

# 有机玻璃板爆炸切割超压与应变研究

程 栋<sup>1</sup>, 贾振铎<sup>2</sup>, 赵 铮<sup>2</sup>

(1. 中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 河南省水下智能装备重点实验室, 郑州 450015;  
2. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094)

**摘要:**为了校正炸药材料的本构方程和状态方程参数和有机玻璃的本构方程参数并检验有机玻璃爆炸切割数值仿真精度,进行了有机玻璃平板爆炸切割试验,得到了空气中的爆炸冲击波超压和有机玻璃板的动态应变。采用非线性动态分析程序 LS-DYNA 对切割过程进行了数值模拟,得到了所测位置的冲击波超压与动态应变,与试验所得数据基本吻合。

**关键词:**爆炸切割;聚能切割索;有机玻璃;冲击波超压;动态应变;有限元分析

**本文引用格式:**程栋,贾振铎,赵铮. 有机玻璃板爆炸切割超压与应变研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(S1):232-235.

**Citation format:**CHENG Dong, JIA Zhenduo, ZHAO Zheng. Study on Overpressure and Strain of Plexiglass Plate Explosion Cutting[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2019,40(S1):232-235.

中图分类号:TJ55

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)S1-0232-04

## Study on Overpressure and Strain of Plexiglass Plate Explosion Cutting

CHENG Dong<sup>1</sup>, JIA Zhenduo<sup>2</sup>, ZHAO Zheng<sup>2</sup>

(1. 713 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation,  
Henan Key Laboratory of Underwater Intelligence Equipment, Zhengzhou 450015, China;  
2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to correct the constitutive equation and state equation parameters of explosive materials and the constitutive equation parameters of plexiglass, and to test the accuracy of numerical simulation of plexiglass explosion cutting, the explosion cutting test of plexiglass plate was carried out, and the explosion shock wave overpressure and the dynamic strain of plexiglass plate in air were obtained. The numerical simulation of the cutting process is carried out by using the nonlinear dynamic analysis program Ls-dyna, and the shock wave overpressure and dynamic strain of the measured position in the test were obtained, and the results are in good agreement with the data obtained from the test.

**Key words:** explosion cutting; Poly energy cutting cable; plexiglass; shockwave overpower; dynamic strain; finite element analysis

爆炸切割是一种利用切割索的聚能效果进行高速侵彻,从而实现侵彻对象被分离的技术。爆炸切割中所用到的聚能切割索是金属壳导爆索通过加工形成凹槽,从而制得的一种具有聚能效应的柔性切割器材<sup>[1]</sup>。聚能切割索有着性能可靠、结构简单的特点,在切割过程中无破片飞出,切缝规则、光滑,易于控制切割形状<sup>[2]</sup>。常被用于常规机械手段无

法实施的特殊作业场合,已有大量的研究成果<sup>[3]</sup>,如火箭的级间分离、卫星整流罩的抛射、军用飞机的弹射座椅救生系统等<sup>[4]</sup>。

有机玻璃是一种高分子材料,有着高强度密度比、高透明度、易热成型、易机械加工及抗老化的优点<sup>[5]</sup>,其强度远比金属材料、岩石等低,经过处理后具有层裂的特性,因此对有

收稿日期:2019-01-20;修回日期:2019-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(11302106)

作者简介:程栋(1966—),男,研究员,主要从事水下发射技术研究。

通讯作者:赵铮(1979—),男,副教授,主要从事爆炸与冲击动力学研究。

机玻璃的爆炸切割主要采用层裂切割<sup>[6]</sup>。切割完成后,评估微爆索的爆炸效果,仅通过分析试验宏观破坏效果是不够精确的,而通过测量爆炸在周围空气中产生的冲击波超压是比较精确和易实现的方法<sup>[7]</sup>。测量有机玻璃的应力应变关系<sup>[8]</sup>,可以进一步的校验修正有机玻璃的本构参数。

爆炸网络分步起爆技术研究的数值仿真分析需要较为准确的材料参数,比如炸药材料的本构方程和状态方程参数和有机玻璃的本构方程参数。为此特别设计了8次有机玻璃平板爆炸切割试验,测试空气中的爆炸冲击波超压和有机玻璃板的动态应变,为了与试验进行对比分析,本文也对爆炸切割过程进行了仿真计算。此外也试图为微爆索爆炸切割有机玻璃在军用领域中的其他应用提供更多的参考。

## 1 试验研究

### 1.1 试验准备

有机玻璃平板尺寸为700 mm×700 mm,平板四角夹持固定在工装上,微爆索位于有机玻璃平板中央,电爆管位于微爆索右端,爆炸切割试验在空气中进行。

压力传感器型号为PCB M02A15,采样频率1 MHz,量程30 MPa(100 mm处)和3 MPa(200 mm处)。单向动态应变片型号为日本共和KFG-2-120-C1-11 L1M2R,频响200 kHz,栅级2 mm。

