

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0140

## 耦合火焰自加速传播的氢气云爆炸超压预测\*

李艳超, 毕明树, 高 伟

(大连理工大学化工机械与安全系精细化工国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 通过揭示当量比对氢气云爆炸火焰形态、火焰半径和爆炸超压峰值的影响规律, 本文拟建立耦合火焰自加速传播的氢气云爆炸超压预测模型。结果表明: 氢气云爆炸火焰传播速度由大至小对应的当量比依次是  $\Phi=2.0$ 、 $\Phi=1.0$  和  $\Phi=0.8$ 。  $Le < 1.0$  和  $Le > 1.0$  的氢气云爆炸火焰表面均出现胞格结构, 胞格结构的出现必然会增加火焰燃烧表面积, 进而出现“火焰自加速”现象。对于特定的当量比, 随着压力监测点和点火位置间距的增加, 爆炸超压峰值的正值和负值绝对值均单调减小; 对于特定的压力监测点, 爆炸超压峰值的正值和负值绝对值随当量比的关系存在些许差异; 不同当量比和监测点位置的爆炸超压峰值的负值绝对值大都高于正值。耦合火焰自加速传播的氢气云爆炸超压预测模型可成功预测不同压力监测点薄膜破裂前氢气云爆炸超压的发展过程。

**关键词:** 火焰自加速传播; 氢气云爆炸超压; 当量比; 胞格结构

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

### Theoretical prediction of hydrogen cloud explosion overpressure considering self-accelerating flame propagation

LI Yanchao, BI Mingshu, GAO Wei

(State Key Laboratory of Fine Chemicals, Department of Chemical Machinery and Safety Engineering,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** On the basis of revealing the effects of equivalence ratio on flame morphology, radius and maximum explosion overpressure, this work was aimed at establishing a theoretical model to predict hydrogen cloud explosion overpressure by considering self-accelerating flame propagation. The results indicated that the decreasing order of flame propagation velocity is  $\Phi=2.0$ ,  $\Phi=1.0$  and  $\Phi=0.8$ . For  $Le < 1.0$  and  $Le > 1.0$ , the cellular structures could be formed on the flame surface, which would increase flame surface area and result in self-accelerating flame propagation. When the equivalence ratio was fixed, the positive maximum explosion overpressure and absolute value of negative maximum explosion overpressure continue to decrease as the distance between pressure sensor and ignition source increases. As the equivalence ratio changes, there are some differences for positive maximum explosion overpressure and absolute value of negative maximum explosion overpressure at the fixed distance. The absolute value of negative maximum explosion overpressure was relatively higher than positive maximum explosion overpressure. Before rupture of thin film, the explosion overpressure evolution at various monitoring points could be reproduced using the theoretical model considering self-accelerating flame propagation.

**Keywords:** self-accelerating flame propagation; hydrogen cloud explosion overpressure; equivalence ratio; cellular structure

作为清洁可持续、零碳排放、能量密度高的理想二次能源, 氢能在促进碳减排目标、丰富可再生能源储存方式、保障能源供应安全等方面备受瞩目。由于较宽的燃烧范围、较低的最小点火能、易泄漏、

\* 收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2020-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(51674059, 51874067); 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT20GJ201)

第一作者: 李艳超(1989—), 男, 博士后, lyc092451@dlut.edu.cn

通信作者: 高 伟(1984—), 男, 博士, 教授, gaoweidlut@dlut.edu.cn

易扩散等危险属性,在制氢、储氢、加氢站建设等关键环节极易发生氢气云爆炸事故,如挪威奥斯陆加氢站爆炸、美国沃基肖氢气储运设备爆炸等。因此,为确保氢能源产业健康、高质量发展,加强氢气云爆炸的基础理论研究,势在必行。

近年来,学者们已对氢气云爆炸开展深入的实验、理论和数值模拟研究。实验研究方面,基于小尺度和大尺度实验, Kim<sup>[1-2]</sup>发现质热扩散不稳定和流体动力学不稳定会引发火焰自加速传播,火焰自加速传播会增强爆炸超压。相关实验结果表明<sup>[3-4]</sup>,在火焰不稳定作用下,火焰加速指数不会高于 1.5。理论研究方面,研究重点集中于建立考虑火焰加速传播的氢气云爆炸超压预测模型(如单极子声源模型)。但相关模型均不可避免地引入实验相关参数,致使难以提前评估氢气云爆炸超压<sup>[5-6]</sup>。数值模拟研究方面,基于大涡模拟, Molkov 等<sup>[7]</sup>构建了耦合火焰不稳定的燃烧速率模型,模拟结果成功再现了胞状火焰的演变过程,模拟爆炸超压和实验值相对相近。Tolias 等<sup>[8]</sup>对比了涡耗散概念模型和多现象燃烧模型对氢气云爆炸的预测效果,结果表明分形维数等于 2.3 时,多现象燃烧模型计算的爆炸超压和实验值较为吻合。

