

# 高压物理学报

## 方形爆炸抛撒装置结构优化

李建平 刘思琪

### Structure Optimization of Square Explosive Dispersion Device

LI Jianping, LIU Siqi

引用本文:

李建平, 刘思琪. 方形爆炸抛撒装置结构优化[J]. 高压物理学报, 2020, 34(2):023301. DOI: 10.11858/gywlb.20190835

LI Jianping, LIU Siqi. Structure Optimization of Square Explosive Dispersion Device[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(2):023301. DOI: 10.11858/gywlb.20190835

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190835>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 不同炮孔间距对岩石爆炸裂纹扩展影响的数值分析

Numerical Analysis of Impact of Shot Hole Spacing on Crack Growth in Rock

高压物理学报. 2019, 33(4): 044103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180683>

#### 环形双锥罩聚能装药结构优化设计

Optimum Design of Annular Double Cone Shaped Charge Structure

高压物理学报. 2018, 32(6): 065105 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180539>

#### 管廊内燃气爆炸作用下不同抗爆结构性能研究

Anti-Explosion Performance of Different Anti-Explosion Structures under Gas Explosion in Pipe Gallery

高压物理学报. 2019, 33(4): 045204 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180640>

#### 近场爆炸冲击波对屏蔽压装TNT的冲击引爆试验和仿真

Experimental and Numerical Study of Shock Initiation of Covered TNT by Near-Field Shock Wave

高压物理学报. 2019, 33(1): 015101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180604>

#### 管廊内燃气爆炸作用下不同抗爆结构性能研究

Anti-Explosion Performance of Different Anti-Explosion Structures under Gas Explosion in Pipe Gallery

高压物理学报. 2019, 33(4): 045204 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180640>

#### 基于3D-DIC对爆炸作用下碳纤维层合板的变形研究

Deformation of Carbon Fiber Laminates under Explosion Based on 3D-DIC

高压物理学报. 2019, 33(6): 064201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190739>

# 方形爆炸抛撒装置结构优化

李建平, 刘思琪

(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:** 为了研究方形抛撒装置壳体破坏规律及燃料分散特性, 开展了抛撒装置外场实验并利用 LS-DYNA 仿真软件进行了数值模拟, 模拟结果与实验结果相吻合。进一步分析装置倒圆角及刻槽深度对壳体破裂效果及燃料分散速度的影响规律, 结果表明: 倒圆角与增加刻槽深度有利于减小壳体棱边处应力集中的影响, 圆角半径增至 10 mm 或刻槽深度增至 1.2 mm 时, 棱边处不再破裂; 同一装置壳体边部和中部位置采用不同深度的刻槽可有效减少壳体破裂不均现象。当边缘处刻槽深度为 1.2 mm、中间刻槽为 1.6 mm 时, 壳体均匀破裂; 当棱边处倒 10 mm 圆角, 边部刻槽深度为 0.8 mm, 中部刻槽为 1.2 mm 时, 抛撒装置既能满足壳体均匀开裂, 又可提高壳体强度, 同时可将燃料分散平均速度差值降低 22%, 从而有效提高燃料抛撒效率。

**关键词:** 方形抛撒装置; 燃料分散; LS-DYNA; 破裂

**中图分类号:** O389

**文献标识码:** A

爆炸抛撒是指利用高能炸药爆炸产生的高压将装置内燃料进行抛撒和分散的过程<sup>[1]</sup>, 在燃料空气炸弹<sup>[2]</sup>等军用领域及灭火<sup>[3]</sup>、除尘<sup>[4]</sup>等民用领域均有广泛应用。抛撒装置主要由壳体、抛撒药剂和中心管组成, 其中壳体结构是影响抛撒性能的一个重要因素。

高重阳等<sup>[5]</sup>以柱形爆炸装置为研究对象, 讨论了薄壁壳体在爆炸荷载作用下的动态断裂准则, 发现壳体结构在冲击作用下发生变形和断裂, 其破片断面主要是由韧性剪切断裂造成的。王晔等<sup>[6]</sup>利用有限元 LS-DYNA 仿真软件研究了圆形抛撒装置壳体结构对燃料近区抛撒速率的影响, 发现壳体轴向的抗拉强度越大, 燃料的抛撒速率越高。张奇等<sup>[7-8]</sup>通过理论研究分析了抛撒装置壳体对燃料近区抛撒过程的影响规律, 给出了考虑壳体时燃料近区抛撒速度的计算方法。目前对圆柱形装药结构抛撒装置的研究较为成熟, 燃料在分散的近场阶段可以简化为一维柱对称模型<sup>[9]</sup>, 然而受装载平台的限制, 如布撒器通常为矩形截面结构<sup>[10]</sup>, 常常会用到方形截面的爆炸抛撒装置来提高整体空间利用率。迄今为止, 关于方形抛撒装置的研究较少, 为了提高装载平台空间的利用率, 研究方形爆炸抛撒装置具有重要意义。

与圆柱形抛撒装置壳体不同, 方形爆炸抛撒装置壳体在各个方向上的应力分布不均, 导致壳体破裂不均匀, 从而影响燃料的初始抛撒速度。本研究在实验的基础上得到方形抛撒装置分散燃料后的云雾效果, 通过 LS-DYNA 软件对方形抛撒装置壳体在爆炸冲击作用下的结构特性进行研究, 分析壳体棱边处倒圆角及刻槽深度对壳体破裂及云雾抛撒效果的影响, 为方形爆炸抛撒装置结构的合理设计提供依据。

