

CO、H₂ 混合气体对瓦斯爆炸的协同作用机理研究 *

贾宝山^{1,2} 李春苗^{*,1,2} 胡如霞^{1,2} 金 珂^{1,2} 李宗翔^{1,2} 李守国^{1,3}

(1. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 阜新 123000;

2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 阜新 123000;

3. 煤科集团沈阳研究院有限公司煤矿安全技术国家重点实验室, 沈阳 113112)

摘 要:为进一步研究多种可燃性气体对瓦斯爆炸的影响,选取 CO、H₂ 混合气体并改变其构成组分,用 CH₄ 燃烧化学动力学详细机理对其进行数值模拟,详细分析其对瓦斯爆炸的协同作用机理,并分析各组分下反应物浓度的变化趋势及影响瓦斯爆炸的关键链式反应的变化。研究表明:当 CO 浓度远大于 H₂ 浓度时,随着 CO 浓度的增加,瓦斯爆炸反应物浓度变化时间会略有提前,且促进 CH₄ 生成的链式反应敏感性会略微下降,其对瓦斯爆炸的影响不明显,但仍有一定的协同促进作用;当 H₂ 浓度大于 CO 浓度时,随着 H₂ 浓度的增加,瓦斯爆炸反应物浓度变化时间会快速提前,促进 CH₄ 生成的链式反应敏感性会大幅下降,协同促进瓦斯爆炸。

关键词:一氧化碳;氢气;瓦斯爆炸;协同作用;链式反应

中图分类号:TD712

文献标识码:A

doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2016.01.008

Study on Synergistic Effect Mechanism of CO, H₂ Mixed Gas on Methane Explosion *

JIA Baoshan^{1,2} LI Chunmiao^{*,1,2} HU Ruxia^{1,2} JING Ke^{1,2} LI Zongxiang^{1,2} LI Shouguo^{1,3}

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000;

2. Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disaster & Control of Ministry of Education, Fuxin 123000;

3. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Shenyang Research Institute Co., Ltd. of China Coal Technology and Engineering Group, Shenyang 113112)

Abstract: In order to further study the effect of a variety of combustible gases on gas explosion, the detailed mechanisms of the CH₄ combustion chemical kinetics was adopted to make numerical simulation by choosing CO, H₂ mixed gas and changing their components. The mechanisms of synergistic effect on methane explosion was analyzed in detail, and the change trend of reactant concentration of components and the change of key chain reactions influencing gas explosion were also analyzed. The simulated results showed that the change time of reactant concentration about gas explosion was slightly in advance with the increase of CO's concentration when the concentration of CO was greater than that of H₂, and the chain reactions' sensitivity promoting the generation of CH₄ decreased slightly, and its effect on gas explosion was not obvious, but there was still a certain synergy. While the concentration of H₂ was greater than that of CO, the change time of reactant concentration about gas explosion advanced quickly and the chain reactions' sensitivity promoting the generation of CH₄ had fallen dramatically with the increase of H₂'s concentration, and methane explosion was promoted collectively.

Key words: CO; H₂; methane explosion; synergistic effect; chain reaction

1 引言

目前,瓦斯爆炸作为矿井开采的主要生产事故之一,严重威胁着我国的煤矿安全生产^[1]。国内外学者为减少瓦斯爆炸事故的发生做了一系列研究:徐超等^[2]从理论角度对瓦斯爆炸极限及影响因素进行了研究;Thomas 等^[3]的研究表明水雾主要是通过交换传递燃烧产生的热量及质量来抑制瓦斯爆炸

的;江丙友等^[4]通过试验研究了火焰传播速度规律,研究表明火焰瞬时速度随着管道长度的增加呈现逐渐增大的趋势,为采取相应预防措施提供参考;贾宝山等^[5]通过应用 CHEMKIN 软件对受限空间内充入不同比例的 H₂ 进行了数值模拟分析,结果表明其对瓦斯爆炸有促进作用;胡耀元等^[6]通过实验研究了部分可燃性气体对瓦斯爆炸的促进作用。但是针对瓦斯中混合多种气体对瓦斯爆炸的协同作用机理研究还比较少。因此,随着煤矿安全应用理论及技术的进一步完善,致力于多种气体对矿井瓦斯爆炸作用的研究就显得尤为迫切。

