

中文引用格式:栾婷婷,黄俊,杨国梁,等.混合气体爆炸极限和爆炸压力影响因素研究进展[J].中国安全科学学报,2025,35(6): 79-87.

英文引用格式:LUAN Tingting, HUANG Jun, YANG Guoliang, et al. Research progress on influencing factors of explosion limit and explosion pressure of mixed gases[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 79-87.

混合气体爆炸极限和爆炸压力影响因素研究进展*

栾婷婷¹副教授,黄俊¹,杨国梁^{**2}正高级工程师,

任常兴³研究员,吕鹏飞¹副教授

(1 北京石油化工学院 安全工程学院,北京 102617; 2 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 3 应急管理部 天津消防研究所,天津 300381)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0257

资助项目:应急管理部重点科技计划项目(2024EMST060602)。

【摘要】 随着掺氢天然气的发展,混合气体爆炸事故逐渐引起重视,为减少混合气体爆炸事故带来的损失和影响,通过文献综述的方法,整合国内外研究成果,综合梳理试验数据与数值模拟分析结果,探讨初始温度、初始压力、气体成分、试验容器及点火条件等因素对混合气体爆炸极限和爆炸压力影响的国内外研究进展。结果表明:初始温度和初始压力对混合气体爆炸极限有较明显的影响,且二者耦合作用下的影响更大;混合气体爆炸上限和爆炸下限对影响因素的敏感性不同,相对来说,爆炸上限受到的影响更大;混合气体爆炸压力的最大值一般出现在略高于理论当量浓度时,且受到的影响因素复杂多样,其中,受混合气体成分的影响较大,氢气、乙烯等可燃气体的加入会提高甲烷等主要气体的爆炸压力;数值模拟技术可为混合气体爆炸极限和爆炸压力的研究提供很好的重要补充和验证。

【关键词】 混合气体; 爆炸极限; 爆炸下限; 爆炸上限; 爆炸压力; 数值模拟

Research progress on influencing factors of explosion limit and explosion pressure of mixed gases

LUAN Tingting¹, HUANG Jun¹, YANG Guoliang², REN Changxing³, LYU Pengfei¹

(1 School of Safety Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;

2 China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China;

3 Tianjin Fire Research Institute, Ministry of Emergency Management, Tianjin 300381, China)

Abstract: With the development of hydrogen-methane-mixture, mixed gas explosion accidents have gradually attracted attention. To reduce the loss and influence caused by mixed gas explosion accidents, this study integrated research results at home and abroad through literature review. The experimental data and numerical simulation analysis results were comprehensively sorted out. The research progress at home and overseas on the influence of initial temperature, initial pressure, gas composition, test vessel and

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0079-09; 收稿日期:2025-02-18; 修稿日期:2025-04-19

** 通信作者:杨国梁(1986—),男,山东临清人,博士,正高级工程师,主要从事危险化学品定量风险评估方面的研究。E-mail: yangguoliang@outlook.com。

ignition conditions on the explosion limit and explosion pressure of mixed gas was discussed. The results show that the initial temperature and initial pressure have a significant effect on the explosion limit of the mixed gas, and the coupling effect of the two is greater. The upper and lower explosion limits of the mixed gas exhibit different sensitivities to the influencing factors, with the upper limit being more significantly affected. The maximum explosion pressure of the mixed gas generally appears when it is slightly higher than the theoretical stoichiometric concentration, and the influencing factors are complex and diverse. Among these factors, the maximum explosion pressure is greatly affected by the composition of the mixed gas. The addition of combustible gases such as hydrogen and ethylene will increase the explosion pressure of major gases such as methane. Numerical simulation technology can provide an important supplement and verification for the study of explosion limit and explosion pressure of mixed gas.

Keywords: mixed gas; explosion limit; lower explosive limit; upper explosive limit; explosion pressure; numerical simulation

0 引言

随着城市化和工业化进程的加速推进,以及国家对绿色可持续发展战略的深入实施,推动以电力、天然气、生物质能、地热能、工业余热等清洁低碳能源替代煤炭已成为能源转型的主流趋势。在此背景下,化石燃料的消耗量逐渐缩减,而清洁能源,尤其是绿色无污染的氢气受到广泛关注。由于氢气相关的设备设施以及配套的管网建设成本高、难度大,距离氢气的广泛使用还存在一定的障碍。为解决这一问题,将氢气掺杂进入天然气之中,形成混合气体进行输送,既可解决氢气的使用问题,也可利用部分现有的天然气管网,减少新管网建设的成本。然而,这一能源结构的转变也带来了新的安全挑战。混合气体在生产、储存、运输和使用过程中,火灾或爆炸事故的可能性和后果严重程度都与单一的气体不完全相同。同时,混合气体引发的火灾爆炸事故往往具有突发性强、爆炸能量巨大、影响范围广泛等特点,对人民的生命安全和城市基础设施构成严重威胁。据统计,2023年上半年,国内(不包含港澳台地区)发生燃气爆炸事故294起,造成57人死亡,190人受伤;2021年第3季度,发生燃气事故329起,造成17人死亡,185人受伤^[1-2]。因此,研究混合气体爆炸极限和爆炸压力的影响因素,对于预防该类事故,意义重大。

