶速度与后效速度,如图 1 所示。

本次试验选用江西长江化工有限责任公司制造的 FDY-03 型Ⅲ级防弹衣与 K-IV(B)型Ⅳ级防弹头盔,材料均为凯夫拉,执行标准为 NIJ-0101,如图 2 所示。测速仪为 NLG202-Z 型六通道测速仪,测试精度为 0.1 μs,如图 3 所示。钨球直径为 2.8 mm,质量 0.2 g,抗压能力大于 4.3 kN,执行标准 GJB3793-99;弹托材料为尼龙,如图 4 所示,本次试验中所有钨球侵彻均为正侵彻。

* **收稿日期**: 2018-01-23; **修回日期**: 2018-04-26
第一作者: 周 捷(1995—),男,硕士研究生,zhoujiepla@foxmail.com;
通信作者: 智小琦(1963—),女,博士,教授,zxq4060@sina.com。

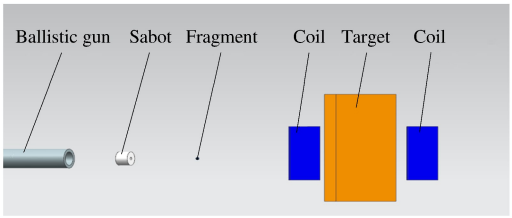


图 1 试验方法

Fig. 1 Test method



图 2 防弹衣与防弹头盔(试验前)

Fig. 2 Bulletproof vest and helmet (before the experiment)



图 3 NLG202-Z 型六路测速仪

Fig. 3 NLG202-Z tachometer

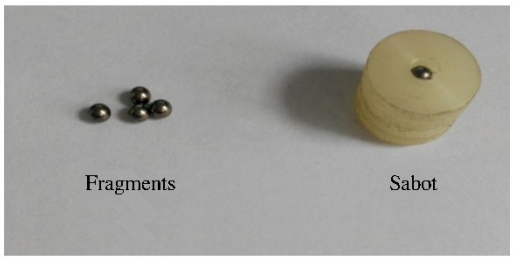


图 4 破片与弹托

Fig. 4 Fragments and sabots

2 试验结果及分析

试验后测试对象状态如图 5 所示。

试验数据见表 1 与表 2,由于防弹头盔外形的特殊性,靶后速度未测得。





图 5 防弹衣与防弹头盔(试验后)

Fig. 5 Bulletproof vest and helmet (after the experiment)

表 1 侵彻防弹衣试验数据表

Table 1 Data of penetrating test

序号	靶前速度/(m·s^{-1})	靶后速度/(m·s^{-1})	破片状态	序号	靶前速度/(m·s^{-1})	靶后速度/(m·s^{-1})	破片状态
1	933.2	597.0	穿透	7	716.8	216.5	穿透
2	838.4	406.9	穿透	8	706.3	15.1	穿透
3	784.3	340.6	穿透	9	699.8	0	嵌入
4	771.5	290.2	穿透	10	663.4	0	未穿透
5	740.7	270.4	穿透	11	604.6	0	未穿透
6	739.5	228.9	穿透				

表 2 侵彻防弹头盔试验数据

Table 2 Data of penetrating helmet

着靶位置	序号	靶前速度/(m·s^{-1})	破片状态	着靶位置	序号	靶前速度/(m·s^{-1})	破片状态
四周	1	790.6	穿透	顶部	8	733.4	穿透
	2	775.3	穿透		9	707.3	穿透
	3	753.6	穿透		10	671.7	穿透
	4	748.4	穿透		11	649.5	穿透
	5	739.5	穿透		12	620.1	穿透
	6	728.8	嵌入		13	606.2	未穿透
	7	701.5	未穿透				

由文献[6-7]知，防弹头盔顶部厚度略小于四周，所以在对侵彻Ⅳ级防弹头盔的试验中，对防弹头盔顶部与四周分别做了正侵彻研究。

根据最小穿透速度与最大嵌入速度的平均值，可知直径 2.8 mm、质量为 0.2 g 的钨合金球型破片侵彻Ⅲ级防弹衣的极限穿透速度为 703.1 m/s，侵彻Ⅳ级防弹头盔四周的极限穿透速度为 734.2 m/s，侵彻顶部的极限穿透速度为 613.1 m/s。然而在实际战场环境中，防弹头盔顶部中弹的情况十分罕见，所以小钨球侵彻防弹头盔的极限穿透速度应取其侵彻头盔四周的极限穿透速度 734.2 m/s。

