



文章编号:1671-251X(2019)11-0059-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019070039

煤自燃气体特征及其对瓦斯爆炸下限影响实验研究

顾周杰^{1,2}, 刘贞堂^{1,2}, 刘浩雄³, 钱继发^{1,2}, 林松^{1,2}, 李晓亮^{1,2}



扫码移动阅读

- (1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;
3. 中国铁路上海局集团有限公司 徐州工务段, 江苏 徐州 221005)

摘要:现有研究大多从煤自燃单组分气体或部分组分混合气体角度对瓦斯爆炸极限进行分析,而对煤自燃过程中不同阶段产生的混合气体对瓦斯爆炸极限的影响分析不足,对煤自燃与瓦斯爆炸的耦合致灾开展的实验研究较少。针对上述问题,通过模拟煤自燃实验装置研究了煤自燃过程中气体生成特征规律;采用20 L球形爆炸装置对瓦斯混合煤自燃各个阶段生成气体进行实验,研究了煤自燃气体对瓦斯爆炸下限的影响。实验结果表明,实验煤样自燃过程中产生的可燃性气体主要为 CH_4 、 CO 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 等,其中 CH_4 和 CO 体积分数最高,最高体积分数分别为0.75%和0.37%;煤自燃不同阶段产生的可燃性气体含量随自燃时间的增加和温度的升高均呈现增大趋势,煤自燃加热初期,温度小于80℃主要产生了 CH_4 、 CO 可燃性气体, CO 可以作为煤自燃缓慢氧化阶段的标志气体;随着自燃时间的持续,温度超过80℃后,开始产生 C_2H_4 和 C_2H_6 ,随后逐渐产生 C_3H_8 气体, C_2H_4 的出现表明煤氧化进入了加速阶段;煤氧化自燃后期,大约到220℃时出现 C_2H_2 ,此时煤进入激烈氧化阶段;低体积分数的 CO 能抑制瓦斯爆炸,高体积分数 CO 能促进瓦斯爆炸,导致爆炸压力变大,爆炸下限降低;煤自燃过程中产生的混合气体增大了瓦斯爆炸压力,爆炸下限最大降低了0.55%,瓦斯爆炸的危险性变大。

关键词:煤自燃气体特征;煤自燃与瓦斯爆炸耦合致灾;瓦斯爆炸极限;瓦斯爆炸压力;瓦斯爆炸下限
中图分类号:TD712 文献标志码:A

Experimental research on characteristics of coal spontaneous combustion and its influence on lower limits of gas explosion

GU Zhoujie^{1,2}, LIU Zhentang^{1,2}, LIU Haoxiong³, QIAN Jifa^{1,2}, LIN Song^{1,2}, LI Xiaoliang^{1,2}

- (1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Key Laboratory of Coal Methane and Fire Control of Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. Xuzhou Works Section, China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., Xuzhou 221005, China)

Abstract: Most of existing research analyze gas explosion limit from single component gas or partial component mixed gas of coal spontaneous combustion, while analysis of gas explosion limit from mixed gas produced at different stages of coal spontaneous combustion is insufficient, and there are few experimental research on coal spontaneous combustion and gas explosion coupling disaster. In view of the above problems, the characteristic laws of gas generation in process of coal spontaneous combustion were

收稿日期:2019-07-14;修回日期:2019-10-18;责任编辑:张强。

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目。

作者简介:顾周杰(1996—),男,江苏泰兴人,硕士研究生,研究方向为瓦斯煤尘爆炸及防治,E-mail:1344618736@qq.com。

引用格式: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 characteristics of coal spontaneous combustion and its influence on lower limits of gas explosion[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(11): 59-64.

