

惰性及特种可燃气体对甲烷爆炸特性的影响实验及分析

任韶然¹ 李海奎¹ 李磊兵² 张亮¹ 王芳³

1. 中国石油大学(华东) 2. 中国石油集团长城钻探工程公司工程技术研究院 3. 辽宁石油化工大学

任韶然等.惰性及特种可燃气体对甲烷爆炸特性的影响实验及分析. 天然气工业, 2013, 33(10): 110-115.

摘 要 天然气开采和集输过程中的防爆问题一直是安全控制的重点, 常见的特种可燃气体(H_2 、 H_2S 和 CO)及惰性气体(CO_2 和 N_2)对天然气的爆炸特性有很大影响。为此, 通过实验和理论模型, 分析了惰性气体和特种可燃气体对 CH_4 爆炸特性的影响规律。结果表明: ①随着惰性气体含量的增加, CH_4 爆炸极限范围变窄, 爆炸的临界氧含量值增大, 爆炸的危险性降低, 其中 CO_2 比 N_2 具有更好的爆炸抑制效果; ②随着特种可燃气体含量的增多, 混合可燃气体的爆炸极限会向所添加特种气体的爆炸上下限逼近, 明显扩大了 CH_4 的爆炸极限范围, 降低了发生爆炸的临界氧含量, 增加了爆炸风险; ③在有惰性气体存在的条件下, 温度、压力的上升也会增加 CH_4 的爆炸风险。该研究成果可应用于气田、煤田开发和天然气集输过程中的防爆工艺, 预防和降低天然气爆炸风险, 保证安全生产。

关键词 惰性气体 特种可燃气体 甲烷 混合 爆炸极限 临界氧含量 气田开发 风险 安全

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.10.019

An experimental study of effects of inert and special flammable gases on methane's explosion characteristics

Ren Shaoran¹, Li Haikui¹, Li Leibing², Zhang Liang¹, Wang Fang³

(1. China University of Petroleum - East China, Dongying, Shandong 266580, China; 2. Engineering & Technology Research Institute of Greatwall Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Panjing, Liaoning 124000, China; 3. Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 1, pp.110-115, 10/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The explosion-proof issue has been an emphasis in safety control in the processes of gas production and storage/transportation. Inert gases and special flammable gases have great effects on the explosion characteristics of natural gas components. In this study, experiments and theoretical modeling were made in order to clarify the influence of CO_2 , N_2 , H_2S , H_2 and CO on the explosion limits of CH_4 and an air mixture. The following results are achieved. (1) With the increase of inert gas content (CO_2 , N_2) in CH_4 and air mixtures, the methane's explosive limit range narrows down and the critical content of oxygen improves, which implies that the risk of explosion is mitigated. In addition, CO_2 has a better explosion suppression result than N_2 . (2) With the increase of special flammable gases (H_2S , H_2 and CO), the explosion limit of the mixed gases will be close to the upper and lower limits of the added specific inflammable gases, thus the methane's explosion limit range is extended conspicuously and the critical content of oxygen is reduced, which implies that the explosion risk increases. (3) Under the condition of the existence of inert gases, the rise of temperature and pressure will also increase the explosion risk of CH_4 and an air mixture. This study provides reference for the research of explosion-proof technologies in the process of gas or coal field development and natural gas transportation in order to prevent and mitigate the explosion risk and thereby guarantee the safe production especially in natural gas sector.

Key words: inert gas, special inflammable gas, methane, mixture, explosion limit, critical content of oxygen, gas field development, risk, security

基金项目:教育部创新团队发展计划“复杂油藏开发和提高采收率的理论与技术”(编号:IRT1294)。

作者简介:任韶然, 1960 年生, 教授, 博士生导师; 1982 年毕业于原华东石油学院; 主要从事注空气提高采收率、 CO_2 地质埋存、水合物抑制和开采研究工作。地址: (266580) 山东省青岛市经济技术开发区长江西路 66 号。电话: 13954618831。E-mail: rensr@hdpu.edu.cn

通信作者:李海奎, 1990 年生, 硕士研究生; 主要从事注气提高采收率研究工作。地址: (266580) 山东省青岛市经济技术开发区长江西路 66 号。电话: 15610500319。E-mail: lihaikuiupc@hotmail.com

