



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

Experimental Study on Methane Explosion Characteristics in Different Atmospheres

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

Abstract- Today, with the rapid development of petrochemical industry, petrochemical products are more and more indispensable in our life, and chemical fiber products have entered thousands of households. With the construction of a large number of gas storage facilities, the probability of gas and oil tank accidents is also increased, and once an explosion accident occurs, the consequences are often very serious. To prevent its explosion and reduce its explosion risk, the key is to deeply study and master its explosion characteristics. At present, many scholars at home and abroad have studied the explosion characteristics, but most of them are the explosion instrument, explosion suppression gas, single gas and so on.

Keywords: CH_4 , premixed gas, explosion limit, explosion pressure.

GJSFR-H Classification: DDC Code: 333.82330973 LCC Code: HD9579.M4



EXPERIMENTAL STUDY ON METHANE EXPLOSION CHARACTERISTICS IN DIFFERENT ATMOSPHERES

Strictly as per the compliance and regulations of:



Experimental Study on Methane Explosion Characteristics in Different Atmospheres

不同气氛中甲烷爆炸特性实验研究

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

摘要: 在石化行业快速发展的今天, 生活中越来越离不开石化产品, 化纤产品走进千家万户。在大批贮气设施建设的同时, 也增大了气、油罐事故概率, 且一旦发生爆炸事故, 后果往往非常严重。防止其爆炸及降低其爆炸危险性, 其关键是深入研究并掌握其爆炸特性。现在国内外许多学者都对爆炸特性进行过研究, 但大多是研究爆炸仪器、抑爆气体、单一气体等, 对多种气体形成的预混气体的爆炸特性的研究比较少。

本文利用HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置进行实验研究, 对甲烷、乙烷与丙烷烷烃进行实验测定; 再经过两两组合进行预混气体实验测定; 通过对三种气体形成的二元预混以及三元预混气体的爆炸特性进行实验测定, 得出爆炸极限, 爆炸压力图以及爆炸最大压力图像; 在预混气体中加入不同浓度的氮气和氧气, 继续进行爆炸特性实验, 对实验结果进行分析, 得出非可燃气体对甲烷预混气体的影响程度; 最后总结归纳, 甲烷在不同气氛环境下的爆炸特性的区别, 以及产生这种区别的原因, 归纳出如下规律:

- 1) 在对三种单烷烃爆炸极限测定后, 所得数据符合 Le Chatelier理论公式, 基本确定实验的准确性符合要求, 在二元与三元预混气体中, 爆炸极限和爆炸域宽都是存在一定规律, 基本时随着C原子组分含量的增加, 爆炸极限都降低, 而且C原子组分占比越高, 爆炸极限越低; 爆炸域宽也是随C原子组分占比增高降低。
- 2) 通过对单烷烃、二元气态烷烃和三元气态烷烃的爆炸压力和最大爆炸压力进行对比, 得出不同烷烃与甲烷形成预混气体时, 对甲烷预混气体的爆炸危险性的影响能力: $C_3H_8 > C_2H_6 + C_3H_8 > C_2H_6 > CH_4$ 。随着预混气体中C原子组分所占比例的下降, 爆炸压力也有一定程度的降低。
- 3) 不可燃气体对 CH_4 预混气体的影响能力也与C原子的含量有同样的关系, 但 O_2 的加入可以释放C原子的爆炸危险性, 加入 O_2 后, C原子含量高的预混气体产生的最大爆炸压力较其他气体, 最大爆炸压力最大; N_2 等抑爆气体会抑制预混气体的爆炸能力, 整体降低预混气体爆炸极限与爆炸压力。

关键词: CH_4 ; 预混气体; 爆炸极限; 爆炸压力。

Abstract- Today, with the rapid development of petrochemical industry, petrochemical products are more and more indispensable in our life, and chemical fiber products have entered thousands of households. With the construction of a large number of gas storage facilities, the probability of gas and oil tank accidents is also increased, and once an explosion accident occurs, the consequences are often very serious. To prevent its explosion and reduce its explosion risk, the key is to deeply study and master its explosion

characteristics. At present, many scholars at home and abroad have studied the explosion characteristics, but most of them are the explosion instrument, explosion suppression gas, single gas and so on.

In this paper, the explosion limits of methane, ethane and propane were measured by hy12474b combustible gas explosion limit experimental device; Then, the premixed gas was measured by pairwise combination; Through the experimental measurement of the explosion characteristics of binary premixed gas and ternary premixed gas formed by three kinds of gases, the explosion limit, explosion pressure diagram and maximum explosion pressure image are obtained; Different concentrations of nitrogen and oxygen were added into the premixed gas, and the explosion characteristics experiment was continued. The experimental results were analyzed, and the influence degree of non combustible gas on methane premixed gas was obtained; Finally, the differences of explosion characteristics of methane in different atmospheres and the reasons for the differences are summarized as follows.

- (1) In binary and ternary premixed gases, the explosion limit and the width of explosion range have certain rules. Basically, with the increase of the content of C atom, the explosion limit decreases, and the proportion of C atom is higher, The lower the explosion limit is; The width of explosion domain also decreases with the increase of the proportion of C atom. (2) By comparing the explosion pressure and maximum explosion pressure of single alkanes, binary gaseous alkanes and ternary gaseous alkanes, it is concluded that when different alkanes and methane form premixed gas, the influence ability on the explosion risk of methane premixed gas is $C_2H_6 + C_3H_8 > C_3H_8 > C_2H_6 > CH_4$. With the decrease of the proportion of C component in the premixed gas, the explosion pressure also decreases to a certain extent. (3) The influence ability of non combustible gas on CH_4 premixed gas has the same relationship with the content of C atom, but the addition of O_2 can release the explosion risk of C atom. After the addition of O_2 , the maximum explosion pressure of premixed gas with high content of C atom is higher than that of other gases, and the maximum explosion pressure is the largest; N_2 and other explosion suppression gases can inhibit the explosion ability of premixed gas and reduce the explosion limit and explosion pressure of premixed gas as a whole.

Keywords: CH_4 , premixed gas, explosion limit, explosion pressure.

I. 引言

a) 研究背景

自1867年法国发生城市煤气管道爆炸以来,许多学者都对气体爆炸进行了研究工作,随着石油化工的兴起,大批运输油气设施的建设与维修,直接导致油、气爆炸事故的频繁发生。当前我国优化能源结构的主要方式是:降低煤炭消费比重,提高天然气消费比重,而天然气本身的物理和化学性质与瓦斯相近,在发生泄漏时,极易与空气形成爆炸性混合气体^[1],在生产生活中,难免会发生或大或小的爆炸事故,事故一旦发生,其后果往往不堪设想,人们在预防事故发生上,一度下了很大的功夫,通过前人研究,发现降低爆炸危险性关键,是从根本上掌握其爆炸特性。可燃气体爆炸极限、爆炸压力、爆炸火焰等都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],气体的爆炸特性是由许多因素决定的,具体包括气体自身属性、预混气体自身所处环境、起爆温度、点火压力等条件;我们在日常生活想做到对爆炸事故的预防,可以通过控制气体浓度,或加入部分惰性气体:氮气、氦气等来抑制可燃气体的爆炸

b) 研究现状

国内外学者已对预混气体爆炸特性进行了大量研究:任常兴、V. Schröde、李润之^[3-5]等研究发现爆炸极限主要由气体本身的燃爆特性决定,在高温高压的状态下,气体的爆炸上限都会出现剧增现象;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。

焦枫媛^[6]等设计了喷射流混合器和静态混合器组成的2级混合器,并通过自身研究,设计了新的爆炸特性测试装置,分别对比了气体在不同混合器条件下爆炸特性的变化。事实证明在二级混合器条件下,爆炸上限增加,下限减少,他们做出大胆猜测,混合物的均匀性会影响气体的爆炸特性。

罗振敏^[7]等人就 C_2H_6 、 C_2H_4 、 CO 、 H_2 气体分别与 CH_4 气体组成的双组份可燃气体的爆炸极限进行了实验。其结果虽然与公式存在误差但总体而言,Le Chatelier定律均适用于计算;武丽娜等人^[4]觉得Le Chatelier公式计算爆炸极限时可以运用于大量的可燃气体混合物计算,确认了公式的可行性;李海奎等^[5]认为Le Chatelier定律不但可以用于单一物质爆炸极限的计算,而且可以计算其他各种爆炸特性,如:活化能、克分子燃烧热、反应速率相近的混合气体的爆炸极限,并通过实验测定验证了结论的可行性。

Jie. Liu等^[8]对 $H_2/CO/O_2/CO_2/H_2O$ 混合物的压力-温度爆炸极限进行了计算和理论分析。结果表明,随着 H_2O 和 CO_2 摩尔分数的增加,三种爆炸极限附近的爆炸温度均升高。分析表明,第一次爆炸极限主要由添加惰性气体后氧浓度的变化控制;二次爆炸极限的变化是由 $H+O_2(+M)$ 反应速率的变化引起的 $\rightarrow ho_2(+M)$,它是通过第三体复合反应的伴随效率间接实现的,而

惰性气体的加入对第三体爆炸极限的影响主要是由氢气浓度的变化引起的。

A.Lidor等^[9]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。通过对 H_2-O_2 系统爆炸极限的详细统计热力学分析,证明了这一概念。结果表明,虽然分子数的相对波动幅度很小,但反应物在爆炸极限处接近其热力学稳定极限,从而导致自燃的发生;并通过热力学方法进行了分析证明。

S. Kondo^[10]等对由九种不同化合物制备的各种二元和三元混合物的可燃极限进行了测量。处理过的化合物有甲烷、丙烷、乙烯、丙烯、甲醚、甲酸甲酯、1,1-二氟乙烷、氨和一氧化碳。结果表明,可燃性上限的观测值与计算值的偏差主要集中在较低的浓度上。

C. V. Mashuga等^[11]为了估算甲烷和乙烯混合物的爆炸极限,并在其中加入 N_2 ,他选用了1200K的火焰温度,在绝热条件下进行实验测定,最后估算出爆炸极限基本符合理论值。

综上所述,可燃气体混合物爆炸特性研究仍是目前国内外研究的热点之一,研究甲烷预混气体爆炸特性具有重要的现实意义。

c) 研究内容

从目前的研究现状来看,甲烷预混气体爆炸特性还有很多研究方面,对我们日常生活也有一定必要性。本文在前人研究的基础上,以甲烷为研究对象,开展甲烷预混气体爆炸特性实验,利用HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置,研究甲烷预混气体在如下气氛环境:乙烷、丙烷、氧气和氮气等不同气氛环境下得爆炸特性。拟开展以下实验研究。

- 1) 在学习了解实验室现有的HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置的基本原理上,通过设计制作单烷烃的爆炸特性实验方案,检验其准确性和实用性;
- 2) 探究以甲烷为主要成分,分别加入乙烷、丙烷单烷烃通过改变组分配比,进而研究甲烷在单种可燃气体气氛环境中的爆炸特性;
- 3) 探究以甲烷为主要成分,加入乙烷丙烷混合物通过改变三种组分配比,利于HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置,进而研究甲烷在不同组分的二元可燃气体气氛环境中的爆炸特性;
- 4) 探究以甲烷为主要成分,加入乙烷、丙烷、氧气和氮气通过改变各组分配比,研究甲烷在复杂气氛环境中的爆炸特性。

