

内爆载荷作用下泄压容器准静态压力特性*

解江^{1,2}, 潘汉源^{2,3}, 李漩^{2,3},
王立轩^{2,3}, 蒋逸伦^{2,3}, 冯振宇^{1,2}

- (1. 中国民航大学 科技创新研究院, 天津 300300;
2. 民航航空器适航审定技术重点实验室, 天津 300300;
3. 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 为了研究泄压容器内部准静态压力特性, 采用 AUTODYN 软件提出并建立了 3 种柱形泄压容器的数值模型, 分别包括一端开口的敞口泄压容器、在开口处设有可冲出端盖的带泄压盖容器、将泄压盖与容器通过剪切销连接的带剪切销泄压容器。以 Bernoulli 方程为基础建立了理论简化模型, 模拟了敞口泄压容器内部的准静态压力; 以能量守恒方程为基础建立理论简化模型, 模拟了不同起爆药量下带泄压盖容器的准静态压力; 最后, 探讨了剪切销在剪断和未剪断时对带剪切销泄压容器内部压力的影响。该文建立了文献中的数值模型, 准静态压力计算结果与文献中的实验结果吻合情况良好, 验证了计算方法的可靠性。结果表明: 敞口泄压容器内部压力衰减迅速, 准静态阶段持续时间较短, 以 Bernoulli 方程为基础的理论简化模型能够较好地预测泄压容器内部压力衰减至大气压力的时间; 带泄压盖容器内冲击波沿轴向做往复式传播, 以能量守恒方程为基础的理论模型能够较好地预测在泄压过程中的准静态压力; 剪切销未剪断时, 容器内部准静态压力呈现明显的平台效应; 对比无剪切销的工况, 18 mm 直径的剪切销剪断后, 容器内部压力变化趋势基本一致, 泄压盖的飞出时间提前了 0.25 ms。研究结果可为泄压容器的结构设计提供理论基础和参考。

关键词: 泄压容器; 泄压盖; 内爆炸; 准静态压力

中图分类号: O383 文献标志码: A DOI: 10.21656/1000-0887.430359

Quasi-Static Pressure Characteristics of Explosion Venting Vessel Under Confined Explosion

XIE Jiang^{1,2}, PAN Hanyuan^{2,3}, LI Xuan^{2,3},
WANG Lixuan^{2,3}, JIANG Yilun^{2,3}, FENG Zhenyu^{1,2}

- (1. *Science and Technology Innovation Research Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P.R.China;*
2. *Key Laboratory of Civil Aviation Aircraft Airworthiness Certification Technology, Tianjin 300300, P.R.China;*
3. *College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P.R.China)*

Abstract: To study the quasi-static pressure characteristics inside the explosion venting vessels, 3 numerical models for cylindrical explosion venting vessels were established with the AUTODYN software, including a one-

* 收稿日期: 2022-11-08; 修订日期: 2023-07-10

作者简介: 解江(1982—), 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师(通讯作者. E-mail: xiejiang5@126.com).

引用格式: 解江, 潘汉源, 李漩, 王立轩, 蒋逸伦, 冯振宇. 内爆载荷作用下泄压容器准静态压力特性[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(10): 1236-1249.

end-opening explosion venting vessel, an explosion venting vessel with an ejectable venting cover, and an explosion venting vessel with a shear pinned venting cover. Based on the Bernoulli equation, a theoretical simplified model was established to simulate the quasi-static pressure inside the opening explosion venting vessel. A theoretical simplified model based on the energy conservation equation was established to simulate the quasi-static pressure in the vessel with a venting cover under different charge weights. In the end, the effects of the shear pin on the pressure of the explosion venting vessel were discussed in the cases of cutoff or non-cutoff. The numerical models in previous literatures were established. The theoretical quasi-static pressure results are in good agreement with the experimental results in the literatures, which verifies the reliability of the proposed theoretical calculation method. The results show that, the internal pressure of the open explosion venting vessel decays rapidly, and the quasi-static stage lasts for a short time. The theoretical simplified model based on the Bernoulli equation can better predict the time when the internal pressure in the explosion venting vessel decays to the atmospheric pressure. The shock wave in the vessel with a venting cover propagates reciprocally along the axial direction. The theoretical model based on the energy conservation equation can better predict the quasi-static pressure during the pressure decaying process. In the case of the non-cutoff shear pin, the quasi-static pressure inside the vessel exhibits an obvious platform effect. Compared with the case without a shear pin, the internal pressure in the vessel with a shear pin will decay basically in the same way after the shear pin with a diameter of 18 mm is cut off, and the venting cover will reach the opening in advance by 0.25 ms. This work mainly provides a theoretical basis and applicable reference for the structural design of explosion venting vessels.

Key words: explosion venting vessel; venting cover; confined explosion; quasi-static pressure

0 引 言

泄压是通过预先设计的结构,将密闭容器内因爆炸导致的高压迅速释放,降低事故破坏程度的一种有效措施^[1-2]。由于约束空间内爆炸准静态超压载荷持续时间较长,其对结构将造成更加持久的损伤,当约束结构局部位置破损后,内部高压气体将从破口处高速喷出,对外部设施及人员造成二次冲击毁伤^[3]。因此,研究泄压容器内部准静态压力特性对合理设计抗爆结构、泄压装置以及降低事故对人员和设备的伤害具有一定的工程意义^[4]。

近年来,针对泄压空间内爆炸准静态压力的研究,国内外学者在数值模拟、高精度数值计算方法等方面开展了大量的工作。Baker 等^[5]采用简化理论分析模型与试验分析相结合的方式研究了带泄压口约束空间内爆炸准静态压力载荷。张玉磊等^[6]提出了泄压和密闭条件下,准静态压力峰值与泄压口面积和密闭空间容积之间的函数关系式,建立了与试验结果吻合度较高的,不同泄压口面积下实时准静态压力的经验公式。徐维铮等^[7]研究了装药质量和泄压口对约束空间内爆炸准静态超压载荷的影响规律,并给出了以封闭准静态超压峰值作为起始状态的泄压过程简化理论公式。高轩能等^[8]发现,在柱壳和拱形屋顶等全封闭大空间结构的内爆荷载作用下,合适的孔洞布置可有效泄爆。汪维等^[9]通过研究建筑物内爆泄压口冲击波参数与不同结构参数之间的关系,给出了泄压口的冲击波参数计算经验公式。

国内的研究主要集中于敞口泄压空间内部准静态压力变化规律,而对通过泄压盖的方式泄压的研究较少,其研究目的大多是为了评估炸药威力。宋浦等^[10]定量评价了不同类型炸药在密闭或半密闭空间内部爆炸的效能当量,并确立了相应的测试方法。李根等^[11]通过设计一种炸药-套筒-滑块实验装置,发现无量纲化的滑块位移随时间变化具有确定关系,根据实验具体参数可以反推出炸药爆炸能量。胡宏伟等^[12]通过自建的顶盖举起试验装置对 5 种典型炸药装药进行了内爆炸试验,发现炸药的空中爆炸性能与内爆炸性能具有显著的差异。

国外学者已开展了大量通过泄压盖将有限空间内部压力释放的研究工作,但主要集中于模拟内部气体压力的变化情况。Feldgun 等^[13-15]为模拟一个可泄压空间的内部爆炸的特性,提出了一种利用泄压盖泄爆的简化模型,所开发的简化模型以合理的精度模拟了泄压过程中流体流出过程的整体特征。Molkov 等^[16]提出