中国陆上天然气勘探开发正处于快速发展时期,非常规天然气作为常规天然气的重要补充,其开发利用也正在起步^[1-3]。在开发过程中,可燃气体与空气混合,在一定的条件下可能发生爆炸事故。在一些特殊气藏中, H_2S 和 CO_2 等特种气体含量很高,如罗家寨气田天然气中 H_2S 含量较高(5.44%~10.41%),川东北高酸性气田中 H_2S 和 CO_2 的含量超过了 20%^[4]。研究结果表明^[5-6],可燃气体组分、惰性气体组分、温度、压力等因素都对可燃气体的爆炸特性有很大影响。特别是 H_2S 、 H_2 和 CO 等可燃气体与天然气的爆炸极限有比较明显的差别,若混合可燃气体中这些组分含量较高,混合气体的爆炸极限和爆炸风险会发生很大变化。另一方面,惰性气体(CO_2 和 N_2)的存在,对爆炸具有一定的抑制作用。因此,分析这些特种可燃气体和惰性气体对天然气混合物爆炸特性的影响对安全防爆具有一定指导意义。

笔者通过爆炸实验和爆炸理论模型,分析了惰性气体和一些特种气体对天然气(主要是甲烷)和空气混合物爆炸特性的影响规律。

1 实验设备和方法

1.1 实验设备和装置

实验所用的爆炸实验装置由爆炸容器、配气装置、点火装置、控温控压及安全控制系统 4 个部分组成。爆炸容器是整个实验系统的核心部件,其形状和大小将直接影响气体爆炸特性参数的测试结果。从爆炸原理上讲^[7],球形容器点火位置更容易控制在整个容器的中心,但是球形容器加工制作比较困难,因而使用有一定局限性。在实验误差范围内等高圆柱体与球形容器的测试结果很接近^[5],而且圆柱形容器更容易加工,同时在油气田生产中注气井、生产井和管线多为圆柱体,因而采用圆柱体爆炸容器与实际更为接近。本实验中采用了圆柱形的爆炸容器,其长度和直径比约为 4:1。

1) 爆炸容器:由耐压不锈钢制造,圆柱形,最大有效容积为 2.24 L,内置活塞,可通过移动活塞对容器内气体加压。最大耐压 70 MPa,可以确保 5 MPa 下实验的安全性(爆炸瞬间压力为初始压力的 3~10 倍)。

2) 配气装置:由 CO_2 、 CH_4 、空气、 O_2 、 N_2 等气体钢瓶以及真空泵组成。采用分压比来配置混合气体。

3) 点火装置:采用 GDH-10 高能点火装置(西安中慧热工技术有限公司提供),火花频率 6 次/s,可以形成连续的电火花,火花能量为 10 J,远大于实验中相

关可燃气体的最小点火能量。

4) 控温控压及安全控制系统:压力测量,采用不同量程的压力表(0~6 MPa, 0.25 级;0~100 MPa, 0.4 级)和压力传感器(0~1 MPa)进行气体爆炸的初始压力和爆炸后压力的测试;温度控制,通过外置加温套对爆炸容器系统进行加热,温度控制范围为 0~150 °C;爆炸安全控制,爆炸容器系统装有安全泄压阀,压力过高会自动卸压。

1.2 实验方法

天然气中的甲烷通常被认为是最具爆炸风险的气体(因为其爆炸的临界氧含量最低)。因此,本实验用甲烷来代表天然气可燃气体。实验中所用甲烷(99.9%)、氮气(99.9%)、二氧化碳(99.9%)和空气等气体由济南德洋特种气体有限公司提供。

1.2.1 实验测试方法

实验前先检查装置的气密性,对爆炸容器抽真空,然后根据道尔顿气体分压定律通过分压法进行配气^[8],并计算混合气体中氧气、甲烷及其他气体的浓度。采用色谱分析和氧气测试仪进行气体抽样测试,测试结果表明,实验压力下(0~2 MPa)的配气误差在可接受范围内(小于 2%)。

