

文章编号:1006-9941(2005)06-0416-05

评价多层丝网结构阻火性能的试验研究

喻健良¹, 孟伟¹, 王雅杰²

(1. 大连理工大学化工学院, 辽宁大连 116012;

2. 大连市公安消防局, 辽宁大连 116002)

摘要: 研究了多层丝网结构对可燃气体燃烧抑制作用。提出了临界淬熄压差和临界淬熄量两个新的重要概念, 综合考虑火焰传播速度和压力差来描述抑爆效果。使用临界淬熄量来衡量阻火结构抑制燃烧的能力。试验研究了临界淬熄压差和临界淬熄量与多层丝网结构几何参数之间的关系, 并得出了该关系的经验公式。随着丝网的几何参数($n \cdot M \cdot d$)的增加, 临界淬熄压差和临界淬熄量增加, 淬熄性能越好。

关键词: 安全工程; 临界淬熄量; 临界淬熄压差; 丝网结构; 阻火

中图分类号: TJ55; TQ050.2

文献标识码: A

1 引言

可燃气体爆炸的工业事故时有发生^[1], 直接影响正常生产和人身安全, 为此人们研究了大量的技术和装置来防止和抑制可燃气体燃烧爆炸, 其中多层网孔结构就是常用的阻火装置。对管内可燃气体燃烧爆炸过程的研究形成了较为系统的理论^[2], 抑制可燃气的燃烧也有很多方法和技术, 多层丝网结构因其体积小、重量轻、淬熄性能好, 成为了最常用的阻火结构。日本的北条英光、津田健等人曾对管内多层丝网结构的淬熄性能做过系统的研究^[3-5], 试验研究发现临界淬熄速度 V_c 与金属丝网几何参数(ε 为体积空间率, ω 为丝网目数, d 为金属丝直径)之间具有一定的关系, 还发现丝网的淬熄性能与其材质无关^[4]。网孔结构对火焰的淬熄作用可用两种理论来解释。一种是热理论, 认为由于阻火结构夺走了火焰的热量阻止了火焰的传播。另一种是连锁反应理论(器壁效应)^[6,7], 认为火焰在结构表面上碰撞而失去自由基使燃烧反应停止, 从而阻止了火焰传播。但是这类研究没有研究抑制压力波的效果。也有很多学者试图用多孔材料或可压缩材料来抑制压力波, 并形成了抑制声动不稳定燃烧压力峰理论^[8,9]和横波抑制理论^[10]。爆炸减压板^[8]能够减弱声动不稳定燃烧压力峰, 网孔材料可显著将爆轰波降低^[11], 但是这类研究没有考虑火焰淬熄的作用。

鉴于这些研究限于火焰速度较低的情况下, 并且没有同时将淬熄火焰和抑制压力波作为研究对象, 本实验在较高火焰速度范围内, 研究了多层丝网结构对圆形管道内高速气体火焰的抑制过程, 以火焰淬熄作为主要研究对象, 得到了描述丝网几何参数与临界淬熄速度之间规律的经验公式。将火焰传播速度和压力差综合起来, 使用临界淬熄量来衡量阻火结构对管内可燃气体火焰的淬熄能力。重点研究了临界淬熄量和临界淬熄压差与阻火结构几何参数之间的关系。

