

CF₃I/CO₂对掺氢天然气燃爆的抑制作用机理研究

廖慧倩, 黎南芳, 李 毅

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年9月24日; 录用日期: 2025年10月25日; 发布日期: 2025年11月10日

摘 要

掺氢天然气中氢气的爆炸风险制约其应用, 开发高效清洁的抑爆剂具有重要价值。基于CF₃I与CO₂对甲烷的抑爆协同效应, 构建化学动力学模型, 研究二者对氢气/甲烷/空气预混爆炸的抑制机理, 重点分析了层流燃烧速度及其敏感性和H·在反应中的生成与消耗, 筛选出了影响抑爆的基元反应, 筛选出了1818、R1788抑制效果与CO₂浓度相关。通过分析获得0.5% CF₃I与15% CO₂为最佳复配比例。同时发现此比例下能高效抑制H·链式反应的同时兼顾经济性, 为掺氢天然气安全利用及低耗环保型抑爆剂开发提供了理论依据。

关键词

掺氢天然气, 抑爆, 三氟碘甲烷, 化学动力学分析

Study on the Inhibition Mechanism of CF₃I/CO₂ on the Combustion and Explosion of Hydrogen-Enriched Natural Gas

Huiqian Liao, Nanfang Li, Yi Li

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: September 24, 2025; accepted: October 25, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

The explosion risk associated with hydrogen in hydrogen-enriched natural gas limits its application,

making the development of efficient and clean explosion suppressants of great importance. Based on the synergistic suppression effect of CF_3I and CO_2 on methane explosions, this study constructs a chemical kinetic model to investigate the inhibition mechanism of these two agents on the explosion of hydrogen/methane mixtures. The analysis focuses on the laminar burning velocity, its sensitivity, and the production and consumption pathways of key radical $\text{H}\cdot$. Elementary reactions influencing explosion suppression were identified, with reactions R1818 and R1788 showing suppression effects correlated with CO_2 concentration. An optimized mixture of 0.5% CF_3I and 15% CO_2 was determined, which effectively inhibits the H radical chain reaction while maintaining cost efficiency. This research provides theoretical support for the safe utilization of hydrogen-enriched natural gas and the development of low-consumption, environmentally friendly explosion suppressants.

Keywords

Hydrogen-Enriched Natural Gas, Suppression Explosion, Trifluoroiodomethane, Chemical Kinetic Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源需求增长与温室效应日益严峻,天然气作为一种清洁高效的化石燃料应用广泛,但其燃烧产生的二氧化碳等温室气体仍对环境造成影响[1]。为降低碳排放,氢气因其燃烧产物清洁无污染而被混入天然气中运用现有的集输管道实现运输,形成掺氢天然气(H_2/CH_4) [2] [3]。掺氢虽有助于减排并提升燃烧效率,却因氢气具有低点火能、较宽可燃范围及高扩散性[4]-[6],增加了泄漏后的燃爆风险,尤其在密闭空间中更为突出[7]-[9]。因此,研究和开发新型的高效抑爆介质对保障掺氢天然气安全应用至关重要。二氧化碳因其低廉的价格和在惰性气体中较好的抑爆效果,一直以来都是学者研究的重点。罗振敏等[10]研究了二氧化碳对于不同掺氢比的天燃气的抑爆效果。随着抑爆介质研究范围的不断扩大,多种抑爆介质组合一直是国内外学者研究的热门方向,已有学者探讨了多种抑制剂对甲烷爆炸的抑制效果与机理。程方明等[11]发现三氟碘甲烷与二氧化碳能通过协同的化学自由基中断与物理稀释作用,显著降低甲烷爆炸压力与火焰速度。向开军等[12]则证实二氧化碳与多孔材料复合可通过催化分解与吸附自由基增强抑爆性能。此外,王涛等[13]研究的两相复合抑爆剂及李满厚等[14]对比的七氟丙烷/二氧化碳,均表明物理化学协同抑爆的有效性。然而,尽管上述研究为复合抑爆技术的开发提供了有价值的机理参考和实践案例,但将其应用于掺氢天然气这一新兴领域时,仍存在明显的局限性[15]。首先,现有研究大多以纯甲烷-空气预混气体为研究对象,未能充分考虑氢气加入后对混合气体燃烧特性(如层流燃烧速度、火焰不稳定性)及爆炸动力学参数的显著影响。

