

文章编号: 0253-9993(2009)04-0492-05

瓦斯爆炸过程中的流体力学行为

周忠宁, 菅从光, 高健康

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 实验研究了瓦斯爆炸过程中壁面粗糙度和管道截面突变这2种因素所引起爆炸流场改变对火焰传播和爆炸波的影响: 爆炸火焰速度由壁面粗糙度为2 mm时的275.1 m/s急剧增加到壁面粗糙度为4 mm时的580.26 m/s, 然后又下降到粗糙度为6 mm时的369.05 m/s; 管道截面突然扩大或缩小均引起爆炸火焰速度迅速增加, 火焰速度由 $L/D=16$ 时的15.2 m/s增加到 $L/D=165$ 时的1 287.7 m/s. 理论分析了由紊流导致的火焰速度变化在这2种工况变化管路中的不同表现以及爆炸过程中的紊流、激波、摩擦管流及拉瓦尔喷管效应等流体力学行为. 研究结果表明: 由壁面粗糙度及管道截面变化导致的紊流会使火焰传播速度大幅上升, 但紊流只是诱导火焰加速的一个次要因素, 由于管道截面突变引起的拉瓦尔喷管效应是导致火焰加速、加剧瓦斯爆炸烈度的根本原因.

关键词: 瓦斯爆炸; 流体力学; 壁面粗糙度; 紊流; 拉瓦尔喷管效应

中图分类号: TD712.7 **文献标识码:** A

Fluid mechanics behaviors in gas explosion

ZHOU Zhong-ning, JIAN Cong-guang, GAO Jian-kang

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The effects on flame propagation and explosion wave caused by the wall roughness and pipeline changing in gas explosion were examined experimentally: flame speed grew from 275.1 m/s to 580.26 m/s sharply when the wall roughness changed from 2 mm to 4 mm, then dropped to 369.05 m/s when the wall roughness changed to 6 mm. When the pipeline area expanded or reduced suddenly, the flame speed rapidly increased from 15.2 m/s ($L/D=16$) to 1 287.7 m/s ($L/D=165$). The different performance of the flame speed which caused by the turbulent flow in these two kinds of pipeline also were theoretically studied. The fluid mechanics behaviors in gas explosion, such as the turbulent flow, the shock wave, the friction pipe flow and the Laval nozzle effect, were analyzed. The results indicate that the turbulent flow caused by the wall roughness and the pipeline area can lead to the flame speed raised largely, but the turbulent flow only is a secondary factor which induced the flame acceleration, the Laval nozzle effect is basic factor which caused the flame acceleration, the gas explosion intensity aggravating.

Key words: gas explosion; fluid mechanics; wall roughness; turbulent flow; Laval nozzle effect

由于瓦斯爆炸的复杂性、快速性、危险性以及实验条件等限制, 目前在瓦斯爆炸理论中还有许多问题没有得到解决^[1]. 尤其是瓦斯爆炸过程中由于粗糙壁面及巷道截面突变引起的紊流和激波及其对火焰传播的影响, 一般认为紊流是导致瓦斯爆炸过程中火焰速度上升、爆炸烈度加剧的根本因素^[2-3]. 本文以实验和理论分析为基础, 给出了其流体力学行为的理论解释.

1 瓦斯爆炸能量平衡理论^[4]

在管道（巷道）瓦斯爆炸传播规律的研究中，由于波的强度、速度等参数在传播过程是变化的，通常按一维不定常流动处理。管内瓦斯爆炸能量平衡方程推导如图1所示，管内瓦斯爆炸在 $d\tau$ 时间内火焰波阵面前移 dx_1 距离，释热 δQ ，此过程中向管壁由对流和热辐射散热 δQ_1 ，通过导热、热辐射和扩散向未燃气体传热 δQ_2 ，通过膨胀做功，爆炸波能量、产物动能增加 dE_s ， dE_k ，同时时间内爆炸波（激波）阵面前移 dx_2 ，由能量平衡得

$$\delta Q = \delta Q_1 + \delta Q_2 + dE_s + dE_k + dR_m, \quad (1)$$

式(1)两边同除 $d\tau$ 得到爆炸释热速率，即管内瓦斯爆炸能量平衡方程式为

$$\begin{aligned} \dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \rho \dot{E}_s + \dot{E}_k + \dot{R}_m = F_1(T_g - T_{w0}) \left/ \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} \right) + \alpha_1 \varepsilon_g \sigma_0 T_g^4 F_1 - \lambda_{g1} F_2 \frac{\partial T}{\partial x} + \right. \\ \left. \alpha_{g1} \varepsilon_g \sigma_0 T_g^4 F_2 - \lambda_{\text{eff}} F_2 \frac{\partial T}{\partial x} + D_s F_1 (p_1 - p_0) + D'_1 F_2 \rho_1 \left(\frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} \right) + \dot{R}_m, \quad (2) \right. \end{aligned}$$

