

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.022

综合管廊内燃气爆炸荷载特性 实验研究和数值模拟*

闫秋实¹, 张亚楠¹, 李述涛², 孙庆文³

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点试验室, 北京 100124;

2. 军事科学院 国防工程研究院, 北京 100036;

3. 中国建筑科学研究院有限公司 国家建筑工程质量监督检验中心, 北京 100013)

摘要: 我国综合管廊内燃气安全问题亟待研究和解决。为了研究管廊内燃气爆炸荷载特性,在0.11 m × 0.11 m × 6 m的小尺寸管道内进行甲烷-空气混合气体封闭爆炸实验,研究了在不同点火能量(电极点火-2 J;化学点火-5 J)下,甲烷浓度为7.5%~13.5%的爆炸波的传播规律。结果表明:燃气爆炸超压峰值随浓度的增大先增加后减少,在浓度为10.5%时超压峰值最高;点火能量提高时,超压峰值普遍提高。采用SIMTEC数值分析软件对实验进行模拟,选用大涡湍流模型和修改的涡耗散概念燃烧模型能够很好的验证管道内燃气爆炸最危险的情况(甲烷-空气充分燃烧爆炸情况)。

关键词: 综合管廊; 超压; 数值分析; 甲烷爆炸

中图分类号: TU352.1⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)01-0140-07

Experimental Study and Numerical Simulation of Gas Explosion Load Characteristics in Utility Tunnel

YAN Qiu-shi¹, ZHANG Ya-nan¹, LI Shu-tao², SUN Qing-wen³

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Institute of Defense Engineering, AMS, PLA, Beijing 100036, China;

3. China Academy of Building Research, National Center of Quality
Supervision and Test of Building Engineering, Beijing 100013, China)

Abstract: It is urgent to study and solve the problem of gas safety in comprehensive pipe gallery. In order to explore the gas explosion load characteristics in the utility tunnel, the methane-air mixed gas enclosed explosion experiment was conducted in a small size pipeline of 0.11 m × 0.11 m × 6 m. The propagation rule of explosive waves with methane concentration between 7.5% and 13.5% at different ignition energies (electrode ignition-2 J; chemical ignition-5 J) was studied. The results showed that the overpressure peak of gas explosion increased first and then decreased with the increase of concentration (reaching the peak value at 10.5%). In addition, with the increase of ignition energy, the overpressure peak generally increased. SIMTEC numerical analysis software was used to simulate the experiment. Meanwhile, the Large Eddy Simulation and the modified Eddy Dissipation Concept model were adopted, which could well verify the most dangerous case of gas explosion in pipeline (methane-air full combustion explosion).

Key words: utility tunnel; overpressure; numerical analysis; methane explosion

中国正在大力建设城市综合管廊,解决城市地下管线管理混乱问题。燃气管线作为城市重要管线工程被纳入综合管廊建设,在某些极端条件下,综合管廊内燃气管道可能发生泄漏并引发燃气爆炸,对综合管廊结构及其周围的建筑将产生破坏效应。利用管道内燃气爆炸实验,对综合管廊内燃气爆炸荷载特性进行研究,分析了气体浓度、点火方式等因素对爆炸荷载的影响。研究成果可以为我国综合管廊在燃气爆炸荷载作用下安全评估及防灾减灾设计提供参考。

