

C₂H₂/CH₄ 燃烧特性实验及反应动力学研究

刘宇¹, 罗蒙蒙¹, 田富超², 谷午¹, 王凯¹, 梁运涛²

(1. 沈阳航空航天大学辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136;

2. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司煤矿安全技术国家重点实验室, 抚顺 113122)

摘要: 随着煤矿开采深度的增加, 极易出现瓦斯与煤自燃灾害交织共生现象, 增大灾害风险。为阐明煤与瓦斯共生灾害发生时的火焰传播特性, 有必要开展煤自燃气体掺混对瓦斯燃烧特性的影响研究。乙炔气体(C₂H₂)是煤高温氧化时产生的主要气体之一, 甲烷(CH₄)是瓦斯的主要成分, 本文研究了 0~2%体积分数 C₂H₂ 掺混对 CH₄ 层流燃烧速度的影响规律。结果表明, 随着 C₂H₂ 体积分数的增加, C₂H₂/CH₄ 混合燃料层流燃烧速度增大。层流燃烧速度受质热扩散作用、动力学和热力学效应的综合影响, 当 C₂H₂ 体积分数增加至 2%时, 混合燃料的 $(\alpha Le)^{1/2}$ 、 T_{ad} 分别增加了 1.54%、2.98%, T_a 减少了 26.93%, 说明动力学效应是 C₂H₂ 促进 CH₄ 层流燃烧速度增加的主导因素。由活性自由基体积分数分析可知, 随着 C₂H₂ 体积分数的增加, H、O、OH 和 CH₃ 等活性自由基体积分数均出现增加趋势, 从而促进了 CH₄ 的燃烧。

关键词: C₂H₂/CH₄ 混合燃料; 层流燃烧速度; 动力学效应; 敏感性分析; 活性自由基

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2024)05-0473-08

Combustion Characteristics Experiment and Reaction Kinetics of C₂H₂/CH₄

Liu Yu¹, Luo Mengmeng¹, Tian Fuchao², Gu Wu¹, Wang Kai¹, Liang Yuntao²

(1. Liaoning Key Laboratory of Advanced Test Technology for Aerospace Propulsion System,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, China Coal Technology & Engineering Group
Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China)

Abstract: With the increase of mining depth of coal mine, gas and coal spontaneous combustion is very easy to occur simultaneously, which increases the risk of disaster. To illustrate the flame propagation characteristics during the occurrence of coal and gas outburst disasters, it is necessary to study the influence of coal spontaneous combustion gases(CSCG) addition on the gas combustion characteristics. Acetylene(C₂H₂) is one of the main gases generated during high-temperature oxidation of coal, and methane(CH₄) is the main component of gas. This work investigates the influence of 0—2%(in vol.) C₂H₂ addition on the laminar burning velocity(LBV) of CH₄. The results show that as the volume fraction of C₂H₂ increases, the LBV of C₂H₂/CH₄ mixed fuel increases. The LBV is affected by mass-thermal diffusion, kinetics and thermodynamic effects. When the volume fraction of C₂H₂ increases to 2%, $(\alpha Le)^{1/2}$ and T_{ad} increase by 1.54% and 2.98%, respectively, and T_a decreases by 26.93%. The kinetics effect is the dominant factor for C₂H₂ to promote the LBV of CH₄ premixed flame. According to the active radical concentration analysis, with the increase of the volume fraction of C₂H₂, the concentration of all the H,

收稿日期: 2023-11-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174229, 52174230); 辽宁省自然科学基金资助项目(2022-KF-13-01, 2023-MS-355).

作者简介: 刘宇(1983—), 男, 博士, 副教授, liuyu_201409@163.com.

通信作者: 梁运涛, 男, 博士, 研究员, liangyuntao@vip.sina.com.

O, OH and CH₃ active radicals appear to increase, which promotes CH₄ combustion process.

Keywords: C₂H₂/CH₄ mixed fuel; laminar burning velocity (LBV); kinetics effect; sensitivity analysis; active radicals

瓦斯爆炸是煤矿中最严重的灾害,据统计,从2011到2016年,我国煤矿发生的特大瓦斯气体爆炸事故达到20余起,死亡人数逾450人^[1-2]。近年来,随着煤矿开采深度的增加,煤层瓦斯含量、温度、压力不断增高,大量浅部低瓦斯矿井升级为高瓦斯矿井甚至是煤与瓦斯突出矿井,极易导致瓦斯与煤自燃灾害交织共生,增大灾害风险^[3]。

