

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.02.007

# 链枷式排爆装置抗爆性能的仿真与试验研究\*

何晓晖<sup>①</sup> 李峰<sup>②</sup> 沙毅刚<sup>①</sup> 朱晓基<sup>①</sup>

①陆军工程大学野战工程学院(江苏南京,210007)

②陆军试验训练基地(北京,100093)

**[摘要]** 为了探究链枷式排爆装置的抗爆性能是否满足作业需求,以 ANSYS 软件为技术平台,建立了该排爆装置抗爆性能的仿真计算模型。依托该模型,对不同 TNT 当量、不同爆炸位置等多种工况下排爆装置的抗爆性能进行了分析,得到其结构变形量和速度特性。同时,搭建了链枷式排爆装置的抗爆性能试验台架,通过台架试验验证了仿真模型的可信性,为排爆装置抗爆性能分析评价与结构优化设计提供参考。

**[关键词]** 排爆装置;抗爆性能;数值仿真;抗爆试验

**[分类号]** O383;TJ51

## Simulation and Experimental Research on Anti-Explosion Performance of a Chain Flail Explosive Disposal Device

HE Xiaohui<sup>①</sup>, LI Feng<sup>②</sup>, SHA Yigang<sup>①</sup>, ZHU Xiaoji<sup>①</sup>

① College of Field Engineering, PLA Army Engineering University (Jiangsu Nanjing, 210007)

② Army Test Training Base (Beijing, 100093)

**[ABSTRACT]** In order to explore whether the anti-explosion performance of a chain flail explosive disposal (EOD) device meets the operation requirements, a simulation calculation model of the anti-explosion performance of the chain flail explosive disposal device was established based on ANSYS software. Based on the model, the anti-explosion performance of the EOD device under different equivalent TNT and different explosion positions was analyzed, and the structural deformation and velocity characteristics were obtained. At the same time, a test bench for the anti-explosion performance of the EOD device was built, and the credibility of the simulation model was verified through the bench test, which provides a reference for the analysis and evaluation of the anti-explosion performance and the structural optimization of the EOD device.

**[KEYWORDS]** explosive disposal device; anti-explosion performance; numerical simulation; anti-explosion test

## 引言

近年来,世界范围内以爆炸式袭击作为主要攻击形式的恐怖活动频繁发生,对全球的安全和经济增长都造成了严重的损害和威胁<sup>[1-3]</sup>。为了维护国际环境的和谐太平,将排爆装备更好地应用到国防军事领域已成为了社会关注的焦点<sup>[4-6]</sup>。某排爆无人车主要应用于大型雷场作业,负责战前开辟道路、战后清理战场等工作,链枷式排爆装置是排爆无人车的主要作业装置。在排爆作业过程中,不可避免地会发生爆炸物的爆炸等问题,为了探究其是否满

足作业需求,需要对结构的抗爆性能进行研究。

目前,对于结构的抗爆性能问题的分析方法有解析法、试验法、数值模拟法等<sup>[7-9]</sup>。解析法是对结构进行非线性瞬态动力学<sup>[10]</sup>分析,计算过程非常复杂,且很难进行精确的分析;试验法由于成本过高,一般用来做仿真模型的验证与测试;相比较而言,数值分析作为一种有效的手段<sup>[11]</sup>,成为抗爆性能测试的一种常用方法。数值分析可以通过选择合适的物理模型,使计算结果较为贴近实际结果<sup>[12-15]</sup>。有限元方法能灵活地选取划分网络、处理边界条件和边界形状,现在已成为爆炸动力学中重要的数值分析方法。

\* 收稿日期:2020-07-30

第一作者:何晓晖(1975-),男,博士,副教授,研究领域为机电一体化。E-mail:1094251715@qq.com

通信作者:沙毅刚(1995-),男,硕士研究生,主要从事机械设计研究。E-mail:1099244947@qq.com

已有文献中对于排爆装置的抗爆性能的研究较少。鉴于此,主要以链枷式排爆装置为研究对象,进行抗爆性能仿真与试验研究。对比仿真与试验结果,得出仿真模型的可信性以及该装置的抗爆性能。