II. 爆炸特性影响因素

a) 爆炸极限的影响因素

可燃气体与空气在一定浓度范围内按一定比例浓度混合,会形成混合物,在遇到点火源或温度较高的物体,会产生燃烧,甚至爆炸,这个浓度我们称之为爆炸极限。

爆炸极限一般分为爆炸上限和爆炸下限;在气体可以爆炸的范围内,气体能达到的最大浓度,这个浓

度就成为爆炸上限；相反，能引起气体爆炸的最小浓度，我们就称之为爆炸下限。不管爆炸上限还是下限，都是研究气体能否爆炸的重要爆炸特性因素。

而影响气体爆炸极限的因素有很多：起爆前的爆炸环境、爆炸点火能力、爆炸环境的压力等都会影响爆炸极限；起爆中爆炸混合物本身的属性、爆炸混合均匀度、混合方式也会影响爆炸极限；所以爆炸极限的影响因素时多种多样的。

i. 温度对预混气体爆炸极限的影响

温度是影响分子运动的重要条件，当温度升高，分子运动变快，很大几率会增加气体的爆炸概率；由

于空气中分子运动变快，碰撞变激烈，当他们与空气中的氧气分子发生碰撞，从而发生反应，就会使混合气体的爆炸风险变高，在爆炸条件形成时，发生爆炸。

Zabrtakis[12]的研究表明，爆炸极限本身可变性比较高，当周围温度不稳定的时候，爆炸上下限都会发生变化，尤其在社会生活与生产中，经常会将一些原料混合起来，在理论上他们的浓度和比例是不会爆炸，但当温度发生变化时，他们会变为可燃甚至会产生爆炸。

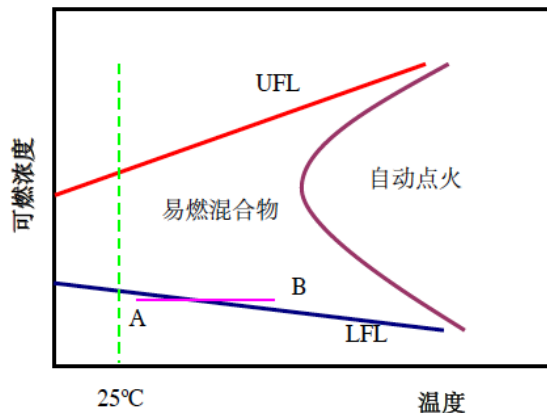


图2-1: 温度对爆炸极限的影响

孙彦龙^[13] 等人为了测试温度对爆炸极限的影响，他们以M15, M50, M85 甲醇汽油为研究对象，在考虑了温度阶梯的设定后，他们选择选用不同的初始温度来进行实验，他们从25°C开始，逐渐升高温度，从开始25°C升高至40°C 到后来递增20 °C 进行实验；实验测得爆炸下限都发生一定变化，其中M50和M85 甲醇汽油都有少许下降，而且他们还发现，在改变甲醇体积时，对下降速度也会有影响，体积分数越大，下降越明显；但M15对反应变化的敏感度就比较低，爆炸下限变化较小。

ii. 压力对预混气体爆炸极限的影响

气体的初始压力会影响气体很多的特性，当然也会影响气体混合物的爆炸极限，在其他学者的研究

我们得知，当爆炸压力变大，爆炸上限会发生明显变化，爆炸上限在压力增大时会明显增大；但在爆炸下限时，影响就没那么明显；但在压力减小时，爆炸上限和下限都会变化，最后形成闭合图像，气体不在发生爆炸。

图2-2天然气爆炸极限对初始压力做出反应的曲线图，由图可以看出，爆炸上限会随着压力的增加，变化显著。爆炸下限基本趋于一条直线，在压力增大时，爆炸下限有一点下降，基本可以验证我们前面所说，爆炸压力对上限影响较大，下限影响一般^[14]。

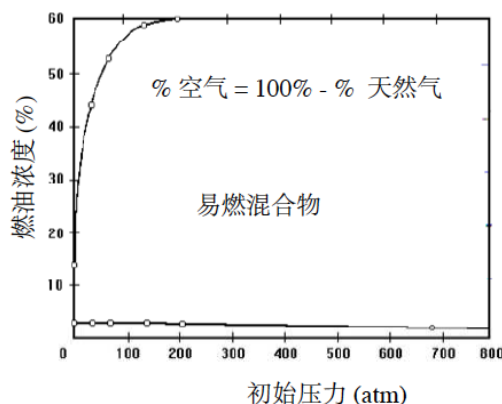


图2-2: 初始压力对28°C天然气可燃性极限的影响

郭丹彤^[15]认为初始爆炸压力对爆炸极限的影响较大,他通过进行改变初始压力的实验出来测量爆炸极限,其中他主要采用控制变量法,测试了气体在1atm和5atm的压力下的最大爆炸压力,结果发现在不同初始压力的条件下,最大爆炸压力各不相同,在1atm时为0.63MPa,而在5atm时为3.25MPa。她大胆预测是因为初始压力的改变,影响了气体爆炸过程产生的链式反应;通过实验研究,她还对密度对爆炸压力的影响做了推测,最终她认为,气体密度增加也会增强爆炸强度。

喻健良^[16]选用了乙烷作为研究对象,探究温度和压力对爆炸极限的影响,他自己设计搭建了高温高压实验装置,在改变了初始温度以及初始压力的条件下,进行乙烷爆炸极限的测量,旨在测出温度和压力双重作用下乙烷爆炸极限变化的规律;实验表明,在初始温度和初始压力增大时,乙烷的爆炸上限和下限都会扩大,爆炸强度也会变大。

iii. 气体组分对预混气体爆炸极限的影响

张增亮^[17]研究角度与他人不同,他想从不同浓度可燃气体下手,研究其最大允许氧浓度的规律,最终通过实验分析的方式,分析爆炸极限与最大允许氧含量之间的关系;进而总结出两者在不同方面的对爆炸极限的影响,继续界定了可燃气体的爆炸范围与爆炸强度。

Besnard^[18]的报告为惰性气体对爆炸极限的影响提供了一个很好的例子。他研究发现,在系统中加入抑爆气体组分,会在一定程度上降低系统的爆炸能力,他们加入各种惰性气体,通过实验,最后对爆炸系统分析发现,抑爆气体可以明显降低系统的爆炸范围。

姜程山^[19]也通过加入抑爆气体来探究组分对爆炸极限的影响,在他看来,多心气体抑爆原理主要是:稀释了气体浓度、隔绝了氧气、还有部分气体可以起到冷却作用;通过这些假设,他认为主要是抑爆气体通过化学反应动力学来影响爆炸,通过抑制爆炸反应,来降低爆炸极限。

孙俊芳^[20]等通过设计一种新式的爆炸极限估算方式,旨在进行不同组分的气态混合物爆炸极限的计算;他们为了获得甲烷在不同混合物中的爆炸极限,对甲烷不同预混气体进行了实验研究,通过对CH₄/N₂和C₂H₄/CO₂这2种二元混合气体进行实验测得,还分别进行了不同比例的组合,测出爆炸极限;最终实验得到爆炸极限与他们设计公式估算结果基本相同,证明了他们设计实验的可行性。

路长^[21]也为研究不同组分对爆炸极限的影响做出贡献,他通过研究H₂和CO₂的反应与爆炸现象,得出CO₂对H₂和CH₄的影响;他自行设计了爆炸平台,通过加入不同体积的预混气体,然后再加入不同配比的H₂,进行爆炸实验,通过对实验后的爆炸压力,火焰传播速度进行分析,得出CO₂不仅有物理惰性和稀释可燃混合气等作用,在爆炸时还会进行爆炸反应,进而消耗部分H₂,反应生产CO会继续影响爆炸过程。

b) 爆炸压力影响因素

在混合气体爆炸时,必然会伴随着压力的上升,而不同的环境条件、点火装置、点火源位置都会影响爆炸时的压力。通常为了方便数据收集,我们通过研究爆炸时的最大爆炸压力、爆炸压力曲线、爆炸上升速率来反映爆炸产生的威力。

爆炸压力是指在气体发生爆炸后,在局部受限空间不断膨胀,对容器造成巨大压力,一般我们选用在常温常压下容积为8升的球形容器进行爆炸压力测定,由于容器形状不同、材质不同测得的爆炸压力也不尽相同。

影响爆炸压力的因素也是多种多样的:点火源位置与能量不同,会直接影响爆炸压力的大小;而且气体状态的不同也会引起爆炸压力的变化;气体的混合系不同,混合系的材质混合系的组分占比都会影响爆炸压力。

i. 点火源对预混气体爆炸压力的影响

混合物在发生爆炸会有很多前提条件,点火源是一个重要条件,只有当点火源达到了发生爆炸的最低要求能量值,气体或混合物才会发生爆炸;当然点火源能量越大,发生爆炸的几率也越大。

而点火源由于它的形状、点火方式、点火能量、点火面积等因素也各不相同,所有不同的点火源也会直接影响到爆炸物的爆炸特性。

Bradley等^[22]在实验过程中将点火源安置在容器口中心,通过实验,他认为最危险的点火位置为球形容器的中心;但HPhylaktou等^[23]在实验时发现将点火源放置在容器底部时,爆炸更加剧烈,他在对比了放在容器中心的实验结果,认为放在容器底部比容器中心爆炸更剧烈;Kasmani等^[24]却与他们的结论都不同,他认为是放在容器底部时压力最大。

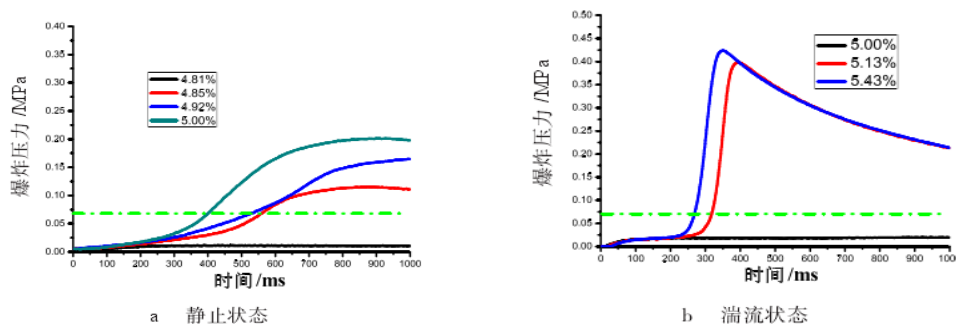
郭丹彤^[25]认为爆炸压力的不同很大程度是由于点火源位置的不同,他在实验牙就肿,分别将点火源位置放置在不同高度,测量爆炸压力。他选用距离封闭段不同的位置进行实验,先选取1m然后将点火源移动至2.5m处;实验结果显示在俩处的爆炸压力不同,分别为0.91MPa和0.27MPa;说明由于点火源位置的不同,爆炸压力有明显变化。

综上所述,选用什么样的点火源、在什么位置放置点火源、点火源能量设置都会直接或间接影响爆炸压力和爆炸极限。

ii. 湍流状态对预混气体爆炸压力的影响

湍流反映的是一种气体流动状态,当气体流动达到一定速度时,气体流层间就会产生相对滑动和混合,导致流体的运动不规则^[26-27]在实际生产场所内的空气往往是非静态的,所以实际生产空间内的气体大都呈湍流状态。