目前,针对掺氢天然气的抑爆尚缺乏对 CF_3I 与 CO_2 组合作为抑爆剂的研究。之前已经提到, CF_3I 以其高效的化学抑制特性,通过捕获 $\text{H}\cdot$ 、 $\cdot\text{OH}$ 等关键自由基中断链式反应受到关注,而 CO_2 则主要发挥物理抑制作用。两者组合可形成高效抑爆机制。在混合气体中,氢气的存在可能影响 CF_3I 的热解路径与自由基捕获效率,同时 CO_2 的稀释与冷却效应也可能因氢气的燃爆特性而大大降低。前人的研究虽揭示了该组合对纯甲烷爆炸的优秀抑制效果,却未涉及掺氢工况,因此无法评估其在实际掺氢天然气应用中的有效性与适应性。这一研究空白使得开发适用于掺氢天然气的安全抑爆方案缺乏关键的理论依据。因此,为填补 $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ 复合抑爆剂在掺氢天然气安全应用领域的研究空白,本研究基于 Chemkin 数值模拟平

台，系统探究不同氢气掺混比例下，CF₃I 与 CO₂ 的协同抑爆效能。研究将通过量化分析爆炸关键参数的变化，深入揭示掺氢环境下 CF₃I 的化学抑制机理与 CO₂ 的物理抑制作用的耦合规律。最终目标在于优化 CF₃I 与 CO₂ 的配比，寻求在确保高效抑爆性能的同时，兼顾经济性的最优方案，为掺氢天然气的安全输送、储存及利用提供理论支撑与技术参考。

2. 模拟方法

2.1. 模型选择和工况设置

层流火焰速度是与燃烧相关的固有特性，是衡量哈龙替代品抑制效率的重要参数，它反应了化学反应、热扩散效率和热量释放的耦合关系[16] [17]。本文采用 ANSYS Chemkin 的 Premixed Laminar Flame-speed Calculation 模块计算层流燃烧速度。模拟中允许的最大网格点数为 2500，GRAD 和 CURV 参数分别设置为 0.05、0.05，保证了模拟结果充分收敛，起始轴向位置和结束轴向位置分别设为-5.0 cm 和 25.0 cm。本模拟分别在当量比 1.0，即刚好完全发生燃烧爆炸反应时，对其中三氟碘甲烷在混合气体中的体积分数分别为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0%，并选择体积分数分别为 0%、5%、10%、15%和 20%的二氧化碳开展对于氢气/甲烷预混气体爆炸的数值模拟研究，具体各个数据如表 1 所示。

Table 1. Volume fraction of each gas under different working conditions
表 1. 各个气体在不同工况下的体积分数

工况	CO ₂	CF ₃ I	CH ₄	H ₂	N ₂	O ₂
1	5%	0.5%	80%	20%	79%	21%
2		1.0%				
3		1.5%				
4		2.0%				
5	10%	0.5%				
6		1.0%				
7		1.5%				
8		2.0%				
9	15%	0.5%				
10		1.0%				
11		1.5%				
12		2.0%				
13	20%	0.5%				
14		1.0%				
15		1.5%				
16		2.0%				

2.2. 反应机理验证

层流燃烧速度是表征混合燃料化学反应速率的参数之一，对验证化学反应机理具有重要意义[15]。采

用一种综合动力学模型对添加 CF_3I 与 $\text{H}_2\text{-CH}_4\text{-air}$ 混合物进行了计算, 反应机理由三部分组成: (1) 碳氢-空气反应机理; (2) 改进的 NIST HFC 机理; (3) 与 CF_3I 相关的反应。烃类模型为 Metcalfe 等人提出的 Aramco Mech 1.3 (C3 version) 机理[16], 用于描述氢氟碳化物反应的机理是 NIST 的 C1-C3 HFC 机理, 还有 BABUSHOK 团队更新的 CF_3I 作用于甲烷燃烧机理[17]。机理中动力学模型包含 1072 种反应, 包括 10 种碘化物种, 能更好吻合实验中 CF_3I 对于甲烷燃烧速度的影响现象。为了保证机理的有效性, 需要对动力学机制进行验证。图 1 将不同当量比下 $\text{H}_2\text{-air}$ 混合物层流燃烧速度的模拟预测结果与已发表的数据[18]进行对比。从数据分布来看, 相同 CF_3I 体积分数下, 实验数据略低数值模拟数据, 这可归结为实验过程中火焰由于快速燃烧存在不稳定性, 导致实验数据存在一定误差, 总体误差属于可接受的范围。

