

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.022

## 钢结构危险品储柜内可燃气体 爆炸动力响应试验研究

夏晨曦,王徐望,王子南

(安徽江南化工股份有限公司,合肥 230088)

**摘要:** 研究危险品储柜结构在内部可燃气体爆炸荷载作用下的动力响应特征和破坏机理,可以最大限度地降低危险品储柜爆炸事故后果,减少人员伤亡和财产损失,具有重要的工程意义和社会价值。本试验研究以甲烷与空气混合气云作为气体爆炸源,分别开展 $1\text{ m}^3$ 、 $8\text{ m}^3$ 、 $27\text{ m}^3$ 及 $78\text{ m}^3$ 气云4种工况下的钢结构危险品储柜可燃气体内爆炸试验,得到内爆炸作用下典型超压及位移时程曲线并进行动力响应分析与研究。试验及研究结果表明:储柜结构位移响应与荷载响应保持同步,即超压荷载在增大的同时,储柜壁板位移也在增加,二者达到峰值的时间几乎是相同的;根据超压试验和结构响应试验结果,试验测得的超压荷载峰值并不满足燃气体积越大,超压峰值越大的规律。

**关键词:** 危险品储柜;可燃气体;内爆炸;动力响应;试验研究

中图分类号: O381; X932 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)01-0183-09

## Experimental Study on Dynamic Response of Steel Structure Hazardous Substances Storage Cabinet under Internal Combustible Gas Explosion

XIA Chen-xi, WANG Xu-wang, WANG Zi-nan

(Anhui Jiangnan Chemical Industry Co., Ltd., Hefei 230088, China)

**Abstract:** Studying the dynamic response and failure mechanism of hazardous substances storage cabinet structures under internal combustible gas explosion loads can minimize the consequences of explosion accidents, reducing casualties and property losses, which holds significant engineering and social value. This study used methane mixed with air as the combustible gas in internal explosion tests conducted within a hazardous substances storage cabinet structure. Tests were performed under four gas cloud conditions:  $1\text{ m}^3$ ,  $8\text{ m}^3$ ,  $27\text{ m}^3$  and  $78\text{ m}^3$ . Typical overpressure and displacement time-history curves from internal explosion were obtained, and the dynamic response was analyzed. The results show that the displacement response of the storage cabinet structure synchronized with the load response. As the overpressure load increased, the displacement of the storage cabinet wall increased accordingly, reaching their peak nearly simultaneously. The results of overpressure and structural response tests indicate that the peak value of the overpressure load measured in the test did not follow the expected trend, as the more extensive gas volume did not consistently result in higher peak overpressure values.

**Key words:** hazardous substances storage cabinet; combustible gases; internal explosion; dynamic response; experimental research

收稿日期 (Date of reception): 2024-04-10

网络首发日期 (Published online): 2024-07-20

作者简介: 夏晨曦 (1987-), 男, 博士、高级工程师, 主要从事火灾爆炸事故后果评估和结构抗爆计算方面的工作, (E-mail) 514440737@qq.com。

**About the author:** XIA Chen-xi (1987-), male, Ph. D, senior engineer, mainly engaged in the assessment of the consequences of fire and explosion accidents and the calculation of structural blast resistance, (E-mail) 514440737@qq.com.

由于危险品储柜(又称危险品集装箱)具有安装方便、管理使用便利、适用范围广等优点,在危险品道路运输、海上运输、铁路运输和工业企业储存等方面

方面得到广泛的应用,典型危险品储柜在运输和储存环节应用见图 1。



图 1 典型危险品储柜应用实景

Fig. 1 Typical application scenario of hazardous substances storage cabinets

随着社会经济的快速发展,各类危险品原辅料的需求也日益旺盛,危险品储柜的数量和使用范围越来越大,但随之而来的危险品储柜火灾、爆炸事故也不断发生,造成了大量的人员伤亡和严重的财产损失,社会影响十分恶劣。2019 年 3 月 31 日,位于江苏昆山的汉鼎公司发生危险品储存柜内可燃气体爆炸。该事故共造成 7 人死亡、5 人受伤,直接经济损失 4000 多万元。2021 年 5 月 25 日,韩国航运公司 KMTC 旗下的危险品集装箱船在港口发生内部可燃气体爆炸事故,事故共造成 34 个集装箱烧毁,130 人受伤。

20 世纪 80 年代以来,国内外学者针对可燃气体内爆炸的研究较多,研究所用结构多集中于储罐、管道、柱形容器、连通器等,并在气体爆炸原理、爆炸安全防护等方面取得了一定的成果<sup>[1-3]</sup>。王志荣等开展了单个容器和容器管道系统气体爆炸实验研究<sup>[4]</sup>;Bao Qi 等研究了开敞空间的可燃气体爆炸特性<sup>[5]</sup>;Woolley、Fairweather 使用计算流体动力学方法预测受限、排放的甲烷-氢气爆炸<sup>[6]</sup>;石立旺、于志华、王震、胡可等研究了气体爆炸作用下抗爆间、球形储罐、拱顶钢储罐的动力响应和冲击荷载的影响<sup>[7-10]</sup>。目前国内外对于危险品储柜这类长方体大空间薄壁结构的研究相对较少,在危险品储柜爆炸安全方面的研究还处于起步阶段,尚未形成设计规范,且研究多采用缩比实验模型或装置,缺少原型试验数据,尺寸效应导致相应研究成果难以指导工程设计。

研究危险品储柜结构在内部可燃气体爆炸荷载作用下的动力响应特征和破坏机理,分析各类设计参数对危险品储柜泄爆抗爆性能的影响规律,可以有效指导结构设计,提高危险品储柜的本质安全性,