2015-07-08 收稿,2015-08-11 接受,2016-02-25 网络发表

* 国家自然科学基金(51174109)资助

** 通讯作者, E-mail:lichunmiao1223@163.com

井下瓦斯混合气体(CH_4 、 CO_2 、 N_2 、 H_2 、 CO 、 H_2S 等)成分复杂多变,其中 H_2 易自燃,即使煤层中含有微量的 H_2 ,也能促进甲烷快速消耗。通过反应动力学模拟研究,可知 H_2 对瓦斯爆炸有促进作用,会对井下作业产生巨大的威胁^[5]。 CO 属于煤层自燃产生的氧化气体,通过对受限空间内充入 CO 并对其反应动力学模拟研究,可知 CO 对瓦斯爆炸有抑制作用^[7]。本文设定多种气体为 CO 、 H_2 ,并采用目前国际最理想的包括 53 种组分及 325 个反应的 GRI Mech3.0 模型来对其进行数值模拟。通过在混合气体中加入不同构成组分的 CO 、 H_2 来分析其对瓦斯爆炸的协同作用,首先分析各种组分下其对反应物浓度变化的影响,然后找出影响瓦斯爆炸的相应链式反应敏感性的变化,以为防止瓦斯爆炸的发生提供相应理论依据。

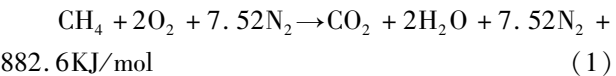
2 瓦斯爆炸条件及反应机理

2.1 瓦斯爆炸条件

煤矿井下发生瓦斯爆炸的三个必要条件为:一是瓦斯浓度必须处于爆炸极限范围内(5% ~ 16%);二是有足够高的温度引爆瓦斯(一般为 650℃ ~ 750℃);三是矿井下空气中的 O_2 浓度必须大于 12%^[8]。

2.2 瓦斯爆炸反应机理

甲烷的燃烧方程式为



根据化学反应方程式(1)可知瓦斯在空气中完全燃烧时的体积分数是 9.5% (即最佳爆炸浓度)。在反应过程中,爆炸混合物会离解出一系列的自由基并循环下去,最终发展为剧烈的氧化反应,此反应是一个极其复杂的链式反应^[9], CO 、 H_2 对此反应具有不同的影响。

2.2.1 CO 对瓦斯爆炸链式反应的影响

在空气—瓦斯混合物中充注惰性气体 CO 参与 CH_4 的链式反应,其会代替原来的部分风流运移瓦斯,这样在氧化反应时就不能产生足够的自由基· CH_3 基、 $\text{H}\cdot$ 基及 $\text{O}\cdot$ 基,而会产生不活泼或者欠活泼的自由基 $\text{C}\cdot$ 基及 $\text{CO}\cdot$ 基等,从而减少反应链的数目,降低反应速率。同时,加入 CO 可以加强瓦斯爆炸反应机理的三体反应,如: $\text{O} + \text{CO} (+\text{M}) \rightleftharpoons \text{CO}_2 (+\text{M})$ 、 $\text{H} + \text{CH}_3 (+\text{M}) \rightleftharpoons \text{CH}_4 (+\text{M})$,此时大量的自由基或自由原子的能量会转移到 CO 分子上,三

元碰撞频率会升高,这样就会增加能量的损耗,减少促进瓦斯爆炸链式快速反应的二元碰撞频率,并且会销毁部分链载体,从而大大降低支链反应的活化中心浓度,使得系统反应能力降低,抑制瓦斯的爆炸^[10,11]。

2.2.2 H_2 对瓦斯爆炸链式反应的影响

加入 H_2 会增加反应产生的高活性 $\text{H}\cdot$ 自由基, $\text{H}\cdot$ 自由基可与 $\text{O}\cdot$ 自由基反应生成· OH 自由基,这样会加速氧化反应,如: $\text{O} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H} + \text{OH}$ 、 $\text{H} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{O} + \text{OH}$ 、 $\text{O} + \text{H} + \text{M} \rightleftharpoons \text{OH} + \text{M}$ 、 $\text{H} + \text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{CH}_3 + \text{H}_2$ 、 $\text{HO}_2 + \text{CH}_3 \rightleftharpoons \text{OH} + \text{CH}_3\text{O}$ 。由于活化中心浓度是瓦斯爆炸的关键环节,而上述自由基在反应中能够形成活化中心,活性很大,故 $\text{H}\cdot$ 自由基的增加可以提高活化中心浓度,促进瓦斯爆炸。