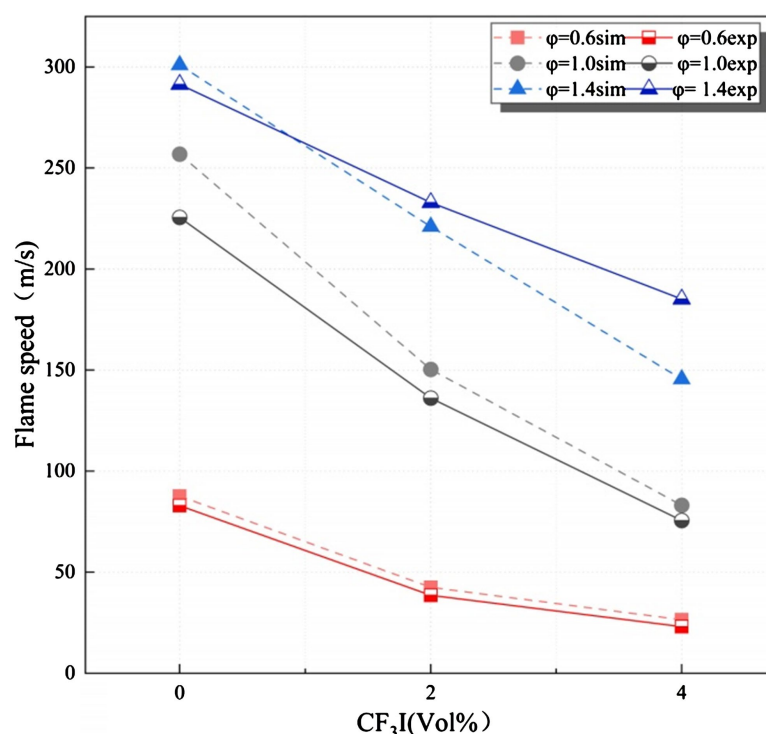


Figure 1. Comparison of the simulated laminar flame speed of $\text{H}_2\text{-air}$ mixture flames with different volume fractions of trifluoroiodomethane and previous experimental data

图 1. 不同体积分数三氟碘甲烷比 $\text{H}_2\text{-air}$ 混合物火焰的层流火焰速度模拟值与以往实验数据的比较

3. 结果与分析

3.1. 层流燃烧速度

CF_3I 与 CO_2 对 $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{air}$ 混合气爆炸火焰层流燃烧速度的模拟结果如图 2 所示。随着 CF_3I 和 CO_2 体积分数的增加, 层流燃烧速度逐渐降低。当 CF_3I 体积分数为 0.5%、 CO_2 为 15%, 或 CF_3I 为 1.0%、 CO_2 为 10% 时, 混合气体的爆炸火焰已被有效抑制; 继续增加抑爆剂体积分数, 则进一步强化了抑制效果。

在 CF_3I 体积分数为 0.5% 时, 分别加入 5%、10% 和 15% 的 CO_2 , 使得层流燃烧速度依次下降 52.3%、71.4% 和 84.5%; 而当 CF_3I 增至 1.5% 时, 相同 CO_2 体积分数下的降幅分别达到 73.9%、87.7% 和 95.8%。结果表明, 在少量 CF_3I 的基础上增加 CO_2 体积分数, 可显著增强对氢气/甲烷爆炸火焰的抑制效果, 体现出明显的协同抑爆作用。在保障高效抑爆的同时兼顾经济性。三氟碘甲烷体积分数为 0.5% 和二氧化碳体积分数为 15% 时最佳。

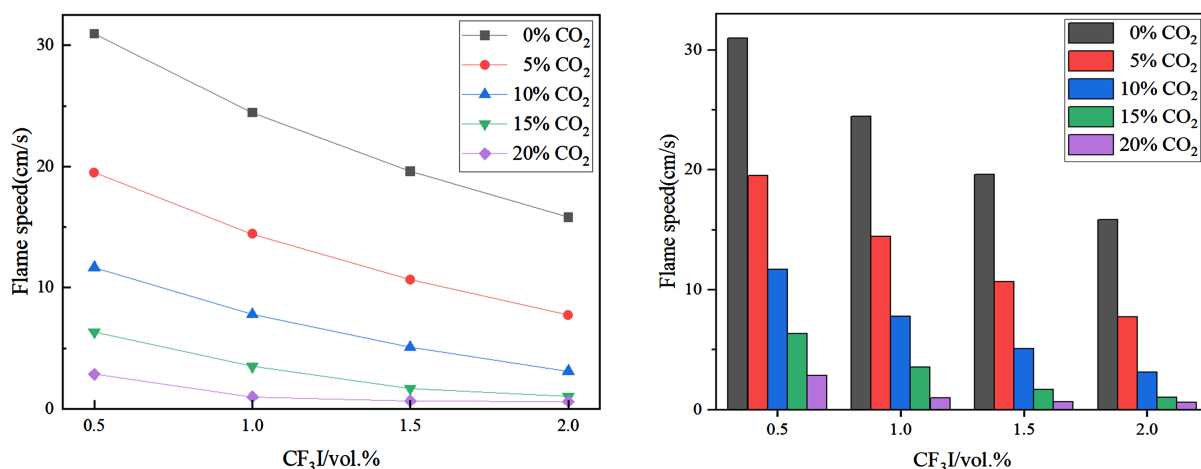


Figure 2. Effect of adding different volume fractions of trifluoroiodomethane to carbon dioxide on flame speed
图 2. 不同体积分数下三氟碘甲烷添加不同体积分数下二氧化碳对于火焰速度的影响

