

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.06.007

# 泄压与隔爆联用的粉尘爆炸压力特性<sup>\*</sup>

赵京宇<sup>①</sup> 饶国宁<sup>①</sup> 周 健<sup>②</sup> 马 盼<sup>②</sup> 肖秋平<sup>②</sup>

①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

②上海化工研究院有限公司(上海,200062)

[摘 要] 作为目前市场上运用最广泛的隔爆产品,隔爆翻板阀一般与泄压板联用,以防止粉尘爆炸传播。为了探究粉尘爆炸时泄压与隔爆联用对容器内压力及隔爆效果的影响,进行了工业规模的粉尘爆炸实验。实验结果表明:由于隔爆翻板阀的影响,容器内部出现了二次峰值压力;随着隔爆翻板阀安装距离的增加,容器内两个峰值压力的时间间隔从 28.2 ms 增加到 62.3 ms,且到达隔爆翻板阀前的峰值压力从 0.067 MPa 上升至 0.101 MPa;泄压面积的增大会导致容器内部和隔爆翻板阀前端峰值压力降低,并可能导致隔爆失败。

[关键词] 粉尘爆炸;泄压;隔爆;隔爆翻板阀;最大爆炸超压

[分类号] O389

## Pressure Characteristics of Dust Explosion in Combination of Pressure Relief and Explosion Isolation

ZHAO Jingyu<sup>①</sup>, RAO Guoning<sup>①</sup>, ZHOU Jian<sup>②</sup>, MA Pan<sup>②</sup>, XIAO Qiuping<sup>②</sup>

①School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Shanghai Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd. (Shanghai, 200062)

[ABSTRACT] As the most widely used explosion isolation product on the market, explosion isolation flap valves are generally used in conjunction with explosion venting plates to prevent the dust explosion propagation. In order to explore influence of the combined use of pressure relief and explosion isolation on pressure in the container and effect of explosion isolation, an industrial scale dust explosion experiment was carried out. The experimental results show that, due to the influence of explosion isolation flap valve, the internal pressure of the container has a secondary peak. With the increase of installation distance of the explosion isolation flap valve, time interval between the two pressure peaks in the container increases from 28.2 ms to 62.3 ms, and the pressure peak at the front end of the explosion isolation flap valve increases from 0.067 MPa to 0.101 MPa. The increase of the explosion venting area will lead to the decrease of the pressure peak inside the container and at the front end of the flap valve, and it might also cause explosion isolation failure.

[KEYWORDS] dust explosion; pressure relief; explosion isolation; explosion isolation flap valve; maximum explosion overpressure

### 引言

由容器与管道相连通的气力输送系统和除尘系统广泛存在于各工艺系统中。在涉爆粉尘工艺中,仅对压力容器采取泄压措施,粉尘爆炸的火焰也可沿着管道传播,引起相连容器内发生二次爆炸<sup>[1]</sup>。

作为用来隔离爆炸的保护性装置,隔爆翻板阀能够有效阻断爆炸压力波和火焰,从而限制爆炸范围,减小爆炸损失<sup>[2]</sup>;因其结构简单、安装方便、价格相对低廉,故被大量应用于粉尘爆炸的防护中。

对于隔爆翻板阀的功能有效性验证、安装要求和影响研究已经开始受到重视。Mittal<sup>[3]</sup> 参照欧洲标准进行了隔爆实验和CFD(计算流体动力学)

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-07-19

基金项目:上海市科技人才计划项目(19QB1402800)

第一作者:赵京宇(1997-),男,硕士,主要从事粉尘爆炸的研究。E-mail: 504965237@qq.com

通信作者:肖秋平(1984-),男,博士,高级工程师,主要从事粉尘爆炸的研究。E-mail: xqp@ghs.com

仿真模拟实验,结果发现:由于隔爆翻板阀以及管道的存在,气流湍流的程度加大会增加相连容器内的爆炸压力。随后,Ajrash 等<sup>[4]</sup>在使用一定浓度的甲烷进行的爆燃实验中也有类似发现:由于被动管压式隔爆阀的结构运动,在关闭阶段,被动阀下游产生了压力波,非常接近原始压力波的大小。Boeck 等<sup>[5]</sup>建立了容器-管道连通系统的爆炸动力学模型,可得到压力波的大小和到达时间,从而为隔爆系统的有效性提供评估依据。