## 1 排爆装置结构

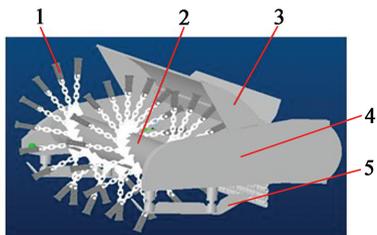
某型排爆无人车主要由链枷式排爆装置和无人车底盘组成。作业时,依靠底盘运动,推动车前排爆装置在雷场中进行排爆作业。车辆本身机械强度较高,能够承受压发地雷的爆炸冲击;同时,履带式的行走方式使其不管是在平地上还是山丘上都能较好地作业。车辆整体采用遥控控制,具有扫除装压发引信和触发引信的爆炸物比较彻底、开辟通路准确无误、可重复进行开路作业等优点,发展潜力巨大,目前已成为国际上研究的热点。某型排爆无人车整车结构如图1所示。



图1 某型排爆无人车

Fig.1 An EOD unmanned vehicle

以某型排爆无人车的链枷式排爆装置为研究对象开展抗爆性能研究。排爆装置结构如图2所示。



1 - 链锤; 2 - 滚筒; 3 - 挡板;

4 - 主框架; 5 - 调节滑板。

图2 链枷式排爆装置结构

Fig.2 Structure of the chain flail EOD device

该排爆装置主要由滚筒、链锤、挡板、主框架和调节滑板组成。滚筒上面分布不同链条连接轴孔,主要用于固定链锤。链锤是作业的主要工具,作业时依靠滚筒旋转提供动力,不断锤击地面,以达到引爆或摧毁爆炸物的目的;链锤沿滚筒的轴向均匀设置,每组链锤设有两个,同组两个链锤在滚筒的同一圆周上对称布置;若干组链锤在滚筒呈螺旋设置,防

止缠绕。挡板是为了防止炸药破片飞溅,达到保护传动装置和底盘的效用。主框架用来安装各部件,底部调节滑板用来调试滚筒与地面的高度,以适应不同作业高度的需求。该装置与整车底盘采用液压与带传动相结合的方法连接,通过调节油缸的伸缩带动连接板的转动,从而调节滚筒距地面的高度,以适应不同的扫雷环境和扫雷要求。

根据某型排爆无人车设计指标与连续作业需求,链枷式排爆装置在承受6 kg TNT炸药爆破时,仍可进行工作。之前试验发现,在排爆装置实际作业时,由于爆炸冲击,会发生链条断裂、滚筒和挡板变形等现象。当滚筒由于爆炸发生应力应变时,由于结构的变形,会导致两轴端轴承发生错位,滚筒两端传动装置磨损或破坏,从而影响正常工作或发生更为严重的事故。因此,主要针对滚筒的抗爆性能进行试验研究;设计试验台架时,忽略链锤对抗爆性能的影响,其余组件按照原排爆装置进行设计。

## 2 抗爆性能仿真分析

以链枷式排爆装置的滚筒为研究对象进行建模。为了探究滚筒在不同炸药当量、不同位置的抗爆性能与结构变形,取5、6 kg两种TNT当量在1/2滚筒、1/4滚筒两种爆炸位置进行爆破仿真,采集整体弯曲程度、轴孔弯曲程度和速度等参数进行讨论与分析。

### 2.1 几何模型构建

根据原排爆装置滚筒结构,滚筒模型设计为圆柱体结构,外径为22 cm,内径为17 cm,内部采用十字隔板进行填充,壁厚为2.5 cm,两端设计轴孔,孔径为5 cm。滚筒的几何模型如图3所示。滚筒内部十字隔板模型设计如图4所示。

设计滚筒模型承载体为土壤,土壤模型设计为

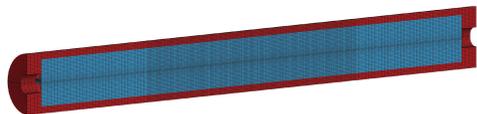


图3 滚筒计算模型

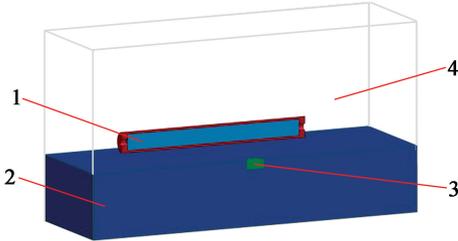
Fig.3 Calculation model of roller



图4 十字隔板计算模型

Fig.4 Calculation model of cross partition

长方体块,上平面与滚筒有效接触。滚筒上部分整体置于空气模型中。为了有效模拟爆炸冲击,空气模型和土壤模型应设计足够大,能够有效包容和承载滚筒。土壤模型尺寸为 4 m × 2 m × 1 m;空气模型尺寸为 4 m × 2 m × 2 m;炸药模型根据实际 TNT 当量体积建立,布置时,应保证有效接触土壤和滚筒。滚筒抗爆性能整体仿真模型如图 5 所示。