了一种带有可移动泄压盖的封闭空间内爆炸压力存储模型,证明了泄压盖射流效应的建模对于模拟空间内部压力-时间变化曲线和泄压盖位移-时间变化曲线至关重要.Yankelevsky 等^[17]研究了泄压空间内爆炸压力特征,结果表明,所提出的基于发展气体压力和准固定相 Bernoulli 方程的简化方法非常适合于部分受限爆炸的模拟,并恰当地描述了泄压和排气室的气体流出。

目前国内针对泄压容器内的准静态压力研究还较少,并且很少考虑泄压结构在小当量炸药内爆时对外造成威胁的解决方法,结合上述两种研究现状,需进一步开展泄压容器准静态压力特性研究.本文提出的泄压容器,通过泄压口释放大当量炸药产生的高压爆轰产物,避免了容器产生破片造成二次毁伤,提升了结构安全性,并利用剪切销作为泄压盖的弱约束包容小当量炸药产生的爆炸载荷,避免了泄压结构对外部设备及人员造成不必要毁伤.本文以泄压容器内部准静态压力为研究对象,提出了计算容器内部准静态压力的简化模型,然后与数值模拟结果对比分析,并探究了泄压盖、剪切销对准静态压力产生的影响,可为兼具包容与泄压功能的结构设计提供参考。

1 问题描述与控制方程

1.1 问题描述

在内爆载荷作用下敞口泄压容器内部压力通过泄压口泄放后迅速衰减,理论简化模型以 Bernoulli 方程为基础描述准静态阶段内部气体的压力变化,通过 AUTODYN 软件计算得到敞口泄压容器内部压力时程曲线,将理论计算结果与数值模拟结果对比,预测敞口容器内部压力衰减至大气压的时间.带泄压盖容器在泄压过程中内部超压经历两个阶段:第一阶段为密闭变容阶段,炸药爆炸后,爆轰产物膨胀推动泄压盖运动至容器口,泄压容器结构及内部气体组成的系统能量守恒,在此过程中由于内部压力还未向外泄放,故压力水平较高;第二阶段为敞口泄压阶段,泄压盖冲出容器口,内部压力服从指数衰减规律下降至大气压水平^[4],与敞口泄压容器泄压过程相似.因此,针对密闭变容阶段建立泄压盖、罐体组合的泄压容器数值模型,理论简化模型以能量守恒方程为基础,预测在不同起爆药量下容器内部的准静态压力.最后建立泄压盖、剪切销和罐体组合的带剪切销泄压容器数值模型,理论简化模型根据能量守恒方程预测剪切销未断裂时容器内部的准静态压力,并通过分析压力时程曲线得到剪切销对容器内部压力的影响.分步研究的 3 种泄压容器如图 1 所示。

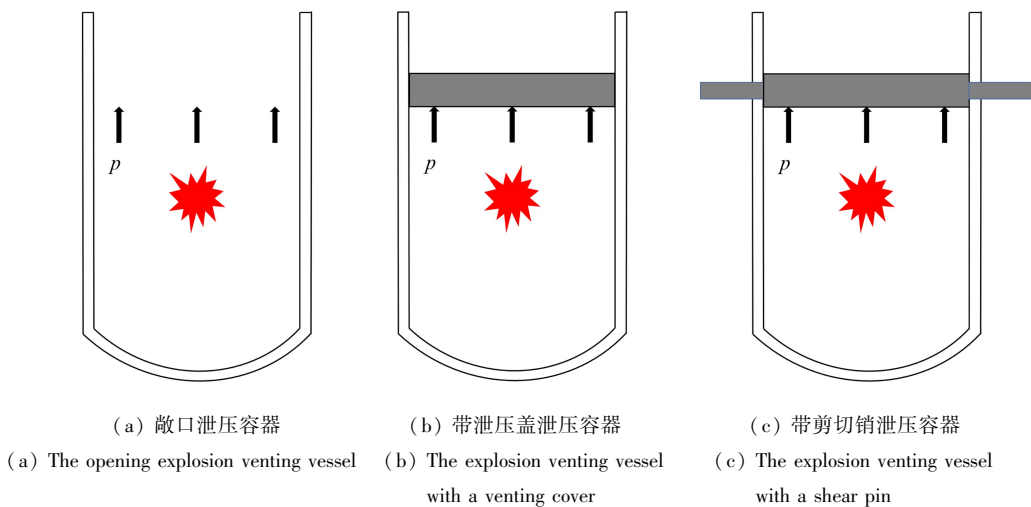


图 1 3 种泄压容器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3 explosion venting vessels

1.2 材料模型

在强动载下金属材料失效涉及材料大变形、热力耦合、材料状态变化等多个复杂物理过程^[18].由于本文研究重点为容器内部的准静态压力,所以根据不同结构在内爆场下的受力特点,选择了相对典型且简化的材料模型.罐体和泄压盖采用刚性材料.剪切销材料为 15-5PH,采用双线性弹塑性本构模型,该材料模型使用两

种斜率的线段来分别表示材料弹性和塑性阶段的应力-应变关系,两种斜率线段的拐点就是材料发生弹性变形和塑性变形的分界点.其失效准则为,当结构单元的最大塑性应变值超过给定的失效应变值时,单元删除,结构发生破坏.本构模型由下式定义:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon < \frac{\sigma_y}{E}, \\ \sigma_y + B\varepsilon^n, & \varepsilon > \frac{\sigma_y}{E}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ 为应力, E 为弹性模量, ε 为应变, σ_y 为屈服强度, B 为应变硬化系数, n 为应变硬化指数,提取相关材料参数如表 1 所示.

表 1 15-5PH 材料参数^[19]
Table 1 Material parameters of 15-5PH^[19]

parameter	value	parameter	value
density $\rho_{15-5PH} / (\text{kg}/\text{m}^3)$	7.78×10^3	E / GPa	196.51
Poisson's ratio μ	0.27	yield strength σ_y	1.077
B	0.499	n	0.568
failure strain ε_0	0.22		

1.3 无黏性非导热流动方程

流体连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

其中, ρ 为密度; u, v, w 分别为 x, y, z 轴方向上的速度.动量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(p + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(p + \rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(p + \rho w^2)}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

其中, p 为压力.能量守恒方程为

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial((e + p)u)}{\partial x} + \frac{\partial((e + p)v)}{\partial y} + \frac{\partial((e + p)w)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

其中

$$e = \rho E = \rho \left(\varepsilon + \frac{|\mathbf{q}|^2}{2} \right), \quad (5)$$

$$q^2 = |\mathbf{q}|^2 = u^2 + v^2 + w^2, \quad (6)$$

e 为单位体积总能, E 为单位质量总能, ε 为单位质量比内能, $q^2/2$ 为单位质量比动能.

1.4 状态方程

空气的理想气体状态方程可由下式表示:

$$p = \rho(\gamma - 1)\varepsilon, \quad (7)$$

其中, $\gamma = C_p/C_v$, γ 为绝热指数, C_p 和 C_v 分别为定压热容和定容热容, ρ 为空气密度.

TNT 炸药选择高能燃烧模型并用 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程描述, JWL 状态方程是一种不含化学反应、由实验方法确定参数的半经验状态方程,能比较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动做功过程.当炸药爆炸时,固体炸药在 Chapman-Jouguet (CJ) 压力下转换成具有相同体积和密度的气态爆炸产物,然后使用基于守恒定律的 JWL 状态方程 (EOS) 和计算流体动力学 (CFD) 模拟爆炸冲击波传播^[20-22].