有利于最大限度地降低危险品储柜爆炸事故后果,减少人员伤亡和财产损失,具有重要的工程意义和社会价值。

## 1 钢结构储柜内可燃气体的爆炸试验

### 1.1 试验装置设计

试验系统由钢结构危险品储柜、气体供应装置、浓度控制装置、点火装置、影像装置和数据采集装置组成,如图 2 所示。试验所用的原型危险品储柜尺寸为  $10\text{ m} \times 2.6\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ ,储柜侧封板及顶板均为双层铁板+岩棉板(起到保温隔热作用),底部为单层铁板,板厚均为  $1.5\text{ mm}$ ,立柱采用空心矩形钢,立柱尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3.0\text{ m}$ ,立柱所用钢材厚度为  $1.75\text{ mm}$ 。柜子左右两侧各有 1 个排风扇,顶部有 2 个泄爆板,尺寸为  $2.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ ,初始状态下泄爆板为关闭状态,泄爆阈值为  $0.6\text{ kPa}$ 。采用甲烷作为典型气体危险品开展内爆炸试验。由于储柜是在均匀气云状态下引爆,上下两部分对称,因此实验压力和位移测点选择在下半部分设置。

### 1.2 试验工况

试验工况如表 1 所示,其中,甲烷均匀分布状态的实现是采用防爆风机对柜子内部气体进行搅拌。燃料区域体积定为  $1\text{ m}^3$ 、 $8\text{ m}^3$ 、 $27\text{ m}^3$  及  $78\text{ m}^3$ (充满整个柜子),采用塑料薄膜对柜子内部空间进行隔断,且保证有一个泄爆口位于燃料区域的正上方,具体位置如图 3 所示,其中  $1\text{ m}^3$  工况体积较小,仅布置一个浓度测点。 $8\text{ m}^3$  和  $27\text{ m}^3$  工况在气云斜对角均匀布置三个浓度测点。 $78\text{ m}^3$  空间体积较大,为了更加准确测量柜体中甲烷分布状况,在柜子斜对角均匀布置 5 个浓度测点。

### 1.3 荷载测试方案

超压测量选用石英压电式压力传感器,燃气爆炸压力传感器量程为 0 ~ 150 kPa,采样频率为 30 kHz。危险品储柜共布置 4 个压力传感器,其中背板布置 3 个,侧板布置 1 个,其中 4 号测点位于正对立方体气云侧面点,其它三个测点均位于板中心,具体位置分布如图 4 所示。

表 1 甲烷爆炸试验工况

Table 1 Methane explosion test conditions

| 工况   | 实验次数/次 | 浓度/vol. % | 气云状态 | 点火位置 | 气云体积/m <sup>3</sup> |
|------|--------|-----------|------|------|---------------------|
| 工况 1 | 4      |           |      |      | 1                   |
| 工况 2 | 2      | 9.5       | 均匀分布 | 气云中心 | 8                   |
| 工况 3 | 2      |           |      |      | 27                  |
| 工况 4 | 1      |           |      |      | 78                  |

### 1.4 结构动力响应测试方案

位移传感器量程为 0 ~ 300 mm,前门和背板各布置 4 个,侧板 1 个,位置如图 5 所示,5、6、7 三个测点为同一扇不同位置处的测点,8 号测点位于另一扇门中心,是对 5 号测点数据的校核。10、11、12 三个测点为同一背板不同位置处的测点,13 号测点位于另一块背板中心,是对 11 号测点数据的校核。



图 2 危险品储柜及甲烷爆炸试验系统  
Fig. 2 Hazardous substances storage cabinet and methane explosion test system

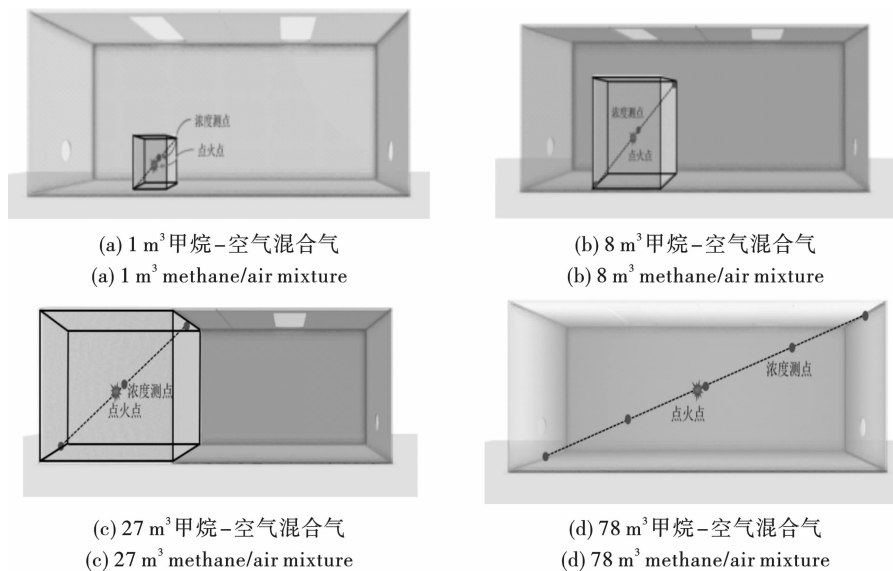


图 3 甲烷爆炸试验工况示意图

Fig. 3 Schematic diagram of methane explosion test conditions

## 2 试验结果及分析

### 2.1 典型超压及位移时程曲线

燃气在危险品储柜内部爆炸是一个复杂的物理

和化学过程,当燃气被点火装置点燃后,火焰快速传播,柜体内温度和压力随之上升,当内部压力达到泄爆阈值时,泄爆板打开,内部火焰及燃烧产物从泄爆口泄出,导致压力降低。通过对各个工况爆炸试验

