



GLOBAL JOURNAL OF SCIENCE FRONTIER RESEARCH: H
ENVIRONMENT & EARTH SCIENCE
Volume 22 Issue 2 Version 1.0 Year 2022
Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal
Publisher: Global Journals
Online ISSN: 2249-4626 & Print ISSN: 0975-5896

Determination of Explosive Properties of $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$ Binary Gaseous Alkane Mixture

By He Jie, Zhuang Chunji, Dai Yifan, Cao Zhaorui & Li Hua

Ningbo Institute of Technology

Abstract- In this paper, HY12474B flammable gas explosion limit experimental device was used to study the explosion characteristics of the three kinds of binary gaseous alkane mixtures, which were the mixture of CH_4 , C_2H_6 and C_3H_8 with different composition ratio respectively. The experimental results showed that the velocity of flame at both ends of explosion limit of the binary gaseous alkane mixtures relatively slow, and the flame is also not so apparent. The composition ratio of binary gaseous alkane mixture has a greater impact on explosion limit, three kinds of mono alkane can be ranked by their influence as $\text{CH}_4 > \text{C}_2\text{H}_6 > \text{C}_3\text{H}_8$ in turn. When the composition ratio of gaseous alkane mixtures decreased, the explosion limit range is reduced, but the maximum explosion pressure peak is increased.

Keywords: *gaseous alkane; explosion flame; explosion limit; maximum explosion pressure.*

GJSFR-H Classification: DDC Code: 628.9222 LCC Code: TH9446.5.P45



DETERMINATION OF EXPLOSIVE PROPERTIES OF $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$ BINARY GASEOUS ALKANE MIXTURE

Strictly as per the compliance and regulations of:



© 2022. He Jie, Zhuang Chunji, Dai Yifan, Cao Zhaorui & Li Hua. This research/review article is distributed under the terms of the Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). You must give appropriate credit to authors and reference this article if parts of the article are reproduced in any manner. Applicable licensing terms are at <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Determination of Explosive Properties of CH₄/C₂H₆/C₃H₈ Binary Gaseous Alkane Mixture

CH₄/C₂H₆/C₃H₈二元气态烷烃混合物爆炸特性测定

He Jie ^α, Zhuang Chunji ^σ, Dai Yifan ^ρ, Cao Zhaorui ^ω & Li Hua [¥]

摘要: 本文采用HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置,将CH₄、C₂H₆和C₃H₈按不同组分比两两混合,研究三类二元气态烷烃混合物的爆炸特性。结果表明:二元气态烷烃混合物的爆炸极限处火焰传播速度较缓慢,火焰较不明显;二元气态烷烃混合物组分比对爆炸极限影响较大,三种单烷烃对爆炸极限的影响能力依次为CH₄>C₃H₈>C₂H₆;当气态烷烃混合物组分比下降时,其爆炸极限范围缩小,最大爆炸压力峰值增大。

关键词: 气态烷烃; 爆炸火焰; 爆炸极限; 最大爆炸压力

Abstract- In this paper, HY12474B flammable gas explosion limit experimental device was used to study the explosion characteristics of the three kinds of binary gaseous alkane mixtures, which were the mixture of CH₄, C₂H₆ and C₃H₈ with different composition ratio respectively. The experimental results showed that the velocity of flame at both ends of explosion limit of the binary gaseous alkane mixtures relatively slow, and the flame is also not so apparent. The composition ratio of binary gaseous alkane mixture has a greater impact on explosion limit, three kinds of mono alkane can be ranked by their influence as CH₄>C₂H₆>C₃H₈ in turn. When the composition ratio of gaseous alkane mixtures decreased, the explosion limit range is reduced, but the maximum explosion pressure peak is increased.

Keywords: gaseous alkane; explosion flame; explosion limit; maximum explosion pressure.

I. 引言

随着现代化工业的不断发展,煤炭等不可再生资源的使用比例逐步降低,以可燃性气体为主的清洁型能源得到了飞速发展,并已在生产生活中占据了重要地位^[1]。很多情况下可燃气体中会含有其他气体成分,如天然气、液化石油气以及某些反

