

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.01.025

## 点火位置对甲烷/空气预混爆炸 特性影响的数值模拟研究\*

王金贵,梁志星,胡强强,朱杭钦,胡超,魏林慧

(福州大学 环境与安全工程学院,福州 350116)

**摘要:** 密闭容器内预混气体爆炸非常复杂,为研究点火位置对甲烷/空气预混气体爆炸特性的影响,在初始压力为101 kPa和初始温度为300 K的环境下,开展1 m<sup>3</sup>密闭球形爆炸容器中10 vol %甲烷浓度的中心点火爆炸实验,并使用Fluent数值模拟软件,采用LES湍流模型和Zimont燃烧模型,研究不同点火位置(中心点火、0.5R点火、R点火)对容器内甲烷/空气预混气体爆炸特性的影响,包括火焰结构演化、爆炸温度、爆炸压力、爆炸压力上升速率。结果表明:(1)在中心、0.5R和R处点火时,火焰分别向四周膨胀直至容器壁面,轮廓由最初的“左薄右厚”逐渐转变为“左侧凸起的尖角”和在壁面处从“圆弧形”逐渐拉伸转变成“尖形”向左侧发展;(2)不同点火位置下温度场存在温度梯度,升温规律均由点火中心能量持续向外释放,温度不断积聚升高;(3)不同点火位置下爆炸压力变化趋势基本一致,由于壁面绝热,最终最大爆炸压力均稳定在766 kPa左右;(4)中心点火时最大爆炸压力上升速率最大,较0.5R点火和R处点火分别增大了94.5%和141.8%。

**关键词:** 点火位置; 甲烷/空气预混气体; 火焰前锋; 大涡模拟; 密闭球形容器

**中图分类号:** TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)01-0186-10

## Numerical Simulation of the Effect of Ignition Position on Methane/Air Premix Explosion Characteristics

WANG Jin-gui, LIANG Zhi-xing, HU Qiang-qiang, ZHU Hang-qin, HU Chao, WEI Lin-hui

(College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** The explosion of premixed gas in a closed vessel is very complicated. In order to study the effect of ignition position on the explosion characteristics of methane/air premixed gas, the central ignition explosion experiment with 10 vol. % methane concentration in a 1 m<sup>3</sup> closed spherical explosive vessel was carried out under an initial pressure of 101 kPa and an initial temperature of 300 K. Besides, the effect of different ignition positions (center ignition, 0.5R ignition, R ignition) on the explosion characteristics of methane/air premix in the vessel was studied by LES turbulence model and Zimont combustion model of the Fluent numerical simulation software. It includes flame structure evolution, explosion temperature, explosion pressure and explosion pressure rise rate. The results show that the flame expands around until the wall and profile of the vessel gradually change from the initial “left thin and right thick” to the “left raised sharp angle” and gradually stretch from the “circular arc” to the “sharp shape” to the left when the flame is ignited at the center, 0.5R and R. And then, there is a temperature gradient in the temperature

**收稿日期 (Date of reception):** 2022-12-28 **网络首发日期 (Published online):** 2023-03-10

**作者简介:** 王金贵 (1987-), 男, 博士、副教授, (E-mail) wjgfzu@126.com.

**通讯作者:** 魏林慧 (1998-), 女, 硕士研究生, (E-mail) 2462928706@qq.com.

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目(2020J01505)

**About the author:** WANG Jin-gui (1987-), male, Ph. D, associate professor, (E-mail) wjgfzu@126.com.

**Corresponding author:** WEI Lin-hui (1998-), female, postgraduate, (E-mail) 2462928706@qq.com.

**Fund Programs:** Natural Science Foundation of Fujian Province funded projects(2020J01505)

field at different ignition positions. The heating law is continuously released from the energy of the ignition center, and the temperature continuously accumulates and rises. Furthermore, the variation trend of explosion pressure under different ignition positions is basically the same. The final maximum explosion pressure is stable at about 766 kPa due to the wall insulation. Finally, the rise rate of the maximum explosion pressure in the center ignition is the highest, which is 94.5% and 141.8% higher than that in 0.5R ignition and R ignition, respectively.

**Key words:** ignition position; methane/air premixed gas; flame front; large eddy simulation; hermetically sealed spherical vessel

天然气作为一种清洁能源,已广泛应用于各行各业中。但是天然气易燃易爆,在运输、储存和使用过程中极易发生爆炸,将造成巨大的财产损失和人员伤亡<sup>[1,2]</sup>。在球形储罐容器内开展甲烷/空气预混气体爆炸实验,研究其爆炸特性,对天然气的安全储存具有重要的参考意义。

近年来,国内外学者针对可燃气体爆炸,从可燃气体浓度<sup>[3,4]</sup>、初始条件<sup>[5]</sup>、爆炸容器体积和形状等方面展开了大量的研究<sup>[6]</sup>。其中点火位置也是影响可燃气体爆炸的一个重要参数<sup>[7]</sup>。Kindracki 等和 Bi 等分别使用实验和数值模拟的方法研究了密闭管道内点火位置对甲烷/空气爆炸超压的影响<sup>[8,9]</sup>,研究结果均表明:管道中心点火产生的爆炸超压高于管道端部点火。在圆柱形容器中也是相同的结果<sup>[10,11]</sup>。Xiao 等使用长度为 530 mm 的密闭管道研究管道一侧不同点火位置下氢气/空气爆炸火焰传播特性<sup>[12]</sup>,研究结果表明:点火位置在管道中心时,火焰传播较为缓慢,火焰振荡较弱。孙从焯等

通过模拟对管道内可燃气体爆炸产生的温度场进行了分析<sup>[13]</sup>,点火位置距管道左端壁面越远,中间节点处温度越高,升温越快。Dai 等和 Zhang 等在 20L 球形容器中比较中心和壁面点火的爆炸危险性<sup>[14,15]</sup>,由于壁面点火下火焰更早接触容器壁,造成更多的热损失,因此壁面点火的爆炸强度小于中心点火。

点火位置对可燃气体爆炸影响的研究多集中于管道容器中,球形容器研究较少且为小尺度的。基于此,在中等尺度(1 m<sup>3</sup>)球形容器中进行甲烷/空气预混气体爆炸实验,并使用 Fluent 软件研究不同点火位置下甲烷/空气预混气体爆炸特性,为容器尺寸效应研究提供数据基础。

