

惰性气体对C₂H₆可燃极限的影响及其产生原因

袁畅, 胡贤忠, 张娟
(东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 在5 L定容燃烧弹中实验测定了O₂/惰性气体(N₂, Ar和CO₂)氛围中乙烷的可燃极限. 在3种惰性气体中, CO₂对可燃极限影响最大. 对于可燃下极限, Ar和N₂使其轻微降低, 而CO₂使其从3.40%增至4.65%. 可燃上极限变化更显著, 当惰性气体体积分数从10%增至80%时, CO₂使其从51.5%降至8.0%, 降低了43.5%, 而Ar和N₂分别使其降低39.0%和40.0%. 为探究影响原因, 使用极限层流燃烧速度法分离了惰性气体的稀释、化学、热力学和辐射作用的影响. 结果表明, N₂仅有稀释和辐射作用的影响, 而Ar和CO₂存在4种作用的影响. 在可燃下极限处, N₂的稀释作用影响最强, 占总影响的99.2%, Ar和CO₂的热力学作用影响最大, 分别占总影响的64.4%和51.4%; 对于可燃上极限, 稀释作用的影响始终最大.

关键词: 气体燃料; 可燃极限; 惰性气体; 极限层流火焰速度法; 反应动力学分析

中图分类号: TK 16; TQ 038.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)10-0074-07

Influence of Inert Gases on Flammability Limit of C₂H₆ and Their Formation Causes

YUAN Chang, HU Xian-zhong, ZHANG Juan

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HU Xian-zhong, E-mail: huxz@smm.neu.edu.cn)

Abstract: The flammability limit of ethane in O₂/inert gases (N₂, Ar, CO₂) atmosphere was experimentally determined in a 5 L constant volume combustion bomb. Among the three inert gases, CO₂ is of the greatest influence on the flammability limit. For the lower flammability limit, Ar and N₂ decreased it slightly, while CO₂ increased it from 3.40% to 4.65%. The upper flammability limit changed more significantly; as the inert gas concentration increased from 10% to 80%, CO₂ reduced it from 51.5% to 8.0%, a reduction of 43.5%, while Ar and N₂ reduced it by 39.0% and 40.0%. The dilution, chemical, thermodynamic, and radiation effects of inert gases were separated with the limiting laminar burning velocity method. The results show that N₂ only produces the effects of dilution and radiation, while Ar and CO₂ produce four effects. At the lower flammability limit, the dilution effect of N₂ is the strongest, accounting for 99.2% of the total effect, and the thermodynamic effect of Ar and CO₂ is the largest, accounting for 64.4% and 51.4% of the total effect, respectively. For the upper flammability limit, the dilution effect is always of the greatest influence.

Key words: gaseous fuel; flammability limit; inert gas; limiting laminar burning velocity method; reaction kinetics analysis

近年来, 气体燃料被广泛应用于化工、石油和天然气等行业, 为人类生活带来了极大便利. 为更好地利用气体燃料, 对其燃烧特性的探究具有必要性. 可燃极限是衡量燃烧特性的重要指标, 包括可燃上极限和可燃下极限, 被广泛用于

工业爆炸危险中燃料的定量风险评估^[1]. 可燃极限受到许多因素的影响, 其中, 惰性气体对可燃极限的影响较大^[2], 人们常将其添加于气体燃料中以实现在爆炸初期降低爆炸强度, 减小爆炸的危害.

收稿日期: 2024-03-08

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2023-1SBA-100); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2425018).

作者简介: 袁畅(1999—), 女, 辽宁抚顺人, 东北大学硕士研究生; 胡贤忠(1984—), 男, 山东枣庄人, 东北大学副教授, 硕士生导师.

为准确探究惰性气体对气体燃料可燃极限的影响, Xie 等^[3]研究了添加 N₂ 时, 甲烷、乙烷、丙烷及其混合物的可燃极限变化规律, 结果表明, N₂ 的不断加入使可燃烷烃的可燃下极限逐渐增大, 可燃上极限逐渐减小. Zhang 等^[4]在 20 L 球形爆炸容器中实验测量了添加 N₂ 和 Ar 时天然气的可燃极限, 结果表明, 增大 Ar 和 N₂ 浓度会缩小其可燃范围. Abdelkhalik 等^[5]实验测定了 CO₂, He, Ar, N₂ 对 1, 3-二氧戊环在两种氧化剂 (Air 和 N₂O) 中可燃极限的影响, 发现惰性气体的加入会缩小 1, 3-二氧戊环的可燃范围, 且影响程度从大到小顺序为 CO₂, He, N₂, Ar. 许多学者建立了可燃极限的预测模型. Le Chatelier 公式^[6]常被用于预测混合气的可燃极限, 但该公式预测可燃上极限时准确性较低. 为提高 Le Chatelier 公式准确性, Kondo 等^[7]在原公式基础上添加了修正系数, 实现了对甲烷等可燃气体在 N₂ 和 CO₂ 稀释下可燃极限的准确预测, 但该公式不适用于乙烷等未被提及的气体. Ma^[8]提出了一种预测可燃极限的热理论方法, 但这一方法假定火焰结构和温度恒定, 与实际情况存在误差, 会影响预测精度. 极限层流燃烧速度法是一种适用于不同初始条件和可燃气体的计算方法, 其计算原理清晰、计算灵活性高且具有良好的预测精度^[9], 可用于预测可燃极限.

