

高静态动作压力下粉尘爆炸泄放标准的可靠性

喻健良, 闫兴清

(大连理工大学 化工机械学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 粉尘爆炸泄放设计标准的可靠性对能否实现爆炸防护尤为关键。以中径 70 μm 石松子粉尘为介质, 采用 20 L 球形粉尘爆炸装置进行了 4 种泄放口径、静态动作压力在 0.12 ~ 0.6 MPa 的爆炸泄放实验, 对比了实验值与 NFPA 68 和 EN 14491 计算值。结果表明, NFPA 68 在预测高静态动作压力下的泄放面积时, 随着泄放口径的增大, 预测结果由保守变为危险, 但预测结果精度较好且数值稳定; EN 14491 在预测高静态动作压力下的泄放面积时非常保守, 预测精度较差, 数据不可靠。依据两种标准推荐的经验函数关系, 分析了 NFPA 68 和 EN 14491 在预测高静态动作压力时产生这种差异的原因。

关 键 词: 粉尘爆炸; 泄放设计; 静态动作压力; 最大泄爆压力; 泄放关系式

中图分类号: X 932

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)09-1316-05

Reliability of Dust Explosion Venting Standards Under Elevated Static Activation Overpressures

YU Jian-liang, YAN Xing-qing

(School of Chemical Machinery, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Corresponding author: YU Jian-liang, E-mail: yujianliang@dlut.edu.cn)

Abstract: The reliability of dust explosion venting standards is of great importance to explosion protection. Dust explosion venting experiments with four venting diameters under elevated static activation overpressures ranging from 0.12 to 0.6 MPa were performed in the 20-liter chamber. The lycopodium dusts with a median diameter of 70 μm were adopted. The experimental results were compared with the predictive values calculated by NFPA 68 and EN 14491. The results indicated that NFPA 68 results tend to be conservative for small venting diameters and dangerous for larger venting diameters. It was found that the prediction results of NFPA 68 correlation have a good accuracy and are stable under elevated static activation overpressures. However, the prediction results of EN 14491 are inaccurate and unstable, which tend to be very conservative. The huge divergence between NFPA 68 and EN 14491 results under elevated static overpressures was analyzed based on the correlations of the empirical functions proposed by the standards.

Key words: dust explosion; venting design; static activation overpressure; maximum reduced overpressure; venting correlation

爆炸泄放技术广泛应用在粉尘爆炸防护领域。爆炸泄放设计的关键是确定容器所需的泄放面积 A_v , 使容器内最大泄爆压力 p_{red} 不超过容器最大许用压力。然而, 泄放设计受容器形状、粉尘特性、压力及温度、初始湍流程度、点火源、泄放条件等诸多参数影响, 机理还未被完全了解^[1]。从工程应用的角度, 研究人员依据不同尺度的粉尘

爆炸泄放实验, 提出了多种泄放设计关系式^[2-3]。目前, 应用最为广泛的两种泄放设计方法是 NFPA 68: 2007^[4] 和 EN 14491: 2006^[5] 推荐的经验关系式, Ismaila^[6], Alberto^[7-8] 等学者对这两种方法在适用范围内的预测精度进行了对比。然而, 这些公式基本由低强度结构的爆炸泄放实验拟合得到, 泄放装置的静态动作压力 p_{stat} 不超过 0.1

收稿日期: 2013-12-31

基金项目: 辽宁省科学技术计划项目(2012231008)。

作者简介: 喻健良(1963-), 男, 辽宁大连人, 大连理工大学教授, 博士生导师。

MPa, 最大泄爆压力 p_{red} 不超过 0.2 MPa. 随着科技和工业的发展, 越来越多体积小、承压能力高的容器及设备的爆炸防护设计被研究人员关注^[9]. 此类容器允许的最大泄爆压力 p_{red} 和泄放装置静态动作压力 p_{stat} 较高, 已经超出了 NFPA 68 和 EN 14491 的适用范围. 采用这两种标准进行泄放设计时, 设计结果的有效性和精度还未被研究人员探讨.