researched by simulating experimental device of coal spontaneous combustion. The 20 L spherical explosion device was used to conduct the experiment about methane mix gas from coal spontaneous combustion at different stages, and effects of coal spontaneous combustion on the lower limits of gas explosion were studied. The experiment results show that main flammable gases of the coal sample spontaneous combustion are CH_4 , CO , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , etc. Among these gases, CH_4 and CO have the highest volume fraction, and the maximum volume fraction can reach 0.75% and 0.37% respectively. The content of flammable gases produced in different stages of coal spontaneous combustion is increased with the increase of spontaneous combustion time and temperature. CH_4 and CO flammable gases are mainly produced at temperatures below 80 °C at the initial of coal spontaneous combustion, CO can be used as a marker gas for the slow oxidation stage of coal spontaneous combustion. As the time of spontaneous combustion continues, it starts to produce C_2H_4 and C_2H_6 after the temperature exceeds 80 °C, and then C_3H_8 gas is gradually produced. At this time, the appearance of C_2H_4 indicates that the oxidation of coal has entered the acceleration stage. C_2H_2 is produced on the temperatures of 220 °C after the late stage of coal spontaneous combustion, at this point, the coal enters the intense oxidation stage. Low concentration of CO inhibits gas explosion, however, high concentration of CO promotes gas explosion, explosion pressure becomes larger, and lower explosion limit decreases. The mixed gas produced during the spontaneous combustion of coal increases the pressure of gas explosion, decreases the lower explosion limit by 0.55%, so increases the risk of gas explosion.

Key words: gas characteristics of coal spontaneous combustion; coal spontaneous combustion and gas explosion coupling disaster; gas explosion limit; gas explosion pressure; lower limit of gas explosion

0 引言

瓦斯爆炸事故是最严重的矿井事故之一^[1],一旦发生往往会造成重大人员伤亡与财产损失。当前国内外学者针对瓦斯爆炸特性做了大量实验与分析探究。文献[2]通过爆炸极限测试装置研究得出煤矿中产生的其他可燃气体混合瓦斯可扩大其爆炸极限范围。文献[3]发现如果瓦斯中混合有惰性气体,会改变封闭区域瓦斯聚集规律。文献[4-5]通过可燃气体爆炸极限测试装置以及理论分析,发现 CO 气体是煤自燃过程中与瓦斯混合的主要气体,混有 CO 的瓦斯爆炸上下限均增大,爆炸危险度也增大。文献[6]研究发现煤自燃产生的可燃性气体具有扩散效应,气体上浮扩散至顶板岩石后放热、降温并下沉,遇高温煤体可引发爆炸。文献[7]发现采空区遗煤氧化过程中生成的标志气体提高了爆炸压力与温度,促进了瓦斯爆炸。文献[8-10]利用 20 L 球形爆炸装置研究了瓦斯煤尘爆炸特征及残留固体和气体成分。文献[11]通过对多个矿区井下煤自燃实验和模拟研究发现煤自燃产生了大量可燃气体,且自然发火诱发了瓦斯爆炸。

上述研究大多从单组分气体或部分组分混合气体角度对瓦斯爆炸极限进行了分析,但对于煤自燃过程中不同阶段产生的混合气体对瓦斯爆炸极限的影响分析不足,对煤自燃与瓦斯爆炸的耦合致灾开

展的实验研究较少。而矿井煤自燃诱发瓦斯爆炸事故,通常是煤自燃气体产物与瓦斯耦合爆炸致灾,煤自燃不同阶段生成的多组分混合气体对瓦斯爆炸极限的影响机制较为复杂。为了研究煤自燃不同阶段的气体成分特征及其对瓦斯爆炸下限的影响,本文通过模拟煤自燃实验装置研究了煤自燃过程中的气体生成特征规律;收集了煤自燃实验各个阶段的气体,采用 20 L 球形爆炸装置研究了煤自燃气体对瓦斯爆炸下限的影响。通过配入煤自燃实验各个阶段产生的混合气体与瓦斯进行爆炸实验,探究其爆炸压力与爆炸下限的变化,研究结果可为矿井煤自燃与瓦斯爆炸耦合致灾提供一定的实验和理论依据。

