

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.008

# 下方介质对爆炸切割脆性平板的影响研究\*

李木易<sup>①</sup> 邹德波<sup>②</sup> 赵 铮<sup>②</sup>

①海装重大项目中心(北京,100071)

②南京理工大学能源与动力工程学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 以有机玻璃为对象,研究下方介质对爆炸切割脆性平板的影响。当有机玻璃平板下方介质为空气、水、橡胶板时,进行爆炸切割有机玻璃平板试验及仿真。结果表明:改变有机玻璃平板下方介质将对平板断裂情况造成影响,当下方介质为空气时,平板断裂情况中层裂效果是最明显的,射流侵彻及冲击断裂影响较小;当下方介质为水时,射流侵彻对平板断裂作用最大,层裂效果减小,获得的平板断裂切口更为整齐;当下方介质为橡胶板时,相比于下方介质为空气时层裂效果会有所减小,射流侵彻效果有所增加,同样会获得相对整齐的断裂切口。研究结果可以为实际工程中涉及不同介质时爆炸切割脆性材料提供参考。

[关键词] 爆炸切割;脆性平板;聚能装药

[分类号] O383

## Influence of the Underlying Medium on Explosive Cutting of Brittle Plates

LI MUYI<sup>①</sup>, ZOU DEBO<sup>②</sup>, ZHAO ZHENG<sup>②</sup>

① Major Marine Decoration Project Center (Beijing, 100071)

② School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Taking PMMA (polymethyl methacrylate) as the object, the influence of the underlying medium on explosive cutting of brittle plate was studied. When the medium below the PMMA plate was air, water or rubber plate, experiment and simulation of explosion cutting PMMA plate were carried out. The results show that changing the underlying medium will affect the fracture of the plate. When the underlying medium of the PMMA plate is air, the spalling effect of the plate fracture is the most obvious in the case of plate fracture, and jet penetration and impact fracture have little effect. When the medium below the PMMA plate is water, jet penetration has the largest effect on plate fracture, and spalling effect decreases, so the obtained plate fracture incision is more uniform. When the medium below the PMMA plate is a rubber plate, compared with the air below the PMMA plate, the spalling effect reduces, jet penetration effect increases, and a relatively neat fracture incision is also obtained. The research results can provide reference for explosive cutting of brittle materials involving different media in practical engineering.

[KEYWORDS] explosive cutting; brittle plate; shaped charge

### 引言

爆炸切割是一种比较成熟的切割手段,被广泛地应用于军事、航空航天及工程领域。爆炸切割有着切割能量大、切割时间短、安全性高及环境适应性强等特点。因此,在一些特定环境,爆炸切割手段有着很大的优势。

爆炸切割是利用聚能装药爆炸时产生的强烈爆炸波与金属射流对材料进行切割处理的一种技术。聚能装药起源于空穴效应理论<sup>[1]</sup>。后来,在 X 射线和压垮试验研究基础上, Birkhoff 及他的团队<sup>[2]</sup>于 1948 年提出了一种理论,使得药型罩聚能装药理论模型被大大地简化;之后在 1952 年, Pugh 等<sup>[3]</sup>改进了 Birkhoff 的分析方法,模型变得稍微复杂,但精度得到很大的提高,即 PER (Pugh-Eichelberg-Rostoker)

\* 收稿日期:2021-03-30  
基金项目:国家自然科学基金项目(11302106)  
第一作者:李木易(1984 - ),男,工程师,主要从事装备项目管理。E-mail:978048924@qq.com  
通信作者:赵铮(1979 - ),男,博士,副教授,主要从事爆炸力学研究。E-mail:zhaozheng@126.com

