

王旭明, 潘玉蕊, 张秋玲, 等. 负压条件下氢气的爆炸极限及最大爆炸压力研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(5): 1718-1723.

WANG X M, PAN Y R, ZHANG Q L, et al. Investigation of explosion limits and maximum explosion pressures of hydrogen under negative pressure conditions[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(5): 1718-1723.

## 负压条件下氢气的爆炸极限及最大爆炸压力研究\*

王旭明<sup>1</sup>, 潘玉蕊<sup>1</sup>, 张秋玲<sup>1</sup>, 许映杰<sup>2</sup>, 胡鑫<sup>1</sup>

(1 浙江新和成股份有限公司安环研究所, 浙江绍兴 312000; 2 绍兴文理学院化学化工学院, 浙江绍兴 312000)

**摘要:** 氢气在实际应用中存在着许多负压场景, 确定负压工况下的燃爆参数是对氢气进行科学评估和有效防控的首要前提。采用高精度配气及爆炸压力采集系统研究氢气在负压场景下的燃爆特性, 明确氢气的爆炸上限、爆炸下限、临界爆炸压力、最大爆炸压力、最大爆炸升压比等燃爆参数; 并通过 Python 中的 Matplotlib 等软件库对试验数据进行拟合, 分析压力对氢气燃爆参数的影响。结果表明: 在室温、空气条件下, 初始压力从 100 kPa 降至 3.5 kPa 的过程中, 爆炸范围不断缩小, 特别是从初始压力低于 10 kPa 开始, 爆炸范围缩小速度明显增加, 该现象与分子间距受压力影响的变化趋势存在强关联; 当初始压力低至 3.72 kPa 时, 爆炸上、下限重合在 12.58% 体积分数的位置, 该压力称为临界爆炸压力, 低于该压力时体系将失去爆炸性; 一般认为最大爆炸压力通常在理论当量体积分数 29.6% 附近取得, 试验发现此规律仅适用于初始压力大  $\geq 5$  kPa 的场景, 当初始压力  $< 5$  kPa 时, 理论当量体积分数将随着压力的减小而发生改变, 逐渐偏离至体积分数 10% ~ 15%; 最大爆炸升压比会随着初始压力的减小而降低, 从常规的 7.30 降低至 4.63, 特别是在初始压力  $< 5$  kPa 的体系中, 该比值大幅降低。

**关键词:** 安全工程; 氢气; 负压; 临界爆炸压力; 爆炸极限; 最大爆炸压力; 爆炸升压比

**中图分类号:** X932 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6094(2025)05-1718-06

**DOI:** 10.13637/j.issn.1009-6094.2024.1940

### 0 引言

氢气作为一种绿色清洁能源, 应用前景广阔, 但与传统气体燃料相比, 氢气可燃范围大、扩散系数高<sup>[1]</sup>、最小点火能仅 0.017 mJ<sup>[2]</sup>, 其燃烧速度是天然气和石油的 7 倍<sup>[3]</sup>, 比其他燃料具有更大的爆炸威力及危害。国内外学者对常压和加压条件下的氢气燃爆特性进行了大量试验研究, 得出了一些有价值的结论。1966 年, Caras<sup>[4]</sup> 的研究首次表明, 随着压力的增加, 氢气的爆炸极限范围最初会收窄, 但随着压力的进一步增加, 爆炸极限会逐渐扩大, 氢气体系的这种特性不同于常规物料。Conrad 等<sup>[5]</sup> 对氢气-空气混合物在 100 ~ 15 000 kPa 下的研究和 Schroeder 等<sup>[6]</sup> 对氢气-氧气混合物在 100 ~ 20 000 kPa 下的研究均验证了上述特性, 表明了氢气随压力增大, 爆炸下限 (Lower Explosion Limit, LEL) 增大, 爆炸上限 (Upper Explosion Limit, UEL) 先减小再增大的特殊性质。Schroeder 等<sup>[7]</sup> 进一步研究了氢气-空气混合物在 100 ~ 3 000 kPa 下爆炸压力的变化, 发现爆炸升压比与初始压力无明显关联, 同时最

