

空气驱过程中爆炸极限影响因素及预测模型

李海奎¹,李磊兵²,张亮¹,王蕾³,王芳⁴,任韶然¹

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580; 2.中国石油集团长城钻探工程技术研究院,辽宁盘锦124010; 3.中国石油煤层气公司韩城分公司,陕西渭南715409; 4.辽宁石油化工大学化学化工与环境学部,辽宁抚顺113001)

摘要:空气驱作为一项富有创造性的提高采收率技术,受到越来越多的重视。而爆炸风险的存在严重制约了该技术的发展和应用,因此准确掌握和控制可燃气体的爆炸极限对空气驱技术的消防预警和安全生产有着重要意义。为此,分析了可燃气体爆炸极限的影响因素,结果表明:混合可燃气体的组分会影响其爆炸极限,多组分可燃气体的爆炸极限为各组分的调和平均值;爆炸极限范围随温度升高而增大,呈线性变化;爆炸极限范围也随压力的增加而增大,但呈对数变化;爆炸极限范围随惰性气体体积分数的增加而减小,不同惰性气体抑爆效果不同。运用数值分析原理,结合经验公式,拟合出了不同影响因素下可燃气体的爆炸极限预测模型和统一预测模型,模型的建立为确定空气驱工艺中不同条件下油气混合物的爆炸极限提供了参考。

关键词:空气驱 爆炸极限 可燃气体 温度 压力 惰性气体 预测模型

中图分类号:TE357.7

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)01-0111-07

Influential factors and model prediction for explosion limits during air flooding

Li Haikui¹, Li Leibing², Zhang Liang¹, Wang Lei³, Wang Fang⁴, Ren Shaoran¹

(1.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2.Engineering & Technology Research Institute of Greatwall Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Panjin City, Liaoning Province, 124010, China; 3.PetroChina CBM Hancheng Branch, Weinan City, Shanxi Province, 715409, China; 4.College of Chemistry, Chemical Engineering and Environmental Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun City, Liaoning Province, 113001, China)

Abstract: Air flooding, as a creative EOR technique, is receiving more and more attention. The existence of explosion risk severely constrains the development and application of this technique. Thus, it is of great importance to obtain a clear knowledge and control of the explosion limits of combustible gases for fire warning and production safety of the air flooding technique. For this reason, the factors that influence the explosion limits of the combustible gases were analyzed, and the results show that: the components of the mix combustible gases can influence on its explosion limits, and the combustible gases with multi-component have an explosion limits which are the harmonic mean of those components; the explosion limits increase linearly with the raise of temperature, but increase logarithmically with the raise of pressure; the explosion limits decrease with the increasing volume fraction of inert gases, and different kinds of inert gases have various influences on explosion proof. The calculation models with different factors and unified prediction model of the explosion limits of the combustible gases were matched by using mechanism of numerical analysis and combination of empirical formula, and that will provide reference for predicting the explosion limits of oil-gas mixture under different conditions in air flooding technique.

Key words: air flooding; explosion limits; combustible gases; temperature; pressure; inert gases; prediction models

目前,中国许多油田已进入开发中后期,油井含水率相对较高,投入产出比较大,依靠常规注水

收稿日期:2014-11-28。

作者简介:李海奎(1990—),男,山东沂水人,在读硕士研究生,从事注气提高采收率研究。联系电话:15610500319, E-mail:lihaikui-upc@hotmail.com。

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”(IRT1294)。

技术挖潜越来越困难,油田现场规模化应用的提高采收率技术主要有化学驱、热采和气驱^[1-5]。空气驱技术由于适用范围大、空气来源广、驱油机理多样性等优点受到中外专家的重视,但由于氧气在一定条件下跟油气混合存在爆炸风险而限制了其发展^[6-7]。可燃气体与氧气(助燃气体)在一定浓度范围内均匀混合,遇到点火源时会发生爆炸,该可燃气体的浓度范围被称为爆炸极限,其最大值被称为爆炸上限,最小值被称为爆炸下限。整个空气驱过程中都存在一定的爆炸风险,如注气井井筒内油气的回流、空气压缩机内积炭的自燃、生产井井筒内氧气的突破、生产管线油气的泄露。因此,准确掌握和控制可燃气体的爆炸极限,对于空气驱技术的消防预警和安全生产有着重要意义。