黄代民^[28]通过实验分析得出,湍流条件下甲烷爆炸极限浓度附近的爆炸压力相差明显,如图3-1,由于湍流加快了甲烷气体的传质和传热。



a) 静止状态下甲烷爆炸下限附近压力曲线 b) 湍流状态下甲烷爆炸下限附近压力曲线

图2-3: 静止与湍流状态下甲烷爆炸下限附近压力曲线对比

由图可得,在湍流状态下,甲烷爆炸极限压力发生变化,在湍流状态下,压力升高明显,而且爆炸达到最大爆炸压力迅速,在短的时间内,产生巨大的爆炸压力,比起静止状态,湍流状态的爆炸压力会大许多。

陈爱平^[29]利用 DBZ-1 型爆炸实验装置进行实验测定,通过实验测定得出管道内流动气体流量增大,爆炸强度提高。由于在管道内流量的变化导致气体反应程度不同,由于流动状态的变化直接影响到爆炸极限,通过继续对爆炸极限范围的研究,发现流动状态不单会影响爆炸极限的大小,还会影响爆炸极限范围的变化,在流动状态下爆炸极限范围明显比处于静态时的爆炸极限范围窄。

韦一^[30]通过实验获得了宏观静止和流动状态下丙酮和正庚烷蒸气的爆炸特性参数,并对比分析了流动状态对两种蒸气爆炸特性的影响。分别在宏观静止和流动状态下对不同浓度丙酮和正庚烷蒸气的爆炸特性参数进行测量。结果表明,随着浓度的增加,两种状态下丙酮和正庚烷蒸气的爆炸压力及其上升率均呈现先增大后减小的趋势;此外,流动状态下丙酮和正庚烷蒸气的最大爆炸压力均小幅增加,最大爆炸压力上升率和爆炸指数则显著提高。

谭迎新^[31]探究了动态条件对爆炸下限的影响,他选用三种气体作为实验对象,通过比较他们在动态和静止条件下的爆炸极限,探究不同条件对爆炸极限的影响;他还自己设计了爆炸测定实验装置,通过实验测得数据显示在动态条件下爆炸上限会变大,爆炸下限也有一定升高;还发现动态条件下爆炸范围会变小的实验现象。

事实证明,爆炸物在不同的流动或存在状态下自身的特性会发生变化,在流动状态下爆炸极限和爆炸压力会变大,在湍流状态下也会加快气体爆炸强度。

c) 气体组分对预混气体爆炸压力的影响

在混合物组分不同时,由于各组分爆炸特性不同,所以产生的爆炸压力也不同,直接反应在爆炸中的爆炸威力不同。通常我们用气体爆炸最大爆炸压力来反映他们爆炸产生的危险度。在甲烷与丙烷组分配比不同的情况下,分别取不同浓度时产生的最大爆炸压力,结果如图3-2所示:

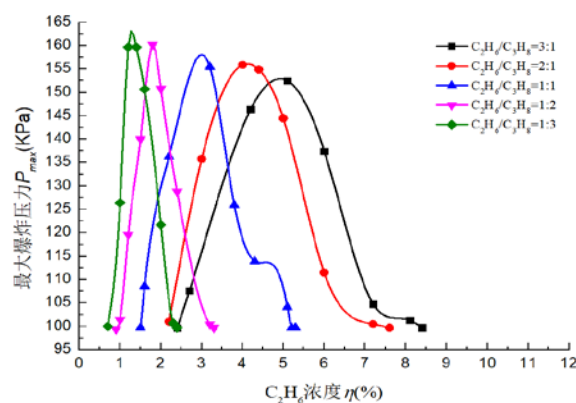


图2-4: CH_4 、 C_3H_8 不同浓度的最大爆炸压力曲线图

可以看出图像变化从右向左靠拢,而且爆炸压力峰值也逐渐身高,但爆炸域宽却变小了,我们大胆猜

测,是C原子的作用使得气体本身的可爆范围转化为最大爆炸压力。

朱熹^[32]采用多功能球形气体/粉尘爆炸实验装置,进行氟化酮、七氟丙烷抑制甲烷爆炸实验。他通过对两个研究对象的爆炸特性进行研究,在同意甲烷浓度下,探究两个研究对象对甲烷的影响规律,主要从爆炸压力、爆炸极限、爆炸压力上升速率来进行研究,结果表明氟化酮对甲烷有明显的抑制作用,在爆炸极限和爆炸压力上都表现明显。

薛少谦^[33]为寻找既环保又能抑制瓦斯爆炸的气体抑爆介质,解决瓦斯输送过程中的爆炸安全问题,分析了七氟丙烷作为抑爆介质的抑爆机理。他通过研究甲烷预混气体的爆炸特性,采用了20L爆炸特性测试系统,在爆炸系统中加入了不同体积分数的七氟丙烷,通过实验探究甲烷预混气体的爆炸压力和最大爆炸压力,以及压力上升速率,结果表明,在体积分数增大时,最大爆炸压力上升,爆炸压力上升速率也变大。

d) 爆炸火焰的影响因素

火焰速度是进行燃烧过程中,我们可以看到的火焰前沿移动速度的快慢,通常会收到火焰前面气流以及管道形状的影响;火焰传播速度使我们通常研究火焰的一个重要特征要素,可以直接反应燃烧和爆炸的危害和强度;火焰速度往往受很多因素影响,燃烧物本身的特性、空气中的氧含量、管道的压力、管道的温度、燃烧物的存在状态等

在爆炸进行的整个过程中,燃烧速度受到环境等原因导致难以测量,数据也不够准确,而测量火焰速度则相对容易得多,数据也准确,所以在研究过程中普遍选用火焰速度来描述爆炸反应过程中火焰传播的运动状况^[34]。

冯若尘^[35]以火焰传播速度以及爆炸压力峰值变化等特征参数为研究对象,分析了在障碍物的影响下,以及浓度梯度的设定对爆炸压力和火焰传播速度的影响。他通过爆炸激波管试验平台,对不同浓度甲烷和不同障

碍物进行组合实验,得出不同浓度的甲烷在不同管状空间爆炸对火焰传播速度的影响:在均匀浓度下火焰传播速度基本一致,在设置梯度浓度变化下,火焰传播速度也会呈上升趋势。

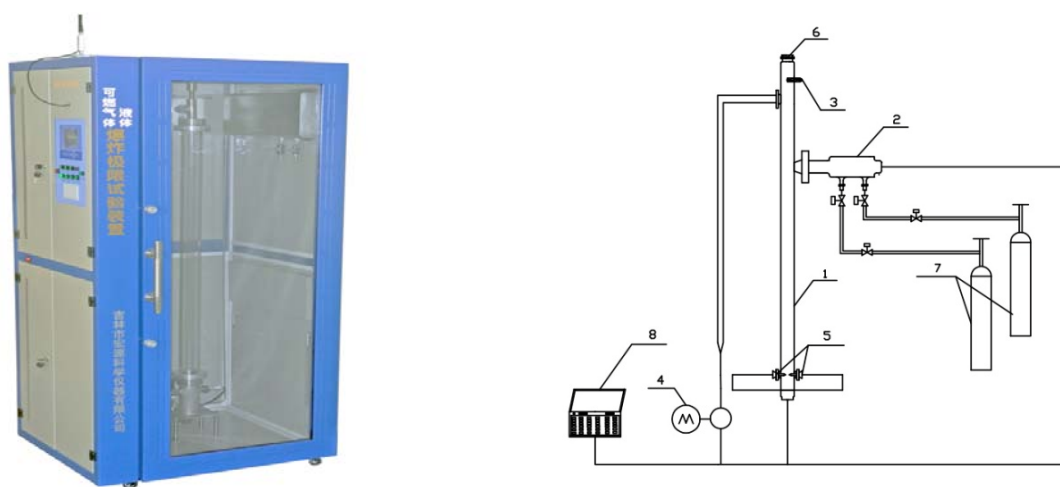
王涛^[36]运用XKWB-S型气体爆炸火焰传播特性测试系统和专业气体爆炸模拟软件FLACS进行实验,想通过模拟,得出甲烷在燃烧时的火焰长度和传播速度的关系,而且在加入了CO₂后他们是否会发生变化;他通过结合可燃性气体爆炸传播相关机理,通过数值模拟发现:当甲烷接近当量浓度时,它的火焰长度和传播距离都会变成,而且CO₂的加入不但会降低他的传播速度,还会降低火焰的亮度和火焰强度;在火焰传播过程中,还会受到一定的湍流影响,导致火焰不稳定。

杨鹏^[37]想通过模型模拟来预测单一体系和混合体系的爆炸下限,通过模拟三种烷烃在绝人条件下的燃烧实验,利用CHEMKIN软件的绝热燃烧相平衡模型探究火焰的变化,得出随着体积分数的增加绝热温度和压力都会升高,他们通过继续实验,最终建立了绝人燃烧相平衡模型。

III. 实验装置及试验方案

a) 试验装置

本实验选用HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置,设计依据符合国家标准GB/T 12474-2008《空气中可燃气体爆炸极限测定方法》。装置如图5-1所示,首先将石英管内抽真空,接下来在气泵的运行下进气,进气结束后自动进行气体搅拌与空气配平,在点火延时120s后电火花进行点火放电,可以在石英管内看到一团上升火焰,可能会伴随不同程度的爆炸声,通过传感器将压力温度信息传至计算机,然后通过泄压装置将管道内压力释放,本实验装置可自动进样,配气精度也可达到0.1%。



1石英管; 2进气口; 3压力温度传感器; 4气泵; 5点火装置; 6压力释放处; 7气瓶; 8计算机

图3-1: 实验装置示意图

b) 试验方案

实验进行时，事先调整好实验前数据，实验大气压处于空气大气压，温度全部设定为17.5°C，实验环境湿度调整为63.2%RH，采样时间为1s，实验设备灵敏度为50，搅拌时间统一设定为120s，点火1s，在真空度为3.2KPa的条件下进行实验。

实验先测定单烷烃气体爆炸极限，我们选用CH₄、C₂H₆、C₃H₈为第一组实验对象，实验结束后，我们分别加入不同浓度的氮气和氧气如（如表 3-1、3-2所示），通过数据处理的到爆炸压力曲线和最大爆炸压力曲线。可燃预混气体爆炸特性的实验方案

本实验以甲烷为主要研究对象，并加入可燃性烷烃气体乙烷和丙烷，研究其对甲烷爆炸极限、爆炸压力、最大爆炸压力的影响。实验围绕气体种类、气体组分配比这两个变量对甲烷进行实验设计。实验开始前先将甲烷、乙烷和丙烷存放在实现准备的气囊中，然后将气囊接入到HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置进气口，通过电脑软件远程控制进气浓度，按照如（表3-1）实验方案，进行甲烷乙烷丙烷配比实验。实验进行

条件进气浓度、实验环境监测、实验温度、点火时间、搅拌时间、实验压力等设定全部通过电脑软件设定，在实验设定结束后，等待实验装置进行进气，搅拌，空气配平后，进行点火，点火结束后软件自动进行数据采集，爆炸压力图像处理，然后进行管道清洗，继续进行下一组实验。