大爆炸压力一般在氢气理论当量浓度时取得。路长等<sup>[8]</sup> 研究了常压、空气条件下氢气的爆炸火焰形状、传播速度与压力变化规律, 发现氢气-空气比例越接近理论当量浓度反应越剧烈、反应时间越短。Liu 等<sup>[9]</sup> 研究了 100 ~ 400 kPa 和 21 ~ 90 °C 时氢气的爆炸上、下限变化规律, 结果表明, 90 °C 和 400 kPa 时氢气-空气混合物的爆炸上限可达到 93% (体积分数)。

氢气在实际应用中存在着许多负压场景: 如航天领域氢燃料管理中, 会在近真空的负压环境中来研究氢气的扩散速率和物性; 如在储氢材料研究中, 为明确材料的脱氢行为, 会在  $< 1$  kPa 的负压条件下将氢气从材料中脱除; 如在冶金行业金属脱气处理中, 需在真空度  $< 1$  kPa 条件下操作, 以确保去除溶解在金属中的气体杂质 (如氢、氮和氧), 尤其是氢气的去除有利于提升钢材的强度和韧性。在其他涉氢工艺中还可能出现氢气错流进入负压输送 (10 ~ 80 kPa)、负压精馏 (1 ~ 50 kPa) 等环节, 此类非常规场景存在较大风险, 在车间危险与可操作性 (Hazard and Operability, HAZOP) 分析时, 会针对该类异常进

\* 收稿日期: 2024-11-19

作者简介: 王旭明, 高级工程师, 从事反应安全与燃爆安全等研究, w.xuming@cnhu.com。

基金项目: 浙江省“十四五”省级大学生校外实践教育基地建设项目 (浙教办函[2023]41号)

行监测及防控方案设计。上述所有负压操作过程中,均存在一定量的氢气,且较难在负压体系中长时间维持较低氧含量,存在较大的燃爆风险,需进一步明确负压条件下的燃爆参数作为安全防控的依据。

因此,为了科学评估负压工况下氢气的燃爆风险并进行有效防控,亟须对负压条件下氢气的燃爆特性展开深入研究。已有试验结果可知,一般可燃体系的爆炸极限范围通常随着系统压力降低而缩小,当压力降至一定值时,LEL 与 UEL 重合,此时对应的压力称为临界爆炸压力,当体系压力降至临界压力以下时将失去可燃性<sup>[10]</sup>。目前为止,负压条件尤其是 <10 kPa 的压力体系中氢气燃爆风险研究报道相对较少,且部分报道所采用的测试设备误差较大。例如,张思辉等<sup>[11]</sup>研究了氢气在常温、负压下的爆炸极限,通过水银压力计读数得到氢气在空气中的临界爆炸压力为 7 kPa 左右。王建等<sup>[12]</sup>研究了氢气-氧气混合气体的爆炸临界条件,确定理论当量浓度下氢气-氧气混合气体的临界爆炸压力为 10 kPa。2018 年,张春燕等<sup>[13]</sup>研究了氢气-空气混合物在 25 ~ 100 kPa 条件下的最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速度,发现初始压力从 100 kPa 降低至 25 kPa 时,最大爆炸压力降低 75.1% ~ 75.9%,最大爆炸压力上升速度降低 77.1% ~ 83.7%,为负压条件下的氢气燃爆研究提供了一定的数据支撑。但上述负压工况下的研究存在以下问题:张思辉等<sup>[11]</sup>的研究中使用水银压力表,肉眼观察配气及爆炸判据,造成 5% 以上的测试误差;王建等<sup>[12]</sup>的研究为氧气环境下开展的,且未涉及 10 kPa 以下的测试场景和常规理论当量浓度外的临界爆炸压力测试;张春燕等<sup>[13]</sup>的研究未涉及 25 kPa 以下的测试场景,也未进一步研究临界爆炸压力的数值。

基于此,本文采用具有高精度配气及爆炸压力采集系统的燃爆测试装置(见图 1),精确测定常温和负压(3.5 ~ 100 kPa)条件下氢气-空气混合物的临界爆炸压力、爆炸极限的压力依赖性和爆炸压力,为合理设置防爆措施提供数据参考。

## 1 试验

试验采用的燃爆测试装置为杭州仰仪科技有限公司制造的 ECB-0520A 型号爆炸极限测试仪,由 5 L 球形爆炸容器、高精度配气系统、电热丝点火系统、爆炸压力快速采集系统四部分组成(见图 1)。配气压力传感器精度为 0.1% FS,动态爆炸压力传感器精度为 0.1% ~ 0.5% FS。采用高速采集卡记