\* 收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-10-21

基金项目: 国防重大专项(201820246213)

作者简介: 李建平(1963—), 男, 博士, 讲师, 主要从事多相爆轰研究. E-mail: ljping@bit.edu.cn

通信作者: 刘思琪(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事分散控制技术研究. E-mail: 1505445921@qq.com

## 1 方形装置抛撒实验

### 1.1 实验方法

抛撒装置的结构及实物如图 1 和图 2 所示。装置由壳体、上下端板和中心管通过焊接组成,壳体棱边处也通过焊接方式成型,内部为直角结构。壳体和中心管内分别装填燃料和分散药,壳体厚度为 3 mm,并设置 12 道深度为 0.6 mm 的方形预制刻槽;装置总体高度为 400 mm,可装填抛撒药剂 11 kg;分散药为压装 TNT 药柱,药量为 120 g。

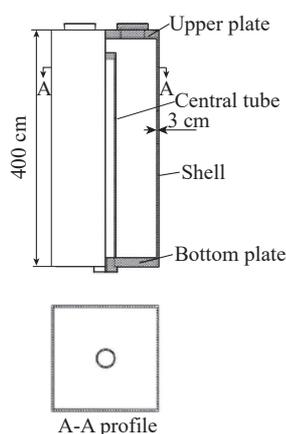


图 1 方形抛撒装置结构

Fig. 1 Structure of square dispersing device



图 2 方形抛撒装置实物

Fig. 2 Image of square dispersing device

实验采用无人机携带的高速摄像机进行俯拍,用于观察燃料分散形成云雾的形态变化,为方便研究云雾结果,无人机俯拍时始终保持方形抛撒装置的横截面四条边与拍摄画面边界平行。采用高速摄影进行拍摄,用于统计边界燃料膨胀规律。

### 1.2 实验结果分析

图 3 为实验过程中不同时刻燃料分散及壳体破裂结果俯视图。如图 3 所示,地面上圆形波痕为冲击波扫过的区域,随后呈四角形散开的深色云雾为抛撒出的燃料;燃料在尖角方向上的扩散速度较大,之后逐渐发展为尖锐的四角星形,这种呈尖角分布的燃料对抛撒来说是极其不利的。图 3 中红线圈内为破裂分散开的大片壳体,可以观察到装置壳体在爆炸冲击作用下破裂成 4 块,其运动方向上对应着四角星形云雾的尖角,即云雾尖角位置是大块壳体生成的位置。

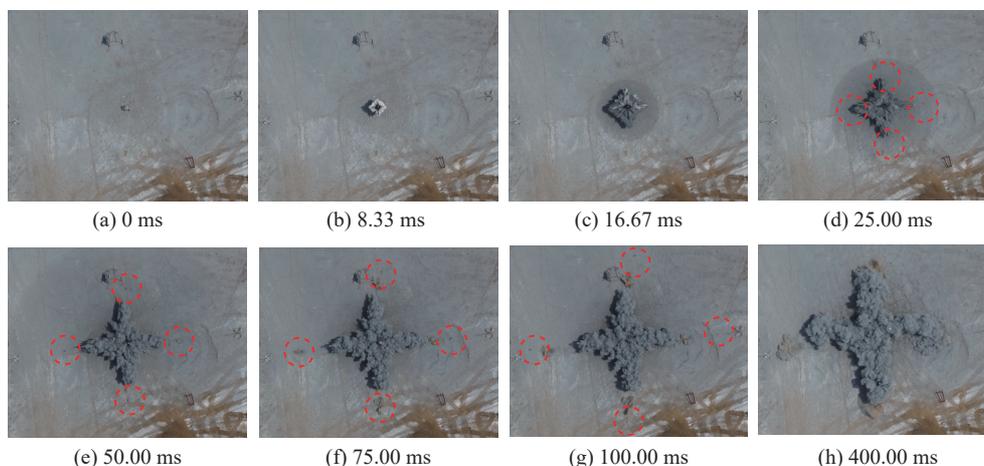


图 3 实验过程中不同时刻燃料分散及壳体破裂

Fig. 3 Fuel dispersion and shell rupture at different times during the experiment

## 2 方形装置作用过程数值仿真

### 2.1 计算模型

利用前处理软件 Hypermesh 建立方形抛撒装置的几何模型。为简化计算, 建立 1/4 模型进行求解计算, 如图 4 和图 5 所示。图 4 为有限元计算模型, 由里向外共有 5 部分, 即分散药、中心管、燃料、壳体 and 空气模型, 完全按照装置实际尺寸进行建模。壳体每个面各有 3 道刻槽, 简化模型中一个面仅显示两道刻槽, 将每个面靠近棱边处的刻槽命名为刻槽 1, 中间的刻槽命名为刻槽 2, 如图 5 所示。其中壳体、上下端板及中心管等装置结构通过共节点的方式连接, 壳体棱边处为直角结构, 刻槽形式为方形, 深度通过改变刻槽处壳体厚度来体现。