式中， \dot{R}_m 为综合爆炸过程中气体与管壁摩擦、激波压缩等各项损失的能量损失率； F_1 ， F_2 分别火焰波前后截面处面积； T_g 为火焰、高温燃烧产物温度； T_{w0} 为管壁外表面温度； α 为火焰高温燃烧产物与管内壁对流换热系数； δ 为管壁厚； λ 为管壁钢管导热系数； α_1 为管壁面对高温燃烧产物投入辐射的吸收率； ε_g 为高温燃烧产物的黑度； σ_0 为黑体辐射常数； λ_{g1} ， α_{g1} 分别为未燃气体的导热系数和吸收率； $\partial T/\partial x$ 为火焰阵面在传播方向的温度变化率； λ_{eff} 为气体有效导热系数； D_s ， D_1 分别为激波速度和火焰波速度； D'_1 为瓦斯混合气体燃烧速度； p ， u ， ρ ， e ， h ， T 分别为气体压力、气流速度、气体质量密度、比内能、焓、气体温度，下标 0，1，2 分别代表爆炸波后、火焰波前、火焰波后的位置。

2 瓦斯爆炸实验系统

瓦斯爆炸实验中所用的“瓦斯爆炸实验系统”结构如图2所示。

(1) 瓦斯爆炸实验腔体。实验中的爆炸实验管道是内径为 80 mm × 80 mm 的方管，用厚 12 mm 的 16Mn 钢板焊制，耐压值达到 20 MPa。每节管长度分别为 0.5，1.0，1.5，2.5 m，管道有火焰、温度、压力传感器和点火装置的安设孔。整体组合后的管道安放在组合式支架上，支架用 YB164-63 轻型槽钢焊制，结构稳定，装卸灵活。

(2) 动态数据采集分析系统。实验中选用 TST3000 动态数据采集系统，该系统具有 16 个通道（采样率 20%，采样精度 10 bit，采样长度 1 m），整个采样通道采用并行工作模式，各通道的时差在 3 ns 内，能满足微秒级数据采集速度的要求。

(3) 火焰速度测量系统。采用光敏三极管作为传感器，将光信号转换为电信号，调制后放大输出，其采集速度达到了微秒级。

(4) 压力测量系统。实验采用 YD205 型石英压电传感器，每一传感器均用独立的 YE5852 型电荷放大器配合。

(5) 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装置，其输出功率为 20 ~ 100 J。

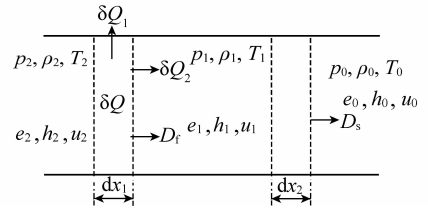


图1 管内瓦斯爆炸能量平衡示意
Fig. 1 Energy balance in gas explosion

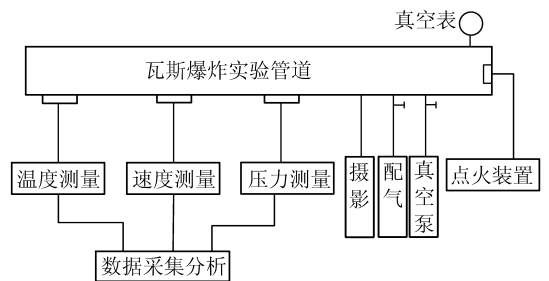


图2 瓦斯爆炸实验系统
Fig. 2 Test system of gas explosion

利用管道抽真空后形成的负压, 将配好一定浓度的瓦斯空气混合气体 (CH_4 , 浓度 9.5%) 送入管道。

3 实验结果及分析

在瓦斯爆炸过程中, 火焰传播速度、爆炸波是表征瓦斯爆炸特征的 2 个主要指标^[5]。针对这 2 个参数进行实验研究, 得出不同实验条件下瓦斯爆炸的规律。实验用的瓦斯爆炸管道是总长度为 4 m 的短管, 内径为 80 mm × 80 mm。