本实验首先测定甲烷、乙烷和丙烷爆炸极限，通过与理论计算值进行对比，验证实验可行性和实验装置的准确性；然后进行甲烷与乙烷混合气体爆炸实验，通过改变甲烷乙烷配比不同，分别进行实验，得出甲烷乙烷预混气体爆炸极限，爆炸压力以及最大爆炸压力的数据与图像；紧接着进行甲烷与丙烷混合气体爆炸实验，与甲烷乙烷爆炸方案相同；最后我们进行甲烷乙烷丙烷三种混合气体爆炸实验，分别进行了27组不同配比的实验，最后得出一系列数据，通过数据分析处理得出甲烷在混合烷烃气氛环境下的爆炸极限、爆炸压力和最大爆炸压力的变化。通过实验数据，分析出通过改变可燃气体气氛和混合气体组分配比对甲烷爆炸特性的影响。

表3-1: 预混气体比例配比表

组分 比例	甲烷: 乙烷	甲烷: 丙烷	甲烷: 乙烷: 丙烷	甲烷: 乙烷: 丙烷	甲烷: 乙烷: 丙烷
	1:1	1:1	1:1:1	2:1:1	3:1:1
	1:2	1:2	1:1:2	2:1:2	3:1:2
	1:3	1:3	1:1:3	2:1:3	3:1:3
	2:1	2:1	1:2:1	2:2:1	3:2:1
	2:2	2:2	1:2:2	2:2:2	3:2:2
	2:3	2:3	1:2:3	2:2:3	3:2:3
	3:1	3:1	1:3:1	2:3:1	3:3:1
	3:2	3:2	1:3:2	2:3:2	3:3:2
	3:3	3:3	1:3:3	2:3:3	3:3:3

本实验方案（表 3-2）测量非可燃气对预混气体爆炸特性的影响，实验首先测量了甲烷，乙烷和丙烷加入氮气和氧气的爆炸特性，验证了实验设备的精确度。由于时间以及考虑材料成本问题，我们紧接着只进行甲烷:乙烷=1:1、甲烷:丙烷=1:1、甲烷:乙烷:丙烷=1:1:1实验加氮气、氧气实验，每一种组分配比分别加入2.5%、5.0%、7.5%、10%氧气和10%、20%、30、

40%氮气。通过对比甲烷和甲烷乙烷预混气体，甲烷和甲烷丙烷预混气体在氧气和氮气影响下的爆炸特性，总结归纳氧气，氮气对甲烷以及甲烷预混气体的影响能力，通过甲烷:乙烷:丙烷=1:1:1预混气体分别加氮气和氧气，我们可以探讨甲烷在复杂气氛环境下爆炸特性的变化。

表3-2: 非可燃气与预混气体比例配比

组分 非可燃气	氧气				氮气			
甲烷	2.5	5.0	7.5	10	10	20	30	40
乙烷	2.5	5.0	7.5	10	10	20	30	40
丙烷	2.5	5.0	7.5	10	10	20	30	40
甲烷: 乙烷=1:1	2.5	5.0	7.5	10	10	20	30	40
甲烷: 丙烷=1:1	2.5	5.0	7.5	10	10	20	30	40

组分 非可燃气体	氧气	氮气
甲烷: 乙烷: 丙烷=1:1:1	2.5 5.0 7.5 10 10 20 30 40	

IV. 甲烷预混气体混合物的危险性测定

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 4-1所示。

a) 甲烷预混气体爆炸极限测定

i. 单烷烃爆炸极限的测定

分别对三种单烷烃气体 (CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8) 进行爆炸极限测定, 所测实验数据与《石油化工可燃气体

表 4-1: 单烷烃爆炸极限表

气体 种类	爆炸下限LEL (%)		爆炸上限UEL (%)	
	实测值	文献值	实测值	文献值
CH_4	6.1	5.0	15.1	15.0
C_2H_6	3.7	3.0	12.7	15.5
C_3H_8	2.5	2.1	9.7	9.5

由表4-1可以看出来, 在单烷烃爆炸极限的测定中, 实验测定结果与文献值还存在一定误差, 爆炸上限平均误差为21%, 爆炸下限误差较低, 平均误差为7%; 我们在分析了实验现象与结果认为主要原因为: (1) 实验室气体纯度没有达到文献值要求, (2) 实验仪器的精确度只能达到0.1%, 不够文献值要求 (3) 实验室环境不恒定, 实验过程中, 实验室环境也会有各种变化, 温度, 湿度都有所差异^[18]。

图 4-1为圆柱石英爆炸管内 CH_4 燃烧爆炸火焰时序图。从图中能够观测到不同浓度下 CH_4 火焰在管内传播

过程中形成的球形或指形火焰, 随着 CH_4 浓度的增加爆炸火焰颜色由浅变深再变浅^[19]。在整个爆炸过程中火焰变化明显, 在爆炸下限我们观察到一朵淡蓝色蘑菇状火焰缓慢上升, 而在甲烷浓度处于爆炸极限中间位置, 火焰表现为上升迅速而且颜色明显, 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爆炸声音; 当浓度增大到爆炸上限附近时爆炸火焰又变为和爆炸下限时的缓慢淡蓝色火焰状态。

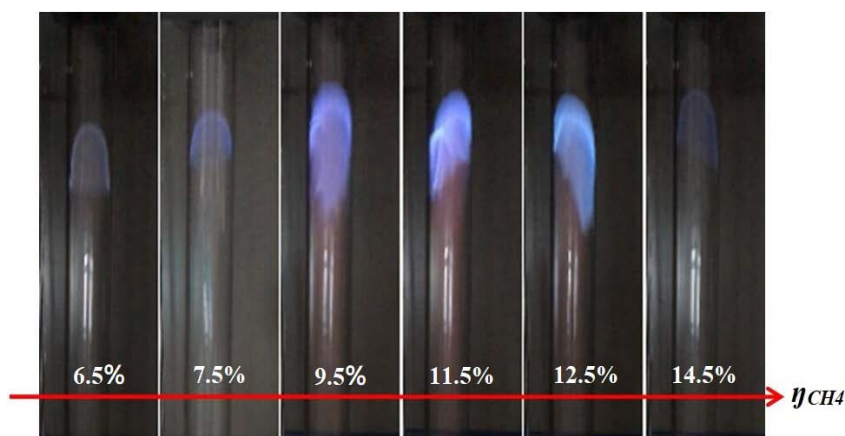


图 4-1: 甲烷燃烧爆炸火焰时序图

ii. 甲烷预混气体爆炸极限的测定

本实验采用Le Chatelier公式 (4-1) 进行理论值计算, 通过计算值我们设定进气浓度, 按照比例设定混合, 通过实验测定爆炸极限, 预混气体爆炸极限实验测定结果如表 (4-2、4-3) 所示。

$$Lm = 100 \div (V_1 \div L_1 + V_2 \div L_2 + \dots + V_n \div L_n) \quad (4-1)$$

式中 Lm ——混合气体爆炸极限, %;

L_1 、 L_2 、 L_3 ——混合气体中各组分的爆炸极限, %;

V_1 、 V_2 、 V_3 —— 各组分在混合气体中的体积分数, %。爆炸极限域宽 (公式 4-2 所示) 也是研究爆炸极限危险性的重要指标, 域宽越大, 气体其所能爆炸的爆炸浓度范围越广。

$$L = UEL - LEL \quad (4-2)$$

式中 L ——爆炸极限域宽, %;

UEL ——爆炸上限, %;

LEL ——爆炸下限, %。

根据表4-2可以看出，在变换不同比例的甲烷乙烷比例和甲烷丙烷比例时，爆炸极限有不同程度的变化，而且域宽也发生了变化。

整体变化呈大致规律，在丙烷占比上升时，爆炸极限就有明显下降，爆炸极限的域宽也随丙烷占比增大而降低。

表 4-2: 二元甲烷预混气体不同组分爆炸极限表

组分 \ 比例		1:1	1:2	1:3	2:1	2:2	2:3	3:1	3:2	3:3
CH_4/C_2H_6	LEL(%)	4.6	4.2	4	5.1	4.6	4.5	5.2	4.8	4.6
	UEL(%)	13.6	13.2	12.8	14.1	13.6	13	14.4	13.3	13.6
	L(%)	9.0	9.0	8.8	9.0	9.0	8.5	9.2	8.5	9.0
CH_4/C_3H_8	LEL(%)	3.8	3.3	3.2	4.5	3.8	3.3	4.8	4.2	3.8
	UEL(%)	12.2	11.1	10.8	12.9	12.2	10.3	13.2	11.2	12.2
	L(%)	8.4	7.8	7.6	8.4	8.4	7	8.4	7	8.4

根据表 4-2可以看出， $CH_4/C_2H_6/C_3H_8$ 为 1:1:1、1:1:2、1:1:3时爆炸极限都呈下降趋势；由表可以看出在C 原子占比变大的情况下，爆炸极限都是呈下降趋势，而且随着C 原子占比含量变大下降趋势也逐渐变大。

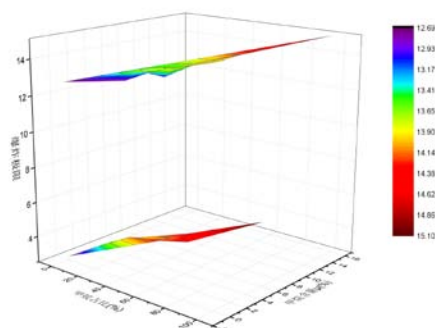
在表中可以看出，随着组分比的变化，也就是C 原子占比的变大，爆炸上限与下限的差值，我们称之为域宽，也在逐渐变小，说明随着C 原子占比的增加，不单会影响爆炸极限的变化，还会影响爆炸的域宽。

表 4_3: 三元甲烷预混气体不同组分爆炸极限表

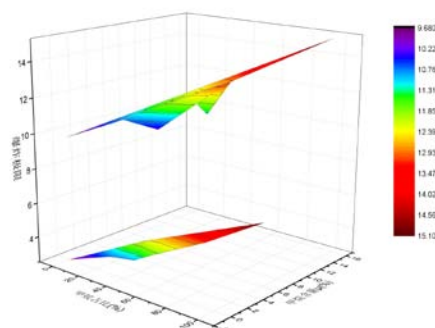
比例 \ 组分		1:1:1	1:1:2	1:1:3	1:2:1	1:2:2	1:2:3	1:3:1	1:3:2	1:3:3
$CH_4/C_2H_6/C_3H_8$	LEL(%)	3.9	3.6	3.5	4	4	3.17	3.54	3.34	3.21
	UEL(%)	12.5	11.2	10	12	11	11.25	12.46	11.87	11.48
	L(%)	9.9	7.6	6.5	8.4	7	8.08	8.92	8.53	8.27
		2:1:1	2:1:2	2:1:3	2:2:1	2:2:2	2:2:3	2:3:1	2:3:2	2:3:3
	LEL(%)	4.4	4.5	3.37	4.5	3.9	3.39	3.8	3.36	3.4
	UEL(%)	12.4	11.5	11.43	12.5	13.8	11.64	12.79	12.21	11.81
	L(%)	8	7	8.06	8	9.9	8.25	8.99	8.85	8.41
		3:1:1	3:1:2	3:1:3	3:2:1	3:2:2	3:2:3	3:3:1	3:3:2	3:3:3
	LEL(%)	4.5	3.84	3.59	4.1	3.79	3.58	4	3.56	3.9
	UEL(%)	14	12.27	11.8	13.02	12.39	11.95	13.03	11.92	13.8
	L(%)	9.5	8.43	8.21	8.92	8.6	8.37	9.03	8.36	9.9