得到的超压时程曲线进行总结分析,可以得出危险品储柜内部燃气爆炸4种典型的超压时程曲线,如图6所示。最简单的超压时程曲线仅有一个超压峰值,如图6(a)所示,该种工况下爆炸压力释放较为稳定,未产生压力振荡现象;图6(b)所示的超压时程曲线与图6(a)相似,不同之处在于前者在峰值过后出现一段负压区,出现该现象的原因在于泄爆过程中由于危险品储柜内部燃烧产物的不断喷出,导致内部压强低于初始压力,之后外部气体涌入柜子内部使得超压逐渐恢复至初始压力;如图6(c)所示的超压时程曲线在峰值处出现一段震荡区域,随后压力恢复至初始压力,出现该现象的原因在于泄爆板打开之前,储柜内部火焰与压力波相互耦合,造成内部压力场的不稳定,从而在超压时程曲线峰值区域处产生震荡;如图6(d)所示的超压时程曲线在压力下降阶段出现压力突增,形成单个或多个峰值,尤其是在燃气充满整个柜体时,该现象尤为显著,其主要原因在于泄爆板打开后储柜内部压力得到释放,然而在释放过程中,柜子内部未反应完全的燃料继续反应,使得压力释放的同时,剩余燃料继续反应产生的压力对柜子内部压力给予补充,因此会出现压力在下降阶段突增的现象,内部燃料越多,未反应的燃料也越多,下降阶段出现压力陡增的现象就会越明显。

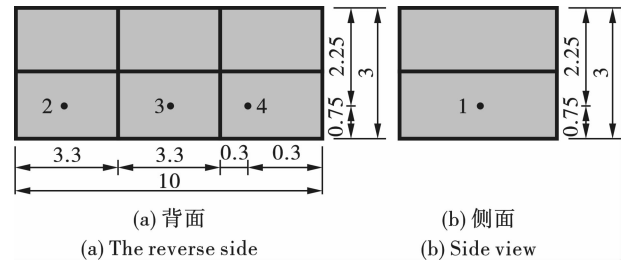


图4 压力传感器布置图  
Fig. 4 Pressure sensor layout

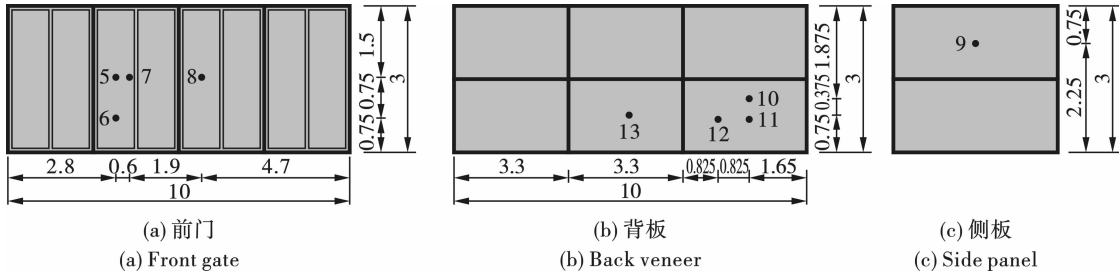


图5 位移测点布置示意图(单位:m)

Fig. 5 Schematic diagram of displacement measurement point layout(unit:m)

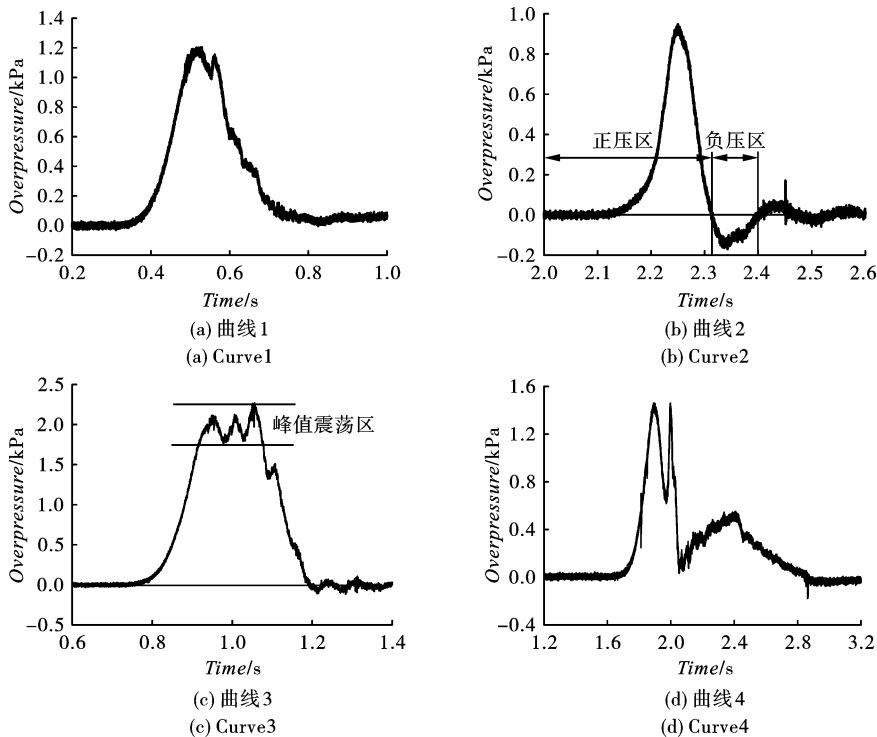


图6 试验测得的典型超压时程曲线

Fig. 6 Typical overpressure time history curve measured in the experiment

3 种典型的结构位移时程曲线如图 7 所示。图 7(a) 的位移时程曲线仅有一个峰值, 残余位移也较小, 曲线形状单一; 图 7(b) 的位移时程曲线有一个主峰值, 且曲线变化过程中出现振动, 形成多个峰值, 残余位移较小, 表明结构位移属弹性位移, 结构未出现明显损伤; 图 7(c) 为燃气充满整个柜体的工

