

文章编号: 1001-1455(2013)04-0415-05

环境温度对瓦斯爆炸压力及压力上升速率的影响*

李润之, 黄子超, 司荣军

(中煤科工集团重庆研究院, 重庆 400037)

摘要: 针对不同环境温度对瓦斯爆炸压力及最大压力上升速率的影响进行实验。研究表明, 在其他条件不变的情况下, 随着环境温度的增加最大爆炸压力逐渐减小, 且最大爆炸压力与环境温度的倒数呈现线性衰减规律; 随着环境温度的升高, 化学反应速率增加, 爆炸压力达到峰值所需的时间减少; 瓦斯气体的最大压力上升速率随环境温度的升高呈非线性变化规律, 在环境温度为 298~473 K 的范围内, 最大压力上升速率基本不变。这些规律性的结论可为防治矿井瓦斯爆炸事故和煤层气的安全利用提供理论基础。

关键词: 爆炸力学; 瓦斯爆炸; 环境温度; 爆炸压力; 爆炸压力上升速率

中图分类号: O381

国标学科代码: 1303510

文献标志码: A

在煤矿生产过程中, 随着开采深度的逐年增大和煤矿井下自燃发火等原因, 矿井环境温度也随之升高, 环境温度的升高给矿井瓦斯治理工作带来了严峻的考验。而在煤层气利用过程中, 同样面临环境温度改变所带来的一系列的安全问题, 这也是制约低浓度煤层气大规模利用的关键因素。因此, 研究特殊环境条件下的瓦斯爆炸特性、探索各影响因素对瓦斯爆炸的作用机理等, 对于有效地防治矿井瓦斯爆炸事故和煤层气的安全利用均具有十分重要的意义。

通过实验和事故案例分析, 发现环境温度的改变对瓦斯爆炸特性具有重要影响。目前, 就环境条件对瓦斯爆炸特性的影响研究方面, 许多学者作了一定程度的研究^[1-5], 但由于特殊环境条件下可燃气体爆炸特性实验较难进行, 该方面的研究依然较少, 也未形成系统的理论体系。

本文中首先对环境温度对爆炸压力及压力上升速率的影响进行理论分析, 在此基础上针对不同环境温度条件对瓦斯爆炸的最大爆炸压力、爆炸压力上升速率的影响进行实验研究, 分析随环境温度的改变所测得的各参数的变化规律。

1 理论分析

密闭容器中的爆炸发展过程较为复杂, 在一般情况下没有解析解。为此采用等温模型作近似假设^[6], 在简化模型的基础上推导出温度与爆炸表征参数的解析关系式。等温模型的基本假设是已反应物质(燃烧产物)的温度 T_b 和未反应物质(初始反应物)的温度 T_u 在爆炸发展过程中始终不变

$$T_b = T_f = \text{常数} \quad (1)$$

$$T_u = T_i = \text{常数} \quad (2)$$

式中: T_f 为燃烧终态产物温度, 由热化学计算得到; T_i 为反应物初始环境温度, 一般为常温。

初始环境温度 T_i 与 T_u 近似相等, 对最大压力和最大压力上升速率影响不大, 而主要受已反应物质的温度(火焰温度) T_b 的影响。通过大量热化学计算, 归纳出如下燃烧温度与初始温度的关系

$$T_b = k_1 T_u + k_2 \quad (3)$$

最大爆炸压力表达式可表示为

$$p_m = p_0 \frac{\bar{M}_u}{\bar{M}_b} \left(0.75 + \frac{4170}{T_u} \right) \quad (4)$$

* 收稿日期: 2012-03-22; 修回日期: 2012-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274238); 重庆市自然科学基金项目(cstc2011jjA90018)

作者简介: 李润之(1981—), 男, 博士。

式中： \bar{M}_u 和 \bar{M}_b 分别为未燃和已燃燃料的平均分子量， p_0 为初始环境压力。从公式(4)中可以看出， p_m 随 T_u 增加而减小。

