文章编号：1000-5773(2012)05-0487-07

不同罩材聚能装药对多层介质侵彻的实验与数值模拟*

康彦龙，蒋建伟，王树有，门建兵

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081）

摘要：为实现聚能装药对多层介质的大破孔侵彻，提出了钛合金药型罩聚能装药设计方案。采用实验与数值模拟相结合的方法，对钛合金、低碳钢及紫铜罩聚能装药侵彻多层介质进行了研究，分析了钛合金聚能侵彻体相对于紫铜和低碳钢侵彻体在成型过程中，其动能、头部速度及射流长度等的差异，并对侵彻过程中应力波的传播特性进行了分析。结果表明：相对于紫铜和低碳钢，钛合金罩聚能侵彻体的能量转换率高，所获得的动能大，头尾速度梯度小，外形更为短粗；虽对多层介质侵彻时侵彻深度有所减小，但漏斗坑尺寸明显增大，且平均破孔孔径提高了约 20%。

关键词：药型罩材料；聚能装药；钛合金；侵彻

中图分类号：O385；TJ301 **文献标识码**：A

1 引 言

聚能装药对机场跑道类多层介质的侵彻是串联战斗部所要实现的重要功能，其侵彻结果是后级弹能否随进的前提。为实现对机场跑道类介质结构最大程度的爆炸毁伤，要求聚能侵彻体能够穿透面层混凝土且侵彻深度不至于太深，以防产生隐爆；同时，对面层混凝土侵彻破孔孔径要尽量大，以使后级弹达到较理想的炸点。通常条件下，聚能装药采用低碳钢及紫铜药型罩，虽能对目标产生较大的侵彻效能，但由于侵彻深度很深，破孔孔径较小，严重制约了串联后级弹的随进。一些学者[1-2]对含能铜罩进行了侵彻研究，通过调整氧化剂含量来提升对目标的破坏。吴成等[3]研究了粉末成型钨合金药型罩对钢靶的大孔径破甲，指出相比于铜罩，钨合金罩聚能装药侵彻钢靶其破甲孔径明显增大。然而，由于多层介质结构从面层向下到底层介质，材料的抗压强度和密度等参数差别很大，所以，对该结构的侵彻不同于对单一介质。目前，关于聚能装药对多层介质的大破孔侵彻仍需进一步研究。

本研究提出一种钛合金药型罩设计方案，分别与低碳钢及紫铜罩材聚能装药对多层介质的侵彻进行了对比分析。通过实验与数值模拟相结合的手段，研究钛合金、紫铜及低碳钢聚能侵彻体在成型过程中特征参数的差异，同时对侵彻过程中应力波的传播特性进行分析。研究结果可为聚能装药的大破孔设计提供依据。

2 实验研究

2.1 实验条件

图 1 为所设计的未装配壳体时的聚能装药实验照片。3 种材料药型罩均为球缺变壁厚罩，分别采用钛

* **收稿日期**：2010-12-20；**修回日期**：2011-03-26

基金项目：科技部“973”项目(3020021301002)；爆炸科学与技术国家重点实验室基金(ZDKT11-02)

作者简介：康彦龙(1984—)，男，博士，主要从事弹药仿真技术研究.

通讯作者：蒋建伟(1962—)，男，教授，主要从事弹药工程及系统仿真技术研究. E-mail：bitjjw@bit.edu.cn

合金、低碳钢及紫铜，对应的罩材密度分别为 5.1、7.8 和 8.9 g/cm^3。装药直径 D_k 为 130 mm，长径比为 0.8，壳体厚度为 0.025D_k，药型罩罩顶厚度为 0.05D_k。选择 JH-2 炸药，密度 1.68～1.70 g/cm^3。

图 2 为实验中弹靶现场布置图，装药垂直放置在支撑架上，炸高为 0.8D_k，装药由固定在底端的雷管起爆；多层介质靶面层混凝土厚度 350 mm，抗压强度 35 MPa，基层为 250 mm 厚的碎石层，底层为夯实土。

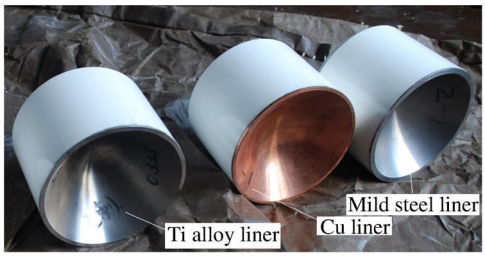


图 1 不同药型罩材料下的聚能装药实验照片

Fig. 1 Photos of manufactured liners and shaped charge with different liner materials