理论。

为了让爆炸切割有更好的应用,国内外学者针对爆炸切割技术进行了很多技术性研究。Pai 等<sup>[4]</sup>研究了聚能射流形成过程中药型罩的不稳定性,利用黑索今(RDX)炸药对药型罩进行压垮,然后使用闪光照相技术记录了整个射流形成过程,确定了金属流动形态。刘志跃等<sup>[5]</sup>对铝铜药型罩不同锥角时的射流形成及侵彻过程进行了数值模拟,结果表明:射流头部速度随着铝铜药型罩锥角的减小而增大,在锥角为 38°时射流深度达到最大。为了获得某线型聚能装药的主要结构参数,武双章等<sup>[6]</sup>运用正交表获得了不同的试验方案,然后利用 LS-DYNA 对各方案进行了数值模拟,获得了不同方案的最大射流速度和射流断裂前的最大长度。同样利用正交设计方法,龚文涛等<sup>[7]</sup>针对钢结构目标优化设计了一种组合式的爆炸切割装置,此装置可以实现对钢结构目标的快速高效切割。潘书才等<sup>[8]</sup>借助 LS-DYNA 软件对线型聚能切割器水下切割钢板性能的影响因素进行了数值模拟,重点分析了水介质、有无药型罩和带有空气槽等因素对射流侵彻靶板的特性影响,结果表明:聚能槽内的水介质会阻碍射流的形成,严重影响切割性能;带有空气槽的切割器可以提供射流形成的空间,大幅提高射流的侵彻能力。Elshenawy 等<sup>[9]</sup>提出了一种改进的 Allison-Vitali 模型,试验和数值模拟研究表明,靶板的屈服强度可以大大降低聚能射流的侵彻深度。

本文中,将进行爆炸切割脆性平板试验及仿真研究。通过改变脆性平板下方介质(空气、水及橡胶),对爆炸切割结果进行对比分析,得到不同介质对爆炸切割的影响,为军事及工程方面提供参考。

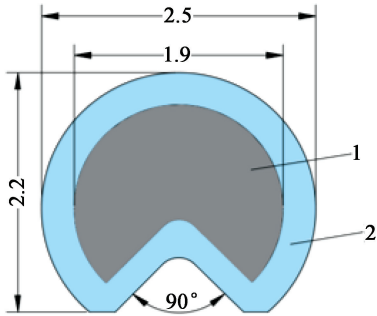
1 爆炸切割脆性平板试验

1.1 试验材料及方法

爆炸切割试验中采用的是以铅铋合金作为药型罩、RDX 进行装药的线型切割索。RDX 起爆威力大,具有较高的爆温和爆速,且化学稳定性好,密度为 1.717 g/cm<sup>3</sup>,爆速为 7 980 m/s。图 1 给出了该切割索截面。

有机玻璃密度为 1.18 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为 2.5 GPa,泊松比为 0.31,抗拉强度为 50 MPa。橡胶板密度为 1.0 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为 0.2 MPa,泊松比为 0.49。

试验分为 3 组:第 1 组,有机玻璃下方介质为空气;第 2 组,有机玻璃下方介质为水;第 3 组,有机玻



1 - 炸药;2 - 药型罩。

图 1 切割索截面(单位:mm)

Fig. 1 Section of cutting cable (unit:mm)

璃下方粘有 2 mm 厚度的橡胶板。每组试验中,分别对厚度为 5.0、10.0、15.0 mm 的有机玻璃平板进行爆炸切割,共需切割 9 块有机玻璃平板。采用零炸高进行爆炸切割试验:一方面,工艺上容易保证炸高精度;另一方面,零炸高时切割索与平板完全接触,爆炸产生的冲击波几乎完全作用于有机玻璃平板,能够提高层裂和冲击断裂的效果。试验前需将有机玻璃平板固定在工装上,再接电爆管用于起爆。第 1 组与第 3 组试验中所用工装相同,如图 2(a)所示;第 2 组试验时将有机玻璃板固定在工装后,如图 2(b)所示。



(a) 工装 1<sup>#</sup>

(b) 工装 2<sup>#</sup>

图 2 爆炸切割试验装置

Fig. 2 Explosive cutting experimental device

1.2 试验结果与分析

试验结束,将有机玻璃平板回收,对切口进行拍照,再利用 Image J 软件测量切口尺寸。在爆炸切割手段下,脆性平板结构动态断裂主要受到射流侵彻、层裂和冲击断裂的综合作用。本文中,将针对这几部分对断裂组成进行划分。