煤自燃过程中产生的可燃性气体主要为CH₄、CO、C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂等^[4]。相关研究指出,当这些可燃气体混入瓦斯气体中,将导致瓦斯爆炸极限、着火延迟时间、火焰传播速度等关键参数发生变化^[5-6]。霍小泉等^[7]向20L球型爆炸装置中注入9.5%CH₄与0~4%CO混合气体,随着CO体积分数增大混合气体爆炸压力先增大后减小,CO体积分数为2%时爆炸压力最大。针对煤矿火区封闭过程中常发生的瓦斯爆炸问题,汪腾蛟等^[8]运用20L球型爆炸装置,实验研究了不同环境温度(25~200℃)和CO体积分数(1%~10%)条件下瓦斯的爆炸极限和最大爆炸压力。李海涛等^[9]将CO和C₂H₄作为煤氧化和高温热解过程中产生的自燃指标气体,与CH₄一起构成采空区多元瓦斯气体的重要组成部分,研究它们与CH₄组成的多元瓦斯气体的爆炸极限特性。陈晓坤等^[10]采用近球型气体爆炸反应罐测试了在空气中C₂H₆对CH₄爆炸极限参数的影响。罗振敏等^[11-13]采用标准的可燃气体爆炸极限测试装置,分析了含有不同体积分数C₂H₄时,CH₄在空气中的爆炸极限,并结合反应动力学来分析C₂H₄对CH₄爆炸反应历程的影响。除了C₂H₄之外,罗振敏等又进一步测定了不同配比C₂H₆/C₃H₈与CH₄混合后的爆炸极限,研究C₂H₆/C₃H₈对CH₄爆炸极限参数及动力学特性的影响。结合气体爆炸极限试验装置,确定NH₃影响近上限体积分数CH₄的可燃极限、爆炸危险性及火焰特性参数。Chen等^[14]通过对贫燃条件下(当量比0.6~0.8)的CH₄/CO/空气火焰结构进行数值模拟,研究燃料中CO添加量对火焰传播速度的影响。研究表明,随着燃料中CO添加量的不断增加,火焰传播速度有所下降。汤成龙等^[15]利用高速纹影摄像法在定容燃烧弹内研究了不同初始压力、初始温度、当量比和CH₄含量条件下CH₄/C₂H₆/空气预混层流燃烧特性,得到了马克斯丹常数和层流火焰燃烧速率等数据,并

进行了化学特性分析。然而,从现有研究来看,对瓦斯与煤自燃产生的可燃气两者形成的混合燃料(以下简称多元瓦斯)着火延迟时间和火焰传播速度的研究还十分有限,由于缺少对多元瓦斯着火及燃烧反应机理的认识,给共生灾害事故的防治带来诸多不确定性,因此,急需开展相关工作。

已有研究指出,当煤层温度升高到220℃后,煤自燃氧化变得激烈,在剧烈氧化作用下煤内部的芳环结构被分解产生大量烃类气体,出现大量C₂H₂气体,且体积分数随温度升高而变大^[16]。C₂H₂作为高阶碳氢燃料高温分解过程中产生的中间产物,在碳氢燃料燃烧过程中起着重要作用,基于此,本研究拟开展C₂H₂/CH₄混合燃料的燃烧特性研究,获得层流燃烧速度特性参数,并从化学反应动力学角度分析C₂H₂气体掺入CH₄后,对CH₄燃烧特性的影响。

1 研究方法

1.1 燃烧反应机理验证

CH₄是瓦斯的主要成分,本文采用化学反应动力学软件CHEMKIN-PRO计算C₂H₂/CH₄混合燃料的层流燃烧速度。在众多CH₄详细燃烧反应动力学机理中,目前广泛使用的是GRI-Mech 3.0,包括化学反应机理文件、各组分热物性参数和输运参数3个部分^[17],因此,本文选择了GRI-Mech 3.0机理。为了验证该机理的可行性,本研究首先在定容燃烧试验装置(图1)中完成了初始温度303 K、373 K和443 K,初始压力0.1 MPa、0.2 MPa,当量比0.7~1.4范围内CH₄层流燃烧特性试验,完成了初始温度300 K,初始压力0.1 MPa,当量比 ϕ 在0.7~1.4范围内C₂H₂/CH₄混合燃料层流燃烧特性试验,获得层流燃烧速度。同时,采用机理计算了相同工况下CH₄和C₂H₂/CH₄预混火焰层流燃烧速度,并将实验值与计算值进行对比,如图2和图3所示,实验值与计算值吻合良好,说明GRI-Mech 3.0机理能够准确预测C₂H₂/CH₄混合燃料的层流燃烧速度。