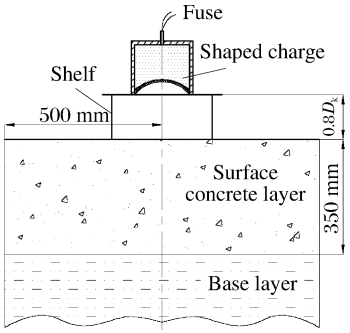


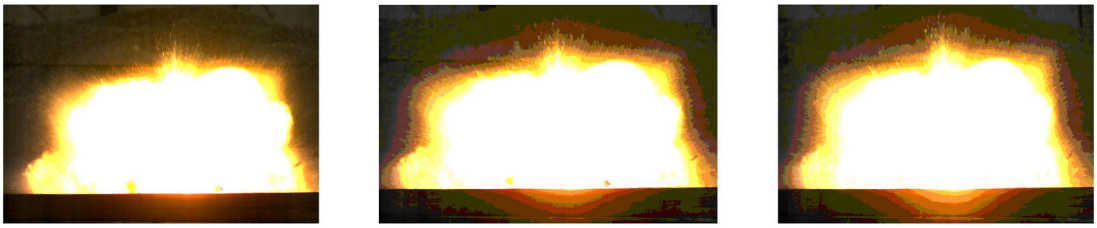
图 2 实验现场布置图

Fig. 2 The experimental configuration

2.2 实验结果分析

对钛合金、低碳钢以及紫铜 3 种药型罩材料聚能装药侵彻多层介质进行了多发实验，并用高速摄影仪记录整个爆炸过程。图 3 为不同罩材料聚能装药侵彻过程典型时刻高速摄影照片。

图 3(a)为聚能装药起爆后 100 μs 状态图，可以看出，3 种罩材料聚能装药爆炸产生的爆炸波形及火光区域的范围基本一致，此时，炸药完全爆轰，形成的聚能侵彻体即将开始侵彻。图 3(b)为侵彻过程中300 μs状态图，从图中看出，此时不同罩材爆炸波形及爆轰产物火光区域有明显差别：低碳钢、紫铜罩材的爆轰产物火光范围基本一致，且相比于开始阶段减少了许多；而钛合金罩材火光区域还很明显，并在火光区域上方产生了向外飞溅的发光产物，说明侵彻过程发生了剧烈的化学反应。



Ti alloy　　Mild steel　　Cu

(a) t=100 μs



Ti alloy　　Mild steel　　Cu

(b) t=300 μs

图 3 不同罩材料下侵彻过程典型时刻的高速摄影照片

Fig. 3 The high-speed camera photos of penetration with different liner materials

图 4 为 3 种方案聚能装药侵彻多层介质破孔实验照片。从图 4 可以看出,钛合金罩其破孔孔径明显大于紫铜以及低碳钢罩,破孔周围混凝土块体的破碎更为严重;同时,在破孔孔壁发现有经高温燃烧烧蚀而形成的黑色产物(从另一个角度证实了图 3(b)中发生了化学反应),并产生了爆炸波形及火光区域差异明显的现象。另外,对于钛合金方案,在混凝土破坏区域周围产生的裂纹更多。

表 1 为所有聚能装药侵彻多层介质后所测得的实验数据,其中 P 为侵彻深度,d 为椭圆形破孔孔径,D 为漏斗底椭圆直径,h 为漏斗坑深度。从表 1 中的结果来看,相比于低碳钢及紫铜,钛合金方案下得到的侵彻深度有一定减少,但还是穿透了面层混凝土。从侵彻孔径来看,钛合金相比于二者提高了约 20%;另外,在面层混凝土产生的漏斗坑深度及底圆直径分别增加约 15%及 10%。



Ti alloy　　Mild steel　　Cu

图 4　不同罩材聚能装药侵彻多层介质后实验结果照片

Fig. 4　The photos of penetrated hole with different liner materials

表 1　3 种罩材方案下聚能装药侵彻多层介质实验结果

Table 1　The experimental results of different liner materials

Liner material	P/(mm)	d/(mm)	D/(mm)	h/(mm)
Ti alloy	385	78×70	800×750	220
	420	76×72	830×810	235
Mild steel	526	60×65	740×700	200
Cu	575	60×55	650×600	195
	550	65×56	610×760	190