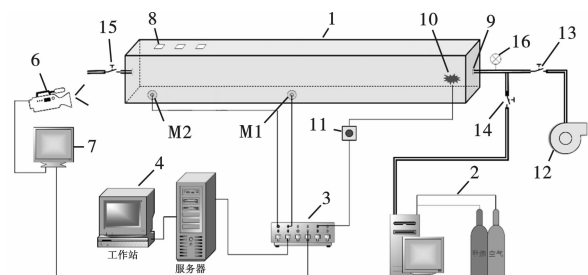
国内外学者对可燃气体在密闭狭长结构中燃烧及爆炸现象进行了研究^[1,2]。王成等在直径0.35 m、长72 m的圆形截面管道里研究了不同浓度以及不同障碍物条件下瓦斯爆炸超压峰值以及火焰传播速度的影响^[3,4]。Zhu等利用截面为0.08 m×0.08 m、长12 m的方形管道研究了管道中瓦斯浓度变化对火焰传播速度的影响^[5]。Ming-Hsu等在毫米级微尺度管道中研究了不同初始条件下可燃气体爆炸火焰传播的规律,以及管道尺度的变化对火焰传播的影响^[6]。王世茂等在长1000 mm,横截面尺寸为100 mm×100 mm的管道中进行了研究了油气浓度对半开口管道爆炸超压特性与火焰行为的影响^[7]。Maremonti等利用AutoReaGas进行了在管道内混合气体爆炸过程的模拟,得到管道的尺寸对可燃气体的爆炸超压荷载有显著影响^[8]。罗振敏、程方明、张群等运用FLACS软件对独头巷道、20L爆炸罐以及工作面范围内的瓦斯爆炸传播特性进行了数值模拟^[9-11]。刘庆明、张迎新等研究了管道中存在障碍物时对爆炸超压峰值的影响^[12,13]。Tomlin在爆炸室内进行了不同泄压排气孔和堵塞情况下的天然气爆炸实验,研究结果表明泄压板的尺寸、破坏压力和内部堵塞情况对爆炸压力影响较大^[14]。Guo Chaowei等人研究发现,在浓度为9.5%的可燃性气体中加入低浓度的煤尘时,燃气爆炸的火焰速度可以达到爆轰水平^[15]。Zhu Yunfei等人通过研究燃气浓度等因素对沼气爆炸的影响,发现甲烷浓度为10.3%时超压峰值最大,并指出可选择近似方形截面的隧道以壁面极高的超压^[16]。Li LeiLei等人运用ANSYS软件研究了不同浓度、不同

预混区的甲烷-空气混合气体在小尺寸管道中的爆炸超压特性^[17]。罗振敏等人采用FLACS软件模拟计算了甲烷在4 m×4 m×200 m的密闭空间内,浓度分别为8.5%、9.5%和10.5%时的爆炸压力等,模拟发现浓度为9.5%和10.5%时爆炸压力数值很接近且浓度为10.5%时数值较高^[18]。王秋红等人采用高压电极点火方式在小尺寸管道内进行不同浓度的瓦斯爆炸实验,分析了浓度对爆炸压力和温度的影响,得出当浓度为10%时压力和温度最大,最大爆炸压力随着浓度的增加先增加后减少^[19]。以上研究多数基于实验研究对火焰和超压峰值进行了一定分析,较多的采用数值分析方法研究燃气浓度等对爆炸的影响。本文采用实验和数值模拟相结合的方法对影响燃气爆炸的气体浓度、点火能量等因素进行了系统实验及理论分析。

1 实验概况

1.1 实验装置

本次实验依托武汉理工大学安全工程重点学科与湖北省重点实验室,在武汉理工大学安全科学与工程实验室进行小尺寸管道爆炸试验。甲烷-空气混合气体爆炸实验系统如图1~2所示,主要包括内截面为0.11 m×0.11 m、长6 m的气体爆炸管道主体和配气系统、点火装置、同步控制系统、高速摄影机以及数据采集系统等实验辅助系统。实验时,在管道内充入适量的甲烷和空气预混气体,在控制系统的控制下于一端点火起爆,产生的高温高压气体向另一端扩张,同时测量系统记录测点处的超压输出数据。



说明:1-水平方形管道;2-配气系统;3-同步控制器;4-数据采集器;M1、M2-压力传感器,分别为测点1和测点2;6-高速摄像机;7-图像显示器;8-泄压口;9-进/出气孔;10-点火装置;11-控制开关;12-抽真空装置;13、14、15-开关阀门;16-真空表。

图1 水平方形管道实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal square pipeline test system

收稿日期:2020-10-28

作者简介:闫秋实(1983-),男,副教授、博士,主要从事结构抗爆方面的研究,(E-mail)yqs2011@bjut.edu.cn。

通讯作者:李述涛(1984-),男,工程师,主要从事地下结构抗震抗爆研究,(E-mail)list16@mails.tsinghua.edu.cn。

基金项目:北京市自然科学基金(8182009);国家自然科学基金(51678018)