应所需的混合气等,生产、储存、运输以及使用等环节过程一旦操作不当,很容易引发可燃气体燃烧爆炸灾害事故。可燃气体爆炸极限是物质危险性评估以及安全操作方法确定的重要参考依据之一^[2],主要由气体本身的燃爆特性决定,但也与实验测定装置、初始温度、压力和湿度、点火源的类型和能量等因素有关^[3-5]。国内外学者已对多元可燃气体混合物爆炸极限进行了大量研究,A. Lidor等^[6]基于燃料氧化剂混合物热力学稳定性分析的概念,对爆炸极限现象提出了一种新的解释,并通过热力学方法进行了分析证明;S. Kondo等^[7]对九种可燃气体混合物进行了燃烧极限的测定,表明混合物的爆炸下限测定值与Le Chatelier公式计算值吻合较好;C. V. Mashuga等^[8]选取1200K作为绝热火焰温度对甲烷-乙烯与氮气混合物的爆炸极限进行了估算;焦枫媛等^[9]研究了混合气体均匀性对甲烷爆炸特性影响的实验研究,并由此设计了混合器;J. Liu等^[10]研究了H₂O和CO₂的摩尔分数变化对爆炸极限的影响。综上所述,可燃气体混合物爆炸特性研究仍是目前研究的热点之一。本文通过对CH₄、C₂H₆和C₃H₈三种气态烷烃进行两两混合形成二元气态烷烃混合物,利用HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置,研究气态烷烃混合物组分比对二元气态烷烃混合物爆炸特性的影响,望能为气态烷烃混合的事故预防和安全防控提供参考。

II. 实验装置与实验方法

a) 实验装置

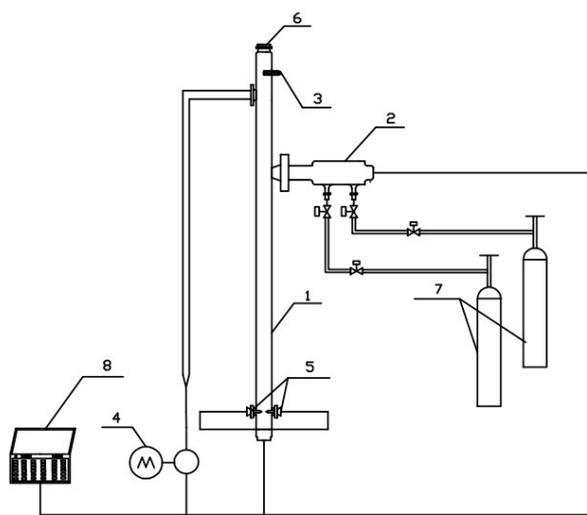
本实验选用HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置,该装置主要由抽真空、进样、循环搅拌、电火花点火、爆炸管、泄压装置、恒温控制、数据处理和计算机等几部分组成,其中爆炸管为3.4 L圆柱石英爆炸管,爆炸管底部安装了300 J高能脉冲电火花装置,顶部安装了压力传感器,样品通过自动进样系统精确进样,配气精度可达到0.1%。实验装置如图1所示。

Author α ρ ω ¥: School of Safety Engineering, Ningbo Institute of Technology, Ningbo 315211, Zhejiang, China.

Fund Project: Funded by Ningbo Natural Science Foundation (2018A610122), Student Science and Technology Innovation Fund of Ningbo Institute of Technology (2018042), Funded by Ningbo Institute of Technology Annual School Research Project (2018005).

Author α: He Jie (1999-), male, undergraduate student, majoring in safety engineering.

Corresponding author σ: Zhuang Chunji (1989-), male, lecturer, majoring in industrial disaster accident prevention technology, Fenghua Road, Jiangbei District, Ningbo City, Zhejiang Province (315211). e-mail: zhuangchunji@126.com



1爆炸管；2进样口；3压力传感器；4真空泵；5放电电极；6泄压阀；7气瓶；8计算机

图1 实验装置示意图

Fig. 1: Experimental device schematic

b) 实验方法

本实验选用纯度为99.9%CH₄、99.9% C₂H₆和99.9% C₃H₈三种气态烷烃作为实验研究对象，通过将其按照不同组分比进行两两混合，研究二元气态烷烃混合物的爆炸极限和最大爆炸压力。本实验参照《空气中可燃气体爆炸极限测定方法》GB/T 12474-2008，在大气压为99.1kPa，环境温度为17.5℃，环境湿度为63.2%RH的条件下进行实验。实验操作以单甲烷的爆炸极限测定为例进行介绍，首先在抽气阀上连接真空泵，启动真空泵并将爆炸管抽真空至0.5kPa，将纯CH₄样品接入进气接口，打开空气接口，按照设定浓度自动进样；然后进行无油封闭循环搅拌，搅拌时间设为120s，使CH₄与空气充分混合；接着启动高能脉冲电火花进行点火，通过观察石英玻璃爆炸管内火焰和计算机控制界面显示，综合判定CH₄与空气混合气体是否发生燃烧爆炸，并保存实验数据；最后实验结束后对爆炸管进行清洗。实验过程中对实验样品的进样控制，应根据放电电极点火后甲烷/空气混合气体是否发生爆炸，逐步减小或增加CH₄体积分数重复实验，直至爆炸和不爆炸之间有一个最小体积分数差，本实验要求最小体积分数差≤0.1%。