况, 由于该工况爆炸能量较大, 导致爆炸过程中危险品储柜出现振动, 因此位移时程曲线在下降段出现较大的波动。

### 2.2 超压试验结果

图 8 ~ 图 11 分别为  $1\text{ m}^3$ 、 $8\text{ m}^3$ 、 $27\text{ m}^3$  和  $78\text{ m}^3$  甲烷爆炸荷载时程曲线, 超压峰值汇总于表 2。

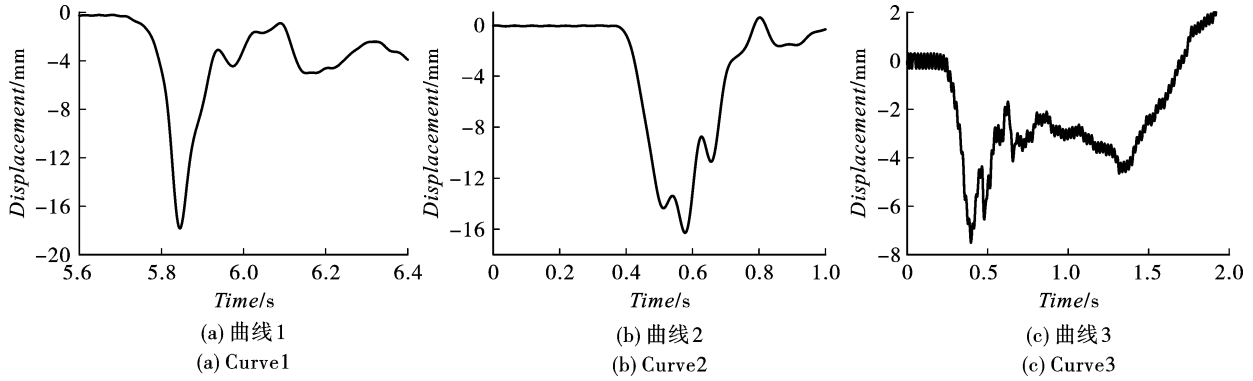


图 7 试验测得的典型位移时程曲线

Fig. 7 Typical displacement time history curve measured in the experiment

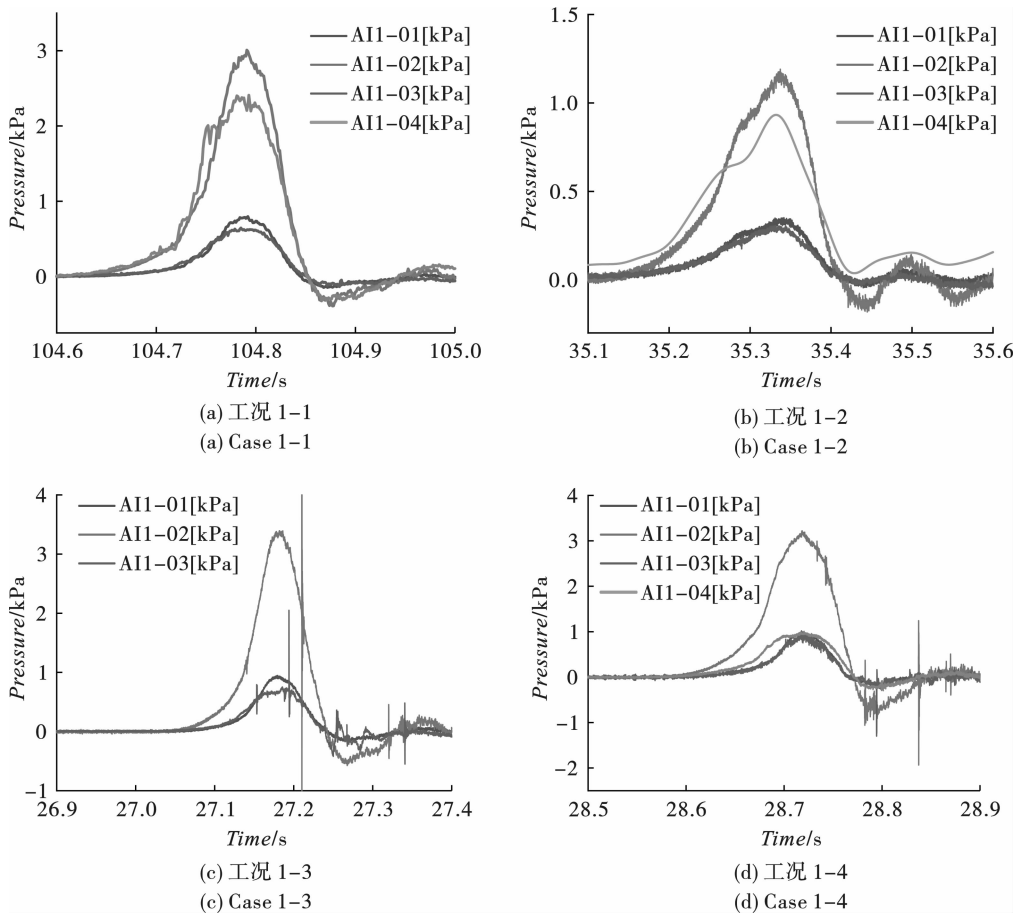


图 8  $1\text{ m}^3$  甲烷爆炸荷载时程曲线

Fig. 8 Time history curve of  $1\text{ m}^3$  methane explosion load

从测得的超压时程曲线上看, 储柜内部荷载并非均匀分布, 工况 1-1 和工况 1-2 中, 测点 1 和测点 3

测得的超压相同, 测点 2 和测点 4 测得超压峰值比测点 1 和测点 3 高, 工况 1-3 未测到测点 4 的超压,

工况 1-4 ~ 工况 4 的测点 1、3、4 的超压均相同,测点 2 比其它几个测点的超压均高。

在所开展的 9 组试验工况中,工况 1-1 和工况 1-2 使用的薄膜较厚,爆炸时立方体上面和侧面薄膜打开,其他几个面未打开,为使其他几个面的薄膜同时打开,从工况 1-3 之后都更换为较薄的塑料膜,根据表 2 及图 12 的超压数据可以看出,并非是燃气体积越大,超压峰值越大,而是随着燃气体积的增大,超压峰值在一定范围波动,测点 1、测点 3 及测点 4 测得的超压较为接近,超压峰值在 0.92 ~ 1.18 kPa 内,峰值不高且变化幅度小,测点 2 测得的超压比其他测点大,但未超过 4.0 kPa,超压峰值总体在 1.0 ~ 4.0 kPa 之间。产生该种规律的原因在于储柜的泄爆面积较大,泄放系数达到 4.56 ( $K_p = V^{2/3}/A_p$ ,式中: $V$ 为爆室体积; $A_p$ 为泄爆面积),无论柜子内部燃气体积大小,内部的超压能够有效且及

时泄放至柜子外部,因此超压峰值总体不高,且不随燃气体积的增大而增大。

表 2 甲烷爆炸试验荷载结果汇总表

Table 2 Summary of methane explosion test load results

| 工况  | 燃气<br>体积/m <sup>3</sup> | 超压峰值/kPa |      |      |      |
|-----|-------------------------|----------|------|------|------|
|     |                         | 1        | 2    | 3    | 4    |
| 1-1 | 1                       | 0.78     | 3.00 | 0.63 | 2.36 |
| 1-2 |                         | 0.33     | 1.17 | 0.29 | 0.94 |
| 1-3 |                         | 0.92     | 3.38 | 0.73 | /    |
| 1-4 |                         | 0.89     | 3.19 | 0.89 | 1.00 |
| 2-1 | 8                       | 0.97     | 3.53 | 0.98 | 1.18 |
| 2-2 |                         | 0.63     | 2.22 | 0.61 | 0.76 |
| 3-1 | 27                      | 0.66     | 2.24 | 0.60 | 0.73 |
| 3-2 |                         | 0.46     | 1.44 | 0.44 | 0.51 |
| 4   | 78                      | 0.80     | 2.18 | 0.55 | 0.74 |