3 CO 、 H_2 混合气体对瓦斯爆炸的协同作用

本文主要是对甲烷与空气、 CO 及 H_2 的混合气体在封闭绝热反应器(定容弹,总体积设定为 1)中的爆炸过程进行分析。利用定容弹自身的性质,用文献[9]中已经建立的数学模型(Chemkin 子程序 Senkin 软件)进行数值计算。在封闭绝热反应器中,根据瓦斯爆炸条件,充入一定比例的混合气体并进行充分预混合,接着提供一定的能量使其发生低温反应,反应过程中会生成自由基,当其达到一定浓度后就会发生燃烧和爆炸。通过软件对其反应过程中的浓度及其关键反应步进行成图,就能进行详细地分析,找出不同气体浓度情况下的变化规律。

3.1 CO 浓度大、 H_2 浓度小时混合气体对瓦斯爆炸的影响

虽然井下环境一般为负压,但根据专著[1]的相关结论,可知在初始压力为 1atm 时,本文数值模型模拟的瓦斯爆炸结果和实验值最吻合,由于本文主要研究多种气体浓度对瓦斯爆炸的作用,故可将初始压力设定为 1atm。又根据文献[5]的结论: CO 抑制作用很不明显,但随着 CO 浓度的增加会逐渐变强,而 H_2 的促进作用比较明显,先选取 CO 的含量远大于 H_2 含量的情况来分析其对瓦斯爆炸的协同作用,根据文献[5]中的数值设定,可选取浓度较高的 CO (0.10、0.15、0.20)。基于瓦斯爆炸的极限范围,工况 1 将 CH_4 设定为一定值 0.0765, CO 为 0.1000, H_2 为 0, O_2 和 N_2 的浓度按照空气中的体积比 21/78 计算,其他工况依据充入的 CO 、 H_2 的浓度,相应计算出其他气体的浓度,得出瓦斯爆炸的四种工况如表 1 所示。

表 1 瓦斯爆炸初始工况

工况	初始温度/K	初始压力/atm	CH ₄ 浓度	O ₂ 浓度	N ₂ 浓度	CO 浓度	H ₂ 浓度	模拟时间(s)
1	1350	1.0	0.0765	0.1747	0.6488	0.1000	0.0000	0.0200
2	1350	1.0	0.0761	0.1737	0.6452	0.1000	0.0050	0.0200
3	1350	1.0	0.0718	0.1640	0.6092	0.1500	0.0050	0.0200
4	1350	1.0	0.0676	0.1543	0.5731	0.2000	0.0050	0.0200

3.1.1 对反应物浓度变化的影响

图 1 显示了在瓦斯燃烧过程中四种工况下混合气体反应物浓度随反应时间的变化趋势。由图分析可知,在工况 1 的前提下加入 0.5% 的 H₂ 后,混合气发生爆炸的时间由 0.0072 s 迅速提前至 0.0040 s 左右,可见 H₂ 对混合气爆炸有明显促进作用。然后 H₂ 浓度固定为 0.5%,随着混合气体中 CO 浓度的升高,后三种工况在 0.0040 s 左右时,CH₄ 浓度均由初始值急剧下降为 0,O₂ 浓度变化为:工况 2,由 17.37% 降为 1.7% 左右;工况 3,由 16.40% 降为 1.2% 左右;工况 4,由 15.43% 降为 0.8% 左右,之后 CH₄ 和 O₂ 浓度保持稳定。