状态方程定义的爆炸冲击压力为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}, \quad (8)$$

式中,参数 A, B, R_1, R_2, ω 为 JWL 状态方程的系数; E_0 为单位体积爆轰产物的初始内能; V 为初始相对体积. 炸药的输入参数, ρ_{TNT} 为密度, D 为爆速, P_{CJ} 为爆压. 具体参数如表 2 所示.

表 2 JWL 状态方程参数^[23]Table 2 EOS parameters of JWL^[23]

parameter	value	parameter	value
A/GPa	374	B/GPa	3.74
R_1	4.15	R_2	1.4
ω	0.35	E_0/GPa	7
V	1	density $\rho_{\text{TNT}}/(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.63
detonation velocity $D/(\text{m}/\text{s})$	6 930	Chapman-Jouguet pressure P_{CJ}/GPa	21

1.5 数值计算方法验证

王鑫等^[24]开展了炸药在密闭爆炸容器内爆试验,结合数值模拟结果对 TNT 炸药在密闭容器的爆炸准静态压力规律分析研究.由于文献[24]采用的密闭容器尺寸与本文提出的爆炸容器相似且均是对内爆场下冲击波压力进行研究,故本文建立了文献[24]中密闭容器的数值模型,将冲击波压力模拟值与文献[24]中实验测量值进行对比,旨在验证本文计算方法的可靠性.图 2 为本文建立的密闭容器数值模型,密闭容器直径 80 mm、高 130 mm、壁厚 10 mm.流体与固体的网格尺寸均为 5 mm,起爆位置为容器内部几何中心.

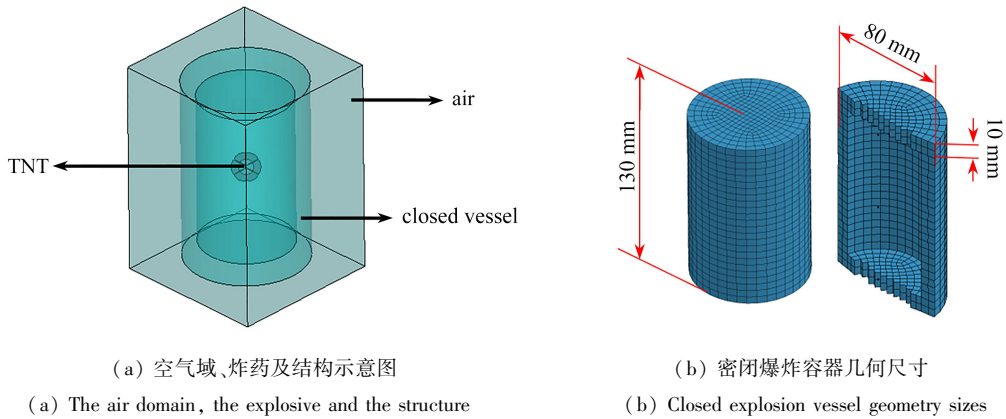


图 2 密闭爆炸容器数值模型

Fig. 2 The numerical model for the closed explosion vessel

图 3 为 5 g、10 g 和 15 g TNT 在密闭容器内爆炸后,密闭容器靠近端盖中心处的压力时程曲线与文献[24]中实验测量值对比.如表 3 所示,3 种当量下数值模拟与实验测得的冲击波准静态压力误差均小于 10%.文献[24]中提到,在高频爆炸冲击载荷阶段,由于传感器为凹陷安装的方式以及柱形约束结构对冲击波传播抑制作用的影响,冲击波在容器内会发生反射和叠加,导致数值模拟压力波形与实验压力波形存在较大的差异.综上,本文复现的数值模拟结果与文献[24]中的实验结果吻合效果较好,故可认为本文中的数值模拟结果具有一定的可靠性.

表 3 本文准静态压力数值模拟值与文献[24]中的试验值对比情况

Table 3 Comparison of the numerical simulation quasi-static pressure in this paper and the experimental quasi-static pressure in ref. [24]

TNT charge mass W_{TNT}/g	quasi-static pressure in the closed explosion vessel		
	numerical simulation ρ_n/MPa	experimental result ^[24] ρ_e/MPa	error $\delta/\%$
5	20.91	22.46	6.9
10	42.03	45.10	6.81
15	62.61	68.25	8.26

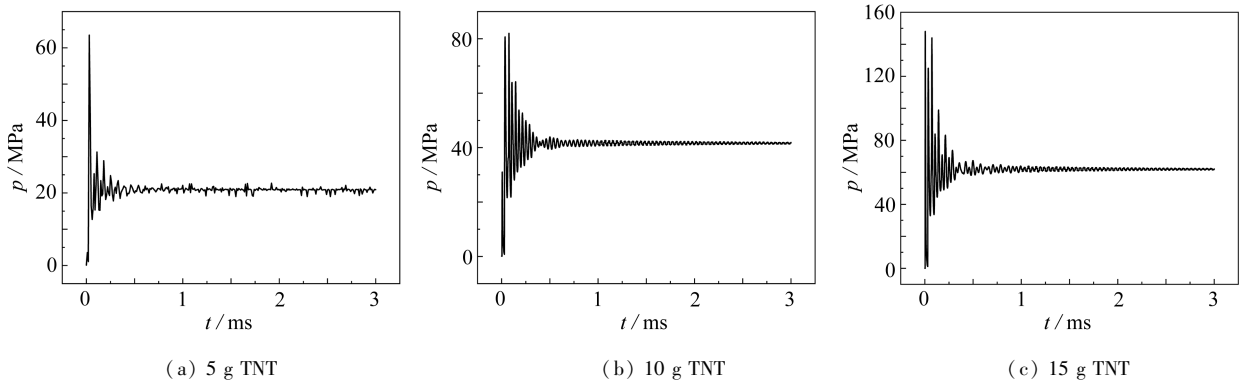


图 3 数值模拟密闭容器内部冲击波超压时程曲线

Fig. 3 The numerical simulation of shock wave pressure-time curves inside the closed vessel

1.6 简化理论计算方法验证

本文的简化理论方法依赖于能量守恒方程,所以在开展后续研究之前,本小节将文献[24]中密闭容器内爆试验测得的准静态压力与理论简化模型预测的准静态压力进行对比,验证简化理论模型的合理性.根据文献[24]中密闭容器内部爆炸前后总能量守恒,可得到式(9)、(10)与(11).

$$E_0 + Q_e m_e = E_1, \quad (9)$$

其中, E_0 为爆炸前空气的初始内能, m_e 为炸药质量, Q_e 为炸药爆热, E_1 为爆炸后有限空间气体内能.考虑炸药在体积为 V_0 的密闭容器内爆炸,此过程可近似认为内部空间没有能量耗散与气体逸出.因此,能量守恒方程具有以下形式:

$$\frac{p_\infty}{\rho_\infty(\gamma_0 - 1)} \rho_\infty (V_0 - V_e) + Q_e m_e = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)} \rho V_0, \quad (10)$$

其中, ρ_∞ 与 ρ 分别为初始空气与爆轰后内部空气的密度, p_∞ 与 p 分别为初始空气压力与爆轰后气体平均压力, γ_0 和 γ 分别是初始气体和爆轰产物的气相混合物的绝热指数, V_e 为炸药体积.最终得到平均压力 p 的表达式为

$$p = \frac{\left(\frac{p_\infty}{\gamma_0 - 1} V_0 + Q_e m_e \right) (\gamma - 1)}{V_0}, \quad (11)$$

$V_0 = 3.12 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, $\gamma_0 = 1.4$, $\gamma = 1.35$, $p_\infty = 0.101 \text{ MPa}$, $Q_e = 4.29 \times 10^6 \text{ J/kg}$, m_e 分别为 5 g, 10 g 和 15 g.将准静态压力的实验值与理论计算值进行对比,二者误差范围在 5%~8%之间,故可以证明本文简化理论模型的合理性,具体如表 4 所示.

