

大尺度管道爆炸火焰速度计算模型

张宇明, 郜冶, 邹高万, 董惠, 霍岩

(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 通过理论分析和实验方法研究了管道内爆炸火焰速度, 旨在为预测和评估爆燃火焰速度提供一种基于理论和实验的半经验计算方法. 研究表明, 火焰速度可以简化为湍流燃烧速度和热膨胀速度叠加的结果, 推导出利用压力计算湍流燃烧速度和热膨胀速度的模型, 并提出了利用压力、层流燃烧速度、湍流燃烧速度和热膨胀速度计算火焰速度的方法. 对贫燃($\varphi = 0.967$)和富燃($\varphi = 1.21, 1.45$)预混气体爆炸实验和计算分析表明, 压力沿长径比增大方向呈线性增大; 层流燃烧速度以线性关系正比于压力变化, 接近化学当量比情况下的变化速率较大, $\varphi = 1.21$ 条件下的层流燃烧速度值最大; 压力变化和层流燃烧速度增大对湍流燃烧速度的影响不明显, 对热膨胀速度的影响显著; 压力和层流燃烧速度不是湍流燃烧速度的决定性因素而是热膨胀速度的决定性因素.

关键词: 爆炸力学; 火焰速度; 压力; 大尺度管道

中图分类号: O389

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)05-0101-07

Calculating model of flame front speed during explosion in full-scale pipe

ZHANG Yuming, GAO Ye, ZOU Gaowan, DONG Hui, HUO Yan

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

Abstract: The method of calculating the flame front speed of the explosion in the pipe is researched by theoretical analysis and experiments. The model of calculating turbulent burning velocity and expansile velocity by pressure is deduced after the simplification of flame front speed to be the result of turbulent burning velocity and expansile velocity, and the method of calculating flame front speed is advanced by pressure, laminar burning velocity, turbulent burning velocity and expansile velocity. The calculating analysis and explosion experiments of the premixed mixture under the condition of the lean fuel (equivalence ratio equal to 0.967) and rich fuel (equivalence ratio equal to 1.21 and 1.45) indicate that the pressure is linear with the accretion of length to diameter ratio on the longitudinal direction, and the laminar burning velocity is linear with the pressure variation, and the change rate of laminar burning velocity is larger when the equivalence ratio approaches the stoichiometric one while the laminar burning velocity is the largest at the equivalence ratio of 1.21. The effect of pressure variation and laminar burning velocity increasing on turbulent burning velocity is not apparent, but is apparent on the expansile velocity, so the pressure and laminar burning velocity is the decisive factor in expansile velocity but not in turbulent burning velocity.

Key words: mechanics of explosion; flame front speed; pressure; full-scale pipe

目前对管道内火焰加速机理的认识还不足以

给出任意实验室或工业尺度条件下火焰速度的解析计算模型^[1]. 然而, 火焰加速所引发的爆燃向爆轰的转变却是工业安全领域爆炸灾害的主要关注问题和难点之一, 因此通过实验加以分析火焰加速机理, 来预测爆炸火焰速度尤为重要. 由于实验成本的限制, 国内外对超过 10 m 的工业尺度管道内的火焰加速实验相对较少^[2-5], 因此更需要开展进一步的研究. 从层流燃烧到爆燃, 由燃烧引

收稿日期: 2012-06-27.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (HEUCFT130203); 科技部对俄合作资助项目 (2011DFR70180).

作者简介: 张宇明(1984—), 男, 博士研究生;
郜冶(1953—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 张宇明, zhangyumingb09@hrbeu.edu.cn.

起的热膨胀能够产生以当地音速传播的不同强度的压力波,该阶段的火焰速度通常低于当地音速,所以压力波超前于火焰阵面,压力波与壁面反射波在火焰阵面前不断叠加对预混气体产生扰动,从而影响火焰传播的特性.与火焰阵面向同运动的压力波能够增大预混气体的湍流强度,促使火焰阵面加速运动;而与火焰阵面相向运动的压力波会产生逆向伴流速度,导致火焰内部出现分离现象和火焰速度下降,这种抑制作用较强时可使火焰熄灭^[6].本文旨在为预测和评估爆燃火焰速度提供基于理论和实验获得的半经验计算方法,以定容管道空间预混气体爆炸过程为研究对象,在对实际问题简化的基础上,推导湍流燃烧速度和热膨胀速度的表达式,然后通过实验数据对表达式进行修正,最终给出火焰速度的半经验计算模型.

