

文章编号: 1001-1455(2001)03-0179-05

阻爆器扩张腔中心缓冲隔离板 对气相爆轰波的衰减作用

周凯元, 李宗芬, 周自金, 王汉良, 年伟民
(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 阻火器和阻爆器是工业上常用的重要安全设备。爆轰火焰的猝熄要比爆燃火焰猝熄困难得多, 因为这不仅取决于阻火芯而且与阻爆器结构有直接关系。在阻爆器扩张腔中部设置球面形缓冲隔离板, 实验研究了在不同爆轰火焰速度时, 在缓冲隔离板作用下, 入射爆轰波压力衰减情况, 以及对爆轰火焰猝熄所产生的有利影响, 给出了实验结果。

关键词: 阻爆器; 扩张腔; 缓冲隔离板; 爆轰波; 衰减

* 中图分类号: O381 文献标识码: A

1 引言

气体爆燃火焰通过阻火器时的猝熄问题已经得到了较为详尽的叙述^[1,2]。爆轰火焰的猝熄问题仍是目前工业安全上尚未完全解决的课题之一, 由于爆轰波对可燃气体管网设备所构成的重大威胁使这个问题受到越来越多的重视。

按照我国的国家标准^[3], 管道阻火器分为阻爆燃型和阻爆轰型两类, 能够阻止亚音速火焰传播的阻火器称为阻爆燃型管道阻火器(flame arresters); 能够阻止超音速火焰传播的阻火器称为阻爆轰型管道阻火器(detonation arresters), 简称为阻爆轰器, 或阻爆器。阻火器与阻爆器工作原理是一样的, 即火焰通过狭小通道时的猝熄作用^[4], 但是爆轰火焰的猝熄难度要大得多。一般说来, 爆轰波通过波纹板阻爆器后, 要使爆轰火焰产生猝熄, 波纹板的三角形波纹高即猝熄直径 D_q 必须足够小, 三角形截面狭小通道长度即猝熄长度 L_q 必须足够大。这在工业上往往是不能被接受的。因为过小的 D_q 和过大的 L_q 会导致阻爆器对气体正常流动时流阻过大而不能使用。同时, 过小的孔隙也极易被气体中微小的杂质颗粒所堵塞。因此对于阻爆器而言, 除了采用较小 D_q 和较大 L_q 的波纹板阻火芯以外, 还必须采取其它措施尽可能衰减进入阻爆器波纹板阻火芯之间的爆轰波强度。阻爆器的扩张腔就具有这样的功能。一般阻爆器的扩张腔直径是管道标称通径的 2 倍左右。当爆轰波从管道进入阻爆器扩张腔后, 前驱激波强度在扩张腔中稀疏波的作用下被衰减^[5], 也降低了爆轰波火焰面的速度, 从而当爆轰火焰面进入阻火芯后就比较容易被猝熄。一般说来扩张腔直径越大, 爆轰波被衰减的程度也越大。但无限增大扩张腔就意味着阻爆器的体积和制造成本的无限增大, 同时也带来安装使用的不便或根本不允许, 这显然是不可取的。

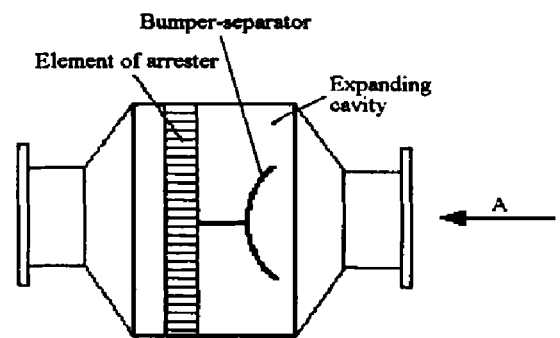


图1 管道阻爆器及缓冲隔离板示意图
(A 为爆轰波入射方向)

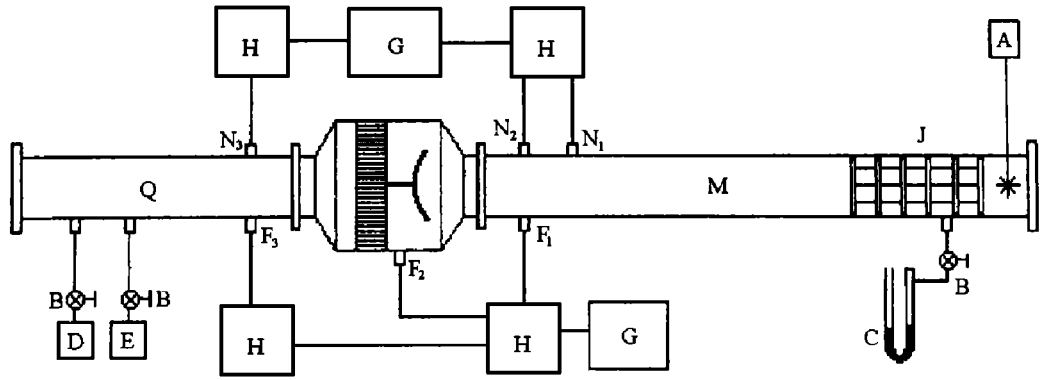
Fig.1 Diagram of detonation arresters
and bumper-separator