根据人体杀伤比动能标准[8-9]，$e_d=160$ J/cm^2，计算得 0.2 g 钨球破片对穿有Ⅲ级防弹衣的人体目标的有效杀伤速度最小值为 769.3 m/s，对戴有Ⅳ级防弹头盔的人体目标的最小有效杀伤速度为 798.4 m/s。因此，破片速度应大于 798.4 m/s，才能对穿有Ⅲ级防弹衣和Ⅳ级防弹头盔的敌有生力量造成有效杀伤。

3　数值模拟

在试验的基础上，为了探究钨球尺寸的变化对侵彻结果的影响，利用有限元方法对试验进行数值模拟研究，但由于凯夫拉材料微观结构复杂且材料精确仿真参数难以获得，本文中以 Q235 替代凯夫拉做数值模拟分析，这样既能探究侵彻规律，又能得出防弹衣和防弹头盔与普通 Q235 材料之间的等效关系[10-12]。

3.1　模型建立与参数确定

3.1.1　仿真模型

采用 LS-DYNA 作为数值模拟软件。破片侵彻靶板的过程是一种高温、高压与高应变率的高速冲击问题，对待此种问题，可采用高效、高精度的 Lagrange 算法[13]。为兼顾计算精度与效率，模型简化为二分之一对称模型，在对称面添加对称约束，在靶板边缘添加无反射边界条件[13]。为保证计算的连续性与高精度，冲击作用主要区域网格尺寸控制在 0.1 mm 至 0.2 mm，边缘区采用 0.4 mm 稀疏网格，其他区域网格尺寸控制在 0.2 mm 至 0.4 mm。网格划分完成后在破片速度方向上取 8 个等距观测点，具体模型如图 6 所示。

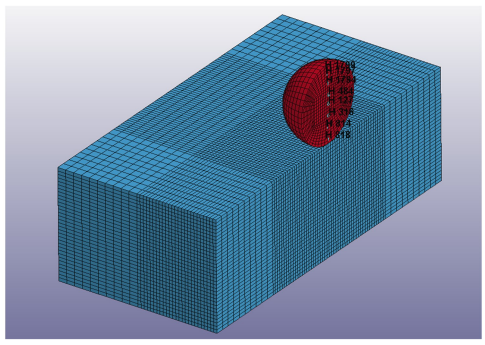


图 6 仿真计算模型

Fig. 6 Simulation model

3.1.2　材料参数

靶板选用 Johnson-Cook 本构模型结合 Grüneisen 状态方程来描述其力学行为[13]。而在侵彻的整

个过程中，钨合金球形破片的应变率虽远低于靶板材料，但这种变形仍不可忽略，且钨合金是一种具有明显应变率相关性的材料[14]，不应将其视为刚体，应用随动硬化模型来描述其力学行为。

靶板材料选择 Q235 合金钢，其 CJ 模型主要参数见表 3，其中 ρ 为密度，G 是剪切模量，A 是初始屈服强度，B 是应变硬化模量，c 是应变率强化指数，m 是热软化指数，n 是硬化指数，T_m 与 T_r 分别代表材料的熔化温度与参考温度，D_1～D_5 均是材料的失效参数。

表 3 Q235 材料 CJ 模型参数表

Table 3 Parameters of CJ model of Q235

ρ/(g·cm^{-3})	G/GPa	A/MPa	B/MPa	c	m	n
7.85	77.3	325	220	0.022	0.83	0.21
T_m/K	T_r/K	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
1793	293	−43.408	44.608	−0.016	0.0145	0.046

靶板材料状态方程主要参数见表 4，其中 C 为冲击波波速－波后质点粒子速度曲线的斜率，S_1～S_3 是该曲线多项式拟合的三个系数，γ_0 是 Grüneisen 常数，E 是初始内能。