1 煤自燃样品及实验装置

实验煤样选自于某矿区新鲜煤岩的肥焦煤,煤样工业分析结果如下:水分为 0.52%,灰分为 16.48%,挥发分为 27.30%,固定碳为 55.70%。

煤自燃实验装置主要包括煤自燃腔体、加热装置、温度采集系统 3 个部分,如图 1 所示。其中煤自燃腔体长为 76 cm,内径为 10 cm,材质为不锈钢,内壁厚为 1 cm,装置一端开口,腔壁设有采集通道,通过该采集通道口进行气体和温度的收集。加热装置主要由加热棒控制器和加热棒构成,对实验煤样进行加热。温度采集系统主要包括温度采集器和计算机系统,用于采集实验过程中自燃气体温度。

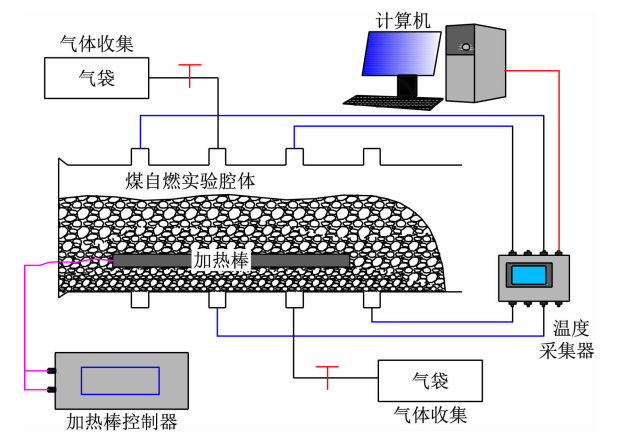


图1 煤自燃实验装置

Fig. 1 Experimental device of coal spontaneous combustion

实验中将煤样破碎为粒径为 10~30 mm 的颗粒,均匀置于燃烧腔体内,实验初始环境温度为 17.5 ℃,氧气体积分数为 21%。在煤加热过程中,设置不同的间隔时间采集煤自燃气体温度数据,同时用注射器抽取气体并封存于气袋中,用气相色谱仪进行成分分析并用于后期瓦斯爆炸影响实验研究。

2 瓦斯爆炸样品及实验装置

瓦斯爆炸实验样品主要涉及 CH₄,CO 及煤自燃产生的气体。根据检测到的煤自燃阶段气体产生时间的不同、主成分 CO 生成量差异以及各个时间段其他可燃气体成分差异,在分析了不同间隔时间点气体具体成分及含量后,采集了自燃实验中第 I 阶段末期、第 II 阶段末期、第 III 段初期的气体,即自燃实验 20,30,35 min 时 3 个时间点具有代表性的气体用于爆炸实验,3 个时间点气体成分种类逐渐变多,含量逐渐变大。

爆炸实验装置主要包括 20 L 球形爆炸装置、数据采集系统、控制系统和高压气瓶 4 个部分,如图 2 所示。其中球形爆炸装置主要由 20 L 不锈钢球体和抽真空装置构成,混合气体通入球体内进行爆炸实验。控制系统由控制箱和控制单元组成,用于控制实验过程。数据采集系统主要由计算机系统构成,用于记录爆炸过程中的压力变化。

爆炸实验点火能量为 12 J,根据气体分压原理,按一定比例先后将 CH₄、空气等气体充入腔体内进行爆炸实验,通过记录爆炸压力参数变化,测试爆炸下限。瓦斯空气配比以 4.45% 为基准,在瓦斯体积分数为 3.6%~5% 范围内进行瓦斯爆炸下限探究实验。实验结束后整理数据并进行分析。

