

管道内流动气体爆炸问题的实验研究^①

陈爱平

(武警学院消防工程系 河北廊坊 065000)

摘要 利用 DBZ-1 型爆炸实验装置,通过测定 3m 爆炸噪声级,对管道内流动气体爆炸的若干问题进行了研究。这些问题主要包括:爆炸随可燃气体浓度变化的特征、流动阻碍作用和流量对爆炸性能的影响等。对有关结果进行了理论分析和讨论。

关键词 爆炸 爆炸噪声级 流动气体 管道

中图法分类号 TQ560.1

1 引言

现代工业的诸多生产过程都不可避免地使用、制造或伴生可燃气体。很多现代工业火灾起因于气体爆炸,而发生在管道及其类似结构内的爆炸占了相当大的比例。现在,人们越来越重视管道内气体爆炸问题的研究。

目前,人们对于气体爆炸的研究仍局限于两个条件:一是爆炸前气体处于宏观静止状态;二是爆炸空间处于密闭状态。而且,人们仍十分重视研究爆炸极限、爆温、爆压、最小引爆能等一般概念,并试图从这些研究中实现对爆炸危险性大小的从定性到定量评估的过渡。尽管人们得到了一些较为一致的结果,但有很多与实际防火防爆工作有关的问题还没有得到根本解决。例如,到目前为止,还不能准确预报实际生产过程中某种可燃气体的爆炸极限^[1]。

静止、密闭条件下气体爆炸的研究结果,无法直接应用于解决实际生产管道内的气体爆炸问题,这是因为这种爆炸通常是在气体流动、管道敞开的情况下发生的。研究这种爆炸,不仅可以解决现代工业火灾的许多问题,为预防和控制火灾提供实用、可靠的依据;还可以探索气体爆炸的功能转换问题,为研究管道内流动气体爆炸的应用开辟道路,国外已经有人在这方面做了一些尝试^[2]。

曾有过管道内气体爆炸问题研究的零星报道,如 H. W. Emmons 等^[3]推算过拟动态条件下爆炸的管道出口压力;A. D. Craven 等^[4]研究过管道内气体爆轰超压的发展问题,但迄今仍缺乏系统性研究。本文中的工作旨在这一方面作些努力。

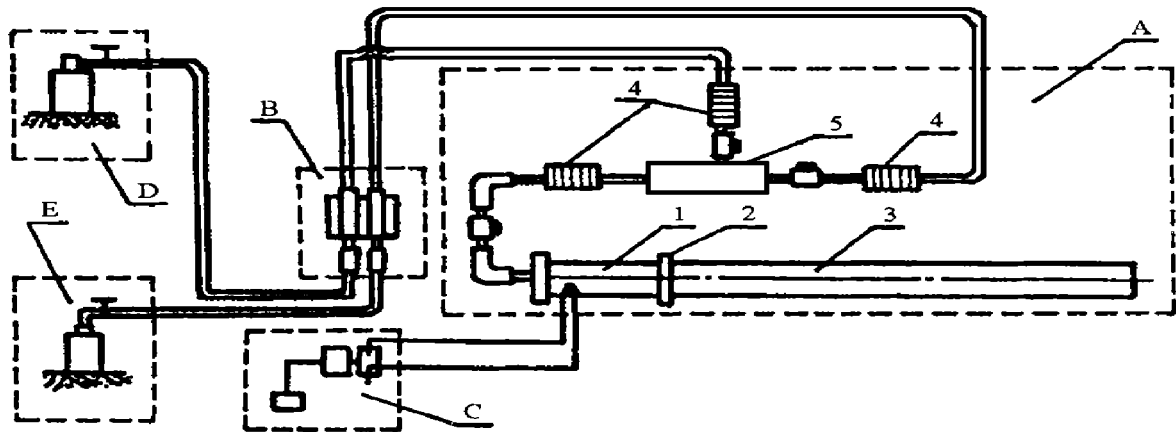
2 实验装置与研究方法

2.1 实验装置

实验是在 DBZ-1 爆炸装置上进行的。该装置的主要组成如图 1 所示。

起爆室和传爆管的内径为 42mm,长度为 1.2m。实验用可燃气体包括液化石油气、乙炔、氢气和城市煤气;空气由空压机供给。

^① 陈爱平:男,1964 年 7 月生,硕士,副教授。
1998-09-08 收到原稿,1999-04-20 收到修改稿。



A. Explosion system; B. Flow control system; C. Ignition system; D. Source of combustible gas; E. Source of air
1. Igniting room; 2. Aperture plate; 3. Explosion-propagating pipe; 4. Flame arrester; 5. Mixer