实验中采用逐步逼近法进行爆炸极限和临界氧含量的测试。逐步充填一种气体(计算混合物的组分)点火试爆(如果没发生爆炸,每次最少点火 10 次),直到发生爆炸,记录爆炸时的气体组分和最接近的未爆炸时的气体组分,取两者的平均数即为实验所得数据。每次实验后首先要抽真空,再用湿度低于 30% 的清洁空气清洗爆炸装置 2~3 次,点火电极若有污染应及时清理,确保实验条件的可比性。

测爆炸下限时,气样的增加量每次不大于 10%;测爆炸上限时,气样减少量每次不小于 2%。

1.2.2 爆炸判定方法

对某一浓度气体进行点爆实验时,通过高压放电点火后压力和温度的变化来确定是否发生爆炸。爆炸时,爆炸容器内压力迅速上升(实验观察的最大爆炸压力可为气体混合物初始压力的 3~10 倍^[9]),系统内温度也急剧升高(高为初始温度的 3~5 倍)。

2 实验结果和模型分析

2.1 惰性气体对爆炸极限的影响

爆炸混合气体中不燃烧的惰性气体(如 N_2 、 CO_2 、Ar 和 He 等)的存在会压缩混合气体的爆炸极限范围。鉴于气田开发实际状况,主要考察 CO_2 和 N_2 对爆炸极限的影响。

维持20℃、0.4 MPa的温度压力条件,在甲烷—空气的混合组分中,逐渐加入CO₂或N₂,进行点火爆炸实验,考察CO₂或N₂对爆炸特性(爆炸极限、临界氧含量)的影响规律。实验结果如图1所示。

王华等在煤矿开采过程瓦斯防爆安全的研究中曾得出与图1(a)所示的类似结果^[10]。

由于空气的主要组成是氮气(79%),图1(a)中所指的氮气含量并不包括这一部分氮气。而实际应用中气体组分分析测出的氮气含量是指混合气体中氮气的总含量。故将图1(a)中氮气含量转换成氮气总量,对甲烷爆炸极限的影响重新作图,结果如图1(c)所示。

从图1可以看出,惰性气体(CO₂/N₂)含量对甲烷—空气体系的爆炸特性有着非常大的影响:随着混合气体中惰性组分含量增多,爆炸上限明显下降,爆炸下限缓慢上升,临界氧含量明显上升,爆炸极限范围明显变窄,爆炸风险显著降低。惰性组分含量增加到一定值后,爆炸上限和爆炸下限就会相交于一点,称之为爆炸极限临界点。此后继续增加惰性气体的含量,则无论怎么改变混合气体中甲烷的体积分数,都不会发生爆炸。爆炸上下限包络内的一尖形半岛区域即为爆炸区域或爆炸极限范围。

在N₂影响实验中,爆炸上下限在加入的N₂浓度达到31.3%(即N₂在甲烷和空气混合物中的总含量为82%)时重合,此时的甲烷爆炸极限临界值在6%左右;在CO₂影响实验中,甲烷和空气混合物的爆炸上下限在加入的CO₂浓度达到22.1%时重合,此时的甲烷爆炸极限临界值为6.8%左右,即当甲烷混合物中CO₂浓度超过22.1%时,便不会发生爆炸,这对于利用CO₂灭火和防止爆炸工艺的设计具有指导意义。

CO₂比N₂的实验结果表明,加入CO₂后,混合气体的爆炸上限下降更快,爆炸下限上升更快,且临界氧含量上升趋势更快。在加入相同体积的情况下,加入CO₂后混合气体爆炸上限均比加入N₂后要低,爆炸下限比加入N₂后要高,临界氧含量值也比加入N₂