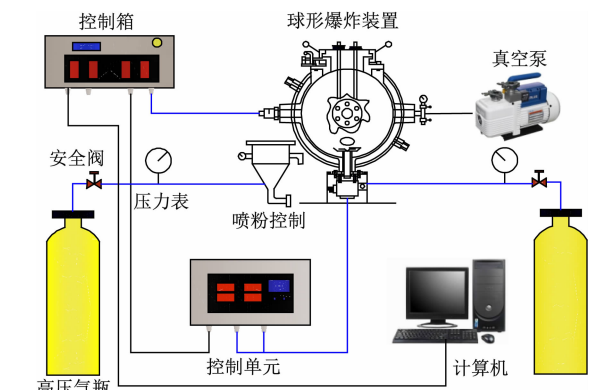


图2 爆炸实验装置

Fig. 2 Explosion experiment device

3 实验分析

3.1 煤自燃气体特征分析

3.1.1 煤自燃标志气体分析

煤在自燃过程中氧化升温,不同阶段产生不同种类的气体,选取各个阶段的代表性气体来表征煤自燃程度。文献[12-13]通过大量实验研究,认为煤自然发火的标志气体一般可通过单一气体、多种气体或相关气体的比值来表征。根据煤自燃过程中不同时间产生的气体成分差异,将煤自燃划分为 3 个阶段^[14],煤自燃不同阶段各气体体积分数如图 3 所示。

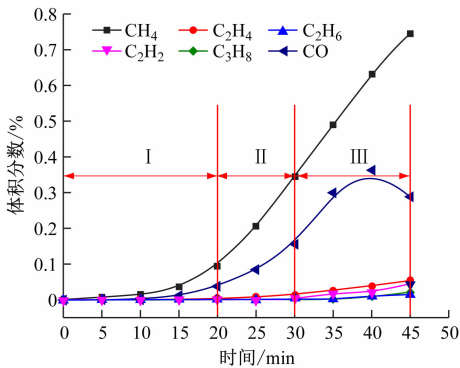


图3 煤自燃不同阶段各气体体积分数

Fig. 3 Gas volume fraction at different stages of coal spontaneous combustion

从图 3 可看出,煤自燃阶段产生的可燃性气体中 CH₄ 的体积分数最高,达到 0.75%;其次为 CO,体积分数达到 0.37%。煤加热初期产生少量 CH₄ 和 CO 气体,随着加热时间的增加,CH₄ 和 CO 的产生率逐渐增大。这是由于在加热初期,低温下 CH₄ 气体吸附在煤表面和内部,最先受热挥发,继续加热,温度小幅度升高,煤样内部结构完好,但开始产生分解反应,CO 开始产生并且反应速率逐步加快,此时为煤自燃的缓慢氧化阶段,即为图 3 中 I 部分;煤自燃加热到 20 min 时开始产生 C₂H₄ 和 C₂H₆,约在 25 min 时产生 C₃H₈,此刻煤氧化进入了加速

阶段,即图 3 中的 II 部分;煤氧化自燃到较高的温度后,约在 30 min 时出现 C_2H_2 ,即进入激烈氧化阶段,为图 3 中的 III 部分。4 种气体的产生量均随时间的增加呈上升趋势,这是由于加热一段时间后,煤分子内部结构在高温下发生链式等复杂反应,结构破坏,相继产生各种烃类气体,直至煤发生燃烧。

3.1.2 煤自燃产生的气体与温度的关系

煤自燃过程中产生的气体体积分数随温度变化曲线如图 4 所示。

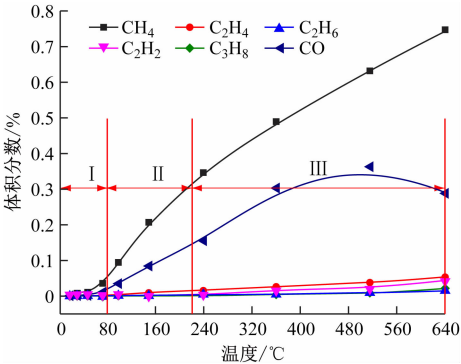


图 4 煤自燃产生的气体体积分数随温度变化曲线

Fig. 4 Variation curves of volume fraction of coal spontaneous combustion gas and temperature