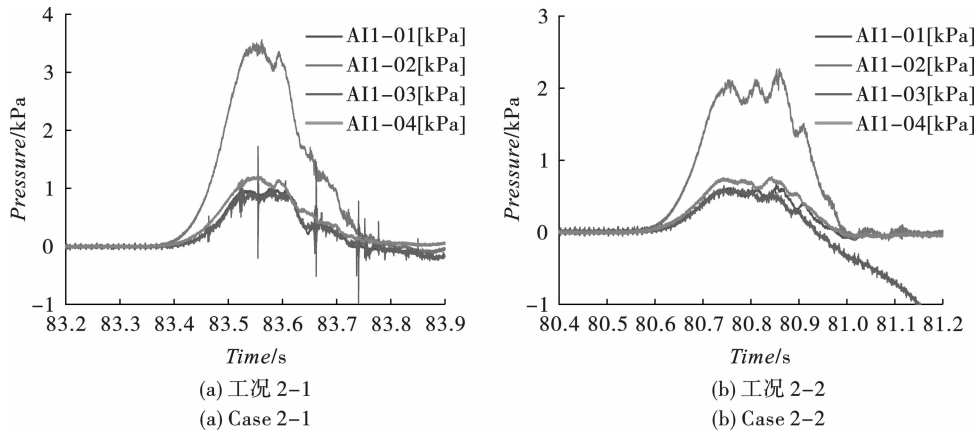


图 9 8 m<sup>3</sup> 甲烷爆炸荷载时程曲线

Fig. 9 Time history curve of 8 m<sup>3</sup> methane explosion load

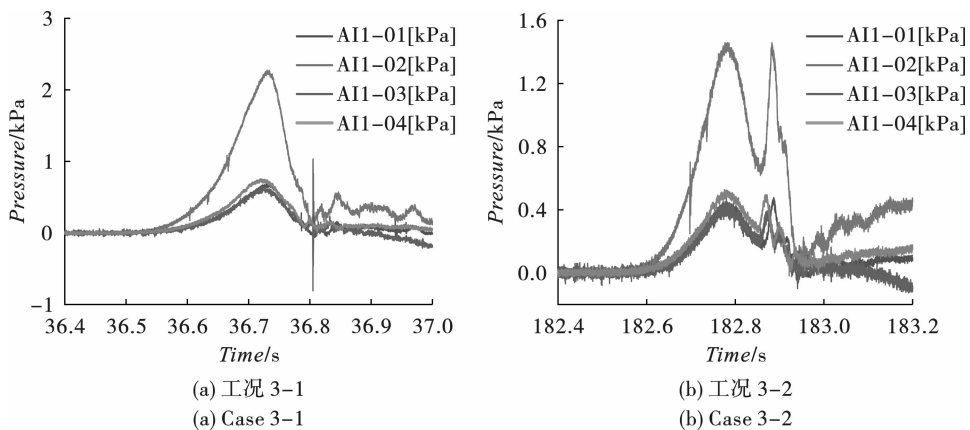


图 10 27 m<sup>3</sup> 甲烷爆炸荷载时程曲线

Fig. 10 Time history curve of 27 m<sup>3</sup> methane explosion load

本试验测得超压时程曲线中工况 1-1 ~ 工况 3-1 的超压时程曲线均只有一个峰值,工况 3-2 存在两个峰值,工况 4 存在 4 个峰值,且所有工况中均未

出现声震现象,相较于文献中的泄爆试验<sup>[5,6]</sup>,本试验测得的超压数据较小,表明本研究中危险品储柜的泄爆面积设计得较为合理,能够有效将柜体内

部压力释放。从危险品储柜爆炸结果来看,柜体结构并未出现明显损伤,说明了危险品储柜能够满足抗燃气内爆要求。

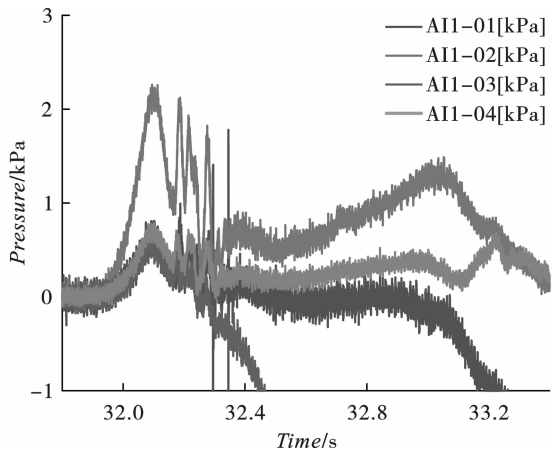


图 11 78 m³ 甲烷爆炸荷载时程曲线  
