

稿号: 2024-0366

前人对可燃气体爆炸强度的研究, 尚未系统开展封闭空间几何尺寸对可燃气体爆炸强度影响的研究工作。但已有证据表明, 不同的空间尺度会导致不同的火焰放热量和放热速率, 从而产生不同的爆炸超压特性和爆炸强度。基于此, 本文通过设计 6 种不同长径比和体积的密闭方形管道, 系统性地研究密闭方形管道内可燃气体爆炸超压特性与空间尺度的关系。反映了长径比和体积变化如何通过影响管口面积(反应速率)和内表面积(热损失)的综合作用, 来调控油气爆炸的最大超压及超压上升速率。所得到的研究结果可对预测和控制各类封闭空间内油气爆炸的后果、减少或避免油气爆炸事故造成的人员伤亡和财产损失等具有重大意义。

长径比与体积对密闭方形管道内油气爆炸超压特性的影响*

周于翔, 张培理, 蒋新生, 马驰, 梁建军, 王冬, 何东海

(中国人民解放军陆军勤务学院, 重庆 401331)

摘要: 为了有效预测和控制封闭空间内油气爆炸的后果, 进而减少事故导致的人员伤亡和财产损失, 对油气爆炸的超压特性与爆炸发生空间尺度的关系进行了研究。在控制初始油气浓度以及点火位置和点火能量不变的情况下, 开展了不同长径比、不同体积和不同长度的密闭方形管道条件下油气的爆炸超压特性实验。实验结果表明, 在爆炸过程中, 超压上升的速率经历急剧增长期、持续震荡期和衰减终止期这三个阶段, 其反映了反应速率与热损失之间的动态变化关系。体积不变(21.2L), 随着长径比的增加(从 7.1 增加至 35.7), 最大超压下降 47.5% (从 472.9kPa 下降至 248.5kPa)、平均超压上升率下降 73.5% ($1359\text{kPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降到 $360\text{kPa}\cdot\text{s}^{-1}$)、最大超压上升速率下降 66.4% (从 $3204\text{kPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降至 $1078\text{kPa}\cdot\text{s}^{-1}$) 及爆炸威力下降 86.2% (从 $643(\text{kPa})^2/\text{ms}$ 下降到 $89(\text{kPa})^2/\text{ms}$), 这是由于管口面积的变化(从 207cm^2 减小到 71cm^2)影响反应速率以及管道内表面积的变化(从 629cm^2 增加到 1022cm^2)影响热损失。进一步分析试验结果发现, 管口面积变化会直接影响火焰前锋面积和反应速率, 对最大超压的影响更为直接和显著, 而内表面积变化对最大超压的影响相对间接, 是通过调节能量传递和热损失来起作用。此外, 管道长度是影响到达最大超压时间的关键因素, 管道增长不仅增加了热损失, 还使反射波与入射波的叠加时间点延后, 并且反射波的能量会相对较多地衰减。

关键词: 密闭方形管道; 油气爆炸; 长径比; 体积; 爆炸超压特性

中图分类号: O389; X932

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Influence of length-diameter ratio and volume on hydrocarbon explosion overpressure characteristics in a closed square pipeline

*收稿日期: 2024.9.28; 修回日期: 2024.11.05;

基金项目: 重庆市教委科学技术研究(KJZD-M202112901); 重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-MSX0127); 陆军勤务学院青年基金(LQ-QN-202427)

第一作者: 周于翔(1993-), 男, 硕士, 助教. E-mail: 540632262@qq.com

通信作者: 张培理(1985-), 男, 博士, 副教授. E-mail: zpl6123@163.com; 何东海(1984-), 男, 硕士, 讲师.

hdhbeyond211@163.com

ZHOU Yuxiang, ZHANG Peili, JIANG Xinsheng, MA Chi, LIANG Jianjun, WANG Dong, HE Donghai

(Army Logistics Academy, Chongqing 401311, China)

Abstract: In order to effectively predict and control the consequences of fuel-air mixtures explosions in enclosed spaces, and thereby reduce the casualties and property losses caused by accidents, this study had investigated the relationship between the explosive overpressure characteristics of fuel-air mixtures and the spatial scale of explosions. The experiment carried out closed square pipes with varying length-to-diameter ratios, volumes and lengths to examine the impact of fuel-air mixtures explosive overpressure characteristics by keeping the initial oil and gas concentration, ignition position, and ignition energy constant. The experimental results showed that the rate of overpressure rise goes through three stages, a rapid increase period, a continuous oscillation period and an attenuation termination period, which reveals the dynamic relationship between reaction rate and heat loss. Under the same volume (21.2L), with the increase of length-diameter ratio (from 7.1 to 35.7), the maximum overpressure decreased by 47.5% (from 472.9kPa to 248.5kPa), and the average overpressure rise rate decreased by 73.5% (from 1359kPa·s⁻¹ to 360kPa·s⁻¹), and the maximum overpressure rise rate reduced by 66.4% (from 3204kPa·s⁻¹ to 1078kPa·s⁻¹), and the explosion power lessened by 86.2% (from 643 (kPa)²/ms to 89 (kPa)²/ms), which is attributed to the change in the nozzle area (from 207cm² to 71cm²) affecting the reaction rate and the change in the internal surface area of the pipeline (from 629cm² to 1022cm²) affecting the heat loss. Further analysis of the experimental results reveals that the changes in the nozzle area affecting the flame front area and reaction rate directly, impacts on the maximum overpressure more directly and significantly. While, the changes in the inner surface area has a relatively indirect effect on the maximum overpressure by regulating energy transfer and heat loss. Additionally, pipeline length is a crucial factor affecting the time to reach maximum overpressure. The increase of the pipeline not only increases the heat loss, but also delays the superposition time point of the reflected wave and the incident wave, with the energy of the reflected wave undergoing relatively attenuation.