1.2 混合燃料层流燃烧速度

为了接近真实情况的煤自燃气体与瓦斯浓度比,本研究设定初始CH₄体积分数为9.5%,向CH₄中掺混体积分数0~2% C₂H₂。使用GRI-Mech 3.0机理获

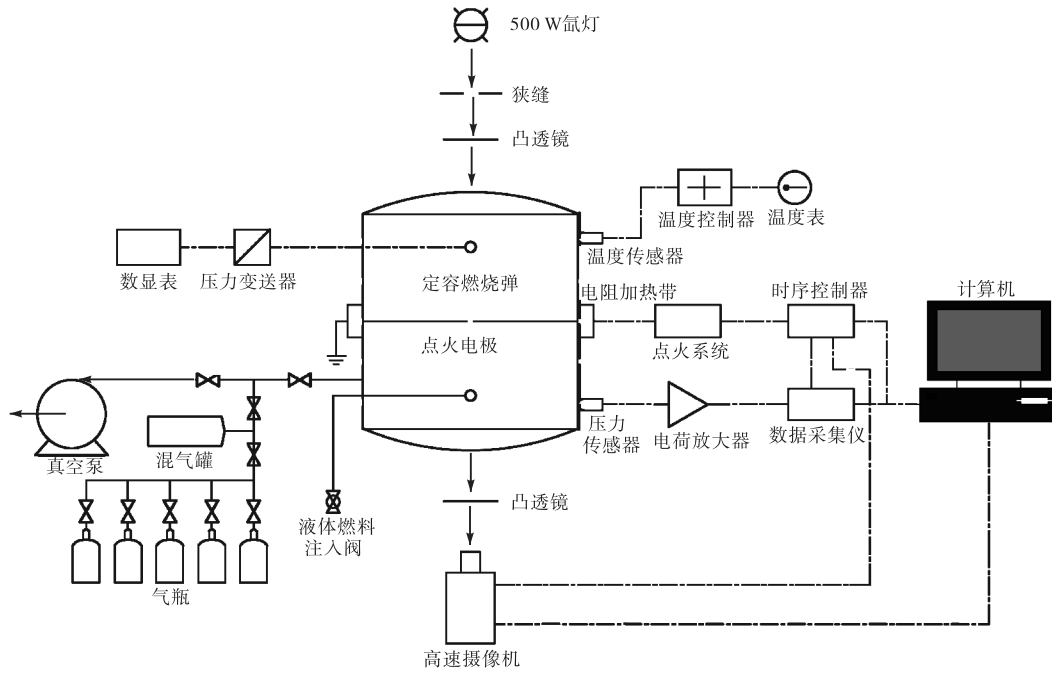


图1 定容燃烧反应装置示意

Fig.1 Schematic experimental setup of constant volume combustion

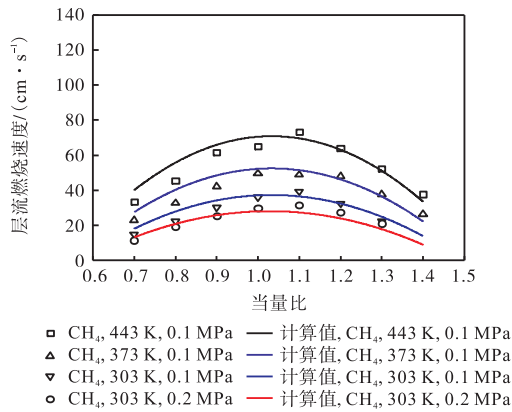


图2 CH₄的层流燃烧速度

Fig.2 Laminar burning velocity of CH₄

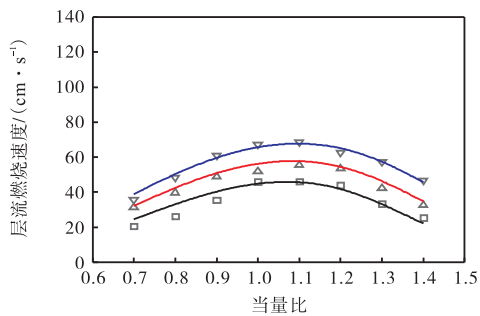


图3 C₂H₂/CH₄混合燃料的层流燃烧速度

Fig.3 Laminar burning velocity of C₂H₂/CH₄ mixed fuel

得初始温度 450 K、初始压力 0.1 MPa 以及当量比 0.7 ~ 1.4 工况下 C₂H₂/CH₄ 混合燃料的层流燃烧速度,结果如图 4 所示。

如图 4 所示,不同 C₂H₂ 体积分数混合燃料的层流燃烧速度均随当量比增加呈现先增加后减小的趋势,而在同一当量比工况,随着 C₂H₂ 体积分数的增加, C₂H₂/CH₄ 混合燃料层流燃烧速度增加,说明 C₂H₂ 掺混促进了 CH₄ 火焰传播. 众所周知,燃烧速度增加意味着燃料能够更快地燃烧,燃烧反应区(火焰锋面)向外快速移动,单位时间内放热量增加. 在封闭环境中,燃烧速度增加会导致温度和压力急剧升高,因此,增加了爆炸的危险性。

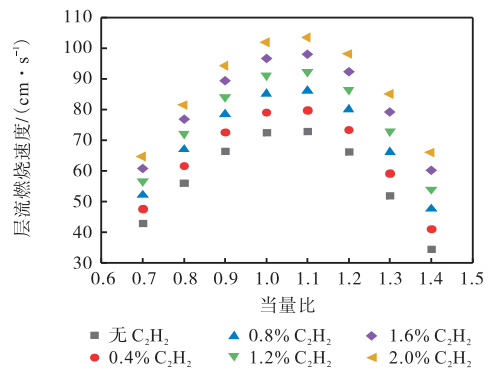


图4 0~2% C₂H₂/CH₄混合燃料的层流燃烧速度

Fig.4 Laminar burning velocity of C₂H₂/CH₄ mixture (0—2%)

2 结果与分析

2.1 层流燃烧速度影响因素

由燃烧理论^[18-20]可知,火焰传播速度正比于 $(\alpha Le)^{1/2} \exp(-T_a / 2T_{ad})$. 其中 α 为热扩散系数, Le 为

路易斯数, T_a 为活化温度, T_{ad} 为绝热火焰温度. 式中 $(\alpha Le)^{1/2}$ 代表质热扩散作用对火焰传播速度的影响, T_a 和 T_{ad} 分别代表动力学、热力学因素的影响, $\exp(-T_a/2T_{ad})$ 代表了热力学和动力学因素的综合影响, 称作阿伦尼乌斯因子.