研究结果^[8]表明,爆炸极限受到多种内外因素的影响,并非是一个固定值,工业生产中很难确定可燃气体的安全浓度范围。但若掌握了外界条件变化对爆炸极限的影响规律和计算方法,根据实际所测的气体体积分数并计算得到爆炸极限对工业生产仍有一定的指导意义。为此,笔者在充分考虑可燃气体爆炸极限影响因素的基础上,建立了可燃气体在不同影响因素下的预测模型和统一预测模型,以期为空气驱过程中确定油气混合物的爆炸极限提供参考。

1 多组分可燃气体爆炸极限预测模型的建立

不同可燃气体具有不同的微观结构和化学性能,因此其爆炸极限也各不相同。由于C—C键比较牢固,C—C型碳氢化合物的分子不易受到破坏,反应能力较差,因而其爆炸极限范围较小;而C≡C键比较脆弱,C≡C型碳氢化合物的分子极易被破坏,其化学反应能力强,因而爆炸极限范围较大;C=C型碳氢化合物的爆炸极限范围则处于C—C型碳氢化合物与C≡C型碳氢化合物之间。对于同一烃类化合物,随碳原子个数增加,爆炸极限范围随之变小^[7,9]。因此,当混合可燃气体中烃类组分体积分数改变时,混合气体的爆炸极限也相应地发生改变。

研究常温常压下维持丙烷的体积分数为10%时,甲烷体积分数变化对甲烷、乙烷和丙烷混合气体爆炸极限的影响规律,以及甲烷体积分数一定(50%)时丙烷体积分数变化对该混合气体爆炸极限的影响规律。由图1中的实验值可知,混合气体的

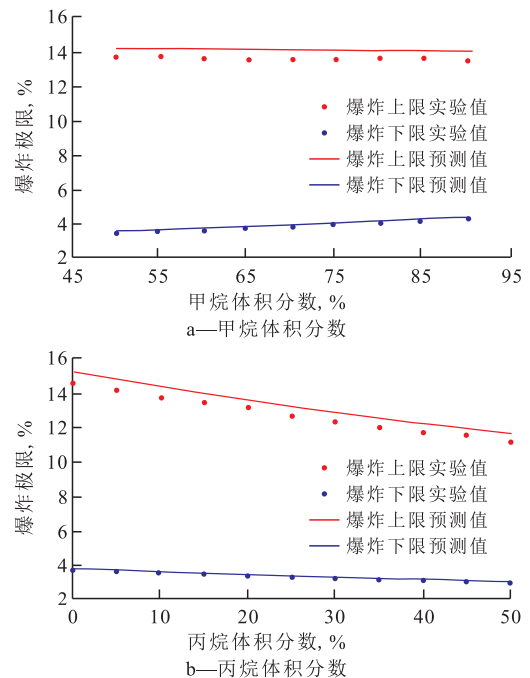


图1 组分体积分数变化对混合气体爆炸极限的影响

Fig.1 Influence of component volume fraction on the explosion limits of mixed gases

爆炸极限相当于各组分可燃气体爆炸极限的调和平均值,当组分体积分数发生变化时,混合气体的爆炸极限趋向于体积分数增加组分的爆炸极限。由多种可燃气体组成的混合气体,它的爆炸极限受到各个组分爆炸极限的影响,可用Le chatlier公式来估算^[10],即

$$C = \frac{100}{\frac{V_1}{C_1} + \frac{V_2}{C_2} + \frac{V_3}{C_3} + \dots + \frac{V_n}{C_n}} \quad (1)$$

根据表1中可燃气体的爆炸极限理论值^[11-12],用Le chatlier公式计算混合气体的爆炸极限,结果如图1中的预测值所示。由误差计算可知,爆炸下限预测值与实验值的最大误差为3.4%,爆炸上限预测值与实验值的最大误差为4.6%。模型预测值与实验值之间存在一定的差别,这主要是因为可燃气体的爆炸极限为经验值(表1),而非实测值;再者,实验条件、人为操作等因素不可避免地造成误差。由于计算误差在可接受范围之内,且模型预测的爆炸极限范围比实验值宽,完全可以通过模型预测值来定性研究混合气体的爆炸极限变化规律。