表 4 本文准静态压力理论预测值与文献[24]中的试验值对比情况

Table 4 Comparison of the theoretical quasi-static pressure in this paper and the experimental quasi-static pressure in ref. [24]

TNT charge mass $W_{\text{TNT}} / \text{g}$	quasi-static pressure in the closed explosion vessel		
	theoretical prediction p_t / MPa	experimental result ^[24] p_e / MPa	error $\delta / \%$
5	24.06	22.46	7.12
10	48.12	45.10	6.70
15	72.18	68.25	5.76

2 泄压容器数值模型建立

应用 AUTODYN 非线性有限元仿真软件建立泄压容器的计算模型,结构模型包括圆柱形罐体、泄压盖.其中罐体内径、壁厚及高度分别为 180 mm, 10 mm 和 514 mm;泄压盖高度及底部直径分别为 50 mm 和 178 mm;剪切销长度和直径分别为 260 mm 和 18 mm,测点 1~4 的坐标分别为(0,0,-2.5), (0,0,148), (0,0,298)和(0,0,448).敞口泄压容器、带泄压盖泄压容器和带剪切销泄压容器的几何模型如图 4 所示.结构采用 Lagrange 网格,炸药和空气采用 Euler 网格,单元类型均采用八节点实体单元,爆轰产物、爆轰冲击波和泄压

容器之间采用流固耦合算法,起爆位置为容器内部空腔的几何中心,坐标为(0,0,223.5)。

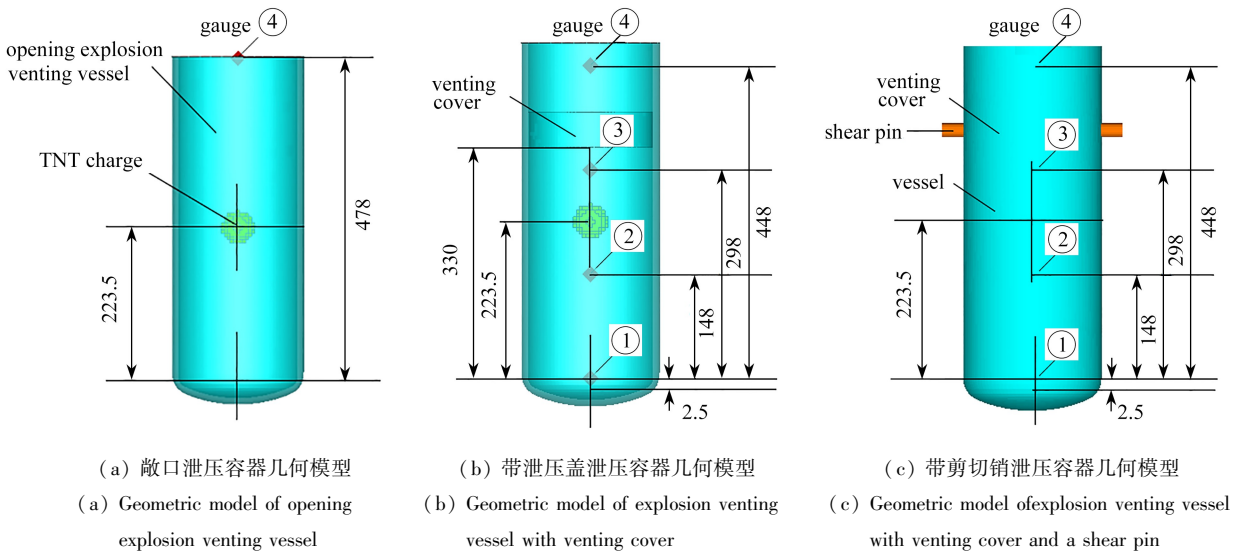


图4 3种泄压容器几何模型(单位: mm)

Fig. 4 Geometric models for 3 explosion venting vessels (unit: mm)

3 敞口泄压容器准静态压力简化理论模型

敞口泄压容器内爆炸过程分为两个阶段:持续时间相对较短的非稳态阶段和持续时间较长的准静态泄压阶段.本节以 Bernoulli 方程为基础,模拟了爆轰产物向外释放过程中每步平均压力的变化.假设整个泄压过程遵循如下假设:

- ① 爆轰产物可被视为具有恒定比热容的理想气体(与分子碰撞动能相比,分子间势能可忽略);
- ② 流体流动过程为正压、等熵(可逆、无传热);
- ③ 容器内的气体可被视为空间上的整体(即容器内的气体性质仅随时间变化);
- ④ 气体压力和密度可以通过 Poisson 方程中的绝热线描述:

$$p(t) = p_{\infty} \left(\frac{\rho(t)}{\rho_{\infty}} \right)^{\gamma}, \quad (12)$$

其中, γ 为绝热指数,初始空气压力和密度分别为 $p_{\infty} = 0.101 \text{ MPa}$, $\rho_{\infty} = 1.225 \text{ kg/m}^3$.容器内部气体质量 $M(t)$ 的微分方程可以写成

$$\frac{dM}{dt} = \rho(t) VS. \quad (13)$$

初始条件下

$$M|_{t=t_0} = \rho_b \theta, \quad (14)$$

其中, V 为气体流过面积为 S 的泄压口的速度, ρ_b 为容器内部爆轰产物气相混合物的密度, θ 为容器容积,时间 t_0 为容器开始向外泄压的时间.沿着任意流线的 Bernoulli 方程可写为如下形式:

$$\frac{U^2}{2} + \Pi(p) = \text{const}, \quad (15)$$

其中, U 为流线中任意一点的速度, $\Pi(p)$ 为此点的单位质量势能.将 Bernoulli 方程应用于沿流线从泄压口横截面的点 (p, ρ, V) 到未经扰动外部空气的点 $(p_{\infty}, \rho_{\infty}, V_{\infty})$ 的流动:

$$\frac{V^2}{2} + \int_p^{p_{\infty}} \frac{dp}{\rho(p)} = \frac{V_{\infty}^2}{2} + \int_{p_{\infty}}^{p_{\infty}} \frac{dp}{\rho(p)}, \quad (16)$$

可得

$$\frac{V^2}{2} + \int_p^{p_{\infty}} \frac{dp}{\rho(p)} = 0. \quad (17)$$

将 Poisson 绝热方程(12)代入到上式中,可得

$$\frac{V^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_\infty}{\rho_\infty} \left[1 - \left(\frac{p}{p_\infty} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] = 0. \quad (18)$$

得到流出速度 V 的理论公式

$$V = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_\infty}{\rho_\infty} \left[\left(\frac{p}{p_\infty} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right]}. \quad (19)$$

根据式(19),将式(13)与初始条件式(14)进行积分,得到质量关于时间的表达式 $M(t)$.根据式(15),计算压力随时间变化的表达式

$$p(t) = p_\infty \left(\frac{M(t)/\theta}{\rho_\infty} \right)^\gamma. \quad (20)$$

上述系统方程的解可由以下方式求得:

- ① 根据上一时间步的气体流出速度,通过式(13)计算容器内的气体质量;
- ② 通过式(20)计算当前内部气体压力;
- ③ 通过式(19)计算下一时间步的气体流出速度.