乙烷是化学工业中蒸汽裂解制备乙烯的主要原料, 由于乙烷极易燃烧, 在储运过程中易引

起爆炸等工业事故, 为更好地利用乙烷并提高其在工业应用中的安全性, 开展乙烷燃烧特性的研究具有十分重要的意义. 目前针对乙烷可燃极限的研究大多在空气或纯氧中进行, 关于惰性气对于乙烷可燃极限的影响研究尚不全面. 鉴于此, 本文实验测量了乙烷在惰性气体/O₂ 中的可燃极限, 并分析了惰性气体的稀释、化学、热力学和辐射作用对可燃极限的影响.

1 方 法

1.1 实验测量

图 1 为实验装置示意图, 实验台由供气系统、爆炸系统、点火系统、真空压力表和排气系统组成. 供气系统通过管道输送 5 个气瓶 (装有纯度 99.99% 的 C₂H₆, O₂, CO₂, N₂ 和 Ar) 中的气体. 爆炸系统包括安全阀和 5 L 圆柱形爆炸容器, 其外部中心装有用于观察火焰的视镜. 爆炸容器内有 1 对间隔 5.6 mm 的铜电极, 连接到输出电压 14 kV 的电火花发生器, 构成点火系统. 真空压力表通过钢管与爆炸装置相连接, 配置混合气体时可通过观察真空压力表监测爆炸容器内压力. 排气系统包括真空泵和 1 个支路阀, 均置于通风橱中, 分别用于将爆炸装置内抽至真空及排出有害气体.

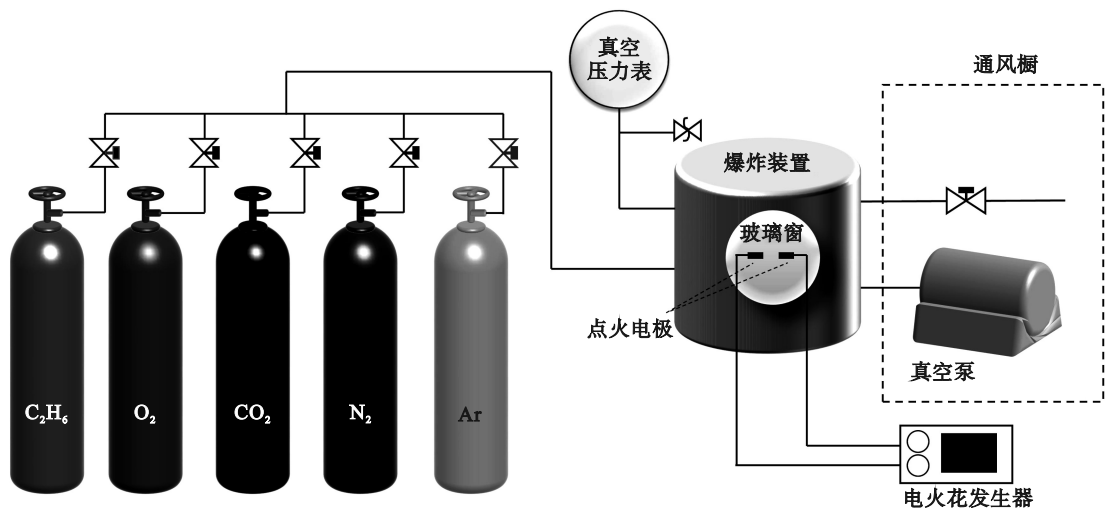


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

本实验中, 可燃极限通过目测法根据 ASTM E681-09 标准确定, 若在视镜处观察到明亮蓝色或橙色火焰从点火中心产生并快速蔓延至容器顶部, 则认为火焰可稳定扩散, 即混合气可燃. 若