表1 常见的可燃气体爆炸极限

可燃气体	爆炸上限	爆炸下限
CH ₄	5	15
C ₂ H ₆	3	15.5
C ₃ H ₈	2.1	9.5
C ₄ H ₁₀	1.9	8.5

式(1)适用于计算活化能、克分子燃烧热、反应速率相接近的可燃气体组成的混合气体的爆炸极限^[13]。故在计算碳氢化合物混合气体时比较准确,而对其他可燃性混合气体(如含硫气藏等特殊油气藏产出气)的计算会出现一些偏差。

2 温度影响下爆炸极限预测模型的建立

常温常压条件下可燃气体的爆炸极限数据相对比较充分^[14],但是油田生产现场工艺中经常面临高温高压环境,且生产现场在高温高压条件下可燃气体发生意外爆炸的例子屡见不鲜,因此,测定不同温度压力条件下的可燃气体爆炸极限具有非常重要的意义。

一般来说,温度升高会增加爆炸的风险,即温度升高会扩大混合气体爆炸极限范围。系统温度升高,空间内分子运动更剧烈,且活化分子数增多,可燃气体分子更容易与氧气分子发生碰撞反应,使原本不会爆炸的混合气体变得具有爆炸风险^[15-16]。

天然气中的甲烷通常被认为是最具爆炸风险的气体(因其爆炸的临界氧含量最低)。因此,实验用甲烷来代表天然气可燃气体,用空气作为助燃气体,研究常压条件下温度对可燃气体爆炸极限的影响规律。由实验结果(图2)可知,随着温度升高,爆炸下限减小,爆炸上限增大,可燃气体的爆炸极限范围变大且具有很好的线性关系。Zabetakis根据大量实验数据,提出了可燃气体爆炸极限的预测模型,并利用Burgess-Wheeler法则进行了修正^[17]。

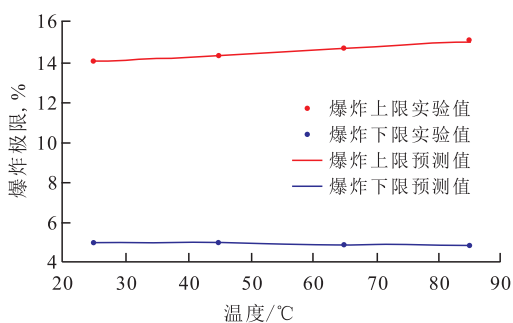


图2 温度对可燃气体爆炸极限的影响

Fig.2 Influence of temperature on the explosion limits of mixed gases

Zabetakis修正公式是根据高至1 200 °C的爆炸实验数据拟合得到,而油田在空气驱过程中存在爆炸风险的管线、空气压缩机等的温度一般不会超过200 °C,利用Zabetakis修正公式预测空气驱过程中的爆炸极限误差较大。笔者利用0~100 °C的实验数

据对Zabetakis公式进行进一步修正,得到

$$L_i^{\text{atm}} = 4.95 - 0.0027t \quad (2)$$

$$U_i^{\text{atm}} = 13.56 + 0.0175t \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)计算得到的常压不同温度下可燃气体的爆炸极限如图2预测值所示,其中爆炸下限预测值与实验值的最大误差为0.4%,爆炸上限预测值与实验值的最大误差为0.3%,均在误差可接受范围之内。

为方便建立爆炸极限的统一预测模型,将式(2)和式(3)转化为Zabetakis公式形式,即

$$L_i^{\text{atm}} = \alpha_L L_{25}^{\text{atm}} \quad (4)$$

$$U_i^{\text{atm}} = \alpha_U U_{25}^{\text{atm}} \quad (5)$$

其中

$$\alpha_L = 1 - 0.0005533(t - 25) \quad (6)$$

$$\alpha_U = 1 + 0.0012238(t - 25) \quad (7)$$

3 压力影响下爆炸极限预测模型的建立

与温度的影响相同,一般来说,压力的上升也会增加爆炸风险,即爆炸混合气体初始压力的上升会增大爆炸极限的范围。压力升高,混合气体被压缩,气体分子间距变小,更容易发生碰撞,使可燃气体燃烧的最初反应更容易、更剧烈,混合气体的爆炸风险更大^[16,18]。