Fig. 11 Time history curve of 78 m³ methane explosion load

### 2.3 结构响应试验结果

图 13 ~ 图 16 分别为 1 m³、8 m³、27 m³ 和 78 m³ 甲烷爆炸下危险品储柜结构位移时程曲线图,将数据汇总于表 3。从表 3 位移数据可以看出,前门位

移总体比侧板及背板均大,前门位移总体在 6.0 ~ 18.0 mm 范围内,工况 1-2 的位移稍小,在 3.62 ~ 6.09 mm 之间,最大位移出现在工况 1-1 的 7 号测点,位移值为 17.81 mm。随着燃气体积的增大,位移值呈减小的趋势,与荷载变化规律相同。所有工况中柜体的位移均处于弹性阶段,未发生塑性变形,从柜子的爆炸图像也可看出危险品储柜并未出现大变形及损伤。

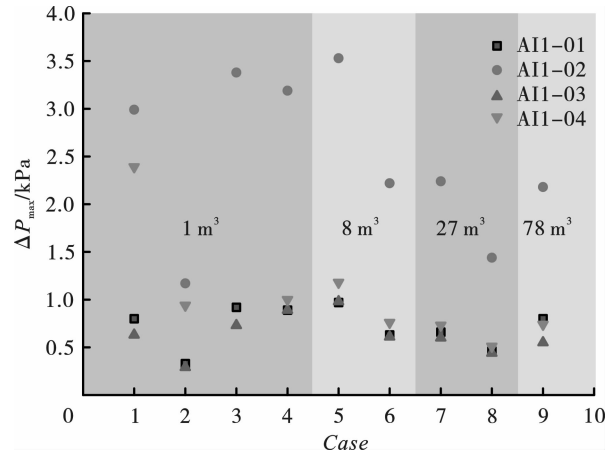
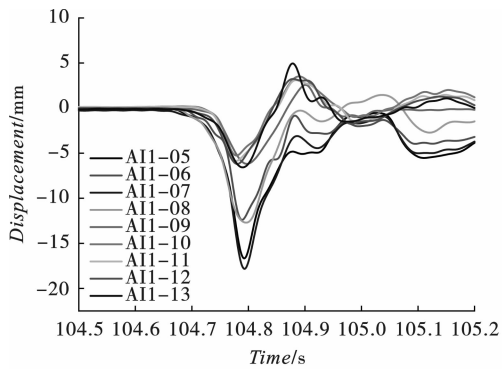
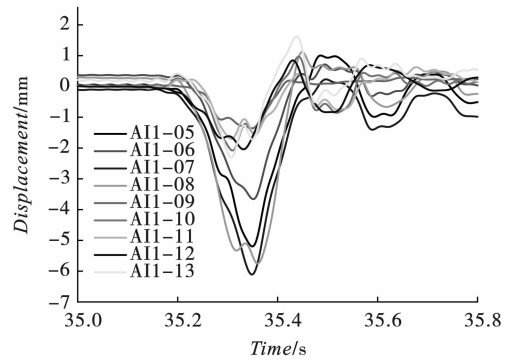


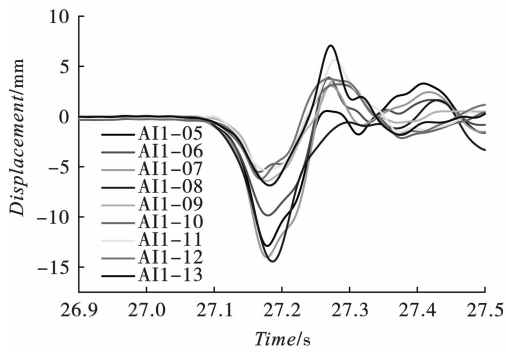
图 12 燃气爆炸荷载峰值分布统计图  
Fig. 12 Statistical chart of peak distribution of gas explosion load