3.2. 层流燃烧速度敏感性

层流燃烧速度敏感性分析是燃烧动力学研究中的重要工具，它主要用于量化关键基元反应对燃烧速度的影响程度，从而揭示影响燃烧过程的主导化学反应机理。敏感性系数为正值表示提升基元反应反应速率系数会提升层流火焰速度，相反，敏感性系数为负值表示提升基元反应反应速率系数会降低层流火焰速度。

图 3 分别展示了在 CF₃I 体积分数为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 条件下，添加不同比例 CO₂ 对 H₂/CH₄/air 混合气体层流燃烧速度敏感性系数的影响，图中列出了敏感性系数绝对值最高的 10 个基元反应。对这四个工况进行综合分析，深入揭示 CF₃I/CO₂ 复合抑爆剂在化学反应动力学层面的协同作用机制。

在所有 CF₃I 浓度条件下，敏感性系数最高的反应均为链分支反应 R1 ($\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$)。该反应是氢气和碳氢燃料燃烧过程中最重要的链分支反应，其高速率常数和放热特性对层流燃烧速度上升具有极强的促进作用。之后具有较高敏感性反应包括 R30 ($\text{HCO} + \text{M} \rightleftharpoons \text{H} + \text{CO} + \text{M}$) 和 R131 ($\text{CH}_3 + \text{OH} \rightleftharpoons \text{CH}_2\text{OH} + \text{H}$) 等。R30 反应通过分解 HCO 生成活性 H·，为维持链式反应的进行提供关键的 H·。以上反应共同构成了促进燃烧反应的主要路径，它们的大量放热和快速生成 H、O、OH 等关键自由基，显著提高了层流燃烧速度。

在负敏感性反应中，链终止反应占据主导地位。其中，R1818 ($\text{I} + \text{HCO} \rightleftharpoons \text{HI} + \text{CO}$) 通过碘原子与 HCO 反应生成稳定的 HI 分子，有效消耗了活性中间体；R1788 ($\text{CH}_3\text{I} + \text{M} \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{I} + \text{M}$) 通过分解 CH₃I 生成碘原子，为后续的链终止反应提供活性原子。这些反应的敏感性系数为负值，表明它们对层流燃烧速度起抑制作用。

随着 CO₂ 体积分数的增加，燃烧系统的反应工况发生显著变化。CO₂ 的高比热容导致火焰温度降低，同时其惰化作用降低了反应物浓度。这些物理效应直接影响基元反应的速率。分析结果表明，多数抑制反应的敏感性系数随 CO₂ 添加量的增加而逐渐增强，特别是 R9、R1788、R1818 等反应的负敏感性系数显著增大，反映出 CO₂ 的物理抑制作用强化了这些反应的抑制效果。

特别值得注意的是，在高 CF₃I 浓度如 1.5%、2.0% 条件下，当 CO₂ 体积分数分别达到 15% 和 20% 时，原本敏感性最高的促进反应 R1 的系数出现急剧下降。这一现象表明，在该临界比例下，复合抑爆剂开始显著抑制最关键链分支路径。此时，CF₃I 的化学抑制与 CO₂ 的物理抑制达到最佳协同状态，导致整个燃烧链式反应受到抑制。

在不同 CF₃I 体积分数条件下，CO₂ 的引入还触发了如 R1787 ($\text{H} + \text{I}_2 \rightleftharpoons \text{HI} + \text{I}$) 和 R1778 ($\text{I}_2 + \text{M} \rightleftharpoons$

2I+M)等具有抑制效应的反应。这些反应通过消耗 H· 和生成活性碘原子, 进一步增强了燃烧反应的抑制强度。R1787 作为链终止反应直接消耗 H·, 而 R1778 通过分解 I₂ 为体系提供更多的碘原子, 这些碘原子可进一步参与其他链终止反应。从四个图的对比可以看出, 随着 CF₃I 体积分数的增加, 敏感性反应图谱发生明显变化。在 CF₃I 浓度为 0.5% 时, 主导的链终止反应为 R123, 而在 CF₃I 浓度 ≥1.0% 时, R1818 和 R1788 等含碘反应的重要性显著提升。这一转变表明, 随着 CF₃I 浓度的增加, 含碘反应路径在抑制机制中扮演越来越重要的角色。

