

温度与 CO 气体耦合作用对瓦斯爆炸界限影响实验

白 刚^{1,2}, 周西华^{1,2}, 宋东平^{1,2}

(1. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室(辽宁工程技术大学), 辽宁 阜新 123000)

摘要: 针对煤矿火区封闭过程中常发生的瓦斯爆炸问题, 运用 20 L 爆炸装置, 实验研究了不同环境温度 (25~200 °C) 和 CO 浓度 (1%~10%, 体积分数) 条件下瓦斯的爆炸极限和最大爆炸压力。结果表明: 单因素可燃性气体 CO 体积分数升高, 瓦斯爆炸上限、下限均下降, 爆炸极限范围变宽; 温度升高, 爆炸上限升高, 下限下降; 常压条件下, 随着温度升高, 爆炸上限与初始温度呈二次函数关系变化, 爆炸下限与初始温度呈对数关系变化; 瓦斯爆炸上限与下限爆炸压力随着初始温度升高均降低, 随着 CO 体积分数升高均升高。多因素高温与 CO 气体耦合作用下, 瓦斯爆炸上限升高, 下限下降, 瓦斯爆炸危险性增加; 初始温度和 CO 气体对爆炸极限的耦合影响比单一因素的影响大, 对爆炸上限的影响更为显著。

关键词: 温度; 可燃性气体 CO; 爆炸界限; 爆炸危险性

中图分类号: O383

文献标识码: A

高瓦斯矿井发生难以直接扑灭的火灾时, 要扑灭火灾就必须先封闭, 在火区封闭过程中, 极易发生火灾诱发次生瓦斯爆炸, 甚至连续爆炸^[1-3]。例如: 2013 年 3 月 29 日和 4 月 1 日, 通化八宝煤矿采空区自然发火封闭过程中诱发多次瓦斯爆炸, 造成 53 人死亡^[4]。研究瓦斯气体的爆炸特性对于煤矿火区安全快速封闭与启封以及安全生产评估具有重大意义, 尤其是火灾时期复杂环境下瓦斯爆炸特性, 如高温、高 CO 气体复合环境下。能够维持可燃气体火焰传播的最低/最高浓度被称为可燃气体的爆炸下限/上限^[5]。通常认为, 常温常压下甲烷在空气中的爆炸界限为 5%~15%。然而对于煤矿井下火区燃烧, 由于供氧不足, 生成大量的 CO, 火区 CO 浓度一般为 4%~6%, 根据勒·查特里埃法则, 可燃性气体混入会改变瓦斯爆炸界限^[6]。针对初始温度、初始压力、惰性气体 (CO₂、N₂) 等单因素对瓦斯爆炸界限的影响, 众多学者进行了研究。王华等^[7]通过实验研究了初始压力对矿井单组分及多组分可燃性气体爆炸特性的影响, 发现初始压力升高增加了可燃性气体爆炸界限, 且对上限的影响更为显著; 随着初始压力的升高, 可燃性气体的最大爆炸超压、最大压力上升速率增大。李润之等^[8]研究发现初始温度越高, 最大爆炸压力越小; 最大爆炸压力随着环境温度升高而减小, 最大压力上升速率随环境温度的升高呈非线性变化规律。肖丹^[9]研究发现随着初始温度、初始压力和煤尘浓度升高, 瓦斯爆炸下限降低, 上限升高, 极限范围扩大。高娜^[5, 10]、司荣军^[11]等研究了初始温度与初始压力对瓦斯爆炸界限的影响, 得到高温高压条件下瓦斯爆炸上限升高、下限降低, 爆炸界限扩大; 初始温度和压力对瓦斯爆炸上限的影响较大, 对爆炸下限的影响较小。Cui 等^[12]研究表明随着温度与初始压力升高, 可燃性极限范围变宽, 爆炸上限或可燃性下限与温度呈线性关系, 爆炸上限与初始压力呈对数趋势变化, 爆炸下限不受初始

* 收稿日期: 2018-08-09; 修回日期: 2018-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(51274115); 辽宁省教育厅城市研究院重点项目(LJCL001)