* 收稿日期: 2000-05-10; 修回日期: 2000-12-01
作者简介: 周凯元(1945—), 男, 教授。

我们曾对阻爆器扩张腔内的爆轰波波面压力分布作过实验研究,发现压力分布是不均匀的。中部比靠近侧壁附近的压力偏高约 20%,中部的火焰速度也较大。我们考虑在阻爆器扩张腔中部设置一个缓冲隔离板,其作用是对扩张腔中部比较强的爆轰波进行缓冲卸载和阻隔绕射,从而减轻阻火芯中心处的正面激波压力,有利于阻火效率的提高。图 1 是管道阻爆器结构和缓冲隔离板位置示意图。本文叙述了在扩张腔中部设置的缓冲隔离板对爆轰波强度衰减的作用以及对爆轰火焰猝熄产生的影响所作的可行性实验研究,给出了实验研究结果。

2 实验装置

实验装置如图 2 所示。激波管内径为 $\phi 20\text{mm}$,分为两段:阻爆器之前的部分为火焰加速段 M,长为 8m;阻爆器之后的部分是观测段 Q,长为 7m。为了在有限长度的火焰加速段中获得我们所需要的较大的爆轰火焰速度和爆轰压力,在加速段 M 的最前端设置了环状的湍流火焰加速装置



A. Electric spark initiator; B. Vacuum valve; C. Mercury vacuum; D. Vacuum pump;
E. Premixing tank; F₁, F₂, F₃. Pressure sensor; G. Transient wave form storage unit;
H. Electric charge amplifier; J. Flame accelerator; M. Flame accelerating section;
Q. Observing section; N₁, N₂, N₃. Photoelectric cell

图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Experimental equipment

J. 在紧靠阻爆器两侧的管道壁上设置了压力传感器 F₁ 和 F₃,用于测量阻爆器前方入射爆轰波的前驱激波压力 p_1 和通过阻爆器之后的激波压力 p_3 ,在阻爆器扩张腔的壁面上也设置了压力传感器 F₂,位于缓冲隔离板之后,用来测量爆轰波在扩张腔内靠近壁面处的压力 p_2 ,并通过 p_2 与 p_1 的比较来研究爆轰波经扩张腔以及缓冲隔离板的作用之后压力变化情况。在紧靠阻爆器两侧的管道壁上还同时设置了光电传感器 N₁、N₂ 和 N₃,分别用于测量进入阻爆器之前的爆轰火焰速度 v ,以及用于监测阻爆器是否已经将爆轰火焰猝熄,即是否阻火。

在本次实验中,阻爆器扩张腔内径为 42mm,扩张角为 120° ,球面形缓冲隔离板直径为 28mm,位于中部。

3 实验程序和实验结果

实验介质采用丙烷/空气/氧气预混气,加入氧气的目的是为了增加预混气中能够参加化学反应的有效成分 η ,以增大火焰加速度,减小加速段 M 的长度,使爆轰波到达阻爆器前方时能够获得较高的爆轰速度。按照计算如果不加氧气,丙烷/空气预混气中能够参加化学反应的有效成分 η 仅为 23.7%,C-J 爆轰速度为 1800m/s。加了氧气和增加了丙烷的浓度,即提高了化学反应有效成分 η 后,可以使爆轰速度提高到 2000m/s 以上。

实验时管道内初始充气压力为 0.1MPa。点火时将激波管尾端端盖打开与大气相通。实验程序如下:管道密封后抽真空;将已经配制好并已混合均匀的预混气导入管道中至 0.1MPa;静置 5min 后打开尾端端盖,点火引爆;记录火焰速度和爆轰波压力。

(1) 首先进行了不设缓冲隔离板时的实验。图 3 给出了在这种情况下,对于不同的爆轰火焰速度所获得的实验结果,即进入阻爆器扩张腔之前的爆轰火焰速度 v 与该处的爆轰波峰值压力 p_1 ;阻爆器扩