第 1 组试验结果如图 3 所示。5.0、10.0、15.0 mm 3 种厚度的有机玻璃平板全部切割成功。5.0 mm 的有机玻璃平板由于厚度过薄,切割索装药量偏大,导致断口处层裂和冲击断裂区域较难区分。这里便将其断裂分为两部分,断裂后射流侵彻深度为 2.0 mm,层裂及冲击断裂厚度为 3.0 mm;10.0

mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 3.2、4.6 mm 和 2.2 mm；15.0 mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为4.6、6.5 mm 和 3.9 mm。

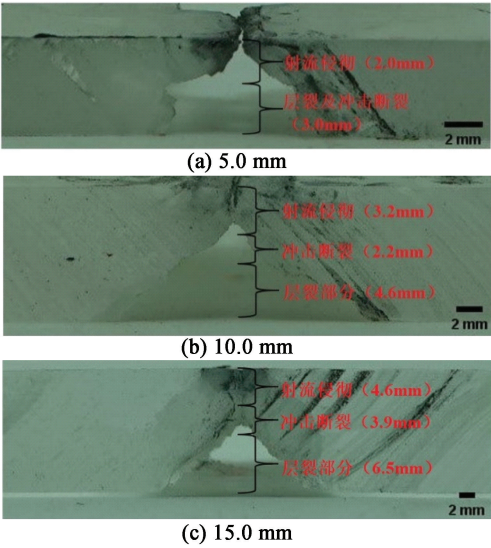


图3 第1组爆炸切割试验结果

Fig. 3 Results of explosive cutting test of Group 1

第2组试验结果如图4所示。5.0、10.0、15.0 mm 3种厚度的有机玻璃平板全部切割成功。5.0 mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度为 2.7 mm，层裂及冲击断裂厚度为 2.3 mm；10.0 mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 4.5、2.8 mm 和 2.7 mm；15.0 mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 6.8 、5.4 mm 和 2.8 mm。

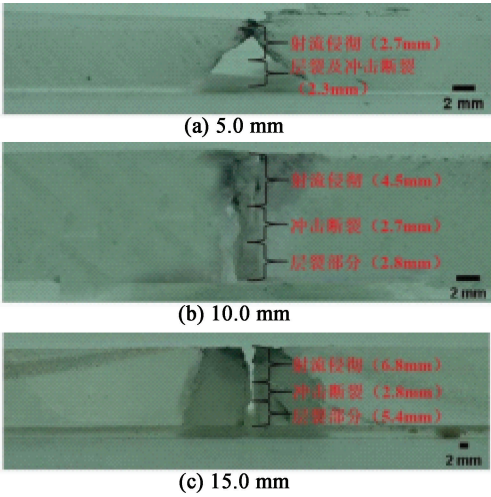


图4 第2组爆炸切割试验结果

Fig. 4 Results of explosive cutting test of Group 2

第3组试验结果如图5所示。5.0、10.0、15.0 mm 3种厚度的有机玻璃平板全部切割成功。5.0 mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度、层裂及冲击断裂厚度分别为 2.6、2.4 mm；10.0 mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 3.8、4.4 mm 和 1.8 mm；15.0 mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 5.4、5.7 mm 和 3.9 mm。

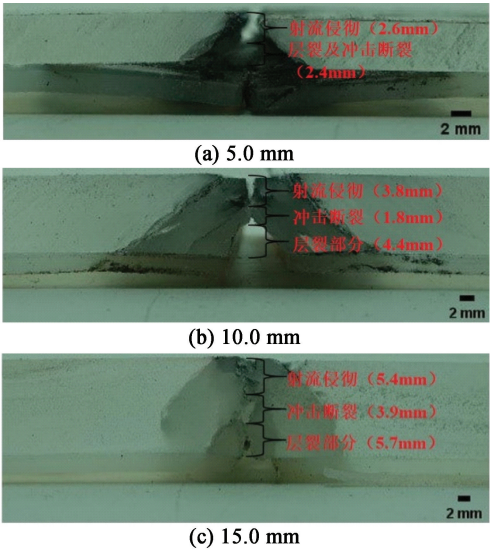


图5 第3组爆炸切割试验结果

Fig. 5 Results of explosive cutting test of Group 3

将每组试验进行对比,如图6所示。可以看出:有机玻璃平板下方介质为空气时进行爆炸切割试验,层裂对平板断裂的贡献更大,在射流侵彻与冲击断裂的综合作用下平板完全断裂;有机玻璃平板下方介质为水时进行爆炸切割试验,射流侵彻作用对平板断裂的贡献更大,同下方介质为空气时相比,爆炸切割所产生的层裂要小很多,从试验结果可以看

