

油气对瓦斯爆炸的影响

张兰君, 李增华, 林柏泉, 赫永恒, 彭 飞

(中国矿业大学 安全工程学院 煤炭资源与安全开采重点实验室 江苏 徐州 221008)

摘 要:焦坪矿区是我国少有的煤油气共存矿区,曾多次发生重大煤矿安全事故,而油气是造成该地区瓦斯涌出量和爆炸危险性增加的重要原因。关于油气-瓦斯-空气混合气爆炸特性方面的研究并不多,为了考察油气的影响并结合矿区实际情况,选用正己烷作为油气的代表,利用自制的配气系统以及 20 L 爆炸实验装置进行实验。由于已有文献对油气-瓦斯混合气爆炸下限进行了研究,本文重点研究油气对爆炸威力以及瓦斯爆炸上限的影响。实验结果表明正己烷的加入增加了瓦斯的爆炸威力,如当正己烷浓度为 2%、甲烷浓度为 0.5%时就能发生爆炸并产生 0.89 MPa 的超高压,正己烷浓度为 2%时混合气的最大爆炸指数达到 9.41 MPa·m/s,超过了甲烷最大爆炸指数 5.5 MPa·m/s。将混合气爆炸上限的理论结果同实验结果进行对比发现二者并不完全符合,理论结果偏安全,而混合气爆炸最佳浓度同化学当量比浓度较为接近。图 4,表 4,参 10。

关键词:油气共存;爆炸上限;爆炸指数;最大爆炸压力;爆炸最佳浓度

中图分类号:TD712

文献标识码:A

文章编号:1672-9102(2009)01-0018-05

焦坪矿区位于陕西省铜川市、宜君、旬邑和耀县交界处,距铜川市约 37 km,矿区现有国有重点矿井 4 个,是设计能力年生产 4.5 Mt 的大型煤矿区。焦坪矿区也是我国少有的煤油气共存矿区之一,受油气的影响瓦斯涌出问题十分突出,并多次引发重大煤矿安全事故,如陈家山煤矿在 2001 年到 2004 年短短的三年之间就发生两起特大瓦斯爆炸事故,同油气的影响存在一定的关系^[1]。该矿区延安组含煤 4 层,自上而下分别为 1、2、3、4 号煤,其中 4-2 煤层为该地区主采煤层,属易自燃发火煤层,居延安组含油气岩系内,上有安定、直罗组含油气岩系,下有延长统含有油气岩系,油气可以沿着孔隙和裂缝渗入到煤层,无论是在岩层掘进巷道,还是在煤层回采过程中,伴随着油气的泄漏,产生大量有害混合气体,造成多起瓦斯燃烧、爆炸和油气喷出事故,给煤炭开采造成极大困难和危险^[2]。

目前在单一可燃气体爆炸方面已有许多研究成果^[3],但是多元气体爆炸研究尚不多,特别是对像油气这样的液体蒸汽同瓦斯以及空气混合气爆炸的研究

更是少之又少。为了进一步搞清楚油气对瓦斯爆炸产生的影响,本文选取了油气重要成分正己烷作为代表,利用 20 L 爆炸实验装置对正己烷-瓦斯-空气混合可燃气的爆炸特性进行研究分析,得出该混合气爆炸上限、最大爆炸压力、最大升压速率、爆炸特征值等有用的信息,为煤油气共存矿井瓦斯治理以及安全标准制定提供有力依据。

1 实验装置系统构建

1.1 配气系统

本实验装置是由配气系统和爆炸系统组成,配气系统如图 1 所示,它主要有气体钢瓶、油气发生装置、减压阀、稳压阀、稳流阀、流量计、混合气室以及连接气路等几个部分^[4]。在实验前首先要计算,根据计算结果进行配气。图中的钢瓶装载着可燃气体、空气等气体,阀门打开后气体从钢瓶中流出,经过减压阀、稳压阀、稳流阀汇入气体混合室,在气体混合室中充分混

收稿日期 2008-09-09

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221506) 国家自然科学基金项目(50534090)