其中,容器内部空腔体积 θ 约为 $1.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3$, $S = 2.54 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, $\gamma = 1.35^{[13,25]}$ (在文献[13]中,作者研究了当 $\gamma = 3, 2.2, 1.4, 1.325, 1.25$ 这 5 种不同取值时对计算结果的影响.其中当 $\gamma = 3, 2.2$ 时,计算结果偏大;当 $\gamma = 1.25$ 时,计算结果偏小;当 $\gamma = 1.325, 1.4$ 时,数值模拟计算结果恰好落在二者范围之内,但 $\gamma = 1.325$ 时的误差更小,故本文中的 γ 取为 1.35).图 5 为容器内部压力理论计算值与数值模拟测量值的对比.

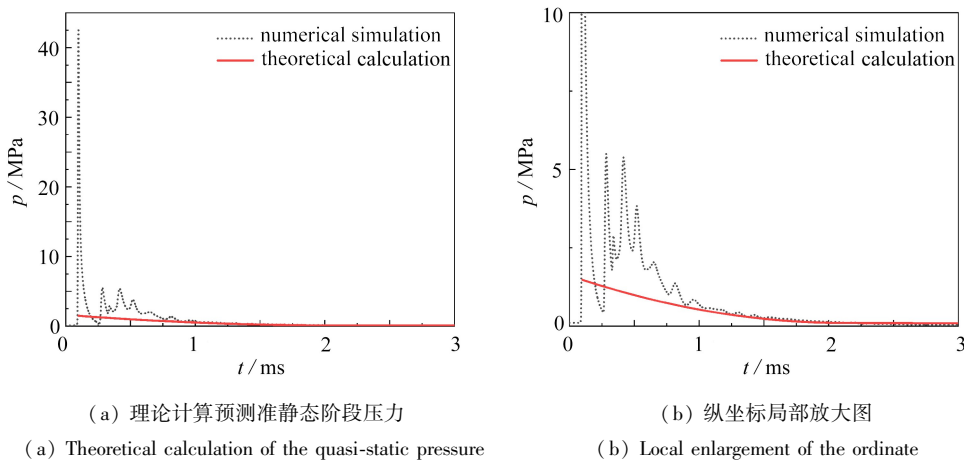


图 5 内部压力理论计算值与数值模拟测量值对比

Fig. 5 Comparison between theoretical calculation values and numerical simulation values of the internal pressure

测点 4 测得的压力曲线特征为:首先出现作用时间短、压力峰值高的脉冲载荷,然后压力曲线维持一段约 1 ms 的震荡波形,最后压力在 2.2 ms 左右时衰减至大气压,其中理论计算得到的容器内部压力也在 2.2 ms 左右时衰减至大气压.敞口泄压容器内部压力衰减速率较快,准静态阶段持续时间较短(1~2.2 ms)、准静态压力较低(约 0.25 MPa),基于 Bernoulli 方程建立的理论简化模型适合模拟泄压容器内爆炸的准静态阶段的压力变化,并且能够合理地预测泄压容器内部压力衰减至大气压力的时间.

4 带泄压盖容器准静态压力简化理论模型

准静态压力的形成是密闭空间内压力逐渐均匀化的过程,本文根据能量守恒方程得到密闭变容阶段平均压力 p 与泄压盖速度 v 的函数关系,通过拟合数值模拟结果中泄压盖速度时程曲线的函数表达式,建立平均压力 p 随时间 t 变化的函数关系式.假设

- ① 爆炸产物满足理想气体状态方程;
- ② 爆炸固态产物体积大小忽略不计;

- ③ 忽略热传导、热扩散等现象造成的能量损失；
 ④ 忽略从泄压盖与容器之间的配合间隙中泄漏的气体质量。

在泄压容器密闭变容阶段,爆炸前后泄压盖动能与容器内部气体的能量守恒,根据式(4)得

$$E_0 + Q_e m_e = E_1 + E_k, \quad (21)$$

其中, E_k 为泄压盖动能,考虑炸药在体积为 V_1 的泄压容器内爆炸,通过内部压力将泄压盖推动至容器口处,内部空间体积增大为 V_2 ,此过程可近似认为内部空间没有能量耗散与气体逸出.因此,能量守恒方程具有以下形式:

$$\frac{p_\infty}{\rho_\infty(\gamma_0 - 1)} \rho_\infty(V_1 - V_e) + Q_e m_e = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)} \rho V_2 + \frac{1}{2} m v^2, \quad (22)$$

其中, ρ_∞ 与 ρ 分别为初始空气与内部空间体积达到 V_2 时内部空气的密度, m 为泄压盖质量, v 为泄压盖出口速度.最终得到平均压力 p 的表达式为

$$p = \frac{\left[\frac{p_\infty}{\gamma_0 - 1} V_1 + Q_e m_e - \frac{1}{2} m v^2(t) \right] (\gamma - 1)}{V_2}, \quad (23)$$

其中, $V_2 = \pi r^2 \int_0^t v(x) dx$, r 为泄压容器内径, $V_1 = 9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, $V_2 = 1.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3$.由于炸药体积 $V_e \ll V_1$,故可在计算中忽略不计. $\gamma_0 = 1.4$, $\gamma = 1.35$ ^[25](γ 的取值原因已在第3节中介绍), $p_\infty = 0.101 \text{ MPa}$, $Q_e = 4.29 \times 10^6 \text{ J/kg}$, $v(t)$ 为泄压盖速度关于时间的函数, p 为容器内部平均压力.

50 g, 100 g 及 150 g TNT 炸药分别在泄压容器中爆炸,泄压盖在爆轰产物的推动下向外做加速运动,泄压盖速度时程曲线如图6所示, $v(t)$ 为泄压盖速度, t 为时间,不同起爆药量下泄压盖到达容器口的时间分别为 1.6 ms, 2 ms 和 2.85 ms,拟合不同起爆药量下泄压盖速度-时间曲线的二次多项式:

$$\begin{cases} v(t_1) = -3.32t_1^2 + 41.23t_1 + 2.47, & 0 \leq t_1 \leq 2.85, \\ v(t_2) = -9.61t_2^2 + 82.48t_2 + 4.78, & 0 \leq t_2 \leq 2, \\ v(t_3) = -6.23t_3^2 + 64.02t_3 + 7.08, & 0 \leq t_3 \leq 1.6. \end{cases} \quad (24)$$

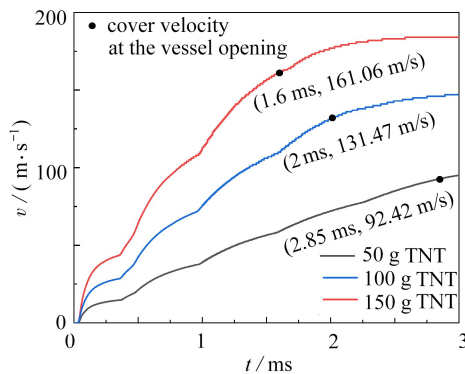


图6 泄压盖速度-时间曲线

Fig. 6 Venting cover velocity-time curves

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同。

根据式(23)、(24)模拟密闭变容阶段准静态压力的变化趋势,如图7所示,曲线横坐标最大时间的选取取决于不同当量下泄压盖的出口时刻.在爆炸载荷初始阶段,计算得到的平均压力与数值模拟超压值存在较大差异;在爆炸载荷进入准静态阶段后,理论计算得到的平均压力与容器内部准静态压力吻合效果良好.这是因为绝热指数 γ 在真实条件下受压力和温度影响而改变,但在本文中为了分析容器内部的平均压力而将 γ 取值 1.35,而在爆炸载荷初始阶段爆轰产物迅速压缩周围空气形成较高的超压峰值,所以在此条件下理论计算得到的压力并不能预测爆炸载荷初始阶段的气体压力.说明利用能量守恒方程描述带泄压盖容器内部