## 1 实验系统及三维几何模型

甲烷/空气预混爆炸实验系统由 1 m<sup>3</sup> 密闭球形爆炸容器、高速摄像系统、数据采集系统、配气系统及点火系统等组成,如图 1 所示。

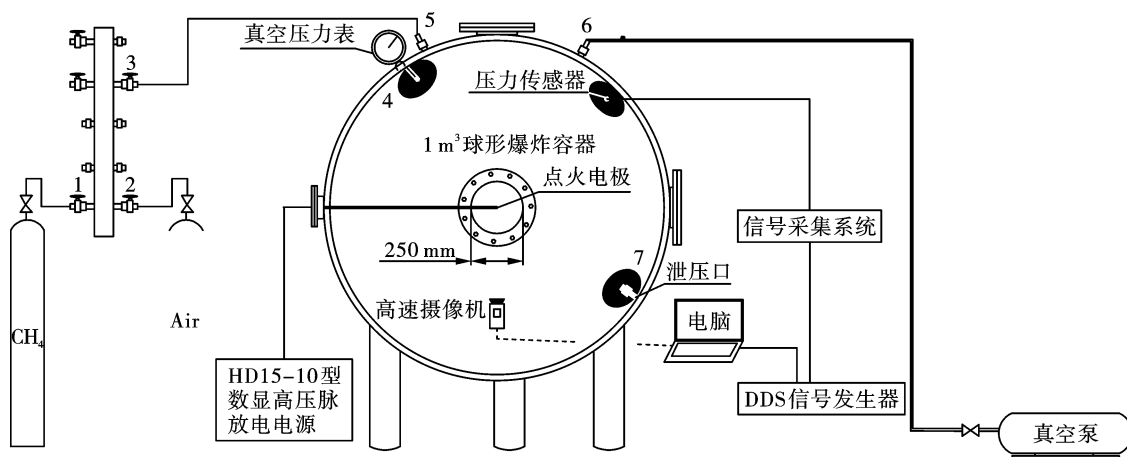


图 1 爆炸实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the explosion experiment system

1 m<sup>3</sup> 密闭球形容器实物图如图 2(a)所示,为实现爆炸过程的可视化,球形爆炸容器前后两侧均安装有直径为 250 mm、厚度为 50 mm 的透明石英玻璃视窗,高速摄像机(HX-3E)以 2000 Hz 的频率记录动态火焰演化图像。实验的压力信号采集系统由

压阻式压力传感器(ZXP660)及存储记录仪(MR8847A)构成。依据球形爆炸容器的实际尺寸等比例建立三维模型,采用 ICEM CFD 对几何模型进行结构化网格划分,如图 2(b)所示。

本次实验使用体积浓度为 10% 的甲烷/空气预

混气体。实验开始前使用真空泵将容器内部抽至真空状态,关闭真空泵并检查装置气密性,在确保内部压力无波动后,按照道尔顿分压定律配置体积浓度为 10% 的甲烷/空气预混气体,真空压力表的精度为  $\pm 0.01$  kPa,配气完成后静置 10 min,以保证气体混合均匀减少误差<sup>[16]</sup>。触发 DDS 信号发生装置同步启动数据采集系统,并通过同步控制器诱发高压脉冲放电开关,使点火电极产生电火花,点火电压为 15 kV,点火能量约为 500 mJ。本次实验均在初始压力为 101 kPa,初始温度为 300 K 的环境下进行,点火位置位于球形容器中心,针对该工况开展 3 次重复实验,并使用该组实验数据验证数值模拟的可靠性。

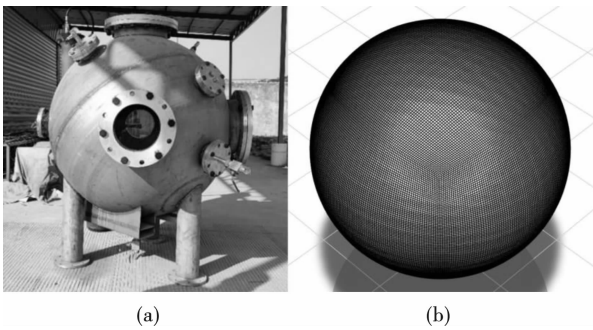


图 2 1 m<sup>3</sup> 密闭球形爆炸容器

Fig. 2 1 m<sup>3</sup> closed spherical explosive vessel

## 2 数学模型

### 2.1 湍流模型

预混火焰传播过程以湍流流动为主,本研究采用大涡模拟(Large eddy simulation, LES)作为球形容器内甲烷/空气预混爆炸数值模拟的湍流模型。大涡模拟方法介于 RANS 模拟与 DNS 模拟之间,通过滤波函数将大尺度涡和小尺度涡分离,大尺度涡流运动通过瞬时 Navier-Stokes(N-S)方程直接计算,而对于小尺度涡流运动采用亚网格(sub-grid scale, SGS)模型进行建模处理。模拟实验中控制方程被大涡模拟滤波后的三维瞬态方程为<sup>[17]</sup>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j) - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \tilde{h}_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{u}_i \tilde{h}_s) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} - \bar{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_i} [\rho (u_i \tilde{h}_s - \tilde{u}_i \tilde{h}_s)] \quad (3)$$

$$p = \rho RT \quad (4)$$

式中:“—”和“~”分别表示 LES 滤波的参量和质量权重滤波的参量; $\rho$  为密度; $p$  为压力; $t$  为时间; $u_i$  和  $u_j$  为速度分量; $\sigma_{ij}$  为应力张量; $\tau_{ij}$  为亚网格尺度应力; $h_s$  为显焓; $\lambda$  为热导率; $T$  为温度;亚网格模型选用 Smagorinsky-Lilly 模型。

### 2.2 燃烧模型

实际中的气体燃烧过程是湍流和化学反应相互作用的结果,本次仿真实验采用 Fluent 软件中提供的部分预混燃烧模型模拟甲烷/空气预混燃烧的化学反应情况。部分预混燃烧模型是预混燃烧模型和非预混燃烧模型的结合,该模型不仅可求解完全均匀预混合的气体,而且还可以通过求解几何混合分数方程确定预混可燃物的组分浓度。因此,本文采用部分预混燃烧模型中基于 C 方程的 Zimont 模型来模拟甲烷-空气预混气体的燃烧爆炸过程。在 Zimont 模型中,燃料和氧化剂在点火之前已经进行分子级别的混合,燃烧反应发生在一个极薄的火焰锋面中,使得未燃烧反应物向燃烧产物转变,并将未燃区与燃烧区分开。Zimont 模型通过求解一个输运方程得到反应进程变量  $c$ ,  $c$  为一个表征反应进程的标量,表达式如公式(5)所示