鉴于此,本文拟揭示当量比对火焰形态、火焰加速传播过程和爆炸超压的影响规律,建立耦合火焰自加速传播的氢气云爆炸超压预测模型。

## 1 实验装置和实验方法

图 1 是氢气云爆炸实验平台,该实验平台主要包括立方体框架(1 m×1 m×1 m)、高速摄像机、红外滤波片、循环泵、浓度监测仪、自由场声压传感器、数据采集仪、高压点火器及时序控制器等。采用聚乙烯薄膜密封立方体框架,以模拟开敞空间。实验之前,持续向立方体框架内通入氢气,当浓度监测仪达到设定浓度后,关闭循环泵,静置 3~5 min,在立方体框架中心点燃可燃气云。声压传感器和点火位置处于同一水平直线上,距离点火位置依次是 3、6、9、12 m。高速摄像机的拍摄速度是 10 000 s<sup>-1</sup>。高压点火器、高速摄像机、数据采集仪均由时序控制器进行控制。图 2 是氢气云爆炸典型超压曲线。可以发现,对于特定的压力监测点,爆炸超压先后经历正压-负压的过程,不同监测点的超压曲线发展趋势相当一致。随着压力监测点和点火位置距离的增加,正压峰值和负压峰值均单调减小。实验条件为不同当量比:  $\Phi=0.8$ ,  $\Phi=1.0$  和  $\Phi=2.0$ , 当量比定义如下:

$$\Phi = \frac{n_f/n_a}{(n_f/n_a)_{st}} \quad (1)$$

式中:  $\Phi$  为当量比,  $n_f$  为燃料摩尔数,  $n_a$  为空气摩尔数, 下标 st 表示化学计量比。

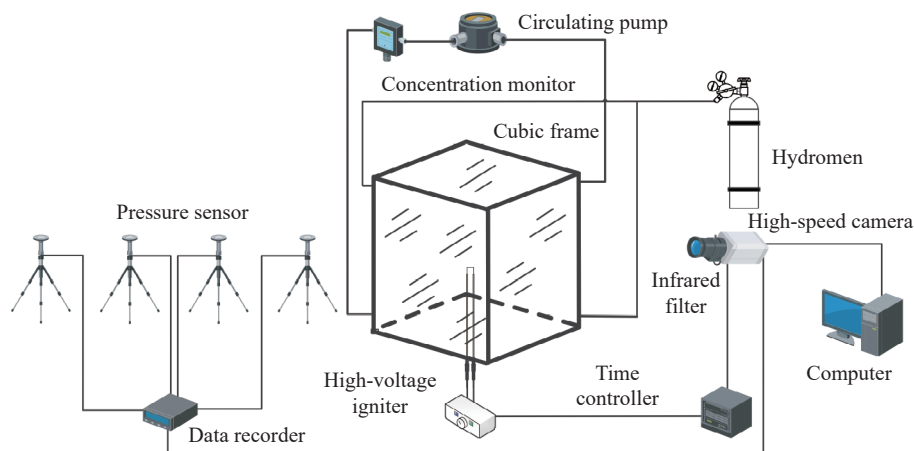
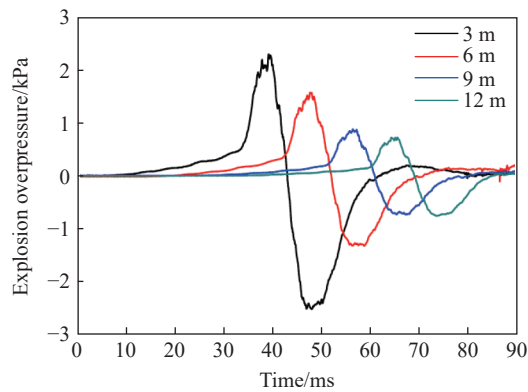