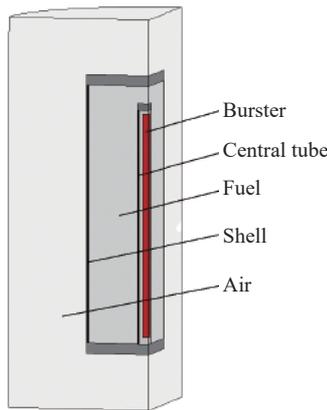


图 4 有限元计算模型  
Fig. 4 Finite element model

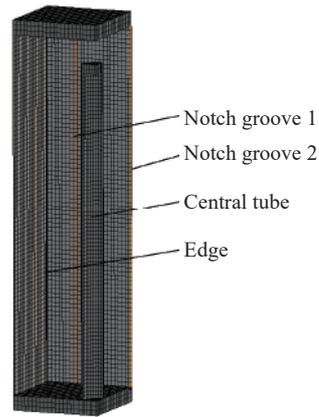


图 5 装置计算模型  
Fig. 5 Mesh distribution of the device computing model

模型中空气区域为半径 40 cm、高度 56 cm 的 1/4 圆柱, 空气域采用无反射边界条件。计算方法采用流固耦合算法, 单元采用单点积分的 ALE 多物质单元, 即一个单元内可以包含多种物质。壳体、分散药管与端盖等采用拉格朗日网格, 分散药、燃料与空气域采用欧拉网格。

计算过程涉及的材料包括分散药、空气、燃料和壳体等。分散药选用 TNT, 采用高能炸药燃烧材料模型和 JWL 状态方程<sup>[11]</sup>描述, JWL 状态方程形式为

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

式中:  $p$  为爆轰产物的压力,  $V$  为相对比体积,  $E$  为单位体积炸药的内能,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为 JWL 状态方程参数。计算参数见表 1<sup>[12]</sup>, 其中  $\rho_0$  为分散药初始质量密度,  $D$  为爆速。

表 1 TNT 炸药的爆轰性能及 JWL 状态方程参数

Table 1 Detonation properties and JWL equation-of-state parameters of TNT explosive

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$p/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E/(\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3})$
1.63	6 930	21	374	7.33	4.2	0.9	0.35	7

燃料为液固混合态, 其性能类似于水, 为此燃料材料模型选用水代替, 采用 MAT\_NULL 材料模型和 Grüneisen 状态方程<sup>[13]</sup>, 计算参数见表 2, Grüneisen 状态方程形式为

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (2)$$

式中:  $\gamma_0$  为 Grüneisen 指数;  $\alpha$  为  $\gamma_0$  的一阶体积修正量;  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ,  $\rho_0$  为燃料的初始质量密度;  $C$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为绝热冲击压缩过程中冲击波波速同质点速度间关系的拟合常数。计算参数见表 2。

空气采用 MAT\_NULL 模型和 LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程描述, LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程形式为

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (3)$$

式中:  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  为常数;  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ,  $\rho_0$  为空气初始质量密度;  $V_0$  为初始相对比容;  $E$  为比内能。计算参数见表 3。

表 3 空气计算参数  
Table 3 Parameters for the computation of air

$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E/(J \cdot m^{-3})$	$V_0$
0.001 25	0	0	0	0	0.4	0.4	0	$2.5 \times 10^5$	1.0

装置结构选用 MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY 材料模型描述。该模型可以较准确地描述爆炸过程中装置发生的弹塑性变形及破裂情况, 各部分结构的主要材料参数如表 4 所示。其中,  $E$  为杨氏模量,  $\nu$  为泊松比,  $F$  为等效应变,  $C_e$  与  $P_e$  为应变率参数。计算中, 当壳体材料的等效应变超过等效失效应变时, 单元被删除, 空间由空气填充处理。

表 4 装置结构计算参数  
Table 4 Computation parameters of device structure

Structure	Material	$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	$E$	$\nu$	$F$	$C_e$	$P_e$
Shell	5A06 Al	2.75	0.68	0.35	0.45	40	5
Plate, central tube and tube cap	2A12 Al	2.78	0.70	0.35	0.35	40	5

## 2.2 仿真结果

由于最终的抛撒结果很大程度上和抛撒初期相关, 因此在燃料抛撒的相关仿真研究中, 通常只考虑燃料抛撒的初期阶段。

图 6 为仿真得到的初期阶段燃料分散及壳体破裂结果俯视图。壳体从 4 条棱边上破裂, 随着壳体的破裂, 燃料逐渐发展为斜正方形, 斜正方形的 4 个尖角对应着装置破裂形成 4 块壳体, 与图 3 中前 25 ms 所显示的燃料分散及壳体破裂结果完全相同。

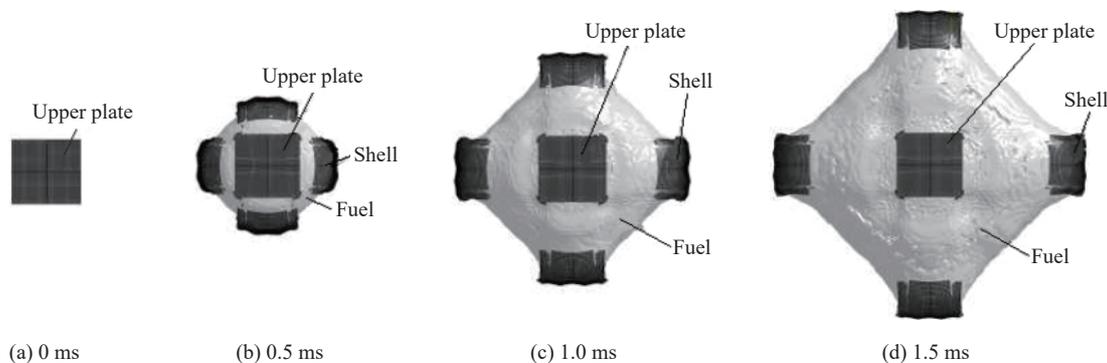


图 6 仿真过程中不同时刻燃料分散及壳体破裂结果

Fig. 6 Results of fuel dispersion and shell rupture at different time in the simulation process