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_{i,eq}} \quad (5)$$

式中: $n$  为燃烧产物数, $Y_{i,eq}$ 、 $Y_i$  为平衡产物组分与产物组分  $i$  的质量分数。

### 2.3 初始条件与边界条件

模拟设置的甲烷浓度、初始温度、初始压力和点火情况均与实验条件保持一致。模型的边界条件设置为 wall,壁面为静止无滑移的绝热边界,局部化学平衡无热损失,故热通量和对流换热系数都设置为 0。采用 SIMPLE 算法求解进程变量和压力场,对流项为二阶逆风格式,扩散项为中心差分格式。为了计算快速收敛,采用 k-omega SST 模型对流场进行冷态计算,得到稳态计算的流场初始值,进而使用 LES 进行求解计算。点火位置及监测点设置情况如图 3 所示。

## 3 结果与讨论

### 3.1 模拟结果验证

#### 3.1.1 网格无关性验证

数值模拟中计算网格的尺寸会影响求解精度,网格尺寸越小,精度越高,但成本也随之增加。本文研究工况为中等尺度球形容器,其计算域远大于小

尺寸球形容器,在考虑计算成本、网格数量及质量的基础上,采用 ICEM CFD 软件对最小网格尺寸为 6、

7、8、9 和 10mm 五种网格尺寸使用相同的网格划分方法进行网格独立性分析。

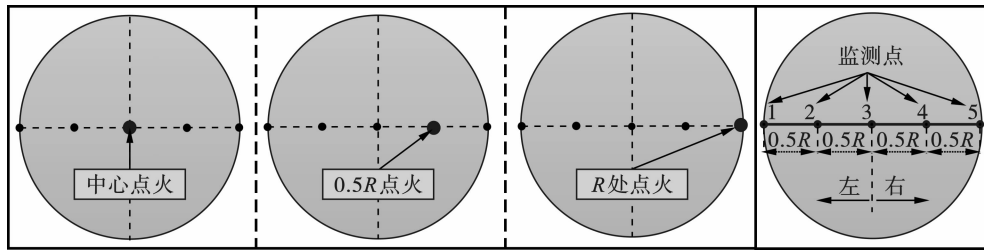


图 3 球形容器内点火位置及监测点设置情况(xy 平面)

Fig. 3 Ignition location and monitoring point setting in the spherical vessel(xy-plane)

图 4 为不同网格尺寸下爆炸超压随时间变化情况,从图中可以看出计算结果的差距随着网格尺寸减小逐渐缩小,这是因为空间离散误差对计算结果的影响随着网格细化逐渐降低,当计算结果不再随着网格尺寸减小而产生明显变化时,即使再对网格进行细化,结果曲线也不会有较大改变,但同时也增加了计算所需时间<sup>[18]</sup>。综合考虑计算效率、费用和精度,最终选取网格尺寸为 7 mm,整体网格数量为 223 w 进行后续计算。

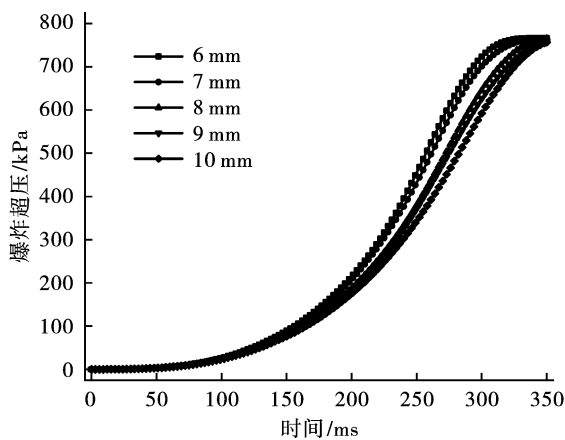


图 4 网格尺寸无关性验证

Fig. 4 Grid size independence verification

### 3.1.2 火焰演化图像

图 5 是中心点火条件下 10% 的甲烷/空气预混爆炸实验图像与模拟云图对比。预混气体点燃后,在自身的热膨胀作用下火焰迅速向外扩张;20 ms 时,火焰受点火电极的影响右侧向内凹陷,形成“苹果形”火焰结构;火焰前锋在能量传输作用下,火焰中心呈亮黄色,四周呈淡蓝色,这是由于反应区的光谱中具有 CH 和 OH 谱带以及一部分 CO 火焰光谱<sup>[19]</sup>;随后,点火电极杆的影响逐渐减小,40 ms 时,火焰以近似“球形”传播,最终以“球形”火焰形态传播至视窗边缘。由于实验过程中高速摄像机通过直

径为 250 mm 的石英玻璃视窗捕捉爆炸过程中局部动态火焰演化过程,而数值模拟云图为全尺寸密闭球形容器中火焰,故在图 5 中显示出火球大小存在差异。通过图 6 实验与模拟结果的火焰等效半径对比,能更加直观的对照实验图像与模拟云图的火焰大小。

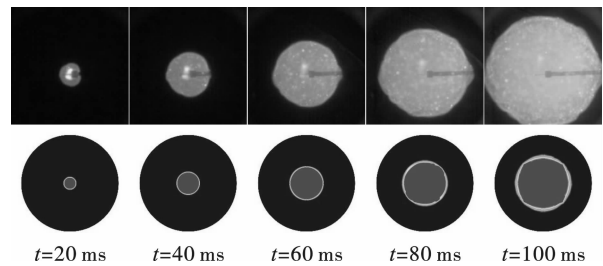


图 5 爆炸实验图像与模拟云图对比

Fig. 5 Comparison of experimental images of explosions with simulated cloud maps

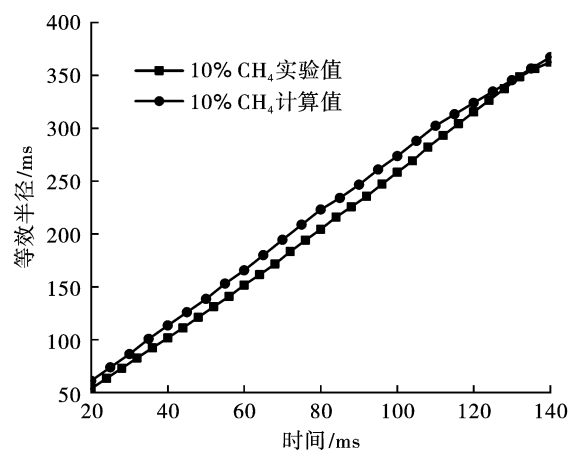


图 6 火焰等效半径实验结果与模拟结果对比

Fig. 6 Flame equivalent radius experimental results compared with simulation results