录爆炸时的压力-时间数据,采集频率为 10 kHz。

在每次试验前,均三次抽真空并用高纯空气吹扫爆炸球,充分置换内部气体,排除杂质气体影响。之后,采用自控系统完成高纯氢气(纯度为 99.999%)及高纯空气(21% 高纯氧气 + 79% 高纯氮气)的配气,搅拌 3 min,静置 1 min 后,触发电火系统,产生 10 ~ 20 J 的点火能量引燃混合气。通过触发电火系统后的压力上升来表征其爆炸强度,压力上升  $\geq 5\%$  初始压力时,即判定发生爆炸<sup>[14]</sup>。

针对环境温度(25  $\pm$  5) °C、空气气氛下,初始压力分别为 3.5 kPa、4.0 kPa、4.5 kPa、5.0 kPa、10 kPa、20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa、100 kPa,氢气体积分数为 4.11% ~ 85.70% 的静态混合气体进行燃爆测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 爆炸极限与初始压力的关系

在不同初始压力下,氢气在空气中的爆炸极限如表 1 所示。由表 1 可知,负压条件下氢气在空气中的爆炸极限规律与其他常见可燃物相似,其 UEL 随初始压力降低而减小,LEL 随初始压力降低而增大。用 Python 中的 Matplotlib 等软件库对表 1 中的数据进行提取、分析并作图 2,拟合得到适用于常温、3.5 ~ 100 kPa 条件范围的爆炸极限随初始压力变化函数。

$$U = 8.7325 \ln p - \frac{613.9548}{p^2} + 45.3653 \quad (1)$$

$$L = 0.3481 \ln p + \frac{124.8366}{p^2} + 3.1240 \quad (2)$$

式中  $U$  为 UEL, % (体积分数,下同);  $L$  为 LEL, % (体积分数,下同);  $p$  为初始压力, kPa。

图 2 中 UEL 和 LEL 拟合曲线的交点(3.72 kPa, 12.58%)即为临界压力点。由表 1 的试验结果可知:氢气-空气体系在 3.5 kPa 下未发生爆炸,4.0

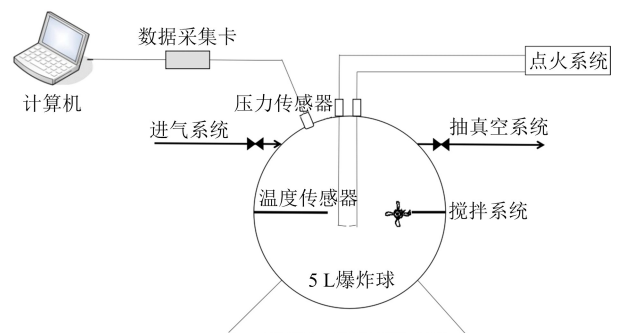


图 1 爆炸设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an explosion equipment

表1 不同初始压力下氢气在空气中的爆炸极限

Table 1 Explosion limits of H<sub>2</sub> in air at different initial pressures

初始压力/kPa	UEL/%	LEL/%
100	85.23	4.60
80	83.58	4.55
60	74.13	4.65
20	67.25	4.53
10	61.00	5.60
5.0	33.43	7.78
4.5	28.44	9.55
4.0	19.63	12.13
3.5	未爆炸	未爆炸

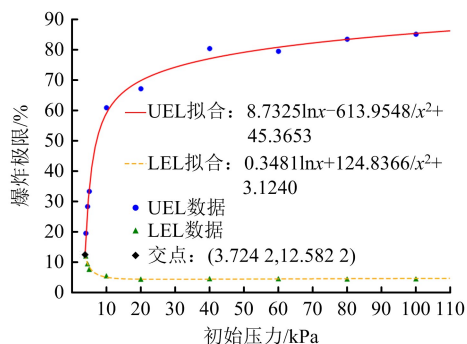


图2 不同初始压力下氢气在空气中的爆炸极限

Fig. 2 Explosion limits of H<sub>2</sub> in air at different initial pressures

kPa 下可发生爆炸,估算其临界压力约为 $(3.5 \text{ kPa} + 4.0 \text{ kPa})/2 = 3.75 \text{ kPa}$ 。二者数据接近,表明该临界压力数据 3.72 kPa 具有一定参考意义,可作为氢气实际防控的基础数据。