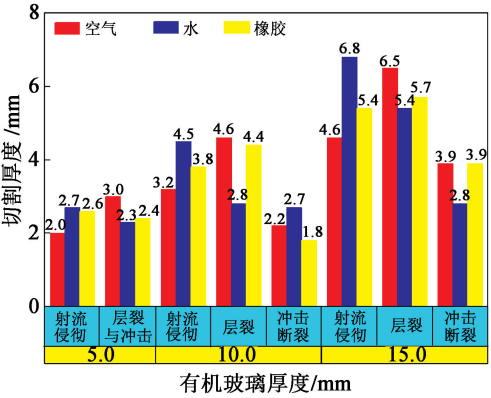


图6 下方介质对爆炸切割有机玻璃平板的影响

Fig. 6 Influence of the underlying medium on explosive cutting of PMMA



出这样获得的切口更加整齐;有机玻璃平板下方介质为橡胶板时进行爆炸切割试验,与下方介质为空气时相比射流侵彻作用有所提高,层裂效果也有所减小,因此第 3 组试验的切口也是比较整齐的。整体来看,改变有机玻璃下方介质会对爆炸切割效果造成影响,下方介质为空气时,有机玻璃平板层裂效果明显,平板切口整齐度较低;下方介质为水与橡胶板时,会减少有机玻璃平板的层裂效果,有机玻璃平板断裂更依赖射流侵彻,可以获得更好的切口。

2 爆炸切割脆性平板仿真

2.1 有限元模型

每组试验中工况的概念图见图 7。第 1 组模型主要由有机玻璃(PMMA)平板、切割索及空气域构成;第 2 组模型主要由有机玻璃平板、切割索、空气域及水域构成;第 3 组模型主要由有机玻璃平板、切割索、橡胶板及空气域构成。

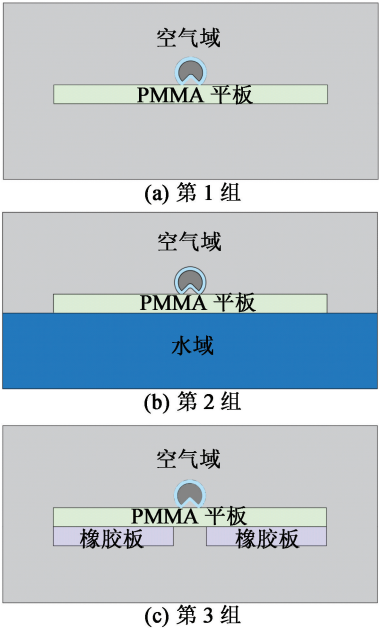


图 7 概念图  
Fig. 7 Concept map

依照概念图建立有限元模型,模型尺寸与实际尺寸一致,建模过程中均采用 cm-g-μs 单位制。由于该模型的对称性,所以在建模时采用 1/2 模型建立,在对称面上施加对称约束,靶板端面施加全自由度约束,来模拟工装对靶板的约束作用。对模型进行网格划分,整个模型为单层实体网格。这里只给出每组中一种厚度的有限元模型,如图 8 所示。