仅点火电极附近出现火花而未形成火焰, 则认为混合气不可燃. 可燃极限由式 (1) 确定:

$$X_{C_2H_6} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad (1)$$

其中: $X_{C_2H_6}$ 为可燃极限实验值(包括可燃上极限和可燃下极限); φ_1 为火焰能稳定扩散传播的临界 C_2H_6 体积分数; φ_2 为火焰不能稳定扩散的临界 C_2H_6 体积分数。

惰性气体体积分数 φ_{dil} 定义式如下:

$$\varphi_{dil} = \frac{V_{dil}}{V_{dil} + V_{oxidizer}} \quad (2)$$

其中: V_{dil} 为惰性气体体积; $V_{oxidizer}$ 为氧化剂体积。

1.2 数值模型

预测可燃极限的数值模型基于极限层流燃烧速度法建立,该方法根据可燃混合物的火焰扩散条件,提出了可燃极限的存在是火焰传播与正常热量损失相互竞争的结果。当绝热或理想火焰前沿热量产生速率与热量损失极限速率达到平衡时,火焰才能够传播。

计算过程原理图见图 2,首先根据给定初始参数估算出该混合气的层流燃烧速度 S_u 及燃烧产物密度、热扩散系数等参数,利用基本参数结合式(3)可计算不同组分混合物的极限层流燃烧速度 $S_{u,lim}$ 。

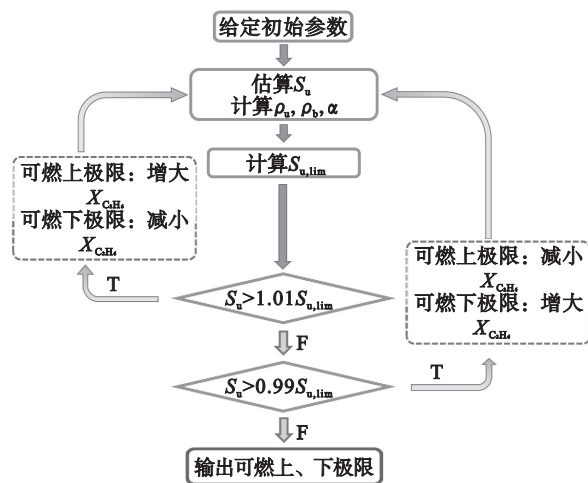


图 2 极限层流燃烧速度法原理图

Fig. 2 Principle diagram of limiting laminar burning velocity method

$$S_{u,lim} = \sqrt[3]{2\alpha g \frac{\rho_b}{\rho_u}} \quad (3)$$

其中: α 为未燃混合物有效热扩散系数; g 为重力加速度; ρ_b 为已燃混合气密度; ρ_u 为未燃混合气密度。

计算出极限层流燃烧速度 $S_{u,lim}$ 后,与当前工况的层流燃烧速度 S_u 对比,以计算可燃下极限为例,若 $S_u < S_{u,lim}$,则增大燃料浓度,反之减小,直至二者无限逼近(本文取差值小于 1%),此时 C_2H_6 浓度即为可燃极限计算值。计算迭代过程通过

Python 代码实现,选用 Davis 等^[10]构建的详细机理,使用开源软件 Cantera 中的 FreeFlame 模型计算 S_u 。

2 惰性气体对 C_2H_6 可燃极限的影响

2.1 实验结果

C_2H_6 在 O_2 /惰性气体中的可燃极限实验值如图 3 所示。根据实验结果可知,可燃下极限受惰性气体的影响较小,Ar 和 N_2 的加入使可燃下极限被轻微降低,当惰性气体体积分数从 10% 增大至 80% 时,可燃下极限分别从 2.95% 和 2.85% 降低至 2.8% 和 2.0%。然而, CO_2 的加入导致可燃下极限被小幅度提高,从 3.4% 上升至 4.65%,且高体积分数的 CO_2 对于可燃下极限的影响更明显。

实验结果表明,在 3 种惰性气体中, CO_2 的影响最为强烈,随着 CO_2 体积分数从 10% 增大至 80%, C_2H_6 的可燃上极限从 51.5% 降低至 8.0%。对于 Ar 和 N_2 ,可燃上极限的变化幅度分别为 39.0% 和 40.0%。

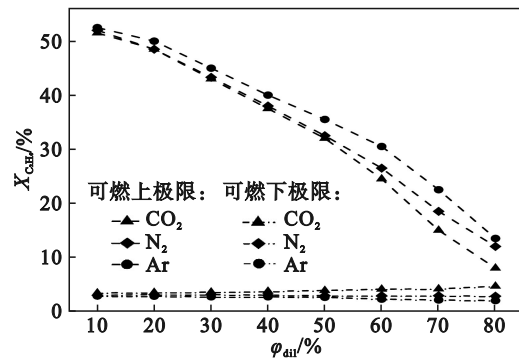


图 3 可燃极限实验结果

Fig. 3 Experimental results of flammability limit

2.2 惰性气体对可燃极限的影响及其产生原因

本文采用极限层流火焰速度法计算不同惰性气体稀释条件下的可燃极限。如图 4 所示,计算值与实验值符合较好,二者变化趋势基本一致。对于可燃下极限,该方法在 3 种惰性气体氛围下预测的绝对误差均在 0.14% 以下,在可燃上极限处, N_2 氛围下的预测值略高于实验值,平均绝对误差为 1.12%。