同时发现初始压力以 10 kPa 作为拐点,由 100 kPa 降低至 10 kPa 时 UEL、LEL 缓慢变化,由 10 kPa 降低至 3.5 kPa 时 UEL 下降速度和 LEL 上升速度明显变大,爆炸范围迅速缩小,这可能与分子间距受初始压力的影响有关。当初始压力越小时,分子间距越大,分子间碰撞的概率越低。为证明上述观点,假设所研究的低压气体为理想气体,计算了分子间距  $D$  与压强  $p$  之间的关系。在理想气体中, $D$  与  $p$  符合以下关系。

$$D = \left(\frac{kT}{p}\right)^{\frac{1}{3}} \times 10^8 \quad (3)$$

式中  $D$  为分子间距, nm;  $k$  为玻耳兹曼常数, J/K;  $T$  1720

为绝对温度, K (本式中为 298.15 K);  $p$  为初始压力, kPa。由  $D$  与  $p$  作图 3, 可知  $D$  随  $p$  的变化也以 10 kPa 为拐点, 佐证了上述观点。

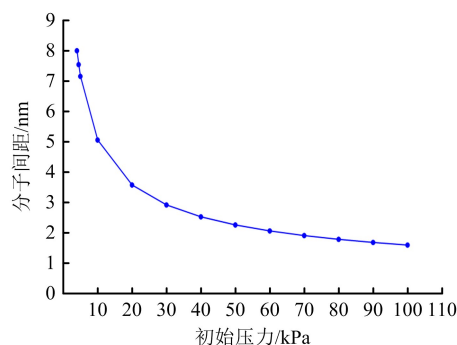


图3 不同初始压力下的分子间距曲线图

Fig. 3 Curve graph of molecular separation at different initial pressures

## 2.2 爆炸压力与初始压力的关系

在 3.5 ~ 100 kPa 初始压力下,共进行了 100 余组测试,得到不同氢气体积分数时的爆炸压力数据。为保证测试精度,选择在最大爆炸压力所对应的氢气体积分数附近进行 1~2 次重复测试,而不可爆炸组则重复测试 3 次。并用 Python 中的 Matplotlib 等软件库进行数据提取、分析并作图 4;为更加清楚地展示不同压力范围各参数差异性,分为 3.5 ~ 10.0 kPa 和 20 ~ 100 kPa 两段进行分析。试验结果表明,最大爆炸压力会随着体系压力的降低而降低,一定体系压力下最大爆炸压力一般会出现在氢气理论当量体积分数附近,而当体系压力 < 5 kPa 时最大爆炸压力对应的氢气体积分数逐渐小于常规当量体积分数。

由图 4 可知,初始压力从 100 kPa 降低至 3.5 kPa 时,最大爆炸压力从 736.2 kPa 降低至 18.5 kPa,降低了 97.49%。这是因为随着初始压力下降,分子间距逐渐增大,而分子间作用力减小,导致分子碰撞概率降低,即真实气体的行为越来越接近理想气体。

另外,当初始压力  $\geq 5.0 \text{ kPa}$  时,最大爆炸压力通常在 30% 的氢气体积分数附近取得,略高于氢气与空气完全反应时的理论当量体积分数 (29.6%),这一现象也发生在 20 L 球形和 20 L 圆柱形爆炸容器测试中<sup>[15]</sup>。当初始压力 < 5.0 kPa 时,氢气的 UEL 逐渐 < 30%,最大爆炸压力对应的氢气体积分数逐渐由 30% 偏离至 10% ~ 15%。这可能是由于分子间距增大,氢气-空气体系的燃爆反应机理可能发生了某些改变,导致氢气的当量体积分数逐渐