为更详细直观地显示火焰演化结构,图 7 为火焰传播过程进程变量  $c=0.2$  的等值面,代表预混火焰三维结构变化情况。火焰发展初期处于层流状

态,以“球形”结构膨胀,不断向未燃区域推进;随火焰不断演化,在 D-L 不稳定性、热-质扩散不稳定性和流体力学不稳定性等因素的耦合作用下,火焰面失稳,逐渐向湍流状态转变。 $t = 60 \text{ ms}$  时,观察到原本光滑平整的火焰轮廓上出现不规则的褶皱以及“胞状”结构,该现象随着反应的进行持续加剧; $t = 225 \text{ ms}$  时,火焰表面“胞状”结构开始破裂,如图中红色圆圈标记所示; $t = 230 \text{ ms}$  后,火焰“胞状”结构不断破裂,火焰表面出现大量裂纹;最后,预混可燃气体燃尽,火焰淬熄。

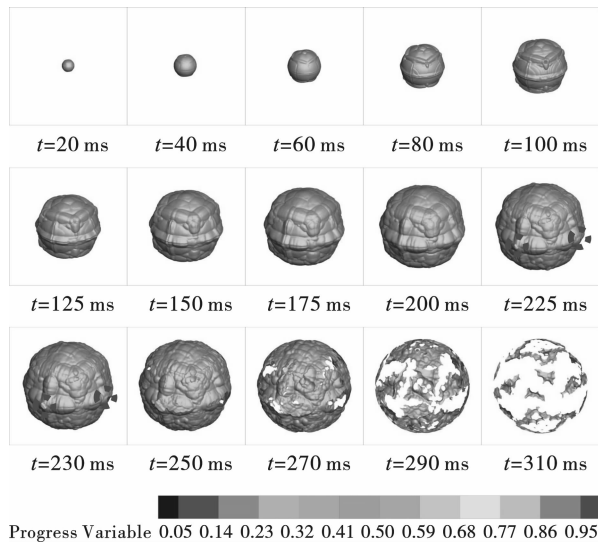


图 7 火焰进程变量  $c = 0.2$  三维等值面图像

Fig. 7 Flame process variable  $c = 0.2$

3D equivalent surface image

### 3.1.3 火焰等效半径

图 6 为甲烷-空气预混气体爆炸火焰等效半径随时间变化曲线,从图中可知实验与模拟的火焰传播速度(即曲线斜率)变化趋势基本相同,模拟与实验结果较为吻合。数值模拟得到的火焰半径略大于

实验的等效半径,这是因为模拟为理想状态,无热耗散、热损失,总的来说,所选数值模型能够有效模拟出火焰的结构,具有较高的准确性。

### 3.1.4 爆炸超压

图 8 为甲烷/空气预混爆炸超压随时间变化的实验结果与模拟结果对比。实验结果与模拟结果发展趋势基本一致,但压力峰值略有差异。表 1 列出了 10% 甲烷浓度下爆炸超压峰值和到达超压峰值所需时间实验与模拟结果具体数值,模拟计算结果略高于实验监测结果。分析认为数值模拟假设是理想状态,不考虑热量散失、浮力不稳定性等因素造成的影响;加之,为便于计算对物理模型进行简化,模型壁面设置为绝热无滑移状态,且局部化学平衡,故模拟后期压力值趋于平缓。综上所述,基于大涡模拟的数值模拟结果与实验结果拟合效果较好,整个过程中的压力误差小于 10%,在误差允许范围内,所采用的数值仿真模型较为准确可靠。

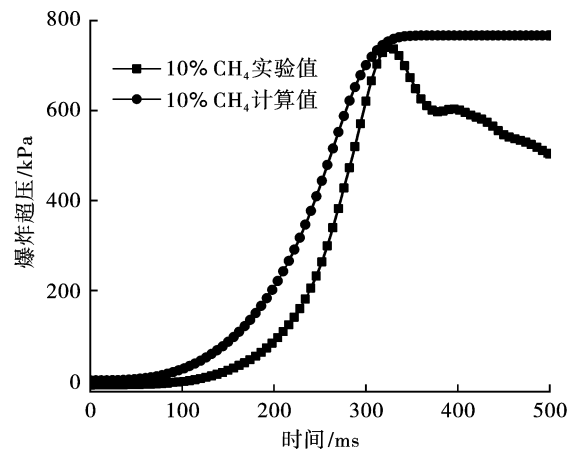


图 8 爆炸超压实验结果与模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of explosion overpressure experimental results and simulation results

表 1 10% 甲烷浓度下爆炸强度相关参数的具体数据值

Table 1 The specific data values of explosion intensity related parameters at 10% methane concentration

甲烷浓度/%	爆炸超压峰值/kPa		到达超压峰值所需时间/ms	
	实验值	计算值	实验值	计算值
10	740.51	766.96	326	353

## 3.2 点火位置对爆炸温度场的影响

### 3.2.1 中心点火

图 9 为中心点火工况下预混火焰温度场分布情况,图 10 为爆炸温度随时间变化曲线。当预混气体自球心处点燃后,点火中心火焰温度骤升至 2242.56 K,此时区域内预混火焰发生层流燃烧,初始火焰呈“球形”向四周扩散。 $t = 80 \text{ ms}$  后,监测点 2

和 4 处观察到火焰温度开始骤升。随着燃烧不断进行,点火中心能量持续向外释放,中心温度不断叠加升高,由于火焰前锋与未燃气体之间存在温度差,导致 D-L 不稳定性、热-质扩散不稳定性等因素的产生,火焰锋面的褶皱现象和“胞状”结构愈加明显。D-L 不稳定性是火焰前沿热膨胀的结果,在其作用下,火焰锋面凸出部分会持续膨胀凹陷部分持续收