1 火焰速度

火焰速度(S_F)是火焰阵面相对于静止坐标系(如地面)运动的矢量.基于研究内容和实验条件的限制,本文将定容空间限定为长度为 L ,直径为 D 的管道.爆炸过程中,火焰速度(S_F)可以分解成湍流燃烧速度(S_T)、摩尔增量速度(S_N)、热膨胀速度(S_E)和初始速度(S_I)的矢量和.出于对问题的简化,管道空间爆炸的火焰传播过程处理成一维非定常问题,并且点火源在管道一端,火焰阵面以平面形态向管道另一端运动,以远离点火源的方向为正,则火焰速度及其分量在未特别说明的前提下均为同向且正值,那么可以用标量的形式表示火焰速度及其分量.

摩尔增量速度是反应物向燃烧产物转变过程中,物质的量发生变化引入的速度,通常忽略该速度对火焰速度的影响^[7].如果点火时预混气体静止,则初始速度为零.那么,认为火焰速度主要由湍流燃烧速度和热膨胀速度叠加而成.

1.1 湍流燃烧速度

若将参考坐标置于火焰阵面上,预混气体以($-S_T$)的湍流燃烧速度通过火焰阵面.预混气体的质量变化速率为

$$\frac{dm_u}{dt} = A\rho_u(-S_T) = -\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2\rho_u S_T. \quad (1)$$

式中: m_u 为预混气体的质量,kg; t 为时间,s; ρ_u 为预混气体的密度,kg/m³;A为火焰阵面面积,m².

基于Lewis和Von Elbe^[8]提出的燃烧产物质量分数与压力的关系为

$$\frac{m_u}{m_{u0}} = \frac{p_e - p}{p_e - p_0}. \quad (2)$$

式中: m_{u0} 为爆炸前初始预混气体的质量,kg; p_e 为爆炸后最终压力,MPa; p_0 为爆炸前初始压力,MPa; p 为爆炸过程中管道内压力,MPa.

式(2)对时间求导得到预混气体质量变化速率与压力变化速率的关系式为

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p_e - p_0}{m_{u0}} \frac{dm_u}{dt}.$$

结合式(1)可得

$$\frac{dp}{dt} = \pi \frac{p_e - p_0}{m_{u0}} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \rho_u S_T. \quad (3)$$

预混气体经绝热压缩 $pp^{-\gamma} = \text{constant}$, $\gamma = 1.4$ 为比热容比,代换式(3)中的 ρ_u 且 $m_{u0} = AL\rho_u$,则可得到湍流燃烧速度的计算式为

$$S_T = \frac{L}{p_e - p} \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\gamma} \frac{dp}{dt}. \quad (4)$$

1.2 热膨胀速度

在 Δt 的时间段内,有 Δm 质量的预混气体参与燃烧,其体积由 ΔV_u 变为 ΔV_b ,物质的量由 Δn_u 变为 Δn_b ,之前已经假设忽略摩尔增量速度的影响,所以 $\Delta n_u = \Delta n_b$.用状态方程表达燃烧所引发的体积变化率为

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta V_b - \Delta V_u}{\Delta t} = \frac{R}{p}(T_b - T_u) \frac{\Delta n_b}{\Delta t}. \quad (5)$$

式中, $R = 8.3145 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 为摩尔气体常数.因为 $\Delta V = A\Delta l/\Delta t$,而 $S_E = dl/dt$,则由式(5)可以得到热膨胀速度的表达式为

$$S_E = \frac{R}{Ap}(T_b - T_u) \frac{\Delta n_b}{\Delta t}. \quad (6)$$

式中: T_u 为预混气体的温度,K; T_b 为燃烧产物的温度,K; n_b 为燃烧产物的物质的量,mol.

用层流燃烧速度代换式(6)中的 $\Delta n_b/\Delta t$.

层流燃烧速度 S_L 的假设是在一定压力和温度的条件下,单位时间内单位面积上进入火焰阵面的预混气体量是恒定的,层流燃烧速度的数学描述^[7]为

$$S_L = \frac{1}{A} \frac{\Delta V_u}{\Delta t}.$$

实验数据表明 S_L 随反应物的温度和压力而变化,但是 S_L 的理论计算式很复杂. S_L 的经验式为

$$S_L = S_{L0} \left(\frac{T_u}{T_0}\right)^2 \left(\frac{p_0}{p}\right)^\beta.$$

式中: T_0 为爆炸前初始温度,K; S_{L0} 为初始温度和压力条件下的层流燃烧速度,ms⁻¹.