图2 甲烷-空气混合气体爆炸实验系统实际图

Fig. 2 Practical chart of methane-air mixed gas explosion test system

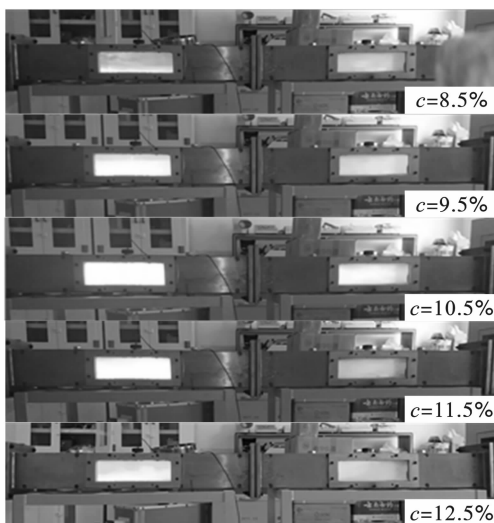
1.2 实验工况

本文研究不同浓度下甲烷-空气混合气体的爆炸超压特性,根据张景林统计^[20],甲烷的爆炸极限为5%~15%,本次实验选取甲烷-空气混合气体的浓度分别为7.5%、8.5%、9.5%、10.5%、11.5%、12.5%和13.5%,分别采取高压电极点火和化学点火方式作为点火源进行实验,高压电极点火电压为14 kV(约2 J),化学点火的药头能量为5 J。

2 封闭爆炸实验结果与分析

2.1 电极点火实验

对浓度为7.5%~13.5%的甲烷-空气混合气体进行高压电极点火下的爆炸实验,爆炸现象如图3所示。从图3可以看出,浓度为10.5%时实验现象最为明显,爆炸燃烧的火焰最明亮,现场可以听到很响亮的爆炸声,通过玻璃窗看到明亮的橘黄色火焰传过;浓度为9.5%和12.5%的爆炸现象十分相似,但浓度为12.5%时的爆炸声音比浓度为9.5%的要小,火焰也较暗;而浓度为8.5%的甲烷爆炸现象进一步弱化,火焰更暗。

图3 实验现象(c 代表浓度)Fig. 3 Experimental phenomena(c stands for concentration)

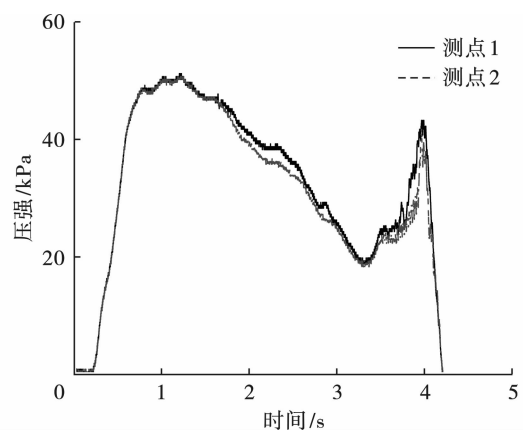
高压电极点火情况下,测点1、2的超压峰值随浓度的变化如表1所示。

表1 (电极点火)超压峰值(单位:kPa)

Table 1 (Electric ignition) Overpressure peak(unit:kPa)

工况	7.5%	8.5%	9.5%	10.5%	11.5%	12.5%	13.5%
测点1	51.0	162.0	229.0	234.0	199.0	167.0	152.0
测点2	50.5	139.0	186.0	201.0	186.0	178.0	145.0

从表中数据可以看出随着甲烷浓度的不断增加,管道内的超压峰值先快速增大后缓慢减小,在浓度为10.5%时达到最大值,为234 kPa。在不同的浓度下,测点1和测点2所测得的超压时程曲线都有相同的规律,且超压峰值相差很小;这是由于燃气爆炸实验是在一个小尺寸管道内进行,在管道内充满甲烷-空气混合气体后,点火产生的爆炸是瞬态的,我们所用的测量仪器也有一定的精度限制,所以测点1和测点2的超压时程曲线几乎一致。浓度 $c=7.5%$ 时,爆炸超压出现两次超压峰值,如图4所示。由于 $c=7.5%$ 时甲烷浓度较低,爆炸燃烧时甲烷和空气反应速率慢,发生明显的层流燃烧,实验中能清楚看到蓝色火焰缓慢传过。在点火端点燃甲烷-空气混合气体时,点火位置引起附近气体燃烧产生高温高压气体并向管道另一端传播,甲烷浓度低时混合气体燃烧反应不充分,会进行二次燃烧爆炸,因此造成二次超压峰值。在其他浓度时,爆炸超压时程曲线呈单峰型曲线,如图5所示。(其他浓度的超压峰值曲线规律与图5相似,不再单独给出。)

图4 超压时程曲线(浓度 $c=7.5%$)Fig. 4 Overpressure time curves($c=7.5%$)