缩,进而促使火焰破裂<sup>[20]</sup>。热-质扩散不稳定性是由于火焰在传播过程中火焰面处可燃混合物热扩散与质量扩散的差异引起的,在其作用下,火焰面处的混合物成分、化学反应速率和燃烧速率都发生改变,使得火焰褶皱<sup>[21,22]</sup>。 $t = 200$  ms 时火焰右侧接触容器壁面,此时,观察到右壁面处监测点 5 的预混火焰温度先于左壁面监测点 1 迅速升高。反应后期容器内温度以较慢的速度缓慢发展,这主要是因为爆炸反应后期容器内可燃气体所剩不多,链式反应还在继续但活性粒子的浓度减小,各活性粒子间碰撞几率减少,所以容器内缓慢升温直至预混可燃气体燃烧殆尽,最终容器内温度保持在相对稳定状态。

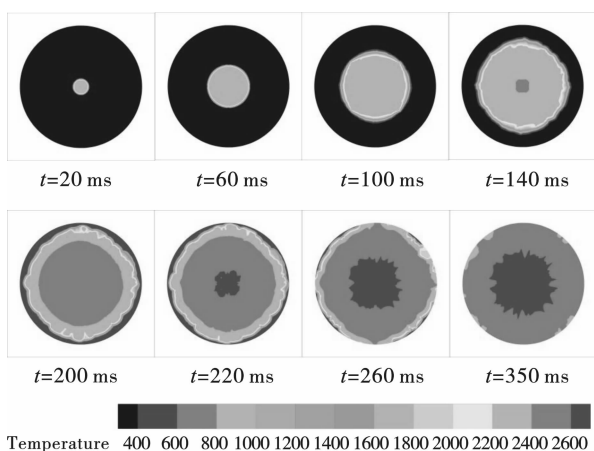


图 9 中心点火爆炸温度场分布云图

Fig. 9 The temperature field distribution cloud diagram of ignition explosion at central

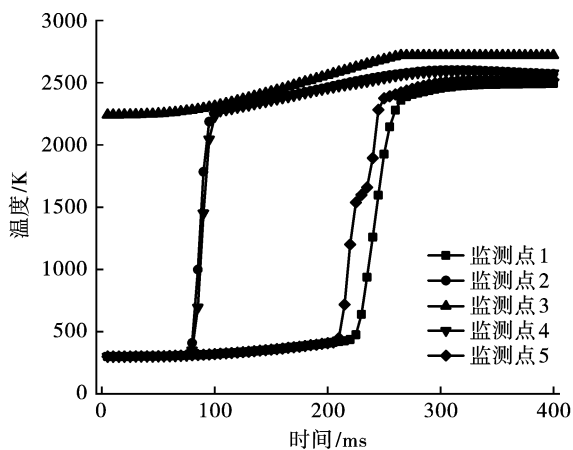


图 10 中心点火爆炸温度随时间变化曲线

Fig. 10 Curve of center ignition explosion temperature changing with time

### 3.2.2 0.5R 处点火

图 11 为 0.5R 处点火工况下预混火焰温度场分布情况,图 12 为爆炸温度随时间变化曲线。当预混气体在 0.5R 处点燃时,点火瞬间热量积聚,监测点

4 处火焰温度升至 2239.12 K;火焰受到容器右壁面限制,点火位置左右两侧存在一定的压力差,在压差作用下火焰轮廓呈现“左薄右厚”形态发展;随着反应不断进行,火焰左侧中心略向前凸起形成“尖角”传播至容器左壁面,对比发现点火位置左侧火焰传播速度明显快于右侧; $t = 80$  ms 时,中心处监测点 3 处火焰温度迅速升高至 2250.13 K; $t = 150$  ms 时,火焰右侧接触壁面,壁面处监测点 5 火焰温度骤升;随着反应的进行,右侧火焰与容器壁面接触面积不断增大,温度在容器右侧积聚,可以明显观察到容器右侧的温度高于左侧;反应后期,预混可燃气体耗尽,火焰面消失。

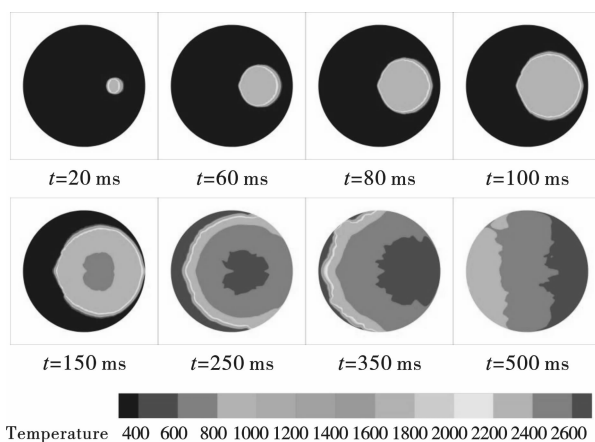


图 11 0.5R 处点火爆炸温度场分布云图

Fig. 11 The temperature field distribution cloud diagram of ignition explosion at 0.5R

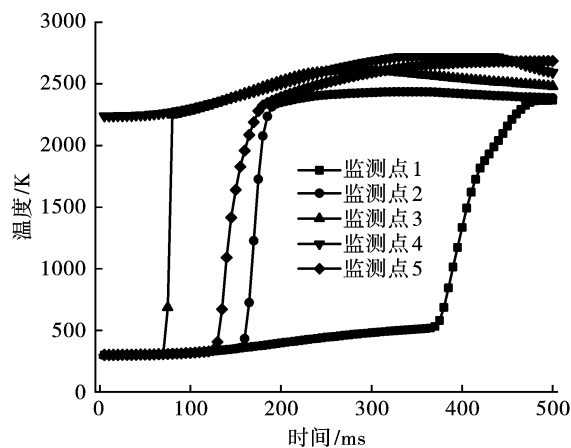


图 12 0.5R 处点火爆炸温度随时间变化曲线

Fig. 12 Curve of 0.5R ignition explosion temperature changing with time

### 3.2.3 R 处点火

图 13 为 R 处点火工况下预混火焰温度场分布情况,图 14 为爆炸温度随时间变化曲线。当预混气体在壁面 R 处点燃时,温度监测点记录下的火焰升

温的顺序依次为:监测点 5 > 监测点 4 > 监测点 3 > 监测点 2 > 监测点 1。火焰初期发展阶段,其传播过程受到容器右壁面的影响,火焰锋面由“圆弧形”逐渐拉伸转变成“尖形”向左侧发展;随后,由于压力波到达左侧壁面后产生反射波,与火焰前锋相互作用,促使 Rayleigh-Taylor 不稳定现象出现,火焰锋面相互挤压、卷吸及拉伸,致使火焰扰动增强,更多的未燃气体卷入燃烧,火焰锋面失稳逐渐转向湍流<sup>[23-25]</sup>;与  $0.5R$  处点火相同,在反应后期,容器右侧温度积聚,右侧温度高于左侧。对比中心点火和  $0.5R$  处点火发现,火焰锋面的褶皱程度及“胞状”结构最明显。