相关研究表明:容器相连的管道长度和容器泄压面积对内部压力有显著影响。王健等<sup>[6]</sup>在接近实际工况的气力输送实验装置中进行了粮食粉尘爆炸测试,结果表明:初级容器的爆炸将沿着管道传播,导致二级容器发生爆炸;且管道各点峰值压力随着管道长度的增加而增加。正是这种影响,英国标准学会发布的 EN 16447—2014 标准<sup>[7]</sup>对隔爆翻板阀的最大、最小安装距离提出了确切的实验测试要求。同时,容器的泄压面积是内部压力的主要影响因素之一,随着泄压面积的减小,连通容器的内部压力增加;且相较于单个容器泄压,其对于连通容器内部压力的影响更为明显。尤明伟等<sup>[8]</sup>认为,这是由于连通容器的爆炸受管道火焰加速和压力累积作用所导致的。这些实验研究为了解泄压过程中容器及管道内部压力提供了参考。

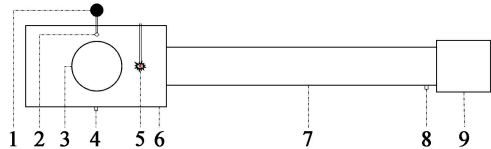
在当前工业防爆中,泄压与隔爆已经成为粉尘爆炸防护的主要手段。但是仅仅将两者简单加和无法应对实际需求,难以确保工艺的安全性。因此,开展泄压和隔爆防护联用下粉尘爆炸实验研究,对于揭示容器及隔爆翻板阀压力变化规律、指导隔爆翻板阀的安装、达到有效隔爆的目的具有重要意义。本文中,通过压力容器和管道的粉尘爆炸实验,改变隔爆翻板阀安装距离及容器泄压面积,探寻泄压和隔爆防护联用对于爆炸超压的影响规律。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要由实验容器、粉尘分散系统、点火系统、数据采集系统和隔爆翻板阀组成。实验容器为 2 m<sup>3</sup> 的圆柱形卧式耐压容器,且容器顶部有可随法兰内径调节泄压面积的泄压口,泄压采用 410 mm×410 mm 泄压片或双层聚酯薄膜。粉尘分散系统主要由喷粉罐和内部多孔分散装置组成,通过 19 mm 连接管安装于实验容器左侧中心位置。点火系统采用释放能量为 10 kJ 的化学点火

头,参照 EN 16447—2014 标准<sup>[7]</sup>中对于隔爆翻板阀功能的测试要求,将点火位置设置在容器中心轴线、距离管道入口 350 mm 处。实验容器右端通过法兰及 DN 500 的管道连接被动式隔爆翻板阀,隔爆翻板阀安装距离通过管道长度改变。数据采集系统主要由压力传感器(瑞士 Kistler)和数据采集器组成,压力传感器 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 分别安装在容器右侧中心和隔爆翻板阀前端 100 mm 处的管道右侧。



1 - 喷粉罐;2 - 多孔分散装置;3 - 泄压口;  
4 - 压力传感器 P<sub>1</sub>;5 - 点火头;6 - 实验容器;  
7 - DN 500 管道;8 - 压力传感器 P<sub>2</sub>;9 - 隔爆翻板阀。

图 1 实验装置示意图(俯视图)

Fig.1 Schematic diagram of experimental device (top view)

1.2 实验方法

实验开始前,打开隔爆翻板阀。依照 250 g/m<sup>3</sup> 质量浓度称取玉米淀粉 500 g 于喷粉罐,由电磁阀控制喷粉。喷粉延迟 420 ms 后,点火引爆,随后压力传感器采集容器内部及隔爆翻板阀前端压力信号。爆炸压力通过容器顶部泄压口释放。同时,火焰与冲击波沿管道传播到达隔爆翻板阀阀板后,使阀板关闭,达到隔爆效果。隔爆翻板阀相关参数见表 1;作用机制如图 2 所示。