超压传感器p3和p4位于微爆索下方200 mm处,传感器p4位于靠近电爆管一侧,p3位于远离电爆管一侧。第一组应变片s1和s2与微爆索垂直,距离微爆索100 mm,应变片s1位于靠近电爆管一侧,s2位于远离电爆管一侧。

### 1.2 试验结果

#### 1) 平板切割结果

有机玻璃平板爆炸切割试验一共8发,前4发只测量了冲击波超压,后4发测量了冲击波超压和有机玻璃的动态应变。后4发的平板切割结果如图1所示。

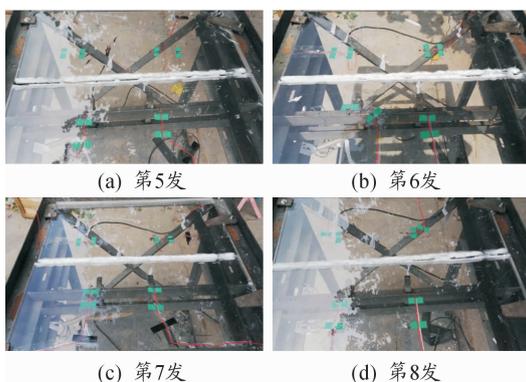


图1 平板切割结果

#### 2) 超压测试结果与分析

提取8发试验的冲击波超压峰值和峰值时刻,见表1。将8个超压峰值绘制成如图2所示的曲线。由于传感器p3和p4

到微爆索距离相同,这两个传感器测得的超压也应该相近,用p3和p4测得的16个超压数据的平均值作为该位置的超压值,得出微爆索下方200 mm处的冲击波超压为1.342 MPa。

表1 冲击波超压峰值

No.	p3		p4	
	$t/\mu\text{s}$	$p/\text{MPa}$	$t/\mu\text{s}$	$p/\text{MPa}$
1	3 016	0.776	2 985	0.857
2	3 252	1.337	3 186	2.681
3	3 586	1.222	3 570	1.392
4	177	1.813	107	1.798
5	651	0.721	588	2.313
6	576	1.635	546	1.025
7	335	0.831	-	-
8	942	0.852	910	0.839

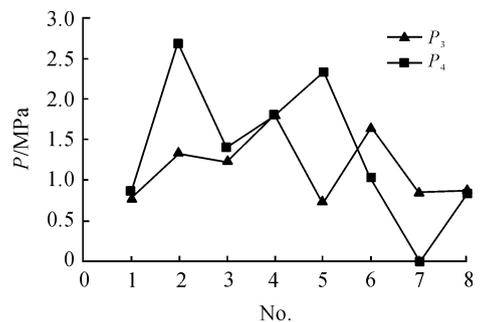


图2 全部8发的冲击波超压峰值曲线

#### 3) 应变测试结果与分析

提取4发试验的应变峰值和峰值时刻,见表2。用s1和s2测得的8个应变数据的平均值作为该位置X方向的应变值,得出距离微爆索100 mm处有机玻璃板的X方向应变为-0.008 6。

表2 后4发的应变峰值

No.	s1		s2	
	$t/\mu\text{s}$	$\varepsilon$	$t/\mu\text{s}$	$\varepsilon$
5	111	-0.008	137	-0.009
6	115	-0.007	-	-
7	117	-0.010	137	-0.007
8	122	-0.009	148	-0.010

### 1.3 试验结论

选取比较具有代表性的工况,给出测试结果图,微爆索下方200 mm处的冲击波超压曲线如图3,距离微爆索100 mm处有机玻璃板的X方向应变曲线如图4。

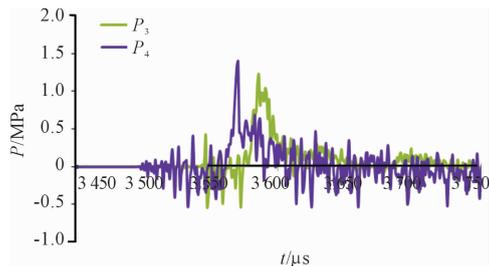


图3 试验所测冲击波超压曲线(微爆索下方 200 mm)

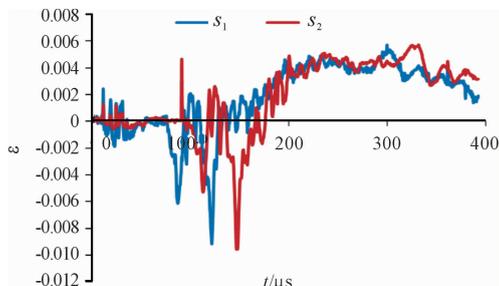


图4 X方向应变曲线(距微爆索 100 mm)

