文章编号:1000-5773(2013)06-0833-06

带切割环弹体斜侵彻钢靶行为的数值模拟*

郭刘伟,谭多望

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室,四川绵阳 621999)

摘要:侵彻靶板的行为对于半穿甲战斗部性能的发挥非常重要,利用 LS-DYNA 对带切割环球形弹体斜侵彻钢靶的行为进行了数值模拟。分别在跳弹临界角、靶板孔径、穿靶前弹体在靶板上的滑行距离及穿靶后弹体的剩余速度方面,对比分析了该新构型弹体与常规弹体的性能,数值模拟结果与实验结果吻合较好。研究发现,切割环在防跳弹方面的贡献并不明显,但带切割环弹体的穿孔尺寸远大于常规球形弹体。在斜侵彻钢靶的过程中,切割环使弹体的偏转及攻角出现了不同程度的变化。提出了一种半切割环弹体构型并进行了对比分析,结果表明,半切割环使弹体的防跳弹性能得到提升。

关键词:弹体;斜侵彻;切割;数值模拟

中图分类号:O385 **文献标识码**:A

1 引 言

半穿甲战斗部作为一种先贯穿靶板后在目标内部爆炸以达到较大破坏力的武器,在国防武器研发中占有重要的地位,很多科研人员对其中的穿甲问题进行了大量的研究[1-5]。实际弹体入侵靶板时都会存在一定的着角和攻角,当着角过大时,可能产生跳弹现象,从而使半穿甲战斗部丧失应有的杀伤能力,故当弹体斜侵彻靶板时如何能达到较好的穿甲效果已成为关键问题。Goldsmith 等[6]对弹体非理想撞击靶板的理论、数值模拟及实验研究做了详细的概述。Recht 等[7-8]提出一种刚性平头弹体侵彻金属靶板的简化模型,并将其推广至斜侵彻情形。Awerbuch 等[9]建立了一种三阶段一维模型,并对钝形弹体的斜穿甲行为进行了理论分析。陈小伟等[10]提出一种尖头刚性弹斜侵彻金属靶的分析模型,以预测跳飞发生的临界条件,与实验结果吻合较好。董永香等[11]对截卵形弹头斜侵彻多层金属靶板的行为进行了数值模拟研究,发现随着弹体着角及初速的提高,弹体的过载及攻角均呈现上升趋势。

半穿甲战斗部通常先依靠弹体的自身动能贯穿靶标,然后进入目标内部产生爆炸。本研究提出一种采用切割环破坏靶标的球形弹体构型,并对其斜侵彻钢靶的行为进行数值模拟研究,分析切割环在弹体斜侵彻靶板过程中的工作机制及其在防跳弹方面的作用,同时就弹体在斜侵彻靶板过程中弹身的偏转及攻角的变化进行讨论,提出一种改进型弹体构型,并与常规球形弹体及带全切割环弹体的侵彻性能进行对比分析。

2 有限元模型

带切割环球形弹体斜侵彻钢靶的有限元模型见图 1。计算中采用 1/2 模型以节约机时。模型的具体尺寸如下:弹体的长径比为 2,切割环的薄壁前端与弹体头部平齐,靶板为 500 mm×400 mm×9 mm 长方体钢板。靶板四周均为固支条件,弹体对称面采用对称边界条件。壳体及靶板的材料分别为 D6A

* **收稿日期**:2011-12-09;**修回日期**:2012-03-01

作者简介:郭刘伟(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事爆轰物理研究. E-mail:guoliuwei1@163.com

通讯作者:谭多望(1967—),男,博士,研究员,主要从事爆轰物理研究. E-mail:dwtan@caep.cn

及 45 钢，均采用 Johnson-Cook 本构模型，壳体内的填充物为石蜡材料，采用理想弹塑性本构，具体的材料参数见表 1。计算中采用 Lagrange 算法，Solid 164 号六面体单元对模型进行网格划分，并对切割环、弹体头部及靶板的受冲击区域进行网格加密。模型中共有两类接触类型：Eroding Surface to Surface(切割环与靶板、壳体与靶板)及 Surface to Surface(填充物与壳体、壳体与切割环、切割环及靶板自身接触)，接触中的静动摩擦系数分别为 0.15 和 0.10。