从图 4 可看出,煤自燃加热过程中各气体体积分数随温度的变化总体呈增大趋势。温度低于 80 °C 时,煤自燃产生了 CH_4 , CO 可燃性气体,且其体积分数随温度升高而缓慢增大,此时间段内,煤主要发生低温氧化反应,气体成分及产量较少,即图 4 中的 I 部分;当温度大于 80 °C 后,开始出现 C_2H_4 , C_2H_6 等气体,部分烃类气体体积分数随温度升高缓慢增大,而 CH_4 和 CO 上升速度加快;在温度高于 120 °C 时出现 C_3H_8 ,这是由于随着温度的升高,煤自燃氧化反应加速,煤内部结构反应逐渐复杂化,产生了 C_2H_4 , C_2H_6 等有机气体产物,即图 4 中的 II 部分;而在温度升高到 220 °C 后,高温下煤自燃氧化激烈,煤内部的芳环结构在剧烈氧化作用下被分解产生大量烃类气体,开始出现 C_2H_2 ,气体体积分数均随温度升高而变大,即图 4 中的 III 部分。

3.2 煤自燃气体对瓦斯爆炸特性的影响

3.2.1 CO 对瓦斯爆炸特征规律的影响

通过向 20 L 爆炸球中注入不同配比的瓦斯与空气混合气,典型瓦斯爆炸压力曲线如图 5 所示。结合文献[15]对瓦斯爆炸极限的研究,本次实验在点火能量为 12 J 情况下测得瓦斯爆炸下限为 4.45%。

CO 是煤自燃气体的主要成分,结合上述实验中 CO 产生量,分别测试了体积分数为 0.04%, 0.08%, 0.15%, 0.3%, 0.5% 的 CO 对瓦斯爆炸特性的影响。

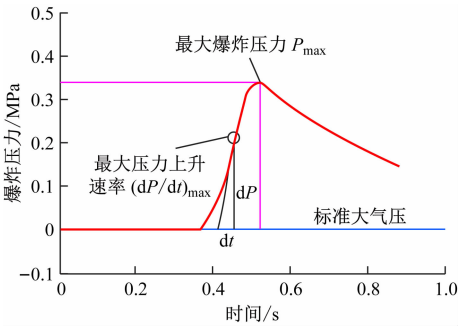


图 5 瓦斯爆炸压力曲线

Fig. 5 Pressure curves of gas explosion

0.04% CO 分别与体积分数为 4.45%, 4.6%, 4.8% 和 5% 的瓦斯混合爆炸压力见表 1。从表 1 可看出,混有 CO 的瓦斯爆炸压力减小,爆炸下限提高至 4.8%。

表 1 0.04% CO 与不同体积分数瓦斯混合的爆炸压力

Table 1 Explosion pressure of 0.04% CO mixed with different gas volume fraction

瓦斯体积分数/%	4.45	4.6	4.8	5
爆炸压力/MPa	未爆	未爆	0.19	0.22

4.45% 瓦斯分别与 0.08%, 0.15%, 0.3% 和 0.5% CO 混合爆炸测试结果如图 6 所示。从图 6 可看出,随着 CO 体积分数升高,4.45% 瓦斯能发生爆炸且爆炸压力呈上升趋势。

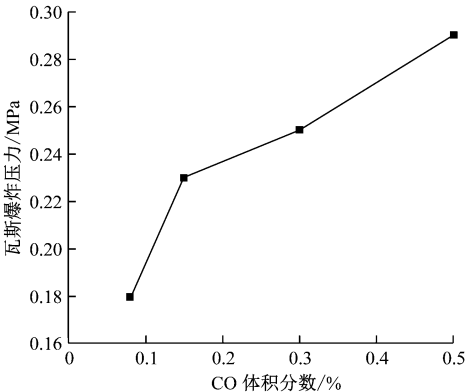


图 6 不同 CO 体积分数下混合 4.45% 瓦斯的爆炸压力

Fig. 6 Explosion pressure at 4.45% gas of different CO volume fraction

不同 CO 体积分数条件下,瓦斯爆炸下限试验结果如图 7 所示,从图 7 可看出,瓦斯爆炸下限随着 CO 体积分数升高呈下降趋势。

分析认为,0.04% 的 CO 能抑制瓦斯爆炸,使爆炸最大压力降低,促进爆炸下限升高;0.08% 的 CO 在 4.45% 瓦斯下能发生爆炸,但爆炸压力相对于不通入 CO 时有所降低,这可能是由于瓦斯活性低于 CO ,在混合气体中充入 CO 后,氧气先与 CO 进行基元反应,部分氧气被消耗,但由于基元反应中耗氧量较少,对瓦斯所需的耗氧量影响甚微。 CO 体积