Keywords: closed square pipe; oil and gas explosion; length-diameter ratio; volume; explosive overpressure characteristics

0 引言

在石油、天然气等能源行业的生产、储存和运输过程中，油气泄漏并在狭长受限空间内积聚的情况时有发生。这类空间，如管道、隧道、矿井巷道等，由于其独特的几何特征——即长度远大于其横截面直径或宽度，形成所谓的“长径比”差异显著的受限环境。容器体积尺寸的不同，不仅影响油气在空间内的分布、扩散和混合过程，还直接关联到油气爆炸事故的发生概率、爆炸强度及传播特性，从而对安全生产构成严峻挑战^[1-2]。

大量的事故原因调查与科学研究都表明可燃气体爆炸强度与其发生空间维度有着紧密的联系^[3-6]。Salvado 等人^[7]研究发现不同的容器结构和体积会导致不同的爆炸特性。Mittal 等人^[8]研究不同体积的矩形容器对甲烷爆炸超压的影响，发现容器体积的增大往往伴随着爆炸强度的增强。而 Huang 等人^[9]研究发现，圆管体积的增大会导致火焰前锋热损失的增加，进而对乙烯爆炸的超压特性产生影响。此外，在探讨可燃气体爆炸强度的影响因素时，除了容器体积这一关键因素外，长径比同样备受关注。李静野^[10]等人通过构建不同长径比管道油气爆炸实验系统，发现在长径比均偏小或偏大的情况下，长径比的增加会一定程度上促进爆炸的发展。赵祥迪^[11]等人在长径比为 6 的管道内进行的丙烷气体燃爆模拟研究，测得的最大超压达到了 97kPa，这一数值高于以往在长径比 1 至 5 范围内文献所报道的结果。李重情^[12]等人在单一空腔下对不同长径比的瓦斯爆炸传播特性进行研究，发现空腔的长径比与其削弱火焰锋面能力之间存在正相关关系。王波^[13]等人则针对密闭管道内汽油蒸汽与空气混合物的爆炸特性进行研究，实验发现管道的长径比不仅影响爆炸最大超压值，还影响到达最大超压值的最佳油气浓度。

从目前主要研究结论上看^[3-13], 狭长空间内油气爆炸特征参数会随着管道空间尺度的变化而呈现不同规律。值得注意的是部分文献^[8-13]研究结论并不一致, 如文献^[8]认为爆炸强度随容器体积增大而增强, 文献^[9]则认为爆炸强度随体积增大而减小。此外, 如文献^[10-11]认为长径比的提升会促进爆炸的发展, 而文献^[12-13]认为长径比的提升会抑制爆炸的发展。多数研究者只针对容器体积或长径比变化对油气爆炸的超压特性影响进行研究, 而忽视了容器体积或长径比变化时, 另一个参数也可能会随之发生变化。因此, 从研究现状来看, 容器尺寸对爆炸强度的影响规律目前尚缺乏公认且统一的研究结论, 同时研究结论并不完全一致, 存在争论。

基于上述问题, 本文将重点探讨三个不同条件下的密闭方形管道内油气爆炸超压特性。一是相同体积下, 不同长径比的狭长受限密闭方形管道内油气与空气混合爆炸产生的超压特性; 二是相同长径比下, 不同体积的狭长受限密闭方形管道内油气与空气混合爆炸产生的超压特性; 三是相同内径下, 不同长度的狭长受限密闭方形管道内油气与空气混合爆炸产生的超压特性。以此研究长径比、体积等空间尺度参数对油气爆炸超压特性的影响规律, 对于深化拓展油气爆炸理论, 深入理解油气爆炸过程的关键现象与内在本质等具有重要研究意义。同时, 所得到的研究结果可对预测和控制各类封闭空间内油气爆炸的后果、减少或避免油气爆炸事故造成的人员伤亡和财产损失等具有重大意义。

1 实验装置与方法

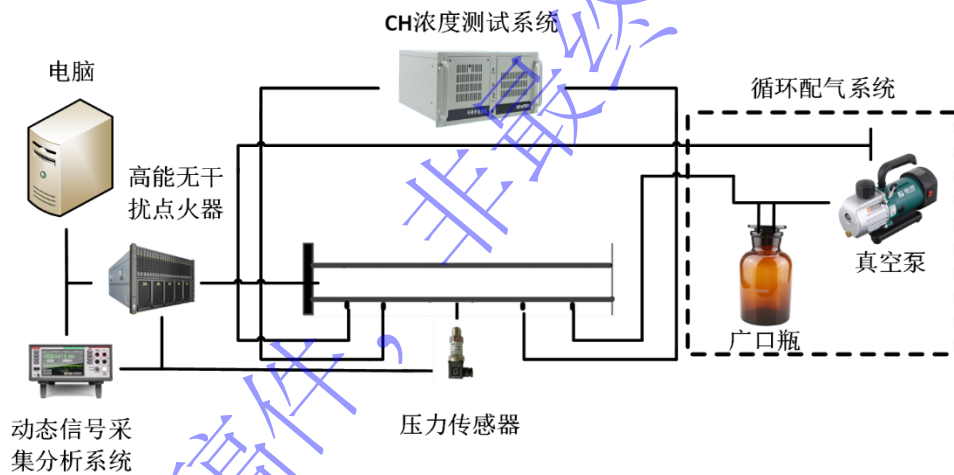


图1 实验系统

Fig.1 Experimental system

油气爆炸实验系统如图1所示, 主要由实验台架、循环配气系统、动态信号采集分析系统、点火系统和CH浓度测试系统等组成。在实验中使用6种不同尺寸的钢制方形管道, 其尺寸参数如表1所示。

表1 密闭管道的尺寸参数

Table 1 The size of closed pipes

管道	L/cm	D/cm	V/L	L/D
1	102	14.4	21.2	7.1
2	163	11.4	21.2	14.3
3	300	8.4	21.2	35.7
4	168	8.4	11.9	20
5	228	11.4	29.6	20
6	288	14.4	59.7	20