基于此, 本文以中径 70 μm 石松子粉尘为介质, 在标准 20 L 球内开展高静态动作压力 (0.1 ~ 0.6 MPa)、不同泄放口径 (15, 28, 40, 60 mm) 的粉尘爆炸泄放实验, 并将实验值与 NFPA68, EN 14491 预测值对比, 以评估标准在预测高静态动作压力时的可靠性.

1 实验装置和实验方法

实验装置如图 1 所示, 主要由 20 L 标准爆炸球以及泄放装置组成. 20 L 球符合 E1226 - 10^[10] 标准, 为双层夹套结构, 内层为爆炸容器, 外层为冷却水通道. 球体上有点火电极端盖、快动气粉阀、排气口、抽真空接口、压力传感器接口. 粉尘仓通过快动气粉阀与反射式喷嘴相连.

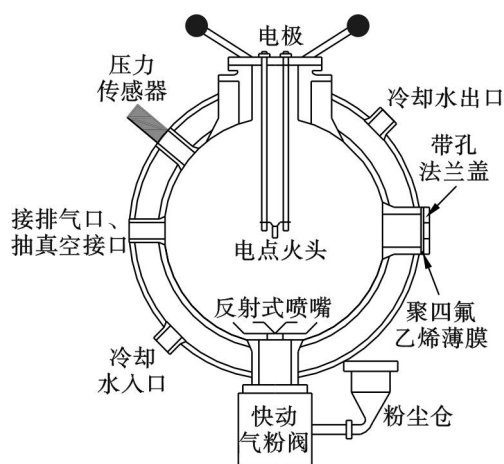


图1 装置结构示意图 (不包括控制及数据采集)

Fig. 1 Illustration of test device (excluding control and data acquisition systems)

泄放装置由带孔法兰盖和聚四氟乙烯膜组成, 如图 2 所示. 泄放口径 d_v 即法兰盘中心孔径可变, 为 15, 28, 40, 60 mm. 聚四氟膜层数可变. 该泄放装置的静态动作压力 p_{stat} 与泄放口径 d_v 和膜层数 n 有关, 将在下文测量.

采用高速压力传感器测量容器内压力, 传感器频率 5 kHz. E1226 标准推荐采用 10 kJ 化学点火头, 但文献^[11-12]报道, 10 kJ 点火头容易出

现“过驱动”现象, 导致测量数据明显偏大. 因此本实验采用 0.5 kJ 的电点火头, 采用中径 70 μm 的石松子粉尘作为介质. 考虑到实验数据重复性要求, 每组实验均重复 3 次.

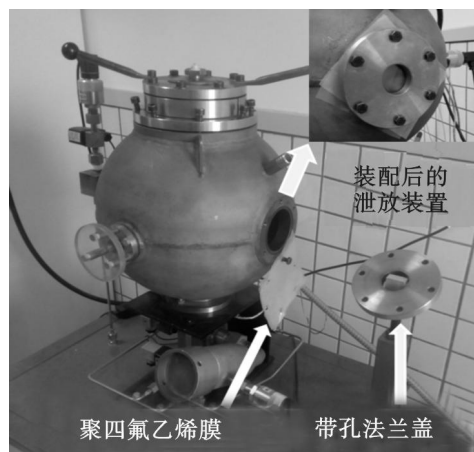


图2 实验装置及泄放结构

Fig. 2 Test device and venting structure

2 结果分析及讨论

2.1 泄放装置静态动作压力 p_{stat} 测定

根据 NFPA 68 和 EN 14491 标准, 静态动作压力是指缓慢升压时泄放装置的动作压力. 利用图 1 ~ 图 2 所示的装置, 采用压缩空气致破的方法测定了不同泄放口径 d_v 、不同膜层数 n 下泄放装置的静态动作压力 p_{stat} , 如图 3 所示 (测量过程在此不再赘述). 由图知, 单一泄放口径下多层泄放膜的静态动作压力与单层膜成简单倍数关系. 口径越大, 静态动作压力越小. 在爆炸泄放实验中, 将直接利用图 3 中的公式计算不同口径及膜层数下的静态动作压力.