经计算，爆炸极限测量值与理论值基本一致，其误差产生的原因可能是由实验仪器精度造成，因此实验所得数据符合Le Chatelier理论公式。根据上表可以得

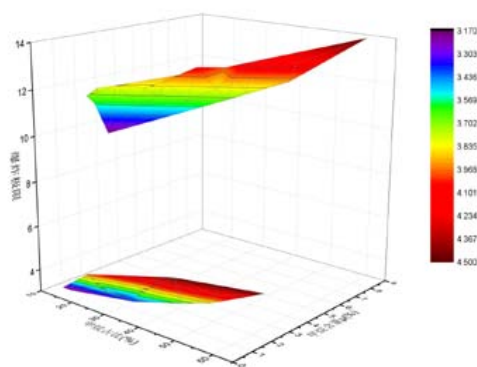
到二元，三元预混气体的爆炸极限三维图，如图4-2所示：



a) 甲乙烷爆炸极限三维图



b) 甲丙烷爆炸极限三维图



c) 甲乙内烷爆炸极限三维图

图 4-2: 甲烷不同预混气体爆炸极限三维图

从爆炸极限三维图中，我们可以看到，不管是甲烷乙烷预混气体、甲烷丙烷预混气体还是甲烷乙烷丙烷预混气体，他们都是呈向右上角增长的趋势，从图4-2可以看出爆炸极限三维图呈一个锥形图，主要是因为甲烷占比变大，C原子组分占比变小，直接导致爆炸极限升高；右上角三维图面积变小也是因为在甲烷占比越来越大的时候，爆炸极限变化的幅度也增大。

b) 甲烷预混气体爆炸压力测定

分别测出不同组分比下的二元，三元预混气体在爆炸极限范围内的最大爆炸压力值，如表 4-4、4-5所示。

表 4-4: 二元甲烷预混气体最大爆炸压力测定表

比例 烷烃混合物	1:1	1:2	1:3	2:1	2:2	2:3	3:1	3:2	3:3
CH_4/C_2H_6	147.1	149.9	152.2	146.5	149.9	146.3	152.2	143.4	147.1
CH_4/C_3H_8	148.9	149.8	154.5	149.0	149.8	145.9	154.8	141	148.9

由表 4-4 可以看出，在二元甲烷预混气体最大爆炸压力测定中，甲乙1:3和3:1时的爆炸压力最大，都为152.2。在甲乙3:2时的爆炸压力最小，仅为 143.4；而甲丙预混气体最大爆炸压力时在甲丙3:1时取到最大值，为154.8，在甲丙3:2时取到最小值，为141。可以看出在组分

不同二元预混气体中，最大爆炸压力最大与最小值的取值点都是相同的，在3:1时取到最大值，在3:2时取到最小值。我们推测是由于H原子占比的变大会提高最大爆炸压力。

表 4-5: 三元甲烷预混气体最大爆炸压力测定表

比例 烷烃混合物	1:1:1	1:1:2	1:1:3	1:2:1	1:2:2	1:2:3	1:3:1	1:3:2	1:3:3
$CH_4/C_2H_6/C_3H_8$	147.5	144.1	147.4	147.5	148.5	142.9	145.5	139.3	150.7
	2:1:1	2:1:2	2:1:3	2:2:1	2:2:2	2:2:3	2:3:1	2:3:2	2:3:3
	150.6	142.2	145.1	150.7	147.5	153	142.2	143.3	138.6
	3:1:1	3:1:2	3:1:3	3:2:1	3:2:2	3:2:3	3:3:1	3:3:2	3:3:3
	144	143	151.7	146.3	137.7	145.3	142.8	145.1	147.5

由表 4-5 可以看出，在二元甲烷预混气体最大爆炸压力测定中，最大爆炸压力的最大值时在甲烷：乙烷：丙烷=3:1:3时取到，为 151.7，比起二元预混气体最大值要稍微低一点。而最小值是在甲烷：乙烷：丙烷=2:3:3时取到，仅为 138.6，是比甲乙预混气体最小值低，但是高于甲丙预混气体最小值，主要是因为预混气体中C原子在总体里含量的占比影响了爆炸压力的大小，C 原子含量高的预混气体，爆炸压力会低一些，反之亦然。

分别测出不同组分比下的二元、三元气态烷烃混合物爆炸极限范围的爆炸压力值，如表 4-6、4-7、4-8、4-9、4-10所示。

表 4-6: 二元甲烷预混气体爆炸压力测定表

$CH_4:C_2H_6=1:1$		$CH_4:C_2H_6=1:2$		$CH_4:C_2H_6=1:3$		$CH_4:C_2H_6=2:1$		$CH_4:C_2H_6=2:2$		$CH_4:C_2H_6=2:3$		$CH_4:C_2H_6=3:1$		$CH_4:C_2H_6=3:2$		$CH_4:C_2H_6=3:3$	
CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)
2.3	100.1	1.5	100	0.9	101.4	3.5	100	2.3	100.1	1.8	99.8	3.6	101.3	2.9	99.8	2.3	100.1
2.8	115	1.7	122.5	1.1	121.5	4.2	125	2.8	115	2.1	122	6	137.5	3.5	117	2.8	115
3.9	145.5	2	135	1.4	142	5.6	145.5	3.9	145.5	3.4	146.3	7.6	142.5	4.5	128	3.9	145.5
4.6	142.5	2.5	150	2	148	7	121.5	4.6	142.5	4	130	9	120	5.3	143.4	4.6	142.5
5.8	115	3.4	117.5	2.4	122.5	8	114	5.8	115	4.7	123	10.5	101.3	6.5	122	6.8	100
6.8	100	4.4	100	3	105	9.5	100	6.8	100	5.2	99.8	10.6	100	7.8	99.8	2.3	100.1

表 4-7: 二元甲烷预混气体爆炸压力测定表

$CH_4:C_3H_8=1:1$		$CH_4:C_3H_8=1:2$		$CH_4:C_3H_8=1:3$		$CH_4:C_3H_8=2:1$		$CH_4:C_3H_8=2:2$		$CH_4:C_3H_8=2:3$		$CH_4:C_3H_8=3:1$		$CH_4:C_3H_8=3:2$		$CH_4:C_3H_8=3:3$	
CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)
2	100.1	1	100	0.8	100	3	101.3	2	100.1	1.3	99.8	4	100	2.52	99.8	2	100.1
2.5	124.7	1.1	109	0.9	110	4.2	142.5	2.5	124.7	1.8	125	5	130	3	116	2.5	124.7
3.5	147.8	1.5	124.1	1	127.9	6	145	3.5	147.8	2.8	145.9	6.5	147.5	4.1	132	3.5	147.8
4.0	133.4	2	148.5	1.5	151.7	7.1	112.5	4.0	133.4	3.3	131	7.6	135	4.8	141	4.0	133.4
4.5	119.5	2.5	132.3	2	120.6	7.5	102.5	4.5	119.5	3.8	117	9	105	5.5	127	4.5	119.5
5.5	100	3	108	2.5	100	8.5	99.5	5.5	100	4.1	99.8	10	100	6.7	99.8	5.5	100

表 4-8: 三元甲烷预混气体爆炸压力测定表

[illegible]

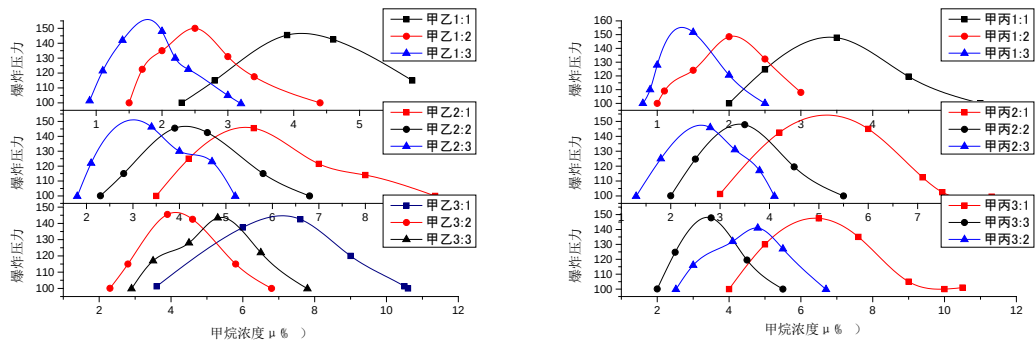
表 4-9: 三元甲烷预混气体爆炸压力测定表

$CH_4:C_2H_6:$ $C_3H_8=2:1:1$ CH_4 浓度 (%)	$CH_4:C_2H_6:$ $C_3H_8=2:1:2$ CH_4 浓度 (%)	$CH_4:C_2H_6:$ $C_3H_8=2:1:3$ CH_4 浓度 (%)	$CH_4:C_2H_6:$ $C_3H_8=2:2:1$ CH_4 浓度 (%)	$CH_4:C_2H_6:$ $C_3H_8=2:2:2$ CH_4 浓度 (%)	$CH_4:C_2H_6:$ $C_3H_8=2:2:3$ CH_4 浓 度 (%)	$CH_4:C_2H_6:$ $C_3H_8=2:3:1$ CH_4 浓 度 (%)	$CH_4:C_2H_6:$ $C_3H_8=2:3:2$ CH_4 浓 度 (%)	$CH_4:C_2H_6:$ $C_3H_8=2:3:3$ CH_4 浓 度 (%)									
2.2	100	1.8	99.8	1.12	99.8	1.8	100	1.3	99.8	0.97	99.8	1.3	99.8	0.96	99.8	0.85	99.8
3.1	127	2.3	128	1.5	115	2.1	113	1.8	131	1.3	121	1.8	126	1.5	115	1.1	115
4.2	150.6	3.1	142.2	2	132	3.3	150.7	2.2	145.3	1.8	133	2.5	134	2	125	1.5	125
5	131	3.6	135	2.5	145.1	3.7	139	2.8	135	2.2	153	3	142.2	2.2	143.3	1.9	138.6
5.7	116	4.0	120	3.1	122	4.2	120	3.5	121	2.7	135	3.8	129	3.1	120	2.4	122
6.2	100	4.6	100	3.81	99.8	5	100	4.1	99	3.3	99.8	4.3	99.8	3.8	99.8	3	99.8