根据冯路阳^[14]等人研究, 方形管道和圆形管道的火焰传播速度和最大超压近乎相等, 但方形管道到达最大爆炸压力所需要的时间相比较短。更有利于实验数据的对比分析, 因此实验选用 6 种不同方形管道。其各管道参数分别为管道 1 长 300cm, 横截面为 8.4cm×8.4cm 的方形钢制管道; 管道 2 长 163cm, 横截面为 11.4cm×11.4cm 的方形钢制管道; 管道 3 长 102cm, 横截面为 14.4cm×14.4cm 的方形钢制管道; 管道 4 长 168cm, 横截面为 8.4cm×8.4cm 的方形钢制管道; 管道 5 长 228cm, 横截面为 11.4cm×11.4cm 的方形钢制管道; 管道 6 长 288cm, 横截面为 14.4cm×14.4cm 的方形钢制管道。压力采集系统最高采样率 200ksps, 压力传感器量程为 0~1MPa, 压力传感器安装于管道中间位置(若压力传感器靠前会受点火系统影响, 若压力传感器靠后会受闭口反射振动的影响)。点火系统采用 WGDH-5 型高能无干扰点火器, 点火头均安装在管道左侧端口中心处, 采用单触点点火模式。当油气初始油气体积分数为 1.75% 时, 最大爆炸超压值达到最大^[15], 采用初始油气体积分数为 1.7% 进行爆炸实验^[16], 在这个浓度下, 油气混合物既不会过于稀薄导致爆炸难以发生, 也不会过于浓厚使得爆炸威力过大, 从而便于观察和记录爆炸过程中的各种参数变化。

实验时, 首先利用配气循环系统对狭长密闭管道进行预充气处理, 使管道内油气混合物的体积浓度达到 1.7% 且在 30s 内保持不变, 认为其分布均匀。紧接着, 关闭配气循环系统, 点燃油气引发爆炸, 同时用动态信号采集系统实时采集相关数据。爆炸结束后, 用鼓风机吹扫容器内的燃烧产物, 准备下次实验。实验中燃料为 92# 车用汽油(中国石油化工股份有限公司生产), 初始压力为 101kPa, 初始温度为 293K, 点火能量 1.5J。

油气爆炸超压特性主要包括最大超压、到达最大超压的时间、平均超压上升速率(最大超压/到达最大超压的时间)、最大超压上升速率和爆炸威力指数等, 上述超压特性特征值均可由超压历程曲线获得。每组工况重复三次, 为确保实验结果准确可靠, 最大超压和到达最大超压时间的最大与最小偏差不得超过 10%, 认为实验结果重复性较好。本次分析规律时, 取三条线中最大超压居中线。

2 实验结果与分析

2.1 同体积, 不同长径比的狭长受限密闭方形管道内油气爆炸超压变化规律

图 2~3 分别为相同容积(21.2L)和初始油气体积浓度(1.7%)条件下, 不同长径比 L/D (7.1, 14.3, 35.7) 的油气爆炸超压和超压上升速率历程曲线。

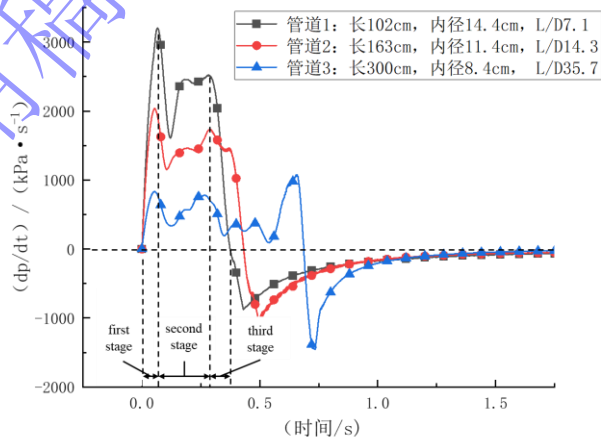


图 2 同体积, 不同长径比 L/D 下超压上升速率历程曲线

Fig.2 Overpressure rising rate history curves with different L/D at the same volume

从图 2 可以看出, 狭长受限密闭方形管道内油气爆炸后的超压上升速率特性, 以管道 1 为例, 其过程可以细分为三个显著阶段。第一阶段持续时间为 0 至 65.8ms, 是超压上升速率的急剧增长阶段。在这一初始阶段, 爆炸引发的火焰以半球形状迅速向前推进, 其扩展势头强劲, 超压上升速率迅速上升。然而, 随着火焰前锋逐渐扩大最终与管道的四壁发生接触, 并受到明显的约束。火焰与管壁的接触不仅限制火焰的进一步扩展, 还导致大量热损失。这种热损失在图 2 中表现为第一个压力峰值之后, 超压上升速率迅速下降, 超压上升速率开始下降标志着第一阶段结束。紧接着进入第二阶段, 持续时间为 65.8ms 至 282.3ms, 在图 3 表现为超压上升速率不稳定的上升与下降交替模式, 此时管道内的超压上升速率是一个更为复杂的过程, 在这一阶段, 爆炸性混合物的持续燃烧和分解仍在不断产生新的压力波, 同时管壁的热传导也在持续影响系统的总体热能和压力状态。因此, 第二阶段的超压上升速率更多地是反应释热和管壁散热相互作用的结果。最终是第三阶段, 持续时间为 282.3ms 至 374.1ms, 随着管道内油气与氧气的逐渐耗尽, 火焰活动趋于减弱, 燃烧反应速率和能量释放均显著下降, 而热损失依然存在, 因此这一阶段在图 2 中表现为超压上升速率再次经历显著的下降。