2 试验装置

试验装置如图1所示。圆形管道内径为81 mm, 长度从1.4 m至2.9 m可调。试验所用的预混可燃气为乙炔/空气混合气, 乙炔浓度为化学计量比(7.75%)。采用压力分配法配气, 试验时先将出口端封闭, 用真空泵抽出管内空气, 再向管道内充入可燃气, 点火前瞬间将出口端完全打开, 爆炸时出口端是开放的, 无约束, 管道内的初始压力为常压。管道内沿轴向包括丝网抑爆结构前后布有多个测点。测点处装有光敏火焰传感器和高频动态压力变送器, 通过高速数据采集卡和计算机进行数据采集和数据记录, 能够测量各测点火焰光的强弱变化和超压变化, 每一测点处设有相距5 cm的2个光敏火焰传感器, 可测得火焰在这5 cm长度上的平均速度, 作为该测点的火焰速度, 测量响应时间为0.001 s, 精度为0.5%。以丝网之间无间距、丝网层数可变化、丝网的目数有40目、60目两种、丝网的材质为不锈钢等为试验条件, 能够研究丝网结构抑制可燃气体燃烧的过程, 测点离丝网的距离如表1所示, 负值表示测点在图1所示丝网的左侧, 正值表示测点在丝网的右侧。点火端

收稿日期: 2005-03-22; 修回日期: 2005-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276009, 50076006); 博士基金资助项目(2001041026)

作者简介: 喻健良(1963-), 硕士, 副教授, 主要从事工业防爆抑爆等机理与技术研究。e-mail: YJL63@21cn.com

用法兰密闭,点火点位于管端的中心处。

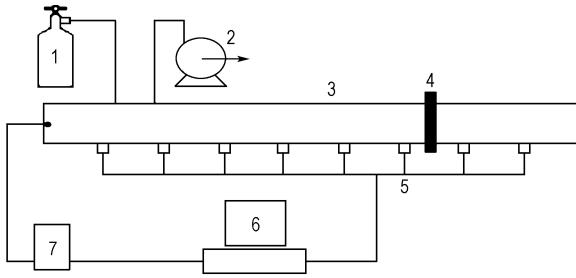


图 1 试验装置图

- 1—可燃气, 2—真空泵, 3—圆形管道, 4—多层丝网结构,
- 5—压力、火焰传感器, 6—计算机, 7—程控点火系统

Fig. 1 Experimental diagram

- 1—combustible gases, 2—vacuum pump, 3—circular tube,
- 4—structure of the multi-layer wire mesh, 5—pressure and flame sensor,
- 6—computer, 7—automatic ignition system

表 1 测点离丝网的距离

Table 1 Distance of testing point to wire mesh

testing point	1	2	3	4	5	6
distance to wire mesh/m	-1.1275	-0.975	-0.675	-0.375	-0.075	0.175

表 2 不锈钢丝网的几何参数值

Table 2 Geometrical parameter value of stainless steel mesh

mesh/M	pore numbers persquare centimeter	pore diameter /mm	mesh diameter d /mm	quality /kg · m ⁻²	rate of metal surface	rate of metal volumn/Yt
40	15.7	0.440	0.193	0.70	0.4858	0.4774
60	23.6	0.300	0.152	0.45	0.4112	0.5734

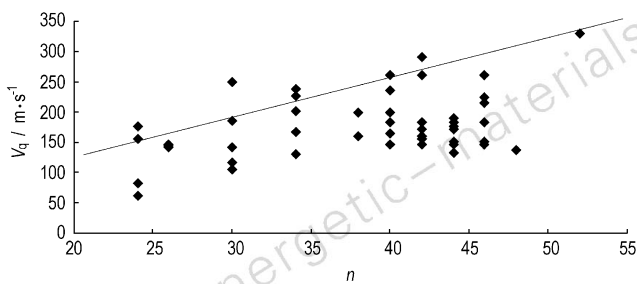


图 2 40 目丝网临界淬熄速度与层数的关系

Fig. 2 Relationship between critical quenching speed and the number of layers with wire of 40 mesh

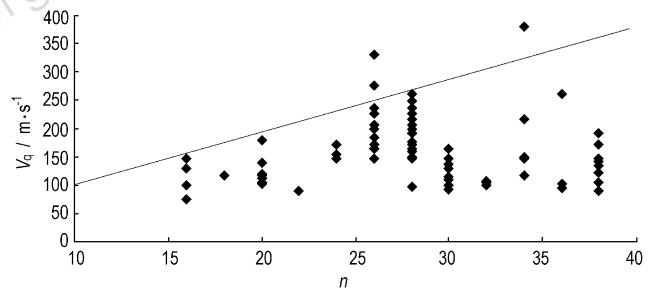


图 3 60 目丝网临界淬熄速度与层数的关系

Fig. 3 Relationship between critical quenching speed and the number of layers with wire of 60 mesh