初始温度对最大爆炸压力上升速率的影响可由下述表达式给出

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_m = \frac{\alpha K_r s p_0}{V T_u^2} \left(\frac{\bar{M}_u}{\bar{M}_b}\right)^2 \left[\left(0.75 - \frac{\bar{M}_u}{\bar{M}_b}\right) 0.75 T_u^2 + \left(1.50 - \frac{\bar{M}_u}{\bar{M}_b}\right) 4170 T_u + 4170^2 \right] \quad (5)$$

式中： K_r 为燃烧速度， α 为湍流因子， s 为火焰面积， V 为爆炸容器容积。该式表明， $\left(\frac{dp}{dt}\right)_m$ 是 T_u 的二次函数。但从式(5)中可以看出， T_u^2 和 T_u 的系数项与常数 4170^2 相比要小得多。

2 实验设备及环境条件

实验装置如图 1 所示，包括 20 L 爆炸罐体、配气系统、点火系统、加温系统及数据采集系统等。爆炸罐体连接有压力传感器、温度传感器，并与控制系统相连，控制系统通过时序电路控制加温系统、配气系统、点火系统，控制系统通过无线监控传输器与高频数据采集系统相连。实验过程中，在爆炸罐体中心进行点火，利用压力传感器探测容器内的定容爆炸压力，并进行实时数据采集。

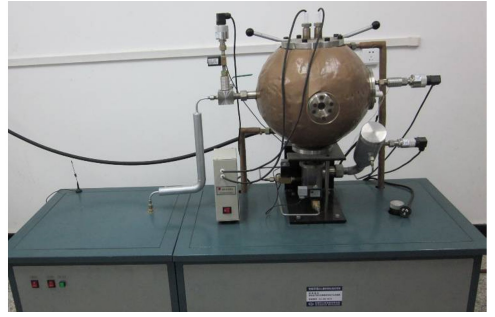


图 1 实验装置

Fig. 1 Experiment equipment

环境条件的改变对瓦斯爆炸特性具有明显影响，因此，在实验时，必须考虑实验的环境条件。本文中实验在常压条件下进行，环境相对湿度在 10%~25% RH 之间，爆炸前罐体内气体处于无湍流静止状态，采用电火花能量发生器产生的 10 J 电火花作为点火源，环境温度变化范围为 298~473 K。

3 环境温度对瓦斯爆炸压力的影响

3.1 常温常压条件下的爆炸压力变化规律

实验在常温常压(298 K、0.1 MPa)条件下得到瓦斯体积分数为 9.8% 时的典型爆炸压力变化曲线，如图 2 所示，具有密闭容器爆炸压力变化特征。为使容器内的气体混合更均匀、系统更稳定，将瓦斯气体设置 200 ms 延迟点火起爆。从图 2 中可以看出，点火发生后爆炸压力不是立即上升，而是有一段几十毫秒的反应感应时间，这段时间就是瓦斯爆炸的点火延迟时间，即爆炸缓慢氧化阶段，之后爆炸压力迅速上升。从压力开始上升到出现最大爆炸压力这段时间可以认为是瓦斯爆炸的快速反应阶段；随后容器内压力逐渐下降，此阶段为反应熄灭阶段。由于系统并非理想的定容绝热条件，故在采集时间约 1000 ms 后，系统压力下降但仍有一定的超压值，并随时间的推移会继续下降直到接近标准大气压。