惰性气体对燃烧过程的影响主要来自 4 个方面:稀释作用、热力学作用、化学作用和热辐射作用。为分离各作用的影响,首先引入了虚拟物质 FN_2 ,该物质常被用于分离惰性气体的稀释作用。然后,引入虚拟物质 FAr 和 FCO_2 以分离热力学作

用及化学作用的影响.3 种虚拟物质 FN₂, FAr 和 FCO₂ 分别与 N₂, Ar 和 CO₂ 具有相同的热力学特性和传输特性,但它们在燃烧反应过程中不参与任何化学反应.此外,为考虑辐射作用的影响,在 Cantera 中添加了一个光学薄辐射模型以探究辐射热损失对可燃极限的影响,该模型的原理是将辐射热损失项 q_{rad} 添加到能量方程中:

$$q_{rad} = -4k_p\sigma(T_{flame}^4 - T_{\infty}^4). \quad (4)$$

式中: k_p 为有效吸收系数; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; T_{flame} 为火焰温度; T_{∞} 为环境温度.

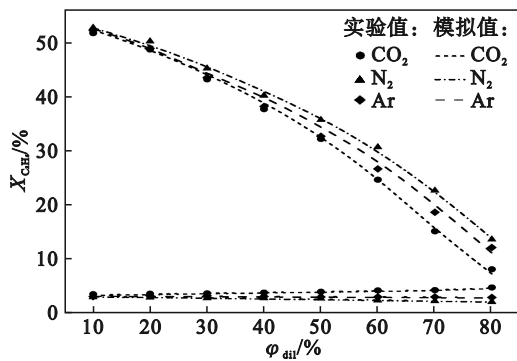


图 4 可燃极限实验和计算结果

Fig. 4 Experimental and simulated results of flammability limit

各作用对可燃极限的影响可通过式(5)~(8)计算,式中各项表示惰性气体为不同物质时的可燃极限计算值.计算结果的绝对值表示了各作用影响程度,若该作用导致可燃极限增大,则记为正值,反之记为负值.

$$\text{稀释作用} = X_{FN_2} - X_{\text{无稀释}}, \quad (5)$$

$$\text{化学作用} = X_{dil} - X_{Fdil}, \quad (6)$$

$$\text{热力学作用} = X_{Fdil} - X_{FN_2}, \quad (7)$$

$$\text{辐射作用} = X_{dil-Rad} - X_{dil}. \quad (8)$$

其中: X_{FN_2} , $X_{\text{无稀释}}$, X_{Fdil} , $X_{dil-Rad}$ 分别代表 FN₂ 做稀释剂、无稀释剂、虚拟物质做稀释剂和考虑辐射换热条件下的可燃极限.

2.2.1 稀释作用的影响

稀释作用对可燃极限的影响如图 5 所示.惰性气体的加入会导致参与燃烧反应的气体体积分数降低,其中 O₂ 体积分数的降低是抑制混合物可燃性的根本原因.由图 6 可知,稀释作用下的影响程度与 O₂ 体积分数的减少量成正比.随着惰性气体体积分数逐渐增大, O₂ 含量降低幅度也越来越大,故稀释作用逐渐增强.对于可燃下极限,稀释作用的影响并不明显,当惰性气体体积分数从 10% 增大至 80% 时,该作用导致可燃下极限降低的最大幅度仅为 0.33%,原因是在可燃下极限处,

O₂ 含量充足,此时可燃极限受稀释作用的影响相对较轻.然而,稀释作用对于可燃上极限影响显著,当惰性气体体积分数从 10% 增大至 80% 时,稀释作用对可燃上极限的降低作用最大达 44.35%,原因是在可燃上极限处,燃料处于富燃而 O₂ 含量相对缺乏,此时 O₂ 体积分数变化对于惰性气体的加入十分敏感,故其受稀释作用的影响非常明显.

