

doi: 10.3969/j.issn.1007-855x.2011.02.002

烷烃气体对甲烷爆炸下限影响的实验研究

张广,童敏明,任子晖,马晓

(中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221008)

摘要: 为确定烷烃类混合气体中甲烷的爆炸极限,设计了混合气体爆炸实验系统. 在实验系统中,采用高精度计算机配气系统配气,其所得到的混合气体含量误差小于1%,从而使气体爆炸下限更加精确. 运用该实验系统研究了丙烷、异丁烷混合气体对甲烷爆炸下限的影响. 实验结果表明:当混有丙烷的体积分数达到0.60%时,甲烷的爆炸下限可以降到1.35%;当异丁烷的体积分数约为0.30%时,甲烷的爆炸下限可降到1.80%. 研究结果对煤矿瓦斯监测的可靠预警具有重要意义.

关键词: 甲烷; 丙烷; 异丁烷; 爆炸下限; 计算机配气系统

中图分类号: TD712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2011)02-0006-04

Experimental Studies on Effect of Alkane Gases on Lower Explosion Limits of Methane

ZHANG Guang, TONG Min-ming, REN Zi-hui, MA Xiao

(College of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: In order to study the lower explosion limits of methane in the mixture of alkane gases, the experimental system for the explosion of methane mixed with alkane gases is established. The high precision computer gas distribution system is used in the experiments, in which deviation of the mixed gases is less than 1%, in order to make sure the accuracy of the lower limits of gas explosion. Using this system, lower explosion limits of methane in propane or isobutane are then determined. It is indicated through the results that the lower explosion limit of methane decreases to about 1.35% while the propane concentration is 0.60% and that when the concentration of isobutane comes to about 0.30%, methane's lower explosion limit is about 1.80%. The results of the studies have vital significance to the reliable warning of coal gas monitoring.

Key words: methane; propane; isobutane; lower explosion limit; computer gas distribution system

0 引言

在煤矿瓦斯成分中,甲烷占绝大多数,其中的可燃气体还有乙烷、丙烷、丁烷、戊烷、己烷及其异构体,以及氢气等^[1]. 在众多的瓦斯气体爆炸下限实验中,实验数据大部分是在微小点火能点火系统下得到的,所得到的下限数据为甲烷空气混合气体体积分数的5%. 但是,在实际的煤矿作业中,由于各种原因产生的点火能量有可能远大于其最小点火能,所以有必要在较大点火能的基础上进行实验,所得到的实验数据才对工程有更实际的价值;并且如果在甲烷中混入一些重烃组分的气体,会显著降低甲烷的爆炸下限. 在本文中,利用实验室构建的可燃性气体爆炸测试装置(计算机配气—哈特曼管爆炸装置),采用电极间电

收稿日期: 2010-09-15. 基金项目: 国家自然科学基金国际合作重大项目(60910005); 国家863计划项目(2007AA04Z332).

作者简介: 张广(1987-),男,在读硕士. 主要研究方向: 传感器及检测技术. E-mail: zhangg05283106@163.com

通信作者: 童敏明(1956-),男,博士,教授,博导. 主要研究方向: 传感器及检测技术. E-mail: jctmm@163.com

火花引燃的方式, 通过大量的爆炸性实验, 分析烷烃组分中的丙烷、异丁烷对甲烷爆炸下限的影响规律, 并且与理论值进行比较分析。

1 实验装置系统

本文设计的试验系统主要由高精度计算机配气系统及气体爆炸极限实验装置组成。

1.1 计算机配气系统

计算机配气系统(RCS2000-B型)框图如图1所示, 主要由计算机操控平台、控制箱、配气箱和原料气体四大部分组成, 系统的优点是其配气精度高($<1.00\%$), 线性误差小。实验所用原料气均为高纯气体, 49.5%的甲烷、99.9%的丙烷、99.9%的异丁烷和压缩空气。通过高精度计算机配气系统, 可以调节各组分气体的浓度比例, 实现多组分混合气体的配置。