2.2 化学点火实验

接下来,同样对浓度为7.5%~13.5%的甲烷-空气混合气体分别进行化学点火下的爆炸实验,不同浓度所测得的超压峰值如表2所示。超压峰值随

着浓度提高先增大后缓慢减少,在浓度为 10.5% 时达到最大值,为 312 kPa。化学点火的爆炸现象更加明显,反应更加剧烈,浓度为 10.5% 和 11.5% 的甲烷爆炸现象最为显著,爆炸声更响亮,通过玻璃窗观察到的火焰速度明显高于电极点火实验。浓度 $c = 7.5\%$ 时超压时程曲线如图 6 所示,浓度为 10.5% 的甲烷爆炸超压时程图如图 7 所示。通过对比图 6 和图 4 以及图 7 和图 5 我们可以发现,化学点火情况下,超压曲线上升速率快,超压作用时间更短,且超压峰值更高。这是由于化学点火相比高压电极点火,提高了点火能量。提高点火能量点燃时,空气中温度和压强提升速率更快,空气中加热面积增大,大大缩短了气体燃烧的反应时间,使甲烷-空气气体的燃烧速率提高,甲烷和空气燃烧反应更充分,因此点火能量提高时,爆炸超压峰值也会提高。(化学点火情况下,其他浓度的超压峰值变化规律同样与图 7 相似,因此在文中不再单独给出。)结合表 2 和表 1 的超压峰值数据可以发现,与电极点火相比,化学点火的超压峰值普遍提高,化学点火的超压峰值比电极点火平均提高约 40%。

表 2 (化学点火)超压峰值(单位:kPa)

Table 2 (Chemical ignition) Overpressure peak(unit:kPa)

工况	7.5%	8.5%	9.5%	10.5%	11.5%	12.5%	13.5%
测点 1	117	145	287	312	292	245	219
测点 2	112	139	265	319	280	247	214

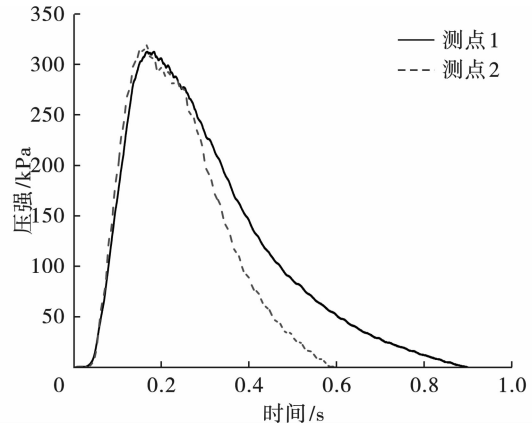


图 7 超压时程曲线(浓度 $c = 10.5\%$)

Fig. 7 Overpressure time curves($c = 10.5\%$)

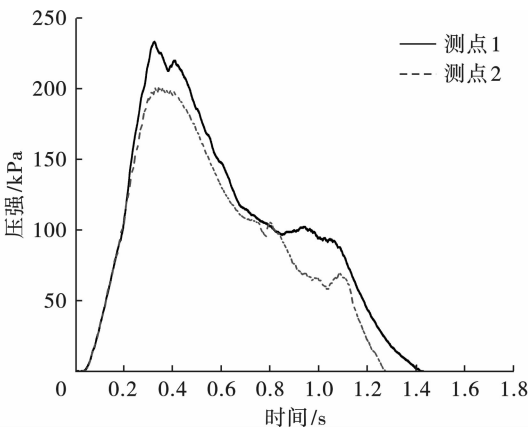


图 5 超压时程曲线(浓度 $c = 10.5\%$)

Fig. 5 Overpressure time curves($c = 10.5\%$)

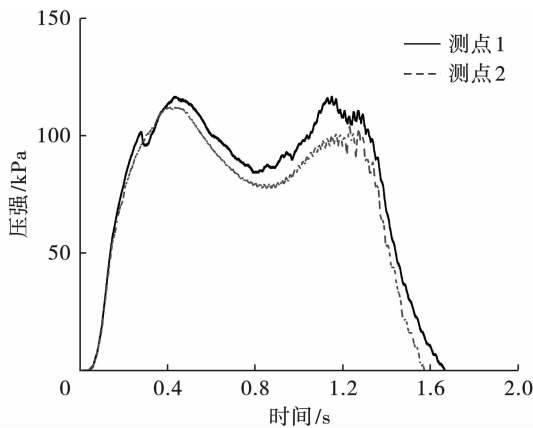


图 6 超压时程曲线(浓度 $c = 7.5\%$)