后要高。也就是说和N₂相比,CO₂具有更好地抑制爆炸作用,更有利于降低生产安全过程中的爆炸风险。

有关惰性气体对爆炸影响实验结果及机理可解释如下:在混合可燃气体中充注惰性气体,使可燃气体浓度及氧气浓度降低,降低了H、O、OH和CH₃等活性自由基的浓度。惰性气体作为稳定的第三体分子,会与活性自由基或自由原子发生多元碰撞,自由基的能量将转移到惰性气体分子上,与高活性的自由基结合成为低活性的稳定分子,导致链式反应活化中心浓度的降低,链式反应进程被减缓甚至被中断,最终使得混合可燃气体点火、燃烧和爆炸受到抑制^[11]。由于CO₂较为“活泼”,除参与多元碰撞反应外,还可能参与其他链式反应^[12],而N₂(化学惰性大)则不参与其他链式反应,这也是CO₂的抑燃、抑爆能力高于N₂的原因。惰性气体对爆炸上限影响较大,而对爆炸下限影响相对较小。这是因为在爆炸下限附近,氧气含量相对较高,即氧气对燃烧和爆炸反应来说是“过量的”,因而氧含量的相对减少,对爆炸下限影响不太明显;而在爆炸上限附近,氧气含量是相对“不足的”,惰性气体浓度稍微增加,氧含量浓度稍微减少,就会对爆炸上限产生很大影响,导致爆炸上限的下降相对较大。

2.2 特种可燃气体对爆炸极限的影响

气田(尤其是一些特殊气藏,如含硫气藏)产出的气体中,除了常见的轻烃组分外,经常还会存在一定量的特种可燃气体,如H₂S、H₂和CO等,其中H₂和CO的含量普遍较低。这些气体的爆炸极限实验和文献值与常见烃类气体进行列表对比(表1)^[13-14]。

从表1可以看出,与气田常见烃类相比,H₂S、H₂、CO 3种气体的爆炸极限范围宽很多。因此,当甲烷—空气中掺有这些气体时,爆炸极限将发生比较明显的变化。万成略、汪莉在对焦炉煤气(主要成分为H₂、CH₄和CO)爆炸研究中^[15],考察了H₂和CO的作用。混合气体的爆炸极限可以通过通用的理查特里(Lechteilier)公式^[16]求出。

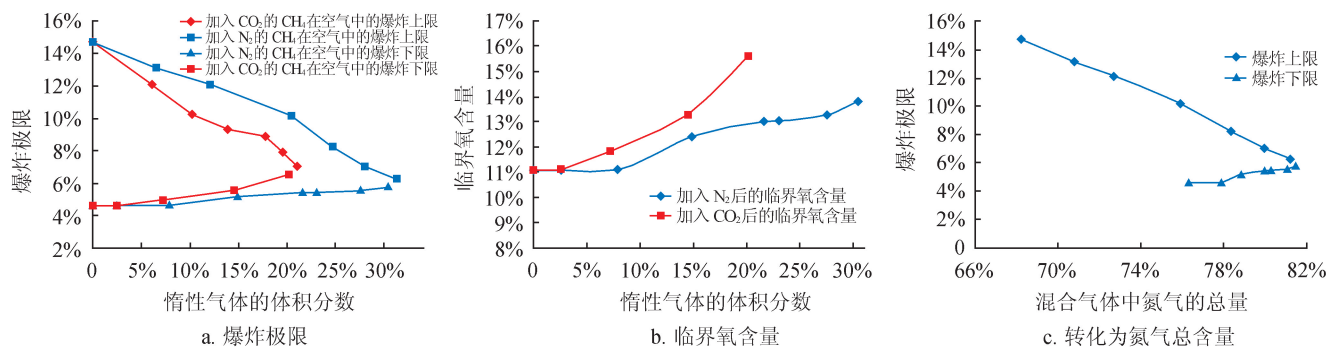


图1 惰性气体对甲烷—空气体系爆炸特性的影响图

表 1 气田常见可燃气体爆炸极限表

气体种类	甲烷	乙烷	丙烷	H ₂	H ₂ S	CO
爆炸下限	5%	3%	2%	4%	4.3%	12.5%
爆炸上限	15%	15.5%	9.5%	75%	45.5%	74.2%
临界氧含量	10%	10.5%	10%	2%	6.45%	6.25%

$$C_{\min} = \frac{100}{\frac{V_1}{C_1} + \frac{V_2}{C_2} + \frac{V_3}{C_3} + \cdots + \frac{V_n}{C_n}}$$