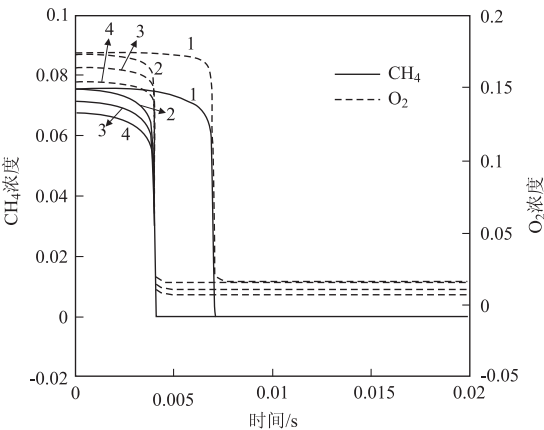


图 1 反应物浓度在瓦斯爆炸中随反应时间的变化趋势

观察曲线可以看出反应物浓度急剧变化时间大致在同一点,不过拐点位置仍有不同,拐点时间值:工况 2 > 工况 3 > 工况 4。这可能是因为 H₂ 的加入会提升活化中心浓度,促进瓦斯爆炸。由此说明 CO 的加入能与 O₂ 反应生成 CO₂,抑制 CH₄ 的链式反应,从而起到抑制瓦斯爆炸的作用,但在 H₂ 少量存在的情况下,随着 CO 浓度的增加,CO 对瓦斯爆炸的抑制作用会明显减弱,而两种气体对瓦斯爆炸的协同影响表现为程度较小的促进作用。

3.1.2 影响瓦斯爆炸的关键反应步分析

由图 2 并结合链式反应机理来分析,可知在瓦斯爆炸过程中,促进 CH₄ 生成的关键反应步为: R158: 2CH₃(+ M) ⇌ C₂H₆(+ M)、R98: OH + CH₄ ⇌ CH₃ + H₂O、R53: H + CH₄ ⇌ CH₃ + H₂、R120: HO₂ + CO ⇌ OH + CO₂, 这些反应步能够消耗自由基 H·、

·HO 等,致使部分的链载体被销毁,从而使反应中断,抑制瓦斯爆炸;促进 CH₄ 消耗的关键反应步为: R38: H + O₂ ⇌ O + OH、R155: CH₃ + O₂ ⇌ O + CH₃O、R156: CH₃ + O₂ ⇌ OH + CH₂O、R119: HO₂ + CH₃ ⇌ OH + CH₃O、R99: OH + CO ⇌ H + CO₂, 这些反应步会使自由基 ·OH、O·、·CH₃O 及 ·CH₂O 的浓度急剧上升,产生链式载体,提升活化中心浓度,利于瓦斯爆炸链式反应的发生,从而促进瓦斯爆炸。

比较四种工况敏感性图,可以发现,工况 1 → 工况 2: 促进甲烷生成的关键反应步的敏感性明显下降,其中 R53 变化最为明显,可能是因为 H₂ 的加入促进此反应步加速反应。促进 CH₄ 消耗的关键反应步的敏感性也明显降低,其中 R155、R156 变化最为明显,R38 大致不变,可能是因为 H₂ 的加入使得 R38 反应正常进行。工况 2 → 工况 3 → 工况 4: 促进 CH₄ 生成和消耗的关键反应步的敏感性都有轻微的降低,前者幅度稍大于后者,其中:前者关键反应步的敏感性依次减弱;后者关键反应步中,R38、R99、R119 都有小幅度的下降,而 R155、R156 的下降幅度则相对较明显一些。由此说明同时加入 H₂、CO,且前者浓度远小于后者浓度时,其会减弱 CO 对瓦斯爆炸的抑制作用,并表现为程度较小的促进作用。

3.2 H₂ 浓度大、CO 浓度小时混合气体对瓦斯爆炸的影响

为深入分析 H₂、CO 两种气体对瓦斯爆炸的影响,现使 H₂ 的浓度大于 CO 的浓度,表 2 为瓦斯爆炸的四种初始工况。

3.2.1 四种工况下反应物浓度的变化

图 3 给出了不同工况下反应物浓度的变化趋势。由图可见,在工况 1 的前提下,加入 0.5% 的 CO,混合气发生爆炸时间几乎没变,说明少量的 CO 对瓦斯爆炸的抑制作用很小。然后在 CO 浓度一定的情况下,随着 H₂ 浓度的升高,瓦斯爆炸时间越来越提前,且变化很明显。当混合气体中充有 0.0050 的 CO、0.0100 的 H₂ 时(工况 2),发生爆炸后,CH₄ 急速从原来的 0.0837 下降至 0,O₂ 浓度则由原来的 0.1912 急剧降至 0.0280 左右;当混合气体中充有 0.0050 的 CO、0.0200 的 H₂ 时(工况 3),发生爆炸后,CH₄ 急速由原来的 0.0829 降至 0,O₂ 浓度则由