1 - 滚筒; 2 - 土壤; 3 - TNT 炸药; 4 - 空气。

图 5 爆炸整体计算模型

Fig. 5 Calculation model for explosion

## 2.2 计算模型设置

### 2.2.1 滚筒的计算模型

滚筒系统材料为 Q345 钢,采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程来确定参数。其中,Johnson-Cook 材料动态本构关系的数学表达式为:

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$  和  $m$  分别为弹体的屈服应力常数、应变硬化模量、应变率系数、应变硬化因子、热软化系数; $\bar{\epsilon}_p$  为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$  为无量纲等效塑性应变速率; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ ,为材料相对温度; $T_r$  为室温; $T_m$  为熔融温度。

Gruneisen 状态方程关系的数学表达式为:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[ 1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) E_0 \quad (2)$$

式中: $E$  为单位体积的初始内能; $c$  为曲线的截距;

$s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  为曲线的斜率系数,为 Gruneisen 系数; $a$  为一阶体积修正系数; $\mu$  为压缩量,由相对体积  $V$  定义, $\mu = 1/V - 1$ 。

根据式(1)和式(2),Q345 钢材料模型和状态方程参数设置如表 1 所示。

### 2.2.2 炸药的计算模型

采用 TNT 作为爆炸物进行研究。在 ANSYS 中,建立炸药的模型一般采用 Mat\_High\_Explosive\_Burn 材料本构模型结合 JWL 状态方程来描述。模型中,爆轰产物的状态方程选用 JWL 状态方程:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中: $p$  为爆轰产物的压力; $E_0$  为单位体积炸药内能; $V$  为相对体积; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  均为 JWL 状态方程中表征炸药特性的常数。

根据式(3),TNT 材料模型和状态方程参数设置如表 2 所示。

### 2.2.3 空气的计算模型

为更加逼近真实环境,需要建立模型试验的空间,在上述模型建立的前提下,对仿真系统中空气进行建模。Preo 中一般用 Mat\_Null 材料本构模型和 Eos\_Linear\_Polynomial 状态方程来描述。具体参数设置如表 3 所示。

### 2.2.4 承载体的计算模型

作为爆炸的承载体,土壤用 Mat\_Soil\_and\_Foam 材料本构模型来描述。参数设置如表 4 所示。

## 2.3 仿真结果与分析

为了探究滚筒整体的抗爆性,根据与两端传动结构的距离分别取 1/2 处和 1/4 处进行爆炸仿真,爆炸物分别选择 5 kg TNT 和 6 kg TNT。

### 2.3.1 滚筒应力应变分析

图 6、图 7 给出了 TNT 药量为 5 kg 时,不同位置处滚筒的变形情况。图 8、图 9 给出了 TNT 药量为 6

表 1 Q345 钢材料模型和状态方程参数

Tab. 1 Material model and state equation parameters of Q345 steel

$\rho/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$G/$ GPa	$A/$ MPa	$B/$ MPa	$C$	$n$	$m$	$T_m/$ K	$T_r/$ K	$C_p/(J \cdot$ $kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$c/$ ( $cm \cdot \mu s^{-1}$ )	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$\gamma_0$	$a$
7.8	77	374	796	0.015 88	0.454 5	1.0	1 795	300	469	0.456 9	1.489	0	0	2.17	0

表 2 TNT 材料模型和状态方程参数

Tab. 2 Material model and state equation parameters of TNT

$\rho/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$D/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$p_{cj}/$ GPa	$A/$ GPa	$B/$ GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/$ GPa	$V_0$
1.65	6 930	21.0	371.2	3.231	4.15	0.95	0.3	7.0	1.0