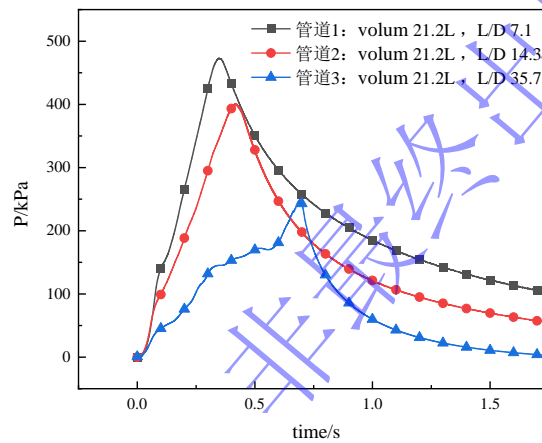


图 3 同体积, 不同长径比 L/D 下超压历程曲线

Fig.3 Overpressure history curve with different L/D at the same volume

从图 3 可以看出, 在保持管道总体积不变的情况下, 随着方形管道长径比 L/D 的增加, 油气爆炸后的最大超压呈现出明显的下降趋势。管道 1 (长径比 7.1) 为最高的最大超压 472.9kPa, 管道 2 (长径比 14.3) 的最大超压则降低至 400.8kPa, 管道 3 (长径比 35.7) 的最大超压进一步下降至 248.5kPa。这一发现不仅在本实验中得到验证, 而且与先前的研究工作相吻合。王波^[13]在其油气爆炸实验中也发现类似的规律, 即管道长径比的增大导致爆炸过程中最大超压的减小。此外, Bi^[17]等人在数值模拟长密闭管道内甲烷/空气爆燃的研究中, 同样得出长径比的增加导致最大超压降低的结论。

超压上升速率反映爆炸的剧烈程度, 除超压上升速率, 爆炸威力指数也是衡量爆炸破坏力的一个重要参数, 广泛应用于涉及瓦斯爆炸的压力容器的工程设计和风险评估^[18], 其定义如下:

$$E_{max} = P_{max}(dp/dt)_{ave} \quad (1)$$

式中: E_{max} 为爆炸威力指数, kPa; $(dp/dt)_{ave}$ 表示平均超压上升速率, kPa·s⁻¹。

为便于进一步分析比较, 将上述 3 种管道的主要爆炸超压特性, 包括最大超压、平均超压上升速率、最大超压上升速率和爆炸威力指数参数绘制成图, 如图 4 所示。

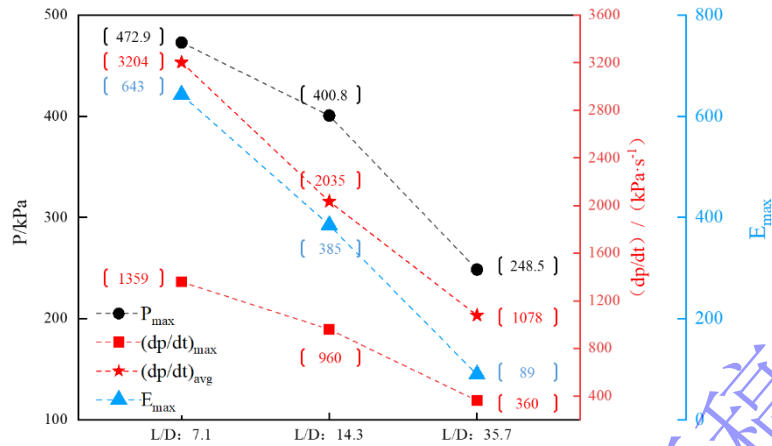


图4 同体积不同长径比 L/D 下爆炸超压特性特征值

Fig.4 Explosion overpressure characteristic values with different L/D at the same volume

从图4可以看出,相同体积,不同长径比的方形管道内进行油气爆炸实验,当长径比 L/D 为 7.1 时,平均超压上升率、最大超压上升率和爆炸威力指数分别为 $1359kPa \cdot s^{-1}$ 、 $3204kPa \cdot s^{-1}$ 和 $643(kPa)^2/ms$; 当长径比 L/D 为 14.3 时,平均超压上升率、最大超压上升率和爆炸威力指数分别为 $960kPa \cdot s^{-1}$ 、 $2035kPa \cdot s^{-1}$ 和 $385(kPa)^2/ms$; 当长径比 L/D 为 35.7 时,平均超压上升率、最大超压上升率和爆炸威力指数分别为 $360kPa \cdot s^{-1}$ 、 $1078kPa \cdot s^{-1}$ 和 $89643(kPa)^2/ms$ 。以上数据表明,当体积相同时,随着长径比 L/D 的增加,包括最大超压,平均超压上升速率、最大超压上升速率和爆炸威力指数都呈下降的趋势。下面分析造成以上现象的原因。

首先,从爆炸超压的基本特性出发,其大小与火焰面积、火焰传播速度以及热损失过程紧密相关。基于表面燃烧理论,火焰面积的扩大直接促进质量燃烧反应速率的提升,进而加快超压的上升速度。在方形管道内,油气被点燃后,初期火焰为“球状”层流火焰,火焰锋面平滑,保持以半球形向前传播^[19],这期间火焰面积增大,燃烧变得激烈,超压上升趋势变快。但由于实验容器为狭长受限密闭的方形管道,火焰在某一时刻会与壁面接触,使得大部分火焰面积突然消失,减缓反应速率和超压的增长。且随着火焰锋面和压力波继续向后传播,爆炸燃烧后的高温高压气体与壁面接触面积不断增大,管道壁面温度又低于爆炸燃烧后气体温度,导致大量的热量通过管道表面散失到周围环境中。进一步阐述,这是基于热传导定律中热流密度和温度梯度之间的关系,有散热损失公式:

$$q = -KA (\Delta T/\Delta x) \quad (2)$$

式中: q 是热流密度; K 是热传导系数; A 是传热表面积; ΔT 是温度差; Δx 是传热厚度。由(2)式可知,单位时间内流过传热面积的热量 q 等于传导系数 K 乘以传热面积 A 乘以温度差 ΔT 除以传热厚度 Δx 。由于油气爆炸是一个瞬态过程,在极短的时间内,高温高压的气体充满整个密闭管道,即 A 的传热面积为管道内表面积。因此,管道内表面积越大,单位时间内的热流密度越大,总体散热损失越大。这种热量的散发减少可用于进一步压缩和加热爆炸气体的能量,进而限制爆炸压力的上升幅度。另一方面,根据 F. Cammarota^[20] 等人的研究,计算管道容器内可燃气体最大超压上升速率公式为:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{MAX} = \frac{A_V}{V} S_L (P_{MAX} - P_0) \left(\frac{P_{MAX}}{P_0}\right)^{1/\gamma} \quad (3)$$

