

文章编号: 1001-1455(2004)04-0305-07

煤气火焰传播规律及其加速机理研究^{*}

卢捷¹, 宁建国¹, 王成¹, 林柏泉²

(1. 北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国矿业大学能源与科学工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 研究了煤气/空气预混气在两端封闭管道中的火焰传播加速现象和管道中是否有障碍物时火焰的加速机理, 认为火焰加速是由于火焰前未燃气体被前驱压缩波加热和障碍物诱导的湍流区对燃烧过程的正反馈造成的。实验结果表明, 障碍物存在时, 最大爆炸压力可提高 20%, 与理论计算一致; 火焰传播特性随煤气浓度的变化而改变; 障碍物阻塞比对火焰的速度和压力都有一定影响。

关键词: 爆炸力学; 火焰加速; 阻塞比; 煤气; 障碍物

中图分类号: O381

国标学科代码: 130°3510

文献标志码: A

1 引言

随着城市煤气、天然气、液化石油气的广泛应用, 西气东输及煤矿深部开采等重大工程项目的建设, 可燃气体爆炸灾害的预防及安全储运显得尤为突出和急迫。可燃气体爆炸灾害的发生绝大多数是由于可燃气体泄漏或突出后, 被火源点燃, 形成湍流燃烧、爆燃甚至爆轰造成的。管道内爆燃波是一种不稳定状态的燃烧波, 它有可能在爆燃的后边界约束增强, 或在有障碍物的情况下, 压力波被逐渐增强, 火焰不断加速, 直至火焰阵面追赶上前驱压力波阵面, 形成带化学反应区的强冲击波。I. O. Moen^[1]和 B. H. Hijertager 等^[2]针对管道内障碍物对可燃气体爆燃过程中的火焰速度与压力的影响进行了实验研究, 结果表明, 障碍物产生的湍流效应对火焰产生明显的加速作用。国内一些学者^[3~6]通过实验也研究了障碍物对火焰、爆炸波传播的影响, 研究表明, 超压与火焰速度有关, 障碍物对火焰的传播具有明显的加速作用, 并有可能出现 DDT。

本文中研究了煤气多元混合气体点燃后火焰在管道中传播的爆炸动力学过程, 以及有无障碍物和障碍物阻塞比的变化对煤气火焰加速过程的影响机理。

2 实验装置及测试系统

实验在中国矿业大学瓦斯(煤尘)爆炸实验室进行^[3]。实验系统由爆炸试验管道、动态数据采集分析系统、火焰速度(及厚度)测量系统、压力测量系统、火焰温度测量系统、点火控制系统和配气系统组成, 如图 1 所示。

(1) 爆炸试验管道

该管道为 80mm×80mm 的方管, 总长 24m, 在方管上有压力、温度、火焰传感器和点火装置的安设孔。整个管道用厚 12mm 的 16Mn 钢板焊制, 耐压 20MPa。

障碍物由若干个同心圆环形钢板组成, 其外径为 80mm, 内径、障碍物数目、间距、安装位置根据实验需要而定。阻塞比 $B = (l^2 - \pi r^2) / l^2$, r 为圆环的内半径, l 为管道的内边长。

(2) 点火装置

该装置采用简易操作型的电容储能高压电火花点火, 其输出能量为 20~100J。

* 收稿日期: 2003-07-22; 修回日期: 2004-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10272023); 中国博士后科学基金项目