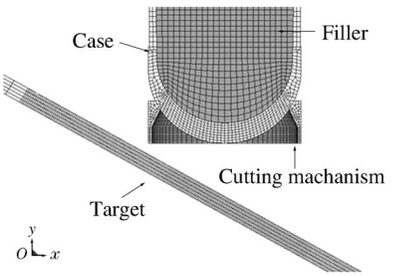


图 1 带切割环弹体斜侵彻钢靶的有限元模型

Fig. 1 The finite element model of the projectile with cutting mechanism penetrating the steel

表 1 材料参数

Table 1 The parameters of materials

Material	Density ρ/(g/cm^3)	Shear modulus G/(GPa)	Elastic modulus E/(GPa)	A /(MPa)	B /(MPa)	C	n	m
D6A	7.80	81.4	165.8	966	512	0.024	0.298	0.900
45 Steel	7.80	81.9	164.2	496	434	0.070	0.307	0.804
Paraffin	0.83	—	100.0	—	—	—	—	—

3 结果与讨论

3.1 模型的有效性

该带切割环弹体以 0°着角入侵钢靶的破坏模式及相关侵彻参数的数值模拟结果与实验结果的对比分别见图 2 及表 2。可见，在靶板破坏模式、弹体剩余速度及靶孔尺寸等方面，该有限元模型均很好地模拟了带切割环弹体正侵彻钢靶的穿甲行为。

表 2 弹体正侵彻性能参数的对比

Table 2 The comparisons of the penetration performance of the projectile with the target angle 0°

Model	Attack velociy /(m/s)	Method	Residual velocity /(m/s)	Perforation diameter /(mm)	Perforated stopper diameter/(mm)
1	291	Experiment	203.1	85	83.6
		Simulation	232.3	88.8	84.1
		Departure δ/(%)	+14.4	+4.5	+0.6
2	307	Experiment	240	85	85
		Simulation	247.0	87.7	83.9
		Departure δ/(%)	+2.9	+3.2	−1.3
3	284	Experiment	213	84	84
		Simulation	215.3	87.9	82.6
		Departure δ/(%)	+1.1	+4.6	−1.7

带切割环弹体斜侵彻钢靶的破坏模式如图 3 所示。数值模拟中靶板的破坏模式与实验吻合得较好。靶孔下端为弹体碰撞切割靶板的起始点，弹体刚碰撞靶板时，切割环较为完整，故在切割前期，靶孔较大，但随着切割的进行，切割环逐渐变形并破碎，切割面积变小，靶孔也随之减小，弹体侵彻靶板末端的靶孔尺寸最小。实验中采用在靶板后一定距离处安装电探针的方法测量弹体的剩余速度，而弹体在一定着角侵彻下，靶板会产生很多小碎片向靶板后方飞去，且弹体切割环撕裂靶板形成的条形靶塞也很容易碰触探针而误触发，故斜侵彻实验中弹体的剩余速度仅能作为参考，本研究中不再进行对照。

3.2 切割环的作用机制

带切割环弹体以一定初始速度(287 m/s)、不同着角侵彻钢靶后的计算结果见表 3，并与常规不带



图 2 正侵彻时弹体及靶板的失效模式对比

Fig. 2 The failure mode comparisons of the projectile and target with the target angle 0°

切割环球形弹体的侵彻结果进行了对比。由表 3 可见,切割环对于球形弹体在防跳弹方面的作用并不明显,且以相同着角侵彻钢靶后,不带切割环弹体的剩余速度高于相应的带切割环弹体,即常规不带切割环的弹体更易开孔,利于弹体后续的侵彻行为。但切割环因其特有的切割机制使得弹体的开孔尺寸增大。

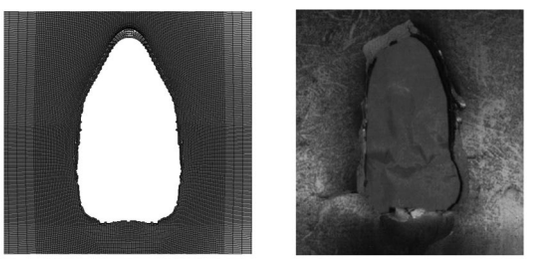


图 3 带切割环弹体斜侵彻时靶板的破坏模式

Fig. 3 The failure mode of the target penetrated by the projectile with cutting mechanism

表 3 带/不带切割环弹体的斜侵彻性能对比

Table 3 The oblique penetration performance comparisons of projectiles with and without cutting mechanism

Target angle/(°)	Cutting mechanism	Perforated	Residual velocity /(m/s)	Perforation size /(mm×mm)
30	With	Yes	121.9	155.1×92.4
	Without	Yes	167.0	106.0×91.2
40	With	Yes	82.6	166.3×95.2
	Without	Yes	137.6	125.4×86.4
50	With	No	—	—
	Without	No	—	—