CO₂ 的加入显著改变了敏感性反应的结构和强度分布。负敏感性反应的数量和强度均随 CO₂ 体积分数的提高而增加, 同时一些关键的促进反应如 R1 的敏感性系数在特定条件下出现急剧下降。这些现象从化学反应动力学层面揭示了 CF₃I/CO₂ 复合体系对掺氢天然气爆炸火焰的协同抑制机制: CF₃I 主要通过提供碘、氟原子参与链终止反应实现化学抑制, 而 CO₂ 则通过降低火焰温度和稀释反应物浓度增强这些抑制效果, 二者协同作用最终导致燃烧反应被有效抑制。

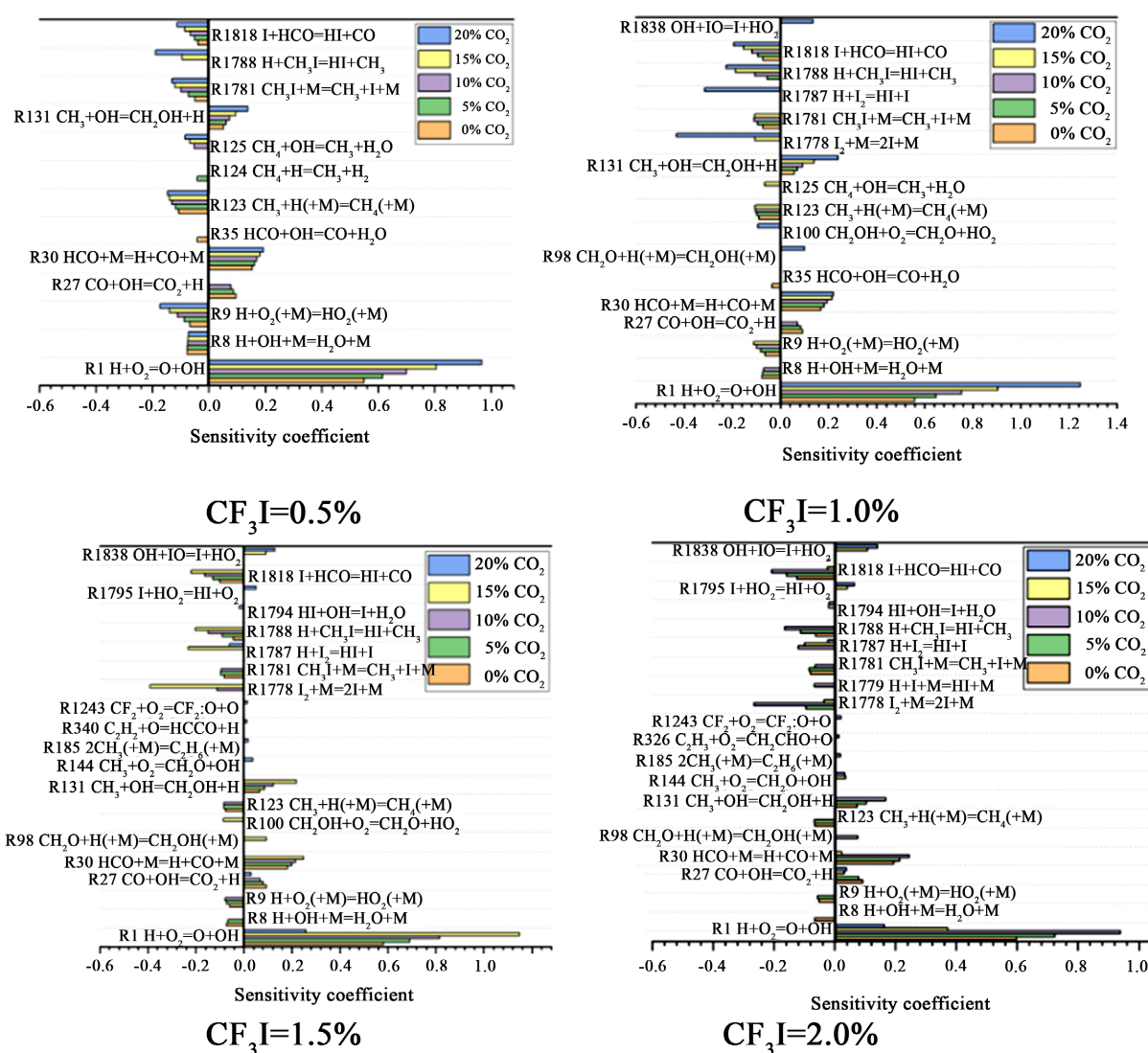


Figure 3. Sensitivity of laminar flow to trifluoriodomethane with different volume fractions of carbon dioxide added at different volume fractions