表3 空气材料模型和状态方程参数

Tab.3 Material model and state equation parameters of air

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0/\text{Pa}$	$V_0$
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	$2.5 \times 10^5$	1.0

表4 土壤材料模型参数

Tab.4 Material model parameters of soil

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$G/\text{MPa}$	$K/\text{GPa}$	$a_0/\text{MPa}$	$a_1/\text{MPa}$	$a_2/\text{MPa}$
1.8	64	30	$3.41 \times 10^{-8}$	$7.03 \times 10^{-2}$	$3.00 \times 10^4$

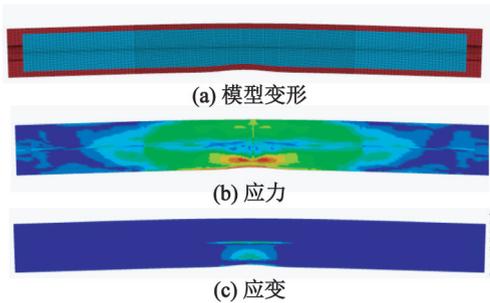


图6 5 kg TNT 1/2处爆炸时滚筒的应力与应变  
Fig.6 Stress and strain of roller during 5 kg TNT blasting at 1/2 of the roller

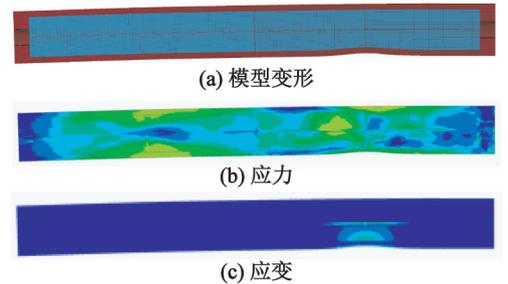


图9 6 kg TNT 1/4处爆炸时滚筒的应力与应变  
Fig.9 Stress and strain of roller during 6 kg TNT blasting at 1/4 of the roller

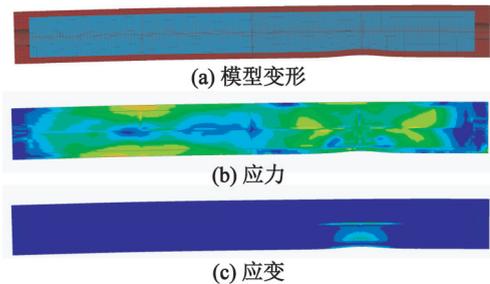


图7 5 kg TNT 1/4处爆炸时滚筒的应力与应变  
Fig.7 Stress and strain of roller during 5 kg TNT blasting at 1/4 of the roller

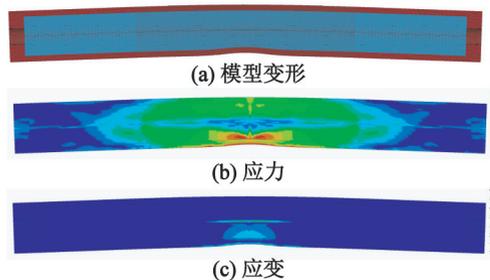


图8 6 kg TNT 1/2处爆炸时滚筒的应力与应变  
Fig.8 Stress and strain of roller during 6 kg TNT blasting at 1/2 of the roller

kg时,不同位置处滚筒的变形情况。

相比较5 kg TNT炸药爆破而言,6 kg TNT爆破时结构变形和应力、应变变化较大,与实际相符;1/2处爆炸时滚筒的形变量明显大于1/4处的形变量。

同时,根据结构变形图可明显发现,爆炸引发的冲击力主要作用在滚筒引爆面,冲击波在引爆面造成的中央爆坑较为明显,而背爆面几乎不受爆炸影响,变形量较小。并且,滚筒整体结构变形量较小,且应力、应变的两端延伸也较小,说明滚筒内部十字隔板可以极大地提高滚筒抵抗变形的能力。

### 2.3.2 滚筒各组件速度变化分析

在滚筒1/2处、靠近端部的1/4处和靠近尾部的1/4处下底面和上顶面分别选取6个节点,分别记为滚筒中下、中上、偏下、偏上、端上、端下位置,测量爆炸过程中各个节点处的速度。图10显示了不同TNT当量爆炸时滚筒各个节点处在Z方向测得的爆速的变化情况。