采用 $Le = \alpha/D_m = \lambda/\rho c_p D_m$ 公式获得路易斯数, 其中 λ 、 ρ 、 c_p 分别为未燃混合燃料的导热系数、密度和比热, D_m 为不足反应物和缓冲气体的二元气体扩散系数. 当量比小于 1 时, 燃料为不足反应物, 此时采用的扩散系数为燃料对 N_2 的二元系数; 当量比大于 1 时, O_2 为不足反应物, 此时采用的扩散系数为 O_2 对 N_2 的二元系数. 由于本文所用燃料为 CH_4 和 C_2H_2 混合燃料, 将采用体积算法获得混合燃料的

有效路易斯数^[21-23].

$$Le_{eff} = x_{CH_4} Le_{CH_4} + x_{C_2H_2} Le_{C_2H_2} \quad (1)$$

式中: x_{CH_4} 和 $x_{C_2H_2}$ 分别是混合燃料中 CH_4 和 C_2H_2 的摩尔分数; Le_{CH_4} 和 $Le_{C_2H_2}$ 分别是 CH_4 和 C_2H_2 的路易斯数.

活化温度 T_a 可进一步表示为 $T_a = E_a/R$, 这里的 R 是气体常数, E_a 是燃料的活化能, 可由公式 (2) 获得^[24-25]

$$E_a = -2R[\partial(\ln \rho_u u_1)/\partial(1/T_{ad})] \quad (2)$$

式中: ρ_u 是未燃混合气密度; u_1 是混合燃料层流燃烧速度. 以 0.4% C_2H_2 含量为例, 得到与混合燃料层流燃烧速度相关的参数如表 1 所示.

表 1 C_2H_2/CH_4 混合燃料层流燃烧速度及其影响参数 ($p=0.1$ MPa, $T=450$ K)

Tab.1 C_2H_2/CH_4 mixed fuel laminar burning velocity and influencing parameters ($p=0.1$ MPa, $T=450$ K)

$R_{C_2H_2}$	ϕ	$\lambda/(10^{-3} J \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1})$	$\rho_u/(kg \cdot m^{-3})$	$u/(cm \cdot s^{-1})$	$c_p/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$\alpha/(cm^2 \cdot s^{-1})$	Le	$E_a/(J \cdot mol^{-1})$	T_a/K	T_{ad}/K
0.4	0.7	33.57	0.758 6	47.673 79	1 095.12	0.404 03407	0.913 4	182 785	21 983	1 964
	0.8	33.69	0.755 5	61.712 65	1 104.15	0.403 87777	0.913 1	158 077	19 012	2 115
	0.9	33.82	0.752 6	72.629 72	1 113.05	0.403 68792	0.912 6	244 198	29 370	2 239
	1.0	33.94	0.749 7	79.061 63	1 121.87	0.403 55449	0.912 3	215 841	25 959	2 315
	1.1	34.07	0.746 9	79.743 23	1 130.61	0.403 42238	0.912 0	208 705	25 101	2 318
	1.2	34.19	0.744 1	73.40 8 76	1 139.26	0.403 34419	0.911 9	182 790	21 984	2 262
	1.3	34.32	0.741 3	59.254 16	1 147.79	0.403 33363	0.911 8	198 159	23 833	2 189
	1.4	34.44	0.738 7	41.149 99	1 156.23	0.403 26565	0.911 7	257 089	30 920	2 116

计算 C_2H_2 体积分数为 0~2% 相关参数并绘制成图. 如图 5(a) 所示, 随着混合燃料中 C_2H_2 含量的增加, $(\alpha Le)^{1/2}$ 增加, 说明质热扩散作用对层流燃烧速度的影响增强, 且在当量比 0.7 时, 增加的最快, 当量比 1.4 时增加最慢, 说明质热扩散作用在低当量比工况下影响更为显著. 如图 5(b) 所示, 随着混合燃料中 C_2H_2 含量的增加, T_a 总体呈现减小的趋势, 说明 C_2H_2 增加使进行燃烧反应所需克服的活化能减小, 反应更容易进行, C_2H_2 体积分数的增加促进了化学反应的进程. 绝热火焰温度也是影响层流燃烧速度的重要因素, 如图 5(c) 所示, 随着混合燃料中 C_2H_2 体积分数的增加, T_{ad} 略有增大, 层流燃烧速度也相应增加. 如图 5(d) 所示, $\exp(-T_a/2T_{ad})$ 代表热效应和动力学效应的综合效应, 随着 C_2H_2 体积分数的增加, 其值显著增大. 由以上分析可知, C_2H_2 含量的增加对层流燃烧速度的促进作用是质热扩散作用、动力学和热力学效应的综合表现. 在当量比 1.0 工况下, C_2H_2 含量由 0 增加至 2% 时, $(\alpha Le)^{1/2}$ 、 T_a 和 T_{ad} 分别增加或减小了 1.54%、26.93% 和 2.98%, $\exp(-T_a/2T_{ad})$ 增加

了 405.03%. 由此可见, 活化温度 T_a 减小幅度最大, 导致阿伦尼乌斯因子显著增加, 因此, 可认为 C_2H_2 掺混对燃烧过程的动力学影响是促进混合燃料层流燃烧速度增加的主导因素.