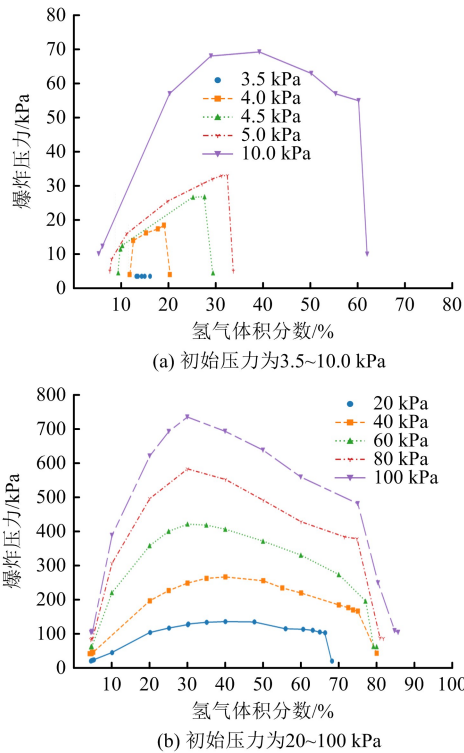


图 4 不同初始压力下爆炸压力与 H<sub>2</sub> 体积分数的关系  
Fig. 4 Relationship between explosion pressure and H<sub>2</sub> volume fraction under different initial pressures

偏离至 10% ~ 15%。

### 2.3 爆炸增压比

计算负压条件、不同氢气体积分数下的爆炸增压比,即爆炸压力与初始压力的比值(以下简称  $p/p_0$ ),发现随着初始压力的减小,  $p/p_0$  逐渐降低,其中最大爆炸增压比从 7.30 降低至 4.63,这有别于文献报道的高压条件下  $p/p_0$  与初始压力无明显关联的结论<sup>[7]</sup>。利用 Python 中的 Matplotlib 等软件库进行数据提取、分析并作图 5,由图 5 可知:  $p/p_0$  在 60 ~ 100 kPa 阶段最大,10 ~ 40 kPa 阶段其次,3.5 ~ 5.0 kPa 阶段最小,但在每个压力段范围内,  $p/p_0$  相对接近,表明在局部压力范围内初始压力对  $p/p_0$  无明显影响。

综上所述,明确了氢气的临界爆炸压力和负压条件下的爆炸极限、最大爆炸压力后,在进行常温条件下涉氢的负压反应和负压操作时,可参考下列措施:针对  $>0$  ~ 临界爆炸压力的工艺,如氢燃料管理、储氢材料研究、金属材料脱氢等研究中,可以先氮气置换,后抽真空至临界爆炸压力 3.72 kPa 以下,再启动制氢反应或分析研究,此时体系不具备爆炸性;针对  $>$  临界爆炸压力 ~

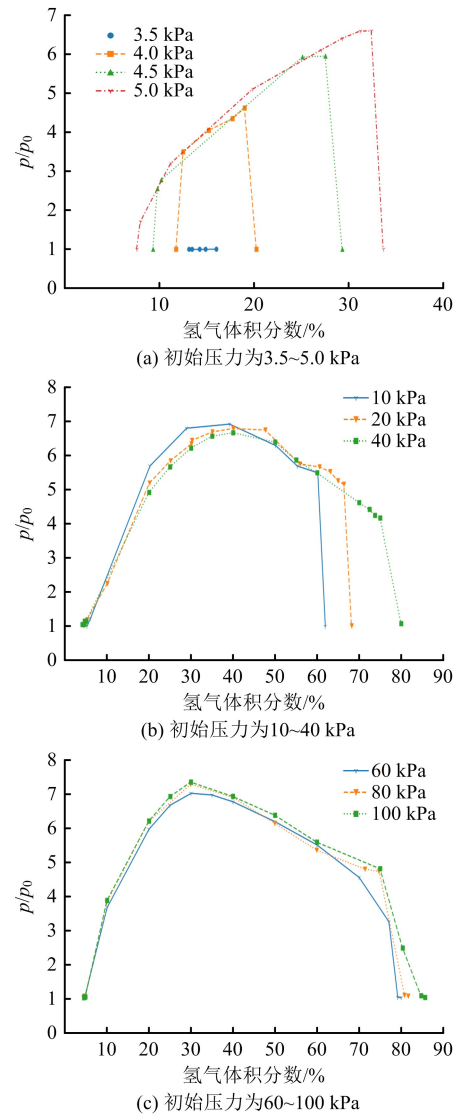


图 5 不同初始压力下爆炸增压比与 H<sub>2</sub> 体积分数的关系  
Fig. 5 Relationship between explosion pressure rise ratio and H<sub>2</sub> volume fraction under different initial pressures