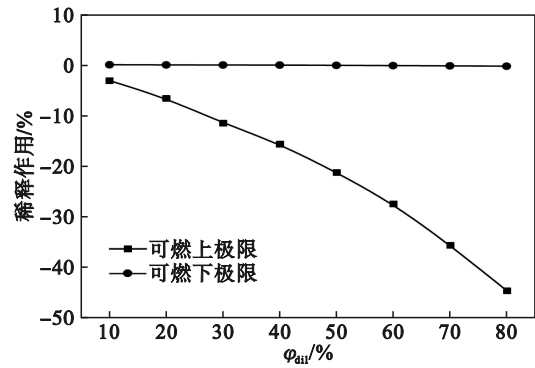


图 5 稀释作用对可燃极限的影响

Fig. 5 Influence of dilution effect on flammability limit

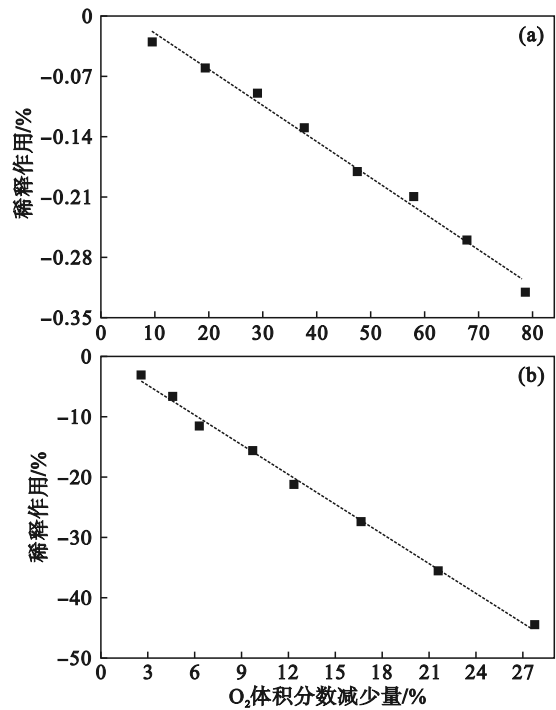


图 6 稀释作用与氧气减少量的关系

Fig. 6 Relationship between dilution effect and O₂ reduction

(a)—可燃下极限; (b)—可燃上极限.

2.2.2 化学作用的影响

虚拟物质 FN₂, FAr 和 FCO₂ 不参与任何化学反应,因此各惰性气体化学作用的影响可通过式(6)计算.由图 7 可知, N₂ 的化学性质对 C₂H₆ 可燃极限不存在影响, Ar 存在微弱的化学作用影响,随着 Ar 体积分数增大, C₂H₆ 可燃下极限减小而可

燃上极限增大,但最大影响仅为0.05%.CO₂的化学性质对于可燃极限的影响最为明显,其导致可燃下极限增大和可燃上极限减小,且对可燃上极限的影响更大,在 $\varphi_{\text{air}}=70\%$ 处,CO₂的化学作用对可燃极限的影响最突出,导致可燃上极限降低了1.34%.

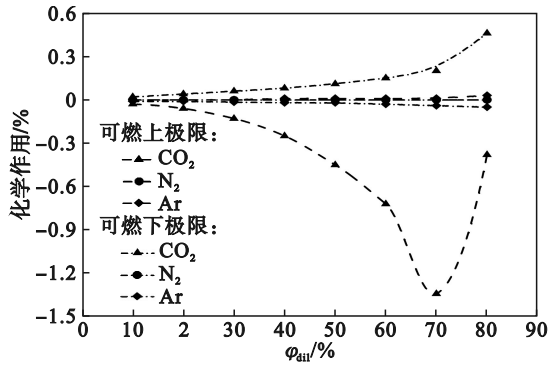


图7 化学作用对可燃极限的影响

Fig. 7 Influence of chemical effect on flammability limit

为深入探究化学作用的影响,计算了惰性气体体积分数为70%,化学当量比 Φ 为0.8和1.8时层流火焰速度的敏感性系数.该系数可以清晰地反映出基元反应对层流火焰传播的促进或抑制作用,从化学反应角度解释惰性气体对C₂H₆燃烧特性的化学影响.敏感性系数为正时,说明该基元反应会提高层流火焰速度,反之则会降低,绝对值越大表示该基元反应对层流火焰速度的影响程度越大.图8列举了不同惰性气体/O₂氛围中

对层流火焰传播的促进和抑制作用最强的5个反应,总体来看,可燃上极限附近的敏感性系数明显更大,因此惰性气体的化学性质对于可燃上极限的影响更明显.