鉴于此,笔者拟综合梳理试验数据与数值模拟分析结果,系统研究初始温度、初始压力、气体成分、试验容器及点火条件等因素对混合气体爆炸极限和爆炸压力的影响,总结各因素对混合气体爆炸极限及爆炸压力的影响规律与作用程度,以期保障安全生产,降低人员伤亡和财产损失。

1 混合气体爆炸极限研究现状

混合气体爆炸上限和爆炸下限不仅用于科学界定可燃气体的分类以及其所具备的火灾危险等级,还为相关操作规程的制定提供坚实的理论基础。在工业生产、建筑设计以及日常安全管理等领域,这2个参数更是被视为不可或缺的指导依据。

对于混合气体爆炸极限的研究,主要集中在探讨并分析各因素对气体爆炸极限的具体影响。这些因素包括但不限于混合气体的温度、压力等物理条件,以及混合气体中掺杂的物质的比例、爆炸容器的体积等。

1.1 初始温度和初始压力对爆炸极限的影响

温度和压力是影响混合气体爆炸极限的重要因素,它们不仅通过改变分子热运动和碰撞概率影响爆炸极限,还通过复杂的耦合作用进一步改变爆炸特性。国内外学者针对温度和压力的单独作用及其耦合作用对混合气体爆炸极限的影响展开了广泛研究。

JIAO Fengyuan 等^[3]通过试验和模拟的方式研究了不同温度对混合气爆炸极限的影响,结果显示:随着初始温度的升高,合成气的爆炸下限降低,爆炸上限升高,且初始温度对合成气爆炸上限的影响大于对爆炸下限的影响。由于高预热温度对化学反应的加速作用,爆炸极限随着初始温度的升高而展宽。一个安全的系统在高温下可能变成一个可燃的不稳定系统。CHOI 等^[4]测试不同压力、氧浓度条件对氧气-氮气-丙烯混合物爆炸极限的影响,发现随着压力从0.10 MPa增加到0.25 MPa,混合物的爆炸下限变化不显著,但爆炸上限明显提高,增加大约2%。这一现象表明:压力的增加对爆炸上限具有显

著影响。此外,随着氧浓度的降低,由于爆炸所需要的氧气不足,爆炸上限迅速降低。高娜等^[5]测试了不同温度和压力共同作用下甲烷-空气预混气体的爆炸极限,发现不同的初始温度和初始压力耦合作用对爆炸极限影响比单一因素的影响大,但爆炸上限所受影响比爆炸下限受到的影响大。寇丽颖等^[6]在高温(40~120℃)和高压(1~30 MPa)条件下,测试了混合可燃气体爆炸极限,并与理论计算的爆炸极限进行对比,发现试验结果与理论推算的结果有较大差距,试验条件下的爆炸上限远高于理论计算的结果,爆炸下限也比理论结果低。万鑫等^[7]通过试验的方式测定了不同温度和压力条件下甲烷分别与氧气和空气混合后的爆炸下限,并与预测模型的结果进行对比。试验数据表明:随着温度的升高,甲烷/空气或甲烷/氧气的混合气体的爆炸下限逐渐减低,爆炸危险性提高;同时,甲烷与氧气混合后的爆炸极限受温度升高的影响更大。

总结以上研究成果可知:温度和压力对混合气体爆炸极限有较明显的影响,且二者耦合作用下的影响更大。

1.2 混合气体成分对爆炸极限的影响

混合气体的爆炸极限受多种因素影响,混合气体成分中不同气体的性质及其体积比例是关键因素之一。此外,当可燃气体中混入可燃粉尘时,其爆炸极限会发生显著变化。针对这些影响机制,国内外学者采用试验和数值模拟相结合的方法,系统地研究了掺杂物质的类型和比例对混合气体爆炸极限的影响。

ADDAI 等^[8]通过试验测试了粉尘与可燃气体混合后的爆炸极限。试验结果显示:氢气与石松粉、聚乙烯混合后,其爆炸极限并未低于混合物中任何一个气体或粉尘的爆炸下限;而氢气与淀粉混合后,在低于其爆炸极限的条件下发生了爆炸。此外,碳粉、石松粉、淀粉与甲烷混合后,均在低于各自爆炸极限的条件下出现爆炸现象。研究还验证了通过数学公式推导某些气体与粉尘混合物(如氢气与淀粉)的爆炸下限并不准确,应用中以试验数据为准。HAO Qiangqiang 等^[9]将氢气掺入到甲烷中测试其爆炸极限,掺氢量从0~2%的过程中,甲烷的爆炸下限降低50.5%,爆炸极限的范围提高12%,另外,通过综合考虑爆炸上限和爆炸下限的影响,提到爆炸危险度,用以表征可燃气体的相对爆炸风险,通过将爆炸上限和下限纳入统一的评估体系,爆炸危险度能够为工程设计和安全策略的制定提供更为全面和