c) 实验方案

本文首先对三种烷烃气体分别单独进行实验，测出三种气态烷烃各自的爆炸上下限，将实验结果与标准值进行对比，验证实验结果的可靠性；然后将其按照不同组分比进行两两混合，对二元气态烷烃混合物的爆

炸特性参数进行测定；最后对实验结果进行总结分析，研究气态烷烃混合物组分比对其爆炸特性参数的影响。

III. 实验结果与分析

a) 单烷烃可燃气体爆炸极限测定

分别对CH₄、C₂H₆和C₃H₈三种气态烷烃的爆炸上下限单独进行测定，所测实验数据与《石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计规范》（GB50493—2009）中的数据进行比较，如表1所示。

表1: 三种气态烷烃爆炸极限值

Table 1: The explosion limit of three gaseous alkanes

物质种类	实测值		文献值	
	LEL/%	UEL/%	LEL/%	UEL/%
CH ₄	6.1	15.1	5.0	15.0
C ₂ H ₆	3.7	12.7	3.0	15.5
C ₃ H ₈	2.5	9.7	2.1	9.5

通过表1可以看出，所测CH₄上下限与文献值的最大相对误差分别为0.6%和22.0%，误差平均值为11.3%；所测C₂H₆上下限与文献值的最大相对误差分别为22.0%和18.0%，误差平均值为15.0%，所测C₃H₈上下限与文献值的最大相对误差分别为9.0%和16.0%，误差平均值为13.4%。分析误差产生的原因主要是由于三种气态烷烃的纯度不够以及环境温度较低、大气压力、环境湿度、实验器材精度等因素引起^[1]。总体而言，本实验测试结果基本符合要求，能为二元气态烷烃混合物的爆炸特性测定提供可信的实验数据。

图2为圆柱石英爆炸管内CH₄燃烧爆炸火焰时序图。从图中能够观测到不同浓度下CH₄火焰在管内传播过程中形成的球形或指形火焰，随着CH₄浓度的增加爆炸火焰颜色由浅变深再变浅^[12]。在浓度为爆炸下限附近时，爆炸火焰安静缓慢上升；随着浓度的增加，火焰上升速率逐渐加快，且尾部伴随着淡红色的火焰，并伴有火焰由下往上在管道内传播的声音；当浓度升高到爆炸上限附近时，火焰慢慢恢复到了淡蓝色。

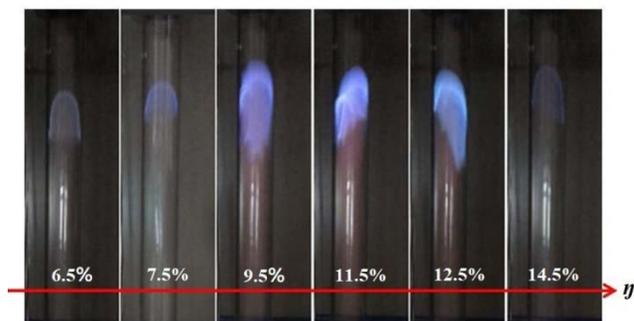


图2: CH₄燃烧爆炸火焰时序图

Fig. 2: Timing diagram of CH₄ combustion explosion flame

b) 二元气态烷烃混合物爆炸特性测定

i. 烷烃组分比对爆炸极限的影响

在开始对二元气态烷烃混合的爆炸极限测定前, 采用夏特尔公式对该混合物的爆炸极限进行估算^[13], 在此基础上按照设定配比进行混合, 逐步测得爆炸极限值。二元气态烷烃混合物爆炸极限测定实验结果如表 2 和图3所示。