3.1 壁面粗糙度对瓦斯爆炸的影响

3.1.1 实验研究

实验中将光管以及 1 ~ 8 mm 的表面粗糙层高度进行研究 (实验管路两端开口), 得到不同粗糙度和光管的速度传播与超压峰值 (实验中峰值均发生在 $L/D=28$ 处) 规律的曲线, 如图 3 所示。

从图 3(a) 可看出, 火焰速度峰值从光管到 2 mm 粗糙管工况以近直线的方式上升,

达到 275.1 m/s。而 3 mm 粗糙管工况的火焰速度峰值为 269.27 m/s, 比 2 mm 工况低。到 4 mm 工况时, 速度峰值急剧增加到 580.26 m/s, 是 2 mm 工况的 2.15 倍。6 和 8 mm 工况的火焰速度峰值分别为 369.05 和 316.17 m/s, 呈下降趋势。由图 3(b) 可以看出, 峰值超压从光管到 2 mm 粗糙管也是以近乎直线的方式上升, 达到 348.9 kPa。3 mm 工况下降到 348.1 kPa, 下降幅值不大。但是 4 mm 工况的超压峰值达到 508.4 kPa, 是 2 mm 工况的 1.5 倍。此后, 6 和 8 mm 工况的超压峰值下降至 393.7 和 317.1 kPa。

同时实验中用拍摄速度为 1 000 幅/s 的高速摄影系统, 在距点火端 3 m 处, 对不同粗糙度管中的火焰传播进行摄影。从火焰传播图像分析得出各种工况下火焰传播过程是相似的。图 4 为粗糙度为 4 mm 时管内瓦斯爆炸火焰传播图像。第 1 至 5 幅为开始阶段的火焰图像, 火焰基本上是整体向前传播的; 第 36 至第 40 幅为中间阶段的火焰传播图像, 火焰基本上整体向后运动。

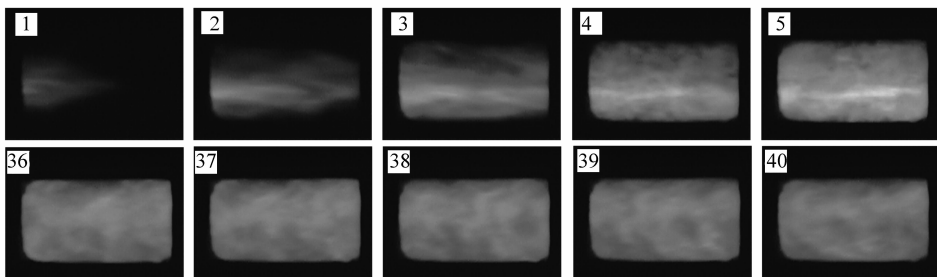


图 4 火焰传播图像

Fig. 4 Image of flame propagation

3.1.2 理论分析

燃烧区的向前流动传播处于较高宏观速度并且微观脉动非常强烈的湍流状态, 火焰在管道内传播时, 和其它流体一样在管壁附近存在混合边界层, 当 Re 变大和壁面粗糙度变大时, 会使壁面的粗糙凸起, 透过边界层导致层流变为紊流, 使得紊流的核心区朝壁面附近扩展, 使黏性底层变薄, 流体几乎是直接撞击壁面上粗糙层的凸起, 增加了紊流度^[6]。当管内粗糙壁面诱导紊流或使紊流度增大时, 加大了燃烧速率,