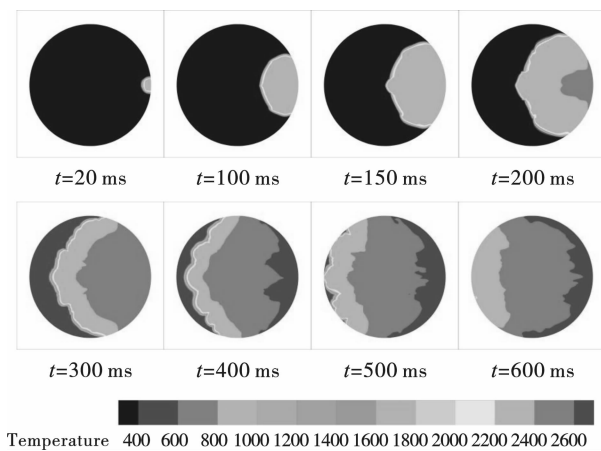


图 13 R 处点火爆炸温度场分布云图

Fig. 13 The temperature field distribution cloud diagram of ignition explosion at R

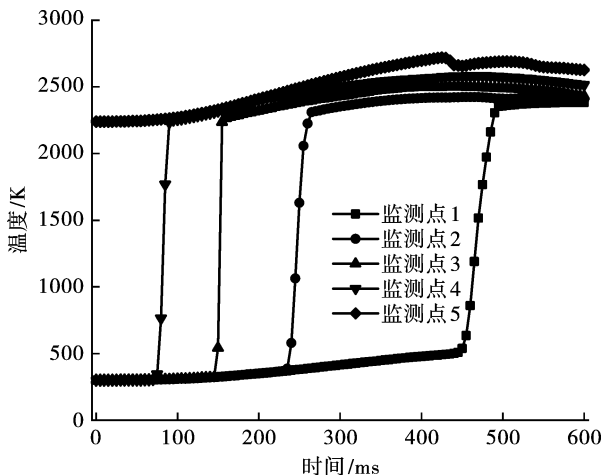


图 14 R 处点火爆炸温度随时间变化曲线

Fig. 14 Curve of R ignition explosion temperature changing with time

### 3.2.4 点火位置对爆炸平均温度的影响

点火位置对爆炸温度场变化情况及反应时间有显著影响。在爆炸过程中化学反应发生在极薄的火

焰锋面内,把高温产物与未燃气体隔开,火焰前锋与未燃气体之间存在温度梯度,未燃气体经热对流、热交换和热辐射等迅速升温,从而促使燃烧波不断向未燃区域推进。在反应过程中,点火中心能量持续向外释放,中心温度不断叠加升高,球形密闭容器内温度场的升温是从点火位置处向外扩散升温的,由于模型的简化,容器壁面为绝热状态,反应后期容器内能量不断积聚,温度曲线基本趋于平缓。图 15 为不同点火位置下容器内平均温度随时间变化趋势。可以看出,中心点火时容器内升温速率最快,随着点火位置越靠近壁面,升温速率逐渐降低。这是因为随着点火位置越靠近壁面,火焰受到右侧壁面的限制,区域内升温速度变得缓慢。

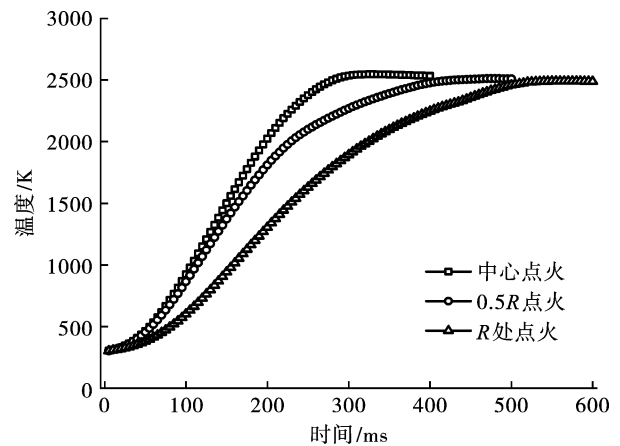


图 15 不同点火位置下容器内平均温度随时间变化趋势

Fig. 15 Variation trend of the average temperature in the vessel with time at different ignition positions

### 3.3 点火位置对爆炸超压及压力上升速率的影响

图 16 为不同点火位置对爆炸超压的影响。可以观察到,不同点火位置下密闭球形容器内爆炸压力发展规律是一致的,但是到达超压峰值的时间不同。中心点火时最先到达爆炸最大压力, $0.5R$  点火次之,而壁面  $R$  处点火最慢到达压力峰值。气体在电火花点火的作用下,开始发生化学反应并释放大量的热量,促使预混气体向外膨胀做功产生压力波,压力随之升高。反应初期,火焰以层流状态向外发展,在此阶段火焰向外膨胀的速率较低,压力上升速率较慢;反应中期,在湍流扰动的作用下,火焰发生扭曲变形,火焰表面与未燃气体接触增加,反应温度不断升高,化学反应速率加快,故压力迅速上升至达到超压峰值;反应后期,可燃气体燃烧殆尽,由于数值模拟的壁面为绝热边界,局部化学平衡无热损失,故压力趋于平缓,最终不同点火位置所达到的最大爆炸压力均稳定在  $766 \text{ kPa}$  左右,在数值模拟计算

中爆炸压力峰值的大小与点火位置无关。

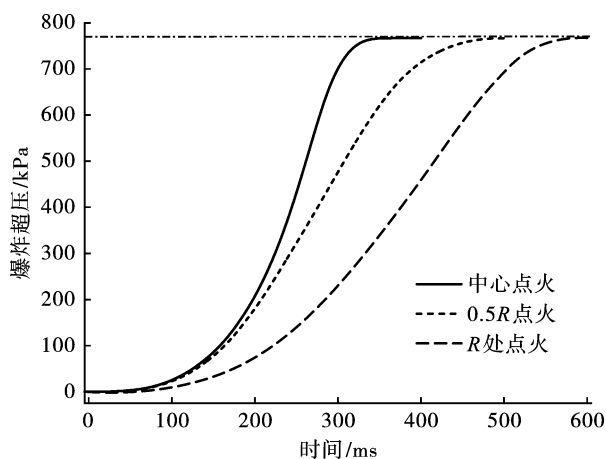


图 16 不同点火位置对超压的影响

Fig. 16 Effect of different ignition positions on overpressure

图 17 为不同点火位置对压力上升速率的影响。表 2 给出了密闭球形容器内不同点火位置下爆炸超压峰值、到达爆炸超压峰值时间、最大压力上升速率和到达最大压力上升速率时间的具体数值。可以发现,对于特定浓度的甲烷气体,中心点火的压力上升速率总是最快,随着点火位置靠近壁面,压力上升速