以空气作为助燃气体,甲烷作为可燃气体的代表,研究常温条件下压力对可燃气体爆炸极限的影响。由实验结果(图3)可知,随着压力的上升,爆炸下限减小,爆炸上限增大,可燃气体的爆炸极限范围变大但并非具有线性关系。Jones和Zabetakis等的研究结果^[13,17]证明,可燃气体的爆炸极限随压力呈对数变化。利用0~2 MPa实验数据建立了压力影响下可燃气体爆炸极限的预测模型,即

$$L_{25}^p = 4.72 - 0.16 \lg p \quad (8)$$

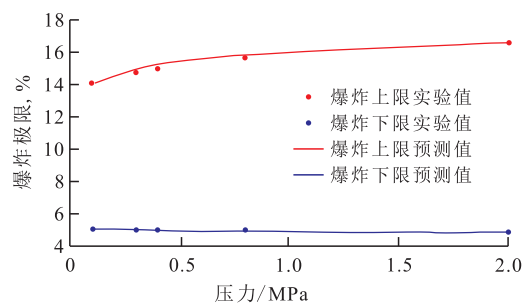


图3 压力对可燃气体爆炸极限的影响

Fig.3 Influence of pressure on the explosion limits of mixed gases

$$U_{25}^p = 16 + 2 \lg p \quad (9)$$

根据式(6)和式(7)计算得到的常温不同压力条件下可燃气体的爆炸极限如图3预测值所示,爆炸下限预测值与实验值的最大误差为0.8%,爆炸上限预测值与实验值的最大误差为1.7%,均在误差允许范围之内。

为方便建立爆炸极限的统一预测模型,将式(8)和式(9)转化为Zabetakis公式形式,即

$$L_{25}^p = \beta_L U_{25}^{atm} \quad (10)$$

$$U_{25}^p = \beta_U U_{25}^{atm} \quad (11)$$

其中

$$\beta_L = 0.9672 - 0.0328 \lg p \quad (12)$$

$$\beta_U = 1.1429 + 0.1429 \lg p \quad (13)$$

4 惰性气体影响下爆炸极限预测模型的建立

爆炸混合气体中惰性气体(如N₂, CO₂, Ar和He等)的存在,会压缩混合气体的爆炸极限范围。如果混合气体中惰性组分的体积分数达到一定比例,原本可燃可爆的混合气体就会变成不易反应的稳定体系,不再具有爆炸风险^[16]。鉴于油田开发实际情况,主要考察CO₂和N₂对爆炸极限的影响。

常温常压条件下,在甲烷与空气的混合组分中,逐渐加入CO₂或N₂,进行点火爆炸实验,考察CO₂和N₂对爆炸极限的影响规律。实验结果如图4实验值所示。王华等在煤矿开采过程瓦斯防爆安全的研究中^[19]曾得出与图4类似的结果。

由图4可知,随惰性气体体积分数的增加,爆炸下限增大,爆炸上限减小,可燃气体的爆炸极限范围变窄,爆炸上下限最终相聚于一点,称之为爆炸极限临界点。如果向混合气体中继续增加惰性气体,则无论怎么改变混合气体中可燃气体的体积分数(保持惰性气体体积分数不变),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。

含有惰性气体的可燃气体的爆炸极限主要有2种计算方法:①配比计算法^[10],将某种惰性气体与某种可燃气体视为一种组分,该组分的爆炸极限可根据惰性气体与可燃组分之比查图版得到,然后根据Le chatlier公式求得混合气体的爆炸极限;②惰性气体修正法^[20],结果如图4预测值1所示,因其未考虑到不同惰性气体的影响,计算结果出现较大误差,最高达17%,故用该方法预测的可燃气体爆炸

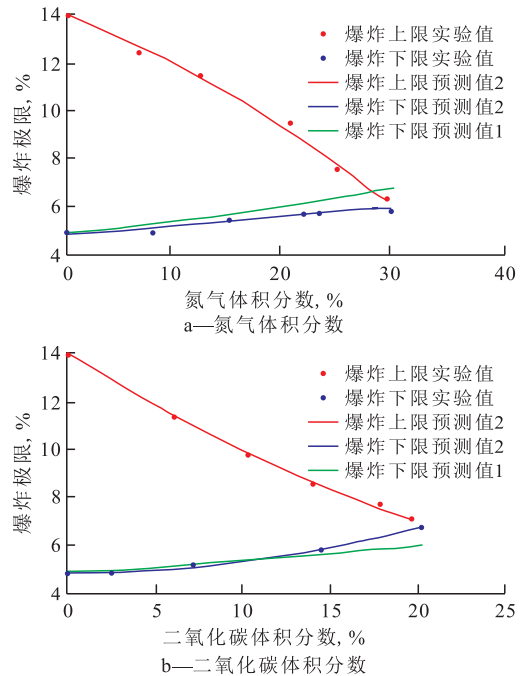


图4 惰性气体体积分数变化对混合气体爆炸极限的影响

Fig.4 Influence of inert gas volume fraction on the explosion limits of mixed gases