图 3. 不同体积分数下三氟碘甲烷添加不同体积分数二氧化碳层流敏感性

3.3. 关键自由基浓度

图4中展示了在固定CF₃I体积分数为1.0%的条件下,不同CO₂体积分数(0%、5%、10%、15%、20%)对H₂/CH₄/air混合气体中H·浓度随时间演变规律的动力学影响。通过对比四条浓度-时间曲线可以清晰地观察到,CO₂的加入不仅显著改变了H·的峰值浓度,也对其整个生成-消耗过程产生了影响。

从H·最大摩尔分数的变化来看,CO₂表现出显著的抑制作用。在未添加CO₂的条件下,H·的最大摩尔分数约为0.025;随着CO₂体积分数增至5%,该值下降至约0.0195;进一步将CO₂体积分数提高至10%、15%和20%时,H·的最大摩尔分数依次降至约0.016、0.0139和0.012。相较于无CO₂条件,20%CO₂使H·的最大摩尔分数下降约52%,不难发现CO₂的加入有效抑制了活性自由基H·的积累,可以影响含有H·的基元反应。观察H·最大摩尔分数随CO₂体积分数变化的趋势,尽管随着CO₂比例增加,H·的最大摩尔分数持续降低,但是下降速率逐渐减缓。这表明CO₂对H·的抑制作用存在“边际效应”,在低CO₂浓度区间,少量CO₂就能引起H·最大摩尔分数大幅下降;而在高CO₂浓度区间,由于体系中H·大部分已经被抑制,继续增加CO₂所带来的抑制效果明显减弱。因此选择合适的添加量,对于研究复合抑爆剂具有较大的研究价值,即能实现高效的抑制又可以节约成本。

图5中以1%CF₃I-10%CO₂为例从ROP基元反应角度展开分析。进行推断不难发现,从反应机理角度分析,H·浓度的降低可归因于CO₂的多重抑制机制。CO₂的稀释作用降低了反应物浓度,减少了分子碰撞频率;第三,CO₂可能直接参与了一些惰化反应,如CO₂+H=CO+OH,这一反应虽然生成OH·,但消耗了活性更强的H·,总体上可能对燃烧速度产生抑制作用。这些自由基浓度的变化趋势与前期敏感性分析结果高度一致。敏感性分析表明,随着CO₂比例的增加,促进燃烧的链分支反应R1的敏感性系数降低,而消耗H·的链终止反应(如R1818等)的敏感性系数增加。自由基浓度分析从定量角度验证了这一动力学趋势,证实了CO₂通过影响关键基元反应速率,最终实现对自由基浓度的有效控制。

H·浓度的显著降低对抑爆效果具有直接意义。作为燃烧链式反应的核心载体,H·浓度的下降意味着整个链式反应速率的降低,从而导致层流燃烧速度的减小和爆炸强度的削弱。这从微观反应动力学层面解释了CF₃I/CO₂复合抑爆剂为何能够有效抑制掺氢天然气爆炸的宏观现象。

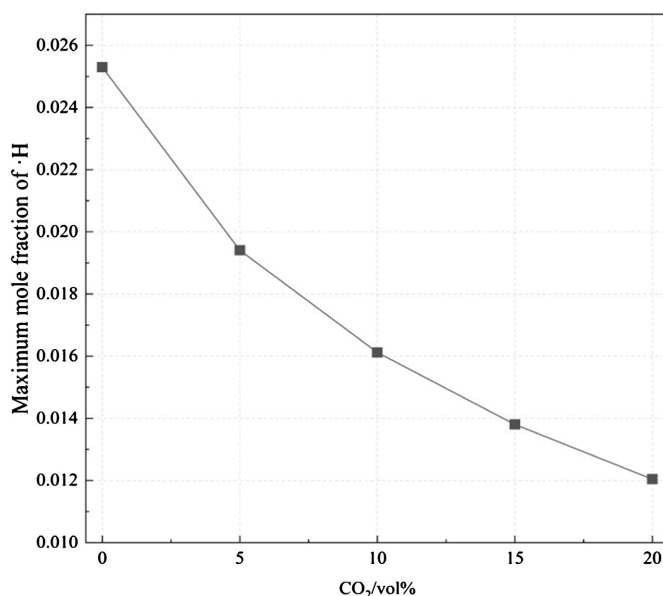


Figure 4. Peak molar fraction of H· in the reaction of adding different volume fractions of carbon dioxide to 1% volume fraction of trifluoroiodomethane