由表2可以算出, 随着气态烷烃混合物组分占比的下降, 二元气态烷烃混合物的爆炸上下限都有不同程度的减小, 爆炸极限宽度呈逐渐缩小。CH₄/C₂H₆的爆炸上下限的平均减小速率都为0.024; CH₄/C₃H₈的爆炸上下限的平均下降速率分别为0.036和0.054; C₂H₆/C₃H₈的爆炸上下限平均下降速率分别为0.012和0.020。由表2区域内CH₄/C₂H₆和CH₄/C₃H₈的爆炸极限数据比较可以得出C₃H₈对爆炸极限的影响大于C₂H₆, 由表2区域内CH₄/C₃H₈和C₂H₆/C₃H₈的爆炸极限数据比较可以得出CH₄对爆炸极限的影响大于C₂H₆, 由表2区域内CH₄/C₂H₆和C₂H₆/C₃H₈

H₈的爆炸极限数据比较可以得出CH₄对爆炸极限的影响大于C₃H₈。由此可得, 对二元气态烷烃混合物的爆炸极限影响能力: CH₄>C₃H₈>C₂H₆。

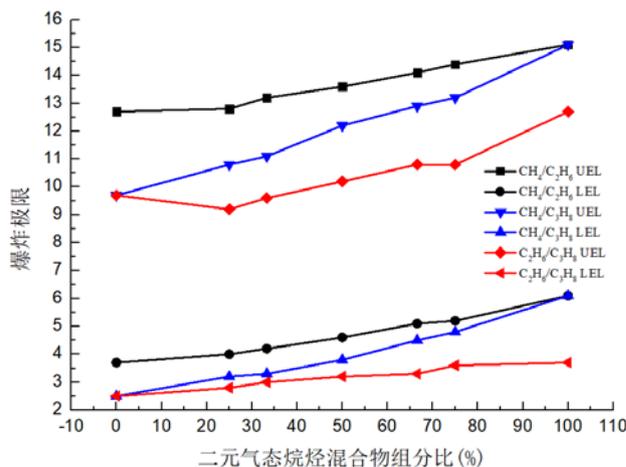


图3: 二元气态烷烃混合物爆炸极限趋势图

Fig. 3: Explosion limit trend of the binary gaseous alkane mixtures

根据表2得到二元气态烷烃混合物的爆炸极限图, 如图 3所示。从图中可以看出, CH₄/C₃H₈的爆炸极限变化最为明显, CH₄/C₂H₆和C₂H₆/C₃H₈的变化次之; CH₄/C₃H₈爆炸上下限处于CH₄/C₂H₆和C₂H₆/C₃H₈之间。

ii. 烷烃组分比对爆炸压力的影响

分别测出不同组分比下的二元气态烷烃混合物爆炸极限范围的最大爆炸压力值P_{max}, 如表3所示。表2

表2: 二元气态烷烃混合物爆炸极限测定值

Table 2: Determination of explosion limit of the binary gaseous alkane mixtures

混合物组分占比		1: 0	3: 1	2: 1	1: 1	1: 2	1: 3	0: 1
CH ₄ /C ₂ H ₆	爆炸下限LEL (%)	6.1	5.2	5.1	4.6	4.2	4	3.7
	爆炸上限UEL (%)	15.1	14.4	14.1	13.6	13.2	12.8	12.7
	爆炸极限宽度L _e	9.0	9.2	9.0	9.0	9.0	8.8	9.0
混合物组分占比		1: 0	3: 1	2: 1	1: 1	1: 2	1: 3	0: 1
CH ₄ /C ₃ H ₈	爆炸上限LEL (%)	6.1	4.8	4.5	3.8	3.3	3.2	2.5
	爆炸下限UEL (%)	15.1	13.2	12.9	12.2	11.1	10.8	9.7
	爆炸极限宽度L _e	9.0	8.4	8.4	8.4	7.8	7.6	7.0
混合物组分占比		1: 0	3: 1	2: 1	1: 1	1: 2	1: 3	0: 1
C ₂ H ₆ /C ₃ H ₈	爆炸上限LEL (%)	3.7	3.6	3.3	3.2	3	2.8	2.5
	爆炸下限UEL (%)	12.7	10.8	10.8	10.2	9.6	9.2	9.7
	爆炸极限宽度L _e	9.0	7.2	7.5	7.0	6.6	6.4	7.0

表3: 二元气态烷烃混合物爆炸特性测定表

Table 3: Determination of explosion characteristics of the binary gaseous alkane mixtures

最大爆炸压力 P_{max} (kPa)	烷烃组分比 烷烃混合物	1:0	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3	0:1
		CH ₄ /C ₂ H ₆	147.2	145.4	146.5	147.1	149.9	152.2
	CH ₄ /C ₃ H ₈	147.2	147.5	149.0	148.9	149.8	154.5	154.8
	C ₂ H ₆ /C ₃ H ₈	152.2	153.3	156.1	158.2	158.6	163.2	154.8