式中 $C_{\min}$ 为多组分可燃性混合物的爆炸极限; $V_1, V_2,$

$V_3, \cdots, V_n$ 为各组分在混合气体中的体积分数; $C_1, C_2, C_3, \cdots, C_n$ 为各组分气体的爆炸极限。

由于 H₂S 实验条件的限制, 可以通过理查特里公式计算分析甲烷—空气系统中添加不同浓度 (0~20%) 的 H₂、H₂S、CO 时对气体混合物爆炸极限的影响, 计算结果如图 2 所示。

计算结果表明, 在甲烷—空气系统中添加 H₂、H₂S 时, 混合气体的爆炸下限有所下降, 而加入 CO 时爆炸下限有所上升。对照表 1 中可燃气体的爆炸下限值可知, H₂ 和 H₂S 的下限值都比甲烷低, 而 CO 的高

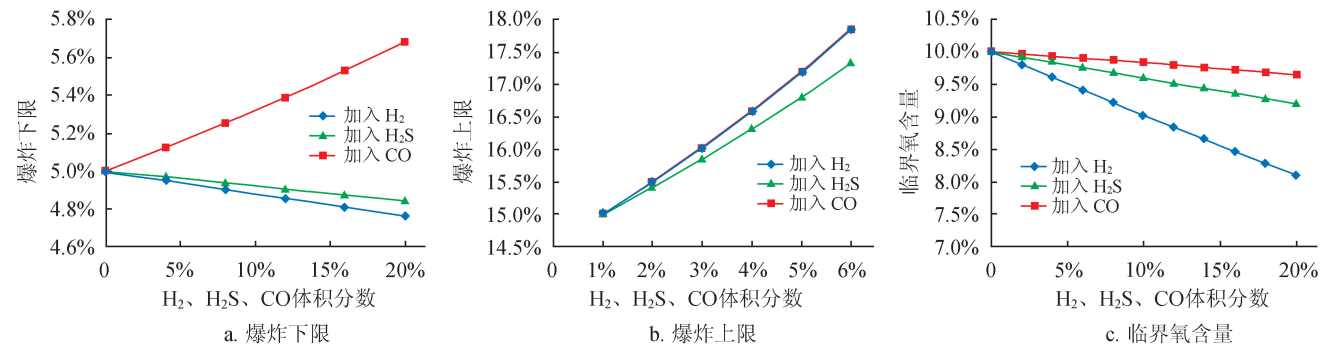


图 2 添加 H₂、H₂S、CO 对甲烷爆炸特性的影响图

于甲烷, 所以其影响规律显而易见。当混合气体中 H₂、H₂S 和 CO 的浓度从 0 增加到 20% 时, 混合可燃气体的爆炸下限从 5% 分别变为 4.76%、4.84% 和 5.68%; 当 H₂、H₂S 和 CO 含量增多时, 混合气体的爆炸上限明显上升, 显然, 这是因为这 3 种气体的爆炸上限都远远要高于甲烷的爆炸上限 (15%)。当混合气体中 H₂、H₂S 和 CO 的浓度从 0 增加到 20% 时, 混合可燃气体的爆炸上限从 15% 分别变为 17.86%、17.32%、17.85%; 从图 2 可以看出, H₂、H₂S 和 CO 这 3 种气体的增多, 会明显降低混合气体爆炸所需的临界氧含量, 增加爆炸风险。3 种气体中, H₂ 的加入使混合气体的爆炸范围增加较大, 临界氧含量下降也最大, 最具有危险性。H₂ 主要存在于煤气和炼厂气体中, 在气田中含量很低。在气田开发中, 遇有酸性气体 H₂S 时, 在考虑爆炸风险的同时, 还需要考虑其毒性对安全生产的影响。

2.3 温度、压力条件对爆炸极限的影响

维持惰性气体 (N₂) 含量为 70%, 甲烷为可燃性气体, 研究在 0.4 MPa 压力下温度 (可燃混合气体的初始温度) 对可燃气体爆炸极限的影响规律, 以及在 20 °C 恒温条件下压力 (可燃混合气体的初始压力) 对可燃气体爆炸极限的影响规律。实验结果如表 2、3 所示。