极限值参考价值不大。

笔者根据不同CO₂或N₂质量分数下可燃气体的爆炸极限数据,利用数值分析原理拟合出爆炸上、下限关于惰性气体体积分数变化规律的函数,即

$$(U_{25}^{atm})_{N_2} = 14 - 0.1716\phi_{N_2} - 0.0033\phi_{N_2}^2 \quad (14)$$

$$(L_{25}^{atm})_{N_2} = 4.88 + 0.0302\phi_{N_2} + 0.0003\phi_{N_2}^2 \quad (15)$$

$$(U_{25}^{atm})_{CO_2} = 14 - 0.456\phi_{CO_2} + 0.0053\phi_{CO_2}^2 \quad (16)$$

$$(L_{25}^{atm})_{CO_2} = 4.88 + 0.002\phi_{CO_2} + 0.0045\phi_{CO_2}^2 \quad (17)$$

根据式(14)和式(15)计算得到的不同N₂体积分数下可燃气体的爆炸极限如图4a预测值2所示,爆炸下限预测值与实验值的最大误差为4.9%,爆炸上限预测值与实验值的最大误差为3.6%,均在误差允许范围之内。根据式(16)和式(17)计算得到的不同CO₂体积分数下可燃气体的爆炸极限如图4b预测值2所示,爆炸下限预测值与实验值的最大误差为1.1%,爆炸上限预测值与实验值的最大误差为2.5%,均在误差允许范围之内。

为方便建立爆炸极限的统一预测模型,将式(14)~式(17)转化为Zabetakis公式形式,即

$$(U_{25}^{atm})_{N_2} = \gamma_{U1} U_{25}^{atm} \quad (18)$$

$$(L_{25}^{atm})_{N_2} = \gamma_{L1} L_{25}^{atm} \quad (19)$$

$$(U_{25}^{atm})_{CO_2} = \gamma_{U2} U_{25}^{atm} \quad (20)$$

$$(L_{25}^{atm})_{CO_2} = \gamma_{L2} L_{25}^{atm} \quad (21)$$

其中

$$\gamma_{U1} = 1 - 1.2257 \times 10^{-2} \phi_{N_2} - 2.3571 \times 10^{-4} \phi_{N_2}^2 \quad (22)$$

$$\gamma_{L1} = 1 + 6.1885 \times 10^{-3} \phi_{N_2} + 6.1475 \times 10^{-5} \phi_{N_2}^2 \quad (23)$$

$$\gamma_{U2} = 1 - 3.2571 \times 10^{-2} \phi_{CO_2} + 3.7857 \times 10^{-4} \phi_{CO_2}^2 \quad (24)$$

$$\gamma_{L2} = 1 + 4.0984 \times 10^{-4} \phi_{CO_2} + 9.2213 \times 10^{-4} \phi_{CO_2}^2 \quad (25)$$

5 统一预测模型的建立

大量的爆炸极限实验数据表明,温度、压力等爆炸极限影响因素之间的交互作用可以忽略^[21-23],此结论同样可以用数理统计的方法^[24]证明。

对表2中的数据^[23]进行方差分析,得到表3所示结果。根据数理统计方法,取置信度为0.99,则统计量 F 大于 λ (统计量 F 的置信度为0.99时的分位数或临界值)的概率为0.01,即 $P\{F > \lambda\} = 0.01$,查相应的 F 分布表,得 $\lambda_1 = 2.70$, $\lambda_2 = 2.36$, $\lambda_3 = 2.12$ 。温度因素的 F 值 $69.50693 \gg \lambda_1$,压力因素的 F 值 $135.7136 \gg \lambda_2$,而温压交互作用的 F 值 $1.565941 < \lambda_3$,说明温度、压力对爆炸极限的影响显著,而温压交互作用对爆炸极限的影响并不显著,与温度、压力相比可以忽略。