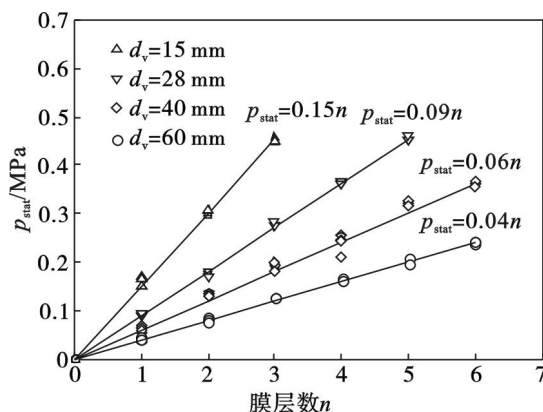


图3 泄放装置静态动作压力与泄放口径、膜层数的关系

Fig. 3 Effects of membrane layers and vent diameters on static activation overpressure

2.2 最大爆炸压力 p_{max} 及爆炸指数 K_{st} 的确定

目前建立的泄放设计关系式均基于粉尘可爆

性,可用最大爆炸压力 p_{\max} 和爆炸指数 K_{st} 表示. 这两个参数的测定是开展泄放设计的基础. 在密闭 20 L 球内测定了不同浓度下 70 μm 石松子粉尘的爆炸压力 p_{ex} 和压力上升速率 $(dp/dt)_{\text{ex}}$, 如图 4 所示. 由图知, 爆炸压力 p_{ex} 随浓度 c 增加先增大后减小, 在 $750 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时达到最大值, 即最大爆炸压力 $p_{\max} = 0.65 \text{ MPa}$; 压力上升速率 $(dp/dt)_{\text{ex}}$ 变化趋势与 p_{ex} 类似, 但在 $1000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时达到最大值, 即 $(dp/dt)_{\max} = 28.3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$. 石松子粉尘 p_{ex} , $(dp/dt)_{\text{ex}}$ 随浓度的变化规律与其他粉尘类似^[13-14].

中径 70 μm 石松子粉的爆炸指数由立方根定律求得: $K_{\text{st}} = (dp/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} = 7.68 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 由于粉尘爆炸泄放实验重点关注压力数值, 因此开展泄放实验时, 粉尘质量浓度均采用 $750 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.

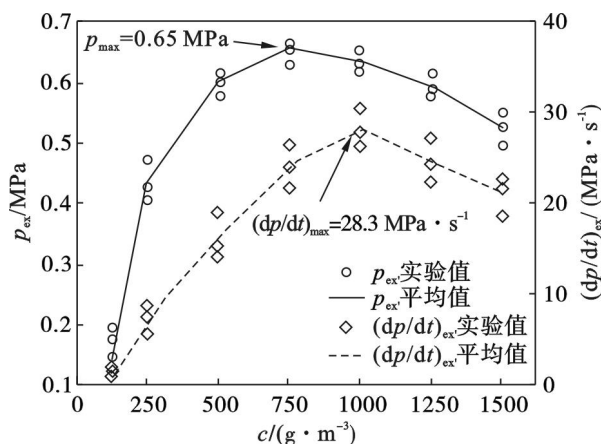


图 4 浓度对石松子粉爆炸压力及压力上升速率的影响

Fig. 4 Effect of lycopodium dust concentration on explosion overpressure and rate of pressure rise

2.3 粉尘爆炸泄放规律

图 5 为石松子粉质量浓度 $750 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 不

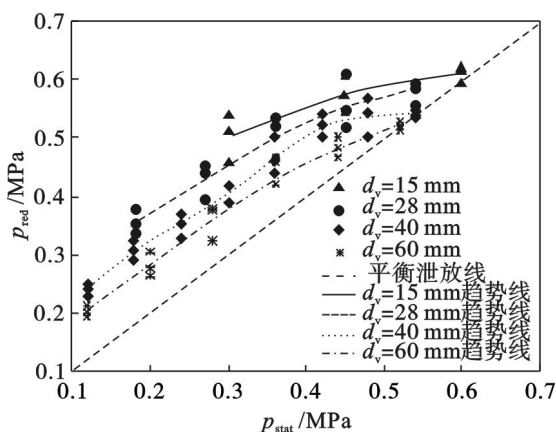


图 5 不同泄放口径及静态动作压力下的最大泄爆压力

Fig. 5 The maximum reduced overpressures at different static activation overpressures and venting diameters