式中: A_V 是最大火焰燃烧面积; V 是管道体积; S_L 是火焰速度; P_{MAX} 是最大超压; P_0 是初始压力; γ 是绝热气体指数。由(3)式可知,最大超压上升率与容器体积、最大火焰燃烧面积、火焰速度、最大超压、初始压力和绝热气体指数有关。在管道 1 至 3 中,其体积相同; 又根据 Metghalhi and Kech^[21] 等人研究,燃烧爆炸的火焰速度主要与可燃气体种类和可燃气体气浓度相关(本实验为 92#号车用汽

油、油气体积分数 1.7%)，即火焰速度相同；初始压力相同；绝热气体指数相同。因此，在管道 1 至 3 中，最大火焰燃烧面积是影响最大超压和最大超压上升速率的主要因素之一。根据 F. Cammarota^[20] 等人的研究，最大火焰燃烧面积可通过燃烧爆炸早期火焰形状来确定，即近似认为火焰刚接触侧壁时，火焰面积最大。在本实验条件下 A_V 的公式为：

$$A_V = \frac{1}{2} \pi D^2 \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (3) 式得：

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{MAX} = \frac{\pi D^2}{2V} S_L (P_{MAX} - P_0) \left(\frac{P_{MAX}}{P_0}\right)^{1/\gamma} \quad (5)$$

因此，管道内径越大，管口面积越大，最大火焰燃烧面积越大，最大超压和最大超压上升率越大。在管道 1 至 3 中，随着长径比的增加（管道 1 长径比 7.1；管道 2 长径比 14.3；管道 3 长径比 35.7），管口面积降低（管道 1 管口面积 207cm²；管道 2 管口面积 130cm²；管道 3 管口面积 71cm²）和管道内表面积增大（管道 1 内表面积 629cm²；管道 2 内表面积 769cm²；管道 3 内表面积 1022cm²）共同导致火焰传播受限、反应激烈程度降低以及散热损失增加，这些因素综合作用使得最大超压、平均超压上升速率、最大超压上升速率和爆炸威力指数均有所下降。

2.2 同长径比，不同体积的狭长受限密闭方形管道内油气爆炸超压变化规律

为进一步探索狭长受限密闭方形管道内油气爆炸的超压变化规律，图 5~6 分别为相同长径比 L/D (20) 和初始油气体积浓度 (1.7%) 条件下，不同体积 (11.9L, 29.6L, 59.7L) 的油气爆炸超压和超压上升速率历程曲线。

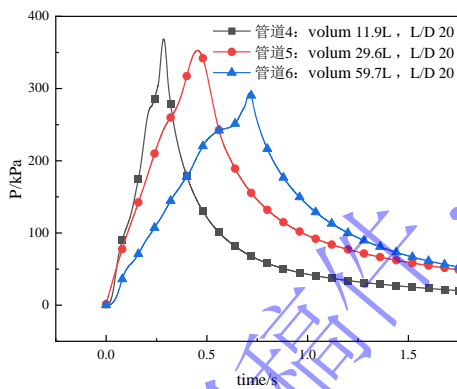


图 5 同长径比不同体积下超压历程曲线

Fig.5 Overpressure history curves with different volume at the same L/D

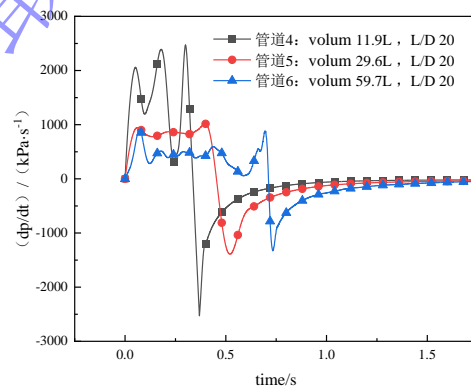


图 6 同长径比不同体积下超压上升速率历程曲线

Fig.6 Overpressure rising rate history curves with different volume at the same L/D

从图 5 和图 6 可以看出，在保持管道长径比 L/D (20) 不变的情况下，随着管道体积的增加（管道 4 的 11.9L；管道 5 的 29.6L；管道 6 的 59.7L），油气爆炸的最大超压呈现出稳步下降的趋势，从最初的 368.7kPa 逐渐降低至 352.8kPa，并最终降至 293.9kPa。同样，超压上升速率也从管道 4 的 2476kPa·s⁻¹ 下降至管道 5 的 1017kPa·s⁻¹，再进一步地下降到管道 6 的 913kPa·s⁻¹。以上数据表明同长径比，方形管道体积的增大对油气爆炸后的最大超压及其上升速率产生显著的抑制效应。

将上述 3 种管道的主要爆炸超压特性主要参数绘制成图，如图 7 所示。

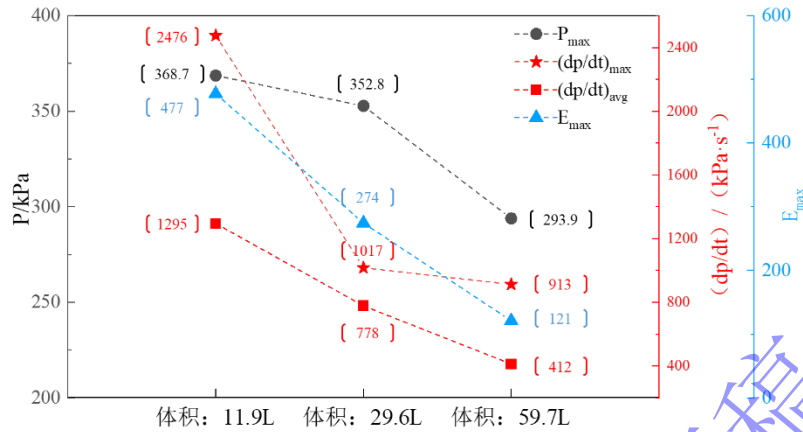


图7 同长径比不同体积下爆炸超压特性特征值

Fig.7 Explosion overpressure characteristic values with different volume at the same L/D