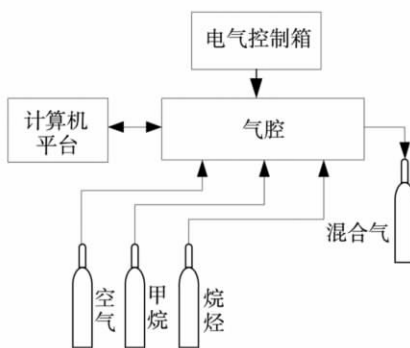


图1 计算机配气系统框图

Fig.1 Block of computer gas distribution system

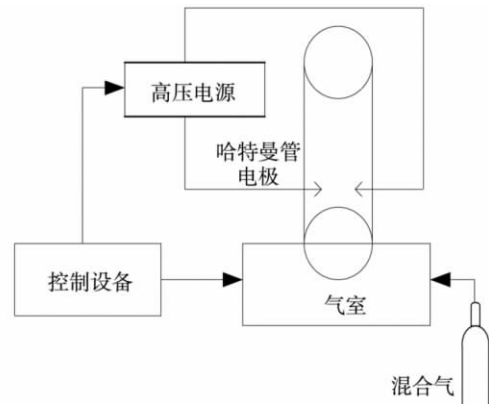


图2 气体爆炸装置框图

Fig.2 Block of gas explosion devices

1.2 气体爆炸装置

爆炸装置由爆炸室、控制装置和高压变压器三部分组成。该实验装置是根据德国标准 DIN51649^[2]设计, 如图2所示。

爆炸室为上部开口、垂直放置的玻璃管, 直径为6 cm, 高30 cm。采用感应电火花点火, 感应电极被固定在距管底6 cm的玻璃管中央, 电极长2 cm, 几何形状为针-针型, 电极间隙为5 mm。虽然现在各种气体爆炸下限值的标准渐渐趋向于20 L球形实验的实验结果, 但是哈特曼管装置和球形装置在测试气体爆炸下限时的误差是很小的, 如果球形装置在适当的压力上升速率(2%)选择数据时, 两者的数据是基本一致的^[3]。

2 实验方法及过程

首先设计各组分气体在混合气体中所占的浓度比例; 在计算机操作平台上调节各管路气体的流量, 从而配得预先设计的混合气体, 将气体冲入钢瓶中充分混合; 待气体混合充分后, 将混合气体通入爆炸装置中, 由哈特曼管控制装置引爆可燃气体。每次实验前, 用混合气体置换玻璃管(至少10次以上), 以排除玻璃管内上次实验的残留物。

试验采用观察法整理数据, 混合气体是否发生爆炸的判别方法是能否在完全黑暗的情况下观察到火焰离开产生火弧的电极间隙向外传播(火焰必须在没有火弧的情况下短时间存在)。每组实验至少进行十次, 记录能够点燃的混合气体浓度及最接近于点燃浓度的一组数据(不能点燃或者点燃一次), 求其算术平均值即是混合气体的爆炸下限值。

3 实验结果及分析

3.1 混合气体爆炸极限的计算

可燃性混合气体的爆炸极限, 可用 Le chatelier 计算公式^[4-7]求解, 如式(1):

$$L = \frac{100}{\sum \frac{X_i}{L_i}} \quad (1)$$

式中: L —混合气体爆炸上(下)限(%); L_i — i 组分的爆炸上(下)限(%); X_i — i 组分的体积分数(%).

甲烷和丙烷、异丁烷的单组分爆炸极限分别为 5.00%、2.10% 和 1.90%, 通过计算确定不同丙烷和异丁烷体积分数下, 甲烷爆炸下限的理论值, 如表 1 所示.

3.2 混合气体爆炸极限计算值与实际值的比较

在本文设计的实验系统的基础上, 首先做甲烷气体的爆炸下限与理论值进行比较, 以确定在下述的混合气体爆炸试验中使用相同的实验条件. 通过大量实验确定实验放电条件为放电时间 50 ms, 点火延时时间(即充气至点火的间隔时间) 5 s, 放电电压 120 V, 相对湿度 20%, 此时甲烷的实验爆炸下限体积分数为 4.30%.