作者简介: 白 刚(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事矿井瓦斯灾害与火灾防治研究。

E-mail: 1272661640@qq.com

通信作者: 周西华(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事矿井瓦斯灾害与火灾防治研究。

E-mail: xihua_zhou68@163.com

压力影响。Li等^[13]研究发现,随着温度升高,爆炸上限与爆炸下限呈线性变化。Karim等^[14]研究了初始温度143~298 K和常压下甲烷可燃性下限实验。周西华等^[15]研究认为,CO₂的惰化效果优于N₂,并进行了新的瓦斯惰化分区。然而,高温与CO气体条件下甲烷-空气混合物爆炸极限的研究甚少^[16]。为此,本研究利用20 L爆炸装置,测定不同初始温度(25~200 ℃)和CO气体浓度(1%~10%,体积分数)条件下甲烷-空气混合物的爆炸上限、下限,研究初始温度和CO气体对甲烷-空气混合物爆炸极限的耦合影响规律,以期对后续研究火区封闭过程中火灾诱发次生灾害、瓦斯爆炸演化规律及动态预测火区瓦斯爆炸危险性提供关键基础参数,对防治煤矿火区封闭过程中火灾诱发次生瓦斯爆炸事故具有重要意义。

1 实验系统与方法

1.1 实验系统

实验采用的20 L爆炸实验装置系统如图1所示,主要包括爆炸本体、配气系统、控制系统(包括温度、压力制)、点火系统和采集系统。顶部开6个螺纹孔,用于进气、测压、抽真空等。爆炸罐体连接压力传感器和温度传感器,中央放置点火电极,电极用火花塞固定。实验遵循的标准为EN1839(B)^[17]。该爆炸系统能测定常温常压和非常温常压下可燃气体(或蒸气)的爆炸参数,并通过热电偶和压强传感器记录爆炸时的温度和压强。

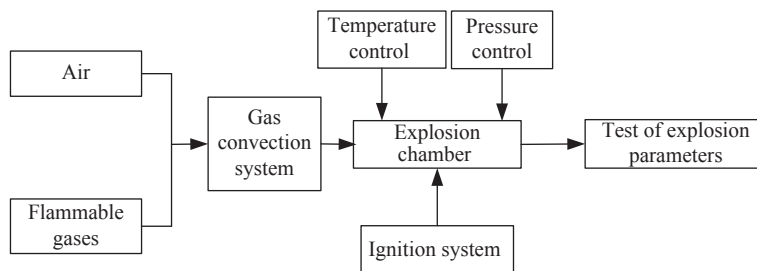


图1 爆炸装置系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of explosive device

1.2 实验过程

实验在不同初始温度(25~200 ℃)和CO气体浓度(1%~10%)条件下进行,实验室环境温度在28~32 ℃之间,大气压力约为100 kPa,环境相对湿度在60%~90% RH之间,实验采用高能电火花能量发生器产生的电火花作为点火源,点火能量均为10 kJ,系统配气精度为±0.1%,实验用的CH₄气体纯度为99.99%。系统通过压力配比的方法实现气体配备,具体操作步骤为:用真空泵将反应罐内抽至真空;由于气体压力比等于体积分数比,将CH₄、惰性气体、空气等气体顺次充入反应罐;每次完成实验后,用真空泵抽出爆炸主体罐内气体,再打开相应阀门充入空气,将主体罐内废气排尽。若进行常温下实验,静置4 min,使CH₄和空气进行混合,利用CH₄传感器检测罐内瓦斯浓度,若连续3次检测到的浓度均为实验设定值,认为混合均匀。若进行高温实验,则通过温控热电偶调节罐体加热带以及罐体底部热板的温度控制加热实验气体至实验温度。

1.3 瓦斯爆炸极限判据

判断瓦斯是否发生爆炸的准则参考美国标准ASTM的规定^[18],即点火后压力升高7%或以上作为发生爆炸的判断依据。爆炸极限实验测量方法参照GB/T 12474-2008和美国标准ASTM E681,利用渐近法测试甲烷在空气中的爆炸极限。对一定浓度的瓦斯气体,如果在同样条件下进行3次实验均未爆炸,则认为该浓度下瓦斯气体不爆炸,如果有1次实验结果为爆炸,则认为该浓度下混合气体爆炸。