常规球形弹体的开孔仅依靠弹体的动能侵彻靶板,从而使得靶板破裂。而带切割环的弹体在碰撞靶板初期,切割环薄壁前端即发生弯曲变形,使切割环在变形与未变形的交界处出现如图 4 中的尖端构型。切割环切割靶板的过程如图 5 所示。在切割前期,该尖端构型在滑动过程中逐渐切割靶板表面,使靶板在沿着切割环尖端构型滑动的痕迹上变薄而更易被破坏。随着弹体在靶板上滑动,靶板在沿着尖端构型滑动的痕迹上逐渐失效并被撕裂,而切割环薄壁前端也开始破碎,同时在切割环破碎的分界处(图 5 中的黑圈标记处),切割环的较厚根部开始切割靶板。靶板在切割环两阶段的切割作用下,逐渐撕裂成较为规则的弹头型靶孔,且其尺寸远远大于常规不含切割环球形弹体形成的靶孔。而正因为切割环在靶板上的逐渐切割撕裂行为,使得弹体相当大部分的动能消耗在此撕裂过程中,故带切割环弹体在穿透靶板后的弹体剩余速度低于相应的常规球形弹体。

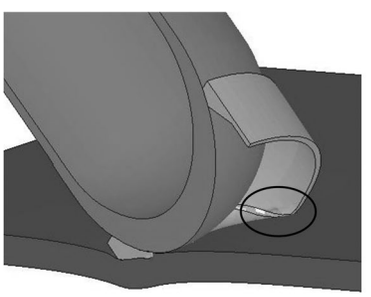


图 4 斜侵彻过程中切割环的尖端构型

Fig. 4 The special sharp shape of the cutting mechanism in the oblique penetrating process

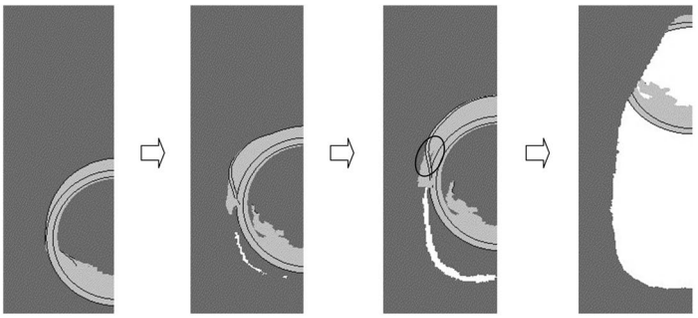


图 5 切割环的切割过程

Fig. 5 The cutting process of the cutting mechanism

3.3 弹体的偏转与攻角的变化

对斜侵彻靶板过程中弹体的偏转及攻角方向的定义如图 6 和图 7 所示。有/无切割环弹体在以不同着角入侵钢靶的过程中,弹体偏转方向的变化如图 8 所示。无切割环弹体在撞靶后迅速发生偏转,而有切割环的弹体撞靶后,切割环薄壁前端的弯曲变形起到缓冲作用,弹体的偏转相对较为缓慢。但有切割环弹体的开孔机制不同于无切割环弹体,使得带切割环弹体的最终偏转角度大于无切割环弹体。有切割环弹体在撞靶后,沿着切割痕逐渐撕裂靶板,在撕裂过程中,弹体头部抵触靶板的被撕裂部分,逐渐发生偏转直至穿过靶孔。而无切割环弹体的穿孔完全靠弹体的动能使得靶板发生破裂,开孔时间较短,故开孔过程中弹体的偏转角度较小。在弹体穿过靶板后,弹体尾部受到靶孔的限制而发生反向偏转,由于无切割环弹头的开孔尺寸较小,靶孔对弹体尾部的限制作用较大,故无切割环弹身发生的反向偏转较为明显。由图 8 可见,随着角的增大,带切割环弹体在斜侵彻过程中的偏转角也增大,且在着角为 40° 时,弹体在靶板上的撕裂过程较长,靶板上的开孔直径较大,穿过靶孔时,弹体尾部并未受到靶孔的阻碍而发生反向偏转。故以 40°着角斜侵彻靶板时,带切割环弹体的偏转角度一直增大,直至弹体穿透靶板,弹体的偏转才逐渐稳定。