表 4 Q235 材料状态方程参数

Table 4 Parameters of equation of state of Q235

C	S_1	S_2	S_3	γ_0	E
0.519	1.33	0	0	2.17	0

破片材料为钨合金，密度 17.82 g/cm^3，其 kinematic 模型主要参数见表 5，其中 E 是杨氏模量，μ 是泊松比，σ_y 是屈服强度，η 是切线模量，β 是硬化指数，ε_c 与 ε_p 是应变率常数，F_s 是侵蚀单元的失效常数。

表 5 钨合金材料 kinematic 模型参数

Table 5 Parameters of kinematic model of tungsten alloy

ρ/(g·cm^{-3})	E/GPa)	μ	σ_y/MPa	η/MPa	β	ε_c	ε_r	F_S
17.82	366.99	0.303	1506	792	1	3.9	6	1.2

3.2　侵彻等效靶仿真结果与分析

根据枪击试验得出的结果，以 703 m/s 作为 0.2 g 钨球破片对 Q235 钢板的极限穿透速度进行仿真分析，以得到此速度下 0.2 g 钨球破片侵彻 Q235 钢板的最大厚度，具体结果见表 6。

表 6 等效靶侵彻仿真结果表

Table 6 Simulation result of penetrating the equivalent target

靶板厚度/mm	靶前速度/(m·s^{-1})	靶后速度/(m·s^{-1})	破片状态
3.5	703.1	139.6	穿透
3.7	703.1	78.4	穿透
3.8	703.1	36.5	穿透
3.9	703.1	0	未穿透
4.0	703.1	0	未穿透

3.9 mm 与 4 mm 靶板侵彻仿真具体结果如图 7 所示。由图 7 可以清晰看出，当靶板厚度为 3.9 mm 时，破片速度降至零且完全嵌进靶板，靶后出现裂纹并即将形成冲塞，靶板厚度为 4.0 mm 时破片无法穿透靶板，所以可以将 3.9 mm 作为 703 m/s 时 0.2 g 钨球破片侵彻 Q235 靶板的极限穿透厚度。由此可得出结论，Ⅲ级防弹衣可等效为 3.9 mm 厚的 Q235 靶板。

同理，用数值模拟的方法对 0.2 g 破片侵彻防弹头盔进行数值分析，得到Ⅳ级防弹头盔的等效

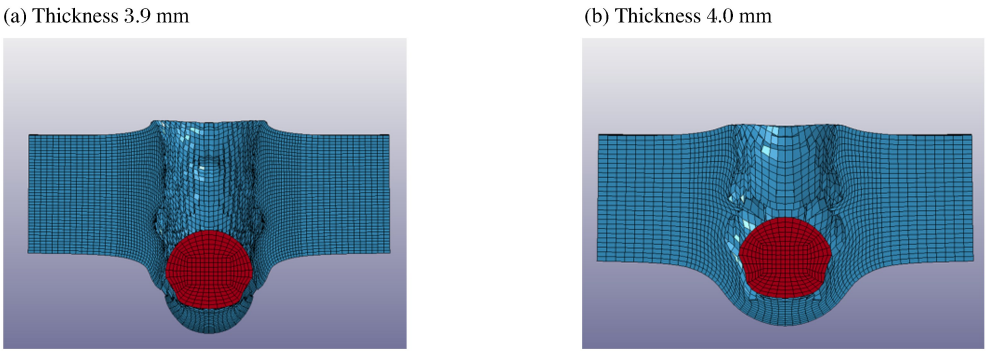


图 7　侵彻仿真结果

Fig. 7　Simulation result of penetrating

Q235 靶板厚度为 4.1 mm。

3.3　质量变化对极限穿透速度的影响规律

为了探究不同质量破片的侵彻规律，在上述仿真的基础上，增加了五种不同质量的钨合金球型破片做对比仿真试验，破片质量分别为 0.15、0.25、0.30、0.35、0.40 g，对应破片直径分别为 2.5、3.0、3.2、3.35、3.5 mm。

为探究这五种破片分别侵彻Ⅲ级防弹衣和Ⅳ级防弹头盔的极限穿透速度，建立三维模型，以 Q235 等效靶替代防弹衣与防弹头盔做数值模拟分析。具体仿真结果见表 7 与图 8。