图 1 氢气云爆炸实验平台

Fig. 1 Experimental platform of hydrogen cloud explosion

图 2 氢气云爆炸典型超压曲线( $\Phi=2.0$ )Fig. 2 Typical curves of hydrogen cloud explosion overpressure ( $\Phi=2.0$ )

## 2 结果与讨论

图 3 是当量比对氢气云爆炸火焰形态的影响规律。可以发现, 高速红外滤波技术可有效捕获氢气云爆炸火焰形态的变化过程。点火后的初期阶段, 氢气火焰以球形形态自由膨胀, 随着氢气火焰底端和地面间距减小, 地面对球形膨胀火焰的阻碍约束作用增强, 球形火焰难以维持。另外, 基于火焰半径和时间的关系, 火焰传播速度由大至小对应的当量比依次是:  $\Phi=2.0$ ,  $\Phi=1.0$  和  $\Phi=0.8$ 。

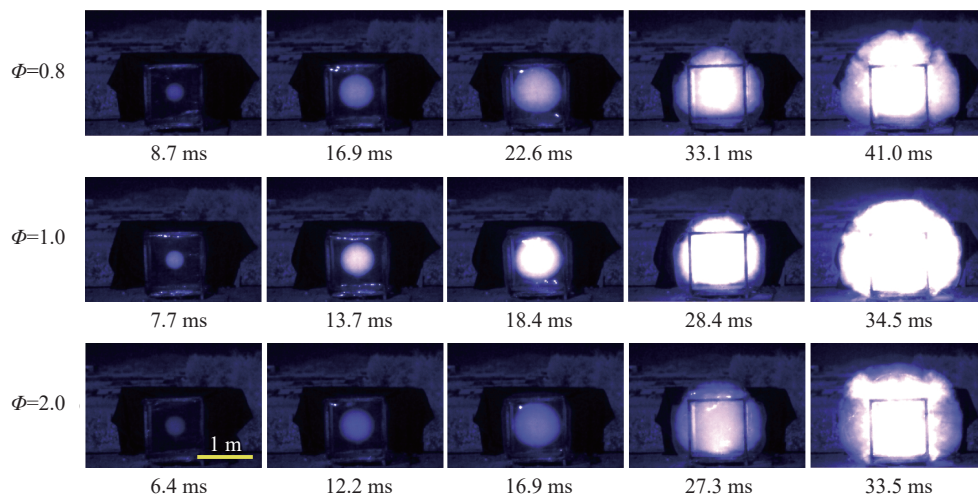


图 3 当量比对氢气云爆炸火焰形态的影响规律

Fig. 3 Effects of equivalence ratio on flame morphology of hydrogen cloud explosion

图 4 所示为  $Le < 1.0$  和  $Le > 1.0$  的氢气云爆炸火焰自加速传播特征。忽略火焰不稳定, 层流球形火焰半径可采用下式计算<sup>[9-10]</sup>:

$$r = \sigma S_L t \quad (2)$$

式中:  $r$  为层流球形火焰半径,  $\sigma$  为热膨胀比,  $S_L$  为层流燃烧速率,  $t$  为时间。

基于图 4 可知, 随着时间的增长, 层流球形火焰半径线性增加, 但实验测量火焰半径呈现非线性特征, 实验测量值和理论计算值的偏差逐步增大, 氢气云爆炸火焰出现“自加速”现象。通过对实验获取红外图像进行高斯变换和 Sobel 边缘处理, 可以发现,  $Le < 1.0$  和  $Le > 1.0$  的火焰表面均存在尺度不均的胞格结构, 胞格结构的形成势必增加火焰燃烧表面积, 进而导致火焰自加速。事实上, 火焰表面胞格结构的形成可归因于热扩散不稳定和流体动力学不稳定。热扩散不稳定是由火焰锋面内部热量和质量不均衡扩散造成的。  $Le=1.0$ , 球形膨胀火焰仅受流体动力学不稳定的作用;  $Le < 1.0$ , 热扩散不稳定迫使球形