根据图10可知:5 kg TNT爆炸瞬间,相应位置节点爆速最大,可达125 m/s;6 kg TNT爆破时,相应位置节点爆速较5 kg时略大,为132 m/s,其余各节点爆速不变。爆炸过后,各节点爆速会在0.2 ms后趋于平稳,稳定爆速基本在20 m/s左右。由此得出,在不同位置进行仿真爆炸时,相应位置下底部爆速变化最大,会在爆炸瞬间到达峰值,后又很快衰减趋于平稳。衰减后,爆速大小与其余测点基本一致。同时,5 kg TNT爆炸和6 kg TNT爆炸测点的爆速峰值相差较小,稳定爆速相差也较小。统计滚筒在不同工况下整体的弯曲程度、轴孔弯曲程度和结构振速,如表5所示。

表 5 仿真结果

Tab. 5 Simulation results

工 况	TNT 当量/ kg	爆 炸 位 置	整 体 弯 曲/ cm	轴 孔 弯 曲/ cm	振 速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )
I	5	1/2	2.5	0.20	9.5
II	5	1/4	2.8	0.19	9.6
III	6	1/2	2.9	0.23	10.9
IV	6	1/4	3.2	0.21	10.8

曲程度最大,为 3.2 cm;在 6 kg TNT 中心装药爆炸后,轴孔弯曲变形量最大,为 0.23 cm,此时振速最大,对结构的影响也最大。

### 3 抗爆性能台架试验

#### 3.1 试验台架的设计

根据某型排爆无人车的结构,结合排爆装置抗爆性能试验的需求,设计的链枷式排爆装置试验台架主要包含排爆试验装置和无人车底盘试验装置。

##### 3.1.1 排爆试验装置

排爆装置试验台架根据原排爆装置结构 1 : 1 进行设计。其中,忽略了链锤和链锤孔在爆炸中的抗爆作用,保留排爆装置中的挡板、滚筒和主框架。

##### 3.1.2 底盘试验装置

总体试验台架依据整车结构进行设计。其中,排爆装置试验台架固定在水泥块上,水泥块设计为长方体,尺寸为 2 m × 2 m × 1 m,水泥块质量为 6 t,用来模拟排爆无人车底盘质量,顶上配重砝码用来确定重心位置。总体试验台架如图 11 所示。



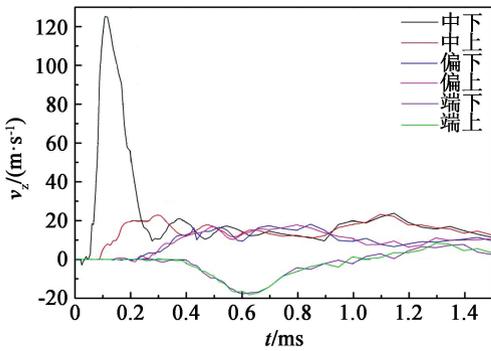
1 - 主框架;2 - 滚筒;3 - 挡板;4 - 连接装置;  
5 - 配重砝码;6 - 水泥块。

图 11 总体试验台架

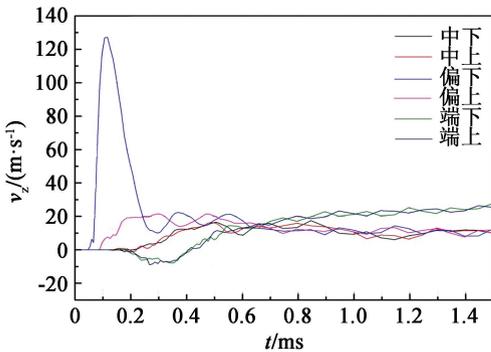
Fig. 11 Overall test bench

#### 3.2 试验仪器与测点布置

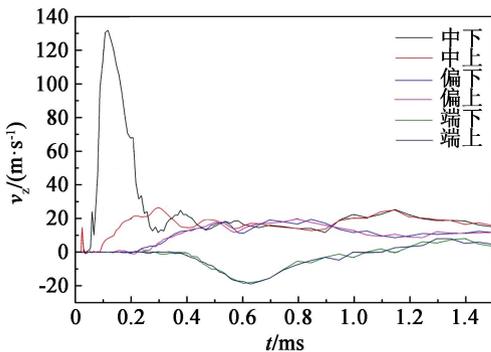
采用 TZI5912 动态信号测试分析系统进行数据采集,同时采用电阻式应变片作为传感器测量应变。应变片由敏感栅等构成。根据要求,将应变片分别均匀布置于滚筒上,从左端到右端将滚筒等分,