科学的依据,有助于更好地评估和控制潜在的爆炸风险;CHENG Fangming 等^[10]模拟分析了在 NH_3 - H_2 -空气的混合气体中掺入二氧化碳后对爆炸极限的影响。验证了在 NH_3 中加入氢气,随着氢气的加入混合气体的爆炸极限范围变大;在掺氢比为0.4的 NH_3 气体中加入二氧化碳,随着二氧化碳体积分数的增加,混合气体的爆炸上限降低,爆炸下限增加,总的爆炸危险性降低,当二氧化碳体积分数达到36%时,混合气体的爆炸被完全抑制,这说明在混合气体中通入二氧化碳可有效降低其爆炸危险性。尚融雪等^[11]研究不同压力 and 不同含氢比下的混合气的爆炸下限,发现随着含氢比的增加爆炸下限降低,且含氢比较低时影响更大。压力的增加导致反应速度加快,因此,合成气的爆炸下限也随着压力的升高而降低。该试验结果进一步补充了针对加压条件下混合气体爆炸下限的试验数据。

1.3 试验容器对气体爆炸极限的影响

不同的容器尺寸和几何形状会改变混合气体的湍流特性、热损失和火焰传播,进而影响爆炸极限的测定结果。

GIERAS 等^[12]研究不同腔室体积对己烷的汽-气混合气的爆炸极限的影响,结果表明:在体积为5.6和40 dm³的腔室中,压力为一个大气压时,混合气的爆炸下限基本不变,但爆炸上限均增加,且体积为5.6 dm³的腔室中,爆炸上限增加6%。改变液滴平均直径后的爆炸上限比化学计量浓度高30~40倍,是己烷蒸气-空气混合物的爆炸上限的3~9倍。YU Xiao 等^[13]在不同初始温度和初始压力下测定乙烯/氧气以及乙烷/氧气在1.5 L圆柱体以及20 L球中的爆炸上限,结果表明:对于乙烷/氧气混合物在高压和高温下的爆炸上限,在20 L球体中获得的试验数据略高于1.5 L钢瓶。对于乙烯/氧混合物在高压和温度下的爆炸上限,在1.5 L圆柱体中获得的试验数据与20 L球体中获得的试验数据几乎相同。

1.4 其他相关研究

在混合气体爆炸极限的研究领域,众多学者不仅关注上述方面,还深入探讨了爆炸极限测定标准和理论计算等关键领域。

LIU Jie 等^[14]通过数值模拟研究了氢气对甲烷爆炸极限的行为,并和已有试验数据进行对比验证,后又研究了第2爆炸极限,研究结果表明:第2爆炸极限斜率与碳数成反比,同时控制氢气爆炸极限的

链支反应和终止反应,对甲烷的二次爆炸极限影响不大;许满贵等^[15]综合考虑多种因素的影响,提供了可燃气体爆炸上限和爆炸下限的理论计算公式,并结合工业生产中的实际情况,采用修正的 Le Chatelier 公式给出爆炸性混合气体的爆炸极限计算公式,为爆炸极限的计算提供了较好的基础和参考。谢溢月等^[16]测试容器内的搅拌转子改变混合气体流动状态,探究不同湍流强度下甲烷的爆炸极限,随着搅拌转子转速提高,甲烷的爆炸下限上升,爆炸上限下降,爆炸极限范围变小,爆炸危险性相较于静止状态降低;任常兴等^[17]从测定范围、测定装置、测定原理、点火方式、判定依据等方面系统地对比分析高温高压条件下可燃气体爆炸极限的测定标准,探讨不同测定标准在高温高压环境下的适用性,为可燃气体爆炸极限的精确测定和安全评估提供了重要的理论参考。

2 混合气体爆炸压力研究现状

在不同标准下,可燃气体爆炸压力研究所包含的内容并不相同,综合《空气中可燃气体爆炸指数测定方法》(GB/T 803—2008)和《最大爆炸压力和气体及蒸气压力上升的最大速率测定》(EN 15967—2022),气体爆炸压力研究主要包括爆炸压力、最大爆炸压力、爆炸压力上升率、最大爆炸压力上升率、爆炸指数、爆炸指数最大值等,他是评估和计算可燃气体与空气混合气爆炸危险性的重要参数。气体爆炸压力受到初始温度、初始压力、气体浓度、测试容器、点火位置等多方面的影响,研究也多从这些方面进行。

2.1 初始温度与初始压力对爆炸压力的影响

初始温度和初始压力是混合气体爆炸的初始条件,目前,国内外对于爆炸压力参数测定标准一般是在常温常压下。

SAEED^[18]测量了密闭容器中甲醇在不同初始压力和温度下的最大爆炸压力与当量比的关系,测试数据显示,最大爆炸压力与初始压力之间存在线性关系,最大爆炸压力上升率和爆炸指数最大值均随初始压力的增大而增加,并随初始温度的升高呈减小趋势。LI Ruikang 等^[19]在 20 L 球中开展了不同初始温度、不同氢气添加量下甲烷/空气的爆炸试验,测试结果显示,随着氢气添加量的增加,甲烷/空气的爆炸压力和爆炸压力上升速率增加;不同体积分数下的甲烷/氢气/空气混合物随着初始温度的升高最大爆炸压力降低,但最大爆炸压力上升速率下