通过 8 次有机玻璃平板爆炸切割试验的测试结果,得出如下结论:

- 1) 微爆索下方 200 mm 处的冲击波超压为 1.342 MPa。
- 2) 距离微爆索 100 mm 处有机玻璃板的 X 方向应变为 -0.008 6。

## 2 数值仿真

### 2.1 计算模型

#### 1) 几何模型

微爆索爆炸切割有机玻璃仿真分析的有限元模型由 3 个 Part 组成,分别为有机玻璃板、炸药和空气。炸药和空气为多物质流体欧拉网格,有机玻璃板为拉格朗日网格,几何模型如下,图 5 为二维模型,图 6 为三维模型。

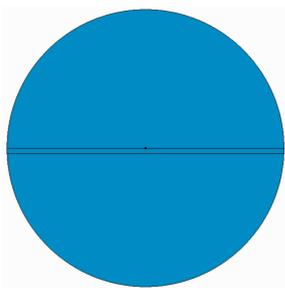


图5 二维模型

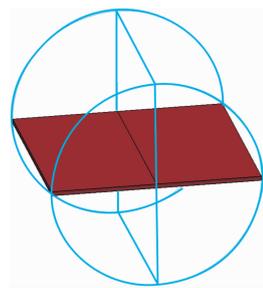


图6 三维模型

#### 2) 有限元模型

为了提高计算精度,全部采用八节点六面体单元来划分有限元网格。空气和炸药单元采用多物质 ALE 算法,要求两者的网格必须共节点以保证两种物质能够在网格中相互流动。有机玻璃板单元采用 Lagrange 算法,其网格密度可以

自定义,不用保证与空气、炸药共节点。图 7 为爆炸切割有限元网格。

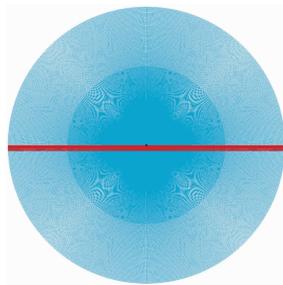


图7 爆炸切割有限元网格

#### 3) 材料模型参数

爆炸切割仿真分析主要涉及到三种材料:空气、炸药和有机玻璃。由于爆炸过程中压力达到 GPa 量级,所以每种材料的定义除了需要本构方程外,还需要定义状态方程。

下面给出 3 种材料的主要材料参数,单位制为 g - cm - us - K。

空气选用空物质的 \* MAT\_NULL 和多项式状态方程 \* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL,材料参数如下:密度为 1.292 9E - 03;状态方程中多项式系数分别为 -1.0E - 06、0、0、0、0.4、0.4、0。

炸药采用 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型及 JWL 状态方程。微爆索炸药参数如下:密度为 1.5;爆速为 0.184;爆压为 0.01;状态方程中系数 A、B、R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> 分别为 1、0.022 68、8.198、2。

有机玻璃采用 JHC 损伤模型 \* MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CERAMICS,该模型适用于像陶瓷、玻璃等脆性材料,具体材料参数如下:密度为 1.18;剪切模量为 0.34;完整的归一化强度参数为 0.93;完整的断裂强度参数为 0.088;与应变率相关的强度参数为 0.003;参考应变率为 1;最大的抗张强度为 0.002 5;最大的归一化断裂强度为 0.6。

#### 4) 边界条件及约束

有机玻璃板两侧面全约束,空气外侧面定义为透射边界。

### 2.2 计算结果与分析

#### 1) 爆炸切割

切割完成后,有机玻璃板的变形如图 8 所示。

爆炸切割爆轰产物流动过程如图 9 所示。

有机玻璃板断裂过程如图 10 所示,可见有机玻璃板发生了层裂,被微爆索完全切开。

#### 2) 冲击波压力

有机玻璃板上方 200 mm 处的空气冲击波压力 - 时间曲线如图 11 所示,压力曲线为单峰结构,为典型的三角波,超压最大值为 1.346 MPa,相对于试验值(1.342 MPa)的误差为 0.29%。且冲击波在 126 μs 时到达峰值,到达时间与压力曲线峰值对应时刻相符。