图 1 DBZ-1 型爆炸装置的系统组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of systematic composition of the DBZ-1 explosion device

将可燃气体和空气输送到流量控制系统,操纵流量计的控制球阀以调节两种气体的流量,使可燃气体达到一定浓度;然后,两种气体经过阻火器和混合器进入起爆室和传爆管;操纵起爆系统,在起爆室引爆混合气体,爆炸经过孔板后在传爆管中传播;具有一定爆压的冲击波和爆炸产物冲出管口,并在管道周围的空气中形成相应的声响。

2.2 研究方法

爆炸噪声是由爆炸冲击波波压变化引起的。根据文献[5],当爆炸噪声的声压级低于180dB时,冲击波波压可认为是声压。爆炸噪声的声能由部分爆炸的能量转换而来。这种转换系数一般在 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ 范围^[5~6]。

假设爆炸功率为 W_E ,爆炸噪声的声功率为 W_N ,能量转换系数为 η ,则爆炸噪声的声功率级(以下简称爆炸噪声级)为

$$N_W = 10 \lg \frac{W_N}{W_0} = 10 \lg \frac{\eta W_E}{W_0} \quad (1)$$

式中: W_0 是参考声功率,取 $W_0 = 10^{-12} W$ 。

由此可见,根据爆炸功率可确定爆炸噪声级;反过来,如果可测定爆炸噪声级,就可确定爆炸功率,即从爆炸噪声级大小上可以反映爆炸性能。因此,我们采用了测定爆炸噪声级的研究方法。

为了保证安全,测试工作是在离爆炸源一定距离处进行的。将管道内爆炸产生的噪声按线声源处理,且声波在大气中的衰减只考虑扩散部分,则管道内的爆炸噪声级可由下式计算^[5~6]

$$N_W = N_P + 10 \lg S + 8 \quad (2)$$

式中: N_P 是离声源 S (m)处所测得的爆炸噪声级(dB)。

本实验规定 S 为3m。由式(1)和(2),可得3m爆炸噪声级 N_3 与爆炸功率 W_E 的关系

$$N_3 = 10 \cdot \lg \eta \cdot W_E + 107.23 \quad (3)$$

爆炸噪声基本上是由普通声级计的频率范围(20~8000Hz)内的频谱组成的,因此人们多使用普通声级计测定爆炸噪声级^[5,6]。而且,人们普遍认为^[7],对于爆炸噪声,使用声级计的A

特性比较好。

考虑到实验在室外露天场地进行,可能存在与爆炸噪声无关的背景噪声,为了消除其对测定结果的影响,可按表 1 对测得的爆炸噪声级进行修正^[5]。实际结果等于实测结果与修正结果之差。

表 1 有背景噪声时的噪声级修正值

Table 1 Revised values of noise level with background noise

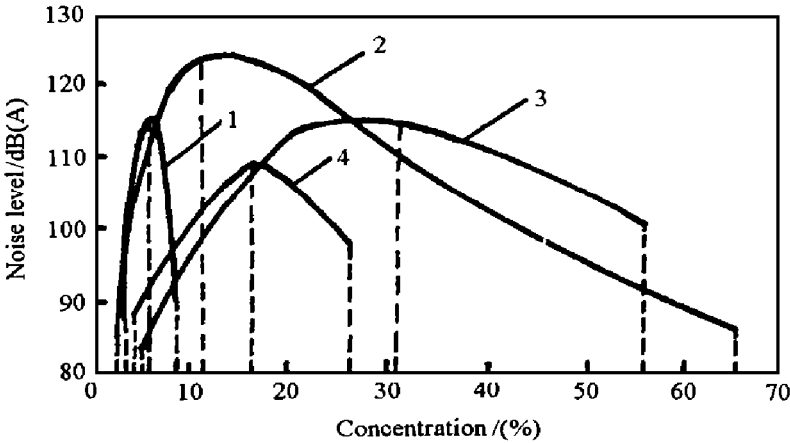
总噪声与背景噪声之差/(dB(A))	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
修正值/(dB(A))	6.9	4.4	3.0	2.3	1.7	1.25	0.95	0.75	0.60	0.45