表 2 惰性气体存在时温度对甲烷爆炸极限的影响表

温度/°C	20	40	60	80
爆炸下限	4.86%	4.86%	4.78%	4.74%
爆炸上限	14.74%	15.01%	15.39%	15.78%

表 3 惰性气体存在时压力对甲烷爆炸极限的影响表

压力/MPa	0.2	0.3	0.4	0.8	2
爆炸下限	4.92%	4.86%	4.86%	4.82%	4.74%
爆炸上限	14.3%	14.65%	14.74%	15.57%	16.58%

从表 2、3 中可以看出, 混合气体的爆炸初始温度、压力对甲烷的爆炸极限有一定的影响, 且二者规律相似: 在有惰性气体存在的条件下, 甲烷的爆炸极限范围随着系统温度的升高而变大, 且爆炸上限比爆炸下限的变化较为明显。系统温度升高, 其内部的分子动能变大, 使其运动更剧烈, 碰撞更加频繁, 增大爆炸风险。由于在爆炸上限附近氧气含量相对不足, 而在爆炸下限附近氧气含量相对过量, 导致温度对爆炸上限的影响更为明显。

系统压力对甲烷爆炸极限的影响与温度相似, 即随系统初始压力的增加, 甲烷爆炸极限范围增大, 且对爆炸上限影响更明显。系统压力增高, 分子之间的间

距减小,单位体积内分子数目增多,分子发生碰撞的概率增大,爆炸极限范围增大,使得密闭容器内发生燃烧反应更容易也更激烈。与温度的影响类似,压力对爆炸上限的影响更为明显。从理论上讲,当压力降到一定程度时,爆炸上下限曲线会交汇于一点,该交汇点对应的压力称为该系统的爆炸临界压力值,是系统可以发生爆炸的最低压力。如果继续降低压力,系统便不会再发生爆炸,但由于爆炸的临界压力很低,对一般工业生产过程没有实际意义。

3 结论

1)惰性气体的加入可以明显缩小可燃气体的爆炸极限范围,降低爆炸风险。当惰性气体浓度达到一定值时,便不会发生爆炸。实验结果表明,在甲烷—空气混合物中,当 CO_2 浓度超过22.1%时,或当 N_2 总浓度超过82%时,混合物就不会发生爆炸; CO_2 比 N_2 具有更好的爆炸抑制效果。在气田生产和其他防爆过程中,可以用惰性气体(N_2 或 CO_2)作为保护气,降低爆炸风险。惰性气体的加入同时提高了可燃气体爆炸所需的临界氧含量。

2)特种气体如 H_2 、 H_2S 和 CO 的存在会增加油气的爆炸极限范围,同时降低爆炸所需的最小氧含量,增加爆炸风险。在有大量特种可燃气体存在的工艺过程中,需严格监测可燃气体和氧气的含量,考察具体情况下的爆炸极限。

3)温度、压力的升高会增加可燃气体的爆炸极限范围,增加爆炸风险。因此针对相对密闭的工作空间,进行减压操作有利于安全生产。在天然气生产和集输过程中,由于可燃气体和爆炸源不可控制或随机性较大,而空气或氧气的混入可以控制和测试,因而密切监测气体中的氧气含量,将氧气浓度控制在气体爆炸临界氧含量之下,是避免爆炸危险的最有效方法。

参 考 文 献

[1] 赵贤正,赵政璋,李景明,等.中国陆上天然气资源的特征及发展策略[J].石油学报,2004,25(5):1-5.
ZHAO Xianzheng, ZHAO Zhengzhang, LI Jingming, et al.Characteristics and development strategy of onshore natural Gas resources in China[J].Acta Petrolei Sinica,2004,25(5):1-5.

[2] 翟光明,何文渊.煤层气是天然气的现实接替资源[J].天然气工业,2004,24(5):1-3.
ZHAI Guangming, HE Wenyuan.Conventional natural gas actual succeeding resources—coalbed methane[J].Natural Gas Industry,2004,24(5):1-3.

[3] 胡文瑞.开发非常规天然气是利用低碳资源的现实最佳选择[J].天然气工业,2010,30(9):1-8.
HU Wenrui.Development of unconventional natural gas: The best approach to low-carbon economy and resource efficiency[J].Natural Gas Industry,2010,30(9):1-8.