表 7　不同破片侵彻等效靶极限穿透速度

Table 7　Critical velocity of different fragments penetrating the equivalent target

破片质量/g	$v_{Ⅲ}$/(m·s^{-1})	$v_{Ⅳ}$/(m·s^{-1})	破片质量/g	$v_{Ⅲ}$/(m·s^{-1})	$v_{Ⅳ}$/(m·s^{-1})
0.15	782	798	0.30	620	635
0.20	703	734	0.35	589	603
0.25	655	671	0.40	562	576

由表 8 可知，破片质量增加的同时，其侵彻等效靶的极限穿透速度不断减小；图 8 中，曲线 1 和 2 分别是破片对Ⅳ级防弹头盔和Ⅲ级防弹衣的最小有效杀伤速度分布曲线，曲线 3 和曲线 4 分别是破片对Ⅳ级防弹头盔和Ⅲ级防弹衣的极限穿透速度分布曲线；从图 8 中可以看出，随着破片质量的增加，极限穿透速度与最小有效杀伤速度均呈非线性递减趋势；当破片质量大于 0.3 g 后，随质量的增加，极限穿透速度下降的趋势明显减缓。

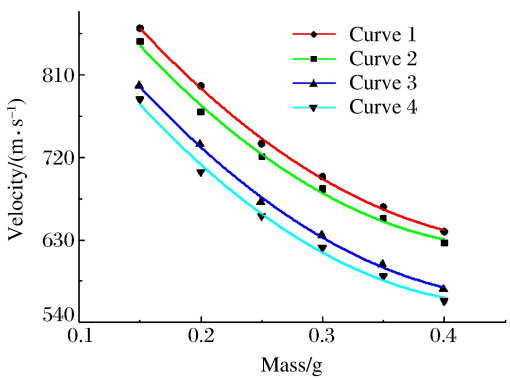


图 8　破片速度曲线图

Fig. 8　Velocities graph of diffirent fragments

4　结　论

(1) 通过枪击试验证实 2.8 mm 小尺寸钨合金球型破片能正面击穿普通Ⅲ级防弹衣与Ⅳ级防弹头盔，且极限穿透速度分别为 703.1、734.2 m/s，但对穿戴有此类防护装备的有生力量的最小有效杀伤速度为 798.4 m/s。

(2) 数值模拟仿真结果表明，Ⅲ级防弹衣Ⅳ级防弹头盔在受球形破片侵彻的试验研究中可分别等效为 3.9 mm 与 4.1 mm 厚的 Q235 钢板。

(3) 通过一对系列不同质量破片的侵彻研究，发现随着破片质量的增加，极限穿透速度随之降低，

当破片质量超过 0.3 g 后降低趋势明显减缓，从减小破片质量，增加破片数量，提高毁伤威力的角度考虑，破片质量在 0.25～0.3 g 左右时最为合适。

参考文献：

[1] 邹渝. 机械化步兵单兵防护装备发展研究[J]. 中国个体防护装备，2015，3(4)：18-22.
ZOU Yu. Research on development of protection equipment for mechanic infantry soldier[J]. China Personal Protective Equipment，2015，3(4)：18-22.

[2] 邹渝，李曙光，肖南. 单兵防弹衣对穿甲破片的防护效应研究[J]. 医疗卫生装备，2015，36(11)：36-38.
ZOU Yu，LI Shuguang，XIAO Nan. Study on protective effect of individual bulletproof cloth against armor-piercing fragments[J]. Chinese Medical Equipment Journal，2015，36(38)：36-38.

[3] 王晓强，朱锡，梅志远，等. 超高分子量聚乙烯纤维增强层合厚板抗弹性能实验研究[J]. 爆炸与冲击，2009，29(1)：29-34.
WANG Xiaoqiang，ZHU Xi，MEI Zhiyuan，et al. Ballistic performances of ultra-high molecular weight polyethylene fiber-reinforced thick laminated plates[J]. Explosion and Shock Waves，2009，29(1)：29-34.