压力指数 β 是与可燃物的种类和当量比有关的参数. 通过状态方程将火焰阵面单位面积的容积变化率表示成物质的量的变化率, 结合层流燃烧速度的定义式, 可以得到

$$\frac{dn_b}{dt} = S_{l0} \frac{T_u}{T_0} \frac{Ap}{R} \frac{M_u}{M_b} \left(\frac{p_0}{p}\right)^\beta \quad (7)$$

式中: M_u 为预混气体的相对分子质量, kg/mol; M_b 为燃烧产物的相对分子质量, kg/mol.

因为 $\Delta n_u = \Delta n_b$, 所以由质量守恒可知, $M_u = M_b$. 那么将式(7)代入式(6)中得到

$$S_E = S_{l0} \frac{T_u(T_b - T_u)}{T_0} \left(\frac{p_0}{p}\right)^\beta$$

将定容爆炸过程作为绝热压缩过程处理, 那么预混气体温度 T_u 和燃烧产物温度 T_b 的计算式为

$$T_u = T_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1-1/\gamma}, T_b = T_e \left(\frac{p}{p_e}\right)^{1-1/\gamma}$$

则热膨胀速度的计算式为

$$S_E = \frac{S_{l0}}{T_0} \left(\frac{p_0}{p}\right)^\beta \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1-1/\gamma} \left[T_e \left(\frac{p}{p_e}\right)^{1-1/\gamma} - T_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1-1/\gamma}\right] \quad (8)$$

1.3 层流燃烧速度

在热膨胀速度的计算中包含了预混气体在初始温度和压力条件下的层流燃烧速度 S_{l0} , 由于层流燃烧速度受温度、压力和当量比的影响较大, 所以需要根据本文实验条件对层流燃烧速度做出修正, 而且层流燃烧速度是可燃气体的固有属性, 无法通过理论推导得到计算式, 只能以实验方法获得经验式. 国内外学者对不同可燃气体的层流燃烧速度进行了大量研究^[9-12], 如甲烷、丙烷、氢气等, 但是针对液化石油气(LPG)的实验数据相对较少. 本文实验是用LPG-空气混合物作预混气体营造爆炸环境, 根据可利用的实验数据^[13-14]拟合LPG-空气预混气体层流燃烧速度随当量比变化的经验公式用于层流燃烧速度的计算.

本文根据文献[13-14]的实验数据对LPG-空气预混气体的层流燃烧速度进行拟合, 如图1所示, 并参考文献[14]提出的多项式形式的经验公式, 给出参考温度 $T_r = 298 \sim 300$ K 和压力 $p_r = 0.1$ MPa条件下层流燃烧速度的计算式为

$$S_{Lr} = -1937.15 + 4380.57\varphi - 2594.37\varphi^2 + 461.4\varphi^3$$

文献[13-14]的实验条件 $p_r = 0.1$ MPa、 $T_r = 298 \sim 300$ K 与本文实验的初始条件 $p_0 \approx 0.1$ MPa、 $T_0 \approx 303 \sim 305$ K 略有不同, 而且爆炸过程中温度和压力是不断变化的, 所以层流燃烧速度也是不断变化的. 参考文献[14]提出的温度指数 α 和压力指数 β 的修正式计算爆炸过程中的层流燃烧速度为

$$\alpha = 2 + 2.75\varphi - 2.13\varphi^2$$

$$\beta = -0.137 + 0.029\varphi - 0.026\varphi^2$$

$$S_{l0} = S_{Lr} \left(\frac{T}{T_r}\right)^\alpha \left(\frac{p}{p_r}\right)^\beta$$

通过以上推导得到了湍流燃烧速度和热膨胀速度的计算式, 但是这两个速度并不是线性叠加表达火焰速度, 所以要通过实验方法研究两者之间的非线性关系.