从图7可以看出,在实验2.2当中,相同长径比L/D(20),体积从11.9L增长到59.7L。其超压特性特征值变化为:最大超压下降幅度为25.5%;平均超压上升速率下降幅度为214.3%;最大超压上升速率下降幅度为171.2%;爆炸威力指数下降幅度为618.4%。在实验2.1中,相同体积(21.2L),长径比从L/D从7.1增长到35.7。其超压特性特征值变化为:最大超压下降幅度为90.3%;平均超压上升速率下降幅度为275.5%;最大超压上升速率下降幅度为197.2%;爆炸威力指数下降幅度为618.4%。体积不变,随着长径比从7.1增加到35.7,管道内表面积增加(629cm²增加到1022cm²),这意味着更多的热量能够通过管道壁面向外传递,导致热损失增加。同时,管口面积减小(207cm²降低到71cm²)限制火焰前锋的扩展面积,使得燃烧过程相对缓慢。这两个因素共同作用,极大地减缓超压的增长趋势,表现为最大超压、平均超压上升速率、最大超压上升速率以及爆炸威力指数均显著下降。这种双重抑制效应(内表面积增大促进热损失,管口面积减小影响反应速率和限制火焰传播)共同解释实验2.1中观察到的超压特性特征值大幅下降的原因。在实验2.2中,方形管道体积公式为:

$$V = D^2 L \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式得:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{MAX} = \frac{\pi}{2L} S_L (P_{MAX} - P_0) \left(\frac{P_{MAX}}{P_0}\right)^{1/\gamma} \quad (7)$$

从式(7)可以看出,在管道4至6中,长径比不变,体积增大,管道长度也增大,最大超压和最大超压上升率降低。以实验数据来看,随着体积从11.9L增加到59.7L,内表面积大幅增加(579cm²增加到1700cm²),同样促进热量的外散,减缓超压的增长。然而,管口面积相应增大(71cm²增加到207cm²),这在一定程度上促进火焰前锋的扩展,加速燃烧过程,从而部分抵消内表面积增大带来的热损失效应。然而,虽然实验2.2管道管口面积有所增长,但在长径比为20的情况下,内表面积的绝对增长量远大于管口面积。因此,在实验2.2中超压特性特征值总体上仍表现为上升趋势的减缓。

实验2.1与实验2.2的进行对比分析,可以更系统地探讨管道内表面积和管口面积变化对油气爆炸超压特性的影响。与实验2.1相比,实验2.2超压特性特征值下降幅度相对较小。这主要差异来源于管道内表面积和管口面积变化对超压特性的不同影响机制。实验2.1通过同时增大内表面积和减小管口面积,实现对超压增长趋势的双重抑制;而实验2.2中,虽然内表面积增加量高于实验2.1(实验2.1内表面积增加量393cm²,实验2.2内表面积增加量112cm²),也减缓超压增长,但管口面积的增大在一定程度上缓解这种趋势。因此,实验2.1中观察到的超压特性下降幅度更为显著,这进一步验证管

口面积与管道内表面积在油气爆炸过程中的重要作用。因此，管口面积与管道内表面积的综合作用机制是理解和预测油气爆炸超压特性的关键因素。

进一步研究管道内表面积和管口面积对油气爆炸超压特性的影响。从表 2 可以看出，从管道 5 到管道 3，内表面积减小 44cm^2 ，管口面积减小 59cm^2 ，最大超压从 352.8kPa 下降到 248.5kPa 。同样，从管道 2 到管道 4，内表面积减小 190cm^2 ，管口面积减小 59cm^2 ，最大超压从 400.8kPa 下降到 368.7kPa 。在管口面积与管道内表面积变化量相近的情况下，相比于内表面积的变化，管口面积的变化对管道内最大超压的影响更为显著。这主要原因是管口面积直接关系到火焰前锋面积，火焰前锋面积的大小直接影响反应速率，反应速率的加快能加速能量的释放，进而促使爆炸超压上升趋势变快。相比之下，内表面积的变化虽然会影响爆炸过程中的能量传递和热量散失，但这种影响机制相对而言比较间接，它主要通过调节爆炸波在管道内的传播效率以及热量向环境的散失来起作用，而不是直接作用于反应速率或能量释放上。因此，当管口面积的变化量与管道内表面积变化量相近时，管口面积对爆炸超压的影响更为直接和显著。在油气爆炸安全设计中，应特别关注管口面积的优化设计，以有效控制爆炸超压。

表 2 内表面积和管口面积对最大超压的影响

Table 2 The influence of internal surface area and nozzle area on the peak overpressure

管道	L/cm	D/cm	内表面积/ cm^2	管口面积/ cm^2	最大超压/kPa
5	228	11.4	1066	130	352.8
3	300	8.4	1022	71	248.5
2	163	11.4	769	130	400.8
4	168	8.4	579	71	368.7

2.3 同内径，不同长度的狭长受限密闭方形管道内油气爆炸超压变化规律

实验 2.1 与 2.2 探讨了体积与长径比在方形管道内对油气爆炸超压特性的影响，发现内表面积和管口面积是其主要的影响因素。但在保持方形管道同体积、不同长径比或同长径比、不同体积时，内表面积和管口面积都在发生变化。因此，实验 2.3 为同内径、不同长度，来验证长度（内表面积）的变化对油气爆炸超压特性的影响。图 8、图 9 和图 10 分别为密闭方形管道内相同内径（ 8.4cm ， 14.4cm ）和初始油气体积浓度（ 1.7% ）条件下，不同管道长度的油气爆炸超压历程曲线。

