

# 可燃气体爆炸泄压过程中声动不稳定 燃烧压力峰减弱方法的研究

王宝兴 李振彦

(公安部天津消防科学研究所)

**摘要** 本文介绍了爆炸减压板的减压性能和减压功能对比试验,指出爆炸减压板是防止建筑物在可燃气体泄放爆炸中破坏的重要措施。

**关键词** 爆炸泄压 安全设备 爆炸减压板

## 一、前言

爆炸泄压的防护方法用于建筑物防爆已有多年历史了,但是近年来,一些爆炸案例表明,尽管按规范<sup>[1][2]</sup>设置了泄压面积,可是某些爆炸的损失仍是很严重,造成了建筑物主结构的破坏。文献[3]、[4]、[5]、[6]指出,在爆炸泄压后期出现的声动不稳定燃烧压力峰( $p_3$ )是造成建筑物恶性破坏的主要因素,并详尽地研究了各种参数对 $p_3$ 的影响,对 $p_3$ 的生成机理作了初步合理的解释。

既然建筑物内声动不稳定燃烧压力振荡(或 $p_3$ )是造成建筑物破坏的主要因素,如果消除了 $p_3$ ,则爆炸泄压的防护效果将更令人满意。因此,研究消除或减弱 $p_3$ 的措施就成为当今世界上防爆研究的一个重要课题<sup>[7]</sup>。

C.J.M. Vanwingerden<sup>[3]</sup>于1983年在5.2m<sup>3</sup>试验容器的内壁上衬以50mm厚的玻璃棉,成功地消除了 $p_3$ ,但是未看到在大的试验装置内试验成功的报导。

## 二、消除声动不稳定燃烧压力峰 $p_3$ 的基本原理

文献[6]阐述了 $p_3$ 的产生机理。概括地可由图1说明。可燃混气在有平行壁面的建筑物(或容器)内经火花点燃后开始泄压。点燃产生的声学振荡在两个平行的刚性壁面之间产生驻波;于是可燃气质点以驻波方式作纵向振动。可燃气团在纵向振动的密状态下,燃烧加速,促使局部压力增高;在疏状态下,燃烧减慢,吸热,使局部压力峰下降得更低,引起振荡燃烧。振荡燃烧又进一步加剧了压力振荡。然后压力振荡又进一步加剧了可燃混气团的纵向迁移振动,也即产生了一个正反馈,引起回路发散,燃烧转变为不稳定燃烧,振荡的压力振幅急剧增加,使残余的可燃气烧完为止。这个过程产生了 $p_3$ (见文献[6])。如果消除了点火后产生的可燃混气的声振驻波,整个放大回路就中断,于是既产生不了不稳定燃烧,也消除了压力振荡,从而消除了 $p_3$ 。这就是消除声动不稳定燃烧压力峰 $p_3$ 的基本原理。

1988年6月15日收到原稿,9月27日收到修改稿。

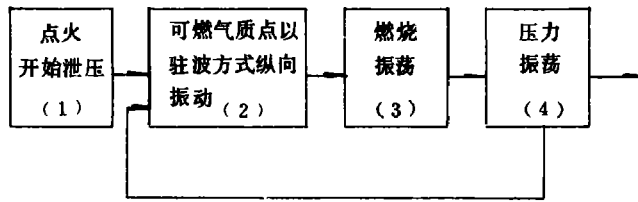


图 1 壁面附近可燃气质点纵向振动导致压力振荡建立的正反馈所引起的燃烧振荡加速方块图

Fig. 1 The pressure oscillation amplification loop of gas-air mixture near the vessel wall resulted by standing acoustic wave

(1) Ignition, (2) The particle of the gas-air mixture oscillated longitudinally as a standing acoustic wave, (3) Combustion, oscillation (4) Pressure, oscillation

### 三、“爆炸减压板”是一种消除（或减弱） $p_3$ 的有效方法

本研究通过对声动不稳定燃烧的试验研究与机理探讨，研制出一种“爆炸减压板”并将这种板以特定方式衬于建筑物内壁上，有效地消除甲烷气、天然气、丙烷气以及液化石油气一类的可燃气体；在爆炸泄压过程中，产生的强烈声动不稳定燃烧压力振荡和压力峰（ $p_3$ ）的方法。“爆炸减压板”是一种难燃的（氧指数大于35）或者不燃材料板。表面有特殊的形状（见图 2），它被贴于墙的内壁上，将改变原来声振的边界条件。声振的前进波遇到“爆炸减压板”后，不能产生周期反转，前进波与反射波不能相互干涉产生驻波，消除了产生  $p_3$  的“动力”，于是消除了（或者减弱了） $p_3$ 。