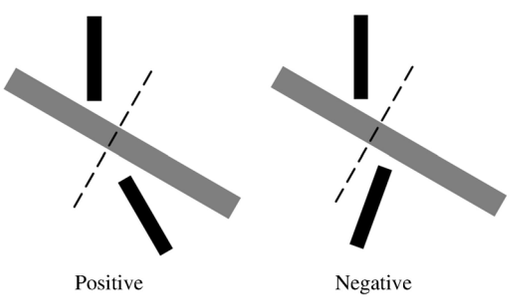


图 6 弹体的偏转方向定义

Fig. 6 The definition of the deflection angle

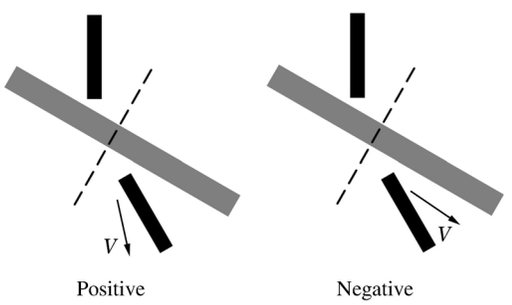


图 7 弹体的攻角方向定义

Fig. 7 The definition of the attack angle

有/无切割环弹体以不同着角侵彻钢靶过程中攻角的变化如图 8 所示。着靶后,随着弹体横向速度的出现,弹体的合速度方向逐渐偏离弹体轴线,而弹体在碰撞初期的偏转速度较慢,故弹体呈现低头姿态(负攻角,即图 8 攻角曲线中第一个负峰值前的阶段)。随着弹体在靶板上的滑移偏转及开孔过程中的偏转加快,弹体逐渐呈现抬头姿态(正攻角,即图 8 攻角曲线中第一个正峰值前)。结合侵彻过程分析可知,图 8 攻角曲线中第一个负峰值处为靶孔的开裂时间,第一个正峰值处则为靶孔形成过程完成及弹体穿过并受到靶孔限制开始的时间。可见,有切割环的弹体在开孔过程中攻角的变化较为缓慢。

3.4 改进型弹体的侵彻性能

切割环薄壁前端在斜侵彻前期即发生弯曲变形,弹体在靶板上更易滑动,从而增加了弹体穿孔的难度,故去除切割环的薄壁前端,即为只含较厚根部的半切割环,如图 9 所示。

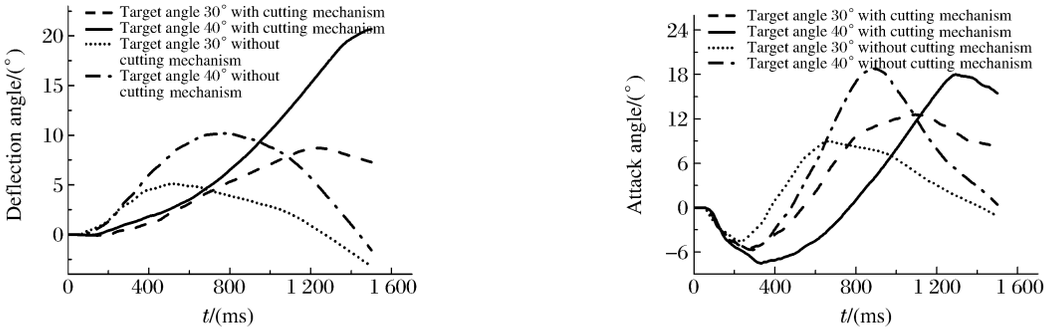


图 8　斜侵彻过程中弹体参数的变化

Fig. 8　The parameter curves of the projectile in the oblique penetrating process

全/半切割环弹体斜侵彻钢靶的性能对比见表 4。结果表明,该改进型半切割环在抵触靶板时的弯曲效应降低,弹体穿孔前在靶板上的滑行距离减小,弹体更易穿孔,防跳弹性能较为优越。以相同角度侵彻靶板时,半切割环弹体的剩余速度高于全切割环弹体,提高了弹体的后续侵彻能力。去除薄壁前端后,弹体更易穿孔,但切割环在弹体穿孔前的切割过程变短,故半切割环弹体侵彻的靶孔尺寸较小。