从表3可以看出,随着二元气态烷烃混合物组分比的下降,各组分下的爆炸极限范围内的最大爆炸压力峰值逐渐变大。相同组分比下C₂H₆/C₃H₈的最大爆炸压力峰值均比CH₄/C₂H₆和CH₄/C₃H₈要大,且在C₂H₆/C₃H₈=1:3的条件下峰值达到了最大值163.2kPa,而在CH₄/C₂H₆=3:1的条件下峰值达到了最小值145.4kPa,由此可知C₃H₈燃烧爆炸可产生了较大的爆炸压力。

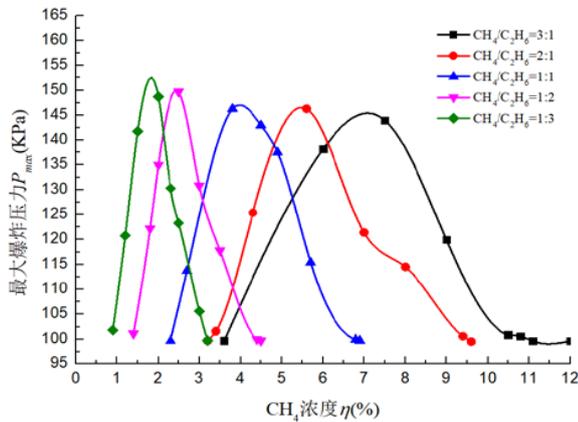
图4: 不同组分CH₄/C₂H₆在爆炸极限范围内最大爆炸压力曲线图

Fig. 4: Maximum explosion pressure curve of CH₄/C₂H₆ with different component ratio in the explosion limit range

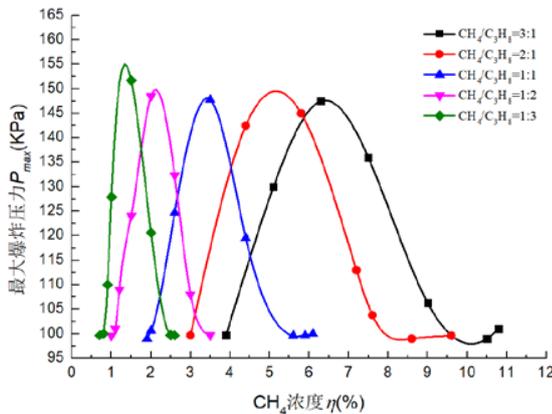
图5: 不同组分CH₄/C₃H₈在爆炸极限范围内最大爆炸压力曲线图

Fig. 5: Maximum explosion pressure curve of CH₄/C₃H₈ with different component ratio in the explosion limit range

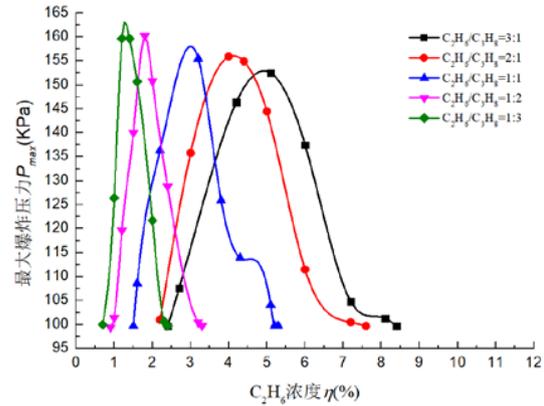
图6: 不同组分C₂H₆/C₃H₈在爆炸极限范围内最大爆炸压力曲线图

Fig. 6: Maximum explosion pressure curve of C₂H₆/C₃H₈ with different component ratio in the explosion limit range

三类二元气态烷烃混合物随组分浓度变化,其爆炸火焰时序图与单烷烃基本相似。在爆炸极限范围内最大爆炸压力曲线分别见图4,图5和图6。从图中可以看出,各组分比的最大爆炸压力曲线的趋势基本相同,均随气态烷烃混合物浓度的升高先增大后减小^[14];在爆炸极限范围内最大爆炸压力峰值出现在爆炸范围的中间位置范围;当三种二元气态烷烃混合物的组分比均为1:3时,在最大爆炸压力曲线图上能取得最大爆炸压力的最大峰值,且最大爆炸压力曲线图也变的最窄,最大爆炸压力曲线图呈现由右向左逐渐聚集的趋势。由此可得,随气态烷烃混合物组分比的下降,二元气态烷烃混合物的爆炸极限范围缩小,而其最大爆炸压力峰值增大。