表2 不同温度、压力下甲烷的爆炸上限

Table2 Upper explosion limits of methane under different temperature and pressure

温度/℃	压力/MPa	爆炸上限,%	
20	0.28	14.180 3	14.400 3
	0.54	14.702 6	14.942 6
	0.76	15.644	15.874
	1	15.863 9	16.093 9
	1.22	16.468 9	16.238 9
50	0.28	14.712 6	14.932 6
	0.54	15.246 9	15.486 9
	0.76	16.067 4	16.297 4
	1	16.517 1	16.747 1
	1.22	16.892 3	16.662 3
90	0.28	15.256 9	15.476 9
	0.54	15.851 8	16.091 8
	0.76	16.309 4	16.539 4
	1	16.674 4	16.904 4
	1.22	17.025 3	16.795 3

注:为进行误差计算,同一温度压力下的爆炸极限测试2次。

表3 方差分析结果

Table3 Analysis results of variance

方差来源	平方和	自由度	平均平方和	F 值
温度	3.679 697	2	1.839 848 361	69.506 93
压力	14.369 36	4	3.592 338 915	135.713 6
温压交互	0.331 604	8	0.041 450 451	1.565 941
误差	0.397 05	15	0.026 47	
总和	18.777 71	29		

因此,不考虑温度、压力、惰性气体各因素之间的交互作用,建立单组分可燃气体的爆炸极限预测模型为

$$L_i^p = \alpha_L \beta_L \gamma_{L1} \gamma_{L2} L_{25}^{atm} \quad (26)$$

$$U_i^p = \alpha_U \beta_U \gamma_{U1} \gamma_{U2} U_{25}^{atm} \quad (27)$$

除可燃气体组分、温度、压力、惰性气体等因素外,混合气体的爆炸极限仍受其他因素的影响:①容器中气体的混合程度,可燃可爆系统通常都是由多种气体混合组成,它们的混合程度会对爆炸极限产生一定的影响。总的来说,混合不均的气体爆炸极限值略小。②点火源,一般来说,点火源越靠近容器中心、放出的点火能量越大以及火花塞与混合气体接触得越充分,相应系统的爆炸极限就越大。③爆炸容器,可燃气体的爆炸极限也会受到其所处爆炸容器(形状、大小和材质)的影响。一般来讲,容器形状越不规则,容积越小,其所对应的爆炸极限就越小。

若点火源能量、位置不同,爆炸容器形状、大小不同以及气体混合程度发生变化,测得的可燃气体爆炸极限就会有所不同,而这些因素对爆炸极限的影响程度很难定量描述。为确保安全和简化实验,只需测得最危险的工况条件(如可燃气体混合均匀、点火源能量足够大且与可燃气体接触充分等)下的爆炸极限 L_{25}^{atm} 和 U_{25}^{atm} ,来代替不同工况条件下的爆炸极限。

式(26)和式(27)充分考虑了影响爆炸极限的温度、压力、惰性气体(主要是 CO_2 和 N_2)等因素,气体混合程度、爆炸容器等因素考虑在可燃气体常温常压下的爆炸极限 L_{25}^{atm} 和 U_{25}^{atm} 内,故模型预测值有一定的应用和参考价值。

而对于多组分可燃气体,可先根据Le chatlier公式计算其常温常压下的爆炸极限值,然后将其视为单组分可燃气体代入单组分预测模型进行计算。由于单组分预测模型未考虑惰性气体对不同可燃气体抑爆效果的差异,对多组分可燃气体爆炸极限的预测值可能会有所偏差,但惰性气体对可燃

气体爆炸极限的影响趋势相近^[20],其预测值仍有一定的参考价值。

6 结论

空气驱是一项富有创造性的提高采收率技术,但爆炸风险的存在严重制约了该技术的发展和应用。可燃气体的爆炸极限是一个浓度的范围,并且不是一个固定值,受到多种因素的影响,如可燃气体种类、温度、压力、惰性气体体积分数以及气体混合程度、点火源等。