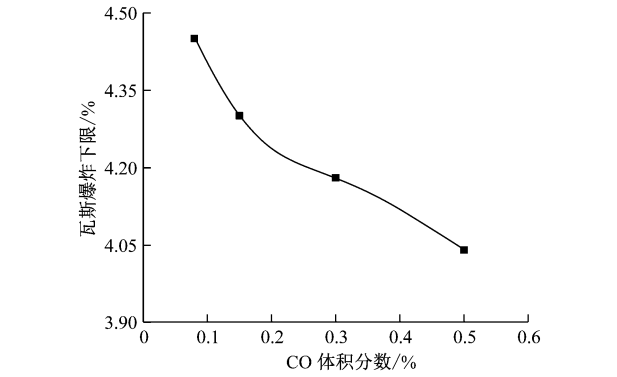


图7 不同CO体积分数下瓦斯爆炸极限
Fig. 7 Gas explosion limits of different CO volume fractions

分数较低,反应放出的热量少,不足以使瓦斯爆炸或完全爆炸,因此,低体积分数的CO能起到抑制瓦斯爆炸的作用。但随着CO体积分数的增加,瓦斯爆炸下限总体呈下降趋势,高体积分数CO对瓦斯爆

炸起促进作用。瓦斯燃烧是由一系列基元的自由基组成的复杂链式反应^[16]过程,其中反应步骤 $\text{OH} + \text{CH}_4 = \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{H} + \text{CH}_4 = \text{CH}_3 + \text{H}_2$, $\text{O} + \text{CH}_4 = \text{OH} + \text{CH}_3$ 有效地反映了促进瓦斯爆炸的机理。在混合气体中充入高体积分数CO后,氧气先与CO进行基元反应并放出大量的热量,同时反应受限空间压力变大,导致瓦斯活性增大,从而促进瓦斯爆炸。

3.2.2 煤自燃产生的混合气体对瓦斯爆炸特征的影响

瓦斯混合气体中充入煤自燃不同阶段收集的气体,即煤自燃初始、加速、燃烧阶段中3个时间点(20,30,35 min)收集的气体,气体的具体体积分数见表2。从表2可看出,随着自燃时间的推进,气体种类逐步多样化,气体体积分数逐渐变大,表示了煤自燃各个阶段的进程。

表2 不同阶段煤自燃气体体积分数

煤自燃阶段	气体体积分数/%							
	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	CO	CO ₂	O ₂
初始阶段	0.094 2	0.004 5	0.000 4	0	0	0.036 6	1.057	19.457
加速阶段	0.346 2	0.014 0	0.001 1	0.001 8	0.000 9	0.155 1	2.888	16.561
燃烧阶段	0.490 4	0.026 3	0.003 1	0.016 9	0.002 4	0.301 9	2.132	15.849

结合煤自燃实验时的取气量,自燃气体以2.5%比例混合进行爆炸实验,研究煤自燃不同阶段产生的气体对瓦斯爆炸最大压力及下限的影响。实验结果见表3。

表3 煤自燃不同阶段瓦斯爆炸下限及爆炸压力

煤自燃阶段	瓦斯爆炸压力/MPa			
	4.45%瓦斯	4.3%瓦斯	3.9%瓦斯	3.6%瓦斯
初始阶段	0.23	未爆	未爆	未爆
加速阶段	0.25	0.18	未爆	未爆
燃烧阶段	0.27	0.22	0.14	未爆

从表3可看出,煤自燃初始阶段产生的气体与4.45%瓦斯混合爆炸最大压力为0.23 MPa,与4.3%瓦斯混合未爆炸。而表1中,4.45%瓦斯混合0.04%CO未爆炸。由此可知,相比于0.04%CO的条件,煤自燃初始阶段产生的气体可降低爆炸下限。另外,结合图6可知,此时混合气体的爆炸最大压力高于加入0.08%CO时的爆炸压力。这说明在煤自燃过程中收集到的气体中除CO外,其他可燃气体