膨胀火焰趋于失稳;  $Le > 1.0$ , 热扩散不稳定迫使球形膨胀火焰趋于稳定。流体动力学不稳定是本质不稳定, 必然会使膨胀火焰趋于失稳, 流体动力学不稳定可用热膨胀比和火焰厚度进行表征, 热膨胀比和火焰厚度的计算方法详见文献<sup>[11-12]</sup>。图 5 所示为当量比对热膨胀比和火焰厚度的影响。随着当量比的增加, 热膨胀比先增后减, 火焰厚度先减后增, 且热膨胀比在当量比  $\phi=1.0$  时达到最大值, 火焰厚度在  $\phi=1.5$  时达到最小值。需要强调的是, 随着火焰尺度的增加, 流体动力学不稳定的失稳效应增强, 对于当量比  $\phi=2.0$  的工况, 流体动力学不稳定的失稳效应超过热扩散不稳定的稳定效应, 致使球形膨胀火焰表面出现胞格结构<sup>[13-14]</sup>。

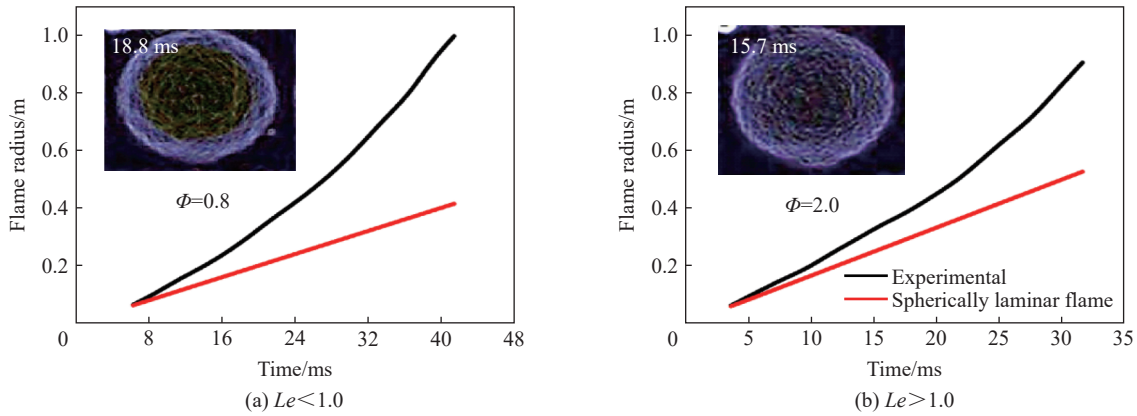


图 4  $Le < 1.0$  和  $Le > 1.0$  的氢气云爆炸火焰自加速传播特征

Fig. 4 Self-accelerating flame propagation of hydrogen cloud explosion of  $Le < 1.0$  and  $Le > 1.0$

基于图 2 可知, 氢气云爆炸会先后产生正压和负压, 爆炸超压是评估爆炸事故后果的重要指标, 建筑物结构损害程度和人员伤亡情况必然强烈依赖于正压和负压强度值, 因此, 预先评估氢气云爆炸超压对于建筑物结构设计和安全距离设定具有理论指导作用。图 6 是当量比对氢气云爆炸超压峰值(正值和负值)的影响规律。对于爆炸超压峰值的正值, 不同压力监测点的爆炸超压峰值由大至小依次是:  $\phi=2.0$ ,  $\phi=1.0$  和  $\phi=0.8$ , 随着压力监测点和点火位置间距的增加, 不同当量比下爆炸超压峰值单调减小。对于爆炸超压峰值的负值, 不同压力监测点的爆炸超压峰值的负值绝对值由大至小依次是:  $\phi=1.0$ ,  $\phi=2.0$  和  $\phi=0.8$ , 随着压力监测点和点火位置间距的增加, 不同当量比下爆炸超压峰值的负值绝对值亦单调减小。改变当量比和监测点位置, 爆炸超压峰值的负值绝对值大都高于正值, 因此, 事故调查中根据围护结构倒塌方向确定气云爆炸位置, 务必慎重考虑负压影响。

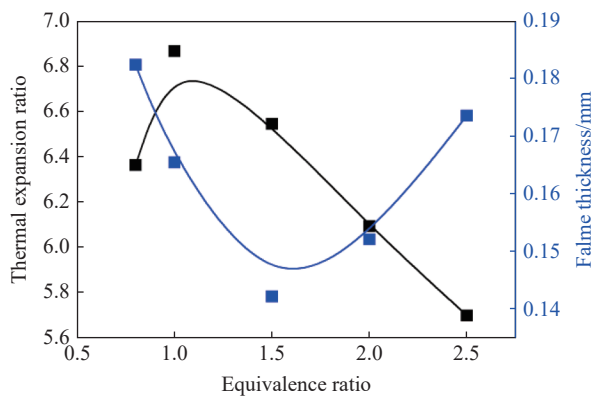


图 5 当量比对热膨胀比和火焰厚度的影响  
Fig. 5 Effects of equivalence ratio on thermal expansion ratio and flame thickness