表 1 隔爆翻板阀相关参数

Tab. 1 Related parameters of explosion isolation flap valve

适用粉尘爆炸等级	最大受控爆炸压力/MPa	正常运行阀板角度/(°)	最大安装距离/m	最小安装距离/m
St 1	0.2	40	7	3

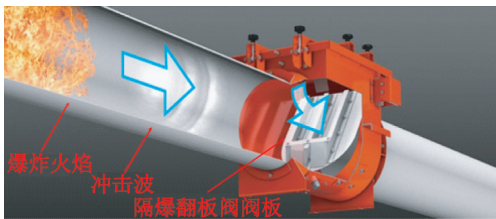


图 2 隔爆翻板阀作用机制示意图

Fig.2 Schematic diagram of mechanism of explosion isolation flap valve

开展两组实验,具体方案见表 2。实验 1<sup>#</sup>采用 304SS 材质、面积为 410 mm×410 mm 的泄压片进

表 2 各实验方案运行参数

Tab. 2 Operating parameters of each experimental program

组别	编号	容器体积/m <sup>3</sup>	隔爆翻板阀安装距离/m	泄压面尺寸	泄压面积/m <sup>2</sup>
1 <sup>#</sup>	A	2	3	410 mm × 410 mm	0.168
	B	2	5	410 mm × 410 mm	0.168
	C	2	7	410 mm × 410 mm	0.168
2 <sup>#</sup>	E	2	3	内径 400 mm	0.126
	F	2	3	内径 600 mm	0.283

行泄压,隔爆翻板阀安装距离分别为 3、5、7 m;实验 2<sup>#</sup>采用双层聚酯薄膜进行泄压,通过改变固定法兰口径达到改变泄压面积的目的,隔爆翻板阀安装距离固定为 3 m。

2 分析和讨论

2.1 隔爆翻板阀安装距离对压力的影响

隔爆翻板阀的安装距离直接影响着隔爆效果<sup>[7]</sup>。通过改变安装距离,研究容器内部及隔爆翻板阀前端的爆炸压力特性。

实验1<sup>#</sup>中,在不同的隔爆翻板阀安装距离下,容器内部压力和隔爆翻板阀前端压力随时间的变化曲线如图3所示。表3是两个测点的峰值压力数据。表3中: $p_v$ 为容器内部一次峰值压力; $p_r$ 为容器内部二次峰值压力; $p_f$ 为隔爆翻板阀前端峰值压力; $\Delta t_{0-1}$ 为 $p_f$ 与 $p_v$ 的时间差; $\Delta t_{0-2}$ 为 $p_r$ 与 $p_v$ 的时

间差。

从图3可以看出,不同隔爆翻板阀安装距离时,容器内部和隔爆翻板阀前端压力都呈现了相似的变化规律。点火引爆后,传感器  $P_1$  测得容器内部压力不断上升,达到泄压片开启压力 0.010 MPa 后,泄压片打开,压力开始下降,随后压力再次升高,但略低于一次峰值压力。同时,容器内部二次峰值压力的时间都明显滞后于隔爆翻板阀前端达到峰值压力的时间。分析认为,二次峰值压力可能来源于隔爆翻板阀关闭过程的冲击波反射作用,但由于管道内几乎没有可燃粉尘继续燃烧,加之壁面摩擦和吸热作用,反射波传播过程中能量不断降低<sup>[9-10]</sup>,因此,反射产生的二次峰值压力均低于隔爆翻板阀前端压力及容器内部的一次峰值压力。在容器内部两次峰值压力间,传感器  $P_2$  测得的隔爆翻板阀前端压力达到最大,且均大于容器内部最大压力;原因主要在于管道内壁的压力反射作用和湍流程度加大产生的压力积聚作用。随着安装距离从 3 m 不断增加至 7 m,压力积聚作用的持续时间增长<sup>[11]</sup>,隔爆翻板阀前端峰值压力从 0.067 MPa 提高了 51.57%,陡升至 0.101 MPa,但未溢出火焰,成功隔爆。