作者简介: 卢捷(1963—), 男, 博士。

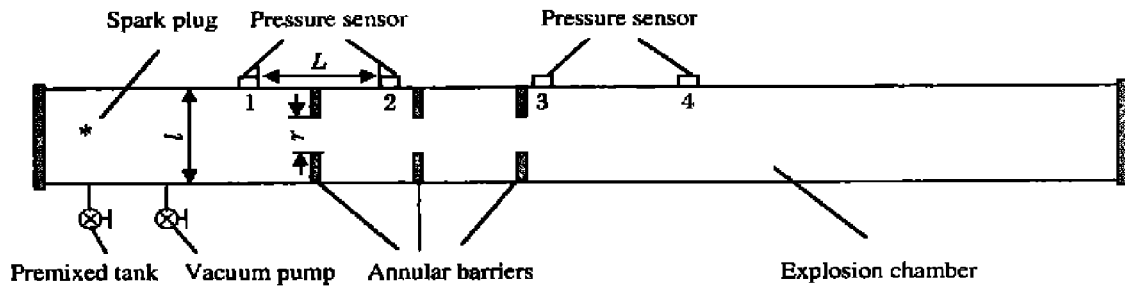


图1 实验布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental arrangements

(3) 试验工质

试验工质为城市煤气和空气按一定比例配比的均匀混合物, 煤气的主要成份是氢气、甲烷、一氧化碳等^[7]。

(4) 测试系统

测试系统包括火焰速度和压力信号测量。火焰速度测量采用光敏三级管作为火焰传感器, 压力测量采用 TD205 型石英压电传感器, 动态数据采集分析系统为 Cs20186-32 型, 具有 32 个通道(采样率 20MHz, 采样精度 10bit, 采样长度 1MHz), 能满足微秒级数据采集速度的要求, 它具有自动采集、储存、数据处理和显示以及打印输出的功能。

实验系统的工作原理为对爆炸试验管道室抽真空, 当爆炸室内的压力达到要求的压力值时停止抽真空, 然后将预混好的混合气体充入管道, 发出点火信号, 使管道内的电极击穿气体放电, 点燃混合气体, 由压力传感器和数据采集系统对爆炸室内的压力进行测试和分析处理。

(5) 火焰速度和压力波速度的确定方法

在火焰传播通道上布置多个光电或压力传感器, 每相邻两个传感器之间的平均速度

$$\bar{v} = d / (T_2 - T_1)$$

式中: d 为相邻两个光电或压力传感器之间的距离, T_1 为火焰前锋或压力波到达传感器 1 的时刻, T_2 火焰前锋或压力波到达传感器 2 的时刻。

3 实验结果与分析

3.1 障碍物对煤气爆炸特性的影响

图 2 表示各种不同配比的煤气/空气混合物在有无障碍物条件下长径比 $L/D = 33$ 处(对应图 1 中传感器 3)测得的最大压力值, 其中曲线 1 为无障碍物时所实测的最大爆炸压力值随煤气浓度的变化值, 曲线 2 为有障碍物(孔径 60mm、环间距 250mm、3 环相串的环形障碍物)时所测得的值。曲线 3 为简化理论计算。从图 2 可知:

(1) 管道中具有障碍物时测得的最大爆炸压力值比无障碍物时要高出 20% 左右。爆炸极限浓度范围也略有加宽。显然在有障碍物情况下, 点火后火焰通过障碍物时产生强烈湍流, 对混合气体产生搅拌效应, 火焰阵面严重畸变, 大大增加了火焰阵面面积, 加速了化学反应速率和反应度。

(2) 理论计算结果与湍流爆炸实测结果除了在接近化学当量浓度的点附近不一致外, 其它点处均比

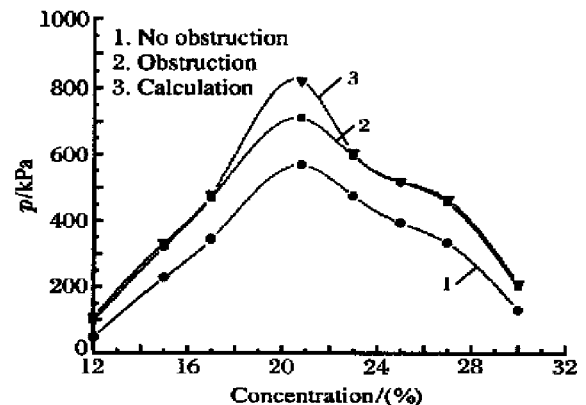
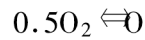


图2 爆炸最大压力随煤气浓度变化图

Fig.2 Explosion pressure vs city coal gas concentration

较一致,这一点反映了混合气体在有障碍物的管中爆炸时,爆炸气体能够达到理论完全反应的程度,也就是释放出全部化学反应热。而无障碍物情况下是难以达到这一点的。

(3)在接近化学当量浓度情况下,绝热爆炸温度值达到 2000K 以上,此时爆炸产物二次反应效应逐渐显露出来,其中对产物组分影响较大的二次反应是氧分子的离解,即



当温度升高时,氧的离解程度增大。而氧分子的离解不但降低了氧化剂的配比,减少了能量释放,而且此反应本身是吸热的。二次反应的结果进一步减少了能量释放,以至使实测值比理论计算值要低。