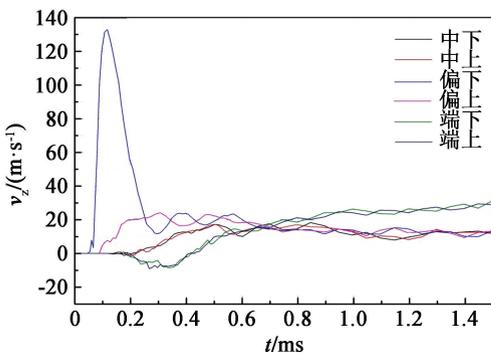
(a) 5 kg TNT, 1/2 处爆破



(b) 5 kg TNT, 1/4 处爆破



(c) 6 kg TNT, 1/2 处爆破



(d) 6 kg TNT, 1/4 处爆破

图 10 各节点爆速变化

Fig. 10 Explosive velocity changes of each node

根据表 5 数据可知,在承受 5 kg 和 6 kg TNT 爆破时,滚筒的整体变形量较小,不超过 3.2 cm。由于爆炸冲击主要作用在迎爆面,对于背爆面的影响较小,因此 6 kg TNT 在 1/4 处爆炸时,滚筒整体弯

共设置 5 个测点。布置时,保证各测点排布相对均匀,应变片粘贴牢固,电源线之间影响较小。应变片在滚筒上的布置见图 12。



图 12 试验布置  
Fig. 12 Experiment layout

### 3.3 台架试验结果与分析

参照 2.3 仿真分析中所设计 4 种工况开展试验,结果如图 13 所示。

从图 13 可以看出,当在排爆装置 1/2 和 1/4 处爆炸时,爆炸点迎爆面均出现明显凹坑,而背爆面变形较小;6 kg TNT 爆炸时凹坑明显大于 5 kg TNT 爆破;但在几种工况中,滚筒结构整体变形量较小,两端偏移量和弯曲量在允许的范围,排爆装置仍可以正常工作,与仿真结果一致。

统计数据采集仪采集到的传感器数据见表 6。将试验结果与仿真结果进行对比,如表 7 所示。根据表 7 的数据,不同工况下,试验与仿真结果

表 6 试验测试结果

Tab. 6 Test results

采样 工况	应变/ $10^{-6}$				
	测点 1#	测点 2#	测点 3#	测点 4#	测点 5#
I	51 363	62 212	92 644	62 613	42 506
II	72 780	92 123	72 726	62 809	42 757
III	71 230	81 948	102 877	72 716	52 688
IV	111 876	102 284	92 746	62 857	42 824

表 7 试验与仿真结果对比

Tab. 7 Comparison between test and simulation

工况	整体弯曲 仿真结果/ cm	试验结果		误差/ %
		应变/ $10^{-6}$	整体弯曲/ cm	
I	2.50	92 644	2.87	14.8
II	2.80	92 123	2.86	2.1
III	2.90	102 877	3.19	10.0
IV	3.20	111 876	3.47	8.4

的误差均在 15% 以内,从而有效验证了仿真结果的可信性,建立的模型能基本反映爆炸载荷下排爆装置抗爆性能的实际情况。

由于在试验过程中存在组件刚性和砖块飞溅等因素的影响,仿真结果中的前期变形状态与试验结果基本吻合;但后期砖块飞溅等模拟不足,使仿真结果存在误差。



(a) 工况 I



(c) 工况 III



(b) 工况 II



(d) 工况 IV

图 13 台架试验结果

Fig. 13 Results of bench test

## 4 结 论

1) 链枷式排爆装置滚筒在 6 kg TNT 中心爆破时变形最大, 此时迎爆面出现明显凹坑, 但结构整体变形量较小, 仍可正常工作, 满足承受 6 kg TNT 爆破的设计要求。