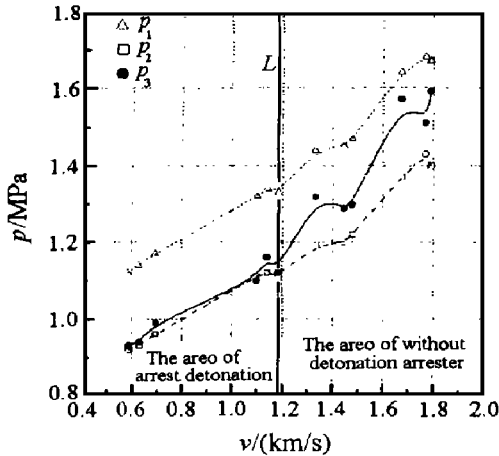


图 3 无缓冲隔离板时火焰速度 v 与压力 p 的关系

Fig.3 The relation between v and p without bumper-separator

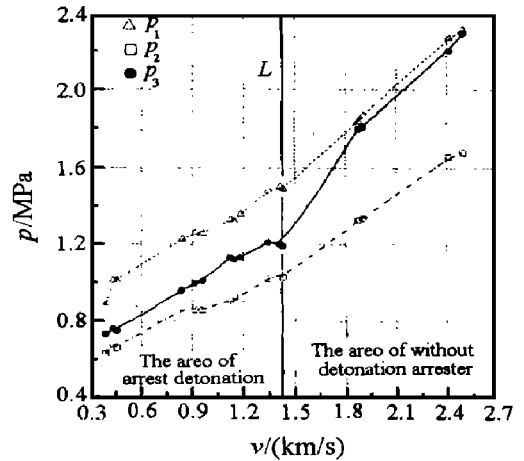


图 4 有缓冲隔离板时火焰速度 v 与压力 p 的关系

Fig.4 The relation between v and p with bumper-separator

张腔内 F_2 处的爆轰波峰值压力 p_2 ; 通过阻爆器后激波的峰值压力 p_3 (如果阻爆器未能将爆轰火焰熄灭, 则 p_3 是进入 Q 段的爆轰波前驱激波峰值压力; 如果阻爆器已经将爆轰火焰熄灭, 则 p_3 是穿越了阻火芯后的激波峰值压力)。在图 3 和图 4 中还分别用直线 L 划分出阻火区与不阻火区; 位于阻火区的实验点表示该次实验中阻火成功, 位于不阻火区的点则表示阻火失败, 是否阻火的信息是由 N_3 能否给出光电信号来确定的。

(2) 其次在阻火器扩张腔中设置球面形缓冲隔离板, 重复进行上述实验, 图 4 给出了对于不同火焰速度所得到的实验结果。

(3) 为了便于对比, 最后进行了无阻火器时的爆轰波传播实验, 即将阻火器从实验装置中取下, 两边管道对接, 其它实验条件不变。对于不同的爆轰火焰速度, 实验结果如图 5 所示。