Fig. 6 Overpressure time curves($c = 7.5\%$)

3 封闭管道内混合气体爆炸数值分析

3.1 管道模型

本次实验的数值分析软件采用由鄢正华博士自主研发的 CFD 软件 Simtec,李松阳等人采用 Simtec 软件对超高层建筑的轰燃现象进行模拟并与其他结果进行对比,很好的验证了软件的正确性^[21]。我们选择 Simtec 软件中的大涡模型模拟甲烷-空气混合物爆炸超压,管道模型示意图如图 8 所示。管道内截面尺寸为 $0.11\text{ m} \times 0.11\text{ m}$,长度为 6 m ,管道内充满不同浓度的甲烷和空气进行封闭爆炸模拟。管壁采用钢材,壁厚为 2 cm ,在距离管道一端 0.15 m 处设置点火源,在管道中部和端部分别设置测点 1 和测点 2 用于记录管道中部和管道端部的超压时程等数据:其中测点 1 位于管道中心,测点 2 位于距离管道端部 0.25 m 处。其余主要参数设置如下:重力加速度为 $9.8\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,初始温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,大气压力为 1.013 bar ,空气成分为氧气和氮气,两者的体积分数分别为 21% 和 79% ,进行数值模拟时采用的燃烧模型为修改的涡耗散概念模型(EDC-Modified)。化学反应方程组如下: $\text{CH}_4 + 1.5\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} + 0.03\text{SOOT}$; $\text{CO} + 0.5\text{O}_2 + 0.1\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 0.1\text{H}_2\text{O}$; $\text{CO}_2 = \text{CO} + 0.5\text{O}_2$ 。设置不同的点火能分别模拟电极点火和化学点火,电极点火的点火能设置为 2 J ,化学点火的点火能设置为 5 J 。数值模拟中采用的网格尺寸为 5 mm ,网格尺寸对超压峰值的影响如表

3所示,从表3的数据可以看出,网格尺寸为8 mm和5 mm时的超压峰值与10 mm相差极小,因此认为采用的5 mm尺寸是有足够的精度的。



图8 管道模型图

Fig. 8 Pipeline model diagram

表3 网格尺寸对超压峰值的影响

Table 3 Influence of grid size on peak overpressure

网格尺寸/mm	5	8	10
超压峰值/kPa	309.3	307.4	307.2

3.2 封闭爆炸模拟与实验结果对比

由于在数值模拟结果中,测点1和测点2的超压时程曲线完全一致,且在实验结果中,测点1和测点2的超压时程曲线相差很小,因此我们仅选择测点1的超压结果进行对比。根据甲烷燃烧的化学反应方程式 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \xrightarrow{\text{点燃}} \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 可知,当空气中氧气的体积分数为21%时,完全反应所需的甲烷

为氧气体积的一半,即体积分数为10.5%,那么甲烷占有所有气体体积为 $\frac{10.5\%}{79\% + 21\% + 10.5\%} = 9.5\%$,

这就是甲烷完全反应的化学当量浓度。由于燃料与空气混合物的燃烧速度和反应热均随着燃料浓度的变化而变化,以及化学反应的不完全性、分解和二次反应等原因,最佳浓度不等于化学当量浓度,以空气作为氧化剂的混合气体的最佳浓度要高于其化学当量浓度。一般最佳浓度为化学当量浓度1.1~1.5倍^[22],那么甲烷的一般最佳浓度在10.45%~14.25%之间。根据实验数据可认为,在本次实验情况下,甲烷最佳浓度为10.5%。采用Simtec软件进行数值模拟的超压时程曲线基本都为单峰曲线,曲线变化规律相似。由于数值模拟中,采用的甲烷燃烧化学方程式为甲烷充分燃烧时的化学方程,且采用了湍流模型进行甲烷空气混合气体爆炸模拟,甲烷-空气混合气体反应速率快,反应充分,所以数值模拟无法模拟出二次超压峰值。本文中分别给出甲烷爆炸低浓度8.5%、最佳浓度10.5%和高浓度12.5%的超压时程曲线,数值模拟和实验结果对比如图9所示。