2 常温常压实验验证

根据BS-EN-1839-2004标准^[17],新爆炸容器必须在实验前进行验证。常温常压下瓦斯爆炸界限实

验数据如表 1 所示,表中数据均为体积分数。本研究获得的爆炸上限值 (UEL, Upper Explosion Limit) 与其他研究相比差异较大,下限值 (LEL, Lower Explosion Limit) 与其他研究基本一致,差异可归因于爆炸容器、点火电极和爆炸标准等因素。然而,总的来说,可燃性极限在 5%~16% 范围内,并且实验误差不大。因此,本研究中的实验装置可用于准确确定甲烷/空气混合物的爆炸极限。

3 初始温度和 CO 气体单因素对瓦斯爆炸界限的影响

由于火区温度复杂多变,因此研究不同温度下的气体爆炸特性十分必要。实验时,首先将爆炸罐体抽真空,然后注入 CH_4 ,待气体配好后再升温,甲烷-空气混合物爆炸极限随初始温度的变化情况如图 2 所示。由图 2 可看出,随着温度的升高,瓦斯爆炸上限变化较小,总体呈现上升趋势(主要是由于温度升高,分子内能增加,促使分子运动速率加快,增加了分子之间的碰撞几率),爆炸下限缓慢下降,爆炸极限范围变大,瓦斯爆炸危险性增加。煤矿井下火区温度较高,通常高于 500 $^{\circ}\text{C}$,甚至达到 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上,因此爆炸界限较大。尤其是爆炸下限可能降低到 3% 以下,火区爆炸危险性大大增加。

由图 2 可知,常压条件下,当初始温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 时,爆炸上限为 13.16%,下限为 5.29%,爆炸极限范围为 7.87%;当初始温度升高至 200 $^{\circ}\text{C}$ 时,爆炸上限为 12.80%,下限下降为 4.30%,爆炸极限范围为 8.5%,爆炸极限扩大的百分率为 8%。常压下不同温度时瓦斯爆炸界限见表 2。

表 2 不同温度条件下瓦斯爆炸极限与爆炸压力(常压)

Table 2 CH_4 explosion limit and explosion pressure under different temperatures (ambient pressure)

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	UEL/%	LEL/%	UEL pressure/MPa	LEL pressure/MPa
25	13.16	5.29	0.62	0.100
50	12.50	5.20	0.58	0.081
75	12.40	4.90	0.56	0.073
100	12.30	4.50	0.56	0.073
120	12.40	4.40	0.52	0.065
200	12.80	4.30	0.45	0.052

通过对瓦斯爆炸上限和下限数据与初始温度拟合得到:

瓦斯爆炸上限

$$y = 13.48652 - 0.02036x + 8.53628 \times 10^{-5}x^2 \quad (1)$$

式中: y 为瓦斯爆炸界限, %; x 为温度, $^{\circ}\text{C}$; 相关系数 $R=0.786\ 09$ 。

瓦斯爆炸下限

表 1 实验数据与历史数据对比

Table 1 Comparison of experimental data with historical data

Researchers	LEL/%	UEL/%
Kondo, <i>et al.</i> ^[19]	5.0	15.5
Vanderstraeten, <i>et al.</i> ^[20]	4.6±0.3	15.8±0.4
Li, <i>et al.</i> ^[13]	5.0±0.1	15.7±0.1
This study	5.29	13.16

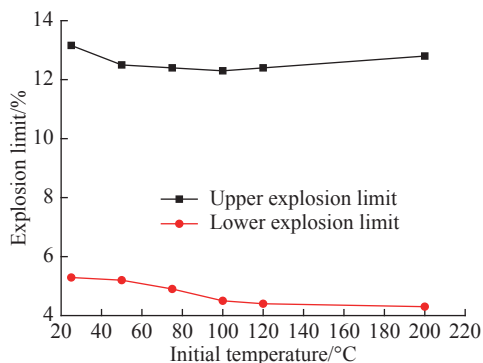


图 2 不同温度下瓦斯的爆炸界限(常压)