从力学角度分析,钛合金密度低于低碳钢和紫铜,且具有较好的强度和塑性,在爆轰压力压垮过程中,能很好地吸收爆炸产物的能量,形成的聚能侵彻体头部直径大、外形较为短粗,在一定程度上导致侵彻破孔孔径增大。另外,在物理性质上钛合金对绝热剪切极其敏感,王彦平曾记录了钛合金绝热剪切带的发光特性[5];同时,在高温下钛元素能与空气中的 N_2 发生剧烈的燃烧反应[6],所以,钛合金材料聚能侵彻体在侵彻过程中,在侵彻体表面势必形成自持高温火焰燃烧层,伴随高温高压作用产生了强烈的化学反应,造成了附加的发光、剧烈氧化放热以及引燃效应等能量释放过程,在此作用下破孔孔径得到进一步提高。

3　数值模拟计算

3.1　数值模型

运用 AUTODYN 仿真软件,对上述药型罩材料的聚能装药侵彻多层介质进行数值计算。由于装药在起爆后,聚能侵彻体在成型、飞行以及侵彻靶时,介质材料发生大变形,故整个过程采用模拟流体与结构相互作用的 Euler-Lagrange 耦合算法进行描述。

图 5 为建立的数值计算模型,考虑到聚能装药以及靶的对称性,建立 1/2 模型。炸高 S_d 为 $0.8D_k$,靶径向尺寸 R 为 500 mm;在聚能装药的 Euler 区周围设定流出边界;为了获得侵彻过程中应力波在靶中的传播规律,在面层混凝土中设置了观测点 A。

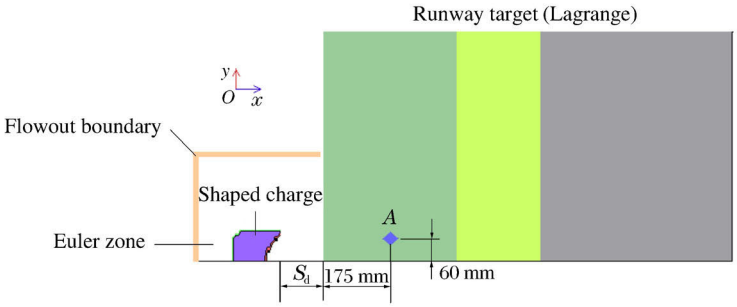


图 5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical model of simulation

3.2 材料模型

聚能装药中壳体及药型罩等金属材料，均采用 Jonhson-Cook 材料模型，该模型能够反映金属材料在受到高应变、高应变率以及温度变化时的响应特征。装药为 JH-2，采用 JWL 状态方程描述炸药的爆轰以及能量的释放过程。面层及基层混凝土采用 p-α 状态方程和 RHT 材料模型[7]。采用 Mie-Grüneisen 状态方程及 Drucker-Prager 强度模型[8]，描述底层土壤在爆炸冲击载荷下的作用过程。

3.3 聚能侵彻体成型特性分析

图 6 为钛合金、低碳钢及紫铜药型罩聚能侵彻体着靶前的成型图。从图 6 中可看出，钛合金聚能侵彻体外形短粗，直径较低碳钢及紫铜侵彻体更大，而低碳钢及紫铜侵彻体则由于头尾速度梯度大而更为细长。



图 6 不同药型罩材料聚能侵彻体成型图

Fig. 6 The jet formation states with different liner materials

图 7 为不同材料药型罩被压垮时 y 方向速度随时间变化的曲线。从图 7 可看出，钛合金罩材下 y 向速度最大，低碳钢罩的压垮速度小于钛合金，而紫铜罩的压垮速度最小。在大约 20 μs 时，药型罩被完全压垮且在轴线产生汇聚，由于药型罩结构的对称性，故在发生汇聚的过程中 y 向速度逐渐发生碰撞抵消。在大约 100 μs 时，y 方向速度减小为零，此时，聚能侵彻体完全成型。