3 实验结果及有关讨论

3.1 管道内流动气体爆炸特征随浓度的变化情况

混合气体流量保持为 $2.5\text{m}^3/\text{h}$,测定了四种可燃气体在不同浓度时 3m 处的爆炸噪声级,据此绘出了爆炸噪声级随浓度的变化曲线,如图 2 所示。

可以看出:在一定范围内,随着可燃气体浓度升高,爆炸噪声级增大,但超出这一范围后,随着浓度升高,爆炸噪声级减小;在某一浓度附近,爆炸噪声级最大,这一浓度就是化学计量浓度(如表 2 所列);在浓度过低或过高时,测不出爆炸噪声,这种浓度就是爆炸的极限浓度(如表 3 所列)。



1. LPG/Air; 2. Acetylene/Air; 3. Hydrogen/Air; 4. Urban gas/Air

图 2 爆炸噪声级随浓度的变化情况

Fig.2 The curve of explosion noise level as a function of concentration

表 2 管道内流动气体爆炸的极限浓度和化学计量浓度(体积分数/(%))

Table 2 Explosion limits and stoichiometric concentration of flowing gases in pipeline (volume rate/(%))

实验参数	液化石油气	乙炔	氢气	城市煤气
爆炸下限	3.1 (3) ¹⁾	2.8 (2.5)	5 (4.3)	4.4 (4)
爆炸上限	9.1 (9.5)	65 (80)	56 (74)	26 (30)
化学计量浓度	5.7 (4.2) ²⁾	10.8 (7.8)	31 (29.6)	16.7

1)括号内数字是静态爆炸极限的测定结果;2)括号内数字是理论化学计量浓度

表 2 说明:流动气体爆炸的下限浓度较其处于静止状态时略有升高,而上限浓度显著降低;化学计量浓度的实测值比其理论值有所升高。引起这些偏差最重要的因素:一是气体的流动不利于爆炸;二是气体的混合较不均匀。

之所以爆炸上限的偏差比较明显,是因为可燃气体浓度较大时,爆炸反应较不完全,爆炸功率较小,爆炸声功率也较小,因而较难测出爆炸噪声级。

3.2 管道内气体流动的阻碍因素对爆炸性能的影响

采用不同浓度的液化石油气/空气混合物, 分别在有孔板和无孔板时, 测定了 3m 处的爆炸噪声级, 结果列于表 3 中。孔板离进气端 0.2m, 起爆室和传爆管就是以它为界限。混合气体的流量控制在 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 。

表 3 孔板对管道内流动气体爆炸的影响

Table 3 The influence of aperture plate on flowing gas explosion in pipeline

体积分数/(%)	3m 处的爆炸噪声级/(dB(A))					
	无孔板			有孔板		
	3	1	2	3	1	2
4	81.8	83.4	82.6	98.2	97.5	98.3
5	98.2	98.4	97.8	106.8	106.3	105.8
6	85.3	85.6	86.2	88.2	88.0	87.8

表 3 表明, 孔板会明显地提高爆炸噪声级。根据有关资料^[4,8], 类似结果在静态爆炸现象中也会发生。这主要是因为孔板使混合气体的运动受阻, 部分动能转化为压力能, 引起局部压力升高。升高的压力可计算^[9]

$$\Delta p = \left[1 + \frac{0.707}{\sqrt{1 - A'/A}} \right]^2 \cdot \left[\frac{A}{A'} - 1 \right]^2 \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中: A 和 A' 分别是管道的内截面积和孔板的内孔面积; v 是混合气体在管道内的流动速度。