2.2 层流燃烧速度的反应动力学分析

为了解释化学反应动力学效应对混合燃料层流燃烧速度的影响, 本研究采用 CHEMKIN-PRO 软件对混合燃料质量燃烧流率进行敏感性分析, 并对燃烧过程中重要的基元反应进行了分析. 图 6 是对初始温度 450 K、初始压力 0.1 MPa、当量比 1.0 工况下 C_2H_2/CH_4 混合燃料质量燃烧流率的敏感性分析的结果(工况 1~6 分别对应 C_2H_2 体积分数 0、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%). 图中显示 8 个具有最大正敏感性系数和 8 个具有最小负敏感性系数的基元反应. 敏感性系数为正值的 8 个基元反应中, 随着 C_2H_2 体积分数的增加, 反应(R38)的敏感性系数明显减小, 反应(R166)、(R119)和(R284)的敏感性系数略有减小, 而反应(R99)、(R167)和(R290)的敏感性系数略有增大, 表明反应(R52)、(R38)、(R166)、

(R119) 和 (R284) 对层流燃烧速度的促进作用减弱, 而反应 (R99)、(R167) 和 (R290) 的促进作用增强. 其中, 反应 (R97) 的敏感性系数随 C₂H₂ 体积分数的增加保持不变. 在敏感性系数为负值的基元反应中, 随着 C₂H₂ 体积分数的增加, 反应 (R52) 的敏感性系数的绝对值显著减小, 反应 (R35)、(R158) 的敏感性系

数的绝对值略有减小, 表明反应 (R52)、(R35) 和 (R158) 对层流燃烧速度的抑制作用减小, 而其余反应敏感性系数基本保持不变.

由敏感性分析可知, 链终止反应 (R52): $H + CH_3 (+M) \rightleftharpoons CH_4 (+M)$ 的负敏感系数最大, 对燃烧反应的抑制作用最显著. 这是因为 R52 消耗了 H 活性自由基生成了 CH₄, 降低了反应中 H 活性自由基的浓度. 链分支反应 (R38): $H + O_2 \rightleftharpoons O + OH$ 的正敏感系数最大, 对燃烧反应的促进作用最显著. R38 是生成 O 活性自由基和 OH 活性自由基的关键反应步, 提高了 O 活性自由基和 OH 活性自由基的浓度. 由图可知, 随着 C₂H₂ 含量的增加, 这两个基元反应的敏感系数的绝对值都相应减小, 由此判断, C₂H₂ 含量增加对燃烧速度的促进作用取决于这些主要基元反应敏感系数的变化.

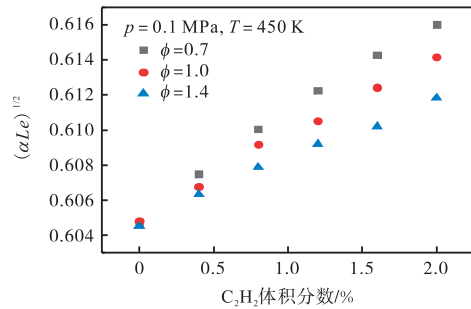
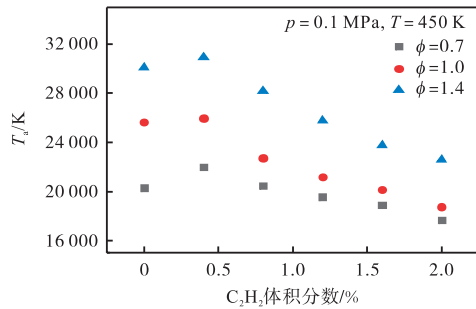
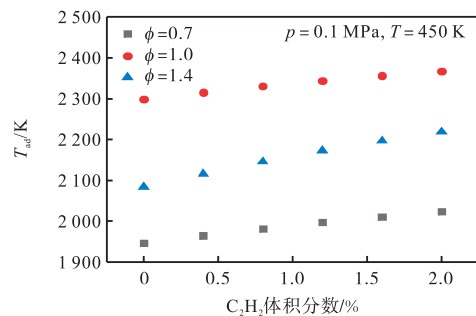
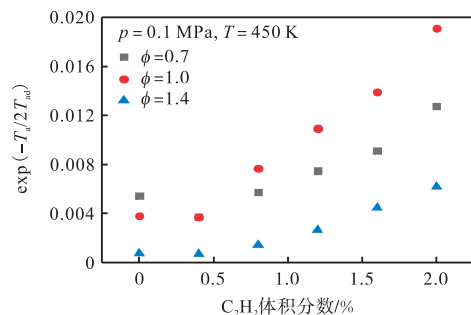
(a) $(\alpha Le)^{1/2}$ (b) T_a (c) T_{ad} (d) $\exp(-T_a/2T_{ad})$

图5 C₂H₂ 体积分数对 $(\alpha Le)^{1/2}$ 、 T_a 、 T_{ad} 、 $\exp(-T_a/2T_{ad})$ 的影响

Fig.5 The influence of C₂H₂ volume fraction on $(\alpha Le)^{1/2}$ 、 T_a 、 T_{ad} 、 $\exp(-T_a/2T_{ad})$