2.2 材料模型

利用LS-DYNA有限元软件进行数值仿真。其

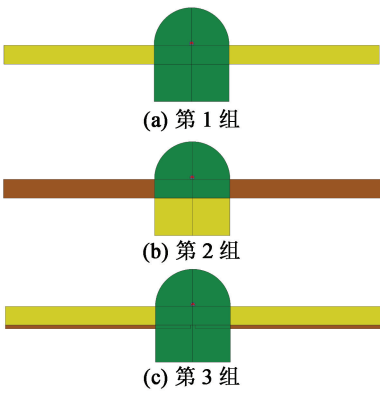


图 8 有限元模型  
Fig. 8 Finite element model

中,有机玻璃平板采用的是适用于陶瓷、玻璃和其他脆性材料的 110# 材料模型 (\* Mat \_ Johnson \_ Holmquist\_Ceramics),即 J-H 塑性损伤模型;空气域与水域采用的是 009# 材料模型 (\* Mat\_Null) 和 \* Eos\_Linear\_Polynomial 状态方程;橡胶板、切割索所用铅铋合金药型罩,采用的是 001# 材料模型 (\* Mat \_ Elastic);切割索内的炸药采用的是 008# 材料模型 (\* Mat\_High\_Explosive\_Burn),即高能炸药模型,该材料模型中燃烧分数  $F$  与高能炸药的状态方程相乘,可控制化学能的释放以模拟爆炸,如式(1)。

$$p = F p_{\text{eos}}(V, W)。$$
 (1)

采用 JWL 状态方程来定义压力:

$$p = I(1 - \frac{\omega}{R_1 V}) e^{-R_1 V} + J(1 - \frac{\omega}{R_2 V}) e^{-R_2 V} + \frac{\omega W}{V}。$$
 (2)

式中: $V$  是相对体积; $W$  是单位体积炸药的初始内能; $I, J, R_1, R_2, \omega$  为状态方程参数。表 1 给出了 RDX 的主要参数。

表 1 RDX 的主要参数

Tab. 1 Main parameters of RDX			
密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	爆速/ (m · s <sup>-1</sup> )	爆压/ GPa	$I/\text{GPa}$
1. 717	7 980	29	524
$J/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
7. 7	4. 2	0. 34	0. 085

2.3 仿真结果与分析

整个仿真过程采用流固耦合算法进行数值计算。计算结束后,利用 LS-Prepost 软件对每组的仿真结果进行分析。

对有机玻璃平板进行爆炸切割主要是依靠切割索爆炸后所产生的冲击波以及金属射流来完成。图 9 与图 10 分别给出了切割索爆炸后的冲击波云图



以及金属射流形成及侵彻的整个过程,从而得到切割索起爆后对有机玻璃平板的作用情况。

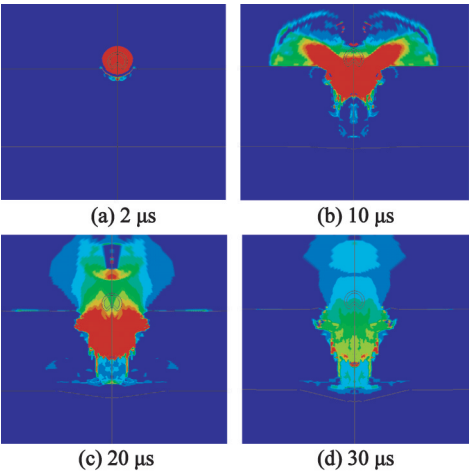


图 9 冲击波云图  
Fig.9 Cloud images of shock wave

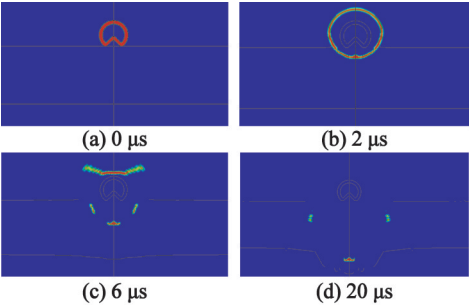


图 10 射流形成及侵彻过程  
Fig. 10 Jet formation and penetration process

从图 9 中可以看出,切割索内的炸药爆炸后产生了强大的冲击波,冲击波随着时间不断扩散,其中一部分直接作用在下方靶板处,这是靶板产生层裂及冲击断裂的主要原因,最后切割索所产生的冲击波逐渐消散。图 10 中,0  $\mu\text{s}$  为切割索初始状态;在 2  $\mu\text{s}$  时,药型罩受到爆轰波作用后全部被压垮;在 6  $\mu\text{s}$  时,可以看见由药型罩形成的射流已经对靶板进行侵彻;在 20  $\mu\text{s}$  时,射流的侵彻作用已完成,射流沿着断裂的靶板向下方运动。