混合气体的爆炸极限相当于各组分可燃气体爆炸极限的调和平均数,可用 Le chatlier 公式进行计算;温度上升,可燃气体的爆炸极限范围变大,且具有很好的线性关系,可用修正的 Zabetakis 公式计算;压力上升,可燃气体的爆炸极限范围变大,呈对数关系变化;随惰性气体体积分数增加,爆炸极限范围变小,不同惰性气体抑爆效果不同。

建立了单组分可燃气体的爆炸极限预测模型: $L_i^p = \alpha_L \beta_L \gamma_{L1} \gamma_{L2} L_{25}^{atm}$, $U_i^p = \alpha_U \beta_U \gamma_{U1} \gamma_{U2} U_{25}^{atm}$ 。对于多组分可燃气体,可先根据 Le chatlier 公式计算其常温常压下的爆炸极限值,然后将其视为单组分可燃气体代入单组分预测模型进行计算。该模型充分考虑了影响爆炸极限的各种因素,故其预测值具有一定的应用和参考价值。

符号解释:

C ——多组分可燃性混合气体的爆炸极限,%; $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ ——各组分在混合气体中的体积分数,%; $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ——各组分气体的爆炸极限,%; L_{25}^{atm} ——常压不同温度下可燃气体的爆炸下限,%; t ——温度,℃; U_{25}^{atm} ——常压不同温度下可燃气体的爆炸上限,%; α_L ——爆炸下限温度系数; L_{25}^{atm} ——常温常压下可燃气体的爆炸下限,%; α_U ——爆炸上限温度系数; U_{25}^{atm} ——常温常压下可燃气体的爆炸上限,%; L_{25}^p ——常温不同压力下可燃气体的爆炸下限,%; p ——压力,MPa; U_{25}^p ——常温不同压力下可燃气体的爆炸上限,%; β_L ——爆炸下限压力系数; β_U ——爆炸上限压力系数; $(U_{25}^{atm})_{N_2}, (L_{25}^{atm})_{N_2}$ ——常温常压下可燃气体在 N_2 影响下的爆炸上限和下限,%; ϕ_{N_2} ——混合气体中 N_2 的体积分数,%; $(U_{25}^{atm})_{CO_2}, (L_{25}^{atm})_{CO_2}$ ——常温常压下可燃气体在 CO_2 影响下的爆炸上限和下限,%; ϕ_{CO_2} ——混合气体中 CO_2 的体积分数,%; γ_{U1}, γ_{U2} ——可燃气体在 N_2 和 CO_2 影响下的爆炸上限惰性系数; γ_{L1}, γ_{L2} ——可燃气体在 N_2 和 CO_2 影响下的爆炸下限惰性系数; L_i^p ——温度 t 压力 p 下的爆炸

下限,%; U_i^p ——温度 t 压力 p 下的爆炸上限,%。

参考文献:

- [1] 王增林,宋新旺,祝仰文,等.海上油田二元复合驱提高采收率关键技术——以埕岛油田埕北1区西部Ng4—5砂层组为例[J].油气地质与采收率,2014,21(2):5-9.
Wang Zenglin, Song Xinwang, Zhu Yangwen, et al. Study on key techniques of surfactant-polymer flooding for offshore field—case of sand groups of Ng4-5 in western Chengbei1 block, Chengdao oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2):5-9.
- [2] 王友启,周梅,聂俊.提高采收率技术应用状况及发展趋势[J].断块油气田,2010,17(5):628-631.
Wang Youqi, Zhou Mei, Nie Jun. Application status and development trend of EOR technology[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(5):628-631.
- [3] 李爱芬,任晓霞,江凯亮,等.表面活性剂改善稠油油藏水驱开发效果实验研究——以东辛油田深层稠油油藏为例[J].油气地质与采收率,2014,21(2):18-21.
Li Aifen, Ren Xiaoxia, Jiang Kai liang, et al. Experimental study on influencing factors of injecting surfactant to improve water flooding for heavy oil reservoir—case of Dongxin heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2):18-21.
- [4] 杨胜来,陈浩,冯积累,等.塔里木油田改善注气开发效果的关键问题[J].油气地质与采收率,2014,21(1):40-44.
Yang Shenglai, Chen Hao, Feng Jilei, et al. A brief discussion on some scientific issues to improve oil displacement during gas injection, Tarim oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1):40-44.
- [5] 杨兵,李敬松,张贤松,等.稠油油藏水平井多元热流体吞吐高效开采技术[J].油气地质与采收率,2014,21(2):41-44.
Yang Bing, Li Jingsong, Zhang Xiansong, et al. Study on horizontal well multi-component thermal fluid stimulation high efficiency recovery technology for heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2):41-44.
- [6] 吉亚娟.注空气采油井下石油气燃爆特性的研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2008.
Ji Yajuan. Study on downhole petroleum gas explosion character for air injection EOR process [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008.
- [7] 吴信荣,林伟民,任韶然,等.空气泡沫调驱提高采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2010:1-10.
Wu Xinrong, Lin Weimin, Ren Shaoran, et al. Air foam flooding EOR technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010:1-10.
- [8] 俞启香.矿井灾害防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.
Yu Qixiang. Theory and technology of mine disaster prevention [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008.
- [9] 田贯三,李兴泉.城镇燃气爆炸极限影响因素与计算误差的分析[J].中国安全科学学报,2002,12(6):48-51.