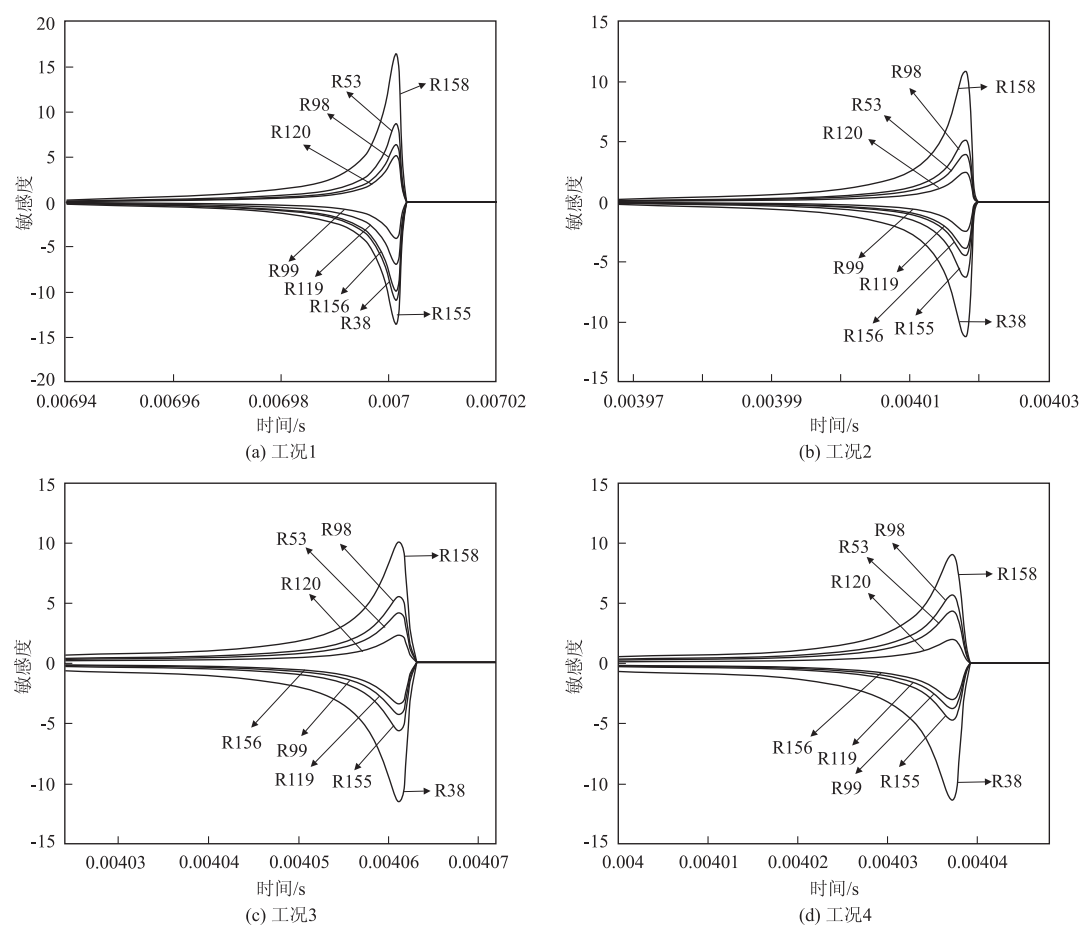


图2 各种工况对瓦斯爆炸关键反应步的影响

表2 瓦斯爆炸初始工况

工况	初始温度/K	初始压力/atm	CH ₄ 浓度	O ₂ 浓度	N ₂ 浓度	CO 浓度	H ₂ 浓度	模拟时间 (s)
1	1350	1.0	0.0842	0.1921	0.7137	0.0000	0.0100	0.0200
2	1350	1.0	0.0837	0.1912	0.7101	0.0050	0.0100	0.0200
3	1350	1.0	0.0829	0.1892	0.7029	0.0050	0.0200	0.0200
4	1350	1.0	0.0820	0.1873	0.6957	0.0050	0.0300	0.0200