降。郭宏展等^[20]在相同的初始温度下改变初始压力和混合气中乙醇的体积分数,在定容的测试容器中进行不同当量比的氢气-甲烷爆炸压力测试,试验数据显示,初始压力增加,导致混合气爆炸压力最大值和最大压力上升速率提高,爆炸危险性提高;随着乙醇体积分数的提高,氢气-甲烷的最大压力上升速率和爆炸指数呈减少趋势。黄子超等^[21]基于 Fluent 软件,采用有限体积法的数值方法模拟不同初始温度下甲烷的爆炸并记录其有关数据,模拟数据显示,随着初始温度的提高,甲烷爆炸完成反应的时间变短,最大爆炸压力变小。

2.2 气体体积分数对爆炸压力的影响

气体体积分数对爆炸的影响是混合气体爆炸研究中的关键因素。只有在体积分数介于爆炸下限和爆炸上限之间时,混合气体才会发生爆炸。此外,理论当量体积分数是爆炸研究中的重要参数,它表示可燃物质与助燃物质恰好完全反应时的体积分数比例,理论上来说,此时爆炸释放的热量最多,产生的压力最大。

HUANG Lijuan 等^[22]在 15 MPa 的高压和 100 ℃ 的高温下,在圆柱形容器中进行不同体积分数甲烷和空气混合气体的爆炸试验,试验结果显示,在甲烷的爆炸下限处测得的最大爆炸压力低于爆炸上限处的爆炸压力,说明在可燃气体体积分数相对较高的情况下,会有更多的气体参与反应,从而产生更大的爆炸压力。HUANG Lijuan 等^[23]通过试验测定了不同体积分数和压力下的乙烷和丙烷的爆炸压力,并于其他文献中测定的甲烷的爆炸压力进行对比分析。结果显示,随着碳元素的增加,混合气体的爆炸压力会逐渐增加,同时,爆炸下限的爆炸压力低于爆炸上限时的爆炸压力,即富燃料下的爆炸压力较大。韦一等^[24]测量了不同体积分数,不同流动状态的甲烷和正庚烷的爆炸压力,试验数据显示,甲烷的最大爆炸压力、爆炸压力上升率出现的体积分数相同,均为 11%,正庚烷情况相同,均出现在体积分数为 4% 时,该体积分数与以化学计量比计算得到的体积分数相差不大。

总的来说,气体爆炸的最大爆炸压力一般出现在理论当量体积分数,即化学计量比计算得到的体积分数;在爆炸极限范围内,体积分数较大时最大爆炸压力比体积分数较小时的最大爆炸压力要小。

2.3 混合气体成分对爆炸压力的影响

混合气体成分对爆炸压力的影响是混合气体爆

炸研究中的重要方向。不同的气体成分对爆炸压力的影响存在显著差异,且同一种气体在不同体积分数下对爆炸压力的影响程度也不同。

HU Erjiang 等^[25] 试验研究了正丁醇添加量对不同体积分数、不同初始压力和温度的异辛烷-空气混合物爆炸特性的影响。结果表明:随着正丁醇掺量的增加,爆炸压力没有变化,但爆炸持续时间缩短,最大压力上升速率增大。在高压下,富混合气的压力曲线在压力峰值附近出现振荡,这种振荡大大缩短了爆炸持续时间,增大了最大压力上升速率。此外,随着正丁醇掺合比的增加,压力振荡强度减小。WANG Tao 等^[26] 在 20 L 密闭室内进行试验,测量了不同乙烯体积分数(0~100%)和当量比(0.72~1.3)下的甲烷-空气混合气体的爆炸参数。结果表明:乙烯提高了甲烷-空气混合物的最大爆炸压力和最大压力上升速率。WANG Hua 等^[27] 结合煤矿中的实际情况,通过试验测定了不同体积分数的二元(CH₄/CO, CH₄/C₂H₆, 和 CH₄/H₂)和多组分(CH₄/CO/C₂H₆/H₂)混合物的爆炸,试验数据显示,加入 CO、C₂H₆ 或 H₂ 后,二元组分混合物的最大爆炸压力高于纯 CH₄。随着 CO、C₂H₆ 或 H₂ 添加量的增加,混合气体的最大爆炸压力显著增加,而在添加量相同的情况下,H₂ 对甲烷爆炸压力的影响最大,CO 次之,C₂H₆ 最小,CH₄/CO/C₂H₆/H₂ 的最大爆炸压力在甲烷体积分数较低时高于纯 CH₄,CH₄ 体积分数提高后,混合气体的最大爆炸压力低于纯 CH₄。ZHANG Jiang 等^[28] 通过试验测试了不同体积分数的 H₂ 和 CO 对 CH₄ 爆炸压力的影响,试验结果显示,氢气的加入促进了甲烷的爆炸,但是,由于阻尼效应的存在,CO 具有促进或减弱甲烷爆炸的双重特性。同时与 CO 相比,H₂ 对主体爆炸的影响更为显著。LEI Baiwei 等^[29] 基于 CFD 软件代码 GASFLOW-MPI 建立甲烷/氢气的燃烧机制模型,进行不同氢气添加量下甲烷/氢气/空气爆炸的数值模拟研究,在考虑爆炸过程中热损失效应的情况下,模拟结果与试验结果基本一致,呈现随着氢气添加量的增加,混合气体的最大爆炸压力和最大压力上升速率均呈现上升趋势,而绝热状态下的模拟结果则与试验结果不同。MA Xinyu 等^[30] 采用 20 L 球形爆炸试验设备进行不同惰性气体的氢气混合物爆炸的抑制试验。试验显示,当 N₂、和 He 的体积分数从 0 增加到 30%时,最大爆炸压力和最大压力上升速率下降 50%左右;当 CO₂ 体积分数为 30%时,爆炸压力始终为平滑、笔直的线,没有明显的压力峰值,爆