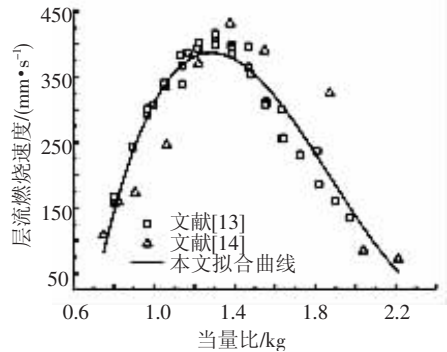


图1 层流燃烧速度

2 实验系统

实验系统构成如图2所示. 系统由爆炸管道、配气装置和数据采集设备组成.

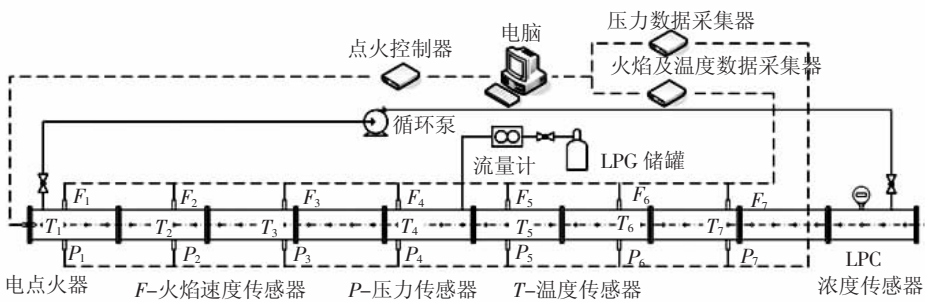


图2 实验系统

2.1 爆炸管道

爆炸管道内径 488 mm, 由 10 节直管段以外法兰方式连接而成, 每节直管段长 1.6 m, 整个管道两端以盲板密封, 形成 16 m 长的定容爆炸空间, 如图 3 所示. 爆炸管道配有高压电火花点火装置, 电点火器固定在爆炸管道一端的盲板中心位置.



图 3 爆炸管道照片

2.2 配气系统

配气装置主要由 LPG 储罐、流量计、LPG 体积分数传感器和气体循环泵组成. 选用液化石油气 (LPG) 作为营造爆炸环境的可燃气体. 注气口设置在管道中间, 采用流量配气法缓慢地向爆炸管道注入 LPG, 并通过 LPG 体积分数传感器监测管道内的浓度变化, LPG 体积分数传感器为深圳华瑞祥科技有限公司生产的 HR100L - GAS 管道固定式 LPG 体积分数传感器. 注气结束后, 循环 30 min 以上保证管道内气体充分均匀混合. 为消除初始湍流对火焰加速传播的影响, 循环结束后静置 30 min 点火进行实验. 本文使用的 LPG 组分构成如表 1 所示.

表 1 LPG 组分构成

LPG 组分	体积分数/%
H ₂	5
CH ₄	10
C ₂ H ₆	5
C ₃ H ₈	20
C ₃ H ₆	10
C ₄ H ₁₀	45
C ₄ H ₈	5

2.3 数采及控制设备

数采设备主要包括火焰传感器、压力传感器、温度传感器、可燃气体传感器和数据采集器. 压力传感器为宝鸡传感器研究所生产的 CYG1145 型压阻式压力传感器, 量程 0 ~ 1.0 MPa. 火焰传感器为自制设备, 通过光敏二极管捕捉爆炸产生的光信号测量火焰阵面运动位置. 温度传感器为自制设备, 采用 K 型 1 mm 热电偶裸丝制作. 数据采集器为美国生产的 DAQBOOK 数据采集器, 装配台湾研华公司生产的 PCL - 816 模块化数据采集卡, 采集时间为 0.2 ms. 整套数采设备配有统一的控制器, 实现同步点火和数采的功能.

火焰传感器 ($F1 \sim F7$)、压力传感器 ($P1 \sim P7$) 和温度传感器 ($T1 \sim T7$) 布置在爆炸管道的同截面的螺纹孔上, 布置位置距点火源的距离如表 2 所示.

表 2 火焰、压力和温度传感器布置

距离点火端/m	火焰传感器	压力传感器	温度传感器
0.6	F1	P1	T1
2.6	F2	P2	T2
4.6	F3	P3	T3
6.6	F4	P4	T4
8.6	F5	P5	T5
10.6	F6	P6	T6
12.6	F7	P7	T7

3 火焰速度计算模型

从计算式(4)和(8)可以看出压力是湍流燃烧速度和热膨胀速度的主要变量, 所以从压力变化分析入手, 依次分析压力变化对层流燃烧速度、湍流燃烧速度和热膨胀速度的影响, 最终得到火焰速度的计算模型.