本实验条件下 40 目和 60 目丝网的临界淬熄速度与丝网层数之间关系可用(1)式表示为直线关系:

$$V_c = 7.0362n - 35.88 \quad (1)$$

$$V_c = 3.275n + 13.19 \quad (2)$$

3 结果与讨论

多层丝网结构抑制管内火焰的传播时,对某一多层丝网结构,只能淬熄低于某一传播速度的火焰,若火焰传播速度高于这一临界值,火焰就会通过该丝网结构继续向下游传播。火焰在多层丝网结构中发生淬熄,则称进入多层丝网结构时的火焰入口速度为此次实验的淬熄速度用 V_q 表示,单位为 $m \cdot s^{-1}$ 。定义能够被淬熄的最大火焰速度为该多层丝网几何参数条件下的临界淬熄速度,用 V_c 表示,单位为 $m \cdot s^{-1}$ 。

3.1 丝网几何参数对临界淬熄速度的影响

用来表征丝网几何特征参数有目数、丝径、孔径等,表 2 为常见规格的不锈钢丝网的几何参数值。

本文以丝网层数 n 、丝网目数 M 和金属丝径 d 来表征多层丝网的几何参数,实验研究多层丝网结构几何参数与其抑爆性能之间的关系。

图 2、图 3 所示为火焰淬熄时不同层数的 40 目和 60 目丝网淬熄速度的实验值,图中横坐标为丝网的层数,纵坐标为淬熄速度。可见,丝网层数越多,临界淬熄速度越大。文献[6,7]也有相关研究结果的报道。

对比图 2 和图 3,在相同丝网层数条件下,60 目的多层丝网结构的临界淬熄速度明显大于 40 目丝网的临界淬熄速度。说明在其它参数不变的情况下,丝网目数越大,临界淬熄速度就越大,淬熄性能也越好。

以丝网层数、丝网目数和金属丝径之积表征多层丝网几何参数,利用图2和图3研究结果,可得到淬熄速度与丝网几何参数 $n \cdot M \cdot d$ 之间的关系,如图4所示。其中O点为设置60目不同层数丝网时的淬熄速度; * 点为设置40目不同层数丝网时的淬熄速度。可见,多层丝网结构临界淬熄速度与几何参数 $n \cdot M \cdot d$ 之间关系可用式(3)表示为直线关系。

$$V_c = 602.67 \cdot n \cdot M \cdot d + 91.17 \quad (3)$$

由式(3)可以看出,多层丝网结构的目数越大、层数越多、金属丝直径越粗,临界淬熄速度越大。说明在单位体积的空间里,丝网金属所占的比率越大,火焰越容易淬熄。

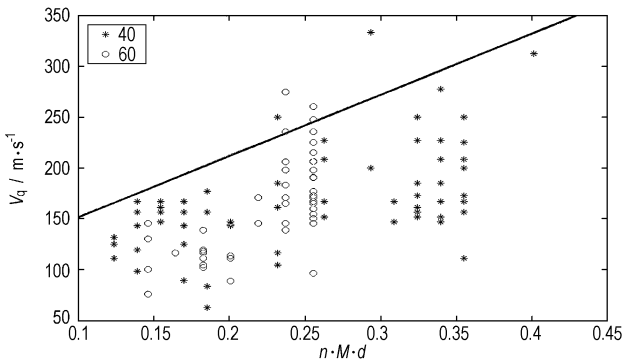


图4 临界淬熄速度与几何参数的关系
Fig. 4 Relationship between critical quenching speed and geometrical parameter