由图 6 可知, 爆炸产生的冲击波能量随着壳体失效破裂泄压而有所降低, 而 4 片大块壳体位置的能量相对较大, 该处燃料的速度相对较大且传播距离较远, 最终在 4 块大片壳体运动方向形成 4 个尖锐刺状云雾。

分析壳体破裂过程的侧视应力云图如图 7 所示。壳体在分散过程中的应力分布不均, 棱边处应力集中, 而壳体刻槽处应力则与周围相比差别不大。至装置解体, 壳体与上下端板分离并向四周运动, 整个壳体在棱边处破裂形成 4 块壳体。

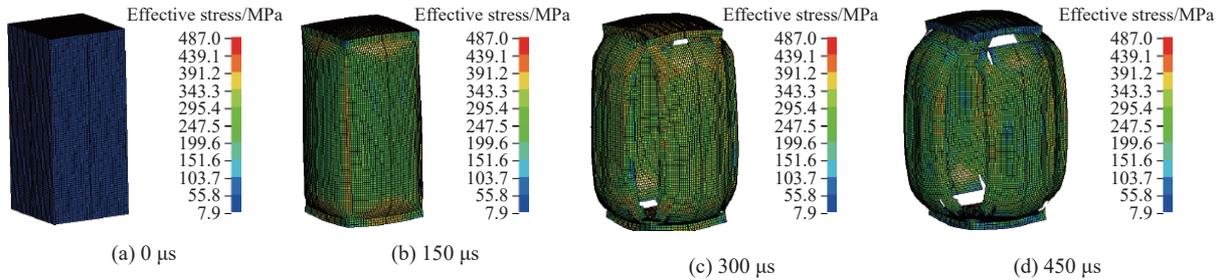


图 7 壳体破裂过程的侧视应力云图

Fig. 7 Side-view of stress nephogram for the shell rupture process

为了达到燃料分散形成均匀云雾的目的, 应避免尖锐刺状云雾的出现, 为此需对壳体的破裂进行优化改进, 减少大块壳体的形成。

### 2.3 燃料分散速度的实验与仿真对比分析

仿真过程中, 需验证结果的准确性。进一步分析实验与仿真得到的燃料边界水平方向速度的变化趋势, 图 8 显示了实验和仿真计算得到的尖角方向上燃料速度随时间变化情况。在前 0.5 ms 内, 云雾速度在分散药的爆轰驱动作用下迅速膨胀而快速上升; 在 0.5~1.0 ms 内, 膨胀速率随着壳体失效破裂泄压而有所降低; 1.0 ms 之后, 爆轰产物向外传播, 膨胀速率又开始呈现上升趋势。数值仿真结果与实验结果在总体趋势上是一致的, 从而验证了数值模拟结果的可靠性。

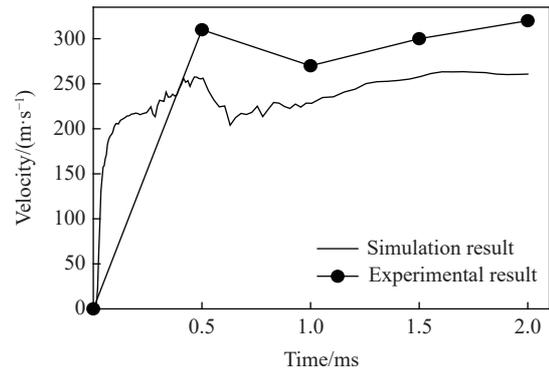


图 8 燃料边界水平方向速度随时间的变化

Fig. 8 Horizontal velocity versus time at fuel boundary

## 3 方形装置抛撒影响因素数值分析

### 3.1 倒圆角对壳体破裂的影响规律

针对棱边处应力集中导致大片壳体出现的现象, 通过在棱边处倒圆角的方式减小应力集中的影响。图 9 为棱边处无倒角及 0.8、1.0、1.2 cm 倒角的俯视图, 对应的棱边处和刻槽处最大应力及开裂时