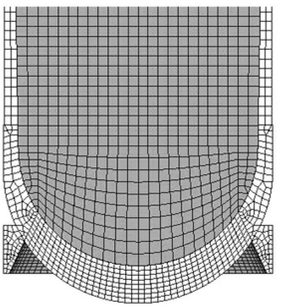


图 9　半切割环弹体构型

Fig. 9　The projectile with half cutting mechanism

表 4　全/半切割环弹体的侵彻性能对比

Table 4　The penetration performance of projectiles with full or half cutting mechanism

rget angle /(°)	Cutting mechanism	Perforated	Residual velocity /(m/s)	Perforation size /(mm×mm)	Sliding distance /(mm)
30	Full	Yes	121.9	155.1×92.4	19.4
	Half	Yes	167.2	105.7×89.4	0
40	Full	Yes	82.6	166.3×95.2	41.4
	Half	Yes	133.3	140.7×90.0	0
50	Full	No	—	125.9×93.6	87.2
	Half	Yes	69.5	187.0×89.6	24.2

4　结　论

对带切割环弹体斜侵彻钢靶的穿甲行为进行了数值模拟研究。全切割环对于弹体在防跳弹方面的贡献并不明显,但带切割环弹体在穿孔过程中形成的尖端构型及其逐渐撕裂靶板的机制使得带切割环弹体的穿孔尺寸远大于常规球形弹体。同时对带切割环弹体在斜侵彻钢靶过程中弹体的偏转及攻角的变化进行了详细的讨论,结果发现,在斜侵彻过程中,弹体的偏转及攻角方向均出现了多阶段的变化过程。提出了一种半切割环弹体构型并进行了对比分析,半切割环使得弹体更易开孔,提高了弹体的防跳弹及后续侵彻性能,但同时也减小了弹体的穿孔尺寸。

References:

[1]　Awerbuch J, Bodner S R. Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates [J]. Int J Solids Struct, 1974, 10(6): 671-684.

[2]　Backman M E, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets [J]. Int J Eng Sci, 1978, 16(1): 1-99.

[3] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(2): 141-230.

[4] Chen X W, Li Q M. Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics [J]. Int J Impact Eng, 2002, 27(6): 619-637.

[5] Chen X W, Li Q M. Perforation of a thick plate by rigid projectiles [J]. Int J Impact Eng, 2003, 28(7): 743-759.

[6] Goldsmith W. Review: Non-ideal projectile impact on targets [J]. Int J Impact Eng, 1999, 22(2/3): 95-395.

[7] Recht R F, Ipson T W. Ballistic perforation dynamics [J]. J Appl Mechanics-Transactions ASME, 1963, 30(2): 385-391.

[8] Ipson T W, Recht R F. Ballistic penetration resistance and its measurement [J]. Exp Mech, 1975, 15(7): 249-257.

[9] Awerbuch J, Bodner S R. An investigation of oblique perforation of metallic plates [J]. Exp Mech, 1977, 17(4): 147-153.

[10] Chen X W, Li W, Song C. Oblique penetration/perforation of metallic plates by rigid projectiles with slender bodies and sharp noses [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(5): 393-399. (in Chinese)
陈小伟, 李 维, 宋 成. 细长尖头刚性弹对金属靶板的斜侵彻/穿甲分析 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 393-399.

[11] Dong Y X, Feng S S, Duan X J. Oblique penetration characteristics of multi-layered spaced targets by steel projectiles [J]. Journal of North University of China, 2010, 31(3): 221-226. (in Chinese)
董永香, 冯顺山, 段相杰. 弹丸斜侵彻多层金属间隔靶特性研究 [J]. 中山大学学报, 2010, 31(3): 221-226.

Numerical Studies on the Oblique Penetration Behavior of the Projectile with Cutting Mechanism into a Steel Target

GUO Liu-Wei, TAN Duo-Wang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621999, *China*)

Abstract: The penetration behavior is very important for the semi-armor-piercing warhead. The oblique penetration behavior of the projectile with cutting mechanism was studied numerically by using the finite element code LS-DYNA. The penetration performance of the projectiles with and without cutting mechanism were compared respectively on the limit ricochet angle, the residual velocity after perforation, the dimension of the hole and the sliding distance of the projectile on the target before perforation. It shows that the numerical results agree well with the experimental ones. It reveals that the anti-ricochet effect of the cutting mechanism on the projectile is not so obvious but the dimension of the hole created by the projectile with cutting mechanism is much larger than that of the traditional projectile. The deflection and attack angle of the projectile with cutting mechanism change to different extent compared to the case of the traditional projectile. An optimized projectile with half cutting mechanism was proposed, and the simulated results showed that the anti-ricochet ability of this optimized projectile is better.

Key words: projectile; oblique penetration; cutting; numerical simulation