在爆炸后期压力下降至常压过程中,由于管道长度的不断增加,压力波传播阻力和管道的冷却作用加强。因此,在实验 C 中,容器内两次峰值压力的时间差较大,容器内压力在爆炸过程中变动幅度平缓,容器泄压口泄压对于管道的负压作用较弱,因而隔爆翻板阀前端压力并未出现波动。但在实验 A、实验 B 中,由于两次峰值压力的时间差较小,期间压力变动较为急促,泄压对于管道的负压作用较强,所以在隔爆翻板阀前端出现明显的压力波动和负压,这种压力波动和负压在安装距离更短的实验 A 中更为剧烈。

2.2 泄压面积对压力的影响

实验2<sup>#</sup>中,分别采用内径400、600mm 双层聚酯薄膜进行泄压时,容器内部压力和隔爆翻板阀前端压力随时间的变化曲线见图4。表4是两个测点

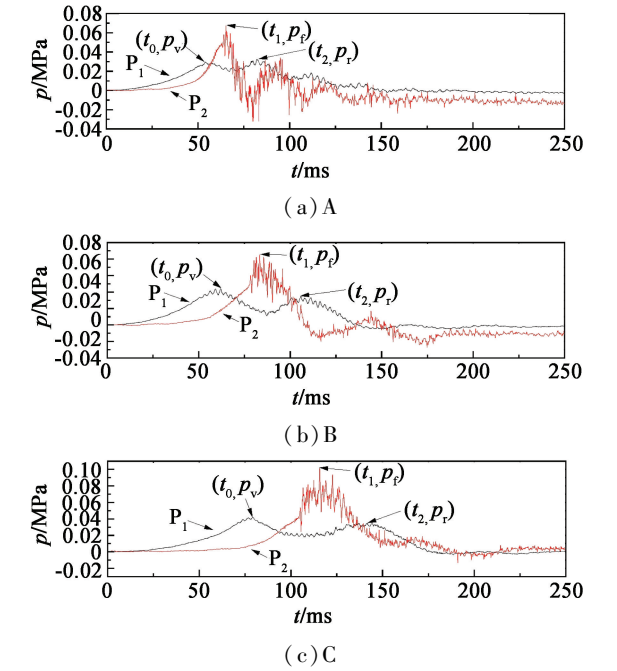


图 3 容器内部及隔爆翻板阀前端的压力-时间曲线(1<sup>#</sup>)

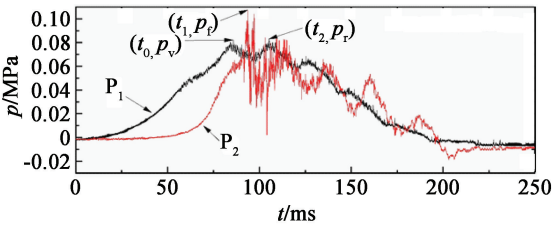
Fig. 3 Pressure-time curves inside the container and at the front end of explosion isolation flap valve (1<sup>#</sup>)



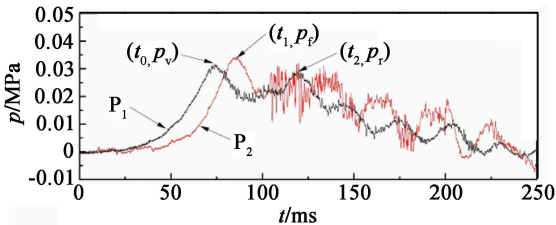
表 3 容器内部及隔爆翻板阀前端的峰值压力(1#)

Tab.3 Peak pressure inside the container and at the front end of explosion isolation flap valve (1#)

编号	隔爆翻板阀安装距离/m	$p_v$ /MPa	$p_r$ /MPa	$p_l$ /MPa	$\Delta t_{0-1}$ /ms	$\Delta t_{0-2}$ /ms	隔爆效果
A	3	0.034	0.031	0.067	11.3	28.2	隔爆成功
B	5	0.046	0.036	0.086	21.5	43.8	隔爆成功
C	7	0.041	0.034	0.101	36.2	62.3	隔爆成功