IV. 结论

本文利用可燃气体爆炸极限实验装置,开展了二元气态烷烃混合物的爆炸特性的实验研究,得出了以下结论:

- 1) 对三种气态烷烃的爆炸极限分别进行测定,验证了本实验研究的可行性,通过观察CH₄的爆炸火焰时序图发现了在爆炸上下限处火焰传播速度较缓慢,火焰较不明显。
- 2) 通过测定二元气态烷烃混合物组分比对爆炸极限,得出三种气态烷烃的对爆炸极限的影响能力依次为:CH₄>C₃H₈>C₂H₆。

- 3) 随气态烷烃混合物组分比的下降，二元气态烷烃混合物的爆炸极限范围缩小，而其最大爆炸压力峰值增大。

参考文献

REFERENCES RÉFÉRENCES REFERENCIAS

- 周吉平. 挑战与应对:建设绿色、国际、可持续的中国 石油——继续推动天然气等清洁能源的开发利用、为社会提供更多优质、清洁、稳定的能源[J]. 世界石油工业, 2013(5): 28-30. [Zhou Ji-ping. Challenges and Responses: Building Green, International and Sustainable PetroChina-Continuing to Promote the Development and Utilization of Clean Energy such as Natural Gas, and Providing More High-quality, Clean and Stable Energy for Society[J].World Petroleum Industry, 2013(5): 28-30.]
- 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 Man-gui, Xu Jing-cai. The explosion limit of industrial flammable gas and its calculation[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(2): 139-142.]
- 任常兴, 张欣, 张琰等. 可燃气体及混合物爆炸极限影响特征研究[J]. 消防科学与技术. 2017(11): 1500-1503. [Ren Chang-xing, ZHANG Xin, Zhang Yan. Study on the characteristics of explosion limit effect of combustible gases and mixtures[J].Fire science and technology. 2017(11): 1500-1503.]
- V. Schröder, B. Emonts, Holger Janßen, et al. Explosion Limits of Hydrogen/Oxygen Mixtures at Initial Pressures up to 200 bar[J]. Chemical Engineering & Technology, 2004, 27(8): 847-851.
- 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]. 青岛: 山东科技大学, 2010. [Li Run-zhi. Study on the influence of ignition energy and initial pressure on gas explosion characteristics[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.]
- A. Lidor, D. Weihs, E. Sher. Theoretical analysis of the explosion limits of hydrogen-oxygen mixtures and their stability[J]. Chemical Engineering Science, 2018(192): 591-602.
- S. Kondo, K. Takizawa, A. Takahashi, et al. A study on flammability limits of fuel mixtures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 155(3): 440-448.
- C. V. Mashuga, D. A. Cowl. Flammability zone prediction using calculated adiabatic flame temperatures[J]. Process Safety Progress, 1999, 18(3): 127-134.
- 焦枫媛, 霍雨江, 刘金彪等. 混合均匀性对甲烷爆炸特性影响的实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8): 38-42. [Jiao Feng-yuan, Huo Yu-jiang, Liu Jin-biao. Experimental research on the effect of mixing homogeneity on the explosion characteristics of methane[J]. Academic of Safety Science of China,2018, 28(8): 38-42.]
- J. Liu, J. L. Wang, N. Zhang. On the explosion limit of syngas with CO₂ and H₂O additions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(6), 3317-3329.
- 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 Guan-san, Li Xing-quan. Analysis of the influence factors and calculation errors of urban gas explosion limit[J].Chinese Journal of Safety Sciences,2002, 12(6): 48-51.]
- J. L. Eilertsen, S. Rrvik, Foosns T, et al. On the "Tulip Flame" Phenomenon[J]. Combustion & Flame, 1996, 105(1-2): 225-238.
- 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): 110-115. [Ren Shao-ran, Li Hai-kui, Li Lei-bing et al. Experiments and analysis of the effects of inertia and special combustible gases on methane explosion characteristics [J].Natural gas industry,2013, 33(10): 110-115.]
- 张淑娟, 孟庭宇, 谢传欣. 常见烷烃爆炸特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(11): 66-70. [Zhang Shu-juan, Meng Ting-yu, Xie Chuan-xin. Research on Explosion Characteristics of Common Alkanes[J].Science and Technology of Safety Production in China, 2012, 8(11): 66-70.]