表 4-10: 三元甲烷预混气体爆炸压力测定表

$CH_4:C_2H_6:$		$CH_4:C_2H_6:$		$CH_4:C_2H_6:$		$CH_4:C_2H_6:$		$CH_4:C_2H_6:$		$CH_4:C_2H_6:$		$CH_4:C_2H_6:$	
$C_3H_8=3:1:1$		$C_3H_8=3:1:2$		$C_3H_8=3:1:3$		$C_3H_8=3:2:1$		$C_3H_8=3:2:2$		$C_3H_8=3:2:3$		$C_3H_8=3:3:1$	
CH_4 浓度 (%)	Pmax (kPa)	CH_4 浓度 (%)		CH_4 浓度 (%)		CH_4 浓度 (%)		CH_4 浓度 (%)		CH_4 浓度 (%)		CH_4 浓度 (%)	
		Pmax (kPa)		Pmax (kPa)		Pmax (kPa)		Pmax (kPa)		Pmax (kPa)		Pmax (kPa)	
2.7	99.8	1.92	99.8	1.5	99.8	2.1	99.8	1.6	99.8	1.3	99.8	1.7	99.8
3.5	124	2.2	121	1.9	121	2.8	121	2.1	115	1.9	121	2.1	121
5.6	144	3.5	133	2.5	134	3.5	131	3.1	126	2.5	133	3.1	133
6	130	3.9	143	3.4	151.7	4.2	146.3	3.6	137.7	2.8	145.3	3.7	142.8
7.1	120	5.4	126	4.5	126	5.5	126	4.3	122	3.5	127	4.5	122
8.4	99.8	6.1	99.8	5.1	99.8	6.5	99.8	5.31	99.8	4.5	99.8	5.6	99.8

由上表作出图 4-3、4-4:

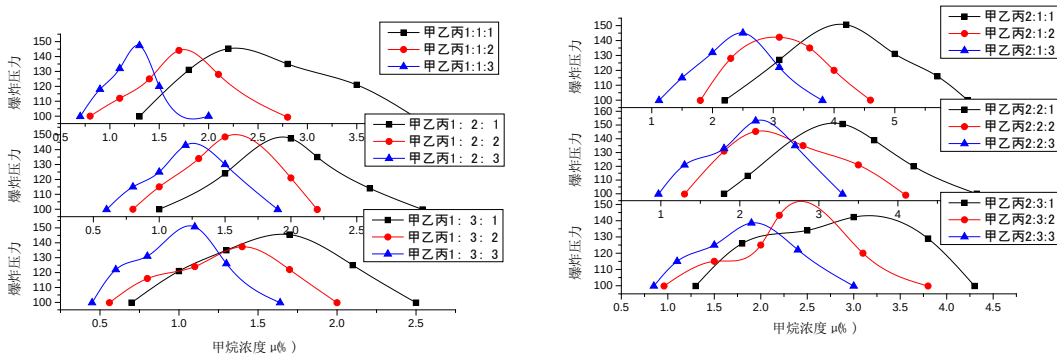


a) 甲烷/乙烷爆炸压力对比图 b) 甲烷/丙烷爆炸压力对比图

图4-3: 二元预混气体爆炸压力对比图

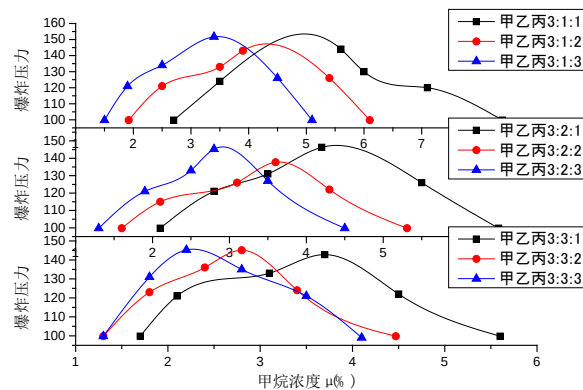
从图4-3中可以看出, 各组分比的最大爆炸压力曲线的趋势基本相同, 均随预混气体混合物浓度的升高先增大后减小^[38]; 在甲乙混合物与甲丙混合物中, 能够取到最大的爆炸压力时, 气体的组分比为2:1和1:3。不

同比例的爆炸曲线最大压力存在差异, 但压力曲线走势基本相同, 在C原子占比小的时候, 曲线的横坐标跨度较小, 但最大值较大; 反之亦然。



a) 甲烷比值恒定为1, 混入不同比例乙烷/丙烷的爆炸压力曲线图

b) 甲烷比值恒定为2, 混入不同比例乙烷/丙烷的爆炸压力曲线图



b) 甲烷比值恒定为2, 混入不同比例乙烷/丙烷的爆炸压力曲线图

图4-4: 三元预混气体爆炸压力对比图

从图4-4中可以看出, 各组分比的最大爆炸压力曲线的趋势也是基本相同, 均随预混气体混合物浓度的

升高先增大后减小; 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; 由于实验设备精确

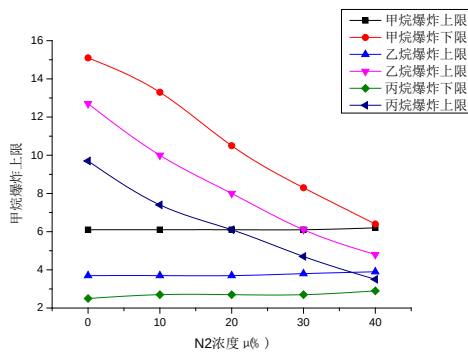
度的问题, 部分爆炸压力曲线会存在误差, 但还是可以看出当丙烷在预混气体中占比变大时, 爆炸压力曲线呈细高状, 证明当丙烷占比增大时, 爆炸压力会变大, 但

可爆范围会变小, 即预混气体中, 甲烷浓度很低就可以发生爆炸, 而且爆炸压力会很大。

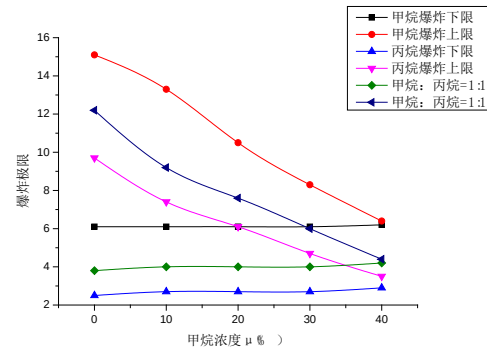
V. 非可燃气对甲烷预混气体危险性的影响

a) N_2 对混合可燃气体危险性影响的测定

i. N_2 对甲烷预混气体爆炸极限影响的测定



a) 单烷烃混合不同浓度 N_2 爆炸极限曲线图



b) 多烷烃混合不同浓度 N_2 爆炸极限曲线图

图5-1: 单烷烃、多烷烃混合不同浓度 N_2 爆炸极限曲线图

由图 5-1 (a) 可以看出在形成甲丙预混气体后, 加入一定量 N_2 后, 甲丙预混气体的爆炸极限变化趋势和单烷烃气体变化趋势大致相同; 而且爆炸极限一致保持在甲烷与丙烷爆炸极限之间。而由图 5-1 (b) 可以看出, 预混气体加入 N_2 的爆炸极限变化趋势都是大致相同的; 其中甲丙预混气体的爆炸极限最低, 甲乙丙烷预混气体的爆炸极限最高。在加入大量 N_2 后, 最后预混气体的爆炸极限上下限重合, 不再爆炸。

ii. N_2 对单烷烃爆炸极限影响的测定

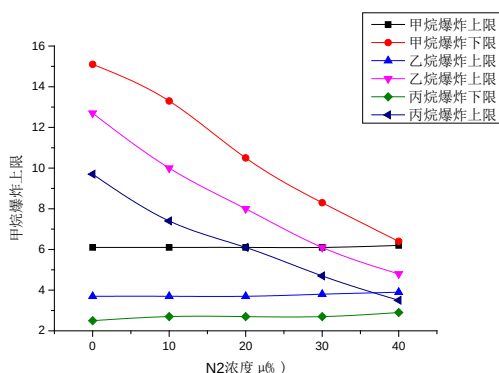
实验就分别对三种单烷烃气体 (CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8) 加入不同浓度的氮气对其爆炸极限进行测定, 测量结果如表 5-1 所示。

表5-2: 单烷烃混合不同浓度 N_2 爆炸极限测定表

N_2 浓度(%)	0	10.1	20	30.1	40
甲烷爆炸上限(%)	15.1	13.3	10.5	8.3	6.4
N_2 浓度(%)	0	10.1	20.1	30	40
乙烷爆炸上限(%)	12.7	10.0	8.0	6.1	4.8
N_2 浓度(%)	0	10.1	20	30	40
丙烷爆炸上限(%)	9.7	7.4	6.1	4.7	3.5
N_2 浓度(%)	0	10.2	20.1	30.1	40.1
甲烷爆炸下限(%)	6.1	6.1	6.1	6.1	6.2
N_2 浓度(%)	0	10.1	20	30	40
乙烷爆炸下限(%)	3.7	3.7	3.7	3.8	3.9
N_2 浓度(%)	0	9.9	20	30	40
丙烷爆炸下限(%)	2.5	2.7	2.7	2.7	2.9

由表5-1可以看出, 在加入不同浓度 N_2 后, 单烷烃的爆炸极限都会发生变化, 而且都随着 N_2 浓度的增加, 爆炸上限明显降低, 爆炸下限基本没有变化。

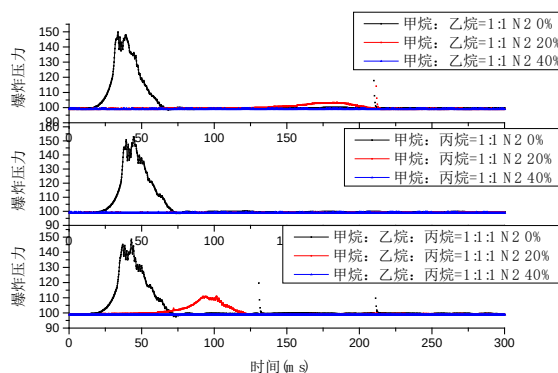
由表5-1可以做出图5-2, 从图5-2 可以看出在加入 N_2 后, N_2 的抑制效果明显, 单烷烃的爆炸上限急剧下降, 在 N_2 浓度达到 35%-40% 时, 爆炸上下限基本相同, 此时气体不会再次发生爆炸。

图5-2: 单烷烃混合不同浓度 N_2 爆炸极限曲线图

与上限不同的是爆炸下限的变化很小, 图像基本处于一条直线: 在加入 N_2 后, 乙烷的爆炸上下限处于甲烷与丙烷之间, 而且甲烷爆炸极限下降趋势最大, 乙烷其次, 丙烷最小。我们可以推测 N_2 对单烷烃爆炸极限的影响强度为 $CH_4 > C_2H_6 > C_3H_8$ 。

iii. N_2 对甲烷预混气体爆炸压力曲线的影响

通过实验数据, 我们做出加入 N_2 预混气体最大爆炸压力曲线对比图 (5-3):

图5-3: 加入 N_2 预混气体最大爆炸压力曲线对比图

由图5-3可以看出在加入 N_2 后单烷烃或预混气体的最大爆炸压力都有明显降低; 在没有加入 N_2 时, 不同比例的预混气体的有明显的爆炸压力曲线, 二元预混气体都在大约25ms的时刻达到最大爆炸压力, 而三元预混气体达到最大爆炸压力的时刻要稍微延后一些。在加入20% N_2 后, 甲乙预混气体还有一点爆炸压力显示在图上, 当 N_2 浓度增加到40%的时候, 就没有爆炸压力了, 是因为 N_2 浓度太高抑制了预混气体的爆炸特性, 从而不在爆炸。而甲丙与甲乙丙预混气体则在加入20% N_2 的时候, 爆炸压力就基本趋于0, 从前面我们研究可以