当有机玻璃平板下方介质为空气时,平板断裂情况如图 11 所示。5.0 mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度、层裂及冲击断裂厚度分别为 2.3、2.7 mm;10.0 mm 有机玻璃平板断裂后,射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 3.6、4.3 mm 和 1.1 mm;15.0 mm 有机玻璃平板断裂后,射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 4.7、7.0 mm 和 3.3 mm。

当有机玻璃平板下方介质为水时,平板断裂情

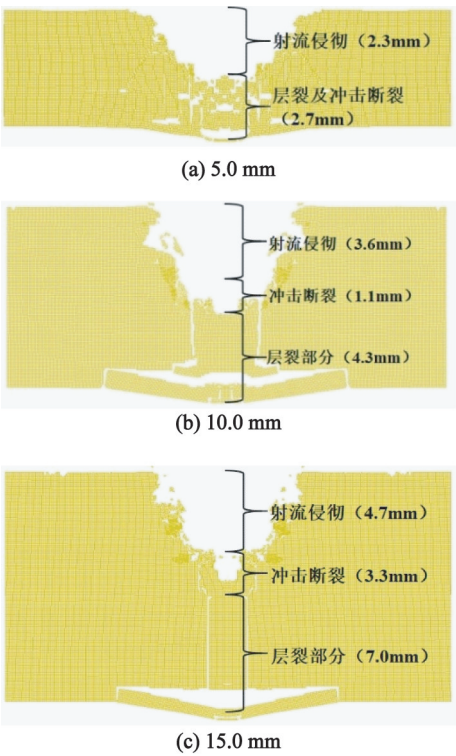


图 11 第 1 组平板断裂示意图  
Fig. 11 Schematic diagram of plate fracture of Group 1

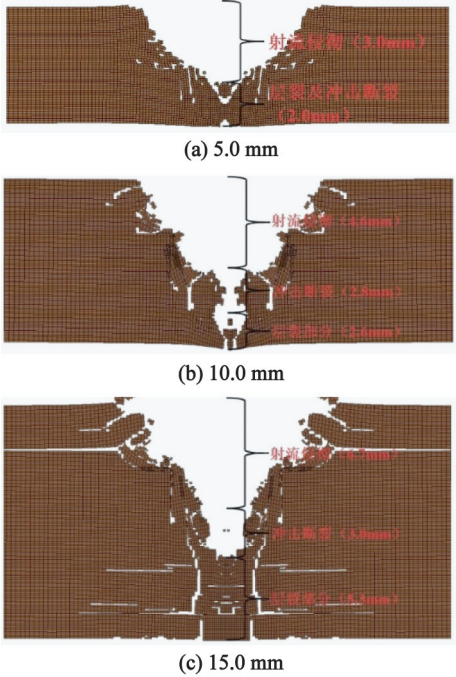


图 12 第 2 组平板断裂示意图  
Fig. 12 Schematic diagram of plate fracture of Group 2

况如图 12 所示。5.0 mm 有机玻璃平板断裂后,射流侵彻深度、层裂及冲击断裂厚度分别为 3.0、2.0 mm;10.0 mm 有机玻璃平板断裂后,射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度为 4.6、2.6 mm 和 2.8 mm;15.0 mm 有机玻璃平板断裂后,射流侵彻深度、

层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 6.7、5.3 mm 和 3.0 mm。

当有机玻璃平板下方介质为橡胶板时,平板断裂情况如图 13 所示。5.0 mm 有机玻璃平板断裂后射流侵彻深度、层裂及冲击断裂厚度分别为 3.0、2.0 mm;10.0 mm 有机玻璃平板断裂后,射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 4.2、3.8 mm 和 2.0 mm;15.0 mm 有机玻璃平板断裂后,射流侵彻深度、层裂厚度和冲击断裂厚度分别为 5.2、5.8 mm 和 4.0 mm。