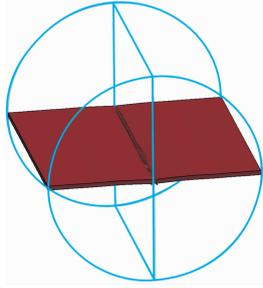


图8 爆炸切割后有机玻璃平板的变形

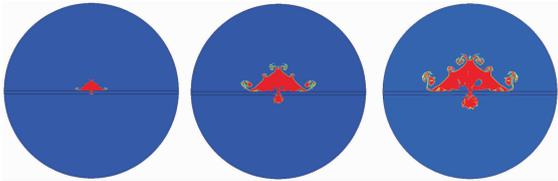


图9 爆轰产物流动过程(20 μs, 100 μs, 200 μs)

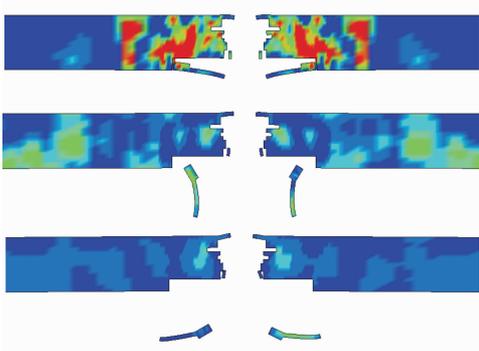


图10 有机玻璃板断裂过程(20 μs, 100 μs, 200 μs)

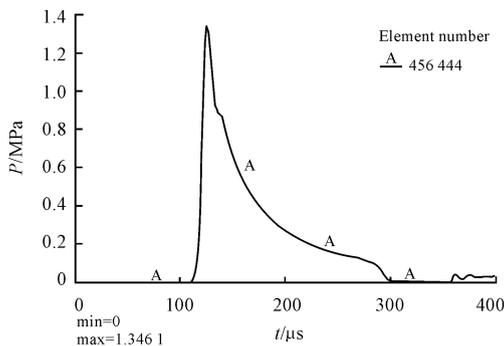


图11 冲击波压力(下方 200 mm 处)时间曲线

### 3) 动态应变

选取试验中 s2 动态应变片(距离微爆索 100 mm)的位置,当前位置 X 方向应力-时间曲线如图 12 所示。

可以看到单元 X 方向最大应力为 -20.173 MPa,有机玻璃的弹性模量  $E = 2\ 500\ \text{MPa}$ ,根据应力应变公式,可以得出

X 方向的最大应变为  $-0.008\ 1$ 。

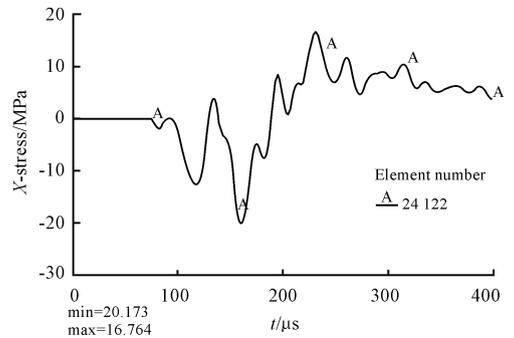


图12 s2 位置 X 方向应力曲线

## 3 结论

爆炸切割的数值仿真计算和试验得到的冲击波超压曲线形状相似,200 mm 处的冲击波仿真值最大超压值为 1.342 MPa,试验值为 1.346 MPa,数值仿真计算相对试验的误差为 0.29%。数值仿真计算所得动态应变与试验中距离微爆索 100 mm 位置处最大动态应变之误差为 5.81%,表明数值仿真的计算模型较为准确,计算精度较高。

## 参考文献:

- [1] 成伟,杜成光,李家家,等. 聚能切割索切割靶板的数值仿真系统[J]. 火工品,2010,1(1):18-20.
- [2] 松全才,金韶华,李文. 俄罗斯切割索的现状[J]. 爆炸与冲击,1997,17(4):382-388.
- [3] 王志华,李志强,任会兰,等. 有机玻璃的几何形状对爆炸切割影响的研究[J]. 高压物理学报,2010(1):43-48.
- [4] 李志强,王志华,刘晓明,等. 微爆索切割航空有机玻璃板实验研究[J]. 兵工学报,2013,34(8):970-974.
- [5] 卢强,王占江,门朝举,等. 有机玻璃中球形应力波传播的分析[J]. 爆炸与冲击,2013(6):561-566.
- [6] 李志强,刘晓明,赵隆茂,等. 爆炸切割技术在微爆索穿盖弹射系统中的应用[C]//中国力学会爆炸力学专业委员会:第五届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 西安:2008.
- [7] 王长利,周刚,蔡宗义,等. 带装药热爆炸冲击波超压测量及分析[J]. 兵工学报,2012(5):574-578.
- [8] 周风华,王礼立,胡时胜. 有机玻璃在高应变率下的损伤型非线性粘弹性本构关系及破坏准则[J]. 爆炸与冲击,1992(4):333-342.