同泄放口径 d_v 及静态动作压力 p_{stat} ($0.12 \sim 0.6 \text{ MPa}$) 下, 容器最大泄爆压力 p_{red} 的数值. 图中趋势线为通过各组实验平均值的连线. 对角线为平衡泄放线, 代表泄放装置的泄放能力足够大使得泄放装置动作时, 容器内压力随即下降, 最大泄爆压力与静态动作压力相等. 由于影响爆炸泄放的不可控因素较多, 因此实验数据具有一定的离散性, 这也是每组实验测量多次的原因. 由图知, 较小泄放口径、较大静态动作压力的容器最大泄爆压力较大. 泄放口径越大, 达到平衡泄放状态所需的静态动作压力 p_{stat} 越小: 15 mm 时 p_{stat} 约 0.6 MPa ; 28 mm 时 p_{stat} 约 0.57 MPa ; 40 mm 时 p_{stat} 约 0.54 MPa ; 60 mm 时 p_{stat} 约为 0.52 MPa .

另外, 对不同泄放口径的容器, 当 p_{stat} 在 $0.4 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 以下时, 最大泄爆压力 p_{red} 随 p_{stat} 的增加近似线性增加; 当 p_{stat} 在 $0.4 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 以上时, 增长的趋势逐渐变缓, 直至达到平衡泄放状态. 图 6 为 $750 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 石松子粉在密闭 20 L 球内爆炸的压力曲线. 图中 A 点为扬尘时刻, B 点为点火时刻, C 点为最大压力上升速率时刻, D 点为最大爆炸压力时刻. C 点处燃烧反应速率最大, 即反应最为剧烈, 此时容器内压力在 0.36 MPa 左右. 因此, 当静态动作压力在 0.4 MPa 以上时, 燃烧已趋向于完全反应, 压力上升速率已经处于降低阶段, 继续增大静态动作压力 p_{stat} , 最大泄爆压力 p_{red} 增大的程度有限, 因此 p_{red} 的增长趋势逐渐变缓, 直至平衡泄放状态. 平衡状态后继续增大静态动作压力 p_{stat} , 则最大泄爆压力 p_{red} 始终等于 p_{stat} .

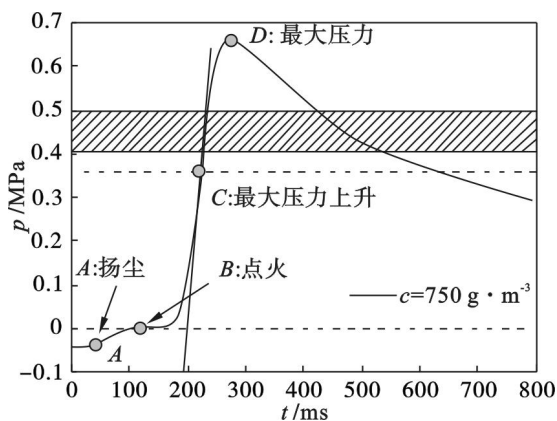


图 6 $750 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时石松子粉在密闭 20 L 球的压力曲线

Fig. 6 Pressure evolution during lycopodium dust explosion at $750 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ in the 20 liter chamber

2.4 NFPA 68 及 EN 14491 计算值与实验值对比

NFPA 68 和 EN 14491 的适用范围为装置静态动作压力 p_{stat} 在 0.1 MPa 以下. 下面分析标准

中的经验公式在静态动作压力超出此范围的高静态动作压力下的可靠性。

NFPA 68 规定粉尘爆炸泄放公式如式(1):

$$A_{v-68} = 10^{-4} (1 + 1.54 p_{\text{stat}}^{4/3}) K_{\text{st}} V^{3/4} \sqrt{\frac{p_{\text{max}}}{p_{\text{red}}}} - 1 \quad (1)$$