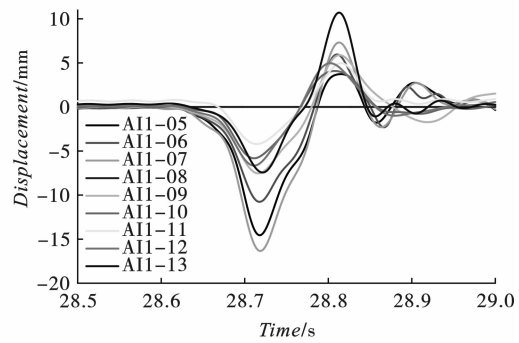
(a) 工况 2-1  
(a) Case 2-1



(b) 工况 2-2  
(b) Case 2-2



(a) 工况 3-1  
(a) Case 3-1



(b) 工况 3-2  
(b) Case 3-2

图 13 1 m³ 甲烷爆炸对应的结构位移时程曲线

Fig. 13 Time history curve of structural displacement corresponding to 1 m³ methane explosion

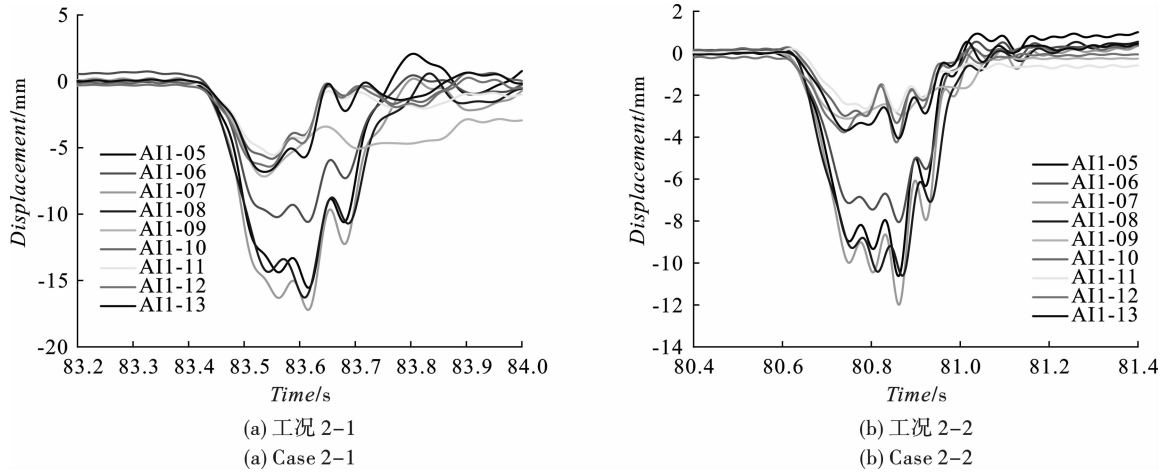


图 14 8 m³ 甲烷爆炸对应的结构位移时程曲线

Fig. 14 Time history curve of structural displacement corresponding to 8 m³ methane explosion

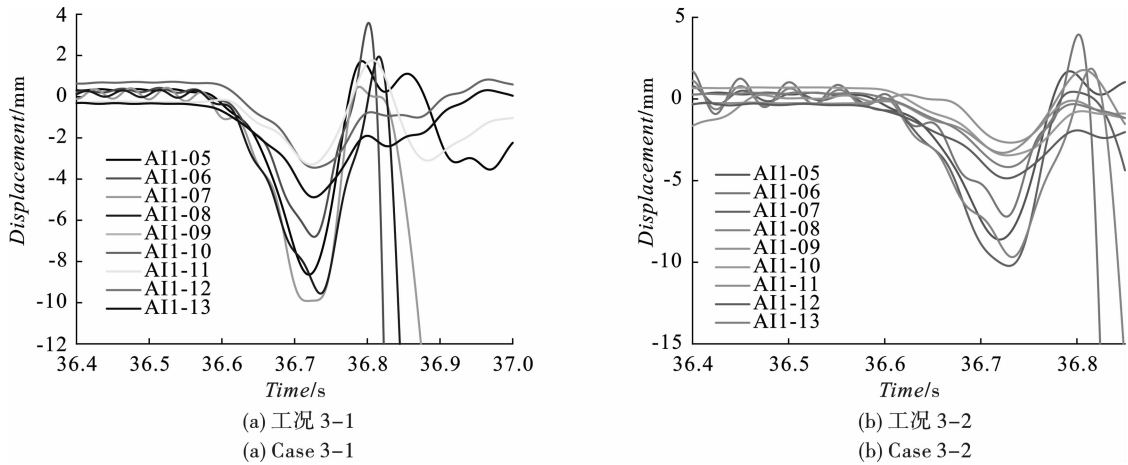


图 15 27 m³ 甲烷爆炸对应的结构位移时程曲线

Fig. 15 Time history curve of structural displacement corresponding to 27 m³ methane explosion

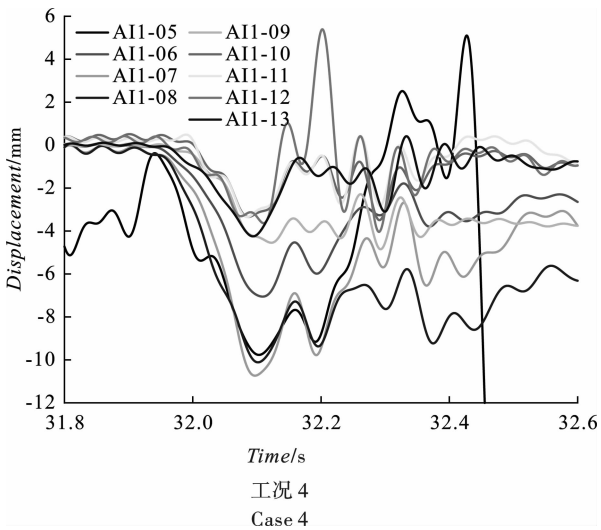


图 16 78 m³ 甲烷爆炸对应的结构位移时程曲线

Fig. 16 Time history curve of structural displacement corresponding to 78 m³ methane explosion