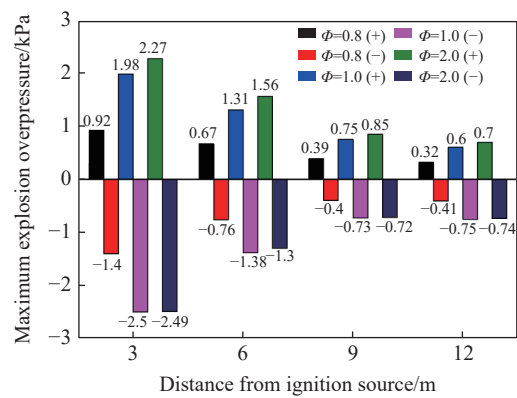


图 6 当量比对氢气云爆炸超压峰值(正值和负值)的影响规律  
Fig. 6 Effects of equivalence ratio on maximum explosion overpressure (positive and negative value)



为避免爆炸超压理论预测模型中存在不确定参数, 本文拟通过修正声学近似模型, 以预先评估氢气云爆炸超压, 声学近似模型如下<sup>[3]</sup>:

$$\Delta p = \frac{\rho_{\text{air}}}{d} \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left[ 2r(\tau) \left( \frac{dr(\tau)}{d\tau} \right)^2 + r^2(\tau) \frac{d^2r(\tau)}{d\tau^2} \right] \quad (3)$$

$$\tau = t - \frac{d}{c} \quad (4)$$

式中:  $\Delta p$  为气云爆炸超压,  $\rho_{\text{air}}$  为空气密度,  $d$  为压力监测点和点火位置间距,  $c$  为声速。

基于图 4, 火焰不稳定作用下, 氢气云爆炸火焰会出现自加速现象, 自加速火焰半径可采用下式计算<sup>[15]</sup>:

$$r = At^\alpha \quad (5)$$

式中:  $A$  为模型常数(当量比  $\Phi=1.0$  时,  $A=138$ ),  $\alpha$  为火焰加速指数( $\alpha=1.5$ )。

将式(5)代入式(3), 可获取耦合火焰自加速传播的氢气云爆炸超压预测模型, 详细如下:

$$\Delta p = A^3 \frac{\rho_{\text{air}}}{d} \frac{\sigma - 1}{\sigma} \alpha(3\alpha - 1) \tau^{3\alpha - 2} \quad (6)$$

图 7 所示为火焰形态对氢气云爆炸超压的影响规律。式(6)为自加速火焰模型, 层流火焰模型详见文献[9]。层流火焰模型假设球形膨胀火焰始终光滑, 但实际过程中火焰表面存在胞格结构, 致使理论计算值远低于实验测量值。式(6)不存在实验相关系数, 可成功预测不同压力监测点薄膜破裂前氢气云爆炸超压的发展过程。需要强调的是, 由于压力监测点和点火位置间距的增加, 气云爆炸超压波依次传至不同压力监测点, 因此不同压力监测点薄膜破裂时间存在“延迟”现象, 延迟时间是超压波传播 3 m 所需时间(约 9 ms)。另外, 薄膜破裂引起的湍流势必会增加火焰燃烧表面积, 进而使得薄膜破裂后实验测量超压高于理论预测值。归纳言之, 氢气云爆炸超压预测必须充分考虑火焰形态对燃烧速率的影响。

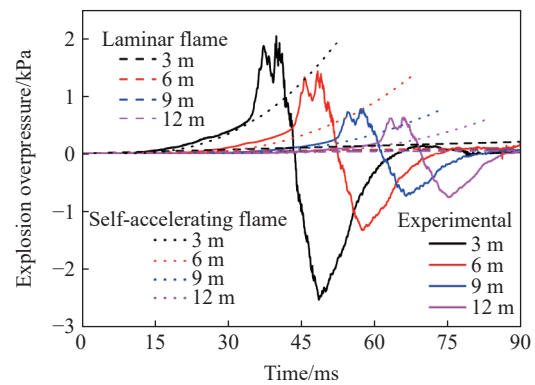


图 7 火焰形态对氢气云爆炸超压的影响规律( $\Phi=1.0$ )