2.2.3 热力学作用的影响

C₂H₆的燃烧过程为剧烈氧化放热反应,添加惰性气时,其热力学性质会改变混合气的吸热能力,影响燃烧过程.热力学作用对可燃极限的影响如图9所示,由于添加N₂对比热容的改变幅度最大仅为0.4%(见图10),故其热力学影响可忽略.随着Ar体积分数从10%增大至80%,可燃下极限降低了0.69%,而可燃上极限增大了2.66%,产生变化的原因是Ar的比热容远小于O₂,其加入会减弱混合气吸热能力.当添加CO₂时,可燃下极限随CO₂体积分数的增大而提高了1.29%,而可燃上极限降低了3.47%,原因是CO₂的比热容远大于O₂,其加入会大幅增强混合物吸热能力,导致火焰温度大幅度降低.此时为保证能量平衡,系统需要释放更多热量.在可燃下极限附近,该部分热量主要取决于被完全消耗的C₂H₆,为保证能量平衡,需增大C₂H₆体积分数,因此可燃下极限增大.而在可燃上极限处,热量主要取决于被完全消耗的O₂,此时要增大系统放热量需提高O₂体积分数,故可燃上极限减小.

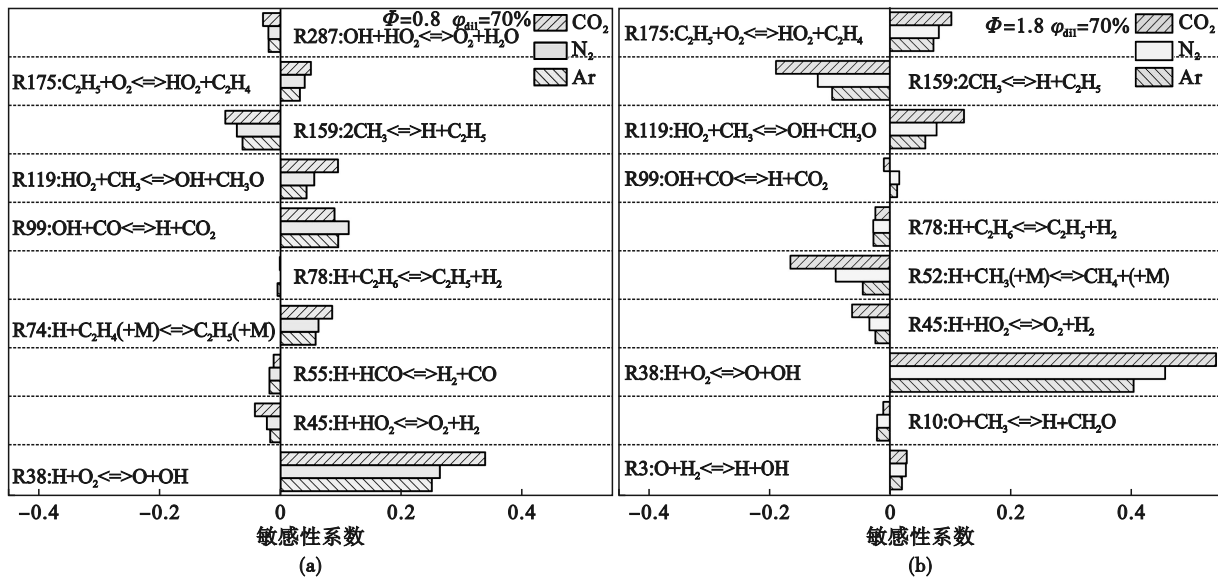


图8 可燃极限附近,层流火焰速度的敏感性系数

Fig. 8 Sensitivity coefficient of laminar burning velocity at flammability limit

(a)—可燃下极限; (b)—可燃上极限.

2.2.4 辐射作用的影响

如图11所示,在3种惰性气体/O₂氛围中,辐射作用均会导致可燃下极限的增大和可燃上极

限的减小.其中,对于可燃下极限,Ar和N₂辐射作用的影响十分微弱,最大仅有0.03%,而随着CO₂体积分数从10%升高至80%,辐射作用对可燃下

极限的影响从 0.08% 增大至 0.37%。对于可燃上极限, CO₂ 的辐射作用影响同样最明显, 随着其体积分分数不断增大, 辐射作用的影响从 0.60% 增大至 1.19%, Ar 氛围下的辐射作用产生影响的最大值为 0.47%, 而 N₂ 的最大影响仅有 0.38%。辐射作用对可燃极限产生影响的原因是, 未考虑辐射热损失时认为反应绝热, 然而 CO₂ 等多原子分子的强辐射能力会改变混合物吸热能力, 影响燃烧过程。根据能量守恒, 燃烧反应产生的热量应等于吸热损失与辐射热损失之和。当存在辐射热损失时, 需增大燃烧反应所产生热量以确保能量平衡。在可燃下极限处, 燃烧状态为贫燃, O₂ 相对过量, 要增大燃烧反应放热量需提高 C₂H₆ 体积分分数, 以使燃烧反应更充分, 因此可燃下极限增大。而可燃上极限处为富燃, C₂H₆ 过量而 O₂ 不足, 此时要使燃烧反应更加充分, 应增大 O₂ 体积分分数, 故可燃上极限降低。