3.1 压力变化规律

利用实验系统对 LPG 贫燃条件 (体积分数为 4%, $\varphi = 0.967$) 和富燃条件 (体积分数为 5%, $\varphi = 1.210$; 体积分数为 6%, $\varphi = 1.450$) 进行定容爆炸实验, 每种当量比条件至少重复 3 次实验, 根据结果复现性选择有效实验数据进行分析. 本文对实验数据运用量纲一化处理后进行分析, 主要是出于对结论的通用性的考虑和减小实验设备条件对数据结果带来的影响.

图 4 为不同当量比条件下量纲一的压力 ($p_0/p, p_0 = 0.1 \text{ MPa}$) 沿管道长径比 (x/D) 方向的变化情况. 图中 x 表示与点火源的距离, D 表示管道直径. 图 4 中的压力是火焰阵面依次到达火焰传感器 ($F1 \sim F7$) 时刻, 对应的同一横截面上的压力传感器 ($P1 \sim P7$) 测得的瞬时压力. 本文以下分析所指的压力变化均为火焰沿管道传播过程中, 火焰阵面前压力的瞬时值. 从图 4 可以看出, 从点火开始, 随着爆炸火焰的传播, 管道内的压力不断升高, 对应的量纲一的压力不断的下降. 不同当量比条件下, 爆炸火焰传播所引发的管道内压力变化基本相同且呈线性变化. 量纲一的压力沿长径比方向变化的拟合结果为

$$p_0/p = 0.9708 - 0.02688x/D.$$

在本文的定压爆炸情况下, 初期火焰速度在短暂增大后随压力的升高逐渐减小, 与压力呈反

比变化关系, 即 $S_f \propto 1/p$. 所以在此采用 p_0/p 的形式对压力进行量纲一化.

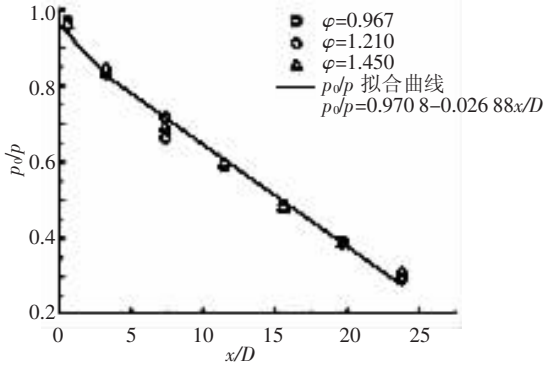


图 4 量纲一的压力沿长径比方向变化

3.2 层流燃烧速度随压力的变化

定容爆炸过程中, 在压力波的作用下预混气体的压力在不断的升高. 压力的变化会直接引起层流燃烧速度的变化从而影响火焰速度. 根据本文提出的层流燃烧速度的计算方法, 对不同当量比条件下 LPG 的层流燃烧速度进行计算, 其随压力变化的结果如图 5 所示.

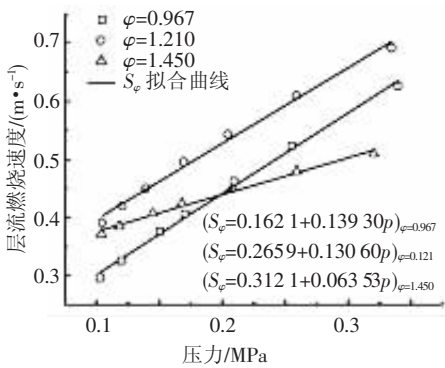


图 5 层流燃烧速度

对于每种当量比而言, LPG 的层流燃烧速度与压力的变化成正比, 随压力的升高而增大; 不同当量比之间比较而言, 层流燃烧速度的大小和变化速率不同, 接近化学当量比 ($\varphi = 1$) 条件下的层流燃烧速度增大较快, 而且富燃条件 ($\varphi = 1.210$) 下的层流燃烧速度值最大. 由图 4 可知, 不同当量比条件下的压力变化基本上是一致的, 所