准静态压力具有一定合理性。

观察测点 4 测得超压曲线可知,其最大压力值总是与准静态压力相近,这表明在容器泄压过程中,当泄压盖飞出容器口时,内部气体的压力基本上可以看作在空间上均匀分布。除此之外,发现压力时程曲线在经过超压峰值之后,还存在一段振荡阶段。其特征主要为随着时间的推移,每次出现的压力峰值逐渐减小,出现两次压力峰值之间的时间间隔逐渐延长。出现这种现象的主要原因是炸药爆炸后冲击波沿容器轴向做往复传播,随着泄压盖的飞出导致冲击波往复传播的距离增大,同时冲击波自身压力和波速随着往复传播逐渐衰减,最终形成压力曲线震荡阶段的特征。

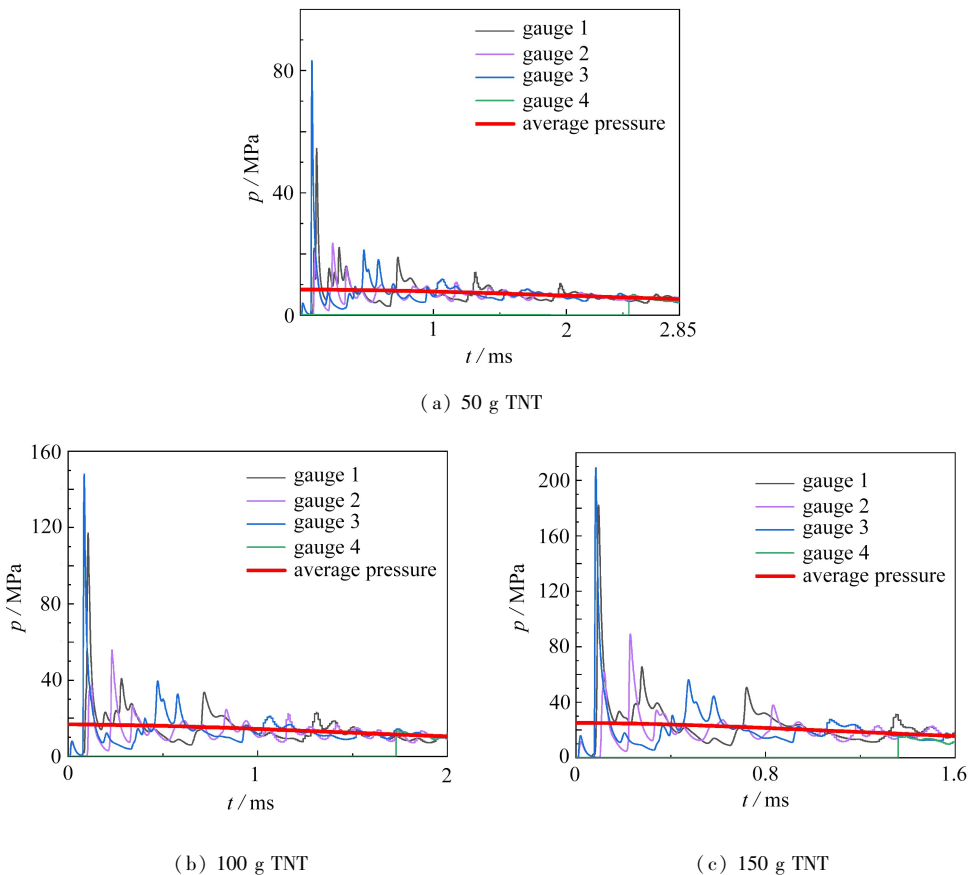


图 7 带泄压盖容器内部理论计算超压平均值与数值模拟测量值对比

Fig. 7 Comparison between the average theoretical overpressure values and the numerical simulation values in the explosion venting vessel with a venting cover

5 带剪切销泄压容器简化理论模型

当起爆药量较小时,剪切销未断裂,容器将爆轰产物包容在密闭空间内。基于能量守恒方程,简化第 3 节计算容器内部平均压力 p 的理论公式(11)来描述剪切销未断裂时容器内部的准静态压力。其中, $V_1 = 9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, $\gamma_0 = 1.4$, $\gamma = 1.35$, $p_\infty = 0.101 \text{ MPa}$, $Q_e = 4.29 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 。

当 $m_e = 30 \text{ g}$ 时,计算得到 $p = 5.09 \text{ MPa}$,将准静态压力理论计算结果与数值模拟结果进行对比,如图 8 所示。理论简化模型对密闭容器内爆炸准静态压力模拟效果较好,准静态阶段存在明显的平台效应^[26-27],说明利用式(11)描述密闭空间内部准静态压力具有一定的合理性。

当起爆药量较大时,剪切销断裂,容器向外泄压。为研究泄压过程中剪切销对准静态压力造成的影响,建立剪切销直径分别为 10 mm , 18 mm ,起爆药量为 100 g 的数值模型,与无剪切销时数值模拟测得的超压时程曲线对比,如图 9 所示。

由图 9 可知,剪切销直径不同时,超压时程曲线整体变化趋势基本一致。观察测点 1~3 可知,随着剪切销直径增加,进入准静态阶段的时间提前,这是由于泄压盖飞出时间延后,相同时刻下容器内部空腔体积较小,

冲击波往复传播距离较近,导致测点 1~3 测得的超压的时间提前;观察测点 4 测得超压可知,无剪切销时测点 4 最先测得超压波形,且压力衰减速率最快,说明随着剪切销直径的增加,泄压盖飞出速度降低,导致泄压盖出口时刻延后,测点 4 测得超压时间推迟.在测点 4 出现明显超压峰值之前还记录到一部分不明显的超压数据,原因是在泄压盖飞出容器之前,部分冲击波从泄压盖与容器之间的缝隙向外传播至测点 4.表 5 为剪切销直径不同时,与准静态压力相关的数据.对比无剪切销时容器内部压力可知,当剪切销为 18 mm 时,泄压盖飞出容器口时内部准静态压力下降了 15.8%,泄压盖出口速度下降了 8.2%,泄压盖出口时刻延后了 12.5%.

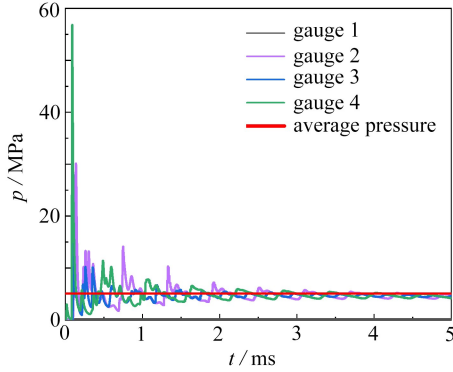


图 8 剪切销未断裂时容器内准静态超压理论与数值计算对比

Fig. 8 Comparison between theoretical quasi-static overpressure values and numerical values in the vessel with the shear pin unbroken