Fig. 2 CH_4 explosion limits under different temperatures (ambient pressure)

$$y = 8.234\,68 - 0.746\,87 \ln(x - 22.149\,27) \quad (2)$$

式中: y 为瓦斯爆炸界限, %; x 为温度, $^{\circ}\text{C}$; 相关系数 $R=0.840\,68$ 。

瓦斯爆炸极限随 CO 气体浓度的变化情况如图 3 所示。由图 3 可看出, 随着 CO 气体浓度的升高, 瓦斯爆炸上限下降, 下限下降, 但爆炸极限范围变大, 瓦斯爆炸危险性增加。当 CO 体积分数为 1% 时爆炸上限下降为 17.7%, 下限下降为 4.5%, 极限范围为 13.2%; 而当 CO 体积分数升高至 10% 时, 爆炸上限下降为 16.0%, 下限下降为 0.7%, 极限范围扩大为 15.3%, 爆炸极限扩大的百分率为 15.9%, 爆炸极限较常温常压时扩大的百分率为 102%。实验温度为 $100\,^{\circ}\text{C}$ 时, CO 浓度不同时瓦斯爆炸极限见表 3。

由表 2 与表 3 可知, 温度与 CO 浓度对瓦斯爆炸上限的影响大于对爆炸下限的影响, 主要是由于在爆炸下限浓度附近, 可燃混合气体中瓦斯含量很小, 过量空气作为反应中的惰性气体, 一方面阻碍了 CH_4 与 O_2 分子有效碰撞, 减少了反应发生的可能性, 另一方面吸收反应放热, 减缓了链式反应持续与火焰蔓延。

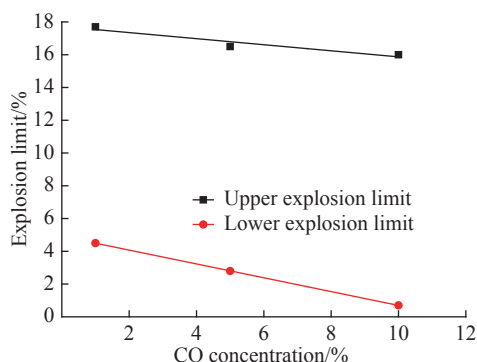


图 3 不同 CO 浓度时瓦斯爆炸极限 (温度 $100\,^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 CH_4 explosion limits with different CO concentration ($T=100\,^{\circ}\text{C}$)

表 3 不同 CO 浓度时瓦斯爆炸极限与爆炸压力 (温度 $100\,^{\circ}\text{C}$)

Table 3 CH_4 explosion limit and explosion pressure with different concentrations of CO ($T=100\,^{\circ}\text{C}$)

CO concentration/%	UEL/%	LEL/%	UEL pressure/MPa	LEL pressure/MPa
1	17.7	4.5	0.42	0.27
5	16.5	2.8	0.52	0.27
10	16.0	0.7	0.56	0.28

4 初始温度与 CO 气体对瓦斯爆炸压力的影响

为分析瓦斯爆炸危险性, 对不同初始温度条件下的最大爆炸压力进行实验测定, 不同温度下瓦斯爆炸上下限时的瓦斯爆炸压力如图 4 所示, 不同 CO 体积分数条件下瓦斯爆炸上下限时瓦斯爆炸压力如图 5 所示。