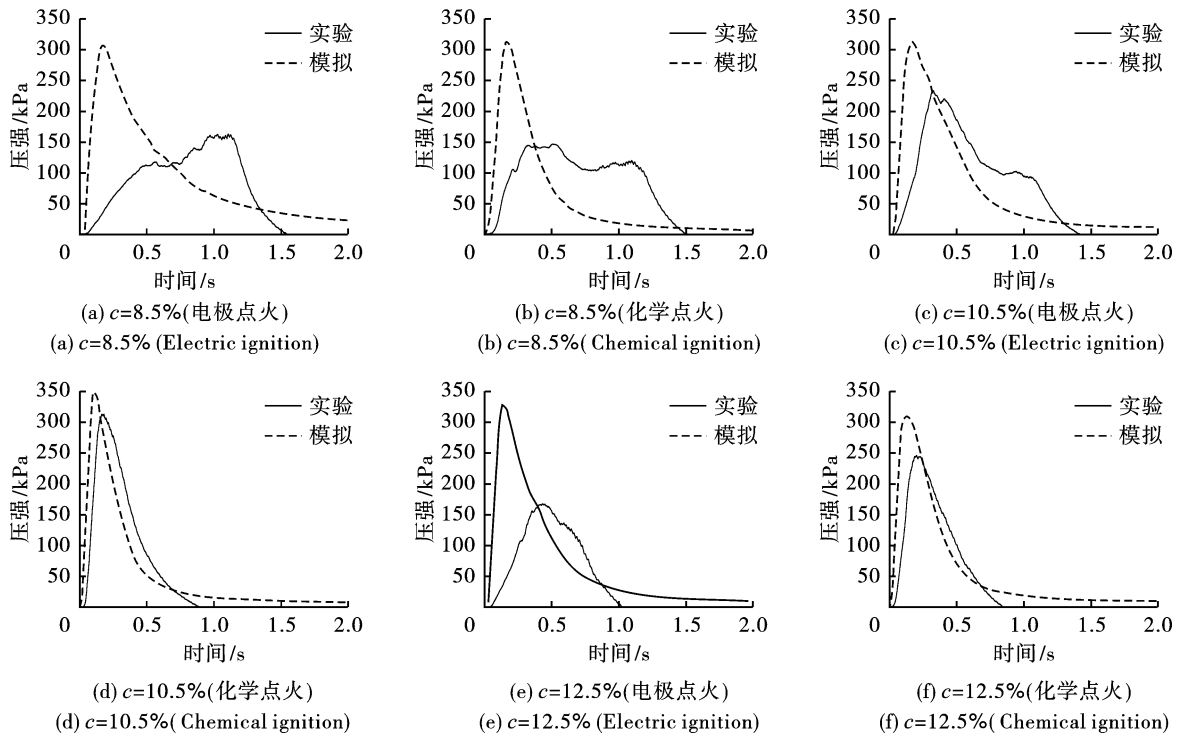


图9 超压时程曲线(实验与数值分析对比)

Fig. 9 Overpressure time curves(Comparison of experiments and numerical analysis)

从图9中超压时程曲线对比图可以发现,数值模拟结果的超压上升速率和下降速率普遍比实验快。这是由于在数值模拟中,甲烷-空气混合气体点

燃后的起爆速度很快,在任何浓度下都采用的甲烷和空气充分反应的方程式,燃烧模式采用的湍流燃烧,这会导致比实验燃气爆炸产生更高的超压,特别

是甲烷浓度处于非化学当量浓度时,超压时程曲线相差较大。在数值模拟时,实验管道材料采用完全刚性的材料,爆炸超压波在管道内完全反射,也是造成超压峰值偏高的因素。所以当甲烷浓度为最佳浓度 10.5% 时,甲烷和空气充分燃烧完全反应,实验和模拟的超压峰值误差较小,且模拟的超压时程曲线更加接近实验的超压时程曲线;甲烷浓度为 8.5% 和 12.5% 时,氧气浓度过高或过低,都使得实际的甲烷-空气燃烧反应不充分,然而数值模拟中模拟的是充分模拟后的结果。因此甲烷在处于非最佳浓度时,数值模拟和实验超压峰值相差较大。

各浓度的超压峰值模拟结果如表 4 和表 5 所

表 4 (电极点火实验与模拟结果对比)超压峰值(单位:kPa)