EN 14491 规定的泄放公式 ($0.15 \text{ MPa} \leq p_{\text{red}} \leq 0.2 \text{ MPa}$):

$$A_{v-EN} = [3.264 \times 10^{-5} p_{\text{max}} \cdot K_{\text{st}} \cdot p_{\text{red}}^{-0.569} + 0.27 \times (p_{\text{stat}} - 1) p_{\text{red}}^{-0.5}] V^{0.753} \quad (2)$$

式中: p_{stat} , p_{red} , p_{max} 单位为 bar; K_{st} 单位为 $\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; V 单位为 m^3 . 依据前面测得的 p_{max} , K_{st} , 以及泄放实验得到的 p_{stat} , p_{red} , 计算 NFPA 68 泄放面积预测值 A_{v-68} , 以及 EN 14491 泄放面积计算值 A_{v-EN} . 采用预测值 (A_{v-68} 及 A_{v-EN}) 与真实泄放面积 $A_{v-\text{exp}}$ ($= \pi \cdot d_v^2 / 4$) 的比值做参数. 图 7 为 $A_{v-68}/A_{v-\text{exp}}$ 与 p_{stat} 的关系. $A_{v-68}/A_{v-\text{exp}} < 1$ 表示 NFPA 68 计算的泄放面积小于实际需要的泄放面积, 反之亦然. 由图知, 当泄放口径分别为 60, 40, 28, 15 mm 时, $A_{v-68}/A_{v-\text{exp}}$ 分别在 0.62 ~ 1.10, 1.02 ~ 2.38, 2.03 ~ 4.22, 2.24 ~ 12.75 之间. 从趋势上看, 泄放口径越大, $A_{v-68}/A_{v-\text{exp}}$ 越小, 说明在高静态动作压力工况下, NFPA 68 预测小口径泄放结果偏保守, 预测大口径泄放结果偏危险. 从数值看, 除了 15 mm 泄放口径外, NFPA 68 在预测高静态动作压力工况的泄放面积时具有较好的精度. 值得注意的是, $A_{v-68}/A_{v-\text{exp}}$ 随着 p_{stat} 的增大变化幅度不大, 说明 NFPA 68 方法在开展高静态动作压力下的泄放设计时具有一定的稳定性.

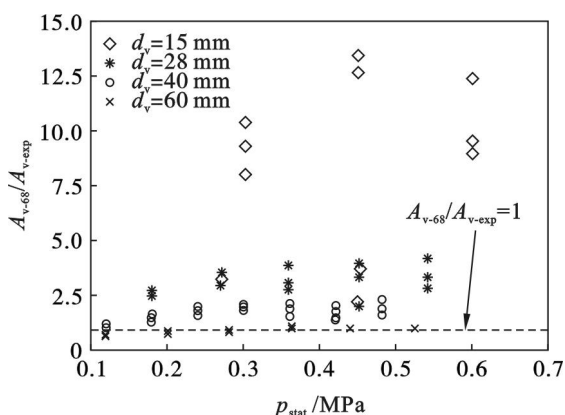


图 7 $A_{v-68}/A_{v-\text{exp}}$ 随 p_{stat} 变化

Fig. 7 $A_{v-68}/A_{v-\text{exp}}$ vs static activation overpressure p_{stat}

图 8 为 $A_{v-EN}/A_{v-\text{exp}}$ 与 p_{stat} 的关系. $A_{v-EN}/$

$A_{v-\text{exp}}$ 在 60, 40, 28, 15 mm 泄放口径时分别为 4.0 ~ 11.4, 8.4 ~ 24.0, 20.8 ~ 52.3, 102.3 ~ 196.1, 说明泄放口径越大, $A_{v-EN}/A_{v-\text{exp}}$ 越小的趋势仍然存在. 但是, 即使是在 60 mm 口径, $A_{v-EN}/A_{v-\text{exp}}$ 也远大于 1, 说明 EN 14491 在高静态动作压力下非常保守. 从数值上看, EN 14491 预测值比 NFPA 68 值大 10 倍还多 (均值). 同时, 随 p_{stat} 的增加, $A_{v-EN}/A_{v-\text{exp}}$ 几乎成线性增大, 这说明 EN 14491 方法在计算高静态动作压力时精度较差, 并且结果不稳定.