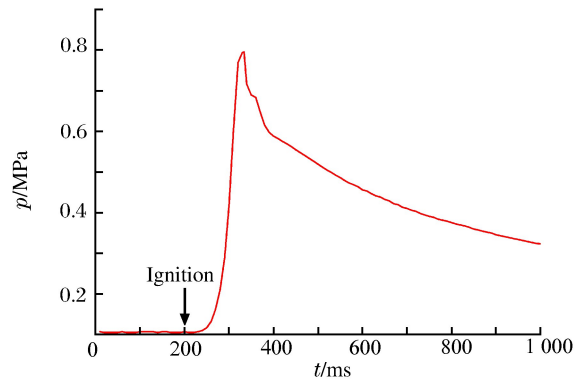


图 2 瓦斯爆炸压力时程曲线图

Fig. 2 Gas explosion pressure varied with time

3.2 不同环境温度条件下的爆炸压力变化规律

图 3 所示为体积分数 9.8% 的瓦斯气体在不同初始环境温度条件下爆炸压力曲线，由上至下温度分别为 298、348、423 和 473 K，均符合典型密闭容器爆炸压力的变化规律。从图 3 中明显可以看出，随着初始环境温度的升高，瓦斯气体的最大爆炸压力数值逐渐降低，对应产生的最大爆炸压力分别为 0.795、0.687、0.566 和 0.502 MPa。

瓦斯爆炸时,初始环境温度对达到最大爆炸压力所需的时间具有一定影响。从图 3 可以看出:在 298 K 的环境温度下,瓦斯完全反应并达到最大爆炸压力所需时间是 134.2 ms,而在 348、423、473 K 条件下获得最大爆炸压力所需要的时间分别为 109.8、95.6、85.8 ms,即随环境温度的升高,反应获得最大爆炸压力需要的时间明显缩短。根据 Arrhenius 理论可知,化学反应的基础是分子之间的碰撞,环境温度的提高首先增加了分子的内能,另外也使分子运动的速率加快,也就增加了分子之间的碰撞几率。所以,环境温度的升高加快了爆炸反应速率,从而使爆炸达到最大压力所需时间缩短。

3.3 环境温度对最大爆炸压力的影响规律

运用式(4)对不同初始环境温度下瓦斯爆炸最大爆炸压力进行计算,并将计算结果与实验数据进行对比分析,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,最大爆炸压力的理论值和实验值均随着环境温度的增加逐渐减小,即最大爆炸压力和初始环境温度的倒数呈近似线性规律变化。实验值和理论值出现差别的原因在于,实验系统并非理想的绝热条件,爆炸容器内部通过容器壁与外界存在热交换,造成热量损失。

4 环境温度对最大压力上升速率的影响

最大压力上升速率是衡量瓦斯爆炸特性的一个重要参数,是描述瓦斯气体化学反应速率的重要参考。在本实验条件下,通过实验测试了体积分数为 9.8% 的瓦斯气体在不同环境温度条件下的爆炸最大压力上升速率值,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出最大压力上升速率基本在 20.83 和 23.80 MPa/s 之间跳跃变化,跳跃过程无明显规律呈现。考虑到实验条件的外界因素的影响,可以认为在本实验条件下(环境温度在常温至 473 K 之间)获得的最大压力上升速率随环境温度变化基本保持不变。图 6 为环境温度在 298 和 473 K 时的瓦斯爆炸压力变化曲线图,比较 298 和 473 K 环境温度条件下最大压力上升速率(压力曲线上时刻的最大斜率),可以看出,虽然压力曲线不同,但其最大压力上升速率值相同,均为 20.833 MPa/s。

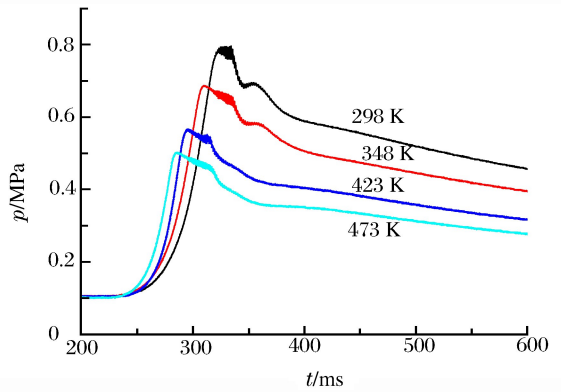


图 3 不同环境温度时瓦斯爆炸压力曲线对比
Fig. 3 Comparison of the gas explosion pressures at different environmental temperatures