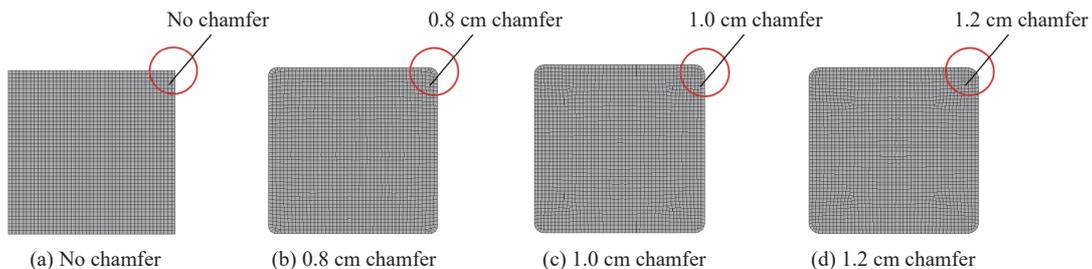


图 9 壳体棱边处倒角俯视图

Fig. 9 Top view of chamfer at edge of shell

间的变化规律如表 5 所示,其中  $\sigma_{max}$  为最大应力,  $t_{crack}$  为破裂时间。如表 5 所示,随着棱边处圆弧倒角的增大,抛撒装置棱边处的最大应力逐渐减小,而刻槽 1 处的最大应力逐渐增大,刻槽 2 处的最大应力无明显变化,维持在 356 MPa 左右。

棱边处有 0.8 cm 倒角与棱边处无倒角相比并无较大变化,均为棱边处开裂而刻槽处未开裂;棱边处有 1.0 cm 或 1.2 cm 倒角时,棱边处不再开裂,而刻槽 1 处发生破裂,且其开裂时间随倒角的增大而缩短,而刻槽 2 处则始终未破裂,如图 10 所示。

由此可知,增加棱边处圆弧倒角可有效地减小棱边处应力集中的影响,有利于靠近棱边位置的刻槽 1 破裂,而对离棱边较远的刻槽 2 无明显作用。

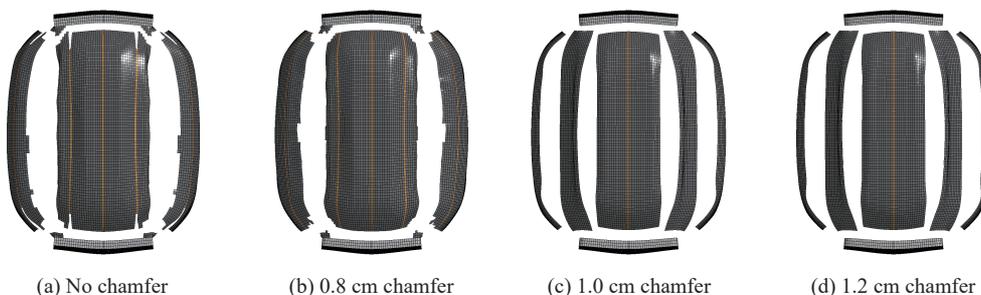


图 10 400 μs 不同倒角大小时壳体破裂结果(正视图)

Fig. 10 Effect of shell rupture under different chamfer sizes at 400 μs (front view)

### 3.2 刻槽深度对壳体破裂的影响规律

#### 3.2.1 单深度刻槽的影响

为研究刻槽深度对壳体分散效果的影响,在棱边处无倒角的情况下,分别对刻槽深度为 0.6、0.8、1.0、1.2 及 1.6 mm 的情况进行了研究,壳体棱边处及刻槽处最大应力及开裂时间如表 6 所示。壳体棱边处最大应力在能使刻槽 1 破裂的刻槽深度下达到最大,之后随着刻槽深度的增大逐渐减小;刻槽 1 处的最大应力随着刻槽深度的增加逐渐增大;刻槽 2 处最大应力随着刻槽深度的增加变化趋势为:刻槽 2 处的最大应力在刻槽 1 开裂前,先逐渐增大,之后缓慢下降。

刻槽深度为 0.8 mm 时,壳体棱边处与刻槽位置上的分裂效果与刻槽深度为 0.6 mm 相比并无变化,仅棱边处开裂而刻槽位置未开裂;当刻槽深度为 1.0 mm 时,刻槽 1 位置开裂,其开裂时间比棱边处开裂时间晚 10 μs;而当刻槽深度为 1.2 mm

表 5 倒圆角对壳体棱边及刻槽的影响

Table 5 Effect of chamfer on edge and groove of shell

Shell	Position	$\sigma_{max}/\text{MPa}$	Crack or not	$t_{crack}/\mu\text{s}$
No chamfer	Edge	376	Yes	175
	Groove 1	361	No	
	Groove 2	355	No	
0.8 cm chamfer	Edge	374	Yes	205
	Groove 1	369	No	
	Groove 2	355	No	
1.0 cm chamfer	Edge	360	No	
	Groove 1	381	Yes	185
	Groove 2	356	No	
1.2 cm chamfer	Edge	359	No	
	Groove 1	385	Yes	175
	Groove 2	357	No	

表 6 刻槽深度对壳体棱边及刻槽的影响

Table 6 Effect of groove depth on edge and groove of shell

Depth of groove/mm	Position	$\sigma_{max}/\text{MPa}$	Crack or not	$t_{crack}/\mu\text{s}$
0.6	Edge	376	Yes	175
	Groove 1	361	No	
	Groove 2	355	No	
0.8	Edge	371	Yes	175
	Groove 1	368	No	
	Groove 2	358	No	
1.0	Edge	378	Yes	175
	Groove 1	376	Yes	185
	Groove 2	366	No	
1.2	Edge	375	No	
	Groove 1	378	Yes	165
	Groove 2	366	No	
1.6	Edge	369	No	
	Groove 1	381	Yes	145
	Groove 2	364	No	