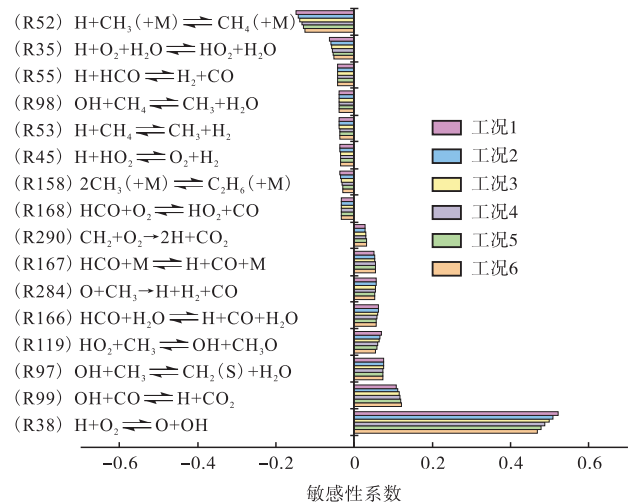


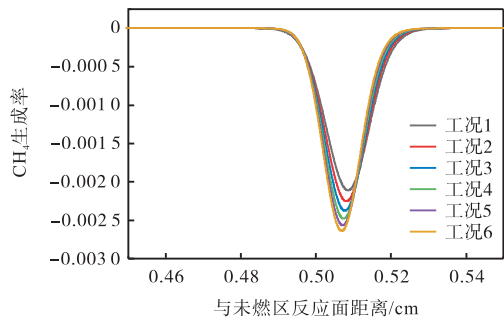
图6 C₂H₂/CH₄ 混合燃料质量燃烧流率的敏感性分析
Fig.6 Sensitivity analysis of mass flow rate of C₂H₂/CH₄ mixed fuel

为了详细说明 C₂H₂ 添加后对 CH₄ 消耗速率的影响, 图 7 给出了 CH₄ 生成率分析 (初始温度 450 K, 初始压力 0.1 MPa). 如图 7(a) 所示, 随着 C₂H₂ 添加量增加, CH₄ 消耗速率提高, 峰值提前, 这说明了 C₂H₂ 不仅促进了 CH₄ 消耗, 而且使反应进程提前, 从而提升了混合燃料的层流燃烧速度.

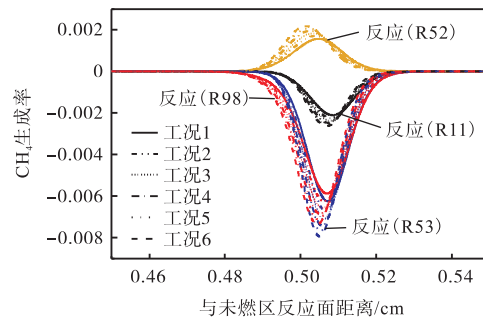
由燃烧理论可知, 自由基是链分支、链传递和链终止反应的主要参与者. 自由基直接参与基元反应而将燃料逐步转化为最终产物, 因而自由基在燃烧化学反应中起着非常重要的作用. 图 7(b) 给出了对 CH₄ 生成速率影响最大的 4 个基元反应, 从图中可以看出, CH₄ 主要的消耗反应 (R11 $CH_4 + O \rightleftharpoons OH + CH_3$)、(R53 $CH_4 + H \rightleftharpoons CH_3 + H_2$)、(R98 $CH_4 + OH \rightleftharpoons CH_3 + H_2O$) 是 CH₄ 与 O、H 和 OH 反应生成

CH₃, 主要生成反应 (R52 $H + CH_3(+M) \rightleftharpoons CH_4(+M)$) 是 CH₃ 活性自由基与 H 活性自由基生成 CH₄. H、O、OH 和 CH₃ 是燃烧中的主要活性自由基, 因此, 接下来对这 4 种活性自由基摩尔分数进行分析.

图 8 为初始温度 450 K、初始压力 0.1 MPa、当量比 1.0 工况下, 随着 C₂H₂ 体积分数变化, 燃烧过程中 H、O、OH 和 CH₃ 活性自由基摩尔分数的变化趋势.



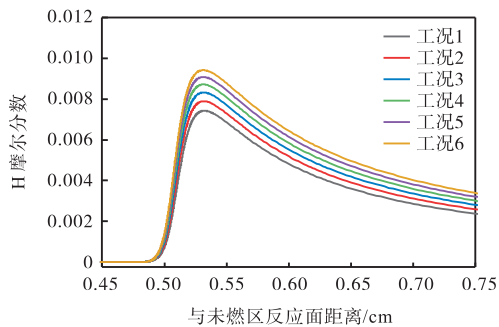
(a) CH₄ 总生成率



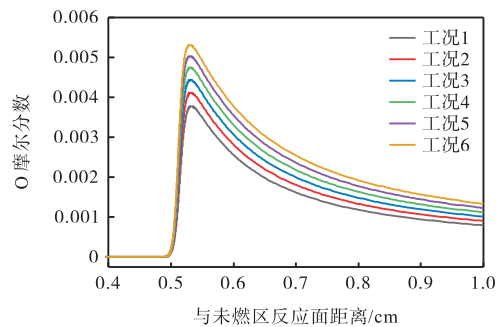
(b) 与 CH₄ 生成率相关的重要基元反应

图 7 CH₄ 生成率分析

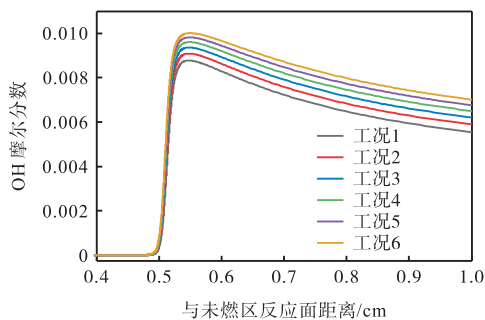
Fig.7 Rate of production analysis of CH₄