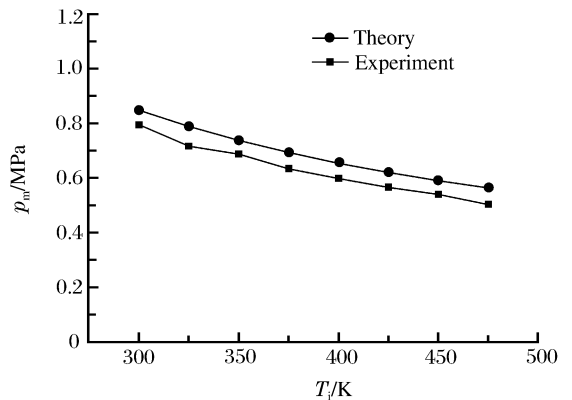


图 4 定容爆炸压力与实测最大爆炸压力的对比图
Fig. 4 Comparison of maximum explosion pressures between experiment and theory

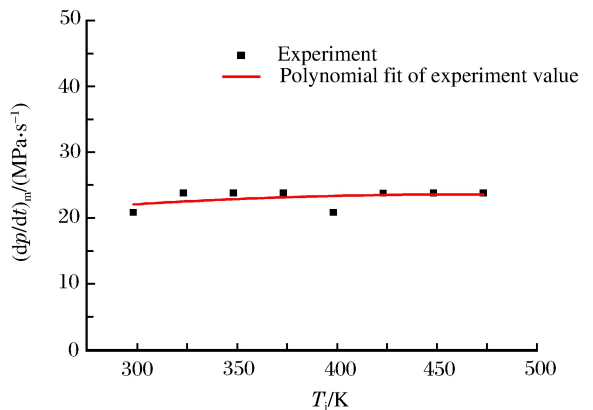


图 5 最大压力上升速率随环境温度的变化曲线
Fig. 5 The maximum pressure rise rate varied with the changes of initial temperature

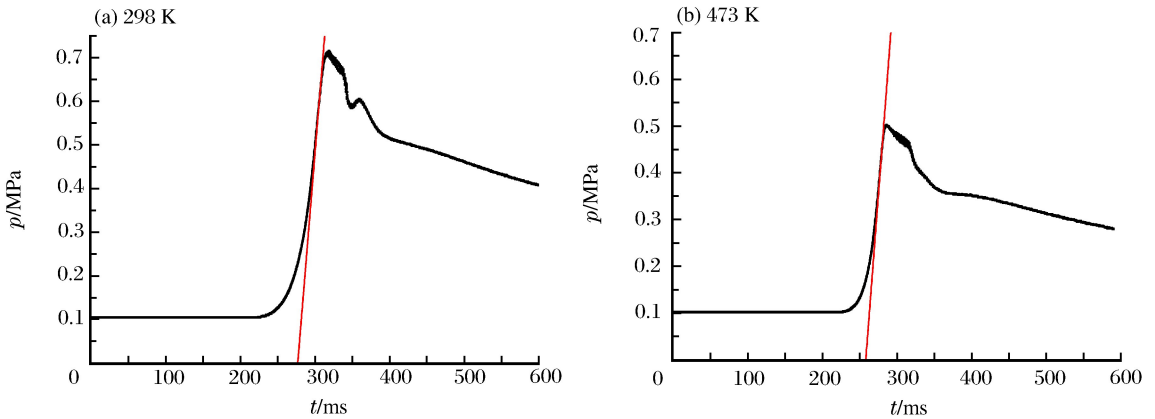


图6 不同环境温度条件下最大压力上升速率对比

Fig. 6 Comparison of the maximum pressure rise rates at different initial temperatures