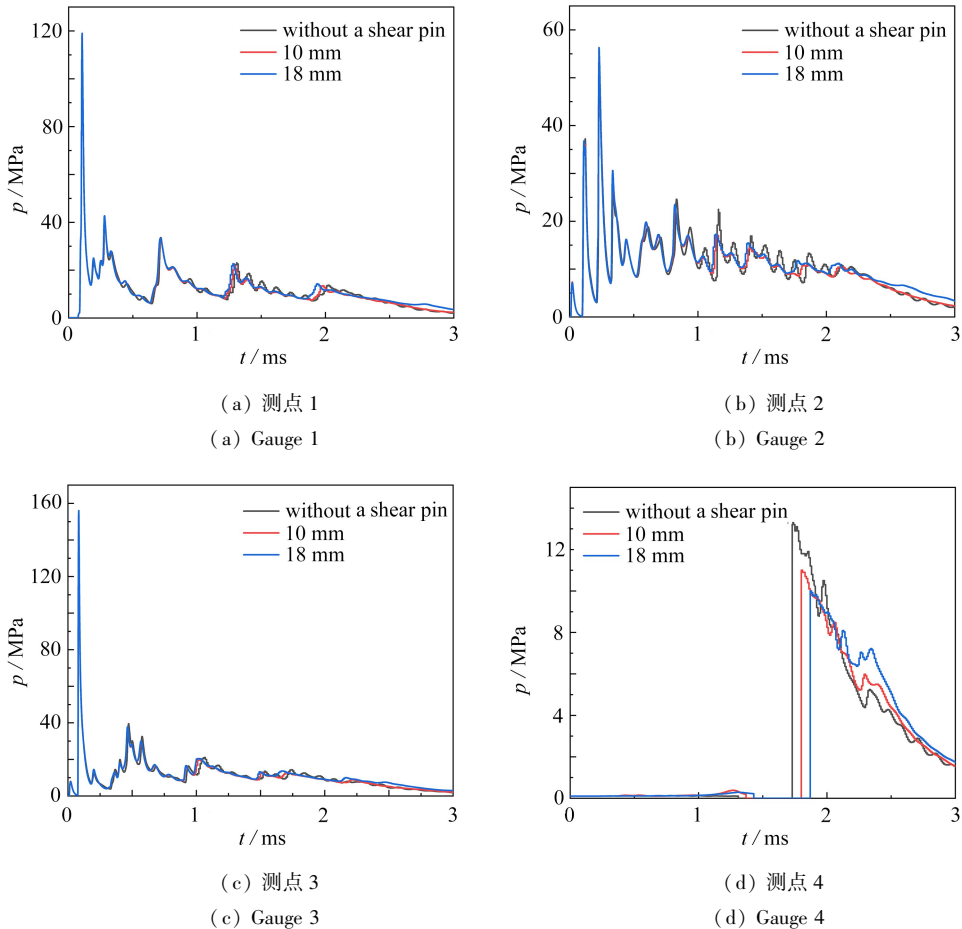


图 9 不同剪切销直径下泄压容器内部超压-时间曲线

Fig. 9 Pressure-time curves of the explosion venting vessel under different shear pin diameters

表 5 对比不同剪切销直径对准静态压力与泄压盖出口速度的影响

Table 5 Comparison of the effects of different shear pin diameters on the quasi-static pressure and the cover velocity

shear pin diameter d /mm	quasi-static pressure when the cover reached the vessel opening p_c /MPa	velocity of the cover reaching the vessel opening v_c /(m/s)	time of the cover reaching the vessel opening t_c /ms
no shear pin	10.3	131.72	2
10	9.09	125.9	2.1
18	8.67	120.92	2.25

可得出如下结论:剪切销未断裂时,简化模型对密闭容器内爆炸准静态压力模拟效果较好;剪切销断裂后,随着剪切销直径增加,泄压盖飞出容器口所需时间延长,准静态压力减小,但超压时程曲线整体变化趋势基本一致。

6 结 论

本文提出了两种理论简化模型用于计算内爆载荷作用下敞口泄压容器和带泄压盖容器内部准静态压力,并分析了剪切销对准静态压力的影响。简化模型与 AUTODYN 数值模拟结果吻合良好,可得到以下结论:

1) 本文建立文献[24]中试验结构的仿真模型并与文献[24]中实验测得的准静态压力进行对比,得到了误差较小的仿真结果,验证了本文数值模型的可靠性。以 Bernoulli 方程为基础的理论简化模型能够较好地预测敞口泄压容器准静态压力,同时简化模型与数值模拟中容器内部压力恢复至大气压的时间 2.2 ms 相近。

2) 本文所提出的应用于密闭变容阶段计算平均压力的理论简化模型(23)与数值模拟结果吻合较好,证明该模型可用于带泄压盖容器密闭变容阶段准静态压力预估。容器内部平均压力与 TNT 药量关系成正比,同时平均压力衰减速率随起爆药量增加而增加。泄压盖出口速度主要受准静态压力影响,而受超压峰值影响较小。

3) 剪切销未断裂时,以能量守恒方程为基础计算得到的准静态压力与数值模拟测得准静态压力基本一致;起爆药量为 100 g 时,随着剪切销直径增加,但对泄压过程中准静态压力整体变化趋势影响较小。对比无剪切销容器泄压盖飞出容器的时间,18 mm 剪切销泄压容器中泄压盖飞出容器时间提前了 0.25 ms。

4) 本文提出的理论模型只能用于不同构型泄压容器内部准静态压力的预测,而在爆炸过程中,超压峰值、正压作用时间和总冲量等对结构造成的影响也是不容忽视的,故本文所提出的理论模型存在一定的局限性^[28-32]。

参考文献(References):

- [1] SIWEK R. Explosion venting technology[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1996, **9**(1): 81-90.
- [2] 赵天辉,高康华,王明洋,等. 方形容器爆燃泄放过程中的压力特性实验研究[J]. 兵工学报, 2017, **38**(4): 722-727.(ZHAO Tianhui, GAO Kanghua, WANG Mingyang, et al. Experimental study of pressure characteristics during deflagration venting in a square vessel[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, **38**(4): 722-727.(in Chinese))
- [3] 张玉磊,苏健军,李芝绒,等. TNT 内爆炸准静态压力特性[J]. 爆炸与冲击, 2018, **38**(6): 1429-1434.(ZHANG Yulei, SU Jianjun, LI Zhirong, et al. Quasi-static pressure characteristic of TNT's internal explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, **38**(6): 1429-1434.(in Chinese))
- [4] 徐维铮,吴卫国. 泄压口大小对约束空间爆炸准静态超压载荷的影响规律[J]. 高压物理学报, 2017, **31**(5): 619-628.(XU Weizheng, WU Weigu. Effects of size of venting holes on the characteristics of quasi-static overpressure in confined space[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, **31**(5): 619-628.(in Chinese))
- [5] BAKER W E, OLDHAM G A. Estimates of blowdown of quasi-static pressures in vented chambers; EM-CR-76029[R]. Southwest Research Institute, 1975.
- [6] 张玉磊,陈华,韩璐,等. 泄压口面积对温压炸药内爆炸准静态压力的影响[J]. 火炸药学报, 2020, **43**(5): 521-525.(ZHANG Yulei, CHEN Hua, HAN Lu, et al. Effect of venting area on quasi-static pressure of internal explosion for thermobaric explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2020, **43**(5): 521-525.