作者简介 张兰君(1984-)女,江苏连云港人,硕士,主要从事安全、消防方面的研究。

合流入爆炸腔中。配气系统中的稳压阀、稳流阀能够稳定各管路中气体的压力和流量,保证配得气体达到所需浓度。除了可以配置气体可燃性混合物外,该配气系统还可以实现对可燃液体蒸汽进行配置,图1中的⑨是液态油气的蒸发器皿,主要是依据在一定温度下液体饱和蒸汽压不变这一原理,通过温度和流量的改变实现配气。为了保证配气的精度,采集配得的气体,利用 SPN 501 气相色谱仪对其进行检验。

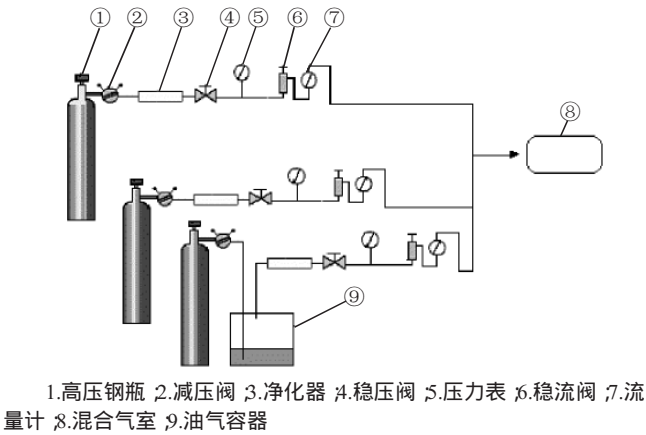


图1 配气系统图
Fig.1 Air distribution system

1.2 20 L 爆炸系统

图2是本实验的爆炸系统,该系统是按德国工程师协会 VD12263 标准设计制造,现已被 IEC 定为国际通用的爆炸实验装置,通过该系统可以对粉尘、可燃气体的爆炸特性进行测试^[5]。爆炸腔体是一个 20 L 的钢球,它由筒体、顶盖、底盖三部分组成,在筒体上开有观测孔,通过观测孔可以观察到内部气体爆炸现象。为了保证实验的安全,腔体上部还装有安全阀,当爆炸室内压力超过其最大承受压力能够自动卸压。

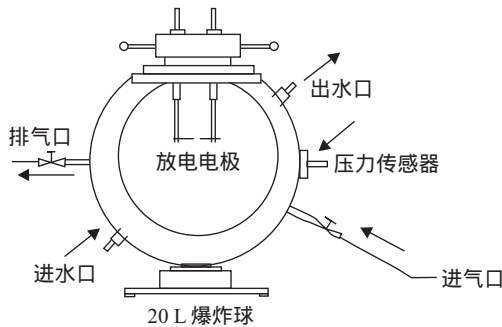


图2 20 L 爆炸腔体
Fig.2 20 L global explosion chamber

实验采用电极间放电火花点燃可燃气体。球型腔体内两个铜棒的上端用来连接高能电源的正负极,位于腔体中心处的铜棒末端接有一对尖-尖型放

电电极。电压在尖-尖处产生放电火花,从而引爆可燃气体。电极间距可以调节,实验时将电极间距离调为 2~4 mm 左右,电火花能量约为 13 J。

爆炸控制装置主要是对爆炸时点火能量以及时间、采样系统、系统安全等进行控制。数据采集系统主要是由压力传感器、PCI-1710 数据采集系统组成,通过它可以实现对压力信号的采集和处理等功能^[6]。

1.3 实验过程及方法

目前常用的瓦斯检测仪主要是针对甲烷气体,对其他的气体如油气等尚不能进行有效地检测,结合井下实际情况,为了更直观地考察油气的影响,本文采取的实验方法是:不同的条件下可燃气爆炸特性不同,首先对甲烷的爆炸特性进行实验,得出在本实验条件下瓦斯爆炸特性;当正己烷浓度为 0.5%、1%、2% 时加入甲烷进行实验,得出含有油气的瓦斯气体爆炸特性。通过对实验数据的分析以及同理论数据之间的对比得出油气对瓦斯爆炸的影响规律。实验步骤:设计各组分气体在混合气体中所占的浓度比例,根据各气体的浓度比例计算得到配气时通入各管路的气体流量,按计算流量值调节各管路气体的流量,气体在混合室内充分混合后通入爆炸室,待气体置换完毕后,触发点燃按钮引爆可燃气体,同时启动数据采集系统进行数据采集和记录。为了保证实验结果的准确性严格控制蒸汽发生器的温度并将所配气体利用气相色谱进行检验。参考美国材料试验学会标准 ASTM E681 和德国工业标准 DIN 51469,结合实验目测观察爆炸火焰燃烧情况和爆炸时的压力升高,选择 7% 及以上的压力升高作为爆炸极限数据。爆炸上限的取值采用“最大-最小”准则,即可燃气体的爆炸上限定义为发生爆炸的最低浓度和不发生爆炸的最高浓度的平均值^[7]。