工况	7.5%	8.5%	9.5%	10.5%	11.5%	12.5%	13.5%
实验	51.0	162.0	229.0	233.5	198.8	167.0	152.0
模拟	270.9	305.1	309.3	312.7	334.0	326.2	323.0
误差/%	431	88	35	34	68	95	112

表 5 (化学点火实验与模拟结果对比)超压峰值(单位:kPa)

工况	7.5%	8.5%	9.5%	10.5%	11.5%	12.5%	13.5%
实验	117.0	145.5	286.5	312.0	292.0	244.5	219.0
模拟	237	311	289	347	341	306	315
误差/%	103.00	114.00	0.87	11.00	17.00	25.00	44.00

示,通过将数值模拟结果与实验结果进行对比可以发现,无论是电极点火还是化学点火,在浓度为 9.5% 和 10.5% 时误差都最小,可以利用数值分析软件对甲烷充分燃烧情况进行模拟。总体上对比表 4 和表 5 可以发现化学点火的超压峰值普遍高于电极点火,与实验规律一致。化学点火情况下的实验和模拟误差较小,模拟精度更高,特别是甲烷的浓度为 9.5% ~ 12.5% 时,化学点火下的实验模拟的误差都较小,超压峰值误差在允许的范围内。因此在化学点火情况时,可以充分利用 Simtec 软件模拟甲烷浓度范围为 9.5% ~ 12.5% 的混合气体情况。

4 结论与展望

进行了甲烷-空气混合气体爆炸实验,之后通过有限元软件 Simtec 对不同点火方式和不同浓度的甲烷爆炸进行数值模拟,综合实验分析与数值分析结果,得到以下结论:

(1) 甲烷爆炸超压峰值随着浓度的不断增加先增大后减少。甲烷在浓度为 10.5% 时爆炸现象最明显,产生爆炸超压的峰值最大,超压上升速率最快,达到最大爆炸压力的时间变短。

(2) 点火方式为化学点火时,爆炸现象更加明显,爆炸后火焰的传播速度加快,峰值超压结果较电极点火平均提高 40% 左右;说明提高起爆能量,能明显提高燃气爆炸火焰燃烧速度及爆炸超压峰值。

(3) 数值分析结果能够较好的反映最危险情况(甲烷在浓度为 9.5% 和 10.5% 且点火方式为化学点火)的实验规律,可以利用数值分析方法对综合管廊内燃气爆炸进行安全研究及分析。

参考文献 (References)

- [1] 刘冲,杜扬,李国庆,等.狭长密闭空间内油气爆炸火焰特性大涡模拟[J].化工学报,2018,69(12):5348-5358.
- [1] LIU C, DU Y, LI G Q, et al. Large eddy simulation of gasoline-air mixture explosion in closed narrow-long space [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2018, 69(12): 5348-5358. (in Chinese)
- [2] 王波,杜扬,李国庆,等.细长密闭管道内油气爆炸特性研究[J].振动与冲击,2017,36(9):80-85,145.
- [2] WANG B, DU Y, LI G Q, et al. Tests for explosion characteristics of gasoline-air mixture in an elongated closed tube [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(9): 80-85, 145. (in Chinese)
- [3] 王成,回岩,胡斌斌,等.障碍物形状对瓦斯爆炸火焰传播过程的影响[J].北京理工大学学报,2015,35(7):661-665.
- [3] WANG C, HUI Y, HU B B, et al. Effect of obstacle shape on gas explosion flame propagation process [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(7): 661-665. (in Chinese)