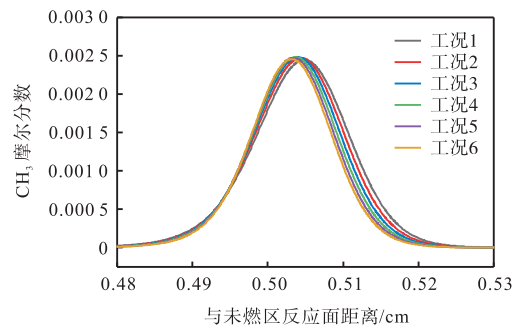
(a) H 自由基



(b) O 自由基



(c) OH 自由基



(d) CH₃ 自由基

图 8 H、O、OH 和 CH₃ 活性自由基摩尔分数

Fig.8 Concentration of H, O, OH and CH₃ active radicals

3 结论

C₂H₂ 是煤高温自燃氧化时产生的气体, 为研究煤自燃与瓦斯爆炸共生致灾机理, 本文研究了

由图可知, 活性自由基摩尔分数的数量级在 10⁻⁴ ~ 10⁻³ 之间. 随着 C₂H₂ 体积分数的增加, 火焰中 H、O 和 OH 活性自由基摩尔分数峰值均出现不同程度的增加, 这些自由基的增加促进了 CH₄ 的消耗, 导致层流燃烧速度增加, 其中, 虽然 CH₃ 活性自由基摩尔分数峰值无明显变化, 但是峰值出现的位置随着 C₂H₂ 体积分数的增加有所前移, 这也一定程度地促进了反应的进行.

C₂H₂/CH₄ 混合燃料层流燃烧特性, 分析了煤自燃氧化产生的气体 C₂H₂ 混入瓦斯后, 对瓦斯燃烧过程的促进作用, 得到结论如下:

(1) 不同体积分数 C₂H₂ 混合燃料的层流燃烧速度均随当量比增加呈现先增加后减小的趋势. 在同

一当量比工况下,随着 C₂H₂ 体积分数的增加, C₂H₂/CH₄ 混合燃料层流燃烧速度增加。

(2) C₂H₂ 含量的增加对层流燃烧速度的促进作用是质热扩散作用、动力学和热力学效应的综合表现。在当量比 1.0 工况下, C₂H₂ 含量由 0 增加至 2% 时,活化温度 T_a 减小了 26.93%, 动力学效应对层流燃烧速度影响最为显著。

(3) 通过质量燃烧流率敏感性分析发现, 反应 (R52): $H + CH_3 (+ M) \rightleftharpoons CH_4 (+ M)$ 是抑制燃烧的最主要反应, 而反应 (R38): $H + O_2 \rightleftharpoons O + OH$ 是促进燃烧的最主要反应。随着 C₂H₂ 体积分数的增加, H、O、OH 等活性自由基浓度显著增加, 促进了燃烧反应的进行。

参考文献:

- [1] 张津嘉, 许开立, 王贝贝, 等. 特别重大煤矿瓦斯爆炸事故致因分析及管理模式研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(2): 73-78.
Zhang Jinjia, Xu Kaili, Wang Beibei, et al. Analysis of causes and management models of particularly serious coal mine gas explosion accidents [J]. *Chinese Journal of Safety Sciences*, 2016, 26(2): 73-78 (in Chinese).
- [2] 熊廷伟. 煤矿瓦斯爆炸事故分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2020, 13: 112-113.
Xiong Tingwei. Analysis of coal mine gas explosion accident [J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2020, 13: 112-113 (in Chinese).
- [3] 陆江, 徐晓萌, 赵文文, 等. 多点测温法在煤自燃动力学分析中的应用研究[J]. 燃烧科学与技术, 2023, 29(6): 706-712.
Lu Jiang, Xu Xiaomeng, Zhao Wenwen, et al. Application of multi-point temperature measurement method in dynamic analysis of coal spontaneous combustion [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(6): 706-712 (in Chinese).
- [4] 赵晓虎, 孙鹏帅, 杨眷, 等. 应用于煤自燃指标气体体积分数在线监测系统[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 319-327.
Zhao Xiaohu, Sun Pengshuai, Yang Juan, et al. Applied to the online monitoring system of coal spontaneous combustion index gas concentration [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 319-327 (in Chinese).
- [5] 邹远龙, 周月桂, 李澜波, 等. CO₂ 和 H₂O 气氛下甲烷 MILD 富氧燃烧 NO 和 CO 生成机理[J]. 燃烧科学与技术, 2022, 28(3): 239-246.
Zou Yuanlong, Zhou Yuegui, Li Lanbo, et al. NO and CO formation mechanisms for methane MILD-oxyfuel combustion under CO₂ and H₂O atmospheres [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2022, 28(3): 239-246 (in Chinese).
- [6] 孙国军, 付忠广, 卢茂奇. 二甲醚、氨气和甲烷混合燃料的层流预混火焰口口损特性研究[J]. 燃烧科学与技术, 2022, 28(3): 271-282.
Sun Guojun, Fu Zhongguang, Lu Maoqi. Analysis of exergy losses in laminar premixed flames of dimethyl ether, ammonia and methane blends [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2022, 28(3): 271-282 (in Chinese).
- [7] 霍小泉, 寇义民, 闫振国, 等. CO 对瓦斯爆炸反应影响机理研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 77-82.
Huo Xiaoquan, Kou Yimin, Yan Zhenguo, et al. Study on the effect mechanism of CO on gas explosion reaction [J]. *Industrial and Mining Automation*, 2022, 48(2): 77-82 (in Chinese).
- [8] 汪腾蛟, 周西华, 白刚, 等. 煤矿火灾诱发瓦斯爆炸危险性预测[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4104-4110.
Wang Tengjiao, Zhou Xihua, Bai Gang, et al. Prediction of the risk of gas explosion induced by coal mine fire [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(12): 4104-4110 (in Chinese).
- [9] 李海涛, 陈晓坤, 邓军, 等. 开放管道内煤粉云形成机制及爆炸过程火焰动态行为数值模拟[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2600-2613.
Li Haitao, Chen Xiaokun, Deng Jun, et al. Numerical simulation of formation mechanism of pulverized coal cloud in open pipeline and dynamic behavior of flame during explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2600-2613 (in Chinese).
- [10] 陈晓坤, 张娥. 可燃性气体对 CH₄ 爆炸特性影响的实验研究[J]. 煤矿安全, 2009, 40(10): 7-10.
Chen Xiaokun, Zhang E. Experimental research on the influence of flammable gas on the explosive characteristics of CH₄ [J]. *Coal Mine Safety*, 2009, 40(10): 7-10 (in Chinese).
- [11] 罗振敏, 李逵, 毛文龙, 等. 少量乙烯对甲烷爆炸危险性 & 反应历程的影响[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(1): 17-25.
Luo Zhenmin, Li Kui, Mao Wenlong, et al. Influence of a small amount of ethylene on the explosion hazard and reaction process of methane [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 38(1): 17-25 (in Chinese).