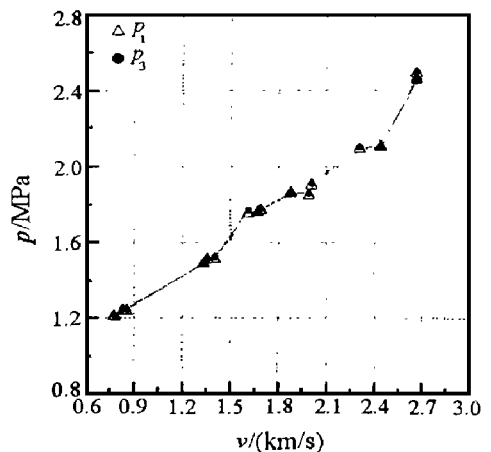


图 5 无阻火器时火焰速度 v 与压力 p 的关系

Fig.5 The relation between v and p without detonation arrester

4 对实验结果的讨论与分析

(1) 从图 3 可以看出, 尽管无缓冲隔离板, 由于阻火器扩张腔的作用, 可使爆轰波进入阻火芯之前的波面压力 p_2 降低较大的幅度, 对于不同的爆轰火焰速度, 平均压力降为 $\Delta p = p_1 - p_2 = 0.2342\text{MPa}$, 平均降幅为 16.76%。从图 4 可以看到, 有缓冲隔离板时比无缓冲隔离板时的压力降有较大增加, 对于不同的火焰速度, 平均压力降为 $\Delta p = 0.3994\text{MPa}$, 平均降幅为 27.28%, 平均降幅提高了 10.52%。更值得重视的是, 压力降 Δp 与爆轰火焰面速度 v 有直接关系, 即 Δp 随着 v 的增大而增大。图 6 给出了压力降 Δp 与火焰速度 v 的关系。由于在爆轰实验中爆轰速度和压力的不稳定性, 即对于每一种固定有效成分 η 的可燃预混气, 每次实验的速度压力数据都有一定程度的误差, 图中的数据都取几次实验的平均值。从图 6 可以清楚地看到, 缓冲隔离板的存在对气体爆轰波压力衰减有一定的作用, 例如当预混气有效成分 $\eta = 31.58\%$ 时, 无缓冲隔离板时平均压力降为 0.25MPa; 有缓冲隔离板时平均压力降增加到 0.42MPa。

(2) 缓冲隔板对爆轰波火焰面速度的影响也是明显的。由图 3, 图 4 和图 5 的对比可以看到, 在化学反应有效成分 η 相同的情况下, 在相同的测试点上爆轰波火焰面速度有较大差异, 无阻火器时所测得的火焰速度最大, 有阻火器无缓冲隔板时次之, 有缓冲隔板时最小。图 7 给出了上述 3 种情况下在同一测试点上所得到的爆轰波火焰面速度 v 与可燃预混气中化学反应有效成分 η 的关系。无缓冲隔板时, 由于阻火芯本身对高速气流也会产生一定的阻碍作用, 在火焰加速过程中产生的压力波在阻火芯处也将发生反射, 这是由于气体拥塞所造成的。这个不断产生的反射压力波当然也影响到火焰的加速度。在增设了缓冲隔板的情况下, 更加大了反射的力度, 因此在同一测试点上, 有缓冲隔板时火焰速度是最低的。例如当化学反应有效成分 $\eta=28.42\%$ 时, 无缓冲隔板时爆轰波火焰面平均速度为 637m/s ; 有缓冲隔板时火焰面平均速度为 426m/s , 降低了 33.12% 。将曲线 b 与 c 相比较, 在相同 η 情况下, 爆轰波火焰面速度平均降低 23.30% 。这个比较已经排除了扩张腔的影响因素, 显然有利于提高阻爆器的工作效率。

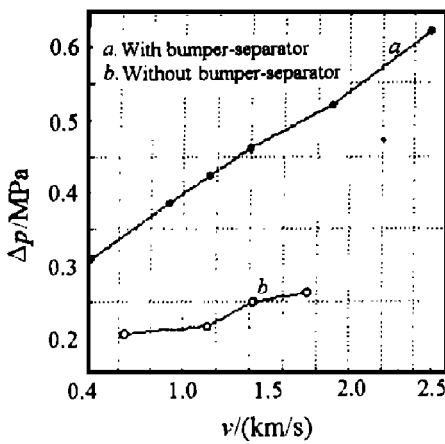


图 6 压力降 Δp 与爆轰火焰速度 v 的关系
Fig.6 The relation between differential pressure Δp and the velocity of detonation flame v

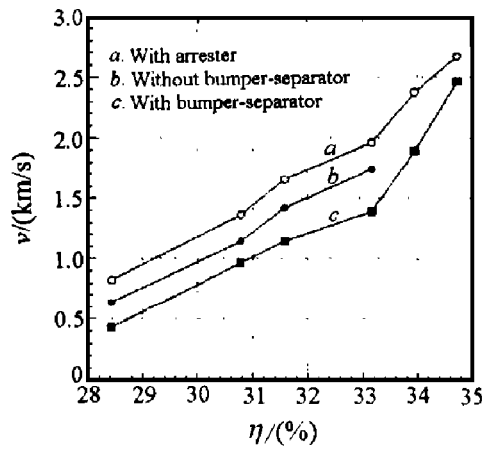


图 7 爆轰火焰速度 v 与化学反应中有效成份 η 的关系
Fig.7 The relation between v and effective chemical composition η

(3) 在有缓冲隔板的情况下, F_1 处所得到的压力波形显示出双高峰特性, 如图 8 所示, 这与无缓冲隔板时有较大区别。第二高峰即为在缓冲隔板前表面处产生的反射激波波峰。由于这个反射激波和缓冲隔板迫使爆轰波绕射以及缓冲隔板后表面处产生的冲击波发散卸载, 使爆轰波后流场中质点的运动速度降低, 速度方向也发生了改变。从而爆轰波的引导激波与火焰面之间的诱导区距离增大, 导致爆轰波强度的降低。由于扩张腔的复杂结构, 要从理论上精确描述波系相互作用是困难的。