图 8 为不同材料药型罩在压垮过程中，炸药的爆炸能量转化为侵彻体动能与时间的关系曲线。从图 8 中可看出，低碳钢及紫铜药型罩在压垮过程中，其聚能侵彻体获得的动能基本相同，而钛合金罩其聚能侵彻体所获得的动能有明显提高，相比二者增加约 30%。

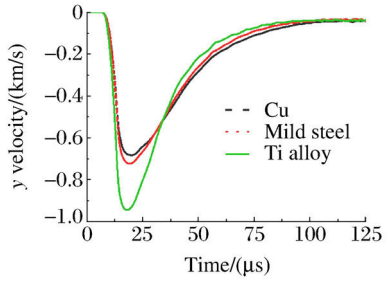


图 7 不同罩材侵彻体成型时 y 向速度与时间关系曲线

Fig. 7 y velocity during jet formation with different line materials

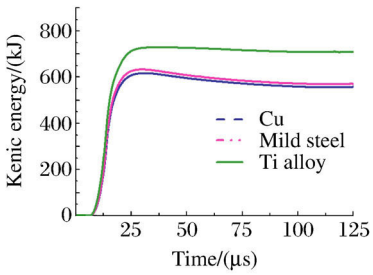


图 8 不同罩材侵彻体成型时动能与时间关系曲线

Fig. 8 Kinetic energy of jet during jet formation with different line materials

图 9 为不同罩材聚能侵彻体的头部速度随时间变化的曲线。从图 9 中可知,在侵彻体头部速度达到稳定时,低碳钢及紫铜罩侵彻体的头部速度相差不大,而钛合金侵彻体的头部速度相比于二者分别提高约 13%和 19%。

图 10 为不同罩材侵彻体在成型过程中其长度随时间变化的曲线。从图 10 中可知,3 种罩材侵彻体随时间增大逐渐被拉长,时间越长,钛合金较低碳钢和紫铜罩材侵彻体长度的差别越大。究其原因,在于侵彻体在成型过程中,钛合金聚能侵彻体的头尾速度梯度小,而低碳钢及紫铜侵彻体梯度高。

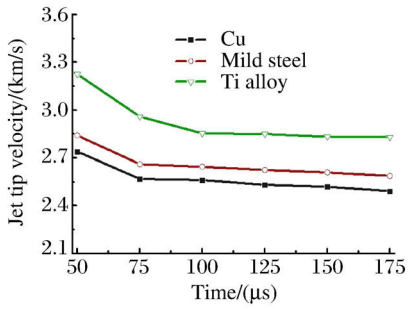


图 9　不同罩材聚能侵彻体头部速度与时间关系曲线

Fig. 9　Tip velocity of jet with different liner materials

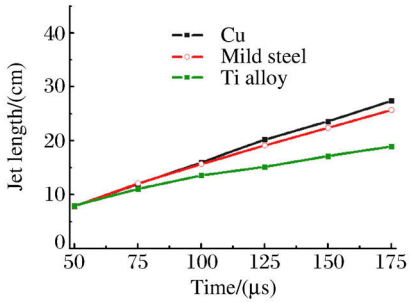
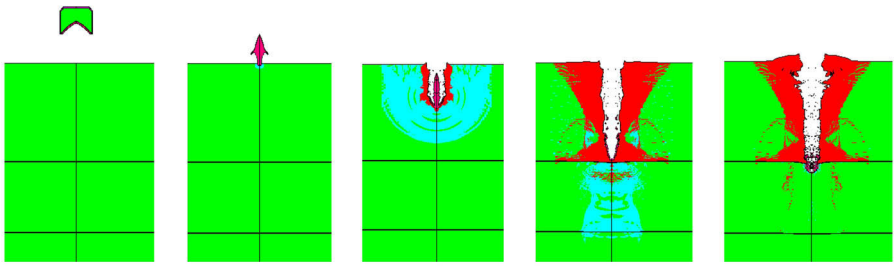


图 10　不同罩材聚侵彻体长度与时间关系曲线

Fig. 10　The length of jet with different liner materials

3.4　聚能侵彻体对多层介质侵彻结果分析

图 11 为钛合金罩聚能侵彻体对多层介质侵彻时,得到的不同时刻材料损伤状态图。从图 11 可以看出,在约 100 μs 时聚能侵彻体着靶,并由头部接触处开始向混凝土中传入强压缩波。当进入稳定侵彻阶段时,破孔周围混凝土受到强压缩波作用,产生不同程度的损伤及强度弱化。在约 700 μs 时侵彻结束,并在面层混凝土产生漏斗状的损伤区。