- [12] 罗振敏, 苏彬, 王涛, 等. C_2H_6/C_3H_8 影响 CH_4 爆炸极限参数及动力学特性研究[J]. 化工学报, 2019, 70(9): 3601-3610.
Luo Zhenmin, Su Bin, Wang Tao, et al. Influence of C_2H_6 / C_3H_8 on explosion limit parameters and dynamic characteristics of CH_4 [J]. *Journal of Chemical Industry*, 2019, 70(9): 3601-3610(in Chinese).
- [13] 罗振敏, 石静, 王涛, 等. NH_3 影响 CH_4 爆炸特性及反应动力学研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(9): 51-58.
Luo Zhenmin, Shi Jing, Wang Tao, et al. Study on the explosion characteristics and reaction kinetics of NH_3 influence CH_4 [J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(9): 51-58(in Chinese).
- [14] Chen Wenting, Jiang Yong, Qiu Rong. Effects of CO addition on the lean premixed CH_4 /air flame[J]. *Acta Physicochemical Sinica*, 2010, 26(6): 1481-1487.
- [15] 汤成龙, 张旭辉, 司占博, 等. 甲烷/乙烷-空气预混层流燃烧特性试验和数值模拟研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(1): 83-88.
Tang Chenglong, Zhang Xuhui, Si Zhanbo, et al. Experimental and numerical simulation research on combustion characteristics of methane/ethane-air premixed laminar flow[J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2016, 37(1): 83-88(in Chinese).
- [16] 顾周杰, 刘贞堂, 刘浩雄, 等. 煤自燃气体特征及其对瓦斯爆炸下限影响实验研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(11): 59-64.
Gu Zhoujie, Liu Zhentang, Liu Haoxiong, et al. Experimental research on the characteristics of coal spontaneous combustion gas and its influence on the lower limit of gas explosion [J]. *Industrial and Mining Automation*, 2019, 45(11): 59-64(in Chinese).
- [17] 马承飏, 林其钊. 利用敏感性分析方法简化的贫燃甲烷氧化反应机理[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(2): 164-170.
Ma Chengbiao, Lin Qizhao. Simplified lean-burn methane oxidation reaction mechanism using sensitivity analysis method[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(2): 164-170(in Chinese).
- [18] Yu Huibin, Hu Erjiang, Cheng Yu, et al. Effects of hydrogen addition on the laminar flame speed and Markstein length of premixed dimethyleter-air flames[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(7): 4567-4575.
- [19] Tang Chenglong, Huang Zuohua, Law C K. Determination, correlation, and mechanistic interpretation of effects of hydrogen addition on laminar flame speeds of hydrocarbon-air mixtures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 921-928.
- [20] Wu Fujia, Andrew P Kelley, Tang Chenglong. et al, Measurement and correlation of laminar flame speeds of CO and C2 hydrocarbons with hydrogen addition at atmospheric and elevated pressures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(20): 13171-13180.
- [21] Bechtold J K, Matalon M. The dependence of the Markstein length on stoichiometry[J]. *Combustion & Flame*, 2001, 127(1/2): 1906-1913.
- [22] Chen Z, Michael P Burke, Ju Yiguang. Effects of Lewis number and ignition energy on the determination of laminar flame speed using propagating spherical flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 1253-1260.
- [23] Cai Xiao, Wang Jinhua, Zhang Weijie, et al. Effects of oxygen enrichment on laminar burning velocities and Markstein lengths of $CH_4/O_2/N_2$ flames at elevated pressures[J]. *Fuel*, 2016, 184(5): 466-473.
- [24] Law C K. *Combustion Physics*[M]. UK: Cambridge University Press, 2010.
- [25] 张尊华, 杜睿恒, 熊晋影, 等. ABE 燃料成分变化对其预混层流燃烧特性的影响[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(3): 109-116.
Zhang Zunhua, Du Ruiheng, Xiong Jinying, et al. Influence of ABE fuel composition variation on combustion characteristics of premixed laminar flow[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2020, 46(3): 109-116(in Chinese).