(4)湍流爆炸条件下实测的爆炸最大压力值与理论计算值比较一致的另一个原因是由于湍流条件下火焰速度的大幅度提高,减小了管中气体流动过程中通过管壁热传导而引起的损失,而更加接近于绝热爆炸条件。而一般理论爆炸压力值均按绝热爆炸假设进行计算。相反,对无障碍物的爆炸,由于火焰速度较低,通过管壁热传导而引起的损失就加大,所以实测爆炸压力值要低。

3.2 煤气浓度对火焰传播的影响

3.2.1 无障碍物时煤气浓度对火焰传播的影响

图 3、图 4 分别给出了煤气浓度对火焰传播速度 v_f 和爆炸压力影响的曲线,对曲线进行分析可以得出以下结论:

(1)当煤气浓度接近爆炸上、下限时,煤气的燃烧速度较低,火焰传播速度很慢,产生的最大压力低于 100kPa;当煤气浓度增加时,火焰传播速度逐渐加快,接近化学当量浓度(20%)时,火焰在管道中传播速度达到最大,产生的平均最大压力达到 1MPa。

(2)随着火焰的向前传播,不同浓度的煤气/空气混合物火焰速度都有所增大,增大到一定位置时火焰速度达到最大,接着减小,而后又增大。这一方面是由于湍流造成的火焰的折叠既可以导致火焰的加速,也会导致折叠面上热和自由基的输运速度的扩散造成的火焰熄灭。因此火焰折叠带来了两种竞争机制,火焰加速与否是由这两种竞争机制的综合效应决定的。另一方面由于管壁热传导而引起的损失,也会导致火焰传播速度有所下降。

(3)在无障碍物时,随着火焰的向前传播,不同浓度的火焰速度都有所增大,这种加速作用主要是由于管道中预混气体被点燃后,燃烧波从封闭端开始向另一端传播,由于波后的燃烧产物受到封闭端的限制,从而使燃烧波后的压力和温度迅速提高,使得燃烧波的传播逐渐加速,由此在波前形成压缩波。燃烧波就是在这种被压缩波预压过的气体内通过。很显然由于燃烧波后的压力和温度的不断升高,燃烧波逐步加速并不断向波前发射压缩波,而且此压缩波的速度也逐步提高,这便是火焰前未燃气体受到前驱压缩波作用而被加热和压缩的正反馈微分加速机制^[8],这种机制对火焰早期加速阶段起作用。与此同时,可以触发形成湍流火焰,一旦湍流火焰形成,则湍流加速机制起主导作用。

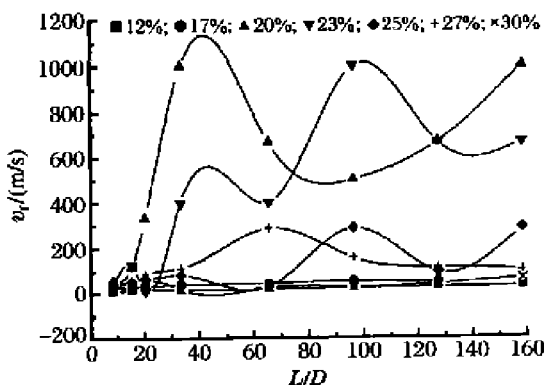


图 3 火焰速度沿管道变化图
Fig. 3 Flame speed variation with L/D

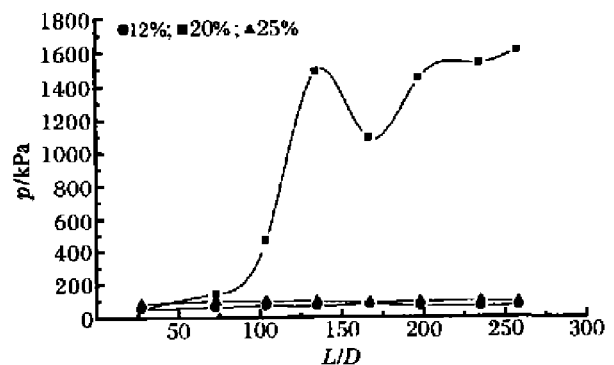


图 4 煤气爆炸最大压力随距离的变化
Fig. 4 Explosion pressure variation of different gas concentration with L/D