10 kPa 的工艺,如负压脱水、负压精馏等,此时爆炸严重度较低,可根据 2.2 节的最大爆炸压力数据,做相应的耐压防爆设计,保证一旦爆炸后,也不会造成严重的后果;针对  $>10 \sim 100$  kPa 的工艺,如负压输送、负压精馏等,可根据对应场景下的爆炸极限范围,通过可燃气浓度监测并连锁氮气吹扫装置,进行可燃物安全浓度控制,或者通过 2.2 节介绍的最大爆炸压力进行相应的泄爆设计,从而实现爆炸防控。上述分类讨论仅作为参考,具体防控方案需结合实际工艺,从可燃物浓度控制、临界爆炸压力控制、耐压设计、泄压设计等多个方式中进行灵活选择和适配。

### 3 结 论

本文测试了室温和空气条件下,氢气初始压力为 3.5 ~ 100 kPa 时的燃爆特征,得到了以下结论。

(1) 随初始压力的降低,爆炸范围缩小,其中当压力小于 10 kPa 时,缩小速度迅速增加,并于 3.72 kPa 时交于一点,此压力即为临界爆炸压力。

(2) 在初始压力从 100 kPa 降至 3.5 kPa 过程中,最大爆炸压力从 736.2 kPa 降低至 18.5 kPa;其中在初始压力  $\geq 5$  kPa 时,最大爆炸压力一般在 30% 氢气体积分数附近取得,初始压力  $< 5$  kPa 时,氢气的爆炸上限逐渐小于 30%,最大爆炸压力对应的氢气体积分数也偏离至 10% ~ 15%。

(3) 爆炸升压比  $p/p_0$  与初始压力相关,随着初始压力的降低而下降;特别是最大爆炸升压比,在临界爆炸压力附近时呈现大幅下降。

(4) 在涉氢负压工艺的工业生产燃爆防控中,除严禁点火源、控制氧浓度外,还可以通过可燃物浓度控制、临界压力控制、耐压、泄压等方式进行防爆设计。

#### 参考文献 (References):

- [1] LÜ X S, ZHENG L G, ZHANG Y G, et al. Combined effects of obstacle position and equivalence ratio on over pressure of premixed hydrogen-air explosion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41 (39): 17740 - 17749.
- [2] 氢系统安全的基本要求: GB/T 29729—2022[S]. Essential requirements for the safety of hydrogen systems: GB/T 29729—2022[S].
- [3] 肖华华, 孙金华. 高压氢气泄漏自燃研究现状及展望 [J]. 安全与环境学报, 2009, 9(4): 125 - 129. XIAO H H, SUN J H. Advances and prospect of research on self-ignition caused by high-pressure hydrogen leak [J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(4): 125 - 129.
- [4] CARAS G J. Prevention, detection, and suppression of hydrogen explosions in aerospace vehicles [R]. Huntsville: Redstone Arsenal, 1966.
- [5] CONRAD D, KAULBARS R. Vibration-proof design of tube bundles in heat-exchangers [J]. Chemie Ingenieur Technik, 1995, 67(2): 185 - 188.
- [6] SCHROEDER V, EMONTS B, JANSSEN H, et al. Explosion limits of hydrogen/oxygen mixtures at initial pressures up to 200 bar [J]. Chemical Engineering & Technology, 2004, 27(8): 847 - 851.
- [7] SCHROEDER V, HOLTAPPELS K. Explosion characteristics

of hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures at elevated pressures [C]//Proceedings of 1st International Conference on Hydrogen Safety. Pisa: University of Pisa, 2005: 35 - 47.