的产生能够促进瓦斯燃烧和爆炸,煤自燃过程中产生的气体促进了瓦斯爆炸最大压力的增大。

结合表3与图6可看出,煤自燃加速氧化阶段产生的气体与4.3%瓦斯混合爆炸压力大于0.15%CO与4.3%瓦斯混合爆炸压力,表明煤自燃加速阶段产生的气体中C₂H₄和C₂H₆等可燃气体增加了混合气体的爆炸威力。同时,同体积分数的瓦斯在充入加速阶段产生的气体后的爆炸最大压力较加入初始阶段时收集到的气体增大,瓦斯爆炸极限降低至4.3%,爆炸下限相对降低了0.15%。这说明加入随着煤自燃时间增加收集到的气体形成的瓦斯混合气体的爆炸最大压力逐渐增大,爆炸极限呈减小趋势。

煤自燃阶段产生的气体与3.9%瓦斯混合具有爆炸性,爆炸下限相对降低了0.55%。从3个阶段实验结果可看出,随着煤自燃过程中加热时间的增加,爆炸最大压力呈现升高趋势,瓦斯爆炸下限呈降低趋势。结合表3与图7可看出,相比于混合单一0.3%CO气体,混合煤自燃气体爆炸下限有所下降,这再次说明随着煤自燃时间的增加,产生的CO及其他可燃气体的含量增大,促进了瓦斯爆炸。

4 结论

(1) 煤自燃过程中产生的可燃性气体主要为 CH_4 , CO , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_2 等, 其中 CH_4 体积分数最高, 最高体积分数可达 0.75%, 其次为 CO , 最高体积分数可达 0.37%。

(2) 煤自燃过程中产生的不同成分气体含量随时间的增加和温度的升高均呈上升趋势。煤自燃加热初期, 温度小于 80℃ 时产生了 CH_4 , CO 等可燃性气体, 可以将 CO 作为煤自燃缓慢氧化阶段的标志气体; 随着自燃时间的持续, 温度超过 80℃ 后, 开始产生 C_2H_4 和 C_2H_6 气体, 在温度高于 120℃ 时会出现 C_3H_8 , C_2H_4 的出现表明煤氧化进入了加速阶段; 煤自燃后期, 煤氧化自燃到较高的温度, 220℃ 时出现 C_2H_2 , 此时煤进入激烈氧化阶段, 煤快速氧化达到着火点。

(3) CO 体积分数较低时抑制了瓦斯爆炸, 使爆炸最大压力降低, 促进爆炸下限升高; 随着混合气体中 CO 体积分数的增加, 高体积分数 CO 对瓦斯爆炸起到了促进作用, 降低了爆炸下限。煤自燃过程中产生的混合气体进一步促进了瓦斯爆炸最大压力增大, 减小爆炸下限, 爆炸下限最终降低了 0.55%, 导致瓦斯爆炸更易发生, 煤矿事故危险性更大。为了有效防控矿井煤自燃区瓦斯爆炸事故, 应加强 CO , CH_4 和其他烃类气体的监测。

参考文献 (References):

[1] 刘贞堂. 瓦斯(煤尘)爆炸物证特性参数实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
LIU Zhentang. Experimental study on characteristic parameters of material evidences in gas (coal dust) explosion [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.

[2] 罗振敏, 林京京, 郭正超, 等. 煤矿其他可燃气体对空气中甲烷爆炸极限的影响[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(1): 91-97.
LUO Zhenmin, LIN Jingjing, GUO Zhengchao, et al. Influence of various other flammable gases in coal mine on explosion limits of methane[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(1): 91-97.

[3] TREVITS M A, YUAN L, THIBOU M, et al. Use of CFD modeling to study inert gas injection into a sealed mine area[C]//SME Annual Meeting, 2010: 1-6.