图4. 三氟碘甲烷为1%体积分数下添加不同体积分数二氧化碳反应H·的摩尔分数峰值

通过以 1%CF₃I-10%CO₂ 为例从 ROP 基元反应角度展开分析。进行推断不难知道, H·浓度的降低可归因于 CO₂ 的多重抑制机制。CO₂ 的稀释作用降低了反应物浓度, 减少了分子碰撞频率; CO₂ 可能直接参与了一些惰化反应, 如 R27CO₂ 的加入影响平衡, 促进反应逆向进行, 降低了 H·产生速率 CO₂ + H = CO + OH, 这一反应虽然生成 OH·, 但消耗了活性更强的 H·, 总体上可能对燃烧速度产生抑制作用。这些自由基 ROP 的变化趋势与前期敏感性分析结果高度一致。敏感性分析表明, 随着 CO₂ 比例的增加, 促进燃烧的链分支反应 R1 的敏感性系数降低, 而消耗 H·的链终止反应的敏感性系数增加。自由基浓度分析从定量角度验证了这一动力学趋势, 证实了 CO₂ 通过影响关键基元反应速率, 最终实现对自由基浓度的有效控制。

H·浓度的显著降低对抑爆效果具有直接意义。作为燃烧链式反应的核心载体, H·浓度的下降意味着整个链式反应速率的降低, 从而导致层流燃烧速度的减小和爆炸强度的削弱。这从微观反应动力学层面解释了 CF₃I/CO₂ 复合抑爆剂为何能够有效抑制掺氢天然气爆炸的宏观现象。

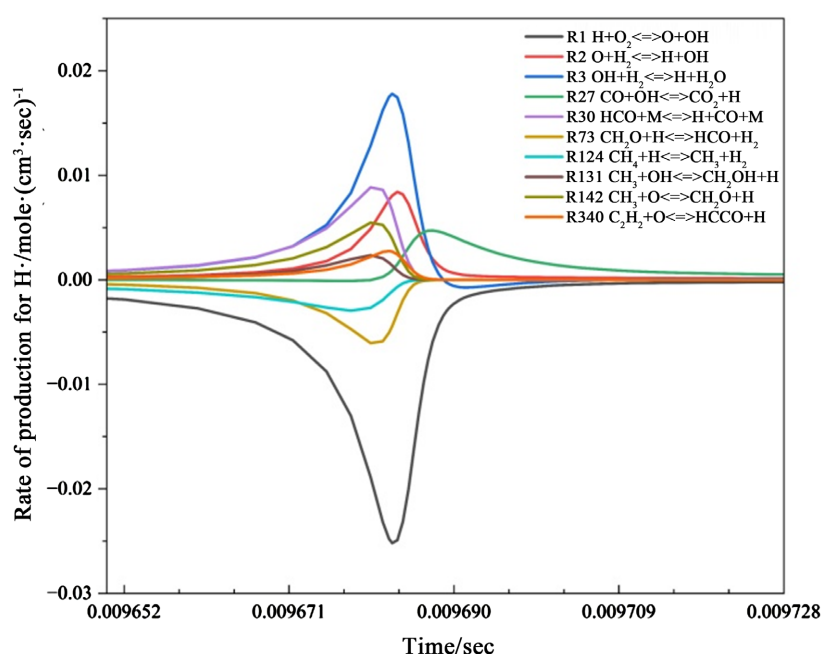


Figure 5. Top 10 elementary reactions with the largest H· generation and consumption when adding 1% CF₃I-10% CO₂
图 5. 添加 1% CF₃I-10% CO₂ 时 H·生成与消耗最大前 10 的基元反应

4. 结论

(1) 三氟碘甲烷(CF₃I)与二氧化碳(CO₂)在复合添加条件下, 对氢气/甲烷混合气体的层流燃烧速度表现出显著的协同抑制效果。随着两者体积分数的增加, 抑爆性能逐步增强。具体而言, 当 CF₃I 体积分数为 0.5%时, 单独使用其抑制效果仅为 24%~30%; 而在相同 CF₃I 用量下, 配以 15%的 CO₂ 可使抑制效果提升至 84%~90%, 在保障高效抑爆的同时兼顾经济性。CF₃I 体积分数为 0.5%和二氧化碳体积分数为 15% 时最佳。

(2) CF₃I 与 CO₂ 在抑制掺氢天然气爆炸过程中表现出显著的物理 - 化学协同机制。CO₂ 主要通过物理作用稀释燃料与氧气浓度, 并利用其高比热容吸收反应热, 降低火焰温度, 延缓爆炸压力上升; CF₃I 则在高温下分解生成含 I 和 F 自由基, 有效捕获 H·和 OH·等关键活性自由基, 中断链式反应。两者协同不仅形成多重自由基淬灭路径, CO₂ 的冷却效应还可延长 CF₃I 的作用时间, 增强抑爆持续性, 共同实现高效抑爆。