局部初始压力上升, 爆炸温度和压力上升速度增大, 从而提高了爆炸功率。有关资料^[8,10]表明, 随着初始压力上升, 爆炸功率几乎呈直线增加。

还测定了装设不同内孔面积的孔板(孔板离管进气端 0.2m)和不同数量的孔板(孔板之间的间距 0.1m)时, 处于化学计量浓度附近的液化石油气/空气混合气体在 3m 处的爆炸噪声级, 结果如图 3 和 4 所示。混合气体流量控制在 $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 。

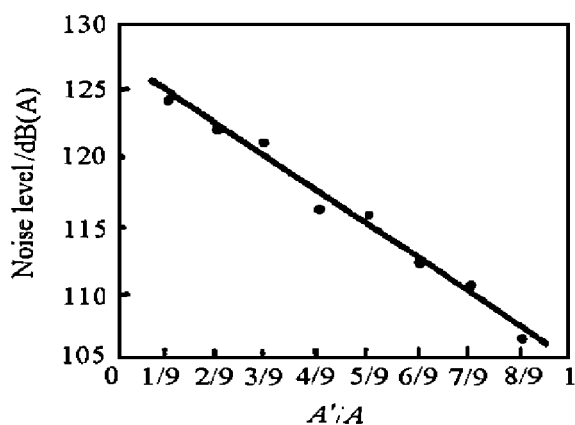


图 3 A'/A 比值对流动气体爆炸性能的影响

Fig.3 The influence of A'/A on performance of flowing gas explosion

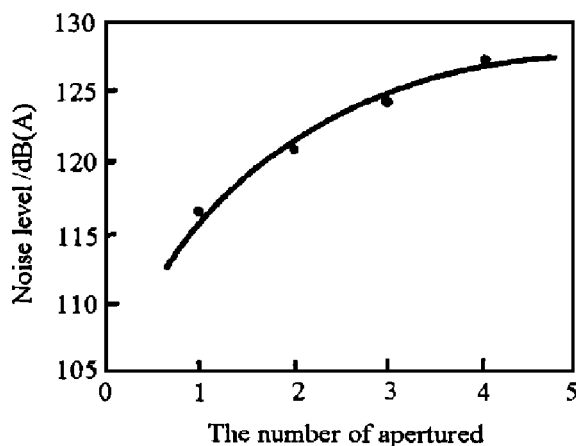


图 4 孔板数量对流动气体爆炸性能的影响

Fig.4 The influence of number of aperture plate on performance of flowing gas explosion

从图 3 可看出, 随着 A'/A 比值减小, 爆炸噪声级几乎呈直线增大; 从图 4 可看出, 在一定数量范围内, 孔板增多, 爆炸噪声级最大。这些现象也可以从孔板的增压和后面讨论的流动状态变化上得到解释。

3.3 管道内气体的流动速度对爆炸性能的影响

对不同流量的、处于化学计量浓度的液化石油气/空气进行了实验。管内不装设孔板,目的是使爆炸前的轴向流动状态主要取决于气体的流量。测定了3m处的爆炸噪声级,如图5所示。图中的虚线就是根据式(3)描绘的。

随着流量增大,爆炸噪声级几乎呈直线(图中实线)提高。原因之一是流量增大,参加爆炸反应的气体增多,但因气体增多而引起的爆炸噪声提高得不明显(图中虚线);更主要的原因是大流量导致管道内气体流动状态发生变化。因此,图5主要反映了气体流量不同时、流动状态对爆炸性能的影响。

根据流体力学原理^[9],管道内气体的流动状态取决于无因次雷诺数

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{4 \cdot \rho \cdot Q}{\pi \cdot \mu \cdot d} \quad (5)$$