- [8] 路长, 李毅, 潘荣锟. 管道氢气-空气预混气体爆炸特征的试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 38 - 42. LU C, LI Y, PAN R K. Experimental study on explosion tendency of hydrogen-air premixed gases in the duct [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(3): 38 - 42.
- [9] LIU X L, QI Z. Influence of initial pressure and temperature on flammability limits of hydrogen - air [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39 (12): 6774 - 6782.
- [10] 王淑梅, 梅林. 可燃性气体爆炸极限与温度、压力的关系 [J]. 安全与环境学报, 1998, 11(2): 24 - 25. WANG S M, MEI L. Relationship between the explosion limit of flammable gases with temperature and pressure [J]. Journal of Safety and Environment, 1998, 11(2): 24 - 25.
- [11] 张思辉, 林春容, 王允兴. 氢-空气混合物在常温低压下的爆炸极限及爆炸临界压力值 [J]. 天然气化学, 1990(3): 41 - 44. ZHANG S H, LIN C R, WANG Y X. Explosion limits and critical pressure of hydrogen-air mixture at ambient temperature and low pressure [J]. Natural Gas Chemistry, 1990(3): 41 - 44.
- [12] 王建, 段吉员, 黄文斌, 等. 氢氧混合气体爆炸临界条件实验研究 [J]. 工业安全与环保, 2008, 34(10): 26 - 28. WANG J, DUAN J Y, HUANG W B, et al. Experimental study on the critical explosion conditions of the hydrogen/oxygen gas mixture [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34(10): 26 - 28.
- [13] 张春燕, 陶刚, 涂善东, 等. 低压氢气-空气混合物爆炸试验研究及数值模拟 [J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 87 - 92. ZHANG C Y, TAO G, TU S D, et al. Experimental study and numerical simulation of low-pressure hydrogen-air mixture explosion [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2): 87 - 92.
- [14] Determination of the explosion limits and the limiting oxygen concentration (LOC) for flammable gases and vapours: BS EN 1839—2017 [S]. London: BSI Standards Publication, 2017.
- [15] 赵懿明, 杨振欣, 张欣, 等. 外部空间与初始温度对氢气与空气混合气体爆炸过程的影响 [J]. 爆破器材, 2022, 51(2): 35 - 41.

ZHAO Y M, YANG Z X, ZHANG X, et al. Effects of external space and initial temperature on explosion

process of hydrogen air mixture [ J ]. Explosive Materials, 2022, 51(2) : 35 - 41.

## Investigation of explosion limits and maximum explosion pressures of hydrogen under negative pressure conditions

WANG Xuming<sup>1</sup>, PAN Yurui<sup>1</sup>, ZHANG Qiuling<sup>1</sup>, XU Yingjie<sup>2</sup>, HU Xin<sup>1</sup>

(1 Institute of Safety and Environmental Protection, Zhejiang NHU Co. , Ltd. , Shaoxing 312000, Zhejiang, China;

2 College of Chemistry and Chemical Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, Zhejiang, China)

**Abstract:** In practical applications of hydrogen, various negative pressure scenarios exist. Identifying the explosion parameters of hydrogen under these negative pressure conditions is essential for conducting scientific risk assessments and implementing effective prevention measures. A high-precision gas distribution and explosion pressure acquisition system was utilized to conduct explosion tests under varying initial pressures and hydrogen volume fractions. The results were analyzed using software libraries, such as Matplotlib in Python, to create curves that illustrate the relationship between explosion limits and initial pressure, explosion pressure and hydrogen volume fraction at different initial pressures, and the explosion pressure rise ratio. The variations in explosion parameters under negative pressure conditions were analyzed from the perspective of molecular spacing. The results indicate that, at room temperature and in an air environment, reducing the initial pressure from 100 to 3.5 kPa leads to a progressive narrowing of the explosion range. Notably, when the initial pressure drops below 10 kPa, the rate of narrowing accelerates significantly. This phenomenon is closely correlated with changes in molecular spacing influenced by pressure, with 10 kPa serving as a critical inflection point for both trends. At an initial pressure of 3.72 kPa, referred to as the critical explosion pressure, the upper and lower explosion limits converge at a hydrogen volume fraction of 12.58%. Below this pressure, the system loses its explosive potential. It is widely accepted that the maximum explosion pressure is typically reached near the stoichiometric concentration of 29.6% (volume fraction). However, experimental results indicate that this principle applies only when the initial pressure is greater than or equal to 5 kPa. When the initial pressure falls below 5 kPa, the stoichiometric concentration shifts with decreasing pressure, moving toward a range of 10% to 15%. Furthermore, the maximum explosion pressure rise ratio decreases from a conventional value of 7.30 to 4.63, especially in systems where the initial pressure is below 5 kPa, resulting in a significant reduction in this ratio.

**Key words:** safety engineering; hydrogen; negative pressure; critical explosion pressure; explosion limit; maximum explosion pressure; explosion pressure rise ratio