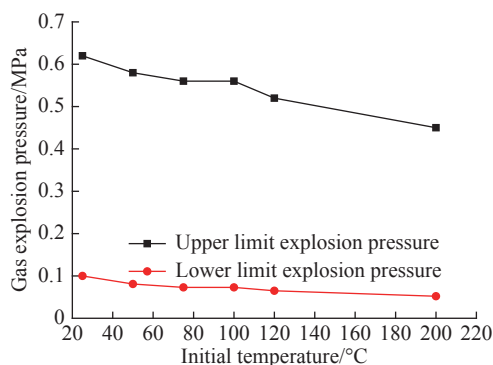


图 4 瓦斯爆炸压力与温度关系

Fig. 4 Relationship between CH_4 explosion pressure and temperature

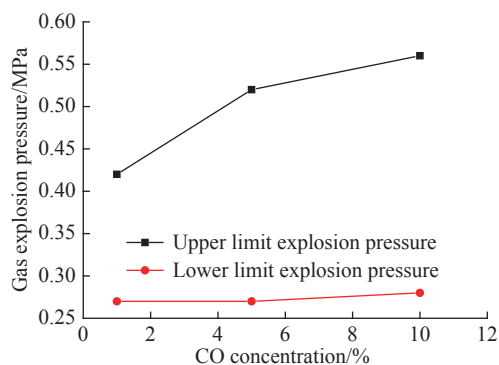


图 5 瓦斯爆炸压力与 CO 体积分数关系

Fig. 5 Relationship between CH_4 explosion pressure and CO volume fraction

由图 4 可知, 瓦斯爆炸上限与下限爆炸压力随着初始温度升高呈近线性关系降低。不同温度条件下, 瓦斯爆炸上限爆炸压力远大于瓦斯爆炸下限爆炸压力。

通过大量热化学计算,最大爆炸压力 p_m 可表示为

$$p_m = p_0 \frac{M_u}{M_b} \left(0.75 + \frac{4170}{T} \right) \quad (3)$$

式中: M_u 和 M_b 分别为未燃和已燃燃料的平均分子量, T 为初始反应物的温度, p_0 为初始环境压力。从(4)式中可以看出,最大爆炸压力 p_m 随初始温度 T 增加而减小,这主要是因为在其他条件不变的情况下,初始温度升高降低了单位体积内瓦斯-空气混合气体物质的量,从而减少了反应放出的热量,因此最大爆炸压力降低,实验结果与理论计算结果的变化规律一致。由图5可知,随着CO浓度增加瓦斯爆炸上限压力、下限压力均升高,这主要是因为CO浓度越大,CH₄-CO混合可燃气体的物质的量增加,增加了爆炸释放的能量,爆炸压力升高。

5 初始温度和CO气体耦合作用对瓦斯爆炸界限的影响

瓦斯的爆炸极限是能维持甲烷与氧气持续反应及火焰的持续传播的甲烷在空气中的浓度范围。瓦斯的爆炸下限越低,爆炸上限越高,即爆炸极限范围越宽,则爆炸危险性越大。

由图6与图7可看出:当CO体积分数相同时,随着温度升高,瓦斯爆炸上限升高,下限下降,爆炸极限范围变宽,变化趋势基本相同;当初始温度相同时,随着CO体积分数升高,单位CO气体对爆炸上限的影响逐渐减弱。温度相同时,随着CO体积分数升高,瓦斯爆炸上限、下限均下降,但爆炸极限范围变宽,瓦斯爆炸危险性增加。这是由于高温和CO气体环境氛围使系统中的活化分子数增加,更多的自由基参与基元反应,使链反应更易持续进行下去,因而可以维持更高浓度的瓦斯-空气混合气体发生燃爆反应。然而,随着爆炸上限的进一步升高,氧气浓度越来越小,初始温度和CO气体对瓦斯爆炸上限的影响减弱。

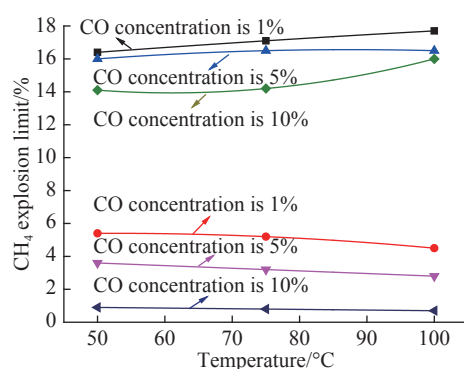


图6 不同CO体积分数下瓦斯爆炸极限与温度的关系

Fig. 6 Relationship between CH₄ explosion limits and temperature under different CO concentrations