2) 数值仿真模型较好地展现了结构在爆炸冲击下的应力与应变状态。

### 参 考 文 献

- [1] 王军. 防地雷反伏击车设计浅谈[J]. 国防科技, 2020, 41(2): 101-106.  
WANG J. Design of a mine resistant ambush-protected vehicle [J]. National Defense Technology, 2020, 41(2): 101-106.
- [2] 王皓. 浅述排爆工作基本原则及高铁防爆对策[J]. 法制博览, 2019(5): 257.
- [3] CHEN L, SUN W W, CHEN B C, et al. A comparative study on blast-resistant performance of steel and PVA fiber-reinforced concrete: experimental and numerical analyses[J]. Crystals, 2020, 10(8): 707.
- [4] 沈臻懿. 现代排爆装备[J]. 检察风云, 2015(18): 40-42.  
SHEN Z Y. Modern demining equipments [J]. Procuratorial View, 2015(18): 40-42.
- [5] 裴红波, 聂建新, 王正宏. 一种利用聚能效应的排爆装置研究[C]//重庆市人民政府, 中国工程物理研究院. 全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集. 重庆, 2011: 986-988.  
PEI H B, NIE J X, WANG Z H. Study on a special shaped charge device for the disruption of explosive object [C]//Chongqing Municipal Government, China Academy of Engineering Physics. Proceedings of the National Conference on Hazardous Substances and Safety Emergency Technology. Chongqing, 2011: 986-988.
- [6] 沈文妮, 黄正祥, 祖旭东, 等. 接触爆炸下黏土砖砌体墙的抗爆性能[J]. 爆破器材, 2020, 49(4): 45-51.  
SHEN W N, HUANG Z X, ZU X D, et al. Anti-explosion performance of clay brickmasonry wall under contact blast load[J]. Explosive Materials, 2020, 49(4): 45-51.
- [7] 赵红玲, 孙成城, 谢冰, 等. 喷涂聚脲加固框架结构墙体抗爆性能试验研究[J]. 福建建设科技, 2020(3): 28-32.  
ZHAO H L, SUN C C, XIE B, et al. The experimental study of the anti-explosion performance of frame wall using sprayed polyurea coating[J]. Fujian Construction Science and Technology, 2020(3): 28-32.
- [8] 杨坦, 蒋亚龙, 蔡周全, 等. 基于 MSC. PATRAN 的救生舱抗爆性能分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 95-101.
- [9] 罗立胜, 陈万祥, 郭志昆, 等. 考虑面力作用的 HFR-LWC 梁抗爆试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(5): 237-248.  
LUO L S, CHEN W X, GUO Z K, et al. Experimental study on blast-resistances of HFR-LWC beam with membrane effect[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(5): 237-248.
- [10] 张嵩, 巴振宁, 赵靖轩. 大直径盾构隧道复合泡沫铝保护层抗爆性能研究[J]. 市政技术, 2020, 38(3): 149-152.  
ZHANG S, BA Z N, ZHAO J X. Study on anti-blast performance of composite foam aluminum protective layer for large diameter shield tunnel [J]. Municipal Engineering Technology, 2020, 38(3): 149-152.
- [11] 赵均海, 董婧, 张冬芳, 等. FRP 钢管混凝土柱抗爆性能数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(2): 35-43.  
ZHAO J H, DONG J, ZHANG D F, et al. Numerical simulation of blast resistance of concrete-filled steel tubecolumns confined with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 35-43.
- [12] KUMAR T, MOHSIN R, MAJID Z A. et al. Experimental study of the anti-knock efficiency of high-octane fuels in spark ignited aircraft engine using response surface methodology [J]. Applied Energy, 2020, 259: 114150.
- [13] 刘三丰, 金丰年, 周寅智, 等. GFRP 筋混凝土梁抗爆性能试验研究与数值分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(2): 024610.  
LIU S F, JIN F N, ZHOU Y Z, et al. Experimental study and numerical simulation of explosion resistance of GFRP reinforced concrete beams [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, 50(2): 024610.
- [14] 田玉祥, 苏振驰, 邵亚军, 等. 阀门执行器端盖抗爆性能优化及轻量化设计[J]. 电子世界, 2020(2): 151-152.
- [15] 何翔, 孙桂娟, 任新见, 等. 砖隔墙抗爆特性及泄漏空气冲击波效应[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3): 899-903.  
HE X, SUN G J, REN X J, et al. Blast-resistance of brick partition wall and air leak shock wave effect [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(3): 899-903.