3.2.2 有障碍物时煤气浓度对火焰传播的影响

障碍物存在时煤气浓度对火焰传播速度和爆炸压力影响的曲线如图 5、图 6, 煤气浓度为 20% (化学当量浓度) 时管道中压力波传播速度 v_p 见表 1。障碍物环的孔径为 60mm, 环间距为 250mm, 3 环相串。在有障碍物时, 火焰传播速度明显加速, 产生的压力增大, 实测压力波速度增加明显, 障碍物对火焰有显著的加速作用。这种加速作用主要是由于火焰在管道内部传播时, 由于容器壁面的存在会在未燃气体中形成剪切和速度梯度场, 如果还同时存在障碍物, 则流场会进一步发生畸变而不再是径向对称, 并在障碍物表面的边界层和尾迹中形成速度梯度。在火焰未到达之前, 未燃混合物的平移流动就形成了速度梯度场和围绕障碍物的伴随流动场, 当火焰到达障碍物时, 随着火焰速度梯度场的会聚, 火焰表面发生畸变, 这不仅增大了火焰面积, 也相应增加了能量释放速率, 使未燃气体获得更高的流动速度, 这又会引起流场梯度的进一步增大, 导致火焰面更加扭曲, 使火焰加速, 加速火焰又增强湍流, 如此下去, 就形成了火焰燃烧速率和气体动力学流动结构之间的正反馈过程——火焰加速机理^[3-4,6]。

表 1 煤气浓度为 20% 时压力波传播速度 v_p

Table 1 Pressure wave speed v_p of city coal gas concentration is 20%

L/D	$v_p / (\text{m/s})$	
	无障碍物	有障碍物
27 ~ 73	163.0	555.6
73 ~ 104	580.2	781.3
104 ~ 135	690.5	881.3
135 ~ 167	790.2	861.3
167 ~ 198	850.5	981.0
198 ~ 235	984.0	1100.0
235 ~ 258	1200.0	1850.0

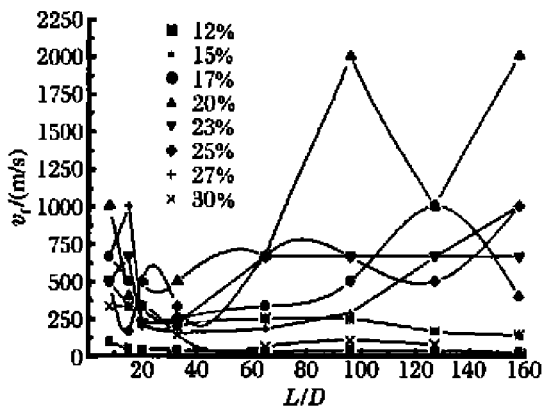


图 5 火焰速度沿管道变化图(存在障碍物)

Fig. 5 Flame speed variation with L/D

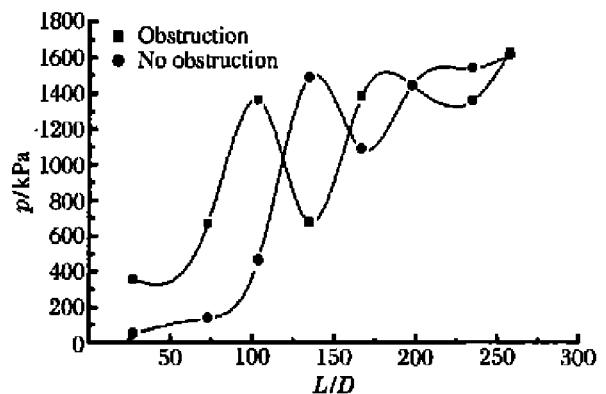


图 6 爆炸最大压力随距离的变化(化学当量浓度处)