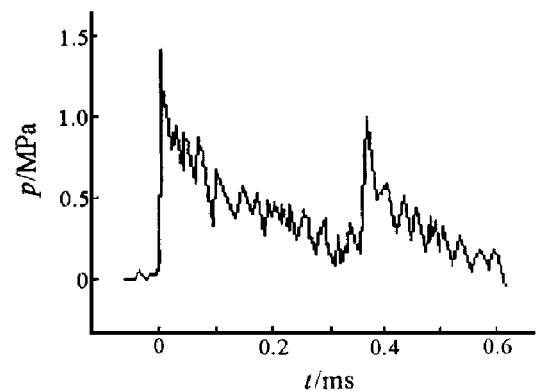


图 8 有缓冲隔板时的压力波形
Fig.8 Typical shock wave fom with bumper-separator

(4) 有缓冲隔板时对阻火器阻火性能也发生了有利的影响。从图 3 和图 4 可以看到在增设了缓冲隔板后阻火区明显增大。无缓冲隔板时最大阻火速度为 1184m/s , 而增设缓冲隔板后最大阻火速度提高到 1430m/s ; 相对提高了 17.2% , 这与有缓冲隔板时压力降 Δp 的增大有直接关系。

(5) 有缓冲隔板时对超驱动爆轰的强度衰减或许将产生一定的作用。例如在图 4 中, 当爆轰速度 v 达到 2501m/s 时, 压力降 $\Delta p = p_1 - p_2$ 也增大到 0.63MPa , 相对压力降达到 27.28% , 这当然包括了扩张腔的作用在内。对于石油气体与空气的混合气而言, 已经达到了 DDT 过程中的超驱动压力值。虽

然在本次实验中未能阻火,但从缓冲隔离板的作用中得到启示,为最终解决超驱动爆轰的火焰猝熄问题提供参考。

5 结 论

(1) 在阻爆器扩张腔中设置缓冲隔离板对入射爆轰波的前驱激波强度衰减有一定的作用,比无缓冲隔离板时压力衰减幅度平均提高 10.52%;在有缓冲隔离板情况下,压力衰减幅度随入射爆轰波火焰速度的提高有增大趋势。

(2) 在阻爆器扩张腔中设置缓冲隔离板对爆轰波火焰面速度的衰减有明显作用,在本次实验中速度平均衰减23.30%。

(3) 缓冲隔离板的设置有利于阻爆器的阻火性能提高,在本次实验研究中,最大阻火速度值提高了17.20%。

参考文献:

- [1] PALMER K N, TONKIN P S. The Quenching of Propane-air Explosions by Crimped-ribbon Flame Arresters [A]. Second Symposium on Process Hazards [C]. London: The Institute of Chemical Engineers, 1963. 15—20.
- [2] 周凯元, 李宗芬. 燃气管道阻火器原理及其应用 [J]. 煤气与热力, 1993, 13(5): 32—37.
- [3] GB13347-92, 石油气体管道阻火器阻火性能和实验方法 [S].
- [4] 周凯元, 李宗芬. 丙烷-空气爆燃火焰通过平行板狭缝时的淬熄研究 [J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(2): 111—118.
- [5] 陈成光, 李剑, 戴伟民. 变角度扩张管中爆轰临界直径的实验研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 1990, 20(71): 71—76.

The Attenuation of Gaseous Detonation Strength as a Result of the Bumper-Separator in Expanding Cavity of the Detonation Arrester

ZHOU Kai-yuan, LI Zong-fen, ZHOU Zi-jin, WANG Han-liang, NIAN Wei-min
(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: Flame arresters and detonation arresters are used to prevent propagation of deflagration or detonation flame through flammable gases in industrial equipment. There are more difficulties in quenching detonation flame, especially over-driven detonation. For a detonation arrester whether or not the flame could be quenched successfully depends on not only construction but also element. A spherical bumper-separator was installed in the expanding cavity of the detonation arrester. When detonation wave arrives at the bumper it will be compelled to diffract, a reflecting shock and a diverging shock will be produced at the front and back surface of the bumper-separator respectively. The paper first describes the experimental study on the attenuation of the shock of detonation as a result of the bumper, and gives out the experiment data of attenuated extent of shock pressure for different detonation velocity, then contrasts aforementioned data with those without bumper. Meanwhile the advantageous influence of bumper-separator on the flame quenching of detonation was related in this paper.

Key words: detonation arrester; bumper-separator; detonation wave; attenuation