[4] 程方明, 邓军. 一氧化碳影响二氧化碳惰化瓦斯爆炸的实验研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(3): 315-319.
CHENG Fangming, DENG Jun. Experimental study on the influence of carbon monoxide on carbon

dioxide-inerted methane explosion [J]. Journal of Xian University of Science and Technology, 2016, 36(3): 315-319.

[5] 秦波涛, 张雷林, 王德明, 等. 采空区煤自燃引爆瓦斯的机理及控制技术[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1655-1659.
QIN Botao, ZHANG Leilin, WANG Deming, et al. Mechanism and restraining technology on spontaneous combustion of coal detonating gas in goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1655-1659.

[6] 李树刚, 安朝峰, 潘宏宇, 等. 采空区煤自燃引发瓦斯爆炸致灾机理及防控技术[J]. 煤矿安全, 2014, 45(12): 24-27.
LI Shugang, AN Chaofeng, PAN Hongyu, et al. Mechanism and prevention technology of gas explosion caused by coal spontaneous combustion in goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(12): 24-27.

[7] 贾宝山, 肖明慧, 尹彬, 等. 采空区遗煤氧化标志性伴生气体对瓦斯爆炸的影响[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(4): 56-61.
JIA Baoshan, XIAO Minghui, YIN Bin, et al. Symbolic associated gas of left coal oxidation in goaf affected to gas explosion[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 56-61.

[8] 刘贞堂, 张松山, 喜润泽, 等. 受限空间煤尘爆炸残留气体特征分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1574-1579.
LIU Zhentang, ZHANG Songshan, XI Runze, et al. Analysis on residual gas characteristics of coal dust explosion in confined space[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1574-1579.

[9] QIAN Jifa, LIU Zhentang, LIU Haoxiong, et al. Characterization of the products of explosions of varying concentrations of coal dust[J]. Combustion Science and Technology, 2019, 191(7): 1236-1255.

[10] 刘贞堂, 张松山, 李忠辉, 等. 基于 20 L 球形爆炸装置的煤尘爆炸残留物研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(5): 823-828.
LIU Zhentang, ZHANG Songshan, LI Zhonghui, et al. Investigation on coal dust explosion residues using 20 L explosion sphere vessels [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(5): 823-828.

[11] 丁广友, 陈阿, 陈孟伯. 煤自然发火对瓦斯爆炸的影响[J]. 煤矿安全, 2012, 43(9): 183-186.
DING Guangyou, CHEN Ke, CHEN Mengbo. The influence of coal spontaneous combustion on gas explosion[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(9): 183-186.

[12] 王聪, 李君, 付彭宾. 煤自燃过程中的温升及 CO 生成

- 特性[J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(5): 458-464.
- WANG Cong, LI Jun, FU Pengbin. Temperature evolution and CO formation during self-ignition of coal [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017, 23(5): 458-464.
- [13] 邢永生. 煤自然发火指标气体优选研究[J]. 煤矿现代化, 2017(5): 107-109.
- XING Yongsheng. Research on index gas optimization of spontaneous combustion [J]. Coal Mine Modernization, 2017(5): 107-109.
- [14] 李金帅, 王德明, 仲晓星, 等. 低温阶段程序升温法对煤氧化过程影响的研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(5): 72-76.
- LI Jinshuai, WANG Deming, ZHONG Xiaoxing, et al. Effect of temperature rising programmed test on process of coal oxidation in low temperature stage [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(5): 72-76.
- [15] 付倩倩, 周乐平, 石玉英. 瓦斯/空气混合气燃爆特性的实验研究[J]. 工业安全与环保, 2009, 35(2): 27-28.
- FU Qianqian, ZHOU Leping, SHI Yuying. Experimental study on explosion characteristics of methane/air mixture [J]. Industrial Safety and Environment Protection, 2009, 35(2): 27-28.
- [16] 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.
- JIA Baoshan, WANG Xiaoyun, WEN Haiyan, et al. Simulation study on reaction kinetics of CO inhibiting gas explosion in roadway of coal mine [J]. Blasting, 2013, 30(1): 35-40.