率逐渐减小。分析认为在中心点火时,火焰向四周膨胀发展最佳,火焰与未燃气体的接触面积最大,使得爆炸压力上升最快;而在壁面点火时,火焰仅向左发展,火焰右端受到壁面的约束,限制火焰的发展,火焰与未燃气体的接触面积受到影响,故压力上升速率最慢。

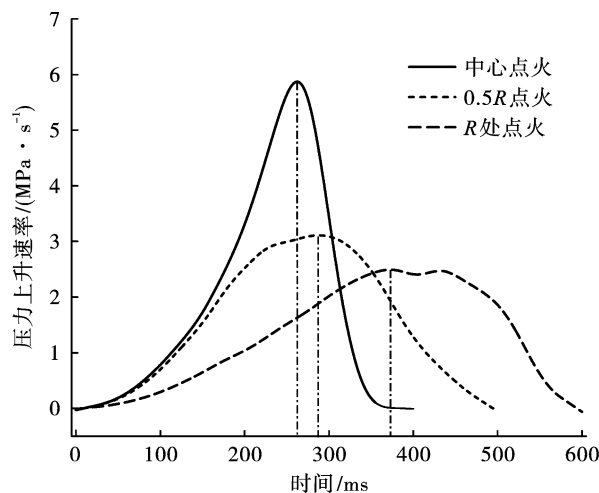


图 17 不同点火位置对压力上升速率的影响

Fig. 17 Effect of different ignition positions on the rate of pressure rise

表 2 不同点火位置爆炸强度相关参数的具体数据值

Table 2 Specific data values of explosion intensity related parameters at different ignition positions

工况	点火位置		
	中心点火	0.5R 点火	R 处点火
爆炸超压峰值/kPa	766.96	766.25	766.88
到达爆炸超压峰值时间/ms	353	491	582
最大压力上升速率/MPa·s <sup>-1</sup>	5.87	3.12	2.51
到达最大压力上升速率时间/ms	263	287	372

## 4 结论

本文通过实验和 Fluent 数值模拟研究了中等尺度(1 m<sup>3</sup>)密闭球形容器内不同点火位置对甲烷/空气预混爆炸特性的影响,实验结论如下:

(1)在壁面 R 处点火时,火焰锋面褶皱程度及“胞状”结构最明显。

(2)中心点火时,容器内的升温速率最快,点火位置越靠近壁面,火焰越早受到壁面的影响。

(3)点火位置不同,压力变化趋势基本一致,但随着点火位置由中心向壁面移动,到达爆炸超压峰值的时间变长。

(4)中心点火的压力上升速率最大,随着点火位置越靠近壁面,压力上升速率逐渐减小。因此,中心点火时造成的危害最严重。

## 参考文献 (References)

- [1] 赵玖超,何倩,嵇斌华,等.液化天然气储运风险因素及策略[J].化工管理,2023(15):105-107.
- [1] ZHAO Jiu-chao, HE Qian, JI Bin-hua, et al. Risk factors and strategies for LNG storage and transportation [J]. Chemical Management, 2023 (15): 105-107. (in Chinese)
- [2] 陈晓坤,蔡灿凡,肖盼.2005—2014 年我国煤矿瓦斯事故统计分析[J].煤矿安全,2016,47(2):224-226, 230.
- [2] CHEN Xiao-kun, CAI Can-fan, XIAO Yang. Statistics analysis of China coal mine gas accidents during 2005 to 2014 [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47 (2): 224-226, 230. (in Chinese)
- [3] 闫秋实,张亚楠,李述涛,等.综合管廊内燃气爆炸荷