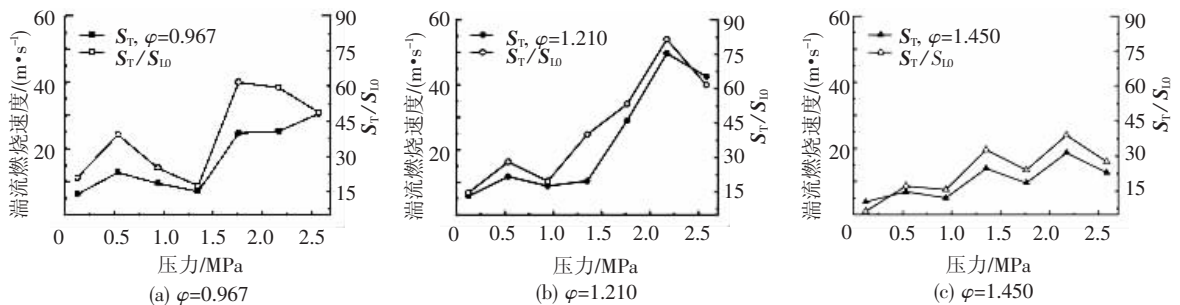


图 6 湍流燃烧速度及量纲一的湍流燃烧速度

以压力变化不是造成层流燃烧速度变化速率和大小的差异的主要原因. 每种当量比条件下的层流燃烧速度随压力变化的线性关系可以用式 (9) ~ (11) 表达, 可将其用于热膨胀速度的计算.

$$S_{T0}^{\varphi=0.967} = 0.1621 + 0.1393p. \quad (9)$$

$$S_{T0}^{\varphi=1.210} = 0.2659 + 0.1306p. \quad (10)$$

$$S_{T0}^{\varphi=1.450} = 0.3121 + 0.06353p. \quad (11)$$

3.3 火焰速度计算模型

根据本文给出的湍流燃烧速度的计算式 (4), 利用实验测得的压力数据对不同当量比条件下 LPG 的湍流燃烧速度进行计算, 结果如图 6 所示. 湍流燃烧速度呈非线性振荡式的变化特征, 随压力的升高整体呈增大的趋势, 这说明管道内的湍流强度随火焰阵面的运动在不断增大. 图 4 表明压力升高基本上为线性变化, 而湍流燃烧速度的变化表现出较强的非线性特征, 说明压力不是影响湍流燃烧速度的直接原因. 压力是通过对预混气体造成扰动, 增大火焰阵面前预混气体的湍流强度来影响湍流燃烧速度的, 而湍流强度受流动状态的影响很大, 所以压力的作用无法得到明显的表现. 从本文的实验数据计算结果来看, 利用压力参数计算湍流燃烧速度只能作为一种可使用的计算方法, 湍流燃烧速度不是压力的单值函数, 压力也不是影响湍流燃烧速度的决定性因素.

同时, 图 6 给出了以湍流燃烧速度与层流燃烧速度之比形式的量纲一化的湍流燃烧速度. 通过与湍流燃烧速度曲线的对比, 可以从量纲一化的湍流燃烧速度可以看出层流燃烧速度变化对其的影响程度, 由于本文层流燃烧速度随爆炸过程中引起的压力变化是线性的, 如果层流燃烧速度对湍流燃烧速度起决定性影响的话, 湍流燃烧速度曲线与量纲一的湍流燃烧速度曲线的形状应该比较相近. 图 6 所示只有 $\varphi = 1.450$ 条件下二者才有相似性, 说明趋近 $\varphi = 1$ 的预混气体爆炸所引发的流动状态的变化对湍流燃烧速度的影响更大.

图7是利用实验数据计算得到的热膨胀速度和量纲一的热膨胀速度. 不同当量比条件下预混气体爆炸所产生的燃烧产物热膨胀引发的速度随压力的升高而增大. 由于3种当量比条件下爆炸过程中, 火焰阵面前的压力变化基本一致, 所以不同当量比之间的热膨胀速度值差别不大. 通过对比热膨胀速度曲线和量纲一的热膨胀速度曲线可以看出, 两者的形状和变化趋势基本相同, 如上述可知, 这说明由压力影响的层流燃烧速度对热膨胀速度的变化起主要的作用. 可以从两方面对此进行解释: 1) 从实验现象角度出发, 利用纹影技术可以拍摄到爆炸火焰的传播过程, 在火焰传播的初期湍流强度很低, 层流燃烧速度占主导, 该阶段的火焰阵面运动速度主要是由层流燃烧速度和