(a) E



(b) F

图 4 容器内部及隔爆翻板阀前端的压力-时间曲线(2#)

Fig. 4 Pressure-time curves inside the container and at the front end of explosion isolation flap valve (2#)

表 4 容器内部及隔爆翻板阀前端的峰值压力(2#)

Tab.4 Peak pressure inside the container and at the front end of explosion isolation flap valve (2#)

编号	泄压面积/m <sup>2</sup>	$p_v$ /MPa	$p_r$ /MPa	$p_l$ /MPa	$\Delta t_{0-1}$ /ms	$\Delta t_{0-2}$ /ms	隔爆效果
E	0.126	0.085	0.084	0.109	8.0	19.4	隔爆成功
F	0.283	0.032	0.029	0.034	12.2	45.3	隔爆失败

的峰值压力数据。

从图 4 可以看出,在爆炸前、中期,容器内部和隔爆翻板阀前端压力随时间的变化规律与图 3 基本一致。相较于实验 F,在实验 E 中,传感器  $P_1$  测得的容器压力达到一次峰值压力后下降较为平缓。这是由于在泄压口打开后,较小的泄压口面积使泄压过程中产生更大的湍流,导致火焰燃烧加速,高压气体难以立刻排出<sup>[12]</sup>;而实验 F 的泄压口面积增加,容器内部压力及气体可以较为迅速地由泄压口排至外部空间。同时,泄压口内径从 400 mm 上升到 600 mm 后,容器内部的一次峰值压力下降了 62.06%,从 0.085 MPa 降低至 0.032 MPa,这也导致实验 F 中传播至隔爆翻板阀前端的峰值压力较实验 E 出现明显下降,从 0.109 MPa 降低至 0.034 MPa。通常认为,隔爆翻板阀失效的主要原因是压力过大导致的阀板变形。然而,在实验 F 中,传感器  $P_2$  测得的隔爆翻板阀前端压力远小于阀板耐压极限,阀板结构完整,却隔爆失败;这是由于阀板受力下降,导致阀板被动关闭的速度下降,阀板未能及时关闭并阻止火焰喷出,致使隔爆失败,如图 5 所示。可见,在实际的工业运用中,仅考虑阀板的耐压极限进行选型安装是相对片面的,当爆炸压力较小时,阀板的关闭时间才是有效隔爆的关键。

在爆炸后期,实验 E 和实验 F 中的隔爆翻板阀

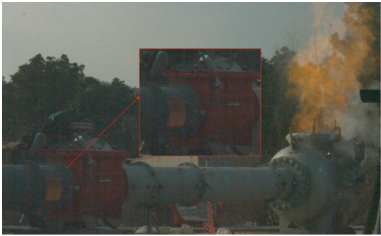


图 5 隔爆阀隔爆失败

Fig.5 Explosion isolation failure situation

前端都出现了压力波动,但波动的原因有所不同。实验 F 由于隔爆失败,压力波动主要是阀板处喷射的火焰扰动所导致的;在实验 E 中,波动主要发生在压力刚达到峰值之后,可能是由于泄压面积较小,容器内部爆炸发展更加完全,加速的火焰在冲击波后再次冲击隔爆翻板阀,导致隔爆翻板阀前端的压力短时间维持在峰值附近。对于压力波动原因的猜想亟需在实验装置中增加火焰探测器进行重复实验加以验证。

3 结论

1) 对于采用泄压与隔爆防护联用的容器,发生粉尘爆炸时,容器内部会出现两次峰值压力:第 1 次峰值压力来源于粉尘爆炸的压力增长;第 2 次峰值

压力来源于隔爆翻板阀的反射波,但第 2 次峰值压力稍小于第 1 次峰值压力。因此,在粉尘爆炸防护装置中采取隔爆措施,虽然能够防止爆炸继续传播,但即使在采取泄压措施情况下,也可能对容器本身结构造成二次破坏。