3.2 临界淬熄压差与丝网结构几何参数的关系

当火焰传播至多层丝网结构入口处时,结构两侧的超压值不同,入口处的超压值高,出口处的超压值低,多层丝网两侧形成了压力差。该压差也是评价丝网结构阻火性能的重要指标,若火焰在结构中发生淬熄,称该压力差值为淬熄压差,用 Δp_q 表示,单位为 kPa。火焰能通过多层丝网结构时的最小压差称为该抑爆结构的临界淬熄压差,用 Δp_c 表示,单位为 kPa。

图5和图6为40目和60目丝网抑爆结构两侧的淬熄压差值与丝网层数之间的关系,丝网的层数越多,淬熄压差的值就越大,抑制爆炸压力的效果越好。

图5中40目丝网临界淬熄压差与丝网层数之间关系可用(4)式表示。

$$\Delta p_c = 4.181 \times 10^{-2} \cdot n^{2.4517} \quad (4)$$

图6中60目丝网的临界淬熄压差与丝网层数之间关系可用(5)式表示:

$$\Delta p_c = 9.732 \times 10^{-3} \cdot n^{3.1016} \quad (5)$$

比较图5和图6,在其它参数不变的情况下,多层丝网目数越大,临界淬熄压差越大,淬熄性能越好。

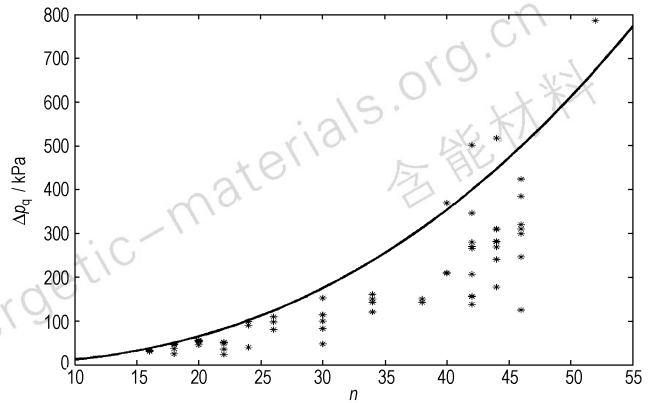


图5 40目丝网临界淬熄压差与层数的关系

Fig. 5 Relationship between critical quenching pressure difference and the number of layers with wire of 40 mesh

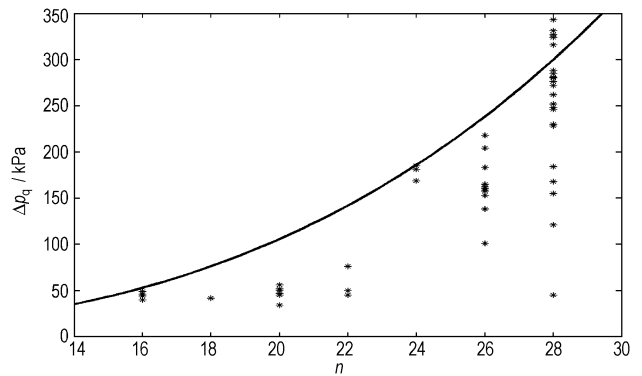


图6 60目丝网临界淬熄压差与层数的关系

Fig. 6 Relationship between critical quenching pressure difference and the number of layers with wire of 60 mesh

Δp_c 与丝网几何参数 $n \cdot M \cdot d$ 之间的关系,如图7所示。其中 * 点表示40目多层丝网结构的淬熄压差; O点表示60目多层丝网结构的淬熄压差。式(6)反映了临界淬熄压差 Δp_c 与丝网几何尺寸 $n \cdot M \cdot d$ 之间的关系:

$$\Delta p_c = 8668.92 \cdot (n \cdot M \cdot d)^{2.5312} \quad (6)$$

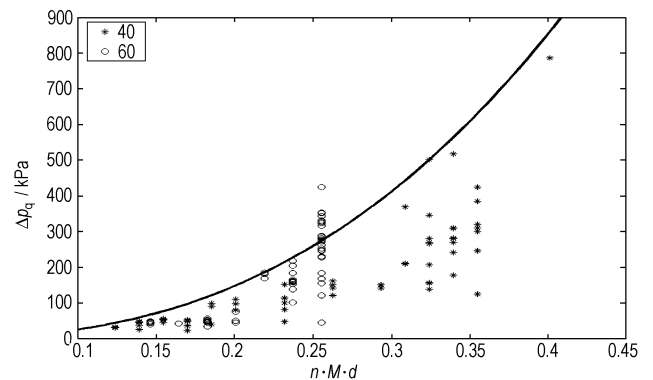


图7 临界淬熄压差与几何参数的关系

Fig. 7 Relationship between critical quenching pressure difference and geometrical parameter

3.3 临界淬熄量与几何参数的关系

通过前面丝网结构对火焰速度和压力差的研究发现,可燃气体爆炸释放的能量,不仅有动能形式的火焰速度还有势能形式的压力差。经过丝网结构的抑制作用,可燃气体爆炸释放的能量也发生了变化,即被丝网结构转化(抑制)了。

因此,研究能量变化与丝网结构的关系是非常必要的。

上述的能量变化可用 ΔQ 表示,即

$$\Delta Q = \Delta(pV) = \Delta p \Delta V \quad (7)$$

p 为管道内的压力; V 为体积。其中 ΔV 可计算得到:

$$\Delta V = svt \quad (8)$$

s 为管道的横截面积; v 为火焰速度; t 为淬熄时间。因此,式(7)可写为:

$$\Delta Q = \Delta p svt = \Delta p v (st) \quad (9)$$

我们将 ΔQ 除以时间,得到功率 W 为:

$$W = \Delta Q/t = \Delta p v s \quad (10)$$

其中,管道的横截面积 s 为常数,所以式(10)可以改写为:

$$W = \Delta Q/t = \Delta p v s = C \Delta p v \quad (11)$$

可见,可燃气体爆炸释放的能量变化(ΔQ)和功率(W)是 $\Delta p v$ 的函数。因此,我们在研究能量变化与丝网结构的关系时,只需研究 $\Delta p v$ 与丝网结构的关系即可。

定义淬熄速度和淬熄压差之积为淬熄量,用 f_q 表示,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,如(12)式表示:

$$f_q = \Delta p_q \cdot V_q \quad (12)$$

淬熄量较小时阻火结构可以使火焰淬熄,当淬熄量高于某一临界值时,阻火结构火焰不能淬熄。这个临界值就称为临界淬熄量,用 f_c 表示,单位为 $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

将各个层数的临界淬熄量(Δf_c)拟合成曲线,可得出丝网临界淬熄量与层数的关系。图 8、图 9 为 40 目和 60 目丝网的临界淬熄量与丝网层数之间关系。

由图 8 可知,40 目丝网的临界淬熄量与丝网层数之间关系如(13)式:

$$f_c = 615.72n^{3.2746} \quad (13)$$

60 目丝网的临界淬熄量与丝网层数之间关系如式(14)所示:

$$f_c = 127.31n^{3.9316} \quad (14)$$

图 10 表示淬熄量 f_c 与 $n \cdot M \cdot d$ 之间的关系。其中 * 点表示 40 目多层丝网结构的淬熄压力; O 点表示 60 目多层丝网结构的淬熄压力。因此,多层丝网结构的临界淬熄量与几何参数之间关系如(15)式:

$$f_c = 5.634 \times 10^9 \cdot (n \cdot M \cdot d)^{3.3256} \quad (15)$$

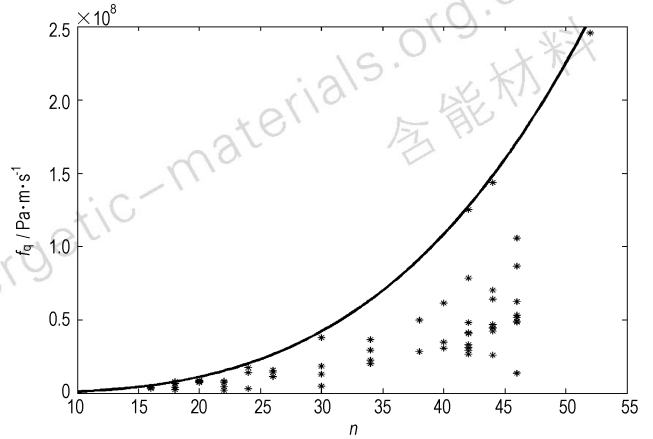


图 8 40 目丝网临界淬熄量与层数的关系

Fig. 8 Relationship between critical quenching value and the number of layers with wire of 40 mesh

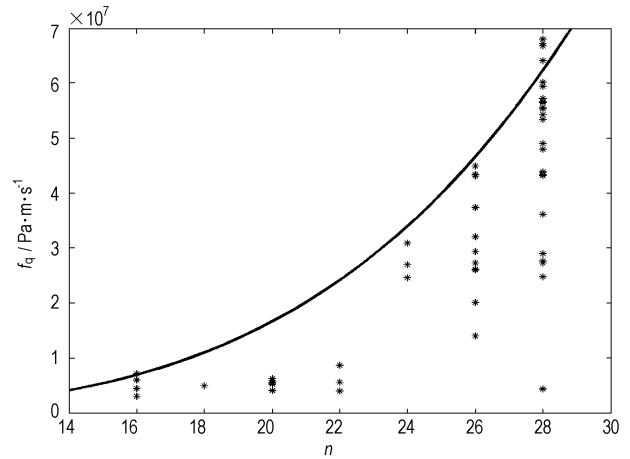


图 9 60 目丝网临界淬熄量与层数的关系

Fig. 9 Relationship between critical quenching value and the number of layers with wire of 60 mesh

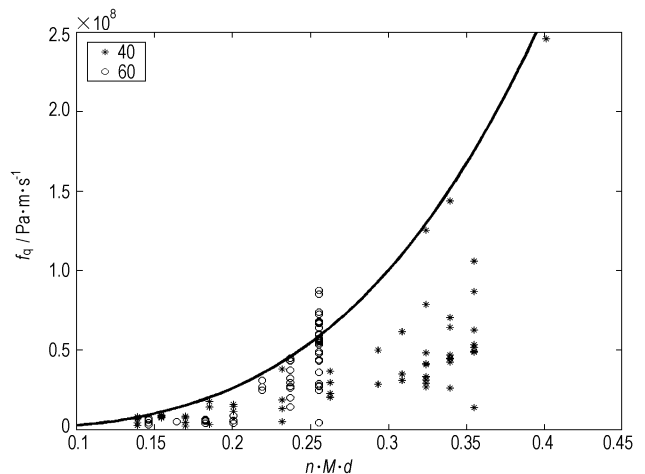


图 10 临界淬熄量与几何参数的关系

Fig. 10 Relationship between critical quenching value and geometrical parameter

3.4 在阻火器设计中的应用

通过前面的研究,实验得到了丝网结构($n \cdot M \cdot d$)和临界淬熄速度、临界淬熄压差和临界淬熄量关系的经验公式。现在介绍在阻火器设计过程中如何应用这些公式。

在阻火器的设计过程中,火焰速度是最常用的参数。将火焰速度(v)作为临界淬熄速度,应用丝网结构和临界淬熄速度的经验公式,可计算得到丝网结构($n \cdot M \cdot d$)。再由计算得到的($n \cdot M \cdot d$)应用丝网结构和临界淬熄压差的经验公式,求出爆炸发生时,作用在丝网前后的压力差 Δp_r 。由计算得到的($n \cdot M \cdot d$)应用丝网结构和临界淬熄量的经验公式,可计算得到丝网结构的临界淬熄量(f_c)。再用临界淬熄速度 v 和临界淬熄量(f_c)的表达式计算出理论上丝网结构所能承受的最大压力差 Δp_i ,对比 Δp_r 和 Δp_i ,若 $\Delta p_i > \Delta p_r$ 即可认为此丝网结构是安全的,可以达到阻火的实际应用目的。