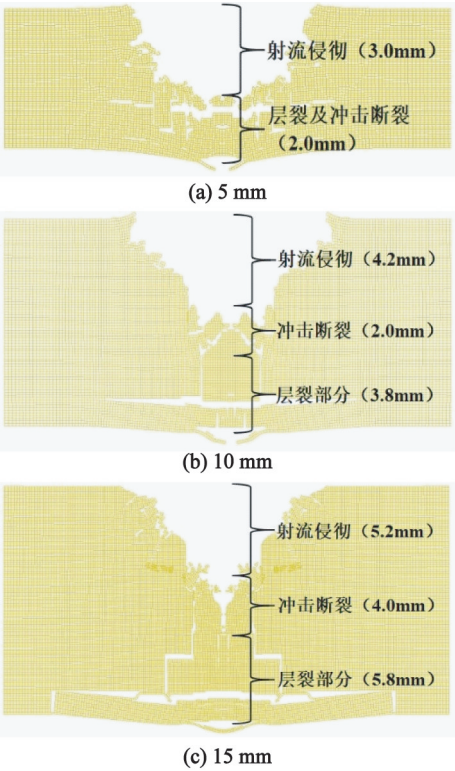


图 13 第 3 组平板断裂示意图

Fig. 13 Schematic diagram of plate fracture of Group 3

从仿真结果来看,有机玻璃平板下方介质为空气时,层裂对平板断裂的作用最大;改变平板下方介质为水和橡胶板时,层裂效果明显减弱,平板断裂更依赖于射流侵彻,从断裂示意图也可以看出获得的断裂切口是比较整齐的。

表 2 给出了试验与仿真结果的对比情况。

从表 2 中看出,数值仿真结果与试验数据吻合较好。在多因素(如人工操作、环境等)影响情况下,微小误差是不可避免的。综合考虑可以确定,通过仿真数值模拟来对试验进行预测是可行的。

这使得试验所得到的规律更具有说服力。在之后的研究中,也可以先进行数值仿真计算得到一个预测性结果,然后再进行试验,可以大大减少试验的

表 2 试验与仿真结果对比

Tab. 2 Comparison of test and simulation results

		mm					
介质	PMMA 平板厚度	射流侵彻厚度		层裂厚度		冲击断裂厚度	
		试验	仿真	试验	仿真	试验	仿真
空气	5	2.0	2.3	3.0	2.7		
	10	3.2	3.6	4.6	4.3	2.2	1.1
	15	4.6	4.7	6.5	7.0	3.9	3.3
水域	5	2.7	3.0	2.3	2.0		
	10	4.5	4.6	2.8	2.6	2.7	2.8
	15	6.8	6.7	5.4	5.3	2.8	3.0
橡胶	5	2.6	3.0	2.4	2.0		
	10	3.8	4.2	4.4	3.8	1.8	2.0
	15	5.4	5.2	5.7	5.8	3.9	4.0

工作量,从而为工程实际提供便利。

3 结论

基于爆炸切割脆性平板技术,在爆炸切割有机玻璃平板试验与仿真中,研究了有机玻璃平板下方介质对爆炸切割的影响。首先进行了试验研究,然后通过仿真进行数值模拟,得到了与试验相吻合的结果。结果表明,有机玻璃平板下方介质会对脆性平板断裂时射流侵彻、层裂及冲击断裂效果有很大的影响。下方介质为空气时,层裂效果是最明显的;当在有机玻璃平板下方粘一层橡胶板时,会减小层裂效果;下方介质为水时,射流侵彻效果是最明显的。相比于下方介质为空气,在下方介质为水或者橡胶板时得到的平板断裂切口更为整齐,在实际工程中应对此进行合理运用。

参 考 文 献

[1] 沃尔特斯,朱卡斯. 成型装药原理及其应用[M]. 王树魁,贝静芬,等,译. 北京:兵器工业出版社, 1992.

[2] BIRKHOFF G, MACDOUGALL D P, PUGH E M, et al. Explosives with lined cavities[J]. Journal of Applied Physics, 1948,19(6):563-582.

[3] PUGH E M, EICHELBERGER R J, ROSTOKER N. Theory of jet formation by charges with lined conical cavities[J]. Journal of Applied Physics, 1952,23(5):532-536.

[4] PAI V V, TITOV V M, LUK, YANOV Y L, et al. Instability of a conical liner during shaped-charge jet formation

[J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2019,55(4):434-438.