在实验装置的参数和甲烷气体爆炸下限实验中相同的情况下, 由表 1 可得当丙烷的体积分数为 0.60%, 甲烷的体积分数为 3.60% 时, 此时有可能爆炸, 故作为一组实验数据, 并在试验中依次减小甲烷的含量来确定实验的混合气体爆炸下限值, 如表 2 所示.

爆炸下限定义为混合气体发生爆炸最低浓度与不发生爆炸的最高浓度的算术平均值, 故 0.60% 丙烷和甲烷混合气体中甲烷下限为 1.35%. 通过实验找出丙烷、异丁烷对甲烷爆炸下限影响的实验值如表 3 所示.

将丙烷和异丁烷对甲烷爆炸下限影响的实验值和根据 Le chatelier 经验公式计算的结果进行对比可得到图 3、4.

3.3 讨 论

由图 3、4 可以看出, 实验值总体上和理论值的变化趋势一致, 即随着烷烃气体体积分数的升高, 甲烷的爆炸下限逐渐降低; 但是实验得到的爆炸下限实验值比理论计算值低很多, 其原因是: ①强点火源使甲烷气体的爆炸下限降低了; ②容器的扩展性(容器的线性尺度、火焰传播方向), 因为随着容器的扩展性, 容器线性尺寸、形状与火焰传播方向的增大, 爆炸极限会增宽^[8]; ③混合气体密度与混合程度对爆炸作用也产生较大影响, 由于重力影响, 密度较小的气体会在上面发生分层, 而密度大的气体会沉淀于气体底部, 从而影响气体爆炸极限值; ④气体爆炸的发生以及爆炸产生的超压破坏很大程度上取决于可燃气体的种类, 气体反应活性越高, 分子扩散越快, 则气体爆炸产生的火焰速度和超压也越大, 其产生爆炸的可能性也越大. 可燃性气体反应活性为异丁烷 > 丙烷 > 甲烷, 故丙烷和异丁烷的加入, 使甲烷的爆炸极限变窄了.

根据链式反应机理, 爆炸性混合物与火源接触, 就会有活性分子生成而成为连锁反应的活动中心, 活性分子自由基与另一分子作用, 其作用结果会产生新基, 新基又迅速参与反应, 形成一系列的连锁反应, 例

表 1 混有丙烷、异丁烷的甲烷爆炸下限理论值

Tab. 1 The theoretical value of lower explosion limits of methane mixed with propane and isobutane

C ₃ H ₈ /%	甲烷爆炸 下限/%	C ₄ H ₁₀ /%	甲烷爆炸 下限/%
0.10	4.80	0.10	4.70
0.20	4.60	0.20	4.50
0.30	4.30	0.30	4.20
0.40	4.10	0.40	4.00
0.50	3.80	0.50	3.70
0.60	3.60	0.60	3.40
0.70	3.30	0.70	3.10
0.80	3.10	0.80	2.80
0.90	2.90	0.90	2.50
1.00	2.50	1.00	2.30

表 2 混有 0.60% 丙烷的甲烷气体爆炸试验统计表

Tab. 2 Statistics of explosion experiments of methane mixed with 0.6% propane content

C ₃ H ₈ /%	甲烷爆炸下限 /%	是否爆炸
0.60	3.60	☒
0.60	3.00	☒
0.60	2.50	☒
0.60	2.00	☒
0.60	1.50	☒
0.60	1.40	☒
0.60	1.30	×
0.60	1.20	×

注: ☒—爆炸; ×—不爆炸

表 3 混有丙烷、异丁烷的甲烷爆炸下限实验值

Tab. 3 The experimental value of lower explosion limits of methane mixed with propane or isobutane

C ₃ H ₈ /%	甲烷爆炸 下限/%	C ₄ H ₁₀ /%	甲烷爆炸 下限/%
0.10	3.30	0.10	3.00
0.20	2.85	0.20	2.55
0.40	2.55	0.30	1.80
0.60	1.35	0.50	0.85
0.80	0.85	0.70	0.55
1.00	0.30	0.80	0.35