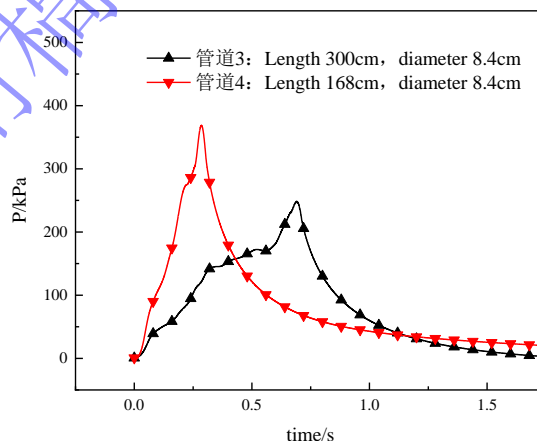


图 8 内径为 8.4cm 的不同长度下超压历程曲线

Fig.8 Overpressure history curves at different lengths with an inner diameter of 8.4cm

图 8 可以看出, 在狭长密闭方形管道内进行油气爆炸实验, 当管道内径相同时 (管口面积相同, 71cm^2), 管道长度从 168cm 增加到 300cm , 内表面积从 579cm^2 增加到 1022cm^2 , 最大超压从 368.7kPa 下降到 248.5kPa , 到达最大超压所需时间从 0.2848s 增长到 0.6896s 。

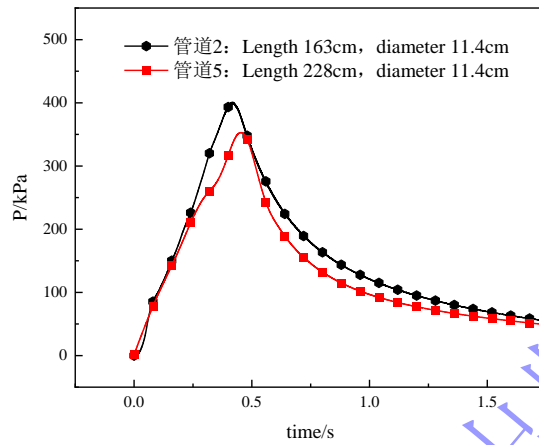


图 9 内径为 11.4cm 的不同长度下超压历程曲线

Fig.9 Overpressure history curves at different lengths with an inner diameter of 11.4cm

图 9 可以看出, 在狭长密闭方形管道内进行油气爆炸实验, 当管道内径相同时 (管口面积相同, 130cm^2), 管道长度从 163cm 增加到 228cm , 内表面积从 769cm^2 增加到 1066cm^2 , 最大超压从 400.8kPa 下降到 352.8kPa , 到达最大超压所需时间从 0.4175s 增长到 0.4536s 。

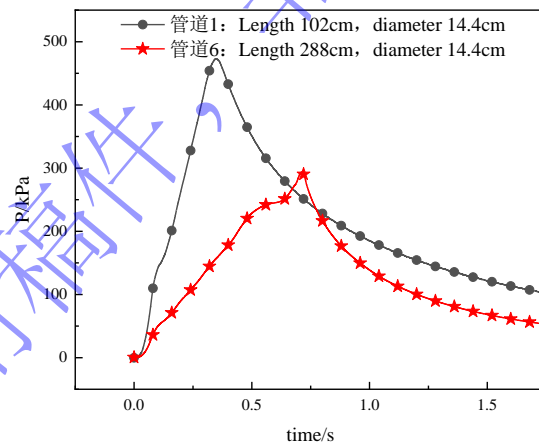


图 10 内径为 14.4cm 的不同长度下超压历程曲线

Fig.10 Overpressure history curves at different lengths with an inner diameter of 14.4cm

图 10 可以看出, 在密闭方形管道内进行油气爆炸实验, 当管道内径相同时 (管口面积相同, 207cm^2), 管道长度从 102cm 增加到 288cm , 内表面积从 629cm^2 增加到 1700cm^2 , 最大超压从 472.9kPa 下降到 293.9kPa , 到达最大超压所需时间从 0.3481s 增长到 0.7129s 。

以上数据可以看出, 在密闭方形管道内进行油气爆炸实验, 当管道内油气体积浓度和内径相同时, 管道的长度则成为影响最大超压和到达最大超压时间的主要因素。一方面, 管道的长度越长, 最大超压越低, 到达最大超压所需时间越多。最大超压的降低主要原因是管道越长, 管道内表面积越大, 导致热损失增加, 最大超压上升趋势变慢。另一方面, 管道越长, 到达最大超压时间增多的主要原因是

在较短的管道中，爆炸波能够迅速传播到管道的另一端，并在那里发生反射。由于管道长度较短，反射波与入射波之间的时间差也较小，使得两者在短时间内能够迅速叠加，且这种叠加效应增强管道内的压力，导致压力迅速上升。因此，在较短的管道中，到达最大超压的时间相对较短。而随着管道长度的增加，爆炸波需要相对更长的时间才能传播到管道的另一端，反射波与入射波之间的时间差不仅会增大，且随着反射波在管道内的传播距离增加，其携带的能量可能因多种因素（如管壁摩擦、气体阻力等）而相对衰减，从而减弱叠加时产生的压力增强效果，因此，在较长的管道中，到达最大超压的时间会相对较长。

3 结论

本文通过设计 6 种不同长径比和体积的密闭方形管道，探讨了密闭方形管道内可燃气体爆炸超压特性与空间尺度之间的关系，主要研究结论如下：

(1) 狭长受限密闭方形管道内油气爆炸超压上升速率经历三个阶段。①急剧增长期：火焰迅速扩展，超压急升后因热损失骤降；②持续震荡期：释热与散热相互作用导致超压上升速率不稳定；③衰减终止期：燃料耗尽，火焰减弱，燃烧反应速率和能量释放下降，超压上升速率显著下降。

(2) 相同体积下，长径比 L/D 增加导致管口面积减小、内表面积增大，限制火焰传播，降低反应速率和能量释放，增加热损失，从而使最大超压、平均超压上升速率、最大超压上升速率及爆炸威力指数均呈下降趋势。

(3) 管口面积与内表面积变化均影响油气爆炸超压特性，但管口面积变化对最大超压影响更显著，因其直接影响火焰前锋面积和反应速率，快速调控能量释放。而内表面积变化影响相对间接，主要通过调节能量传递和热损失来起作用。