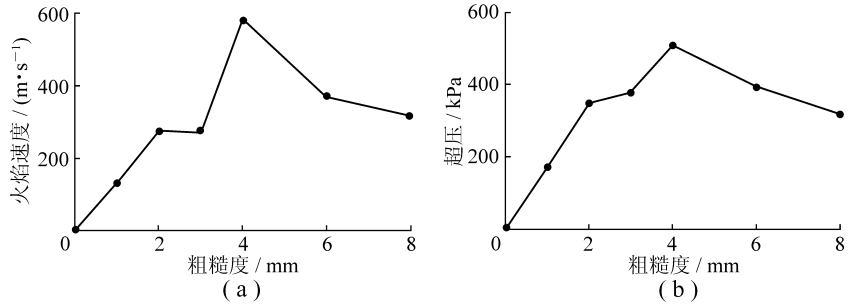


图 3 不同粗糙度时的火焰速度峰值和超压峰值

Fig. 3 Peak of flame speed and overpressure in different roughness

增大了爆炸释热速率，由管内瓦斯爆炸能量平衡方程式(2)可知，会使向未燃气体的传热量和激波能量(强度)增大，两者均使火焰燃烧速度(传播速度)进一步增加。同时，由粗糙管道湍流的达西摩擦因子表达式^[7] $\lambda = 2f_1[Re, e/D]$, Re 为管内平均雷诺数; e/D 为管道相对粗糙度, 可知, 当 Re 和 e/D 增大(火焰传播速度增加)时, 摩擦力也大大增加(紊流中有流体微团剧烈的横向掺混), 此时直管内的火焰传播为等截面的摩擦管流。等截面摩擦管流都有其确定的极限管长, 当火焰在管路中流动时, 在极限管长的管段发生了堵塞现象, 流速达到了声速(此时的声速随着气体的温度升高而升高)。堵塞使得气流压强增高, 对于亚声速火焰气流, 由于火焰气流压强增高, 扰动可以逆流往上游传播(火焰逆流现象如图4所示), 同时减小了气流速度; 对于超声速火焰气流, 堵塞引起的压强增高将产生激波, 激波之后是亚声速气流。

对于直管内的火焰流动, 由于壁面粗糙度的存在既引入了较大的总阻力, 同时也因为增加了燃烧区的紊流度而加速燃烧产生能量以推动反应进行和加速传播。摩擦的存在使得火焰的传播速度最大值向声速靠近, 壁面粗糙度对瓦斯爆炸过程的影响取决于抑制因素和激励因素的综合作用。

实验结果所反映出来的火焰峰值速度(向声速靠近)、爆炸波超压峰值随粗糙度变化的双峰三区曲线^[8]及爆炸过程的火焰图像验证了上述理论分析的合理性。

3.2 管路面积突变对瓦斯爆炸的影响

3.2.1 实验研究

实验管路设置如图5(实验管路出口端封闭)所示, 图6为变截面管道对瓦斯爆炸传播速度的影响。由图6可以看出: 当管道截面突然扩大或缩小时, 火焰速度均迅速增加, 火焰传播速度关系曲线斜率最高, 即加速程度最大。由 $L/D = 16$ (管道变截面前) 的 15.2 m/s 增加到 $L/D = 22$ (管道面积突扩) 时的 162.1 m/s , $L/D = 28$ (管道面积突缩) 时的 260.9 m/s , 然后逐渐加速, 在 $L/D = 165$ 处达到最大值为 $1\ 287.7 \text{ m/s}$ 。

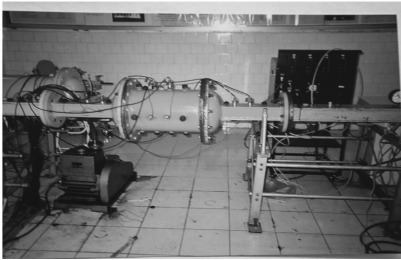


图5 变断面管道结构

Fig. 5 Arrangement of variable cross-section pipeline

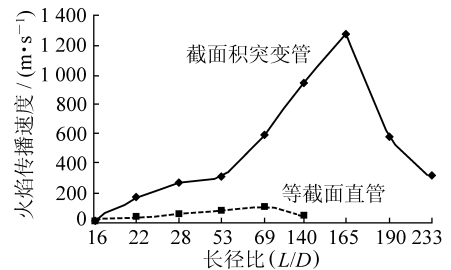


图6 管道面积突变对瓦斯爆炸火焰传播速度的影响

Fig. 6 The influence of pipeline area changing on flame propagation speed in gas exposition

3.2.2 理论分析

面积的突变打破了直管中火焰加速—堵塞(音速附近)—激波—火焰速度下降这样的平衡, 面积变化的管道实际上变成了拉瓦尔喷管的作用: 使得高温高压火焰气体的热能转换成高速气流的动能, 马赫数 $Ma < 1$ 的火焰气流在管道截面减少时得到了加速, $Ma > 1$ 的火焰气流在管道截面增加时得到了加速, 使得火焰速度达到了约4倍音速。由能量守恒方程可知, 瓦斯爆炸提供的热能保证了火焰高速时的高温高压, 这样就形成管内瓦斯爆炸加速过程中火焰、激波之间的正反馈传播机制, 诱导激波的位置前移, 最强激波位置前移, 激波强度增加(图7), 加剧了瓦斯爆炸的破坏力。