- Tian Guansan, Li Xingquan. Analysis and estimate of the explosive limit of town gas [J]. *China Safety Science Journal*, 2002, 12(6): 48-51.
- [10] 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(5): 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(5): 10-12.
- [11] 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*, 2007, 32(1): 119-124.
- [12] 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): 120-126.
- Du Xia, Zhang Xin, Ren Changxing, et al. Fire hazard category of the syngas in gasification plant [J]. *Fire Science and Technology*, 2012, 31(10): 120-126.
- [13] 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 Mangui, Xu Jingcai. Explosion limits and calculated methods of combustible gas [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2005, 25(2): 139-142.
- [14] 邹伟. SY 6503—2008 石油天然气工程可燃气体检测报警系统安全技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Zou Wei. SY 6503—2008 Safety technical specification of combustible gas detection and alarm system for petroleum and natural gas engineering[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [15] 刘振翼, 李浩, 邢冀, 等. 不同温度下原油蒸气的爆炸极限和临界氧含量[J]. *化工学报*, 2011, 62(7): 1998-2004.
- Liu Zhenyi, Li Hao, Xing Ji, et al. Explosion limits and critical oxygen content of crude oil vapor at different ambient temperatures [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(7): 1998-2004.
- [16] 任韶然, 李海奎, 李磊兵, 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[J]. *天然气工业*, 2013, 33(10): 1-5.
- Ren Shaoran, Li Haikui, Li Leibing, et al. An experimental study of effects of inert and special flammable gases on methane's explosion characteristics [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(10): 1-5.
- [17] Zabetakis M G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors[R]. Bureau of Mines Washington D C, 1965.
- [18] 李润之. 点火能量与初始压力对瓦斯爆炸特性的影响研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2010.
- Li Runzhi. Study of the influence of ignition energy and initial pressure on the gas explosion characteristics [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [19] 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 using inert gas to suppress mine gas explosion [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2008, 35(1): 4-7.
- [20] 项友谦, 严铭卿, 周传利, 等. 混合燃气爆炸极限的确定[J]. *煤气与热力*, 1992, 12(6): 40-45.
- Xiang Youqian, Yan Mingqing, Zhou Chuanli, et al. Measurement of explosion limits of mixed gases [J]. *Gas & Heat*, 1992, 12(6): 40-45.
- [21] 吉亚娟, 周乐平, 任韶然, 等. 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, et al. Study of explosion-proof experiment on oil field air injection process [J]. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(2): 87-92.
- [22] 李凯凯, 杨其彬. 空气驱油安全控制研究[J]. *断块油气田*, 2008, 15(5): 93-95.
- Li Kaikai, Yang Qibin. Safety control of air injection displacement [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2008, 15(5): 93-95.
- [23] 于洪敏, 左景栾, 任韶然, 等. 注空气采油井产出气体燃爆特性[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(6): 99-103.
- Yu Hongmin, Zuo Jingluan, Ren Shaoran, et al. Explosion characteristics of oil well produced gas by air injection for improved oil recovery [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2010, 34(6): 99-103.
- [24] 王清河, 常兆光, 李荣华, 等. 随机数据处理方法[M]. 东营: 石油大学出版社, 1997.
- Wang Qinghe, Chang Zhaoguang, Li Ronghua, et al. Random data processing method [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1997.

编辑 刘北羿