1.4 压力曲线图

图3为甲烷浓度为 10% 时的爆炸压力曲线,横坐标是时间,纵坐标是压力,通过该曲线可以读出爆炸压力值、升压速率、爆炸指数等信息。从图中可以看出其爆炸基本符合定容爆炸规律,压力波形可以分为 3 个阶段:爆炸压力上升阶段,爆炸压力高值区以及压力衰减区。另外在压力衰减区还看到一个明显的负压区,从实验结果来看,当可燃气体浓度在化学当量比附近时产生的最大爆炸压力通常在 0.7 MPa 以上,此时在压力衰减区会发现负压区的存在,其原因可能是

爆炸混合物发生猛烈的爆炸，在爆炸膨胀后形成较强的负压和凝聚现象，然后压力缓慢上升为爆炸后压力^[8]。当甲烷浓度在爆炸上限附近时，最大压力值比较低，压力曲线上升缓慢，波形也比较宽。

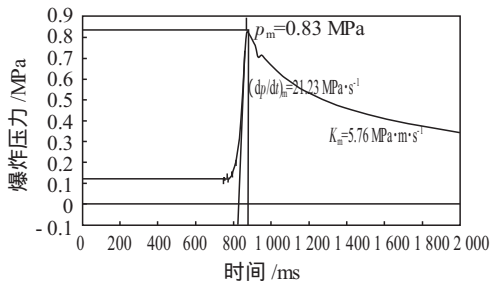


图3 $\varphi(\text{CH}_4)=10\%$ 时爆炸压力曲线

Fig.3 Explosion pressure cure of mixture with 10% CH_4 and Air

2 实验结果及其分析

2.1 甲烷 - 空气混合气爆炸实验

从甲烷浓度为 8%开始实验，之后逐步升高甲烷浓度，直到可燃气体不发生爆炸时停止实验，得到的实验结果如表 1 所示。

表 1 甲烷 - 空气混合气爆炸情况

Tab.1 The explosion situation of methane- air mixture

爆炸参数	$\varphi(\text{CH}_4)/\%$							
	8	9	10	11	12	13	14	15
P_m/MPa	0.73	0.81	0.83	0.80	0.75	0.58	0.14	-
$(dp/dt)_m/(\text{MPa/s})$	23.91	23.91	21.23	20.10	6.50	2.16	0.03	-
$K_m/(\text{MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	6.49	6.49	5.76	5.46	1.76	0.71	0.01	-

其中，爆炸压力 P_m 为可燃气体在某一浓度的最大爆炸压力，MPa；升压速度 $\left(\frac{dP}{dt}\right)_m$ 为可燃气体在某一浓度时的升压速度， $\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ；爆炸指数 K_m $K_m=\left(\frac{dP}{dt}\right)_m \times V^{1/3}$ ， $\text{MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

以上 3 个参数都是衡量爆炸危险程度的指标，容器的体积和形状对爆炸压力没有太大的影响，对最大压力上升速率影响较大，反应容器越大，其爆炸上升速率也越小，爆炸指数考察了容器体积对爆炸上升速率的影响，当条件一定时最大爆炸指数可以视为一个特定的物理常数，这就是常说的“三次方定律”，该定律已被国际标准 ISO6184 “ExplosionProtection System” 所采用，是衡量可燃气体爆炸强度的重要指标。

从甲烷的爆炸实验数据表 1 来看，本实验条件下得到的甲烷爆炸上限为 14.5%，同文献值点火能量为 10 J 时甲烷爆炸上限 14.2%基本吻合。当浓度为 10%