2)隔爆翻板阀的安装距离对隔爆翻板阀前端压力的最终发展具有显著影响。随着隔爆翻板阀安装距离增加,粉尘浓度及容器内部压力基本不变的条件下,隔爆翻板阀前端最大压力明显升高。而安装距离较短,容器内部压力的两次峰值间隔也缩短,整体呈现出更加剧烈的压力波动。因此,选择合适的安装距离才能有效避免由于压力过大或压力波动可能导致的隔爆翻板阀结构变形。

3)泄压面积设置不当可能导致隔爆翻板阀隔爆失效。随着容器泄压面积的减小,容器内一次峰值压力和隔爆翻板阀前端压力也随之升高;但是泄压面积的增大时,爆炸压力下降,也可能导致隔爆翻板阀关闭的时间增加,隔爆失败的概率也会上升。因此,对于隔爆翻板阀,选择合适的泄压设计,将被保护设备内的最大受控爆炸压力限制在合理范围内对有效隔爆有重要影响。

参 考 文 献

[1] AMYOTTE P R, ECKHOFF R K. Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview[J]. Journal of Chemical Health and Safety,2010,17(1):15-28.

[2] 钟圣俊. 粉尘爆炸隔离技术的应用与设备试验[J]. 劳动保护,2018(9):27-29.

[3] MITTAL M. Explosion characteristics of micron- and nano-size magnesium powders[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2014(27):55-64.

[4] AJRASH M J, ZANGANEH J, MOGHTADERI B. Experimental evaluation and analysis of methane fire and explosion mitigation using isolation valves integrated with a vent system[J]. Journal of Hazardous Materials,2017,339(5):301-309.

[5] BOECK L, BAUWENS C R, DOROFEEV S A. Modeling of explosion dynamics in vessel-pipe systems to evaluate

performance limitations of explosion isolation systems[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2021,71(5):104477.

[6] 王健,李新光, RADANDT S, 等. 管道相连泄爆容器中粉尘爆炸的实验研究[J]. 实验流体力学,2010,24(4):39-43,79.

WANG J, LI X G, RADANDT S, et al. Experimental research on dusts explosion in interconnected vented vessels [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2010,24(4):39-43,79.

[7] European Committee for Standardization. Explosion isolation flap valves: EN 16447—2014 [S]. Brussel, Belgium; CEN-CENELEC Management Centre,2014.

[8] 尤明伟,蒋军成,喻源,等. 泄爆面积对连通容器预混气体泄爆影响的实验研究[J]. 实验流体力学,2011,25(5):51-54.

YOU M W, JIANG J C, YU Y, et al. Experimental study on effect of venting area on premixed flammable gas explosion venting in linked vessels[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics,2011,25(5):51-54.

[9] 刘静平,赵金刚,潘峰,等. 硬脂酸粉尘爆炸过程中火焰传播试验及数值模拟[J]. 爆破器材,2016,45(5):11-16.

LIU J P, ZHAO J G, PAN F, et al. Experiment and numerical simulation on flame propagation in stearic acid dust explosion[J]. Explosive Materials,2016,45(5):11-16.

[10] AJRASH M J, ZANGANEH J, MOGHTADERI B. The influences of the initial ignition energy on methane explosion in a flame deflagration tube [J]. Energy & Fuels, 2017,31(6):6422-6434.

[11] 宫婕,聂百胜,樊堉,等. 水平管道内褐煤煤尘爆炸传播特性[J]. 兵工学报,2020,41(增刊2):156-161.

GONG J, NIE B S, FAN Y, et al. Explosion propagation characteristics of lignite in horizontal pipeline[J]. Acta Armamentarii, 2020,41(Suppl. 2):156-161.

[12] 袁帅,王庆慧,王丹枫,等. 粉尘爆炸防护措施的研究进展[J]. 爆破器材,2017,46(4):13-20.

YUAN S, WANG Q H, WANG D F, et al. Research progress of preventive and control measures for dust explosion[J]. Explosive Materials,2017,46(4):13-20.