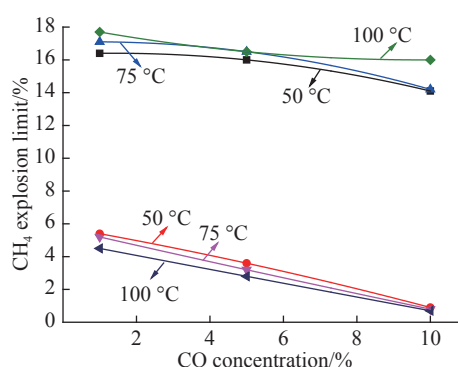


图7 不同温度下瓦斯爆炸极限与CO体积分数的关系

Fig. 7 Relationship between CH₄ explosion limit and CO concentration

常温常压条件下,瓦斯爆炸上限为13.16%,当初始温度升高到100℃且CO体积分数为1%时,爆炸上限为17.7%,上升幅度几乎达到了34.5%。常压下,当初始温度由25℃升至200℃时,上限的升幅仅为2.8%;而常温下,当CO气体体积分数由1%增大到10%时,上限升幅仅为5.4%。常温常压条件下,瓦斯爆炸下限为5.29%,当初始温度升高到100℃且CO体积分数为10%时,爆炸下限为0.7%,下降幅度为86.77%。常压下,当初始温度由25℃升至200℃时,爆炸下限的下降幅度为18.7%;而常温下,当CO体积分数由1%增大到10%时,爆炸下限的下降幅度为84.4%。由此可见,瓦斯爆炸上限与下限在初始温度和CO气体耦合作用下的变化幅度均比单因素影响下的变化幅度大得多,且耦合作用下爆炸上限的变化幅度远大于单因素下变化幅度的和。

将初始温度和可燃性气体CO耦合条件下瓦斯爆炸界限的变化绘成曲面,并对曲面进行拟合(图8)。当初始温度为50~100℃、可燃性气体CO体积分数为1.0%~10.0%时,若将初始温度 T 和CO体积分

数 n 作为自变量, 甲烷爆炸极限 L 作为因变量, 根据拟合公式与实际曲面函数的相关度更高的原则, 可得到拟合曲面的拟合方程式, 即

$$L = a + bT + cn \quad (50 < T < 100, 1.0\% < n(\text{CO}) < 10.0\%) \quad (4)$$

式中: L 为爆炸上限, %; T 为初始温度, $^{\circ}\text{C}$; n 为 CO 体积分数, %。拟合参数见表 4。

表 4 温度与 CO 浓度耦合条件下拟合函数各参数

Table 4 Function fitting parameters under coupling conditions with varying temperatures and CO concentrations

Explosion limit	a	b	c	R^2
UEL	15.581 15	0.024 67	-0.257 92	0.863 63
LEL	6.471 86	-0.012 67	-0.470 77	0.990 92

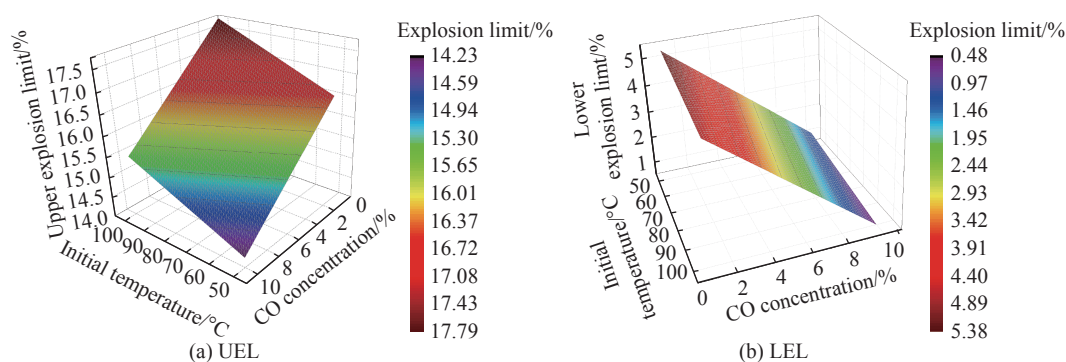


图 8 初始温度与 CO 气体浓度对甲烷爆炸极限的耦合影响

Fig. 8 Coupling influence of initial temperature and CO concentration on CH_4 explosion limit