式中: ρ 是管道内混合气体的平均密度; μ 是混合气体的动力粘度系数; Q 是混合气体的流量。

据此式,可得出管道内的气体在不同流量时的流动状态,如表4所列。

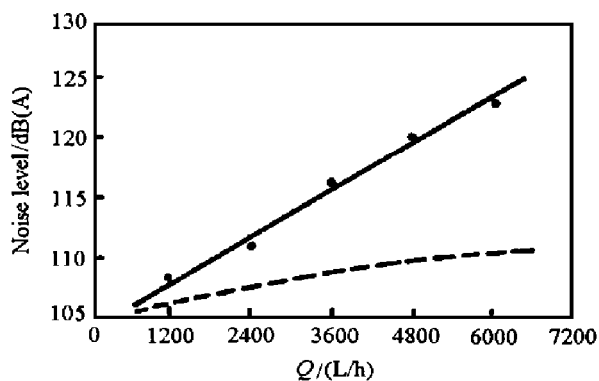


图5 不同流量时的爆炸噪声级

Fig.5 Explosion noise level at different flow rate

表4 不同流量的气体流动状态分析

Table 4 Flowing state analysis of gas at different flow rate

流量/ (m ³ /h)	Re	管道内气体 流动状态
0(静态)	0	
1.2	780	层流
2.4	1560	
3.6	2340	层流向湍流过渡
4.8	3120	
6.0	3900	湍流
7.2	4680	

从表4看出,随着管道内混合气体流量增大,雷诺数增加,气体的流量状态发生了变化。这种变化既使得火焰的弯曲程度增加而增大了反应面积,又加剧了热和自由基的输运速度,还缩短了已燃热气体与未燃冷气体的混合时间,从而提高了爆炸反应的完全程度,增大了爆炸速度,提高了爆炸功率。

4 结 论

(1)管道内流动气体爆炸的噪声级随混合体积比的变化曲线,基本反应了流动气体爆炸的特征。爆炸极限范围比气体处于静态时的爆炸极限范围窄,主要体现在爆炸上限下降;爆炸化学计量浓度的测试值高于理论值。

(2)管道内孔板具有提高流动气体爆炸功率的效果,而且这种效果随着孔板内孔面积的减小和孔板数量的增加而愈益明显,这主要是因为孔板使局部初始压力升高。这一现象反应了管道内的阻碍作用对流动气体爆炸性能的影响。

(3)管道内流动气体流量增大,爆炸强度提高。这主要是由于流量时气体的流动状态有利于爆炸反应完全程度的提高。

参 考 文 献

- 1 Baker W E, et al. Explosion Hazards and Estimation. [s.l.] : Elsevier Scientific Publishing Co., 1983
- 2 Henrych J. The Dynamic of Explosion and Its Use. [s.l.] : Elsevier Scientific Publishing Co., 1979
- 3 Emmons H W. Fundamentals of Gas Dynamic (Section G). [s.l.] : Princeton University Press, 1958
- 4 Craven A D, et al. The Development of Detonation Overpressures in Pipelines. Int Chem Eng, 1968, 25: 61 ~ 69
- 5 Faulkner L L. Handbook of Industrial Noise Control. [s.l.] : Industrial Press Inc., 1976
- 6 Irwin J D, Graf E R. Industrial Noise and Vibration Control. [s.l.] : Prentice-Hall, 1982
- 7 Schultz T J. Community Noise Rating (Second Edition). [s.l.] : Applied Science Publishers, 1982
- 8 Feay B A, Bowen J R. A Model of the Ignition of Cylindrically-Confined Explosive Gas Mixtures. Combustion and Flame, 1973, 20: 115 ~ 123
- 9 Batchelor G K. An Introduction of Fluid Dynamics. England: Cambridge at the University Press, 1970
- 10 Bodurthe F T. Industrial Explosion Prevention and Protection. [s.l.] : Mc, Graw-Hill book Co., 1980

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PROBLEMS OF FLOWING COMBUSTIBLE GAS EXPLOSION IN PIPELINE

Chen Aiping

(Dept. of Fire Protection Engineering, Armed Police Force Academy, Langfang, 065000)

ABSTRACT In this paper, experimental studies were made for problems of flowing combustible gas explosion in pipeline with DBZ-1 explosion device and by measuring explosion noise level at 3 meters away from the explosion source, these problems mainly include the characteristics of explosion as a function of concentration of combustible gases and the influences of drag to flow and rate of flow on the performance of explosion. Some results are obtained from the studies, theoretical analysis and discussion are made for these results.

KEY WORDS explosion, explosion noise level, flowing gases, pipeline