图3给出“爆炸减压板”消除  $p_3$  的效应的对比试验。表 1 给出了对比试验的有关数据。对比试验表明，装了“爆炸减压板”， $p_3$  从最大值 101 kPa 减低到 4 kPa；火焰从明亮减到红

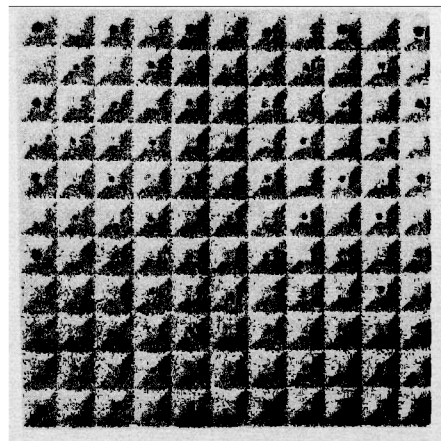


图 2 爆炸减压板

Fig. 2 Explosion pressure-reducing board

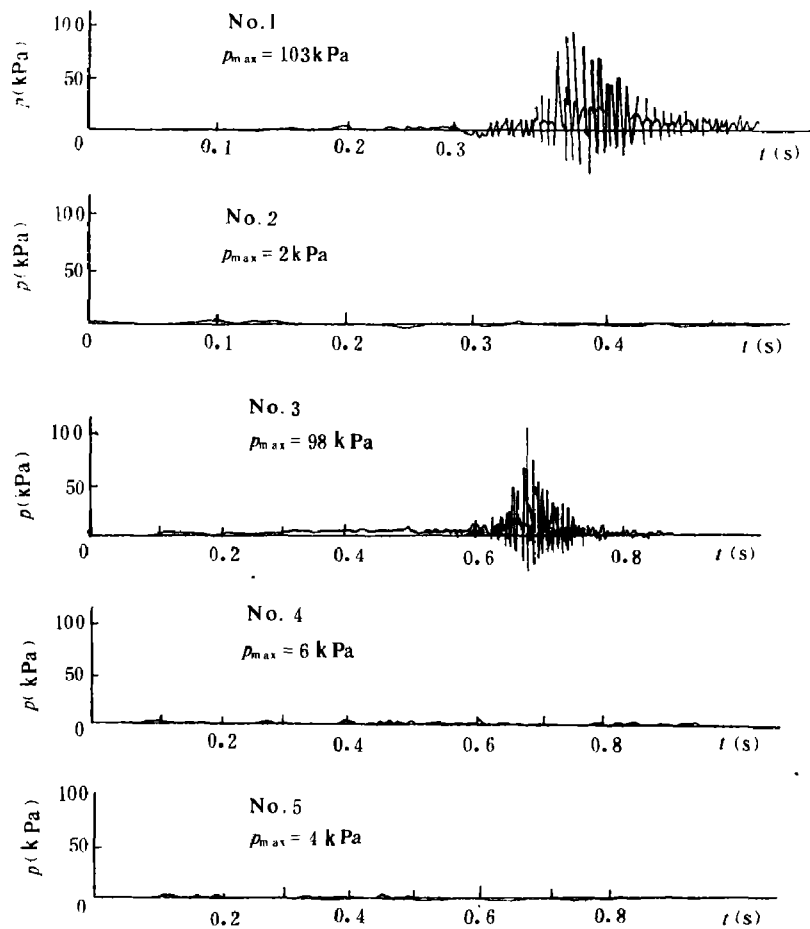


图 3 “爆炸减压板”减压效果对比试验

No. 1 : 1.0 m<sup>3</sup> 爆炸容器; 5.1% LPG-空气;

No. 2 : 装有“爆炸减压板”的1.0 m<sup>3</sup>爆炸容器; 5.1% LPG-空气;

No. 3 : 30.0 m<sup>3</sup>爆炸容器; 4.2% LPG-空气;

No. 4 : 装有“爆炸减压板”的30.0 m<sup>3</sup>爆炸容器, 4.3% LPG-空气;

No. 5 : 装有“爆炸减压板”的30.0 m<sup>3</sup>爆炸容器; 4.1% LPG-空气混合后, 用31 cm排气扇搅拌, 直到点火停止。

Fig 3 The pressure reducing effect of "explosion pressure reducing board"

No.1 : 1.0 m<sup>3</sup> explosion vessel; 5.1% LPG-air

No. 2 : 1.0 m<sup>3</sup> explosion vessel with "explosion pressure reducing board"; 5.1% LPG-air

No. 3 : 30.0 m<sup>3</sup> explosion vessel; 4.2% LPG-air

No. 4 : 30.0 m<sup>3</sup> explosion vessel with "explosion pressure reducing board"; 4.3% LPG-air

No. 5 : 30.0 m<sup>3</sup> explosion vessel with "explosion pressure reducing board"; 4.1% LPG-air mixed and disturbed by 31 cm fan until ignition.