Fig. 6 Explosion pressure variation of stoichiometric gas concentration with L/D

3.2.3 火焰传播特性分析

(1) 通过煤气浓度对火焰传播影响规律的分析, 可以将火焰传播划分为以下三个区域: 缓慢的亚声速湍流火焰传播; 高速湍流火焰传播, 即火焰的传播速度接近或高于燃烧产物的声速; 爆轰, 即火焰的传播速度接近或稍低于 CJ 爆轰速度。这三个区域可以从压力波的传播图 7、8 及表 2 反映出来。在煤气浓度接近爆炸上、下限时, 火焰属于缓慢的亚声速湍流火焰传播, 管道中的压力基本相同, 约为 60kPa, 当煤气浓度接近化学当量浓度时, 在无障碍物时, 火焰刚开始属于缓慢的亚声速湍流火焰传播, 接着表现出高速湍流火焰传播, 最后在一定的条件下可以达到爆轰, 如图 7 所示; 在有障碍物时, 图 8 表明火焰不经过亚声速湍流火焰传播, 直接加速进入高速湍流火焰传播, 最后达到爆轰。

(2) 在高速湍流火焰区, 由于压缩波阵面和火焰阵面之间面积收敛加剧, 导致管内压力急剧上升, 长径比为 33 处实测最大爆炸压力可达到 1MPa, 平均压力接近理论上计算的定容爆炸压力^[9]。在爆轰区, 长径比为 158 处实测最大爆炸压力达到 1.6MPa, 接近 CJ 爆轰压力^[9]。

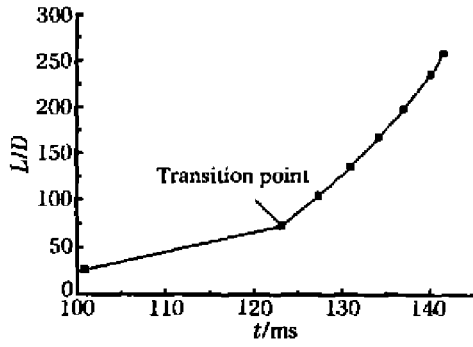


图 7 压力波传播曲线 (无障碍物)

Fig. 7 Pressure wave curve under no obstruction

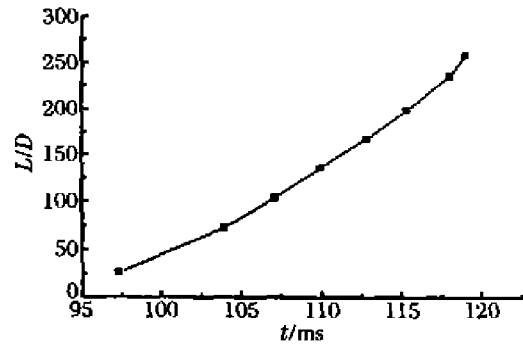


图 8 不同位置处的压力波传播曲线 (存在障碍物)

Fig. 8 Pressure wave curve under obstruction

表 2 煤气浓度对火焰传播速度的影响

Table 2 The effect of city coal gas concentration on flame speed

L/D	$v_f / (m/s)$					
	无障碍物			有障碍物		
	12%	20%	30%	12%	20%	30%
8	6.0	55.6	15.6	95.2	1000.0	333.3
20	13.0	333.3	52.6	45.0	500.0	333.3
33	15.0	1000.0	149.0	41.5	500.0	142.9
65	16.5	666.7	24.5	30.0	666.7	62.5
127	23.0	666.7	36.7	35.0	1000.0	76.9
158	25.0	1000.0	62.5	25.0	2000.0	52.6

3.3 障碍物阻塞比对火焰传播的影响

在相串中环数目 (6 环) 及环间距 (250mm) 相同的条件下, 研究环的孔径大小 (阻塞比) 对火焰传播的影响。

3.3.1 阻塞比对爆炸压力的影响

图 9 为煤气/空气混合物爆炸压力随阻塞比 B 的变化曲线, 图中曲线表明, 随着阻塞比的增大, 压力增大, 而且基本成线性增长。这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, 引起压力升高。升高的压力增量^[10]