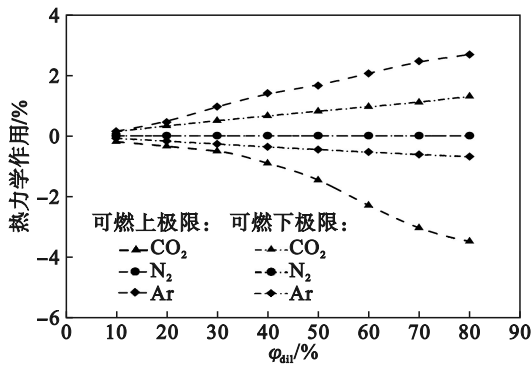


图 9 热力学作用对可燃极限的影响

Fig. 9 Thermodynamic effect on flammability limit

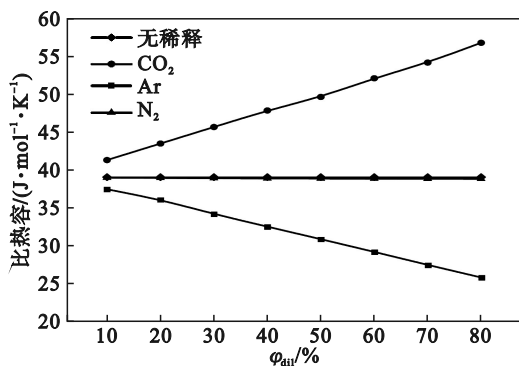


图 10 添加惰性气时混合物的比热容

Fig. 10 Specific heat capacity of mixture when inert gases are added

为清晰表示惰性气体对可燃极限的影响, 将 N₂, Ar 和 CO₂ 的稀释、化学、热力学和辐射作用计算结果展示在图 12 中。N₂ 对于 C₂H₆ 的可燃极限仅存在稀释和辐射作用的影响, 而 Ar 和 CO₂ 存在 4 种作用的影响。

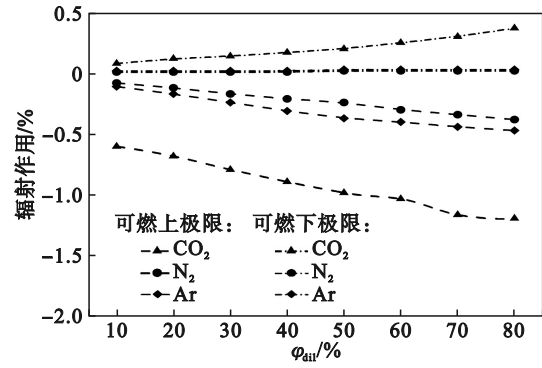


图 11 辐射作用对可燃极限的影响

Fig. 11 Influence of radiation effect on flammability limit

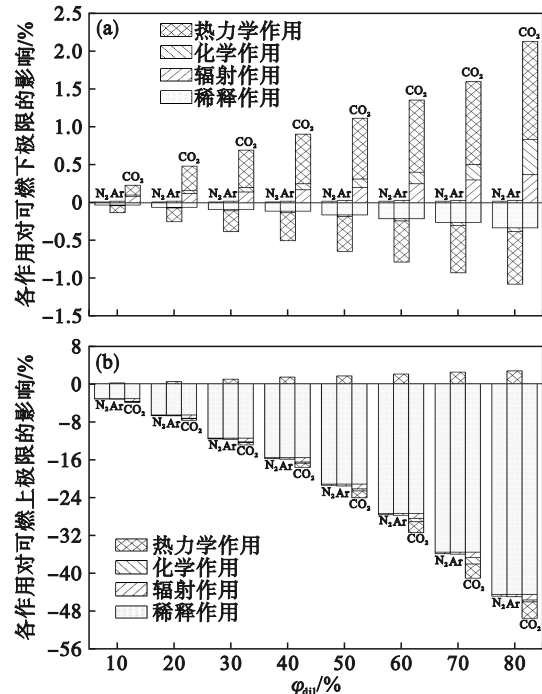


图 12 稀释作用、化学作用、热力学作用、辐射作用对可燃极限的影响

Fig. 12 Influence of dilution, chemical, thermodynamic, and radiation effects on flammability limit