炸反应不强。即氢气爆炸会受到 N₂、He 以及 CO₂ 等惰性气体的影响,同时,在相同气体体积分数下,不同惰性气体的抑制作用不同,CO₂ 的抑制效果最好。邓军等^[31] 基于 Fluent 数值模拟软件,模拟多种可燃气体与甲烷混合后,在不同体积分数、点火能量、初始压力下的爆炸压力,模拟结果显示,在甲烷中混入不同的可燃气体后,混合气体的爆炸压力均比甲烷单独爆炸的爆炸压力要大,其中,氢气对甲烷最大爆炸压力的影响最大,最多增加 22%。点火能量对最大爆炸压力有影响,但影响不大。

总的来说,一种可燃气体对另一种可燃气体的爆炸压力起着促进作用,以 CH₄ 为例,CO、H₂、乙烯等对其都有促进作用,但是与其他气体相比,H₂ 对 CH₄ 的促进作用较为明显。

2.4 测试容器对爆炸压力的影响

测试容器的大小和形状在爆炸压力的测定标准中有着明确的规定,因为容器的几何形状和尺寸不仅决定火焰传播的方向和速度,还影响压力波的传播方式和强度。因此,一些学者测量不同大小、不同形状的测试容器中的爆炸压力,结果见表 1。

表 1 不同容器中的爆炸压力测试结果
Table 1 Test results of explosion pressure in different containers

参考文献	测试气体	容器形状	容器体积/L	最大爆炸压力/MPa
[19]	2%氢气-甲烷	球形	20	0.63
[22]	甲烷-空气	圆柱体	0.645	0.81
[32]	甲烷-空气	球形	20	0.80
	乙烷-空气	球形	20	0.85
[33]	甲烷-空气	球形	0.52	0.69
		圆柱体	0.17	0.63
[34]	甲烷-空气	圆柱体	10 000	0.60
[35]	30%氢气-甲烷	球形	20	0.65
[36]	甲烷-空气	圆柱体	40	0.80
[37]	甲烷-空气	球形	120	0.75
	氢气-空气	球形	120	0.78

ZHANG Kai 等^[38] 在直径为 600、350 mm 的球形容器,以及直径为 60 mm 的管道中,考察不同点火位置和初始压力下氢气的爆炸压力变化。研究发现,在体积较大的容器中,氢气的最大爆炸压力受点火位置的影响较小;而在体积较小的容器中,点火位置对最大爆炸压力的影响则较为显著。此外,无论大型容器还是小型容器,最大爆炸压力均随初始压

力的增大而增加,且在大型容器中最大爆炸压力与初始压力之间近似呈线性关系。当点火点位于小容器时,大容器内的最大氢气爆炸压力随管道长度的增加而增大,而小容器内的最大氢气爆炸压力则先增大后减小。MITTAL^[39]进行了静态下,容器体积分别为 20 L、27 L、800 L 和 25.6 m³,形状分别为球形、立方形、矩形、球形的容器内的爆炸压力测试,综合试验结果可知:爆炸指数与爆炸容器的形状和大小有关系,在 4 个试验容器中的爆炸指数最大值分别为 8.2、8.4、8.6、10.6 (MPa·m)/s,表明爆炸指数随容器尺寸的增大而呈现上升趋势。胡洋等^[40]测试了不同尺寸、不同截面形状下长直管道内的甲烷/空气混合气体的爆炸压力,测试结果表明:圆形截面管道和方形截面管道的最大爆炸压力出现的位置相同,都出现在管道的后半段,但圆形截面管道中最大爆炸压力远大于方形截面管道的最大爆炸压力。