Fig. 7 Effects of flame morphology on hydrogen cloud explosion overpressure ( $\Phi=1.0$ )

### 3 结论

为预先评估氢气云爆炸超压, 本文中获取了当量比对火焰形态、火焰半径和爆炸超压的影响规律, 建立了耦合火焰自加速传播的氢气云爆炸超压预测模型。结论如下:

(1) 由于热扩散不稳定和流体动力学不稳定的相互作用,  $Le < 1.0$  和  $Le > 1.0$  的氢气云爆炸火焰表面均会出现胞格结构, 进而引发火焰自加速传播;

(2) 随着压力监测点和点火位置间距的增加, 爆炸超压峰值的正值和负值绝对值均单调减小, 且不同当量比和监测点位置的爆炸超压峰值的负值绝对值均高于正值;

(3) 氢气云爆炸超压预测必须充分考虑火焰形态特征, 耦合火焰自加速传播的氢气云爆炸超压预测模型可成功预测不同压力监测点薄膜破裂前氢气云爆炸超压的发展过程。

### 参考文献:

- [1] KIM W K, MOGI T, DOBASHI R. Flame acceleration in unconfined hydrogen/air deflagrations using infrared photography [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(6): 1501–1505. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.09.009.

- [2] KIM W K, MOGI T, KUWANA K, et al. Prediction model for self-similar propagation and blast wave generation of premixed flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(34): 11087–11092. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.123.
- [3] WU F J, JOMAAS G, LAW C K. An experimental investigation on self-acceleration of cellular spherical flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(1): 937–945. DOI: 10.1016/j.proci.2012.05.068.
- [4] CAI X, WANG J, BIAN Z, et al. On transition to self-similar acceleration of spherically expanding flames with cellular instabilities [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 215(5): 364–375. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.02.001.
- [5] DESHAIES B, LEYER J C. Flow field induced by unconfined spherical accelerating flames [J]. *Combustion and Flame*, 1981, 40: 141–153. DOI: 10.1016/0010-2180(81)90119-X.
- [6] PU L, SHAO X, LI Q, et al. A simple and effective approach for evaluating unconfined hydrogen/air cloud explosions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(21): 10193–10204. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.041.
- [7] MOLKOV V V, MAKAROV D V, SCHNEIDER H. Hydrogen-air deflagration in open atmosphere: Large eddy simulation analysis of experimental data [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2198–2205. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.021.
- [8] TOLIAS I C, VENETSANOS A G, MARKATOS N, et al. CFD evaluation against a large scale unconfined hydrogen deflagration [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7731–7739. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.052.
- [9] THOMAS A, WILLIAMS G T. Flame noise: sound emission from spark-ignited bubbles of combustible gas [J]. *Proceedings of the Royal Society of London: Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1966, 294: 449–466. DOI: 10.1098/rspa.1966.0218.
- [10] LEYER J C, DESBORDES D, CLOUD J P S, et al. Unconfined deflagrative explosion without turbulence: experiment and model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1993, 34(2): 123–150. DOI: 10.1016/0304-3894(93)85002-V.
- [11] LAPALME D, LEMAIRE R, SEERS P. Assessment of the method for calculating the Lewis number of  $H_2/CO/CH_4$  mixtures and comparison with experimental results [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(12): 8314–8328. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.099.
- [12] SUN Z, LIU F, BAO X, et al. Research on cellular instabilities in outwardly propagating spherical hydrogen-air flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(9): 7889–7899. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.011.
- [13] LI Y, BI M, ZHANG S, et al. Dynamic couplings of hydrogen/air flame morphology and explosion pressure evolution in the spherical chamber [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(4): 2503–2513. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.044.
- [14] MUKAIYAMA K, SHIBAYAMA S, KUWANA K. Fractal structures of hydrodynamically unstable and diffusive-thermally unstable flames [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(11): 2471–2475. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.05.017.
- [15] GOSTINTSEV Y A, ISTRATOV A G, SHULENIN Y V. Self-similar propagation of a free turbulent flame in mixed gas mixture [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1988, 24(5): 563–569. DOI: 10.1007/BF00755496.

(责任编辑 王易难)