[4] 李常胜，黄献聪，李焱，等. 软体防弹衣穿透概率的分析[J]. 兵工学报，2013，34(1)：20-24.
LI Changsheng，HUANG Xiancong，LI Yan，et al. Study on the probability of perforation for soft body armor[J]. Acta Armamentarii，2013，34(4)：20-24.

[5] FREITAS C J，MATHIS J T，SCOTT N，et al. Dynamic response due to behind helmet blunt trauma measured with a human head surrogate[J]. International Journal of Medical Sciences，2014，11(5)：409-25.

[6] 蔡志华，包正，王威，等. 枪弹冲击防弹头盔致头部非贯穿性损伤的数值模拟研究[J]. 兵工学报，2017，38(6)：1097-1105.
CAI Zhihuan，BAO Zheng，WANG Wei，et al. Simulation of non-penetrating damage of head due to bullet impact to helmet[J]. Acta Armamentarii，2017，38(6)：1097-1105.

[7] 孙幸福. 防弹头盔研制技术及发展前景[J]. 中国个体防护装备，2009(1)：14-38.
SUN Xingfu. Developing technology and prospect of ballistic helmet[J]. China Personal Protective Equipment，2009(1)：14-38.

[8] 张国伟. 终点效应及其应用技术[M]. 北京：国防工业出版社，2006：2-3

[9] 王林，李晓辉，刘永付，等. 基于比动能标准的战斗部杀伤威力评价方法研究[J]. 测控技术，2012，31(增刊)：88-90.
WANG Lin，LI Xiaohui，LIU Yongfu，et al. Study of anti-personal warhead killing power based on the specific kinetic energy lethality criteria[J]. Measurement and Control Technology，2012，31(suppl)：88-90.

[10] 杨玉林，赵国志，王戈冰. 装甲目标毁伤评估的等效靶方法[J]. 火力与指挥控制，2003，28(6)：81-84.
YANG Yulin，ZHAO Guozhi，WANG Gebing. Surrogates for armor targets vulnerability assessment[J]. Fire Control and Command Control，2003，28(6)：81-84.

[11] 张庆明，黄风雷，周兰庭. 破片贯穿目标等效靶的极限速度[J]. 兵工学报，1996，17(1)：21-25.
ZHANG Qingming，HUANG Fenglei，ZHOU Lanting. Limit velocity for the penetrarion of fragments into their targets[J]. Acta Armamentarii，1996，17(1)：21-25.

[12] 米双山，何剑斌，张锡恩，等. 战斗损伤仿真中的等效靶与破片终点速度研究[J]. 兵工学报，2005，26(5)：605-608.
MI Shuangshan，HE Jianbin，ZHANG Xien，et al. Equivalent target and terminal velocity of fragments in battle damage simulation[J]. Acta Armamentarii. 2005，26(5)：605-608.

[13] 刘鹏飞. 破片特性对冲击起爆 B 炸药比动能阈值的影响[D]. 太原：中北大学，2017.

[14] 马红磊，胡更开，李树奎. 97 钨合金力学性能研究[J]. 兵器材料科学与工程，2003，26(6)：39-41.
MA Honglei，HU Gengkai，LI Shukui. Mechanical properties of 97% tungstenalloy[J]. Ordnance Material Science and Engineerin，2003，26(6)：39-41.

Research on penetration of small size fragment to single soldier protection equipment

ZHOU Jie[1], ZHI Xiaoqi[1], XU Jinbo[2], YUE Zhonghao[2]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;

2. *Jinxi Industrial Refco Group Ltd, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*)

Abstract: In order to find out whether the small size fragment can penetrate the ordinary single-soldier bulletproof clothes and bulletproof helmets effectively, the spherical fragment has been selected as the object, obtained the limit velocities of the 0.2 g spherical tungsten alloy fragment penetrating the level Ⅲ body armor and level Ⅳ bulletproof helmet. The thickness of Q235 equivalent targets of body armor and bulletproof helmet is obtained by the means of numerical simulation, and the influence rule of the fragment's mass on the limit velocity is investigated. The conclusions is important to the development of new anti-infantry weapons and soldier's basic protective equipments.

Keywords: small size spherical fragment; single soldier bulletproof equipment; limit penetration velocity; equivalent targrt

(责任编辑　王小飞)