和 1.6 mm 时, 棱边处不再开裂, 仅刻槽 1 位置开裂, 其开裂时间随着刻槽深度的增加而缩短。随着刻槽深度的增加, 刻槽 2 处始终未开裂。

因此, 刻槽深度的增加有利于减小壳体棱边处应力集中的影响, 有利于靠近棱边位置的刻槽 1 破裂, 而对离棱边较远的刻槽 2 无明显作用。

### 3.2.2 多深度刻槽的影响

由 3.2.1 节可知, 刻槽 2 处的应力始终小于刻槽 1 的应力。为此, 可通过增加刻槽 2 的深度来减少壳体应力分布不均对壳体破裂产生的影响。保持刻槽 1 的深度为 1.2 mm, 设定刻槽 2 的深度分别为 1.4、1.5、1.6 mm, 结果如表 7 所示。由表 7 可知, 保持刻槽 1 的深度不变, 随着刻槽 2 深度的增加, 刻槽 1 的最大应力基本不变, 刻槽 2 的最大应力逐渐提高。当刻槽 2 的深度增加至 1.4 mm 时, 刻槽 2 处依旧未开裂; 刻槽 2 的深度增加至 1.5 mm 时, 刻槽 2 开裂, 其开裂时间较刻槽 1 晚 10  $\mu\text{s}$ ; 刻槽 2 的深度增加至 1.6 mm 时, 刻槽 2 与刻槽 1 同时开裂。在刻槽 2 深度增加的过程中, 刻槽 1 的开裂时间均为 165  $\mu\text{s}$ 。刻槽 2 的深度不同时壳体破裂结果如图 11 所示。

表 7 多深度刻槽条件下增加刻槽 2 的深度对壳体破裂产生的影响

Table 7 Effect of increasing groove 2 depth on shell rupture under multi-depth grooving conditions

Depth of groove 2/mm	Position	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	Crack or not	$t_{\text{crack}}/\mu\text{s}$
1.4	Groove 1	378	Yes	165
	Groove 2	370	No	
1.5	Groove 1	382	Yes	165
	Groove 2	373	Yes	175
1.6	Groove 1	380	Yes	165
	Groove 2	377	Yes	165

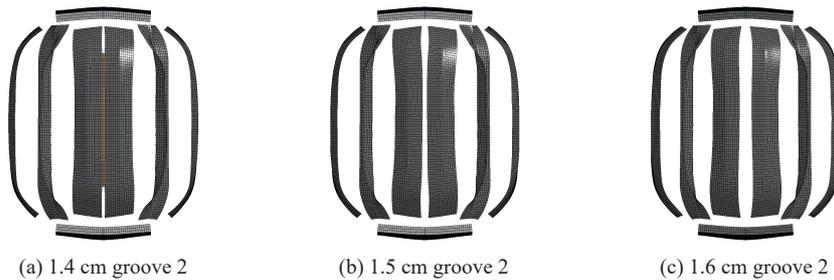


图 11 400  $\mu\text{s}$  刻槽 2 深度不同时壳体破裂结果(正视图)

Fig. 11 Effect of shell rupture under different groove 2 depth at 400  $\mu\text{s}$  (front view)

保持刻槽 1 的深度不变, 增加刻槽 2 的深度有利于减小壳体应力分布不均而导致壳体破裂不均的现象, 当刻槽 2 的深度达到 1.6 mm 时, 装置壳体刻槽同时开裂。

### 3.3 倒圆角与刻槽深度两因素对壳体破裂的影响规律

在刻槽深度的单一影响下, 当刻槽 1 的深度为 1.2 mm 而刻槽 2 的深度达到 1.6 mm 时, 能保证壳体棱边处不破裂而刻槽位置同时破裂。而在实际情况下, 刻槽深度过大对壳体的强度有较大影响, 可能导致燃料在起爆前发生泄漏。

同时考虑倒圆角与刻槽深度两个因素, 由上述分析可知, 棱边处倒角大小为 1.0 cm 且刻槽深度为 0.8 mm 的情况与棱边处无倒角而壳体深度为 1.2 mm 的情况相同, 棱边处不再破裂, 刻槽 1 的破裂时间均为 165  $\mu\text{s}$ 。因此保持棱边处倒角大小为 1.0 cm, 刻槽 1 的深度为 0.8 mm, 设定刻槽 2 的深度分别为 1.0、1.1、1.2 mm, 得到结果如表 8 所示。

表 8 两因素条件下增加刻槽 2 的深度对壳体破裂效果的影响

Table 8 Effect of increasing groove 2 depth on shell fracture under two factors condition

Depth of groove 2/mm	Position	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	Crack or not	$t_{\text{crack}}/\mu\text{s}$
1.0	Groove 1	383	Yes	165
	Groove 2	364	No	
1.1	Groove 1	382	Yes	165
	Groove 2	371	Yes	185
1.2	Groove 1	382	Yes	165
	Groove 2	376	Yes	165

表 8 结果与表 7 规律基本一致;刻槽 2 的深度为 1.0 mm 时,刻槽 2 未开裂;刻槽的深度为 1.1 mm 时,刻槽 2 开裂时间晚于刻槽 1;当刻槽 2 的深度增加至 1.2 mm 时,刻槽 2 与刻槽 1 同时开裂。