2.5 点火位置对爆炸压力的影响

不同的点火位置对密闭容器中的爆炸发展有较大影响,进一步影响混合气体爆炸压力的有关参数。

郑立刚等^[41]在不同的位置进行点火,测量了当量比为 1 的甲烷/空气预混气体的爆炸压力,发现点火位置距离闭口端越远,泄爆时的超压峰值越小,超压的最大值先增大后减小,点火位置处于管道中间时达到最大值。王金贵等^[42]模拟了在密闭球形容器中心、0.5R、R(R 为密闭球形容器半径)处点火引发甲烷-空气混合气体爆炸,模拟结果显示,不同位置点火时爆炸压力变化趋势基本一致,但是中心点火时最大爆炸压力上升速率最大。郑立刚等^[43]在方形管道上测试了不同点火位置和氢气添加量下的氢气/甲烷/空气混合气体的爆炸特性,测试结果显

示,当点火位置靠近管道的中后部时,点火位置的影响大于氢气添加量较低时的影响。

3 结 论

1) 混合气体爆炸极限受到初始温度、初始压力、混合气体成分以及试验容器等多方面因素的影响,且其中部分因素存在耦合作用,如初始温度和初始压力,他们的耦合作用大于单一因素对混合气体爆炸极限的影响;混合气体爆炸上限和爆炸下限对影响因素的敏感性不同,总的来说,爆炸上限受到的影响比爆炸下限要大。

2) 混合气体爆炸压力受到的影响因素复杂多样,初始温度、初始压力、气体体积分数、混合气体成分、试验容器以及点火位置等因素均对混合气体爆炸压力有影响;混合气体最大爆炸压力一般出现在理论当量体积分数附近,一般来说,比理论当量体积分数要大;混合气体成分对爆炸压力的影响较为显著,氢气、乙烯等可燃气体的加入会提高甲烷等主要气体的爆炸压力;测试容器的形状和大小以及点火位置的不同,也会导致爆炸压力及其上升率等参数的变化,在以后的研究和实际生产生活中也应该综合考虑这些因素。

3) 在混合气体爆炸极限和爆炸压力的研究中,利用数值模拟技术可模拟各种复杂工况下的爆炸过程,为混合气体的爆炸极限和爆炸压力的研究提供重要的补充和验证。

4) 目前,针对混合气体爆炸极限和爆炸压力的研究多数已经考虑到了多因素耦合的影响,但是实际的生产中所遇到的条件会更加复杂,后续的研究应结合生产实际,进一步深入研究多因素耦合作用下的混合气体爆炸极限和爆炸压力。

参 考 文 献

- [1] 中国城市燃气协会安全管理工作委员会. 2023 年上半年全国燃气事故分析报告[J]. 城乡建设, 2023(16): 18-23.
Safety Management Committee of China Gas Association. National gas accident analysis report for the first half of 2023[J]. Urban and Rural Development, 2023(16): 18-23.
- [2] 中国城市燃气协会安全管理工作委员会. 全国燃气事故分析报告(2021 年·第三季度报告)[R], 2021.
- [3] JIAO Fengyuan, ZHANG Huarong, LI Wenjuan, et al. Experimental and numerical study of the influence of initial temperature on explosion limits and explosion process of syngas-air mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(52): 22 261-22 272.
- [4] CHOI Y, CHOI J. Effects of inert gas addition, oxygen concentration, and pressure on explosion characteristics of propylene[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2021, 38(2): 337-341.
- [5] 高娜,张延松,胡毅亭. 温度、压力对甲烷-空气混合物爆炸极限耦合影响的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2017,

37(3):453-458.

GAO Na, ZHANG Yansong, HU Yiting. Experimental study on methane-air mixtures explosion limits at normal and elevated initial temperatures and pressures[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(3): 453-458.

[6] 寇丽颖,张红,刘亚欣,等. 高温高压下可燃气体爆炸极限研究[J]. *世界石油工业*, 2021, 28(5): 71-77.

KOU Liying, ZHANG Hong, LIU Yaxin, et al. Study on ignition and detonation characteristics of combustible gas under high temperature and high pressure environment[J]. *World Petroleum Industry*, 2021, 28(5): 71-77.

[7] 万鑫,王敏,曹春艳,等. 高温高压气体在氧气中爆炸下限的数值预测与实验研究[J]. *当代化工*, 2022, 51(4): 820-823, 828.

WAN Xin, WANG Min, CAO Chunyan, et al. Numerical prediction and experiment research of lower flammability limits of combustible gases in oxygen at high temperature and pressure[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2022, 51(4): 820-823, 828.

[8] ADDAI K E, GABEL D, KRAUSE U. Lower explosion limit of hybrid mixtures of burnable gas and dust[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 35: 36 497-36 504.

[9] HAO Qiangqiang, LOU Zhenmin, WANG Tao, et al. The flammability limits and explosion behaviors of hydrogen-enriched methane-air mixtures [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 126: DOI: 10.1016/j. expthermflusci. 2021. 110395.

[10] CHENG Fangming, LI Beibei, LOU Zhenmin, et al. Effect of CO₂ on the explosion limit parameters and kinetic characteristics of ammonia-hydrogen-air mixtures[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2024, 92: DOI: 10.1016/j. jlp. 2024. 105480.