(3) 基于对 $\text{H}\cdot$ 浓度变化的分析可知, CF_3I 与 CO_2 的协同抑爆作用在自由基层面表现为对关键活性中间体的显著抑制。随着 CO_2 体积分数的增加, $\text{H}\cdot$ 的峰值浓度与稳定浓度均按照一定规律降低。 CO_2 通过物理稀释和降温作用延缓了 $\text{H}\cdot$ 的生成速率, 而 CF_3I 则通过碘自由基的化学捕获机制加速 $\text{H}\cdot$ 的消耗。两者协同不仅降低了自由基的生成强度, 也改变了其动态演化历程, 从而在微观层面有效阻断了燃烧链式反应。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划基金资助项目(YKJCX2420706)。

参考文献

- [1] Sorgulu, F., Ozturk, M., Javani, N. and Dincer, I. (2023) Experimental Investigation for Combustion Performance of Hydrogen and Natural Gas Fuel Blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, **48**, 34476-34485. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.239>
- [2] 孔莹莹, 胡若炜, 秦子康, 等. 掺氢天然气燃烧特性与应用[J]. 油气储运, 2025, 44(2): 153-167.
- [3] 马青峰, 韩辉, 李玉星, 等. 受限空间掺氢天然气泄漏与燃爆特性研究综述[J]. 油气与新能源, 2023, 35(1): 117-128.
- [4] 郑立刚, 苏洋, 李刚. 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): 4874-4881.
- [5] 崔洋洋, 王成, 钱琛庚, 等. 开放空间 H_2/CH_4 /空气爆炸实验与数值模拟研究[J]. 力学学报, 2022, 54(8): 2173-2193.
- [6] 马秋菊, 邵俊程, 王众山, 等. 氢气比例和点火能量对 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 混合气体爆炸强度影响的实验研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1): 131-136.
- [7] 陈卓, 李敬法, 宇波. 室内受限空间中掺氢天然气爆炸模拟[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5608-5614.
- [8] Zhang, B., Pang, L. and Gao, Y. (2016) Detonation Limits in Binary Fuel Blends of Methane/Hydrogen Mixtures. *Fuel*, **168**, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.073>
- [9] Okafor, E.C., Hayakawa, A., Nagano, Y. and Kitagawa, T. (2014) Effects of Hydrogen Concentration on Premixed Laminar Flames of Hydrogen-Methane-Air. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 2409-2417. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.11.128>
- [10] 罗振敏, 南凡, 孙亚丽, 等. 掺氢比和 CO_2 对掺氢天然气爆炸特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(11): 111404-1-111404-13. <https://link.cnki.net/urlid/51.1148.O3.20250108.1344.008>
- [11] 程方明, 南凡, 肖旻, 等. CF_3I 和 CO_2 抑制甲烷-空气爆炸实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(6): 158-166.
- [12] 向开军, 段玉龙, 何国钦, 等. CO_2 -多孔材料协同抑制甲烷爆炸特性[J]. 高压物理学报, 2024, 38(1): 174-181.
- [13] 王涛, 孟帆, 弋伟斋, 等. 碳酸钾改性干水-六氟丙烷抑制甲烷爆炸特性[J]. 高压物理学报, 2025, 39(4): 79-90.
- [14] 李满厚, 汲世杰. 方形容器内掺氢天然气爆炸抑制实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(6): 953-958.
- [15] Xiao, P., Lee, C., Wu, H. and Liu, F. (2020) Effects of Hydrogen Addition on the Laminar Methanol-Air Flame under Different Initial Temperatures. *Renewable Energy*, **154**, 209-222. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.037>
- [16] Metcalfe, W.K., Burke, S.M., Ahmed, S.S. and Curran, H.J. (2013) A Hierarchical and Comparative Kinetic Modeling Study of C1-C2 Hydrocarbon and Oxygenated Fuels. *International Journal of Chemical Kinetics*, **45**, 638-675. <https://doi.org/10.1002/kin.20802>
- [17] Babushok, V.I., Burgess, D.R., Kim, D.K., et al. (2021) Modeling of Combustion of Fluorine Containing Refrigerants. NIST.
- [18] Luo, Z., Nan, F., Cheng, F., Xiao, Y., Wang, T., Li, R., et al. (2024) Study on the Inhibition of Hydrogen Explosion Pressure and Flame Propagation by Trifluoroiodomethane. *International Journal of Hydrogen Energy*, **49**, 670-680. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.182>