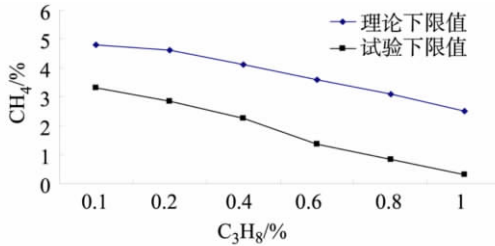


图3 混有丙烷的甲烷爆炸下限理论计算结果和实验结果比较

Fig.3 The comparison of the theoretical value and the experimental value of lower explosion limits of methane mixed with propane

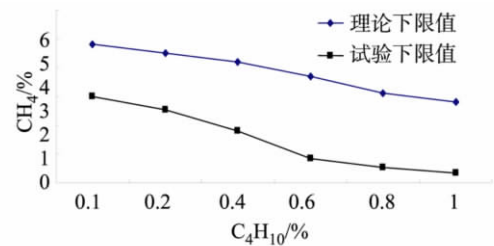


图4 混有异丁烷的甲烷爆炸下限理论计算结果和实验结果比较

Fig.4 The comparison of the theoretical value and the experimental value of lower explosion limits of methane

如自由基的产生: $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \cdot\text{CH}_3 + \text{HO}_2\cdot$, $\text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow 2\cdot\text{CH}_3$, 由于丙烷和异丁烷的气体反应活性更高, 使混合气体中产生更多的自由基, 从而使爆炸下限变低; 从宏观上看, 爆炸性混合物在一点上着火后, 热量及活性中心都向外传播, 促进相邻一层混合物发生化学反应, 然后该层又成为热量和活动中心新的源泉而引起新的相邻一层混合物的反应, 如此循环往复, 直到全部反应物均反应完为止. 通过实验也可观察到在爆炸时火焰是以球面的形式往各方面蔓延的.

4 结论

本文在建立了在计算机—哈特曼管爆炸试验装置系统的基础上, 对丙烷及异丁烷对甲烷爆炸下限的影响进行了大量实验. 根据实测与计算的结果, 可以得出如下结论:

1) 当丙烷达到 0.40% 时, 甲烷的爆炸下限已经下降到了 2.25%, 异丁烷达到 0.10% 时, 甲烷在体积分数 3.00% 时就可以点燃, 表明烷烃类气体对甲烷的爆炸下限影响是十分显著的, 故在实际设计工作当中, 应当将混合气体的爆炸下限报警设计的范围放得更宽;

2) 根据实验结果显示, 为确保安全, 在煤矿作业当中, 不但要实时监测甲烷的体积分数, 最好同时监测烷烃类气体的体积分数, 以确定在混合气体的含量在其爆炸下限之下;

3) 在同样条件下点燃混合气体时, 其火焰现象比单独做甲烷爆炸下限时更加明显, 可得出混合气体的爆炸危险性更高.

参考文献:

- [1] 董敏明, 张愉, 戴新联. 催化传感器对可燃性混合气体的分析[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 35-38.
- [2] 陈爱平. 动态爆炸极限的实验研究[J]. 消防科技, 1996(3): 2-6.
- [3] 黄金印, 张树旗. 两种标准试验方法测定的气体爆炸极限的比较[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999(A70): 51-55.
- [4] 许满贵, 徐精彩. 工业可燃气体爆炸极限及其计算[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(2): 139-142.
- [5] 刘彬. 有机可燃气体爆炸极限的推荐计算方法[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2007, 32(1): 119-124.
- [6] 田贯三, 于畅, 李兴泉. 燃气爆炸极限计算方法的研究[J]. 燃气与热力, 2006, 26(3): 29-33.
- [7] LU J, WANG C, NING J Q. Explosion Limits of Multi-composition Mixture Gas and Its Influence Factors Analysis[C]. Progress in Safety Science and Technology Volume 4: Proceedings of the 2004 International Symposium on Safety Science and Technology, Oct 25-28 2004, Shanghai, China.
- [8] 胡耀元, 周邦智, 杨元法, 等. H₂, CH₄, CO 多元爆炸性混合气体的爆炸极限及其容器因素[J]. 中国科技, 2002, 32(3): 35-39.