- [4] 蔺伟,回岩,王成,等. 瓦斯体积分数对火焰传播规律影响的实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2015,35(6):551-555.
- [4] LIN W, HUI Y, WANG C, et al. Experimental investigation about the influence of gas concentration on flame propagation[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2015,35(6):551-555. (in Chinese)
- [5] ZHU C J, LU Z G, LIN B Q, et al. Effect of variation in gas distribution on explosion propagation characteristics in coal mines [J]. Mining Science and Technology, 2010(4):516-519.
- [6] WU M H, BURKE M P, SON S F, et al. Flame acceleration and the transition to detonation of stoichiometric ethylene/oxygen in microscale tubes[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007,31(2):2429-2436.
- [7] 杜扬,李国庆,王世茂,等. 障碍物数量对油气泄压爆炸特性的影响[J]. 化工学报, 2017(7):334-343.
- [7] DU Y, LI G Q, WANG S M, et al. Effects of obstacle number on characteristics of vented gasoline-air mixture explosions[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2017(7):334-343. (in Chinese)
- [8] MAREMONTI M, RUSSO G, SALZANO E, et al. Numerical simulation of gas explosions in linked vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999,12(3):189-194.
- [9] 罗振敏,张群,王华,等. 基于FLACS的受限空间瓦斯爆炸数值模拟[J]. 煤炭学报, 2013,38(8):1381-1387.
- [9] LUO Z M, ZHANG Q, WANG H, et al. Numerical simulation of gas explosion in confined space with FLACS[J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(8):1381-1387. (in Chinese)
- [10] 程方明,邓军,蔡周全,等. 瓦斯积聚范围对独头巷道瓦斯爆炸冲击波破坏特征与传播规律的影响[J]. 矿业安全与环保, 2016,43(4):1-5,9.
- [10] CHENG F M, DENG J, CAI Z Q, et al. Influence of gas accumulation scope on destroying characteristics and propagation laws of gas explosion pressure waves in a blind tunnel[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2016,43(4):1-5,9. (in Chinese)
- [11] 张群. 高瓦斯矿井封闭火区瓦斯爆炸实验及数值模拟研究[D]. 西安:西安科技大学, 2013.
- [11] ZHANG Q. Research on gas explosion experiment and simulation of sealing fire zone in high-gas coal mine [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [12] 李小东,刘庆明,白春华,等. 管道中瓦斯爆炸超压场的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2008(1):5-7.
- [12] LI X D, LIU Q M, BAI C H, et al. Numerical simulation of gas explosion overpressure field in tube[J]. Safety in Coal Mines, 2008(1):5-7. (in Chinese)
- [13] 张迎新,孙海波. 管道内置障条件下瓦斯爆炸超压规律的实验研究[J]. 黑龙江科技大学学报, 2017, 27(4):350-353.
- [13] ZHANG Y X, SUN H B. Experimental study on effect of obstacles on gas explosion overpressure in duct[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2017,27(4):350-353. (in Chinese)
- [14] G Tomlin, D M Johnson, P Cronin, et al. The effect of vent size and congestion in large-scale vented natural gas/air explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,35:169-181.
- [15] GUO C W, SHAO H, JIANG S G, et al. Effect of low-concentration coal dust on gas explosion propagation law [J]. Powder Technology, 2020,367:243-252.
- [16] ZHU Y F, WANG D M, SHAO Z L, et al. Investigation on the overpressure of methane-air mixture gas explosions in straight large-scale tunnels[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020,135(C):101-112.
- [17] LI L L, WANG Y. Mechanical characteristics of partially premixed methane/air explosion in a small closed tube based on simulation technology[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020,42(10):1255-1267.
- [18] 罗振敏,吴刚. 密闭空间瓦斯爆炸数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2020,51(2):1-4.
- [18] LUO Z M, WU G. Numerical simulation of gas explosion in confined space [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(2):1-4. (in Chinese)
- [19] 王秋红,王二飞,陈晓坤,等. 管道内瓦斯爆炸火焰传播压力与温度特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020,51(1):239-247.
- [19] WANG Q H, WANG E F, CHEN X K, et al. Pressure and temperature characteristics of flame propagation of gas explosion in pipeline[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020,51(1):239-247. (in Chinese)
- [20] 张景林. 气体、粉尘爆炸灾害及其安全技术[J]. 中国安全科学学报, 2002(5):13-18,2.
- [20] ZHANG J L. Explosion disaster due to gas & dust and its safety technology [J]. China Safety Science Journal, 2002(5):13-18,2. (in Chinese)
- [21] 李松阳,宗若雯,廖光焯. 超高层建筑中典型腔室火灾轰燃现象的实验及数值模拟比较研究[C]//广州中国科学院工业技术研究院:广州中国科学院工业技术研究所科技管理与对外合作处, 2010:13.
- [21] LI S Y, ZONG R W, LIAO G X. Experimental and modeling study on flashover in the typical compartment of extra-high building construction [C]//Institute of Industry Technology, Guangzhou & Chinese Academy of Sciences: Department of Science and Technology Management and Foreign Cooperation, 2010:13. (in Chinese)
- [22] 尉存娟. 水平管道内甲烷-空气预混气体爆炸过程研究[D]. 太原:中北大学, 2010.
- [22] YU C J. Research of explosion process on premix gas of methane-air in horizontal pipeline [D]. Taiyuan: North University of China, 2010. (in Chinese)