### 3.4 倒圆角与刻槽深度对燃料分散的影响规律

基于上述优化结果,棱边处无倒角、刻槽 1 深度为 1.2 mm、刻槽 2 深度为 1.6 mm 的多深度刻槽优化装置,与棱边处倒角为 1.0 cm、刻槽 1 深度为 0.8 mm、刻槽 2 深度为 1.2 mm 的两因素优化装置,都可以保证在爆炸抛撒过程中装置棱边处不破裂,刻槽位置在 165 μs 时同时破裂。将最初的装置命名方案 1,多深度刻槽优化装置命名为方案 2,倒圆角与刻槽深度两因素优化方案命名为方案 3,3 种方案参数如表 9 所示。

表 9 方案参数

Table 9 Scheme parameters

Plan	Chamfer size/cm	Depth of groove 1/mm	Depth of groove 2/mm
1	0	0.6	0.6
2	0	1.2	1.6
3	1.0	0.8	1.2

为了得到优化装置的燃料分散效果,将 3 种方案燃料抛撒速度进行对比。最初装置的燃料最大速度  $v_{max}$  位于尖角位置,而最小速度  $v_{min}$  在棱边方向。对比 3 种方案下位于尖角的最大速度与棱边方向的最小速度及其差值,如图 12 和图 13 所示。

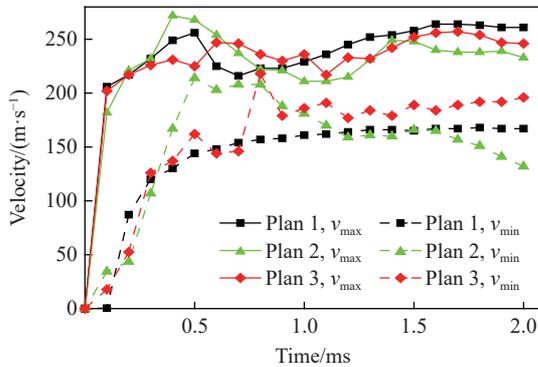


图 12 3 种方案中燃料的最大速度与最小速度

Fig. 12 Maximum and minimum fuel speed in three schemes

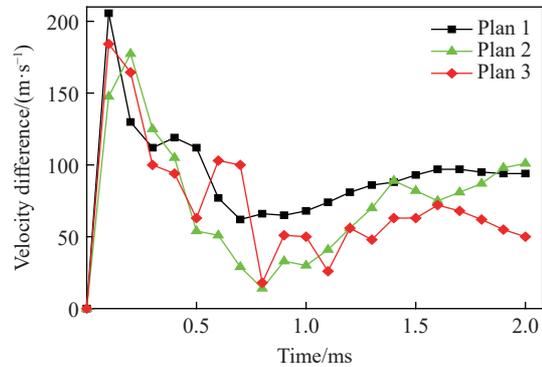


图 13 3 种方案中燃料的最大最小速度差

Fig. 13 Velocity difference of fuel in three schemes

图 12 显示了 3 种方案的燃料最大速度和最小速度随时间变化的趋势。可以看出:燃料最大速度的变化趋势基本一致,先迅速增大至某值,随即速度有所下降,之后又呈现上升趋势;1 ms 之前 3 种方案的燃料速度波动较大;1 ms 之后,方案 1 的最大速度最大,方案 2 的最大速度最小。最小速度的变化趋势有所不同:方案 1 的燃料最小速度在 1 ms 内缓慢提高至 160 m/s,随后保持稳定;方案 2 的燃料最小速度在 0.5 ms 内升高至 214 m/s,之后逐渐降低至 132 m/s;方案 3 的燃料最小速度在 0.8 ms 内升高至 218 m/s,随后迅速降低至 191 m/s,之后基本趋于稳定。1 ms 前方案 2 燃料速度最大,方案 1 燃料速度最小;1 ms 后方案 3 燃料速度最大,而方案 2 燃料速度最小。

图 13 为 3 种方案燃料分散最大速度与最小速度的速度差随时间的变化。3 种方案下燃料速度差的变化趋势基本一致,先迅速增大,然后逐渐减小,之后又缓慢上升。方案 3 燃料速度差在缓慢上升至 1.6 ms 后呈现下降趋势。1 ms 前 3 个方案的燃料速度差波动较大;1 ms 后方案 3 的燃料速度差最小,方案 1 的燃料速度差最大。整个过程中方案 1 的燃料速度差平均值为 91 m/s;方案 2 的燃料速度差平均值为 74 m/s,较方案 1 下降 18.7%;方案 3 的燃料速度差平均值为 71 m/s,较方案 1 下降 22%。

## 4 结 论

在方形抛撒装置实验基础上,通过 LS-DYNA 软件对方形抛撒装置的 3 mm 厚壳体在爆炸冲击作用下的结构特性进行研究,分析壳体棱边处倒圆角及刻槽深度对壳体破裂及云雾抛撒效果的影响,为方形爆炸抛撒装置结构的合理设计提供依据。

(1) 壳体在爆炸冲击作用下应力分布不均, 直角棱边处应力集中易破裂。刻槽深度小于壳体厚度的1/3时, 刻槽不发生破裂。仅棱边处破裂时, 装置分散燃料后的云雾呈现尖锐四角星形。