- 载特性实验研究和数值模拟[J]. 爆破, 2021, 38(1): 140-146.
- [3] YAN Qiu-shi, ZHANG Ya-nan, LI Shu-tao, et al. Experimental study and numerical simulation of gas explosion load characteristics in utility tunnel. [J]. *Blasting*, 2021, 38(1):140-146. (in Chinese)
- [4] 徐景德, 冯若尘, 田思雨, 等. 100% 置障与浓度梯度耦合作用甲烷爆炸激励效应实验研究[J]. 爆破, 2020, 37(1):134-140.
- [4] XU Jing-de, FENG Ruo-chen, TIAN Si-yu, et al. Excitation effect of methane explosion propagation under condition of coupling of 100% blocking probability and concentration gradient[J]. *Blasting*, 2020, 37(1):134-140. (in Chinese)
- [5] 李润之. 点火能量与初始压力对瓦斯爆炸特性的影响研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2010.
- [5] LI Run-zhi. Study of the influence of ignition energy and initial pressure on the gas explosion characteristics[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] MARIA Mitu, VENERA Giurcan, DOMNINA Razus, et al. Propagation indices of methane-air explosions in closed vessels[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 47:110-119.
- [7] 陈明仙, 郭进, 罗飞云, 等. 点火位置对甲烷-空气预混泄爆容器结构响应影响研究[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(5):800-807.
- [7] CHEN Ming-xian, GUO Jin, LUO Fei-yun, et al. Influence of ignition position on structural response of methane-air premixed explosion venting vessel[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(5):800-807. (in Chinese)
- [8] KINDRACKI J, KOBIERA A, RARATA G, et al. Influence of ignition position and obstacles on explosion development in methane-air mixture in closed vessels[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, 20(4/5/6):551-561.
- [9] BI M S, DONG C J, ZHOU Y H. Numerical simulation of premixed methane-air deflagration in large L/D closed pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 40:337-342.
- [10] RAZUS D, MOVILEANU C, OANCEA D. The rate of pressure rise of gaseous propylene-air explosions in spherical and cylindrical enclosures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 139(1):1-8.
- [11] WANG L Q, MA H H, SHEN Z W. Effects of vessel height and ignition position upon explosion dynamics of hydrogen-air mixtures in vessels with low asymmetry ratios[J]. *Fuel*, 2021, 289(2):119926.
- [12] XIAO H H, DUAN Q L, JIANG L, et al. Effects of ignition location on premixed hydrogen/air flame propagation in a closed combustion tube[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(16):8557-8563.
- [13] 孙从煌, 曲艳东, 刘万里, 等. 点火条件对密闭管道内预混氢气/空气燃爆特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3):622-631.
- [13] SUN Cong-huang, QU Yan-dong, LIU Wan-li, et al. Influence of different ignition conditions on deflagration characteristics of a premixed mixture of H<sub>2</sub> and air in a closed pipe [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3):622-631. (in Chinese)
- [14] DAI Ting-kai, ZHANG Bo, LIU Hong. On the explosion characteristics for central and end-wall ignition in hydrogen-air mixtures; A comparative study [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021(9):30861-30869.
- [15] ZHANG B, CHANG X, BAI C. End-wall ignition of methane-air mixtures under the effects of CO<sub>2</sub>/Ar/N<sub>2</sub> fluidic jets[J]. *Fuel*, 2020, 270:117485.
- [16] 陈发祥, 何伟杰, 朱杭钦, 等. 可燃气体抑爆实验系统设计与应用[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(11):14-17.
- [16] CHEN Fa-xiang, HE Wei-jie, ZHU Hang-qin, et al. Development and application of combustible gas explosion suppression experiment system[J]. *Industrial Safety Environmental Protection*, 2022, 48(11):14-17. (in Chinese)
- [17] 乔征龙, 马恒, 邓立军. 基于 Charlette 模型的柔性障碍物对瓦斯爆炸的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5):2420-2427.
- [17] QIAO Zheng-long, MA Heng, DENG Li-jun. Research on the influence of small space flexible obstacles on gas explosion based on Charlette model[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(5):2420-2427. (in Chinese)
- [18] 孙柏刚, 赵建辉, 刘福水. 预混氢气层流燃烧速度的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(5):430-435.
- [18] SUN Bai-gang, ZHAO Jian-hui, LIU Fu-shui. Numerical simulation for laminar burning velocity of premixed hydrogen-air mixture [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*. 2010, 16(5):430-435. (in Chinese)
- [19] RALLIS C J, GARFORTH A M, STEINZ J A. Laminar burning velocity of acetylene-air mixtures by the constant volume method: Dependence on mixture composition, pressure and temperature [J]. *Combustion & Flame*, 1965, 9(4):345-356.
- [20] 肖华华. 管道中氢-空气预混火焰传播动力学实验与数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学,

- 2013.
- [20] XIAO Hua-hua. Experimental and numerical study of dynamics of premixed hydrogen-air flame propagating in ducts[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [21] MATALON M. Flame dynamics[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 57-82.
- [22] VADIM N. Gamezo, TAKANOBU Ogawa, ELAINE S. O-ran. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: Effect of obstacle spacing[J]. Combustion and Flame, 2008, 155(1-2): 302-315.
- [23] 严清华, 王淑兰, 李岳, 等. 大型球形密闭容器内可燃气体爆炸过程的数值模拟[J]. 天然气工业, 2004(4): 101-103, 15.
- [23] YAN Qing-hua, WANG Shu-lan, LI Yue, et al. Numerical simulation of flammable gas explosions in large closed spherical vessels[J]. Natural Gas Industry, 2004(4): 101-103, 15. (in Chinese)
- [24] 王公忠, 张建华, 李登科. 障碍物对预混火焰特性影响的大涡数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 68-76.
- [24] WANG Gong-zhong, ZHANG Jian-hua, LI Deng-ke. Large eddy simulation of impacted obstacles' effects on premixed flame's characteristics[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1): 68-76. (in Chinese)
- [25] 程方明, 常助川, 史合, 等. 多孔障碍物对预混火焰传播的影响[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(8): 33-41.
- [25] CHENG Fang-ming, CHAN Zhu-chuan, SHI He, et al. Multi-hole obstacles' effects on premixed flame's propagation[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(8): 33-41. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方

(上接第185页)

- [9] 陆培庆, 唐超. 移动式三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 测绘通报, 2020(5): 155-157, 160. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0167.
- [9] LU Pei-qing, TANG Chao. Application of mobile 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnel[J]. Notice of Surveying and Mapping, 2020(5): 155-157, 160. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0167. (in Chinese)
- [10] 袁长征, 滕德贵, 胡波, 等. 三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 测绘通报, 2017(9): 152-153.
- [10] YUAN Chang-zheng, TENG De-gui, HU Bo, et al. Application of 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnels[J]. Notice of Surveying and Mapping, 2017(9): 152-153. (in Chinese)
- [11] 何桂珍, 杨军. 地铁隧道收敛变形监测方法的研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(3): 105-110. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2016.03.015.
- [11] HE Gui-zhen, YANG Jun. Research on convergence deformation monitoring method of subway tunnel[J]. Modern Tunnel Technology, 2016, 53(3): 105-110. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2016.03.015. (in Chinese)
- [12] 汤继新, 王群敏, 陈文华, 等. 光纤光栅传感和光电成像技术在地铁深基坑中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S1): 361-368.
- [12] TANG Ji-xin, WANG Qun-min, CHEN Wen-hua, et al. Application of fiber grating sensing and photoelectric imaging technology in deep foundation pit of subway[J]. Tunnel construction (Chinese and English), 2019, 39(S1): 361-368. (in Chinese)
- [13] 侯公羽, 李子祥, 胡涛, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的隧道沉降监测研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3148-3158. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1929.
- [13] HOU Gong-yu, LI Zi-xiang, HU Tao, et al. Tunnel settlement monitoring based on distributed optical fiber strain sensing technology[J]. Geomechanics, 2020, 41(9): 3148-3158. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1929. (in Chinese)
- [14] LI Z X, HOU G Y, HU T, et al. Deformation behavior monitoring of a tunnel in its temporary shoring demolishing process using optical fiber sensing technology[J]. Measurement, 2021(2): 109170.
- [15] NIU H, WENG X, TIAN C, et al. Model test and back analysis of shield tunnel load distribution in soft clay[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021(1): 1-15
- [16] XIA P, HU H, YU C, et al. Model test on construction loads of prefabricated structural elements for a double-deck shield-driven tunnel(Article)[J]. Modern Tunneling Technology. 2015, 52(4): 105-110.

英文编辑: 陈东方