表 1 “爆炸减压板”减压性能的对比试验

Table 1 Results of comparison test of the pressure reducing effect of explosion pressure-reducing board

试验编号(No)	试验容器容积(m <sup>3</sup> )	泄压口封盖的材料	$A/V^{2/3}$	$p_3$ (kPa)	体积浓度(%)	“爆炸减压板”设置状况	备注
1	1	0.05 mm 塑料薄膜	0.264	101.0	5.1	无	声音啸叫，火焰明亮
2	1	同上	0.264	2.0	5.1	左、右、后、底四个内表面衬“爆炸减压板”	声音低闷
3	30	同上	0.326	98.0	4.2	无	声音啸叫，振荡时火焰明亮
4	30	同上	0.326	4.0	4.3	左、右、后、顶四面衬“爆炸减压板”。	声音闷。 $p_3 = 6$ kPa 是最大的压力
5	30	3 mm 厚的平板玻璃	0.472	4.0	4.1	同上	从充液化石油气开始，用两台 300 毫米排气扇搅拌、直到点火前停转。爆炸后有一块半玻璃完好

注：[ 1 ] 试验用的可燃气体为液化石油气。

[ 2 ]  $A$  代表泄压口面积， $V$  代表试验容器的容积， $A/V^{2/3}$  为比例泄放比。

暗；爆炸响声从啸叫变为低沉，基本上消除了  $p_3$ 。爆炸减压板是一种消除  $p_3$  的有效方法。

#### 四、“爆炸减压板”的减压功能试验

为了全面考核“爆炸减压板”的减低声动不稳定燃烧压力峰  $p_3$  的功能，做了以下考核试验。

##### 1. 各种可燃气体浓度下的“爆炸减压板”的减压效果

在 1 m<sup>3</sup> 试验容器内，以内右壁面、左壁面、后壁面和顶面贴爆炸减压板的方式，在不同液化石油气浓度进行了一系列爆炸泄压试验。表 2 给出了试验结果。结果表明，在包括最危险浓度的各种浓度下，爆炸减压板将  $p_3$  减弱得很低，几乎完全消除了  $p_3$ 。

表 2 “爆炸减压板”对不同的液化石油气浓度爆炸的减压效果

Table 2 Explosion pressure reducing effect of explosion pressure reducing board for vented explosion with different LPG concentration

试验编号	体积浓度(%)	$p_3$ (kPa)	泄压口封盖物	减压板敷设情况	备注
1	5.9	≤ 2	3 mm 厚平板玻璃	左、右、后及底四面敷设“爆炸减压板”	声音低闷
2	5.4	≤ 2	同上	同上	同上
3	4.85	≤ 2	同上	同上	同上
4	4.3	≤ 2	同上	同上	同上

( $A/V^{2/3} = 0.264$ , 液化石油气)

## 2. “爆炸减压板”在不同的比例泄压面积下的减压效果

在  $1\text{ m}^3$  试验容器内,用接近危险浓度的液化石油气,分别在四种不同的比例泄压面积下进行了爆炸泄压试验,结果汇于表 3。典型的压力-时间曲线与图 3 试验 2 相似。

从表 3 的试验数据表明:比例泄压面积小到 0.264 的各种情况下,爆炸减压板均成功地将  $p_3$  减低到  $2 \sim 3\text{ kPa}$ 。

表 3 “爆炸减压板”在不同的比例泄压面积下的减压效果  
Table 3 Explosion pressure reducing effect of explosion pressure reducing board for vented explosion with different scale vent ratio

试 验 编 号	体 积 浓 度 (%)	$A/V_0^{2/3}$	泄 压 口 封 盖 物	$p_3$ (kPa)	减 压 板 敷 设 情 况	备 注
1	5.4	0.264	3 mm 平板玻璃	$\leq 3$	左、右、后及底四面敷设“爆炸减压板”	声音低闷
2	5.4	0.404	同上	$\leq 3$	同上	同上
3	5.4	0.545	同上	$\leq 3$	同上	同上
4	5.4	0.821	同上	$\leq 3$	同上	同上