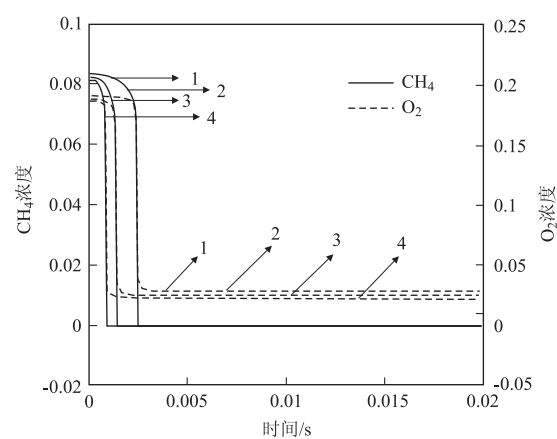


图3 反应物浓度在瓦斯爆炸中随反应时间的变化趋势
原来的 0.1892 降至 0.0250 左右;当混合气体中充有 0.0050 的 CO、0.0300 的 H₂ 时(工况 4),发生爆炸后,CH₄ 浓度急速由原来的 0.0820 降至 0, O₂ 浓

度则由原来的 0.1873 降至 0.0220 左右,三种工况之后都保持稳定状态。

比较后三条曲线,可以发现,工况 2 到工况 3 的变化要比工况 3 到工况 4 的变化明显一些,分析气体浓度,应该是因为后者 H₂ 浓度增加的倍数相对较少,从而使促进瓦斯爆炸的作用减弱造成的。不过总体来说,当 CO 浓度小、H₂ 浓度大时对瓦斯爆炸有明显的协同促进作用。

3.2.2 四种工况下影响瓦斯爆炸的关键反应步分析

结合图 4 与链式反应机理分析可知:在瓦斯爆炸过程中,促进 CH₄ 生成的关键反应步为:R158、R98、R53、R57; $H + CH_2O (+M) \rightleftharpoons CH_3O (+M)$;促进 CH₄ 消耗的关键反应步为:R38、R84; OH