4 结 论

由粗糙壁面及管道面积导致的紊流会使火焰传播速度大幅上升。粗糙直管内的紊流流动阻力与紊流加剧能量释放速率这一对矛盾影响因素强弱决定了壁面粗糙度影响瓦斯爆炸过程的趋势, 使得火焰的传播速度最大值向声速靠近。在变截面瓦斯爆炸过程中, 紊流只是诱导火焰加速的一个因素, 由于管道面积突

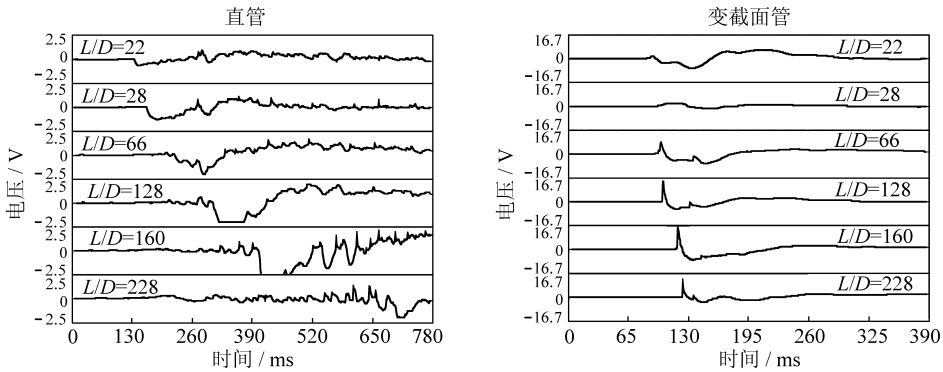


图 7 管道面积突变对瓦斯爆炸波的影响

Fig. 7 Effect of pipeline area changing on explosion wave in gas exposition

变导致的拉瓦尔喷管效应是导致火焰加速、加剧瓦斯爆炸烈度的根本因素。

综合以上的分析,在影响瓦斯爆炸过程火焰传播中的因素中,管道内各种结构诱导的紊流并不起决定作用,管道本身结构影响更大.因此在抑制井下巷道瓦斯爆炸传播过程的爆炸强度、减少爆炸造成的损失方面,要尽可能减少不必要的巷道断面面积突变.

参考文献:

- [1] 徐景德. 我国煤矿瓦斯爆炸的研究现状与发展方向 [J]. 华北科技学院学报, 2003, 5 (2): 5-8.
Xu Jingde. The actual condition and developing direction of gas explosion accidents studying in China [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2003, 5 (2): 5-8.
- [2] 翟成, 林柏泉, 菅从光, 等. 壁面粗糙度对瓦斯爆炸火焰波传播的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35 (1): 101-105.
Zhai Cheng, Lin Baiquan, Jian Congguang, et al. Influence of wall roughness on flame transmission of gas explosion [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35 (1): 101-105.
- [3] 林柏泉, 菅从光. 湍流的诱导及对瓦斯爆炸火焰传播的作用 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, 3 (2): 107-108.
Lin Baiquan, Jian Congguang. Inducement of turbulence and its effect on fire transmission in gas explosion [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 3 (2): 107-108.
- [4] 菅从光. 管内瓦斯爆炸传播特性及影响因素研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003: 71-73.
Jian Congguang. Research on influencing factors and propagation characteristics of gas explosion [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2003: 71-73.
- [5] 菅从光, 林柏泉, 宋正昶, 等. 湍流的诱导及其对瓦斯爆炸过程中火焰和爆炸波的作用 [J]. 实验力学, 2004, 19 (1): 39-43.
Jian Congguang, Lin Baiquan, Song Zhengchang, et al. Induction of turbulent flow and its effects on flame and explosion wave in gas explosion [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19 (1): 39-43.
- [6] 周光炯, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
Zhou Guangjiong, Yan Zongyi, Xu Shixiong, et al. Fluid mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [7] 孔珑. 工程流体力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
Kong Long. Engineering fluid mechanics [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 2000.
- [8] 林柏泉, 张仁贵, 吕恒宏. 瓦斯爆炸过程中火焰传播规律及其加速机理的研究 [J]. 煤炭学报, 1999, 24 (1): 56-59.
Lin Baiquan, Zhang Rengui, Lü Henghong. Research on accelerating mechanism and flame transmission in gas explosion [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24 (1): 56-59.