### 3 结论

为研究钢结构危险品储柜在气体爆炸荷载作用下的动力响应,本次试验以甲烷与空气混合气云作为气体爆炸源,设计了试验方案,开展了原型尺寸危险品储柜结构可燃气体内爆炸试验,得到的主要结论如下:

(1) 试验得到了危险品储柜可燃气体内爆炸作用下典型超压及位移时程曲线。试验结果表明:储柜结构位移响应与荷载响应保持同步,即超压荷载在增大的同时,储柜壁板位移也在增加,二者达到峰值的时间几乎也是相同的。

(2) 根据超压试验和结构响应试验结果,试验测得的超压荷载峰值并不满足燃气体积越大,超压峰值越大的规律,而是所有  $\Delta P_{max}$  均接近某一特定值,即9组试验工况所测得的最大超压峰值  $\Delta P_{max}$  的

平均值 2.48 kPa,上下浮动不超过 1.5 kPa。产生该种规律的原因可归结于储柜有足够大的泄爆面积,内部的超压能够有效且及时泄放至柜子外部。

表3 位移试验数据汇总

Table 3 Summary of displacement test data

| 工况  | 燃气<br>体积/m <sup>3</sup> | 位移峰值/mm |       |       |       |      |      |      |       |      |
|-----|-------------------------|---------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|
|     |                         | 5       | 6     | 7     | 8     | 9    | 10   | 11   | 12    | 13   |
| 1-1 | 1                       | 16.64   | 12.31 | 17.81 | 12.74 | 6.11 | 5.21 | 5.84 | 12.42 | 6.55 |
| 1-2 |                         | 5.18    | 3.62  | 6.09  | 5.73  | 1.32 | 2.03 | 1.67 | 2.02  | 2.25 |
| 1-3 |                         | 12.88   | 9.77  | 14.00 | 14.36 | 6.37 | 5.48 | 5.34 | 6.22  | 6.86 |
| 1-4 |                         | 14.55   | 10.71 | 16.23 | /     | 7.58 | 5.83 | 4.22 | 6.50  | 7.46 |
| 2-1 | 8                       | 15.49   | 10.66 | 17.17 | 16.29 | 7.10 | 5.74 | 5.62 | 6.38  | 6.78 |
| 2-2 |                         | 10.54   | 8.01  | 11.96 | 10.59 | 3.13 | 3.31 | 2.80 | 4.22  | 4.01 |
| 3-1 | 27                      | 8.64    | 6.82  | 9.96  | 9.53  | /    | 3.48 | 3.30 | /     | 4.85 |
| 3-2 |                         | 8.60    | 7.17  | 10.28 | 9.65  | 2.67 | 3.46 | 3.24 | 4.83  | 4.10 |
| 4   | 78                      | 9.77    | 7.10  | 10.76 | 10.11 | 4.80 | 3.30 | 3.52 | 4.03  | 4.21 |

## 参考文献 (References)

- [1] MILLS C A. The design of concrete structures to resist explosions and weapon effects [C] // Proceedings of the 1st International Conference on Concrete of Hazard Protection, 1987; 61-73.
- [2] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [2] ZHAO Heng-yang. Principle of gas and dust explosion [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [3] W Bartknecht. Explosion course prevention protection [M]. Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- [4] 王志荣, 蒋军成. 受限空间工业气体爆炸研究进展 [J]. 工业安全与环保, 2005, 31(3): 43-46.
- [4] WANG Zhi-rong, JIANG Jun-cheng. The research development on industrial gas explosion in confined space [J]. Industrial Safety and Dust Control, 2005, 31(3): 43-46. (in Chinese)
- [5] BAO Q, FANG Q, YANG S, et al. Experimental investigation on the deflagration load under unconfined methane-air explosions [J]. Fuel, 2016, 185: 565-576.
- [6] WOOLLEY R M, FAIRWEATHER M, FALLE SAEG, et al. Prediction of confined, vented methane-hydrogen explosions using a computational fluid dynamic approach [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(16): 6904-6914.
- [7] 石立旺. 内爆炸作用下抗爆间动力响应及防护措施研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] SHI Li-wang. Research on dynamic response and protective measures of anti explosion room under internal explosion effect [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] 于志华. 爆炸冲击作用下球形储液罐动力响应分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] YU Zhi-hua. Dynamic response analysis of spherical liquid storage tanks under explosive impact [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] 王震, 胡可, 赵阳. 拱顶钢储罐内部蒸气云爆炸冲击荷载的数值模拟 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(20): 35-40.
- [9] WANG Zhen, HU Ke, ZHAO Yang. Numerical simulation for internal vapor cloud explosion loading in dome-roof steel tanks [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(20): 35-40. (in Chinese)
- [10] 胡可, 王震, 赵阳. 耦合效应对钢储罐内部爆炸冲击荷载的影响 [C] // 第十四届空间结构学术会议论文集, 2012: 506-511.
- [10] HU Ke, WANG Zhen, ZHAO Yang. The influence of coupling effect on the internal explosion impact load of steel storage tanks [C] // Proceedings of the 14th Academic Conference on Space Structures, 2012: 506-511. (in Chinese)