推测是因为, 随着C原子占比的增加, 预混气体本身的爆炸特性就会降低, 当加入 N_2 惰性气体后, 导致爆炸特性急剧下降, 最终无法爆炸。

b) O_2 对混合可燃气体危险性的影响测定

i. O_2 对单烷烃爆炸极限影响的测定

O_2 对混合烷烃爆炸极限影响的测定采用的是两种不同烷烃加 O_2 构成三元混合物的进行爆炸极限的试验, 试验结果如表5-2所示。

表5-3: 烷烃气体混合 O_2 爆炸极限表

O_2 浓度(%)	0	2.6	5.0	7.6	10.1	O_2 浓度(%)	0	2.6	5.2	7.6	10
甲烷爆炸上限(%)	15.1	17.6	20.7	23.6	26.7	甲烷爆炸下限(%)	6.1	5.9	5.9	5.9	5.9
O_2 浓度(%)	0	2.6	5.0	7.4	10.1	O_2 浓度(%)	0	2.5	5.1	7.6	10
丙烷爆炸上限(%)	9.7	10.1	11.9	13.5	15.3	丙爆炸下限(%)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
O_2 浓度(%)	0	2.6	5.0	7.6	10.1	O_2 浓度(%)	0	2.5	5.1	7.7	10.2
$CH_4:C_3H_8=1:1$	12.2	12.8	14.6	17.2	18.8	$CH_4:C_3H_8=1:1$	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
UEL(%)						LEL(%)					

从上表中,可以看出烷烃爆炸上限随着 O_2 浓度的增加呈上升趋势,爆炸下限虽然呈下降趋势但下降幅度很小^[17]。在加入 O_2 后爆炸极限明显变大,最大值为26.7,时当 CH_4 加10% O_2 的爆炸上限,我们推测在加入更多 O_2 ,其爆炸极限还会上升,但由于实验风险变大,我们暂时停止继续加 O_2 的实验。最小值为丙烷不加 O_2 ,即使全部加入2.5% O_2 也依旧时丙烷爆炸上限最低,主要原因

还是由于C原子的含量太高,导致气体本身的爆炸能力变低。

在 O_2 浓度一样时,在甲烷里加入乙烷形成混合气体时,发现预混气体还是处于甲烷与丙烷之间,这个结果与我们推测结果一样,依旧是C原子占主要原因,最终影响了爆炸极限的变化。

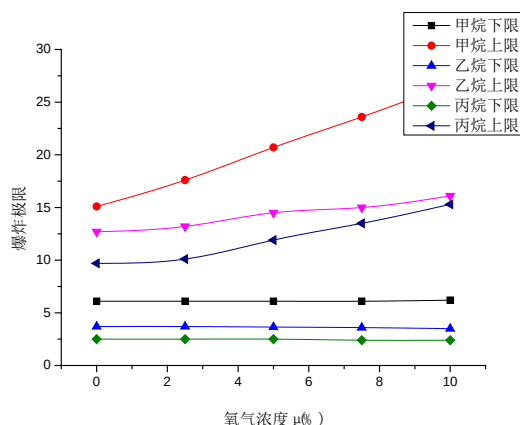


图5-4: 单烷烃混合 O_2 爆炸极限曲线图

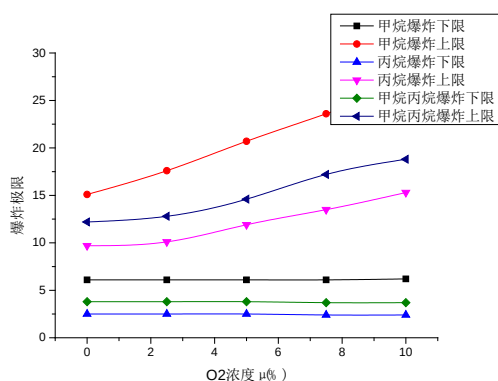
从上图中可以看出,氧气对单烷烃有一定的活化能力,导致单烷烃的爆炸极限都有不同程度的增加。由图可以看出 O_2 对单烷烃的活化能力大小为: 甲烷 > 乙烷 > 丙烷。由于C原子数的增加,会降低单烷烃本身的爆炸特性,也会降低氧气的活化能力。

在图中显示,在加入 O_2 后整体图像呈喇叭状,可以看出依然是甲烷的爆炸极限增长剧烈,乙烷次之,

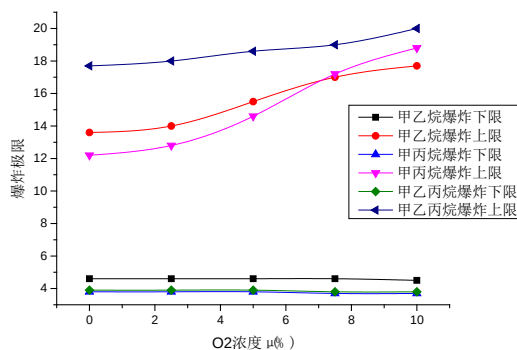
丙烷最小;但在之后的图像走势可以看出丙烷的爆炸上限可能会超过乙烷的爆炸上限,可能是实验数据存在一定误差,但整体我们可以看出乙烷和丙烷也都是呈上升趋势,而且是逐渐变缓。

ii. O_2 对甲烷预混气体爆炸极限影响的测定

通过实验数据,我们作出单烷烃、多烷烃混合不同浓度 O_2 爆炸极限曲线图 (5-5):



a) 单烷烃混合 O_2 爆炸极限曲线图



b) 多烷烃混合 O_2 爆炸极限曲线图

图5-5: 单烷烃、多烷烃混合不同浓度 O_2 爆炸极限曲线图

由图 5-5 (a) 可以看出在形成甲丙预混气体后,加入一定量 O_2 后,甲丙预混气体的爆炸极限变化

趋势和单烷烃气体变化趋势大致相同;而且爆炸极限一致保持在甲烷与丙烷爆炸极限之间。而由图5-5 (b) 可

以看出, 预混气体加入 O_2 的爆炸极限变化趋势都是大致相同的; 其中甲丙预混气体的爆炸极限最低, 甲乙丙烷预混气体的爆炸极限最高, 我们大胆推测是由于C原子数的增加, O_2 的影响能力降低了, 但预混气体本身随含

C量的增高, 本身的爆炸潜力也随之变大。我们推测会有一个临界点, 使得甲丙预混气体的爆炸极限变为最大值。

iii. O_2 对甲烷预混气体爆炸压力曲线的影响

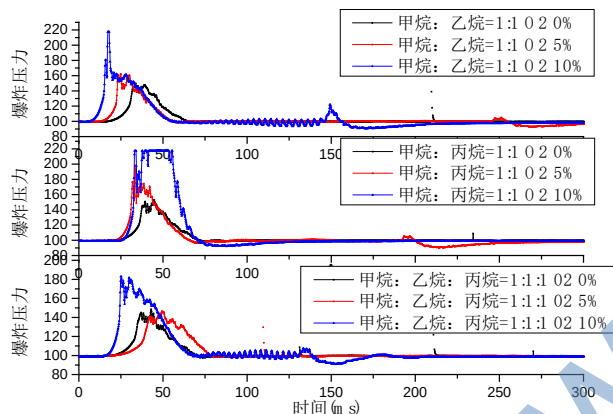


图5-6: 加入 O_2 最大爆炸压力曲线对比图

由图5-6可以看出加入不同浓度 O_2 的甲烷预混气体的最大爆炸压力曲线, 在加入0% O_2 时, 不同比例的甲烷预混气体都有明显的爆炸压力; 在加入5% O_2 时, 爆炸压力顶峰有明显上升, 而且, 起爆时刻也由25ms提前到10-15ms; 在加入10% O_2 时, 可以看出甲乙与甲丙预混气体的最大爆炸压力已经突破测量范围, 尤其甲丙预混气体的最大爆炸压力远远超过了217.5kPa, 而且起爆时间被再次提前。可以看出在加入 O_2 后, 会明显提高甲烷预混气体的最大爆炸压力, 还会将起爆时间提前, 当 O_2 浓度足够高时, 基本上可以做到在点火的一瞬间就达到最大爆炸压力的程度。而且, 随着C原子组分占比的增加, 我们可以发现在 O_2 的活化作用下, 激

发了C原子的爆炸威力, 导致C原子组分占比高的预混气体产生的最大爆炸压力相较其他气体要高出许多。当我们在平时的可燃气体隐患排查时, 一定要注意环境中 O_2 的含量, O_2 会全面的提高可燃物的爆炸危险度, 包括爆炸极限、爆炸域宽、爆炸压力以及起爆时间等。

VI. 不同气氛中甲烷爆炸特性对比

a) 甲烷预混气体爆炸极限测定

整理甲烷在不同气氛下形成各种预混气体的爆炸极限, 作出表6-1:

表6-1: 甲烷预混气体爆炸极限表

组分	CH_4	$CH_4:C_2H_6=1:1$	$CH_4:C_3H_8=1:1$	$CH_4:C_2H_6:C_3H_8=1:1:1$	CH_4 5% O_2	$CH_4:C_2H_6=1:1$ 15% O_2	$CH_4:C_3H_8=1:1$ 5% O_2	$CH_4:C_2H_6:C_3H_8=1:1:1$ 15% O_2	CH_4 0% N_2	$CH_4:C_2H_6=1:1$ 120% N_2	$CH_4:C_3H_8=1:1$ 120% N_2	$CH_4:C_2H_6:C_3H_8=1:1:1$ 0% N_2
爆炸极限												
爆炸上限	15.1	13.6	12.2	12.5	20.7	15.5	14.6	18.6	10.5	9	7.6	10.5
爆炸下限	6.1	4.6	3.8	3.9	5.9	4.6	3.8	3.9	6.1	4.6	4.6	3.9

由表6-1可以看出, CH_4 加入5% O_2 爆炸上限最大, 为20.7, 最小为 $CH_4:C_3H_8$ 加20% N_2 , 为7.6, 因为在 O_2 的活化作用下, CH_4 爆炸极限明显升高, 而在 N_2 的抑制作用下本来爆炸极限就偏低 $CH_4:C_3H_8$ 预混气体, 就要稍微低一点。由表6-1作出图6-1:

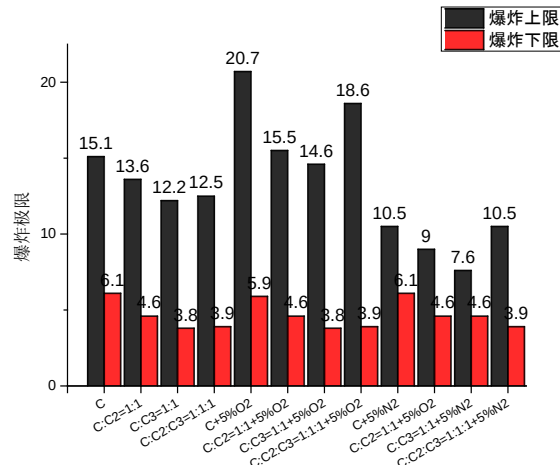


图6-1: 甲烷预混气体爆炸极限图

由图6-1可以看出 CH_4 的不同预混气体, 爆炸下限波动较小, 但爆炸上限波动频繁, 在加入5% O_2 后的预混气体的爆炸上限明显比其他气氛环境下打的多。在加入20% N_2 后, 爆炸上限也稍微降低了。爆炸上限最大差值达到了13, 而爆炸下限最大差值仅为2.3。

b) 甲烷预混气体爆炸压力测定

将不同预混气体爆炸压力整理得到图6-2:

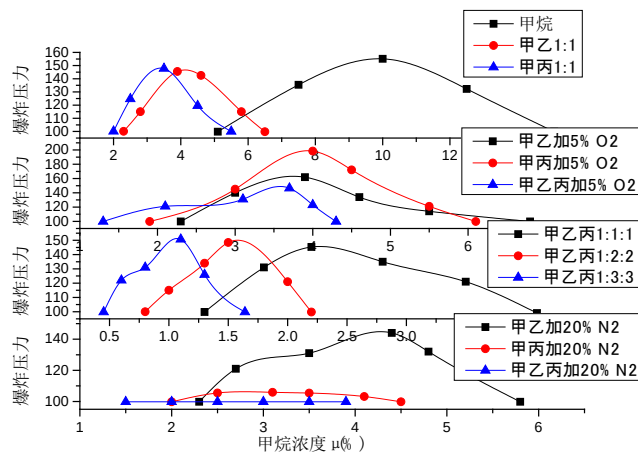


图6-2: 甲烷预混气体爆炸压力图

由图6-2可以看出, 甲烷在不同气氛环境中爆炸压力各不相同, 甲烷与可燃气体或抑爆气体形成的预混气体爆炸压力曲线都有明显降低, 爆炸域宽会稍微扩大, 我们可以通过加入可燃烷烃气体或抑爆气体来防止甲烷预混气体的爆炸。当甲烷与活化气体形成预混气体时, 爆炸压力会有明显上升, 而且爆炸域宽也会变大, 也可以发现甲烷: 丙烷=1:1时加入氧气爆炸压力最大, 是因为C原子组分占比的增大, 在氧气的活化作用下, 激发了预混气体的爆炸能力, 使得爆炸压力变大。

c) 甲烷预混气体最大压力爆炸测定

将不同预混气体最大爆炸压力整理得到图6-3:

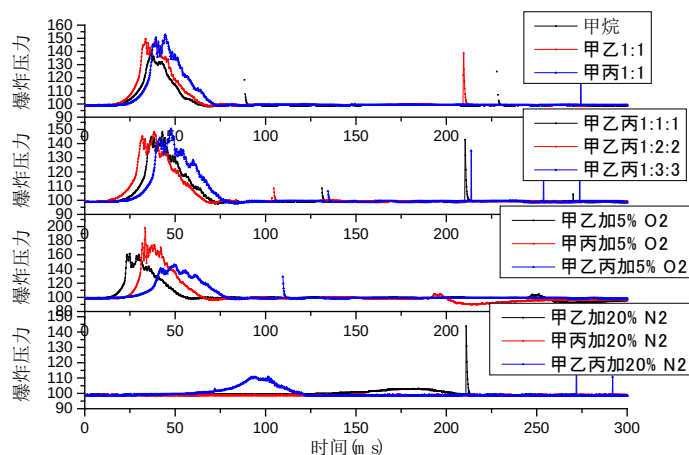


图6-3: 甲烷预混气体最大爆炸压力图

由图6-3可以看出,当C原子组分占比偏大时,爆炸压力图像顶峰最高,但起爆时间会有一点延后;在加入氧气后,最大爆炸压力的顶峰明显升高,而且起爆时间也稍微提前;相反,在加入抑爆气体氮气后,不单爆炸压力顶峰降低很多,而且起爆时间延后,爆炸时长也变窄。

d) 小结

综上,我们可以看出甲烷在不同气氛环境中的爆炸特性各不相同,不同的气氛环境对甲烷的影响强度与机理也不尽相同,可燃烷烃气体虽然会降低预混气体的爆炸极限,但当C原子占比变大时,会使得最大爆炸压力变大;活化气体则会全面活化预混气体的爆炸特性,增大爆炸极限、提高爆炸压力、提前起爆时间、延长爆炸时长;惰性气体可以全方面抑制预混气体的爆炸能力,降低爆炸极限、降低爆炸压力、延后起爆时间等,但惰性气体本身带有一定的危险性,我们在使用惰性气体抑制爆炸时要注意惰性气体在空气中的浓度,谨防窒息危害。

VII. 结论

本文利用HY12474B型可燃气体爆炸极限实验装置,开展了甲烷不同气氛环境爆炸特性的实验研究,得出了以下结论:

不可燃气体对 CH_4 预混气体的影响能力也与C原子的含量有同样的关系,但 O_2 的加入可以释放C原子的爆炸危险性,加入 O_2 后,C原子含量高的预混气体产生的最大爆炸压力较其他气体,最大爆炸压力最大。希望本文的以为 CH_4 爆炸特性研究提供参考价值。

1) 在对三种单烷烃爆炸极限测定后,所得数据符合Le Chatelier理论公式,基本确定实验的准确性符合要求,在二元与三元预混气体中,爆炸极限和爆炸域宽都是存在一定规律,基本时随着C原子组分含量的增加,爆炸极限都降低,而且C原子组分占比越高,爆炸极限越低;爆炸域宽也是随C原子组分占比增高降低。

- 通过对单烷烃、二元气态烷烃和三元气态烷烃的爆炸压力和最大爆炸压力进行对比,得出不同烷烃与甲烷形成预混气体时,对甲烷预混气体的爆炸危险性的影响能力: $C_3H_8 > C_2H_6 + C_3H_8 > C_2H_6 > CH_4$ 。随着预混气体中C原子组分所占比例的下降,爆炸压力也有一定程度的降低。
- 不可燃气体对 CH_4 预混气体的影响能力也与C原子的含量有同样的关系,但 O_2 的加入可以释放C原子的爆炸危险性,加入 O_2 后,C原子含量高的预混气体产生的最大爆炸压力较其他气体,最大爆炸压力最大; N_2 等抑爆气体会抑制预混气体的爆炸能力,整体降低预混气体爆炸极限与爆炸压力。

VIII. 致谢

在将近三个月的时间的论文写作过程中,我遇到了无数的困难和障碍,但都在同学和老师的帮助下度过了,尤其要强烈感谢我的论文指导老师庄春吉讲师,他对我进行了无私的指导和帮助,不厌其烦的进行论文的修改和改进。庄老师严谨的治学态度、渊博的学术知识、诲人不倦的敬业精神以及宽容的待人风范使我获益颇多。

其次,感谢学院为我提供了良好的实验环境,才使得我得以完成这篇毕业论文。

同时,也感谢这篇论文所涉及到的各位学者。本文引用了数位学者的研究文献,如果没有各位学者的研究成果的帮助和启发,我将很难完成本篇论文的写作。

再次感谢每一位参与实验与论文过程的老师和同学,在他们的帮助下,我才能安全进行实验,认真完成论文。

最后,感谢我的爸爸妈妈,养育之恩,无以回报,是你们不求回报的付出才有了今天的我,谢谢你们!

由于我的学术水平有限,所写论文难免有不足之处,恳请各位老师和学友批评和指正。

REFERENCES RÉFÉRENCES REFERENCIAS

- 王洪明, 潘永东. 油气站场天然气泄漏应急处置若干问题探讨[J]. 石油化工安全环保技术, 2015(01): 15-18.
- 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.
- 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.
- 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): 47-851.
- 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.
- 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.
- 罗振敏, 苏彬, 王涛等. C_2H_6/C_3H_8 影响 CH_4 爆炸极限参数及动力学特性研究[J]. 化工学报, 2019, 70(09): 3601-3601.
- Jie. Liu, Junle. Wang, Ning. Zhang. On the explosion limit of syngas with CO_2 and H_2O additions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43 (6), 3317-3329.
- 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. Crowl. Flammability zone prediction using calculated adiabatic flame temperatures[J]. Process Safety Progress, 1999, 18(3): 127-134.
- Zabetakis M G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors[J]. Bulletin 627, 1965.
- 孙彦龙, 谭迎新, 谢溢月等. 甲醇汽油混合物爆炸下限测试研究[J]. 中国安全科学学报. 2015, 25(12): 56-61.
- Zhao F. Experimental measurements and modeling prediction of flammability limits of binary hydrocarbon mixtures[J]. Dc Language, 2009.
- 郭丹彤. 窰井内受限空间可燃气体爆炸特性研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2017.
- 喻健良, 姚福桐, 于小哲等. 高温和高压对乙烷在氧气中爆炸极限影响的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39 (12): 17-23.
- 张增亮, 李革梅. 可燃气体的爆炸极限和最大允许氧含量的测定及影响因素研究[A]. 湘潭师范学院学报, 2006, 28(3): 67-69.
- Besnard S. Full flammability test of gases and gas mixtures in air[J]. CERN Report, 1996.
- 姜程山. 氢气的爆炸极限抑制研究[D]. 山东: 山东建筑大学, 2017.
- 孙俊芳, 张可, 郭保玲等. CH_4/N_2 、 CH_4/CO_2 二元和 $CH_4/N_2/CO_2$ 三元混合气体爆炸极限的实验与估算[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(5): 747-752.
- 路长, 刘洋, 王鸿波等. CO_2 、 H_2 对 CH_4 /Air 预混气爆炸特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(05): 1788-1795.
- Bradley, Mitcheson. The venting of gaseous explosion in spherical vessels: I: theory[J]. Combustion and Flame, 1978, 32(78): 237-255.
- Hphylaktou, G. E. Andrews. Gas explosions in linked vessels[C]. 13th ICDERS. Japan. July, 1999.
- Kasmani R M, Andrews G E, Phylaktou H N. Experimental study on vented gas explosion in a cylindrical vessel with a vent duct[J]. Process Safety and Environmental Protection. 2013, 91(4): 245-252.
- 郭丹彤. 窰井内受限空间可燃气体爆炸特性研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2017.
- 邓军, 程方明, 罗振敏等. 湍流状态下甲烷爆炸特性的实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2008.
- 霍雨江. 流动态可燃气体的爆炸特性测试装置设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- 黄代民, 覃欣欣, 徐伟巍. 湍流状态下甲烷爆炸极限实验研究[J]. 电气防爆, 2020, (3): 39-42.
- 陈爱平. 管道内流动气体爆炸问题的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, (4): 347-352.
- 韦一. 甲烷、丙酮和正庚烷爆炸特性的实验研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2020.
- 谭迎新, 霍雨江, 张华荣等. 流动态可燃气体爆炸极限的试验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(05): 449-452.
- 朱熹. 含氟灭火剂抑制瓦斯爆炸实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- 薛少谦. 七氟丙烷抑制甲烷空气预混气体爆炸的实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(1): 5-8.
- 冯肇瑞, 杨有启. 化工安全技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993, 47: 65-66, 96-118.
- 冯若尘. 不同浓度甲烷在管状空间内爆炸传播特性的实验研究[D]. 华北科技学院, 2020.
- 王涛. 管道内甲烷爆炸特性及 CO_2 抑爆的实验与数值模拟研究[D]. 西安科技大学, 2014.
- 杨鹏, 潘勇, 蒋军成等. 基于 CHEMKIN 的可燃气体爆炸下限模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35 (11): 1525-1529.
- 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.