[4] 张应安,刘振翼,王峰,等.含 CO_2 天然气燃烧爆炸特性实验研究[J].天然气工业,2009,29(6):110-112.
ZHANG Ying'an, LIU Zhenyi, WANG Feng, et al.Experimental studies on fire and explosion characteristics of natural gas with carbon dioxide[J].Natural Gas Industry,2009,29(6):110-112.

[5] 吉亚娟,周乐平,任韶然.油田注空气工艺防爆实验的研究[J].中国安全科学学报,2008,18(2):87-92.
JI Yajuan, ZHOU Leping, REN Shaoran.Study of explosion-proof experiment on oil field air injection process[J].China Safety Science Journal,2008,18(2):87-92.

[6] 黄海仙,李明,顾安忠,等.煤层气爆炸极限分析[J].天然气工业,2010,30(12):104-106.
HUANG Haixian, LI Ming, GU Anzhong, et al.Theoretical analysis on the explosion limit of coalbed methane gas[J].Natural Gas Industry,2010,30(12):104-106.

[7] 黄金印,张树旗.两种标准实验方法测定的气体爆炸极限的比较[J].消防技术与产品信息,2001(4):52-55.
HUANG Jinyin, ZHANG Shuqi.Comparison of explosion limits measured by two standard test methods[J].Fire Technique and Products Information,2001(4):52-55.

[8] 刘晓波.防爆试验自动配气方法的探讨[J].煤矿安全,2008(11):100-103.
LIU Xiaobo.Discussion on automatic gas mixing method in explosion proof test[J].Safety in Coal Mines,2008(11):100-103.

[9] 侯万兵,谭迎新.障碍物影响下瓦斯爆炸压力传播规律研究[J].中国煤层气,2009,6(6):43-46.
HOU Wanbing, TAN Yingxin.Study on propagation rule of gas explosion under the conditions of barrier[J].China Coalbed Methane,2009,6(6):43-46.

[10] 王华,葛岭梅,邓军.惰性气体抑制矿井瓦斯爆炸的实验研究[J].矿业安全与环保,2008,35(1):4-7.
WANG Hua, GE Lingmei, DENG Jun. Experimental study of inert gas inhibiting the explosion of mine gas[J].Mining Safety & Environmental Protection,2008,35(1):4-7.

[11] 邱雁,高广伟,罗海珠.充注惰气抑制矿井火区瓦斯爆炸机理[J].煤矿安全,2003,34(2):8-11.
QIU Yan, GAO Guangwei, LUO Haizhu.Mechanism of pumping inert gas into mine fire area for inhibition of methane explosion[J].Safety in Coal Mines,2003,34(2):8-11.

- [12] 李成兵, 吴国栋, 周宁, 等. $N_2/CO_2/H_2O$ 抑制甲烷燃烧数值分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(3): 288-293. LI Chengbing, WU Guodong, ZHOU Ning, et al. Numerical analysis of methane combustion suppression by $N_2/CO_2/H_2O$ [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, 40(3): 288-293.
- [13] 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. LIU Bin. Recommended calculation of explosion limitation for organic burning gas[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology Edition, 2007, 32(1): 119-124.
- [14] 杜霞, 张欣, 任常兴, 等. 煤气化厂房合成气的火灾危险性类别[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(10). DU Xia, ZHANG Xin, REN Changxing, et al. Fire risk category of synthetic gas in coal gasification plants[J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(10).
- [15] 万成略, 汪莉. 可燃性气体含氧量安全限值的探讨[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(1): 48-53. WAN Chenglue, WANG Li. Study on the safety threshold value of the oxygen content in coke oven gas[J]. China Safety Science Journal, 1999, 9(1): 48-53.
- [16] 吴建峰, 孔庆钊, 王保东. 混合气爆炸极限的理论计算方法[J]. 油气储运, 1994, 13(6): 10-12. WU Jianfeng, KONG Qingfang, WANG Baodong. Theoretical calculation methods for the explosion limit of a mixed gas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1994, 13(6): 10-12.
- (修改回稿日期 2013-09-02 编辑 赵 勤)