热膨胀速度共同作用决定的, 而以火焰阵面为参考系的话, 预混气体确是以层流燃烧速度进入火焰阵面参与燃烧反应从而生成高温燃烧产物, 进而产生热膨胀速度, 所以在不考虑湍流的前提下热膨胀速度本身就是由层流燃烧速度控制的; 2) 从本文给出的计算热膨胀速度的方法来看, 模型本身假设火焰阵面以平面形态运动, 而真实的火焰阵面是褶皱的非平面形态, 这说明模型简化了湍流对火焰阵面和湍流燃烧速度的影响, 使热膨胀速度主要取决于层流燃烧速度. 当火焰速度分解成湍流燃烧速度和热膨胀速度时, 这种将热膨胀速度与层流燃烧速度抽离出来的处理方法可以使问题得到简化.

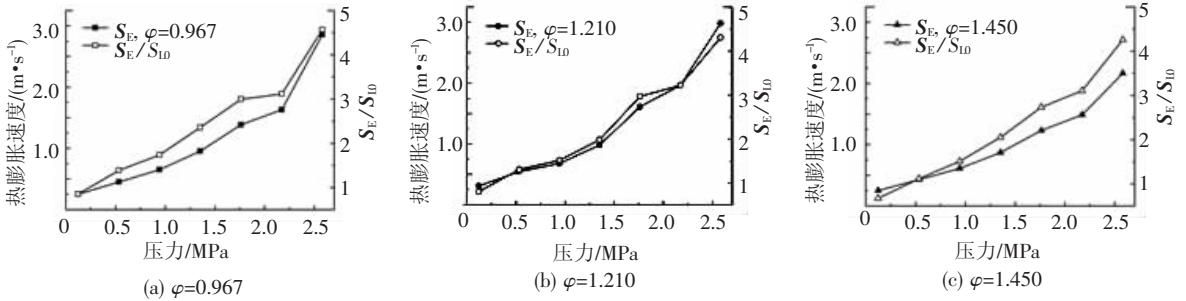


图7 热膨胀速度及量纲一的热膨胀速度

基于以上对层流燃烧速度、湍流燃烧速度和热膨胀速度随压力变化的分析, 认为定容空间爆炸的火焰速度主要由以上4个参数共同影响, 层流燃烧速度的影响隐含在湍流燃烧速度和热膨胀速度中, 火焰速度与以上4个参数的关系表示成

$$S_F \propto (S_{L0}, S_T, S_E, 1/p). \tag{12}$$

对式(11)中的各项进行量纲一化处理, 通过公式拟合得到火焰速度与层流燃烧速度、湍流燃烧速度、热膨胀速度和压力的关系式为

$$\frac{S_F}{S_{L0}} = A + B \left(\frac{S_T}{S_{L0}} \frac{S_E}{S_{L0}} \right)^{-2} + C \exp\left(-\frac{p_0}{p}\right). \tag{13}$$

式(12)中A、B、C分别为与当量比有关的待定参数. 利用式(13)计算得到的火焰速度值与实验值的对比如图8所示. 表3给出了对 $\phi = 0.967, 1.210, 1.450$ 的定容爆炸火焰速度计算式的待定参数和拟合度R-Square.

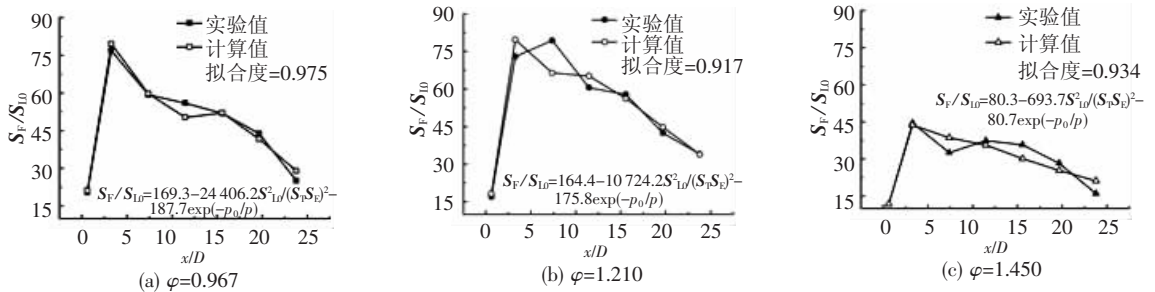


图8 量纲一的火焰速度

表3 定容管道爆炸火焰速度拟合结果

当量比	A	B	C	R-Square
0.967	169.3	-24 406.2	-187.7	0.975
1.210	164.4	-10 724.2	-175.8	0.917
1.450	80.3	-693.7	-80.8	0.934