5 结论

通过爆炸特性实验装置测试不同环境温度条件下体积分数为 9.8% 的瓦斯爆炸最大爆炸压力、最大压力上升速率的参数值,分析不同环境温度条件下的瓦斯爆炸特性得出如下结论:

(1)将理论计算和实验测定对比分析,得到了最大爆炸压力随环境温度的变化规律,即随着环境温度的增加,最大爆炸压力逐渐减小,最大爆炸压力和初始环境温度的倒数呈近似线性规律变化。

(2)随着环境温度的升高,化学反应速率增加,爆炸压力达到峰值所需的时间减少。在 298 K 环境温度下,爆炸完全反应达到最大爆炸压力的时间为 134.2 ms,而在 473 K 环境温度时,爆炸反应在 85.8 ms 时刻达到最大爆炸压力。

(3)瓦斯气体的最大压力上升速率随环境温度的升高呈非线性变化规律,在实验研究的温度范围内 (298~473 K),最大压力上升速率基本保持不变。

参考文献:

- [1] 李润之,司荣军. 瓦斯浓度对爆炸压力及压力上升速率的影响研究[J]. 西安科技大学学报,2010,30(1):29-33.
Li Run-zhi, Si Rong-jun. Gas concentration on the explosion pressure and pressure rise rate impact studies[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010,30(1):29-33.
- [2] Li Run-zhi, Si Rong-jun, Zhang Yan-song. Experimental study on impact of ignition energy on gas explosion limit [C]//International Conference on Mine Hazards Prevention and Control, 2010:275-279.
- [3] 李艳红,贾宝山,曾文,等. 受限空间初始压力对瓦斯爆炸反应动力学特性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(5):697-701.
Li Yan-hong, Jia Bao-shan, Zeng Wen, et al. Effect of initial pressure on kinetic characteristics of gas explosion in enclosed space[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2011,30(5):697-701.
- [4] 梁建军,杜扬,张延松,等. 瓦斯爆炸下限的温变特性试验研究[J]. 煤炭科学技术,2009,37(11):28-29.
Liang Jian-jun, Du Yang, Zhang Yan-song, et al. Experiment research on temperature variation features under lower limit of gas explosion[J]. Coal Science and Technology, 2009,37(11): 28-29.
- [5] 刘向军,陈昊. 初始压力对矿井瓦斯爆炸过程影响的理论研究[J]. 矿冶,2006,15(1):5-9.
Liu Xiang-jun, Chen Hao. Theoretical study on the effects of initial pressure on methane explosion in coal mine[J]. Mining&Metallurgy, 2006,15(1):5-9.
- [6] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996:161-185.

Influence of environmental temperature on gas explosion pressure and its rise rate^{*}

Li Run-zhi, Huang Zi-chao, Si Rong-jun

(*Chongqing Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corporation, Chongqing 400037, China*)

Abstract: Based on the theoretical analyses, a set of experimental equipment, which consisting of a 20-litre closed spherical container, a gas distribution system, an ignition system, a heating system and a data acquisition system, was adopted to experimentally investigate the effects of the different environmental temperatures on the gas explosion pressure and the maximum pressure rise rate. The experimental results show that when the other conditions remain unchangeable, the maximum explosion pressure gradually decreases with the increase of the environmental temperature and its attenuation is linear with the reciprocal of the environmental temperature. With the increase of the environmental temperature, the chemical reaction rate quickens, and the time that the explosion pressure reaches its peak shortens. The maximum pressure rise rate of the gas explosion is nonlinear with the increase of the environmental temperature, but it basically remains unchanged in the 298~473 K environmental temperature range.

Key words: mechanics of explosion; gas explosion; environmental temperature; explosion pressure; pressure rise rate

* Received 22 March 2012; Revised 3 August 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51274238)

Corresponding author: Li Run-zhi, runzhi_li@126.com