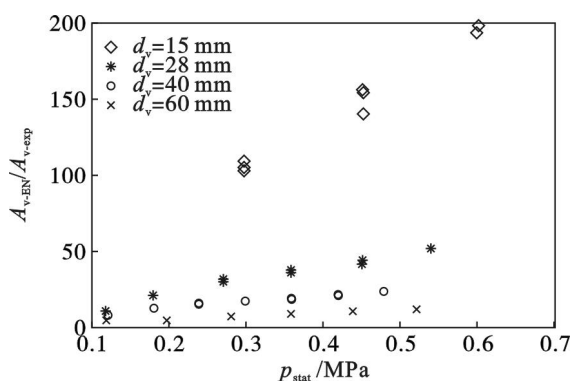


图 8 $A_{v-EN}/A_{v-\text{exp}}$ 随 p_{stat} 变化

Fig. 8 $A_{v-EN}/A_{v-\text{exp}}$ versus static activation overpressure p_{stat}

两种标准在预测高静态动作压力所需的泄放面积时出现了较大偏差. 其原因需要从经验公式中 A_v 与 p_{red} 的函数关系分析. 根据实验测得 p_{max} , K_{st} , 当 $p_{\text{stat}} = 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 \text{ MPa}$ 时, 依据 NFPA 68 和 EN 14491 计算的泄放面积 A_v 与最大泄爆压力 p_{red} 的函数关系如图 9, 图 10 所示. 其中, 图 9 的 p_{stat} (0.01, 0.05, 0.1 MPa) 值满足标准的适用范围, 而图 10 的 p_{stat} (0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa) 均超出使用范围.

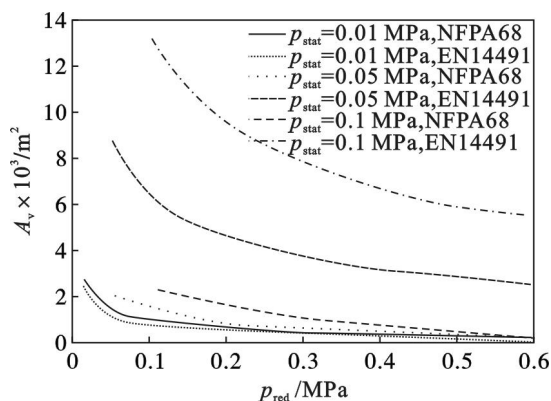


图 9 泄放面积与最大泄爆压力关系

($p_{\text{stat}} = 0.01, 0.05, 0.1 \text{ MPa}$)

Fig. 9 Relationship between venting area and maximum reduced overpressure ($p_{\text{stat}} = 0.01, 0.05, 0.1 \text{ MPa}$)

由图 9 知,当 $p_{\text{stat}} = 0.01 \text{ MPa}$ 时,随 p_{red} 增加, NFPA 68 先高于然后低于 EN 14491,但两者结果偏差很小. p_{stat} 增至 0.05, 0.1 MPa, EN 14491 计算结果迅速增大,但 NFPA 68 增加的程度较小,且 EN 14491 结果分别是 NFPA 68 的 4 ~ 12, 5 ~ 16 倍. p_{stat} 继续增至 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa 时,如图 10, EN 14491 持续增大, NFPA 68 增大的趋势依然很小. 这说明 EN 14491 公式对 p_{stat} 的响应较大. 结合前面实验结果可知,这种高灵敏度的函数响应在计算高静态动作压力时并不准确,这也是 EN 14491 预测值远高于 NFPA 68 的原因.