(2) 增加棱边处倒圆角半径和刻槽深度都有利于减小壳体棱边处应力集中的影响, 棱边处倒圆角半径增至10 mm或刻槽深度增至1.2 mm时, 棱边处不再破裂而边部刻槽发生破裂; 同一装置壳体边部和中部位置采用不同深度的刻槽可有效减少壳体应力分布不均导致的破裂不均现象, 当边缘处和中间位置分别设置深度为1.2 mm、1.6 mm的刻槽时, 刻槽同时破裂; 棱边处倒10 mm圆角, 边缘处和中间位置分别设置深度为0.8 mm、1.2 mm的刻槽时, 即棱边倒圆角结合壳体边部和中部位置采用不同深度刻槽, 既能满足抛撒时刻槽同时开裂, 又可减小刻槽深度, 确保抛撒装置有较好的强度。

(3) 棱边处倒10 mm圆角, 边部和中部分别设置深度为1.2 mm和0.8 mm的刻槽时, 可将燃料分散的最大速度与最小速度的平均差值降低22%, 有效消除燃料分散不均的现象。

## 参考文献:

- [1] 薛田, 徐更光, 黄求安, 等. 爆炸抛撒过程的研究进展 [J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(21): 60-67.  
XUE T, XU G G, HUANG Q A, et al. Review on explosive dispersion [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(21): 60-67.
- [2] LIU G, HOU F, CAO B. Experimental study of fuel-air explosive [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2008, 44(2): 213-217.
- [3] 韩宝成, 雷红飞, 徐豫新, 等. 液体灭火弹动态抛撒区域工程计算方法 [J]. *含能材料*, 2011, 19(3): 310-314.  
HAN B C, LEI H F, XU Y X, et al. Computational model of dynamic dispersed area of liquid fire-extinguishing ammunition [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2011, 19(3): 310-314.
- [4] 胡涛, 刁伟, 崔正辉, 等. 水袋在爆破水雾除尘技术中的应用 [J]. *水科学与工程*, 2012(4): 52-54.  
HU T, DIAO W, CUI Z H, et al. Computational model of dynamic dispersed area of liquid fire-extinguishing ammunition [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2012(4): 52-54.
- [5] 高重阳, 施惠基, 姚振汉. 薄壁柱壳在内部爆炸载荷下膨胀断裂的研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 160-167.  
GAO C Y, SHI H J, YAO Z H. Dynamic fracture of thin cylindrical shells subject to internal explosive loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(2): 160-167.
- [6] 王晔, 白春华, 李建平. 弹壳体结构对燃料装药抛撒速率影响的数值模拟研究 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(1): 43-49.  
WANG Y, BAI C H, LI J P. Influence of shell structure on dispersing velocity of fuel-air mixture [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(1): 43-49.
- [7] 张奇, 白春华, 刘庆明. 壳体对燃料近区抛撒速度的影响 [J]. *应用力学学报*, 2000, 17(3): 102-106.  
ZHANG Q, BAI C H, LIU Q M. Influence of shell casting on fuel near-field dispersal velocity [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2000, 17(3): 102-106.
- [8] ZHANG Q, BAI C H, LIU Q M. Study on near field dispersal of fuel air explosive [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1999, 8(2): 113-118.
- [9] 薛社生, 刘家骢, 彭金华. 液体燃料爆炸抛撒的近场阶段研究 [J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 1997(4): 49-52.  
XUE S S, LIU J C, PENG J H. Study on the near-field phase of explosive throwing of liquid fuel [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 1997(4): 49-52.
- [10] 王在成, 姜春兰. 机载布撒器弹仓总体技术的发展与分析 [J]. *飞航导弹*, 1999(10): 21-28.  
WANG Z C, JIANG C L. Development and analysis of the overall technology of airborne dispenser silo [J]. *Flying Missile*, 1999(10): 21-28.
- [11] LEE E L, HORMIG H C, KURY J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products: UCRL-50422 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1968.
- [12] 陈明生, 白春华, 李建平. 燃料抛撒的初始速率与结构动态响应数值模拟 [J]. *含能材料*, 2015, 23(4): 323-329.  
CHEN M S, BAI C H, LI J P. Simulation on initial velocity and structure dynamic response for fuel dispersion [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(4): 323-329.
- [13] MEYERS M A. Dynamic behavior of materials [M]. John Wiley & Sons, 1994: 124.

## Structure Optimization of Square Explosive Dispersion Device

LI Jianping, LIU Siqi

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

**Abstract:** This paper presents a numerical model of the square dispersing device for simulating the process of shell failure and fuel dispersion by LS-DYNA software. Combined with the results of the field experiments, this model reveals in detail the influence of the fillet angle and groove depth on the shell rupture process and fuel dispersion speed. The results show that the shell edge would no longer rupture when the fillet radius increases to 10 mm or the groove depth increases to 1.2 mm, since different groove depth would effectively reduce the nonuniform shell rupture. And when the depth of edge and middle groove is 1.2 mm and 1.6 mm respectively, the shell is uniformly ruptured. In addition, a special dispersing device with 10 mm fillet angle, 0.8 mm edge groove depth and 1.2 mm middle groove depth, could not only make the shell uniformly ruptured, but also increase the strength of the shell. Meanwhile, it would reduce the average velocity difference of fuel dispersion by 22%, which effectively improve the fuel dispersing efficiency.

**Keywords:** square dispersion device; fuel dispersion; LS-DYNA; crack