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

式中: A 和 A' 分别是管道的内截面积和环形障碍物的内孔面积, v 是管道内障碍处气体的流动速度。

3.3.2 阻塞比对火焰速度的影响

图 10 显示了阻塞比对火焰速度影响的规律。当阻塞比较低时, 障碍物前火焰速度几乎与没有障碍物时的火焰速度相同, 这是由于阻塞比较小时, 形成的湍流对火焰面的扭曲贡献较小, 因此对火焰的速度影响也较小; 随着阻塞比的增加, 火焰速度增加, 阻塞比增加到一定程度时, 火焰速度开始下降, 这是由于燃烧波前气体流动速度受到阻塞而减小,

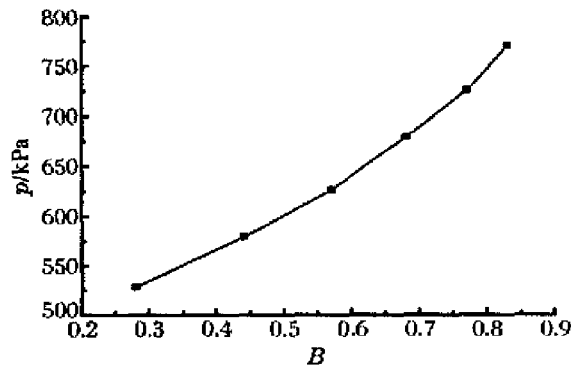


图 9 压力峰值随阻塞比的变化曲线

Fig. 9 Pressure peak for different blockage ratio

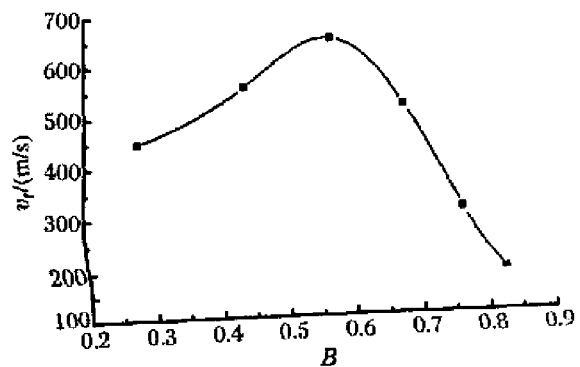


图 10 火焰速度随阻塞比的变化曲线

Fig. 10 Flame speed for different blockage ratio

火焰速度相应也减小,虽然阻塞比的增加导致湍流燃烧速度增加,但其增加的幅值小于波前气流减小的幅值^[5]。因此,火焰速度最终减小。当障碍物诱导的湍流消失时,火焰速度又降到没有障碍物时的火焰速度。

3.4 火焰速度与超压之间的关系

图 11 为煤气爆炸过程中火焰速度和超压的相互关系曲线,从图中看出,超压与火焰速度有关,当火焰速度增加时,超压增加,火焰速度降低时,超压减小。这是由于在煤气爆炸过程中,燃烧产物膨胀,火焰阵面前形成压缩波,火焰传播速度越快,压缩波波阵面到火焰面之间面积收敛越急剧,爆炸压力就越大^[3],引起的破坏效应就可能越大。

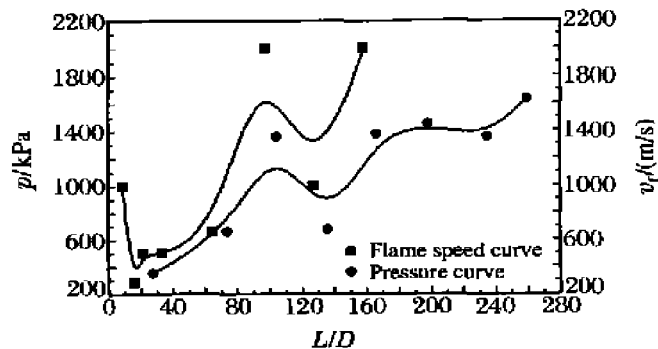


图 11 不同位置处火焰速度与爆炸压力的曲线

Fig. 11 Flame speed and explosion pressure for L/D

4 结 论

(1)实验结果表明,障碍物存在时,爆炸最大压力提高约 20%,理论计算最大爆炸压力基本上接近湍流爆炸压力。

(2)在火焰传播的通道上设置障碍物,对火焰具有明显的加速作用,这种加速可归功于障碍物诱导的湍流区对燃烧过程的正反馈。

(3)火焰传播特性与煤气浓度有很大的关系,当煤气浓度接近爆炸上、下限时,火焰属于缓慢的亚声速湍流火焰传播,管道中的压力基本相同,当煤气浓度接近化学当量浓度时,在无障碍物时,火焰刚开始属于缓慢的亚声速湍流火焰传播,接着表现出高速湍流火焰传播,最后在在一定条件下可以达到准爆轰;在有障碍物时,火焰不经过亚声速湍流火焰传播,直接加速进入高速湍流火焰传播,最后达到准爆轰。