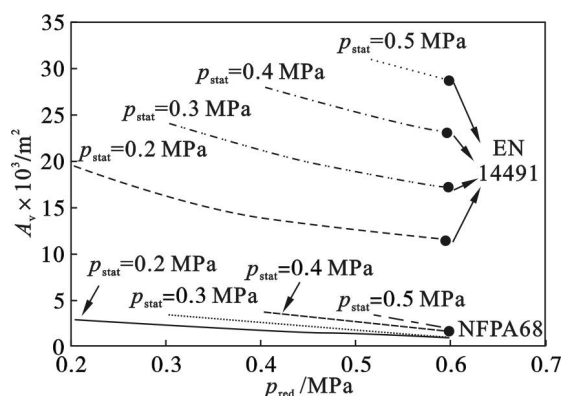


图 10 泄放面积与最大泄爆压力关系
($p_{\text{stat}} = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 \text{ MPa}$)

Fig. 10 Relationship between venting area and maximum reduced overpressure
($p_{\text{stat}} = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 \text{ MPa}$)

需要说明的是,上述工作仅是在单一体积 V 、单一粉尘爆炸指数 K_{st} 下开展的验证工作. 因为无法关联 V 和 K_{st} , 作者并未尝试建立新的粉尘爆炸泄放关系式. 在以后的研究中,应结合标准,对不同体积 V 、不同爆炸指数 K_{st} 下的高静态动作压力工况进行全面可靠性验证,并尝试修正现有的或建立新的适用高静态动作压力下的粉尘爆炸泄放关系式.

3 结 论

1) 采用聚四氟乙烯膜作为泄放装置时,多层泄放膜的静态动作压力与单层膜成倍数关系.

2) 中径 $70 \mu\text{m}$ 的石松子粉最大爆炸压力为 0.65 MPa , 在 $750 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 取得;最大压力上升速率为 $28.3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 $1000 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 取得,爆炸指数为 $7.68 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3) NFPA 68 在预测高静态动作压力的泄放面积时具有一定的精度,且数据较为稳定;EN 14491 在预测高静态动作压力下的泄放面积

时偏保守且数据偏差较大,结果不可靠.

4) NFPA 68 与 EN 14491 在高静态动作压力下的预测结果显著不同,与其本身经验公式的函数关系有关. EN 14491 公式对静态动作压力的响应比 NFPA 68 大很多.

参考文献:

- [1] Amyotte P R, Eckhoff R K. Dust explosion causation, prevention and mitigation; an overview [J]. *Journal of Chemical Health & Safety*, 2010, 10(1): 15–28.
- [2] Abbasi T, Abbasi S A. Dust explosions-cases, causes, consequences, and control [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 140(1/2): 7–44.
- [3] Eckhoff R K. Dust explosions in the process industries [M]. 3rd ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2002: 582–583.
- [4] National Fire Protection Association, NFPA 68. Standard on explosion protection by deflagration venting [S]. 2007 ed. Quincy: Batterymarch Park, 2007.
- [5] European Committee for Standardization, EN 14491. Dust explosion venting protective systems [S]. Brussels: British Standard Institute, 2006.
- [6] Ismail A, Andrews G E, Abdullahi I, et al. Venting as a means of mitigating explosions; the need to revised European and USA (NFPA 68) guidance for explosion venting [J]. *Archives of Applied Science Research*, 2012, 4(1): 155–168.
- [7] Alberto T, Ruiz A, Aguado P J. Dust explosions in vented silos; simulations and comparisons with current standards [J]. *Powder Technology*, 2011, 208(3): 717–724.
- [8] Alberto T, Aguado P J, Ramirez A. Dust explosion venting in silos; a comparison of standards NFPA 68 and EN 14491 [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(2): 204–209.
- [9] Holbrow P. Dust explosion venting of small vessels and flameless venting [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013, 91(3): 183–190.
- [10] American Society for Testing, Materials, E 1226. Standard test method for explosibility of dust clouds [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2010.
- [11] Di Benedetto A, Garcia-Agreda A, Russo P. Combined effect of ignition energy and initial turbulence on the explosion behavior of lean gas/dust-air mixtures [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(22): 7663–7670.
- [12] Gao W, Zhong S, Miao N, et al. Effect of ignition on the explosion behavior of 1-octadecanol/air mixtures [J]. *Powder Technology*, 2013, 241(1): 105–114.
- [13] Dufaud O, Trоре M, Perrin L, et al. Experimental investigation and modeling of aluminum dusts explosions in the 20 L sphere [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23(2): 226–236.
- [14] Kuai N S, Li J M, Zhi C, et al. Experiment-based investigations of magnesium dust explosion characteristics [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24(4): 302–313.