(a) — 可燃下极限; (b) — 可燃上极限。

由图 12a 可知, 稀释作用始终导致可燃下极限降低, 且影响随着惰性气体体积分分数增加而愈发明显。N₂ 的辐射作用导致可燃下极限轻微增大, 但该作用最大仅占总影响的 14.3%。Ar 的热力学作用始终提供主要影响, 该作用使可燃下极限明显降低, 最大时占总影响的 71.7%, 而其辐射作用导致可燃下极限轻微增大。CO₂ 的热力学作用同样存在最突出的影响, 该作用导致了可燃下极限明显增大, 在 $\phi_{\text{dil}}=80\%$ 处, 其影响达到总影响的 52.7%。当 CO₂ 体积分分数为 10%~70% 时, 化学作用产生的影响弱于稀释作用, 但在 $\phi_{\text{dil}}=80\%$ 处, 化学作用的影响值得注意, 达到总影响的 18.8%。

在可燃上极限处(图 12b),稀释作用始终是最主要的影响,大幅降低了可燃上极限.原因是在可燃上极限处,燃料充足而氧化剂相对缺乏,此时的低氧化剂浓度对惰性气体的加入十分敏感,故可燃上极限明显降低.3种惰性气体氛围下,该作用在总影响中最高分别占比 99.2%, 92.7%和 93.1%.对于 Ar 和 CO₂,热力学作用的影响仅次于稀释作用.Ar 的热力学作用使可燃上极限小幅增大, $\varphi_{\text{dil}}=50\%$ 时,其在总影响中的占比最高,达到 7.1%.而 CO₂的热力学作用导致可燃上极限降低,其占比最大的位置出现在 $\varphi_{\text{dil}}=60\%$ 处,达到总影响的 8.5%.

3 结 论

1) 实验结果表明,惰性气体对可燃下极限影响较小,N₂的加入使其从 2.85%降至 2.00%,Ar 仅使其从 2.95%降至 2.80%,而 CO₂的加入使可燃上极限从 3.40%增至 4.65%.相比之下,可燃上极限受惰性气影响更明显,N₂,Ar 和 CO₂均使其降低,随着 φ_{dil} 从 10%增至 80%,C₂H₆可燃上极限分别降低 40.0%, 39.0%和 43.5%,其中 CO₂影响最为突出.

2) N₂对于 C₂H₆可燃极限的影响主要来自稀释作用,该影响导致可燃下极限减小和可燃上极限增大,除稀释作用外,N₂仅存在辐射作用所产生的微弱影响.

3) Ar 对于可燃下极限的影响主要来自热力学作用,它导致 C₂H₆可燃下极限降低,其次为稀释作用,辐射和化学作用存在微弱影响.在可燃上极限处,稀释作用产生的影响最为突出.

4) 对于可燃下极限,CO₂的热力学、化学和辐射作用均使其增大,且热力学的影响最为明显,而稀释作用导致可燃下极限减小.对于可燃上极限,CO₂的 4 种作用均导致其减小.

参考文献:

- [1] Wang T, Zhou Y, Luo Z M, et al. Flammability limit behavior of methane with the addition of gaseous fuel at various relative humidities [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 140: 178-189.
- [2] Leo Y, Zhang B, Dai T K, et al. Influence of pressure and dilution gas on the explosion behavior of methane-oxygen mixtures[J]. *Fuel*, 2023, 333: 126390.
- [3] Xie Y, Zhang Y Q, Zhuang C J, et al. Experimental study on flammability limits behavior of methane, ethane, and propane with dilution of nitrogen[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(31): 28758-28768.
- [4] Zhang B, Xiu G L, Bai C H. Explosion characteristics of argon/nitrogen diluted natural gas-air mixtures [J]. *Fuel*, 2014, 124: 125-132.
- [5] Abdelkhalik A, Askar E, Markus D, et al. Explosion regions of 1,3-dioxolane/nitrous oxide and 1,3-dioxolane/air with different inert gases - experimental data and numerical modelling[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 71: 104496.
- [6] Le Chatelier H, Boudouard O. On the flammable limits of gas mixtures[J]. *Process Safety Progress*, 2005, 24(1): 3-5.
- [7] Kondo S, Takizawa K, Takahashi A, et al. Extended Le Chatelier's formula for carbon dioxide dilution effect on flammability limits [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 138(1): 1-8.
- [8] Ma T G. A thermal theory for estimating the flammability limits of a mixture[J]. *Fire Safety Journal*, 2011, 46(8): 558-567.
- [9] Pio G, Salzano E. Evaluation of safety parameters of light alkenes by means of detailed kinetic models [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 119: 131-137.
- [10] Davis S G, Law C K, Wang H. Propene pyrolysis and oxidation kinetics in a flow reactor and laminar flames[J]. *Combustion & Flame*, 1999, 119(4): 375-399.