(a) $t=0$　(b) $t=100$ μs　(c) $t=200$ μs　(d) $t=500$ μs　(e) $t=700$ μs

图 11　钛合金罩材对多层介质侵彻时不同时刻的介质损伤图

Fig. 11　The material state of multi-layer during penetration with Ti alloy liner materials

图 12 为不同罩材聚能装药在侵彻过程中观测点 A 处的应力与时间关系曲线。从图 12 中看出,不同罩材侵彻体在侵彻过程中,应力波强度在面层混凝土中的传播规律有所差别。对于低碳钢及紫铜罩材情况,在侵彻过程中其压力变化曲线较为一致,压力峰值也基本相同。而对于钛合金罩,由于其聚能侵彻体的头部速度高、动能大,应力波峰值较低碳钢及紫铜罩有明显增加,峰值应力增大约 25%。

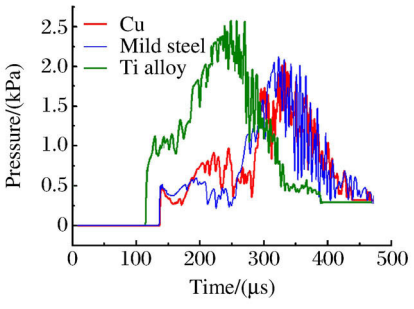


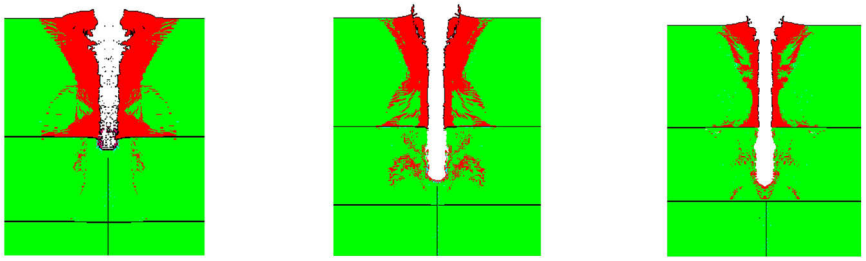
图 12　不同罩材侵彻过程中 A 点处的应力与时间关系曲线

Fig. 12　The pressure curve in A gauge during penetration with different liner materials

图 13 为不同罩材聚能装药对多层介质的侵彻结果。从图 13 明显看出,低碳钢及紫铜罩得到的侵彻深度及孔径较为相似,钛合金相比于二者侵彻深

度虽有所减小，但侵彻孔径有大幅提高。另外，从图 13 可以明显看出，钛合金罩其破孔周围混凝土呈现漏斗状的损伤破坏区域更大，与实验结果相一致。

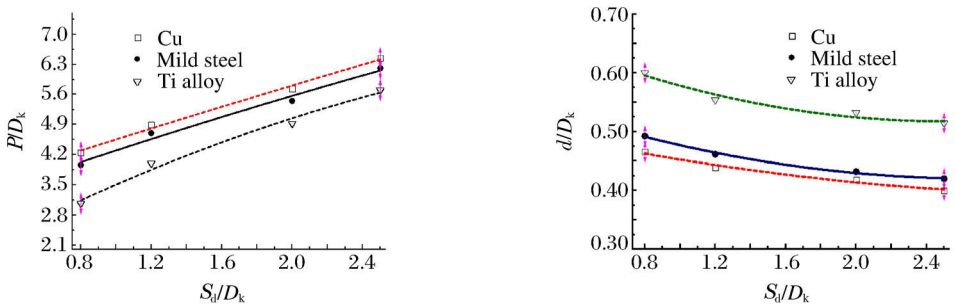
图 14 为不同罩材聚能装药侵彻多层介质时，计算得出的侵彻深度及破孔孔径随炸高的变化曲线。从图 14 可以看出，在相同炸高条件下，钛合金、低碳钢及紫铜罩其侵彻深度依次增加，低碳钢及紫铜罩的侵彻深度相差不多；钛合金罩的侵彻深度相对有一定减小，但其侵彻孔径较低碳钢及紫铜罩却有较大提高，约提高 15%～20%。