[11] 尚融雪,庄紫喧,杨悦,等. 初始压力对合成气爆炸下限的影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(8): 120-125. SHANG Rongxue, ZHUANG Zixuan, YANG Yue, et al. Effect of initial pressures on lower explosion limits of syngas[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(8): 120-125.

[12] GIERAS M, KLEMENS R, KUHL A, et al. Influence of the chamber volume on the upper explosion limit for hexane-air mixtures[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2008, 21(4): 423-436.

[13] YU Xiao, YAN Xingqing, JI Wentao, et al. Effect of super-ambient conditions on the upper explosion limit of ethane/oxygen and ethylene/oxygen mixtures[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 59: 100-105.

[14] LIU Jie, YU Ruiguang, MA Biao, et al. On the second explosion limits of hydrogen, methane, ethane, and propane[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(30): 19 268-19 276.

[15] 许满贵,徐精彩. 工业可燃气体爆炸极限及其计算[J]. *西安科技大学学报*, 2005, 25(2): 139-142.

XU Mangui, XU Jingcai. Explosion limits and calculated methods of combustible gas[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2005, 25(2): 139-142.

[16] 谢溢月,谭迎新,孙彦龙. 湍流状态下甲烷爆炸极限的测试[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(11): 65-69.

XIE Yiyue, TAN Yingxin, SUN Yanlong. Explosive limits of methane in turbulent flow[J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(11): 65-69.

[17] 任常兴,蒋乐章,王玥,等. 高温高压条件下可燃气体爆炸极限测定标准对比研究[J]. *标准科学*, 2023(2): 73-77, 100.

REN Changxing, JIANG Yuezhong, WANG Yue, et al. Comparative study on determination standards for the explosion limits of the combustible gas at high temperature and pressure[J]. *Standard Science*, 2023(2): 73-77, 100.

[18] SAEED K. Determination of the explosion characteristics of methanol-air mixture in a constant volume vessel[J]. *Fuel*, 2017, 210: 729-737.

[19] LI Ruikang, LOU Zhenmin, WANG Tao, et al. Effect of initial temperature and H₂ addition on explosion characteristics of H₂-poor/CH₄-air mixtures[J]. *Energy*, 2020, 213: DOI: 10.1016/j. energy. 2020. 118979.

[20] 郭宏展,张衍,王筱蓉. 氢气-甲烷-乙醇混合燃料的爆炸压力特性[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(12): 168-180.

GUO Hongzhan, ZHANG Yan, WANG Xiaorong. Explosion pressure characteristics of hydrogen-methane-ethanol mixtures[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(12): 168-180.

[21] 黄子超,司荣军,张延松,等. 初始温度对瓦斯爆炸特性影响的数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(5): 5-7, 11.

HUANG Zichao, SI Rongjun, ZHANG Yansong, et al. Numerical simulation of the influence of initial temperature on gas explosion characteristics[J]. *Safety in Coal Mines*, 2012, 43(5): 5-7, 11.