- (in Chinese))
- [7] 徐维铮, 吴卫国. 装药质量对约束空间内爆炸准静态超压载荷的影响规律研究[J]. 应用力学学报, 2018, **35**(1): 42-46. (XU Weizheng, WU Weigu. Influence of mass of explosives on the characteristics of quasi-static overpressure in confined space[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2018, **35**(1): 42-46. (in Chinese))
- [8] 高轩能, 王书鹏, 江媛. 爆炸荷载下大空间结构的冲击波压力场分布及泄爆措施研究[J]. 工程力学, 2010, **27**(4): 226-233. (GAO Xuanneng, WANG Shupeng, JIANG Yuan. Shock wave pressure distribution on large-space structure and explosion venting under blast loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, **27**(4): 226-233. (in Chinese))
- [9] 汪维, 刘瑞朝, 吴飏, 等. 建筑物内爆泄压口冲击波参数工程算法研究[J]. 振动与冲击, 2015, **34**(9): 48-54. (WANG Wei, LIU Ruichao, WU Biao, et al. Engineering arithmetic for internal blast waves parameters in venting area of building structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, **34**(9): 48-54. (in Chinese))
- [10] 宋浦, 冯海云, 胡宏伟, 等. 爆炸装药在有限空间内爆炸做功能力的一种新型评估方法[J]. 防护工程, 2014, **36**(2): 26-28. (SONG Pu, FENG Haiyun, HU Hongwei, et al. A new evaluation method for charge work capacity exploding in finite space[J]. *Projective Engineering*, 2014, **36**(2): 26-28.
- [11] 李根, 卢芳云, 李翔宇. 测量炸药爆炸威力的实验方法研究[J]. 中国测试, 2020, **46**(9): 40-46. (LI Gen, LU Fangyun, LI Xiangyu. Research on experimental method for assessing explosive power[J]. *China Measurement & Test*, 2020, **46**(9): 40-46. (in Chinese))
- [12] 胡宏伟, 冯海云, 肖川, 等. 基于顶盖举起试验的炸药内爆炸性能评估[J]. 火炸药学报, 2016, **39**(3): 53-57. (HU Hongwei, FENG Haiyun, XIAO Chuan, et al. Evaluation of the internal blast performance of explosives based on roof lift test[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, **39**(3): 53-57. (in Chinese))
- [13] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, YANKELEVSKY D Z. A simplified model with lumped parameters for explosion venting simulation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, **38**(12): 964-975.
- [14] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, YANKELEVSKY D Z. Simplified models of shock waves interaction with rigid and flexible obstacles[C]//30th International Symposium on Shock Waves 1. Switzerland, 2017: 691-696.
- [15] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. On blast pressure analysis due to a partially confined explosion II: numerical studies[J]. *International Journal of Protective Structures*, 2012, **3**(1): 61-79.
- [16] MOLKOV V V, GRIGORASH A V, EBER R M, et al. Vented gaseous deflagrations: modelling of translating inertial vent covers[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2003, **16**(5): 395-402.
- [17] YANKELEVSKY D Z, FELDGUN V R, KARINSKI Y S, et al. Prediction of quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, **90**: 46-60.
- [18] 柳占立, 初东阳, 王涛, 等. 爆炸和冲击载荷下金属材料及结构的动态失效仿真[J]. 应用数学和力学, 2021, **42**(1): 1-14. (LIU Zhanli, CHU Dongyang, WANG Tao, et al. Dynamic failure simulation of metal materials and structures under blast and impact loading[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, **42**(1): 1-14. (in Chinese))
- [19] 戴志成. 飞机断离销剪切强度有限元与实验研究[D]. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳理工大学, 2017. (DAI Zhicheng. Finite element and experimental study on shear strength of aircraft fuse pin[D]. Master Thesis. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2017. (in Chinese))
- [20] 李臻, 刘彦, 黄风雷, 等. 接触爆炸和近距离爆炸比冲量数值仿真研究[J]. 北京理工大学学报, 2020, **40**(2): 143-149. (LI Zhen, LIU Yan, HUANG Fenglei, et al. Investigation of specific impulse under contact explosion and close-in explosion conditions using numerical method[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, **40**(2): 143-149. (in Chinese))
- [21] 王辉. 炸药爆炸产物JWL状态方程参数数值计算[D]. 硕士学位论文. 西安: 西安工业大学, 2011. (WANG Hui. Numerical calculation of parameters of JWL equation of state for explosive explosion products[D]. Master Thesis. Xi'an: Xi'an Industrial University, 2011. (in Chinese))
- [22] 冯振宇, 姜超, 高斌元, 等. 芳纶纤维平纹织布在爆炸载荷下的动态响应与失效行为的数值分析[J]. 应用数学和力学, 2021, **42**(11): 1113-1125. (FENG Zhenyu, JIANG Chao, GAO Binyuan, et al. Numerical study on dynamic responses and failure behaviours of aramid fabrics subject to blast loads[J]. *Applied Mathematics and*

- Mechanics*, 2021, **42**(11): 1113-1125. (in Chinese))
- [23] 解江, 高斌元, 甄婷婷, 等. 爆炸载荷下机织物的动态响应与失效行为[J]. 复合材料学报, 2022, **39**(10): 4949-4960. (XIE Jiang, GAO Binyuan, ZHEN Tingting, et al. Dynamic response and failure behaviors of woven fabrics under blast load[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, **39**(10): 4949-4960. (in Chinese))
- [24] 王鑫, 张连生, 张明明, 等. 密闭空间 TNT 内爆炸准静态压力研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, **41**(5): 188-192. (WANG Xin, ZHANG Liansheng, ZHANG Mingming, et al. Study on quasi-static pressure of TNT internal explosion in confined spaces[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, **41**(5): 188-192. (in Chinese))
- [25] 徐维铮, 吴卫国. JWL 状态方程及其等效多方状态方程在内爆炸计算中的应用分析[J]. 中国舰船研究, 2019, **14**(3): 83-91. (XU Weizheng, WU Weiguo. Application analysis of JWL EOS and the equivalent polytropic EOS in internal explosion calculation[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, **14**(3): 83-91. (in Chinese))
- [26] 孔祥韶, 王子棠, 况正, 等. 密闭空间内爆炸载荷抑制效应实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, **41**(6): 24-37. (KONG Xiangshao, WANG Zitang, KUANG Zheng, et al. Experimental study on the mitigation effects of confined-blast loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, **41**(6): 24-37. (in Chinese))
- [27] ANDERSON C E, BAKER W E, WAUTERS D K, et al. Quasi-static pressure, duration, and impulse for explosions in structures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1983, **25**(6): 455-464.
- [28] 刘欣, 顾文彬, 蔡星会, 等. 圆柱形爆炸容器的内壁爆炸载荷[J]. 爆炸与冲击, 2022, **42**(2): 19-30. (LIU Xin, GU Wenbin, CAI Xinghui, et al. Blast loads on the inner wall of cylindrical explosion containment vessel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, **42**(2): 19-30. (in Chinese))
- [29] 徐景林, 顾文彬, 刘建青, 等. 圆柱形爆炸容器内爆炸载荷的分布规律[J]. 振动与冲击, 2020, **39**(18): 276-282. (XU Jinglin, GU Wenbin, LIU Jianqing, et al. Distribution of blast loading in cylindrical explosive containment vessels[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, **39**(18): 276-282. (in Chinese))
- [30] 周清. 密闭空间内爆炸引起的内壁超压分布规律及简化计算研究[D]. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2008. (ZHOU Qing. Study on distribution law and simplified calculation of inner wall overpressure caused by explosion in confined space[D]. Master Thesis. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))
- [31] 陈鹏宇, 侯海量, 金键, 等. 舰船舱内爆炸载荷简化载荷计算模型[J]. 舰船科学技术, 2020, **42**(17): 22-29. (CHEN Pengyu, HOU Hailiang, JIN Jian, et al. Simplified calculation model for explosion loading in ship cabin[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, **42**(17): 22-29. (in Chinese))
- [32] 侯日立, 周平, 彭建祥. 冲击波作用下 LY12 铝合金结构毁伤的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2012, **32**(5): 470-474. (HOU Rili, ZHOU Ping, PENG Jianxiang. Numerical simulation of shock damage of LY12 aluminium alloy structure[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, **32**(5): 470-474. (in Chinese))