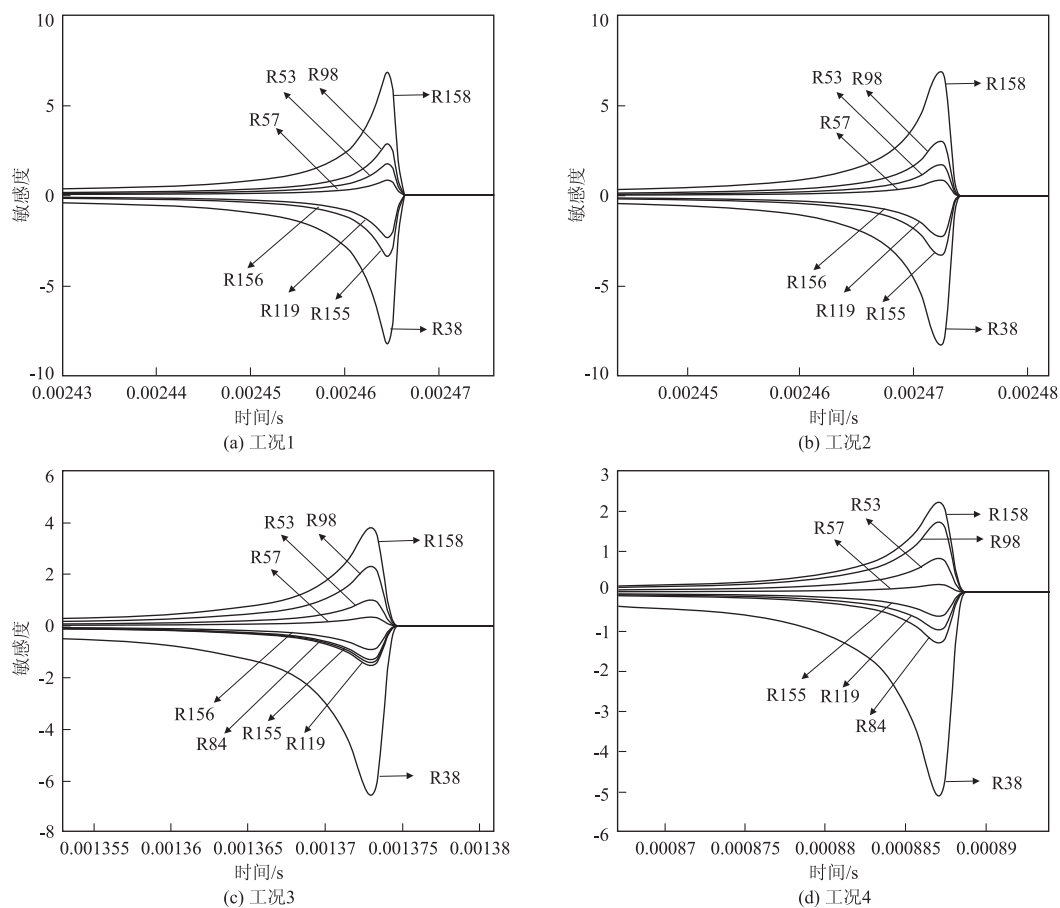


图4 各种工况对瓦斯爆炸关键反应步的影响

+ H₂ < = > H + H₂O、R155、R156、R119。

比较四种工况敏感性图,可以发现:工况 1→工况 2,反应步敏感性大致不变,说明 CO 少量的加入对瓦斯爆炸影响很小。工况 2→工况 3→工况 4:随着充入气体浓度的升高,整体敏感程度大幅度降低,但随着 H₂ 浓度的增加,促进 CH₄ 生成的敏感程度比促进 CH₄ 消耗的敏感程度下降得快,并且反应剧烈时间会因为 H₂ 对瓦斯爆炸的强促进作用提前,此时 CO 对瓦斯爆炸的抑制作用并没有明显体现。其中:在促进甲烷生成的反应步中,R158、R98、R53、R57 都依序大幅度下降,说明其对瓦斯气体着火的抑制作用减弱;在促进甲烷消耗的反应步中,R38、R119 都依序大幅度下降,R84 对反应的影响逐渐表现出来,而 R155、R156 的下降幅度则最为明显,可能是因为 H₂ 的加入会产生高活性 H· 自由基,H· 自由基可与 O· 自由基反应生成·OH 自由基,从而会加速氧化反应。因此说明当 H₂ 浓度大、CO 浓度小时对瓦斯爆炸有协同促进作用。

根据文献[12]的实验结果可知 CH₄、CO、H₂ 属于多元可燃性气体;又根据文献[6]的实验结果:混

合气体中加入 CO 和 H₂ 后,其协同作用是促进瓦斯爆炸的,可以验证本文的数值模拟结果是正确的。通过计算机模拟研究得出这两种气体对瓦斯爆炸有协同促进作用,可以为防止瓦斯爆炸提供重要的理论指导意义,即在采取加入气体成分来抑制瓦斯爆炸方面,可不予考虑这两种气体的同时加入。

4 结论

- 本文通过改变加入 CO、H₂ 的浓度值来研究其对瓦斯爆炸的协同作用机理,得出如下结论:
- 1)当加入 CO 浓度远大于 H₂ 浓度时,随着 CO 浓度的增加,瓦斯爆炸反应物浓度变化时间略有提前。
 - 2)当加入 H₂ 浓度大于 CO 浓度时,随着 H₂ 浓度的增加,瓦斯爆炸反应物浓度变化时间快速提前。
 - 3)通过数值计算分析,可知促进 CH₄ 生成的主要关键反应步为:R158、R53、R98,促进 CH₄ 消耗的主要关键反应步有:R38、R155、R156。
 - 4)通过分析两种情况下的关键反应步可知,随
- (下转第 58 页)

分布呈两边高中部低的“马鞍形”。

此外,工作面回采过程中,覆岩破坏呈倒置的梯形演化,覆岩离层裂隙向前与向上同时渐进式演进。覆岩离层裂隙主要经历了形成、扩展、闭合三个过程,在推进过程中,采空区中部的采动裂隙逐渐被垮落的上覆岩层压实,而受煤柱支承作用,近煤壁区域裂隙数量仍然非常大。

参考文献

[1]高保彬,王晓蕾,朱明礼,等.复合顶板高瓦斯厚煤层综放工作面覆岩“两带”动态发育特征[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增1):3444-3451.