## 3. “爆炸减压板”对不同的可燃气体的减压效果

文献 [8] 指出:可燃气体与空气的混气的爆炸指数  $K_{max}$  表征其爆炸烈度。甲烷气的  $K_{max}$  约为  $5400\text{ [kPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ ,丙烷气的  $K_{max}$  约为  $7350\text{ [kPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ ,而液化石油气依生产厂家的不同,成分有所不同, $K_{max}$  值约为  $9000 \sim 10000\text{ [kPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ 。文献 [5] 指出,液化石油气-空气混气产生的  $p_3$  最大。

本研究做了甲烷气、液化石油气两种可燃气体的爆炸减压板的减压试验。试验结果表明:爆炸减压板对甲烷气的爆炸泄压过程的减压效果最好,对液化石油气爆炸泄压过程的减压效果也很理想。可以这样说,对  $K_{max}$  值小于液化石油气的可燃气体(氢气、乙炔、乙烯除外的可燃气和可燃蒸气),爆炸减压板的减压效果均很好,都能将最大爆炸压力减低到  $8\text{ kPa}$  之下。

## 4. 不同容积情况下,爆炸减压板的减压效果

除了在  $1\text{ m}^3$  试验容器内作了一系列爆炸减压板的减压效果试验外,在  $30\text{ m}^3$  试验装置内也作了多次试验。例如,表 1 中的试验 4、试验 5 均为在  $30\text{ m}^3$  试验装置内进行的(试验的  $p-t$  曲线见图 3 的试验 4、试验 5)。试验结果表明,在  $30\text{ m}^3$  及  $1\text{ m}^3$  容积的容器中,爆炸减压板的减压效果均很好,能够将最高爆炸压力减低到  $8\text{ kPa}$  之下。

## 5. 使用不同的泄压口封盖物情况下的爆炸减压板的减压效果

共试验了两种泄压口封盖物——塑料薄膜和  $3\text{ mm}$  平板玻璃。表 1 中的试验 2 和试验 4 分别为  $1\text{ m}^3$  试验容器和  $30\text{ m}^3$  试验容器使用塑料薄膜封盖泄压口情况,表 1 中的试验 5,表 2、表 3 中的全部试验均为  $3\text{ mm}$  平板玻璃封盖泄压口情况。试验结果表明,两种材料封盖泄压口情况下,爆炸减压板的减压效果均很好,均能将  $p_3$  减低到  $8\text{ kPa}$  之下。

## 6. 建筑物内有陈设物情况下,爆炸减压板的减压效果

一般情况下,建筑物内是有设备和陈设物的。为了考核这种实际情况下,爆炸减压板的减压效果,做了一次模拟试验。在  $30\text{ m}^3$  试验装置内放置一个旧板车架、一个油桶、几块木板,

以阻碍可燃混气向外流动的方式置放。用4.6%液化石油气-空气混气,几何中心点火。试验容器的左、右、顶、后四壁面敷设爆炸减压板,比例泄压面积 $A/V^{2/3}=0.326$ ,3mm平板玻璃封闭了泄压口。结果 $p_1 \approx 5 \text{ kPa}$ , $p_2 \approx 7 \text{ kPa}$ , $p_3 \approx 4 \text{ kPa}$ ( $p_1$ , $p_2$ , $p_3$ 的定义参看文献[3],分别为泄压口盖开启压力,火焰前峰传播到泄压口时的压力以及声动不稳定燃烧压力峰)。也即由于有陈设物阻碍了可燃气体与燃烧产物向外泄放,紊流度加大,使 $p_2$ 上升,但是最大压力仍然小于8 kPa。

#### 7. 室内通风(有初始紊流度)情况下,爆炸减压板的减压效果

室内通风,则会增加初始紊流度,增加爆炸的烈度。为了考核爆炸减压板在这种情况下减压效果,在 $30 \text{ m}^3$ 试验装置的底面上装两台30cm排风扇。扇叶朝上,分别对着顶部两个可燃气体进气口吹,从开始充气一直吹到充气结束。排气扇停转半分钟之内点火。试验数据列于表1(试验5), $p-t$ 曲线见图3的试验5。 $p_3$ 已减小到4 kPa。这表明有初始紊流度的情况下,爆炸减压板仍有很好的减压效果。