[5] 刘志跃,翟俊昭. 铝铜药型罩射流与侵彻数值模拟[J]. 高压物理学报, 2019,33(6):130-137.  
LIU Z Y, ZHAI J Z. Numerical simulation on the performance of shaped charge with explosively welded aluminum copper liner[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(6): 130-137.

[6] 武双章,顾文彬,李旭锋,等. 切割防护门的线型聚能装药参数正交优化设计研究[J]. 爆破器材,2012,41(5):12-16.  
WU S Z, GU W B, LI X F, et al. Study on the orthogonal optimization design of the parameters of linear shaped charge cutting the protective door[J]. Explosive Materials, 2012,41(5):12-16.

[7] 龚文涛,刘健峰,龚先乐,等. 线型聚能切割器结构参数优化设计及应用[J]. 爆破器材,2017,46(6):37-42.  
GONG W T, LIU J F, GONG X L, et al. Structural parameter optimization and application of the linear shaped charge cutter[J]. Explosive Materials, 2017, 46(6): 37-42.

[8] 潘书才,钟明寿,谢兴博,等. 线型聚能切割器水下切割钢板性能的数值模拟研究[J]. 爆破器材,2017,46(6):31-36.  
PAN S C, ZHONG M S, XIE X B, et al. Numerical simulation on underwater plate cutting performance of linear shaped charge cutter[J]. Explosive Materials, 2017, 46(6):31-36.

[9] ELSHENAWY T, ELBEIH A, LI Q M. Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018,136:234-242.



(上接第 42 页)

[2] 欧仙荣. 数码电子雷管中影响点火头性能因素分析[J]. 四川兵工学报,2014,35(5):128-131.  
OU X R. Influencing factors of digital detonator match-head performance[J]. Journal of Sichuan Ordnance Engineering, 2014,35(5):128-131.

[3] 邓重阳,张海艳,莫颖. 数码电子雷管及其推广应用[J]. 采矿技术,2020,20(3):146-148.

[4] 王长利,李迅,刘晓新,等. 典型炸药爆炸过程的电磁辐射实验研究[J]. 兵工学报,2014(增2):188-192.  
WANG C L, LI X, LIU X X, et al. The experimental research on the electromagnetic radiation aroused by detonation of explosive[J]. Acta Armamentarii, 2014( Suppl. 2):188-192.

[5] 张文洲,孙磊. 钛粉对电子雷管电引火药头性能的影响[J]. 爆破器材,2019, 48(2):43-46.  
ZHANG W Z, SUN L. Effect of titanium powder on performances of electric fusehead of electric detonator[J]. Explosive Materials, 2019,48(2):43-46.

[6] 杨文,岳彩新,宋家良,等. 数码电子雷管抗静电性能研究[J]. 火工品,2021(1):9-11.  
YANG W, YUE C X, SONG J L, et al. Research on anti-static performance of digital electronic detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(1):9-11.

[7] 林文斌,赖远标,余晖,等. 工业电子雷管盲炮产生原因分析及其处理措施[J]. 现代工业经济和信息化, 2021(3):136-137,157.  
LIN W B, LAI Y B, YU H, et al. Causes and treatment measures of blind gun with industrial electronic detonator[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2021(3): 136-137,157.

[8] 张英豪,张泽楠. 数码电子雷管应用问题的探讨[J]. 火工品,2018(4):54-57.  
ZHANG Y H, ZHANG Z N. Discuss on the application of digital electronic detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2018(4):54-57.

[9] 李治国. 数码电子雷管装配生产线的实践[J]. 煤矿爆破, 2021,39(1): 35-38.  
LI Z G. Practice of digital electronic detonator assembly line[J]. Coal Mine Blasting, 2021,39(1): 35-38.

[10] 王伟,崔占忠,唐凯,等. 电子雷管高压交流载波扩频通信研究[J]. 北京理工大学学报,2012,32(11): 1169-1173.  
WANG W, CUI Z Z, TANG K, et al. Spread spectrum communication system of high-voltage AC carrier for electronic detonator network [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012,32(11): 1169-1173.