- [22] HUANG Lijuan, LI Zongfa, WANG Yu, et al. Experimental assessment on the explosion pressure of CH_4 -air mixtures at flammability limits under high pressure and temperature conditions[J]. Fuel, 2021, 299: DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120868.
- [23] HUANG Lijuan, WANG Yu, ZHANG Liang, 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: DOI:10.1016/j.jlp.2021.104638.
- [24] 韦一,潘剑锋,GABEL D. 甲烷和正庚烷的爆炸特性试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2021,42(3):271-277.
WEI Yi, PAN Jianfeng, GABEL D. Experiment on explosion characteristics of methane and n-heptane[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2021, 42(3): 271-277.
- [25] HU Erjiang, TIAN Hongzhen, ZHANG Xinyi, et al. Explosion characteristics of n-butanol/iso-octane-air mixtures[J]. Fuel, 2017, 188: 90-97.
- [26] WANG Tao, LUO Zhenmin, WEN Hu, et al. The explosion enhancement of methane-air mixtures by ethylene in a confined chamber[J]. Energy, 2020, 214: DOI:10.1016/j.energy.2020.119042.
- [27] WANG Hua, GU Sai, CHEN Tao. Experimental investigation of the impact of CO , C_2H_6 , and H_2 on the explosion characteristics of CH_4 [J]. ACS Omega, 2020, 5(38): 24 684-24 692.
- [28] ZHANG Jiang, ZHOU Shangyong, SU Yang, et al. Experimental study of the influence of H_2/CO on the CH_4 explosion pressure and thermal behaviors[J]. ACS Omega, 2022, 7(36): 32 432-32 441.
- [29] LEI Baiwei, WEI Qinan, PANG Renhua, et al. The effect of hydrogen addition on methane/air explosion characteristics in a 20-L spherical device[J]. Fuel, 2023, 338: DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127351.
- [30] MA Xinyu, NIE Baisheng, WANG Weili, et al. Investigation on explosion characteristics of hydrogen-air mixtures diluted with inert gases in confined spaces[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 100: 138-148.
- [31] 邓军,马晓峰,商铁林,等. 多元可燃气体爆炸压力峰值的数值模拟[J]. 煤矿安全,2014,45(4):13-16,20.
DENG Jun, MA Xiaofeng, SHANG Tielin, et al. Numerical simulation of peak pressure for multiple combustible gases[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(4): 13-16, 20.
- [32] SHEN Xiaobo, ZHANG Bo, ZHANG Xiaoling, et al. Explosion characteristics of methane-ethane mixtures in air[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 45: 102-107.
- [33] MITU M, GIURCAN V, RAZUS D, et al. Propagation indices of methane-air explosions in closed vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 47: 110-119.
- [34] ZHANG Bo, BAI Chunhua, XIU Guangli, et al. Explosion and flame characteristics of methane/air mixtures in a large - scale vessel[J]. Process Safety Progress, 2014, 33(4): 362-368.
- [35] MA Qiuju, ZHANG Qi, CHEN Jiachen, et al. Effects of hydrogen on combustion characteristics of methane in air[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(21): 11 291-11 298.
- [36] GIERAS M, KLEMENS R, RARATA G, et al. Determination of explosion parameters of methane-air mixtures in the chamber of 40 dm^3 at normal and elevated temperature [J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2006, 19(2/3): 263-270.
- [37] CASHDOLLAR L K, ZLOCHOWER A I, GREEN M G, et al. Flammability of methane, propane, and hydrogen gases[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000, 13(3/4/5): 327-340.
- [38] ZHANG Kai, WANG Zhirong, GONG Junhui, et al. Experimental study of effects of ignition position, initial pressure and pipe length on H_2 -air explosion in linked vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 50: 295-300.
- [39] MITTAL M. 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.
- [40] 胡洋,陶红,宋民航,等. 长直管道预混气体爆燃波系演化过程研究[J]. 中国安全科学学报,2024,34(3):55-62.
HU Yang, TAO Hong, SONG Minhang, et al. Study on evolution process of deflagration wave system of premixed gas in long straight pipeline[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 55-62.
- [41] 郑立刚,吕先舒,郑凯,等. 点火源位置对甲烷-空气爆燃超压特征的影响[J]. 化工学报,2015,66(7):2 749-2 756.
ZHENG Ligang, LYU Xianshu, ZHENG Kai, et al. Influence of ignition position on overpressure of premixed methane-air deflagration[J]. CIESC Journal, 2015, 66(7): 2 749-2 756.

[42] 王金贵,梁志星,胡强强,等. 点火位置对甲烷/空气预混爆炸特性影响的数值模拟研究[J]. 爆破, 2024, 41(1): 186-195.
WANG Jingui, LIANG Zhixing, HU Qiangqiang, et al. Numerical simulation of the effect of ignition position on methane/air premix explosion characteristics[J]. Blasting, 2024, 41(1): 186-195.

[43] 郑立刚,苏洋,李刚,等. 点火位置对氢气/甲烷/空气预混气体爆燃特性的影响 [J]. 化工学报, 2017, 68(12): 4 874-4 881.
ZHENG Ligang, SU Yang, LI Gang, et al. Effect of ignition position on deflagration characteristics of premixed hydrogen/methane/air[J]. CIESC Journal, 2017, 68(12): 4 874-4 881.



作者简介： 栾婷婷 （1982—）,女,山东高密人,博士,副教授,主要从事危化品安全技术、风险评估技术、应急管理等方面的研究。E-mail: luan tt@ bipt. edu. cn。



《中国安全科学学报》被 Ei 数据库收录

2025 年 4 月,《工程索引》(Ei Compendex) 发布最新收录期刊目录,《中国安全科学学报》(简称《学报》) 成功被收录。

COMPENDEX SOURCE LIST: UPDATED APRIL 2, 2025					
PRINT ISSN	ONLINE ISSN	CHINESE TITLE (中文刊名)	TRANSLITERATED TITLE (刊名翻译)	ENGLISH/TRANSLATED TITLE (英文刊名)	LANGUAGE (语言)
10014632	-	中国铁道科学	Zhongguo Tiedao Kexue	China Railway Science	Chinese
10033033	-	中国安全科学学报	Zhongguo Anquan Kexue Xuebao	China Safety Science Journal	Chinese
10079289	-	中国表面工程	Zhongguo Biaomian Gongcheng	China Surface Engineering	Chinese

自 1991 年创刊以来,《学报》始终秉承“立足安全科技前沿,服务国家重大需求”的办刊宗旨,坚持“学术性、权威性、应用性、信息性”的办刊原则,在安全生产、应急管理、公共安全、防灾减灾、职业健康等领域搭建高水平学术交流平台,发表众多具有创新性和实践价值的研究成果。多年来,《学报》的学术影响力持续攀升,先后入选“中国科技核心期刊”“中文核心期刊”和“中国科学引文数据库核心期刊(CSCD 核心期刊)”,入选中国科技期刊卓越行动计划梯队期刊(一期、二期),并被美国《化学文摘社》(CAS)、Scopus 等国际知名数据库收录。此次成功被 Ei Compendex 数据库收录,更是对《学报》学术地位的有力肯定。