值得指出的是,爆炸后仍有一块半玻璃未碎。这说明爆炸压力已减低到足够低的程度,不足以使它破坏。由此推论,墙体更是安全的。

#### 8. 爆炸减压板装设面积对减压效果的影响

上述试验均采用左、右、顶(或底)、后四个内表面敷设爆炸减压板的方式。这是试验确定的最有效的方式。如果左、右两平行平面中有一个平面不装爆炸减压板,减压效果差一些,但 $p_3$ 仍可减低到11 kPa之内。

## 五、结 束 语

综上所述,概括如下:

1. 减弱或消除建筑物内可燃气体爆炸压力的措施的研究是实用的,也是当今国际上爆炸泄压研究的方向。

2. 经各种工况下的考核试验证实,本研究发展的“爆炸减压板”和将它贴于建筑物的内壁,减低建筑物内发生的甲烷气、丙烷气和液化石油气的爆炸压力的方法是有效的,能够将 $p_3$ 由最大值98 kPa减低到8 kPa之内。

3. 在下述三种情况下,爆炸减压板具有重大的实用意义:

①具有甲烷气、天然气、丙烷气和液化石油气一类的可燃气体爆炸危险性的建筑物,位于人口密度大的区域,建筑物外有行人,工作人员;附近有厂房、居民住房,爆炸会引起人员伤亡、房屋破坏等严重后果的情况。

②建筑物本身不符合“建筑设计防火规范”要求,不是钢架结构,建筑物本身强度低,强烈爆炸会引起砖石满天飞的恶劣后果的情况。

③一些放有贵重仪器的操纵间、或者建筑物内有可燃气体、液体的容器、管道(如油田、油库和化工厂的油泵房、气泵房),剧烈的爆炸将造成贵重仪器的损坏,容器与管道的破裂,将进一步引起可燃物的泄漏,造成危害区域成几倍扩大的二次爆炸情况。

4. 本研究的成功,对于液化石油气一类可燃气体来说,克服了爆炸泄压“不能提供足够的泄压面积来防止建筑物中最佳混合物的爆炸带来的严重损失”的缺点,使爆炸泄压防护技术上升到一个新的水平,也即,当泄压面积符合“建筑设计防火规范”的规定时,建筑物内

壁装置了爆炸减压板, 将保证任何可燃气体浓度下发生的爆炸都不会造成建筑物主结构的损坏。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] National Fire Protection Association, Guide For Explosion Venting, NFPA 68 (1983).
- [ 2 ] 公安部, 建筑设计防火规范, T16-74.
- [ 3 ] Vanwingerden, C.J.M., Zeeven, J.P., *Combustion and Flame* 51 (1983), 109.
- [ 4 ] 王宝兴, 裴惠芬等, 力学与实践, 9 (5) (1987), 13.
- [ 5 ] 王宝兴, 杜兰平等, 爆炸与冲击, 8 (1) (1988), 37.
- [ 6 ] 王宝兴, 声动不稳定燃烧压力峰 $p_0$ 的产生机理和实验验证, 中国工程热物理学会, 燃烧学学术会议 (1986), 9.
- [ 7 ] Yao, C., Fuel-Air Explosions, University of Waterloo Press (1982), 987.
- [ 8 ] International Organization for Standardization, ISO 6181/2, Explosion Protection Systems-Part 2: Determination of explosion indices of combustible gases in air.

## ON THE ELIMINATION MEASURES OF PRESSURE PEAK DRIVEN BY ACOUSTICALLY UNSTABLE COMBUSTION IN VENTED GAS EXPLOSIONS

Wang Baoxing, Li Zhenyan

(Tianjin Fire Control Research Institute)

**ABSTRACT** This paper describes the elimination measure of pressure peak driven by acoustically instable combustion in vented gas explosion by means of explosion pressure reducing board. The explosion pressure reducing board is a kind of effective product which can reduce the explosion pressure inside the building. It is made of flame-proof or non-combustible materials, has a special style surface and can be adhered on the inner walls and ceilings of any building. More than one hundred tests have been performed in 1.0m<sup>3</sup> and 30.0m<sup>3</sup> explosion vessel. These tests consider variable parameters that can influence explosion pressure peak, such as gas concentration, scale vent ratio, matter of vent cover and initial turbulence.

It has been proved by these tests that the explosion pressure of combustible gas or flammable vapours such as LPG in any concentration which produced in building during the vented explosion can be reduced from the maximum 100KPa to 8KPa by explosion pressure reducing board. Apparently, this measure, the explosion pressure reducing board, can prevent the main building structure to damage from combustible gas explosion and greatly reduce the losses of people and property during explosion to a minimum level.

**KEY WORDS** explosion venting, safety devices, explosion pressure-reducing board.