4 结论

(1) 提出了用临界淬熄压差和临界淬熄量来描述阻火结构性能的新概念。将火焰传播速度和压力差综合起来研究,使用临界淬熄量来衡量多层丝网结构的阻火能力。

(2) 研究了多层丝网结构对管内火焰传播的影响,得到临界淬熄速度、临界淬熄压差、临界淬熄量与丝网层数、丝网目数、金属丝径这三个多层丝网结构的几何参数之间的关系式。

参考文献:

- [1] Khan Faisal I, Abbasi S A. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1999, 12(5): 361-378.
- [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.
- [3] 北條英光, 津田健, 新井信, 等. 管内における火炎の传播挙動とフレームアレスターの消炎性能 [J]. 化学工学论文集, 1986, (2): 153-158.
- [4] 北條英光, 津田健, 加纳能一. 金網形フレームアレスターの流动抵抗と消炎挙動 [J]. 高压ガス, 1984, (5): 239-247.
- [5] 津田健, 北條英光. 垂直管における金網形フレームアレスターの消炎性能 [J]. 安全工学论文集, 1990, (4): 251-255.
- [6] 湖畔. 石化装置设计中阻火器的选用 [J]. 炼油设计, 2002, 32(6): 37-39.
- HU Pan. Selection of flame damper in petrochemical unit design [J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 2002, 32(6): 37-39.
- [7] 王振成, 小川辉繁. 金属网阻火器设计参数的优化选择 [J]. 中国安全科学学报(增刊), 1995, (12): 176-182.
- [8] 王宝兴, 李振彦. 可燃气体爆炸泄压过程中声振动不稳定燃烧压力峰减弱方法的研究 [J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(2): 130-136.
- WANG Bao-xing, LI Zhen-yan. On the elimination measure of pressure peak driven by acoustically unstable combustion in vented gas explosions [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1989, 9(2): 130-136.
- [9] Van Wingerden C J M, Zeeuen J P. On the role of acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination [J]. *Combustion and Flame*, 1983, 51: 109-111.
- [10] Gvozdeva L G. Normal shock waves reflection on porous compressible materials [A]. Dynamics of Explosions, Prog. Astronautics and Aeronautics [C], AIAA. New York, 1986, 106: 155-165.
- [11] Dupre G. Propagation of detonation waves in acoustic absorbing walled tube [A]. Dynamics of Explosion, Prog. Astronautics and Aeronautics [C], AIAA. Washington, 1988, 114: 248-263.

Appraisal of Capability of Flame Arrest by Multi-layer Wire Mesh Structure

YU Jian-liang¹, MENG Wei¹, WANG Ya-jie²

(1. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China;

2. Dalian Public Security Fire Prevention Bureau, Dalian 116002, China)

Abstract: The suppressive effect of multi-layer wire mesh structure on the combustible gas explosion is studied. Two new important concepts, critical quenching value and critical quenching pressure difference are proposed. Both flame propagation speed and pressure difference are considered to describe the explosion suppression result. Critical quenching value is used to determine the suppression capability of the suppressive structure. The relationship among critical quenching value, critical quenching pressure difference and geometrical parameter of suppressive structure of multi-layer wire mesh is studied. And the empirical formula of the relationship is obtained. With the increase of geometrical parameter ($n \cdot M \cdot d$), critical quenching pressure difference and critical quenching value increase, moreover, the quenching capability is improved.

Key words: safety engineering science; critical quenching value; critical quenching pressure difference; structure of wire mesh; flame arrest