时爆炸压力、升压速率以及爆炸指数均达到最大值，因此 10%即为本实验条件下甲烷爆炸的最佳浓度，该数据同我国公安部消防局得出的 10.1%非常接近^[9]，这就表明利用该实验仪器得出的结果是较为准确的。从最大爆炸指数值来看甲烷的爆炸特征值通常为 $5.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，实验得出的值为 $6.49 \text{ MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，略高于理论数据，这说明本实验条件下甲烷 - 空气混合气产生爆炸威力很大，这可能和点火源、温度等条件不同有关。

2.2 正己烷 - 甲烷 - 空气混合气爆炸实验

正己烷浓度为 0.5%时从甲烷为 6%开始实验，逐渐升高甲烷浓度，直到可燃气体不发生爆炸时停止实验，得到实验结果如表 2 所示：

表 2 正己烷为 1%时甲烷 - 空气混合气爆炸情况

Tab.2 The explosion situation of 0.5% *n*- hexane- methane- air mixture

爆炸参数	$\varphi(\text{CH}_4)/\%$						
	6	7	8	9	10	12	13
P_m/MPa	0.76	0.84	0.80	0.81	0.58	0.21	-
$(dp/dt)_m/(\text{MPa/s})$	19.04	24.16	22.23	21.01	2.50	0.23	-
$K_m/(\text{MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5.17	6.56	6.03	5.43	0.68	0.06	-

正己烷浓度为 1%时从甲烷为 5%开始实验，逐渐升高甲烷浓度，直到可燃气体不发生爆炸时停止实验，得到实验结果如表 3 所示：

表 3 正己烷为 1%时甲烷 - 空气混合气爆炸情况

Tab.3 The explosion situation of 1% *n*- hexane- methane- air mixture

爆炸参数	$\varphi(\text{CH}_4)/\%$						
	5	6	8	9	10	11.5	12
P_m/MPa	0.77	0.89	0.83	0.84	0.54	0.20	-
$(dp/dt)_m/(\text{MPa/s})$	23.16	32.71	32.22	27.34	0.51	0.22	-
$K_m/(\text{MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	6.29	8.880.8	8.75	7.42	0.14	0.06	-

正己烷浓度为 2%时从甲烷 0.5%开始实验，逐渐升高甲烷浓度，直到可燃气体不发生爆炸时停止实验，得到实验结果如表 4 所示：

表 4 正己烷为 2%时甲烷 - 空气混合气爆炸情况

Tab.4 The explosion situation of 2% *n*- hexane- methane- air mixture

爆炸参数	$\varphi(\text{CH}_4)/\%$						
	0.5	1	2	3	4	5	6
P_m/MPa	0.89	0.91	0.87	0.78	0.54	0.25	-
$(dp/dt)_m/(\text{MPa/s})$	39.78	34.66	33.93	27.09	1.24	0.26	-
$K_m/(\text{MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	6.29	9.41	9.21	7.35	0.34	0.07	-

从表 2~ 表 4 可以得出正己烷浓度为 0.5%、1%、2%时混合气体爆炸上限所对应的甲烷浓度分别为 12.5%、11.75%、5.5%。目前混合气体爆炸极限多采用 Le Chaterlier 准则进行计算，根据甲烷爆炸上限浓度 14.5%、正己烷爆炸上限浓度 7.5%就可以算得正己烷，

甲烷、空气混合气理论爆炸上限浓度^[10]。根据计算得出正己烷浓度为 0.5%、1%、2% 时甲烷的理论浓度为 13.5%、12.5%、10.6%。实验值比理论值要低,这说明 Le Chaterlier 理论与实际有一定的误差,Le Chaterlie 得出的结果偏安全。从表 2~表 4 中可以得出正己烷浓度为 0.5%、1%、1.5% 时混合气体达到最佳浓度时甲烷的浓度分别为 7%、6%、1%,根据化学平衡方程可以算出正己烷浓度为 0.5%、1%、2% 时甲烷的化学当量浓度分别为 7.87%、5.11%、0.72%,可以看出实验得出的混合气体最佳浓度值接近化学当量浓度。

2.3 对比分析

将所得数据中相同甲烷浓度、不同正己烷浓度的最大压力值进行对比可以得到图 4:

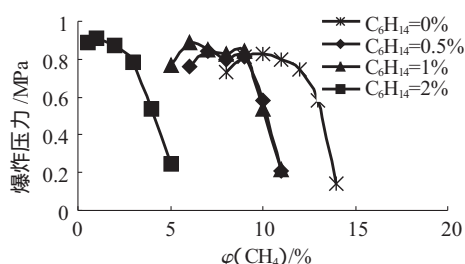


图 4 压力对比图

Fig.4 Pressure comparison diagram

从图中可以看出随着正己烷浓度的增加,甲烷爆炸浓度范围向左移,而最大爆炸压力也略有升高,这表明原来不具有爆炸性的甲烷-空气混合气当加入正己烷后爆炸危险性大幅高,如当甲烷浓度为 0.5% 时甲烷-空气混合气并不能爆炸,当加入 2% 的正己烷后甲烷-正己烷-空气混合气发生了剧烈的爆炸,产生了接近 9 个大气压的超压。而在井下的仪器是针对瓦斯中甲烷进行设计的,并不能有效地检测出油气,一旦油气泄露、喷出、混入瓦斯气体中,将可能会造成巨大的危害。

从实验结果中还能看出虽然各组的最高压力值差别不是很大,如甲烷-空气混合气的最高爆炸压力值为 0.83 MPa,正己烷 2% 时混合气的最高爆炸压力值为 0.91 MPa,但是最大爆炸指数却有显著区别,如当混合气体不含正己烷时最大爆炸指数为 $6.19 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,当正己烷浓度为 0.5%、1%、2% 时混合气的最大爆炸指数分别为 $6.56 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $8.88 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $9.41 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,而瓦斯气体的最大爆炸指数通常为 $5.5 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,这表明随着正己烷的加入爆炸强度迅速增加,爆炸威力急剧增大。

3 结论

(1) 在 20 L 爆炸容器中,当可燃气体浓度在化学当量比附近时产生的最大爆炸压力通常在 0.7 MPa 以上,此时在压力衰减区会发现负压区的存在,原因可能是爆炸混合物发生猛烈的爆炸,在爆炸膨胀后形成较强的负压和凝聚现象,然后压力缓慢上升为爆炸后压力。

(2) 利用 Le Chaterlier 法则对正己烷-甲烷-空气混合气的爆炸上限进行理论计算,发现理论结果同实验结果并不完全符合,理论结果偏安全,实验测得正己烷浓度为 0.5%、1%、2% 时混合气达到爆炸上限时甲烷浓度分别为 12.5%、11.75%、5.5%。

(3) 实验得出正己烷浓度为 0.5%、1%、2% 时混合气体达到最佳浓度时甲烷的浓度分别为 7%、6%、1%,它同理论计算得出的化学当量比浓度 7.87%、5.11%、0.72% 较为接近。

(4) 随着正己烷的加入,最大压力指数迅速增加,如正己烷浓度为 2% 时混合气的最大爆炸指数达到 $9.41 \text{ MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,大大超过了甲烷最大爆炸指数,这表明油气的加入使得混合气体爆炸强度增强,爆炸威力急剧增大。

(5) 正己烷的加入使得甲烷的爆炸范围向左移,爆炸压力也有所增高,这表明原来不具爆炸性的瓦斯气体当混入油气之后爆炸危险性急剧增大,当正己烷浓度为 2%、甲烷浓度为 0.5% 时就能产生 0.89 MPa 的超高压,目前井下尚缺乏对油气的有效检测,一旦油气混入瓦斯气体中就有可能产生巨大的危害。

另外本文选用正己烷作为油气代表进行实验,仅是初步得出油气对瓦斯爆炸的影响规律,由于井下瓦斯成分十分复杂,除了油气成分以外,还含有乙烷、丙烷、丁烷等重烃气体以及氢气等可燃气体成分,因此需要进一步进行大量地实验研究,以求能更好地应用于实际瓦斯灾害治理和预防中。

参考文献:

- [1] 封华,徐永亮,任万兴.焦坪矿区油气伴生特性及其对瓦斯爆炸极限的影响[J].矿业快报,2007(7):53-55.
FENG Hua, XU Yong-liang, REN Wan-xing. The character of oil accompany with gas and the influence on explosion limits of gas in jiaoping mining area [J]. Express Information of Mining Industry, 2007 (7): 53-55.
- [2] 王生全.焦坪南部煤油气共生矿区的瓦斯地质特征及瓦斯预测研究[D].西安:西安科技大学,2006.