[2]肖鹏,李树刚,林海飞,等.基于物理相似模拟实验的覆岩采动裂隙演化规律研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(4):18-23.

[3]赵忠理,张明,胡川,等.高头窑煤矿河流下浅埋煤层综放开采安全限采研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(5):21-25.

[4]张红鸽,张钊,张伟.上覆岩层瓦斯卸压范围及流动规律的应用研究[J].中国安全生产科学技术,2012,8(1):32-35.

[5]熊祖强,王晓蕾.复合顶板综放面覆岩破坏及裂隙演化相似模拟试验[J].中国安全生产科学技术,2014,10(10):22-28.

[6]魏刚.红菱煤矿保护层开采裂隙演化规律相似模拟实验[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,31(2):185-188.

[7]高保彬,高佳佳,袁东升.基于 UDEC 的大采高覆岩破裂的模拟与分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(2):1-6.

[8]王文,李化敏,高保彬,等.远距离保护层开采煤层渗透特性及瓦斯抽采技术研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(11):84-89.

[9]郝天轩,杨战旗,黄励新.远距离下保护层开采保护效果研究[J].矿业研究与开发,2014,34(3):136-140.

(上接第 39 页)

着气体浓度的增加:在 H_2 浓度远小于 CO 浓度时,促进 CH_4 生成的关键反应步敏感性降低幅度略大于促进 CH_4 消耗的关键反应步敏感性;在 CO 浓度小于 H_2 浓度时,促进 CH_4 生成的敏感程度比促进 CH_4 消耗的敏感程度下降得快。由此可知,这两种情况对瓦斯爆炸有不同程度的协同促进作用。

参考文献

[1]梁运涛.瓦斯爆炸反应动力学特性及其抑制机理[M].北京:科学出版社,2013.

[2]徐超,刘辉辉,王伟杰.瓦斯爆炸极限的理论计算及影响因素探析[J].山东煤炭科技,2009,4:154-155.

[3]THOMAS G O,JONES A,EDWARDS D H. Influence of water sprays on explosion development in fuel-air mixtures[J]. Combustion Science and Technology,1991,80(1-3):47-61.

[4]江丙友,林柏泉,朱传杰,等.瓦斯爆炸过程中火焰瞬时传播规律

研究[J].中国安全科学学报,2010,20(8):96-101.

[5]贾宝山,温海燕,梁运涛,等.受限空间瓦斯爆炸与氢气促进机理的研究[J].中国安全科学学报,2012,22(2):81-87.

[6]胡耀元,钟依均,应桃开,等. H_2 , CO , CH_4 多元爆炸性混合气体支链爆炸阻尼效应[J].化学学报,2004,62(10):956-962.

[7]贾宝山,王小云,温海燕,等.煤矿巷道内 CO 抑制瓦斯爆炸的反应动力学模拟研究[J].爆破,2013,30(1):35-40.

[8]陈桢.矿井火区可燃气体爆炸分析[J].煤矿现代化,2005,(5):17-18.

[9]ANDREW E L,ROBERT J K,JAMES A M. Senkin: A Fortran Program for Predicting Homogeneous Gas Phase Chemical Kinetics with Sensitivity Analysis;Sandia,CA 94551-0969 [P]. 1988.

[10]王华,葛岭梅,邓军.惰性气体抑制矿井瓦斯爆炸的实验研究[J].矿业安全与环保,2008,35(1):4-7.

[11]张启俭,周迎春,贺德华,等.甲烷气相均相选择氧化制甲醇-CHEMKIN-III 模拟计算[J].石化科技,2003,32(1):195-197.

[12]邓军,吴晓春,程超. CH_4 、 CO 、 C_2H_4 多元可燃气体爆炸的试验研究[J].煤矿现代化,2007,(5):63-65.