(4)环形障碍物阻塞比对火焰的速度和压力都有一定的影响,随着阻塞比的增加,火焰速度增加,阻塞比增加到一定程度时,火焰速度开始下降。压力随着阻塞比的增加而增加,而且基本成线性增长。

参考文献:

- [1] Moen I O. The influence of turbulence on flame propagation in obstacle environment[A]. First International Specialist Meeting on Fuel-Air Explosions[C]. Montreal, 1982: 101-135.
- [2] Hijertager B H, Fuher K, Parker S J. Flame acceleration of propane-air in a large-scale obstructed tube[A]. Dynamics of Shock Wave, Explosions and Detonations[M]. 1984, 94: 504-522.
- [3] 林柏泉. 瓦斯爆炸动力学特征参数的测定及其分析[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 164-167.
LIN Bai-quan. The measurement and analysis of dynamics feature parameter in gas explosion[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(2): 164-167.
- [4] 余立新, 孙文超, 吴承康. 氢/空气火焰在半开口有障碍管道中的传播特性[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(1): 27-30.
YU Li-xin, SUN Wen-chao, WU Cheng-kang. Flame propagation of H_2 -air in a semi-open obstructed tube[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002, 8(1): 27-30.
- [5] 樊未军, 孙文超, 吴承康. 爆炸波除灰器中火焰传播及压力波形研究[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(4): 217-220.
FAN Wei-jun, SUN Wen-chao, WU Cheng-kang. A study on flame propagation in a gas-explosion ash remover[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(4): 217-220.
- [6] 刘晓利, 李鸿志, 叶经方, 等. 障碍物对铝粉火焰加速作用的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(1): 54-58.
LIU Xiao-li, LI Hong-zhi, YE Jing-fang, et al. An experimental study on the accelerating effect of the aluminum dust flame with obstacles[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(1): 54-58.

- [7] 卢捷, 王成, 张文凯, 等. 常压、高温条件下煤气爆炸特性的研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23 增刊: 302—306.
LU Jie, WANG Cheng, ZHANG Wen-kai, et al. Study on coal gas explosion characteristics under pressure and high temperature[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 23 suppl: 302—306.
- [8] 孙锦山, 朱建士. 理论爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [9] 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.
- [10] 陈爱平. 管道内流动气体爆炸问题的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 347—352.
CHEN Ai-ping. Experimental study on the problems of flowing combustible gas explosion in pipeline[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4): 347—352.

Study on flame propagation and acceleration mechanism of city coal gas

LU Jie¹, NING Jian-guo¹, WANG Cheng^{1*}, LIN Bai-quan²

(1. National Key Lab for the Prevention and Control of Explosion Disaster,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Energy Science and Engineering, China University
of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China)

Abstract: An experimental study on acceleration mechanism of flame propagation of city coal gas-air mixture was conducted in a closed obstructed duct with 80mm diameter and 21mm length, and acceleration mechanism of flame with or without obstructions is researched. Acceleration mechanism of flame propagation owes mainly to the positive feedback of unburned gas heated and compressed by the leading compression wave and the turbulence region induced by obstacles for combustion process. The experiment results indicates that maximum explosion pressure can increase by 20% when obstacles are present, the maximum explosion pressure of theoretical computation results accord with the experiment one well. Flame propagation Characteristics with the variation of equivalence ration of city coal gas-air mixtures is compared. Circular plates number and blockage ratio have some effects on the flame velocity and the overpressure. The experiment and calculation results are useful in providing some guidance for industrial application.

Key words: mechanics of explosion; flame acceleration; blockage ratio; city coal gas; obstructions

* Corresponding author: WANG Cheng

E-mail address: wangchero6@sina.com

Telephone: 010-68912762