(4) 管道长度的增加会降低最大超压值并延长到达最大超压时间。这主要是因为随着管道的增长，热损失也随之增加。此外，反射波与入射波的叠加时间点会延后，同时反射波的能量会相对较多地衰减。

需要指出的是，油气爆炸是一个极为短暂且复杂的瞬态过程，其影响因素众多。然而，受限于实验条件，无法精确测量火焰面积、湍流度、火焰结构以及散热损失等关键因素，因此难以对这些因素进行定量分析。尽管如此，这也是目前正在研究和攻关的重点。

参考文献

- [1] Ma G, Huang Y, Li J. Risk Analysis of Vapour Cloud Explosions for Oil and Gas Facilities [M]. 2019.
- [2] Wei S, Jiang X, Xu J, et al. Experiment study on the gasoline-air mixture explosion suppression in a long-narrow confined space [J]. Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(10): 51-56 and 62. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.10.009.
- [3] Li T, Wang L Q, Ma H H, et al. Explosion characteristics of H₂/CH₄/N₂O at fuel-lean and stoichiometric conditions [J]. Combustion science and technology, 2022. DOI: 10.1080/00102202.2020.1825400.
- [4] Mitu M, Brandes E. Influence of pressure, temperature and vessel volume on explosion characteristics of ethanol/air mixtures in closed spherical vessels [J]. Fuel, 2017, 203(sep.1): 460-468. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.04.124.
- [5] Cheng, FangmingChang, ZhuchuanLuo, ZhenminLiu, ChangchunWang, TaoHe, Chunxu. Large eddy simulation and experimental study of the effect of wire mesh on flame behaviours of methane/air explosions in a semi-confined pipe [J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2020, 68(1). DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104258.
- [6] 杜扬, 李国庆, 吴松林, 等. T 型分支管道对油气爆炸强度的影响[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(5): 6. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0729-06.

- DU Y, LI G Q, WU S L, et al. Explosion intensity of gasoline-air mixture in the pipeline containing a T-shaped branch pipe [J]. *explosion and shock waves*, 2015, 35(5): 6. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0729-06.
- [7] Salvado F C, Tavares A J, Teixeira-Dias F, et al. Confined explosions: The effect of compartment geometry [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 48: 126-144. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.04.013.
- [8] Mittal, Manju. Explosion pressure measurement of methane-air mixtures in different sizes of confinement [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 46: 200-208. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.02.022.
- [9] Huang L, Wang Y, Zhang L, et al. Influence of pressure on the flammability limits and explosion pressure of ethane/propane-air mixtures in a cylinder vessel [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 74: 104638-. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104638.
- [10] 李静野, 蒋新生, 李进, 等. 长径比对管道油气爆炸特性与火焰传播规律影响研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(8): 7. DOI: CNKI:SUN:LDBK. 0. 2020-08-019.
- LI J Y, JIANG X S, LI J, et al. Study on Influence of length-diameter ratio on explosion characteristics and flame propagation law of oil and gas in pipeline [J]. *China Safety production science and technology*, DOI: CNKI:SUN:LDBK. 0. 2020-08-019.
- [11] 赵祥迪, 张广文, 郑毅, 等. 狭长通道内部丙烷气体爆炸冲击实验与模拟分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2024(003): 020. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2024.03.006.
- ZHAO X D, ZHANG G W, ZHENG Y, et al. Experiment and Simulation Analysis of propane Gas Explosion Impact in narrow channel [J]. *China Safety Production Science and Technology*, 2024(003): 020. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2024.03.006.
- [12] 李重情, 穆朝民, 许登科, 等. 空腔长度对瓦斯爆炸冲击波传播影响研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(6): 8. DOI: CNKI:SUN:KSYL.0.2018-06-029.
- LI Z Q, MU C M, XU D K, et al. Influence of cavity length on shock wave propagation of gas explosion [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(6): 1293-1300. DOI: CNKI:SUN:KSYL.0.2018-06-029.
- [13] 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): 7. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.09.013.
- WANG B, DU Y, LI G Q, et al. Study on oil and gas explosion characteristics in narrow and closed pipeline [J]. *Vibration and shock*, 2017, 36(9): 7. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.09.013.
- [14] 冯路阳. 管道结构对瓦斯爆炸压力及温度的影响研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2017.
- [15] 蒋新生, 魏树旺, 袁广强, 等. 狭长管道油气爆炸流场分布特征规律及分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(8): 5. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2016.08.022.
- JIANG X S, WEI S W, YUAN G Q, et al. Characteristic rules and analysis of flow field distribution for gasoline-air mixture explosion in narrow and long pipeline [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(8):5. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2016.08.022.
- [16] 李国庆, 张笈玮, 武军, 等. 方管内汽油-空气混合气体密闭爆炸和泄爆特性研究[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(10): 14. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0416.
- LI G Q, ZHANG J W, WU J, et al. Characteristics of closed and vented explosions of gasoline-air mixture in a square tube [J]. *explosion and shock waves*, 2020, 40(10): 14. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0416.
- [17] Bi M, Dong C, Zhou Y. Numerical simulation of premixed methane-air deflagration in large L/D closed pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 40(none): 337-342. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.065.
- [18] Razus D, Brinzea V, Mitu M, et al. Temperature and pressure influence on explosion pressures of closed vessel propane-air deflagrations [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1-3): 548-555. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.086.
- [19] 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): 11. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180614.

- 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, 2018, 69(12): 11. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180614.
- [20] Cammarota, F, et al. (2010) Experimental analysis of gas explosions at non-atmospheric initial conditions in a cylindrical vessel. Process Saf. Environ. Protect, 88(5): 341-349.
- [21] Metghalchi, M, Keck, J. C. (1982) Burning velocities of air mixtures with methanol, isooctane, and indolence at high pressure and temperature. Combust. Flame, 48(48): 191-210.

(责任编辑 爆炸与冲击)

录用稿件，
非最终出版稿