- WANG Sheng-quan. Study on gas-geology and gas prediction in the coal-oil-gas association mining area of southern Jiaoping [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2006.
- [3] 黄超, 杨绪杰, 陆路德, 等. 烷烃高温下爆炸极限的测定[J]. 化工进展, 2002, 21(7): 496-498.
- HUANG Chao, YANG Xu-jie, LU Lu-de, *et al.* Explosion limits measurement of paraffin under high temperature [J]. Chemical Industry and Engineer Progress, 2002, 21(7): 496-498.
- [4] 潘尚昆, 李增华, 林柏泉, 等. 氢气及重烃组分对瓦斯爆炸下限影响的实验研究 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版), 2008, 23(3): 23-27.
- PAN Shang-kun, LI Zeng-hua, LIN Bo-quan, *et al.* Experimental studies on effect of hydrogen and heavy hydrocarbon on lower explosion limits of gas [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2008, 23(3): 23-27.
- [5] 周从章, 曾庆轩, 胡秀峰, 等. 工业粉尘云爆炸下限的实验研究[J]. 火工品, 2002(2): 19-21.
- ZHOU Cong-zhang, ZENG Qing-xuan, HU Xiu-feng, *et al.* Experimental studies of lower explosible limit of industrial dusts [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2002(2): 19-21.
- [6] 李增华, 林柏泉, 张兰君, 等. 氢气的生成及其对瓦斯爆炸的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2): 147-151.
- LI Zeng-Hua, LIN Bai-quan, ZHANG Lan-jun, *et al.* Effects of hydrogen production on gas explosion [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(2): 147-151.
- [7] 陈爱平. 动态爆炸极限的试验研究 [J]. 消防科学与技术, 1996(3): 2-6.
- CHEN Ai-ping. The research on dynamic state explosion limits [J]. Fire Science and Technology, 1996(3): 2-6.
- [8] 陆美丽. H₂、CO 和 CH₄ 多元爆炸性混合气体支链爆炸特性和防爆安全指标[D]. 金华: 浙江师范大学, 2005.
- LU Mei-li. Characteristics and explosion-proof safety guideline of branch-chain explosion of ploybasica mixture gas containing H₂, CO and CH₄[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2005.
- [9] 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.
- XU Mang-gui, XU Jing-cai. Explosion Limits and Calculated Methods of Combustible Gas [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(2): 139-142.
- [10] 周心权, 吴兵. 矿井火灾救灾理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- ZHOU Xin-quan, WU Bing. The theory and practice of fire disaster in mine[M]. Beijing: China Press of Coal, 1996.

The influence of oil gas on gas explosion

ZHANG Lan-jun, LI Zeng-hua, LIN Bai-quan, HE Yong-heng, PENG Fei

(State Key Laboratory of Coal Resource & Mine Safety, School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract : Jiaoping mining area is a rare mining region in China where oil and gas coexist where the serious safe accidents happen frequently. The oil is main factor which causes out-flow and explosion hazard of gas become serious. But the researches on explosive characteristic of oil-methane-air mixtures are few. Based on the mining reality this article chooses the *n*-hexane to represent oil gas. The experiments were made using self-made air distribution system and 20 L global explosion installation to investigate the influence of oil gas on gas explosion. The article researched the influence of oil on gas explosion low limits^[1], this article will focus on the influence of oil on explosion power and upper explosive limits. The results show that the *n*-hexane can increase the explosive power greatly. The mixture which contains 2% *n*-hexane and 0.5% methane can explode immediately and produces 0.89 MPa high pressure. When *n*-hexane concentration is 2% the maximum explosion index of mixture can get 9.41 MPa·m·s⁻¹ which greatly exceeds the methane maximum explosion index 5.5 MPa·m·s⁻¹. There are some different between the experimental results and theoretical values of upper explosive limit, the theoretical values trend safety. The explosion optimum concentration is close to the stoichiometric ratio. 4figs. 4tabs. 10refs.

Key words : oil and gas coexist ; upper explosive limit ; explosion index ; maximum explosion pressure ; explosion optimum concentration

Biography ZHANG Lan-jun, female, born in 1984, M.E., safety and fire technique.