(a) Ti alloy (b) Mild steel (c) Cu

图 13 不同罩材聚能侵彻体对多层介质侵彻结果

Fig. 13 The penetration result of simulation with different liner materials



(a) Depth of penetration (b) Penetration diameter

图 14 侵彻深度及破孔直径随炸高的变化关系曲线(相对装药直径 D_k 的无量纲值)

Fig. 14 The curve of penetration hole diameter and depth with standoff (The dimensionless value of relative to D_k)

4 结 论

采用实验与数值模拟相结合的方法，对钛合金、低碳钢及紫铜药型罩聚能装药侵彻多层介质进行了研究，得出如下结论。

(1) 提出的钛合金罩聚能装药设计方案实现了对多层介质的大破孔侵彻，实验及数值计算结果表明，钛合金药型罩其破孔孔径较传统罩材破孔孔径提高约 20%。

(2) 在钛合金药型罩被压垮、侵彻体成型过程中，侵彻体表面形成了高温火焰燃烧层。在高温高压侵彻过程中产生了强烈的化学反应，伴随有发光、剧烈氧化放热等能量释放现象。

(3) 相比于紫铜及低碳钢材料，钛合金药型罩聚能装药在侵彻体形成的过程中，头部直径大，头尾速度梯度小，外形较为短粗。在压垮过程中，钛合金药型罩比其它材料的能量转换率更高，所获得的动能更大。

References:

[1] Baker E L, Daniels A S. Barnie: A unitary Demoli Ti alloy on warhead [A]//19th International Symposium of Ballistics [C]. Interlaken, Switzerland, 2001: 569-574.

[2] Wang Y, Jiang W, Liu H Y, et al. Progress in materials and processing technology of powder liners [J]. Chinese Journal of Energetic Material, 2007, 15(5): 555-559. (in Chinese)
王　毅,姜　炜,刘宏英,等. 粉末药型罩材料及其工艺技术的研究进展 [J]. 含能材料, 2007, 15(5): 555-559.

[3] Wu C, Liao S S, Sun T, et al. Research on shaped charge warhead employing large diameter penetrating hole with tungsten alloy liner [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(9): 760-766. (in Chinese)
吴　成,廖莎莎,孙　韬,等. 钨合金药型罩材料的大破孔聚能战斗部研究 [J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(9): 760-766.

[4] Century Dynamics Inc. AUTODYN User Manual [M]. USA: Century Dynamics in Corporation, 2001.

[5] Wang Y P. The research of dynamical fracture of TC4 alloy [D]. Beijing: The Beijing Graduate School, CAEP, 1990. (in Chinese)
王彦平. TC4 钛合金的动态断裂研究 [D]. 北京:中国工程物理研究院北京研究生部, 1990.

[6] Hu B Y, Dong Q D, Han C S, et al. Analysis of the firing mechanics for Ti-6Al-4V natural fragments [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(3): 254-257. (in Chinese)
胡八一,董庆东,韩长生,等. TC4 钛合金自然破片的引燃机理分析 [J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(3): 254-257.

[7] Tu Z G, Lu Y. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(1): 132-146.

[8] Luccioni B, Ambrosini D, Nurickc G, et al. Craters produced by underground explosions [J]. Comput Struct, 2009, 87(21-22): 1366-1373.

Experimental and Numerical Simulation Study of Penetration into Multi-Layer Target by Shaped Charge with Different Liner Materials

KANG Yan-Long, JIANG Jian-Wei, WANG Shu-You, MEN Jian-Bing

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: To investigate the large penetrated hole's performance of shaped charge against multi-layer target, a titanium alloy liner of shaped charge is proposed. Using the method of experimental and numerical simulation, the jet formation and penetration into multi-layer target are investigated. Difference among the explosion energy conversion, jet tip velocity, jet length, penetration performance, and also the shock wave propagation in the penetrating process are analyzed, for which liner materials include titanium alloy, mild steel and Cu. It is found that compared with the mild steel or Cu liner, the liner material made of titanium alloy has a larger energy of jet whose shape is podgier, the depth as well as diameter of crater is bigger. Although the penetration depth decreases slightly, the size of crater formed in concrete increases obviously and the average penetrated hole diameter on multi-layer increases by 20%.

Key words: liner material; shaped charge; titanium alloy; penetration