根据图 8 可知: 随着温度升高, 瓦斯爆炸下限下降, 爆炸上限上升, 瓦斯爆炸危险性增加; 随着可燃性气体 CO 浓度升高, 瓦斯爆炸上限、下限均下降, 但爆炸极限范围变宽, 瓦斯爆炸危险性增加。煤矿火区煤燃烧时, 火区温度通常为 $600 \sim 800^{\circ}\text{C}$, 甚至可高达 1200°C , 根据文献 [21] 可知, 温度越高, 瓦斯爆炸下限下降, 爆炸上限升高, 爆炸界限范围变大, 因此现场火区治理过程中, 应充分考虑火区温度与瓦斯浓度, 防止发生瓦斯爆炸事故。

初始温度为 100°C 、CO 体积分数为 1% 时, 瓦斯爆炸上限为 17.7%, 比常温常压时的 13.16% 扩大的百分率为 34.5%, 扩大的危险浓度范围使瓦斯-空气混合气体在高温、CO 条件下危险性大幅提高。因此, 煤矿井下火灾时期, 瓦斯爆炸界限范围较常温常压下爆炸界限范围更广, 火区治理时应考虑低浓度瓦斯发生爆炸的可能性。

6 结 论

对初始温度和 CO 气体耦合作用对瓦斯爆炸界限影响进行研究, 得到以下结论。

(1) 随着可燃性气体 CO 浓度升高, 瓦斯爆炸上限、下限均下降, 爆炸极限范围变宽; 随着温度升高, 爆炸上限升高, 下限下降; 瓦斯爆炸上限与初始温度呈二次函数关系, 瓦斯爆炸下限与初始温度呈对数关系。

(2) 瓦斯爆炸上限、下限爆炸压力随着初始温度升高均略有降低, 瓦斯爆炸上限压力、下限压力随着 CO 浓度升高均升高。

(3) 高温与高可燃性气体 CO 双因素耦合条件下, 瓦斯爆炸下限下降, 爆炸上限升高, 瓦斯爆炸危险性增加, 爆炸界限与温度、CO 气体浓度近似满足 $L = a + bT + cn$ 关系式; 初始温度和 CO 气体对爆炸极限的耦合影响比单一因素的影响大, 且对爆炸上限的影响更为显著。

(4) 为深入研究煤矿火区瓦斯爆炸极限与环境因素之间的关系, 还需要继续研究更高温度和 CO 气体、烷烃、烯烃类气体条件下可燃性混合物爆炸界限以及其他影响因素之间耦合作用的影响。

参考文献:

- [1] 周心权. 矿井火灾防治 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002: 146–160.
- [2] 王海燕, 冯超, 王忠文, 等. 封闭火区注惰危险性和临界注惰参数 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(Suppl 1): 117–122.
WANG H Y, FENG C, WANG Z W, et al. Dangers and critical parameters of inert gas injection during mine fire sealing [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(Suppl 1): 117–122.
- [3] 梁运涛, 罗海珠. 中国煤矿火灾防治技术现状与趋势 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(2): 126–130.
LIANG Y T, LUO H Z. Current situation and development trend for coal mine fire prevention & extinguishing techniques in China [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 126–130.
- [4] 丁百川. 四天里的五次爆炸 [J]. 劳动保护, 2013, 12: 32–35.
DING B C. Five explosions in four days [J]. Labour Protection, 2013, 12: 32–35.
- [5] 高娜, 张延松, 胡毅亭. 温度、压力对甲烷-空气混合物爆炸极限耦合影响的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 453–458.
GAO N, ZHANG Y S, HU Y T. Experimental study on methane-air mixtures explosion limits at normal and elevated initial temperatures and pressures [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(3): 453–458.
- [6] 俞启香. 矿井瓦斯防治 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992: 40–52.
YU Q X. Mine methane prevention [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1992: 40–52.
- [7] 王华, 邓军, 葛玲梅. 初始压力对矿井可燃性气体爆炸特性的影响 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 423–428.
WANG H, DENG J, GE L M. Influence of initial pressure on explosion characteristics of flammable gases in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 423–428.
- [8] 李润之, 黄子超, 司荣军. 环境温度对瓦斯爆炸压力及压力上升速率的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 415–419.
LI R Z, HUANG Z C, SI R J. Influence of environmental temperature on gas explosion pressure and its rise rate [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 415–419.
- [9] 肖丹. 受限空间瓦斯爆炸特性及其影响因素研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- [10] 高娜, 张延松, 胡毅亭. 温度压力对瓦斯爆炸危险性影响的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(2): 218–223.
GAO N, ZHANG Y S, HU Y T. Experimental study on gas explosion hazard under different temperatures and pressures [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(2): 218–223.
- [11] 司荣军. 温度压力耦合对甲烷爆炸极限影响的试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 32–35.
SI R J. Experimental study on the explosion limits of methane under coupling effects of temperature and pressure [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(4): 32–35.
- [12] CUI G, LI Z L, YANG C. Experimental study of flammability limits of methane/air mixtures at low temperatures and elevated pressures [J]. Fuel, 2016, 181: 1074–1080.
- [13] LI Z M, GONG M Q, SUN E Y, et al. Effect of low temperature on the flammability limits of methane/nitrogen mixtures [J]. Energy, 2011, 36: 5521–5524.
- [14] KARIM G A, WIERZBA I, BOON S. The lean flammability limits in air of methane, hydrogen and carbon monoxide at low temperatures [J]. Cryogenics, 1984, 24(6): 305–308.
- [15] 周西华, 孟乐, 史美静, 等. 高瓦斯矿发火区封闭时对瓦斯爆炸界限因素的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 351–356.
ZHOU X H, MENG L, SHI M J, et al. Influences of sealing fire zone in high gas mine on impact factors of gas explosion limits [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 351–356.
- [16] GIERAS M, KLEMENS R, RARATA G, et al. Determination of explosion parameters of methane-air mixtures in the chamber of 40 dm³ at normal and elevated temperature [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(2/3): 263–270.
- [17] DIN. Determination of explosion limits of gases and vapours: DIN EN 1839-2004 [S]. Berlin: DIN, 2004.
- [18] ASTM International. Standard test methods for limiting oxygen (oxidant) concentration in gases and vapors: ASTM E2079-07 [S]. American Society for Testing and Materials, 2013: 1–2.
- [19] KONDO S, TAKIZAWA K, TAKAHASHI A, et al. On the temperature dependence of flammability limits of gases [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 187(1/2/3): 585–590.
- [20] VANDERSTRAETEN B, TUEERLINCKX D, BERGHMANS J, et al. Experimental study of the pressure and temperature dependence on the upper flammability limit of methane/air mixtures [J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 56(3): 237–246.
- [21] 欧文·格拉斯曼. 燃烧学 [M]. 赵惠富, 张宝诚, 译. 北京: 科学出版社, 1983.

Experimental Study on the Coupling Influence of Temperature and CO Concentration on CH₄ Explosion Limit

BAI Gang^{1,2}, ZHOU Xihua^{1,2}, SONG Dongping^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters & Control of Ministry of Education

(Liaoning Technical University), Fuxin 123000, China)

Abstract: Gas explosion often occurs in the course of closing fired coal mine. The explosion limit and maximum explosion pressure under temperatures ranging from 25 °C to 200 °C and CO volume fractions of 1%–10% are studied by using a special 20 L explosive device. The results show that upper and lower explosion limits all decrease with increasing CO volume fraction, the range of explosion limit is widened in the presence of only CO. The upper gas explosive limit increases while its lower limit decreases as temperature increases. At ambient pressure, the upper gas explosive limit increases quadratically with initial temperature while the lower limit increases logarithmically with initial temperature. Increasing CO volume fraction results in increase in both the upper pressure limit and the lower pressure limit. Coupling CO gas with high temperature, the gas explosive upper limit increases and the lower limit decreases thus higher risk is expected in such condition. Explosive limits, especially the upper limit are more sensitive to coupling factors than to single factor.

Keywords: temperature; combustible gas CO; explosion limit; explosion hazard