4 结 论

1)在初始状态静止且忽略摩尔增量速度的定容管道爆炸情况下,火焰速度可以分解成湍流燃烧速度和热膨胀速度,这两个速度不同程度地受到爆炸过程中压力变化的影响。

2)通过对湍流影响火焰阵面的简化将定容管道爆炸过程处理成一维非正常问题,基于理想气体状态方程给出了计算湍流燃烧速度和热膨胀速度的方法。

3)本文实验条件下,贫燃($\varphi = 0.967$)和富燃($\varphi = 1.210, 1.450$)预混气体爆炸过程中的压力沿长径比增大方向呈线性增大;层流燃烧速度以线性关系正比于压力变化,贫燃和富燃预混气体的层流燃烧速度的大小和变化速率不同,接近化学当量比情况下的变化速率较大, $\varphi = 1.210$ 条件下的层流燃烧速度值最大;压力变化和层流燃烧速度增大对湍流燃烧速度的影响不明显,对热膨胀速度的影响显著,说明压力和层流燃烧速度不是湍流燃烧速度的决定性因素而是热膨胀速度的决定性因素。

4)压力通过对层流燃烧速度、湍流燃烧速度和热膨胀速度的影响,进而影响火焰速度。

参 考 文 献

[1] KERAMPRAN S, DESBORDES D, VEYSSIERE B. Study of the mechanisms of flame acceleration in a tube of constant cross section[J]. *Combustion Science and Technology*, 2000, 158(1): 71-91.

[2] GAMEZO V N, KARL ZIPF Jr R, SAPKO M J, *et al.* Detonability of natural gas-air mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(2): 870-881.

[3] THOMAS G, OAKLEY G, BAMBREY R. An experimental study of flame acceleration and deflagration to detonation transition in representative process piping[J]. *Process Safety and Environmental*

Protection, 2010, 88(2): 75-90.

[4] CHATRATHI K, GOING J E, GRANDESTAFF B. Flame propagation in industrial scale piping [J]. *Process Safety Progress*, 2001, 20(4): 286-294.

[5] 周凯元, 李宗芬. 丙烷-空气爆燃波的火焰面在直管道中的加速运动[J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 137-142.

[6] 林柏泉, 菅从光, 周世宁, 等. 受限空间瓦斯爆炸反射波及对火焰传播的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(1): 1-5.

[7] NAGY J, CONN J W, VERAKIS H C. Explosion development in a spherical vessel [R]. Report of investigations 7279, U. S; Bureau of Mines, 1969: 1-23.

[8] LEWIS B, Von ELBE G. *Combustion, Flames and Explosions of Gases*[M]. 3rd ed. London: Academic Press, 1987.

[9] KONNOV A A. The effect of temperature on the adiabatic laminar burning velocities of CH₄-air and H₂-air flames[J]. *Fuel*, 2010, 89(9): 2211-2216.

[10] HERMANN S R T E, KONNOV A A, BASTIAANS R J M, *et al.* Effects of temperature and composition on the laminar burning velocity of CH₄ + H₂ + O₂ + N₂ flames [J]. *Fuel*, 2010, 89(1): 114-121.

[11] CHENG Longtang, ZUO Huahuang, CHUN Jin, *et al.* Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane-hydrogen-air premixed flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(18): 4906-4914.

[12] PAREJA J, BURBANO H J, OGAMI Y. Measurements of the laminar burning velocity of hydrogen-air premixed flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(4): 1812-1818.

[13] RAZUS D, OANCEA D, BRINZEA V, *et al.* Experimental and computational study of flame propagation in propane-, n-butane-and liquefied petroleum gas-air mixtures [C]//Proceedings of the Third European Combustion Meeting. Chania, Greece: CNCSIS, 2007: 1-6.

[14] HUZAYYIN A S, MONEIB H A, SHEHATTA M S, *et al.* Laminar burning velocity and explosion index of LPG-air and propane-air mixtures [J]. *Fuel*, 2008, 87(1): 39-57.

(编辑 张 红)