

文章编号:1006-9941(2022)12-1252-07

## 磁场对乙烯预混气体爆炸自由基影响机理

胡守涛<sup>1,2</sup>,李如霞<sup>1</sup>,聂百胜<sup>3</sup>,洪子金<sup>1</sup>,高建村<sup>1,2</sup>,杨喜港<sup>1</sup>,孙诤<sup>4</sup>

(1.北京石油化工学院,安全工程学院,北京 102617; 2.北京市安全生产工程技术研究院,北京 102617; 3.重庆大学 资源与安全学院,重庆 400044; 4.北京恒安天诚科技有限公司,北京 101299)

**摘要:** 为探究磁场对预混气体爆炸特征的影响及机理,以乙烯为例,通过自行研制的实验系统研究磁场对预混乙烯/空气爆炸压力、火焰传播速度等爆炸特征的影响,利用Chemkin-Pro模拟了乙烯爆炸链式反应过程,研究了乙烯爆炸链式反应的关键自由基,理论计算了磁场对自由基粒子的作用力,探讨了磁场影响预混气体爆炸的自由基机理。结果表明,在最大磁场强度3300Gs作用下,6.5%乙烯最大爆炸压力降低18.18%、爆炸压力上升速率降低17.33%,沿着火焰传播方向,磁场对乙烯爆炸火焰传播速度呈现先促进后抑制的效应,抑制效果大于促进效果,总体呈现抑制效应。乙烯爆炸过程中的关键自由基为 $\cdot\text{H}$ 、 $\cdot\text{O}$ 、 $\cdot\text{CH}_2$ 。自由基在磁场作用下的受力与自由基的磁化强度成正比,乙烯爆炸关键自由基的磁化强度各不相同,在磁场作用下,自由基出现分层现象,减少了不同自由基之间的碰撞,降低基元反应速率,从而抑制乙烯爆炸。

**关键词:** 磁场;火焰传播速度;关键自由基;磁化强度;反应速率

中图分类号: TJ5; X9

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022143

## 0 引言

外加磁场对燃烧火焰和化学爆炸具有一定的影响,最受关注的是针对可燃气体燃烧和爆炸受外加磁场影响的应用研究<sup>[1-3]</sup>,研究发现外加磁场对燃烧火焰形状、亮度、温度等都会产生一定影响,主要表现为对梯度向上减少的磁场对气体燃烧具有促进和加强效应<sup>[4-6]</sup>,梯度向上增加的磁场对气体燃烧具有抑制效应<sup>[7-9]</sup>,研究发现磁场可以控制并调节火焰的大小、方向<sup>[10-11]</sup>;外加磁场对烷烃气体燃烧和烃类燃料爆燃产生明显影响,燃烧反应废气排放减少、发动机内壁设置永久磁铁使得氮氧化物浓度降低<sup>[12-15]</sup>;外加磁场对预

混气体爆炸的瞬态压力和爆炸火焰传播速率存在明显的削弱作用,对可燃预混气体爆炸具有抑制效应<sup>[16]</sup>。周尚勇等<sup>[17-18]</sup>分析得到磁场和铁磁性阻隔防爆材料通过与自由基发生作用来抑制气体爆炸。高建村等<sup>[19]</sup>发现铁磁性阻隔防爆材料对5%丙烷爆炸的抑制效果大于抗磁性阻隔防爆材料。杨喜港等<sup>[20]</sup>实验研究也发现非均匀磁场下抑制丙烷/空气爆炸火焰传播速度和爆炸压力。高建村等<sup>[3]</sup>实验研究结果表明随着磁场强度增加,磁场对乙炔爆炸抑制效果增强,分析认为磁场通过改变自由基的电子自旋来抑制气体爆炸。爆炸是大量自由基快速碰撞发生反应,自由基拥有未成对电子,电子自旋产生磁矩,本身是一个小磁场,是顺磁性物质。根据电子自旋共振波谱仪原理自由基之间存在电子能阶差,改变外磁场强度,孤对电子在2个能阶间产生能量跳跃<sup>[21]</sup>。磁场通过影响自由基可以影响爆炸。磁场对燃烧和发动机燃爆的研究相对广泛,对爆炸影响及其机理的研究相对较少。

因此,本研究采用爆炸压力采集系统和爆速仪分别测量6.5%乙烯/空气预混气体的瞬态爆炸压力和火焰传播速度,实验研究了磁场对乙烯/空气预混气体爆炸压力和火焰传播速度影响规律,利用Chemkin-Pro

收稿日期:2022-05-30;修回日期:2022-06-29

网络出版日期:2022-10-26

基金项目:北京市教委科技计划项目(KM201910017001);北京市自然科学基金青年项目(2214071)

作者简介:胡守涛(1986-),男,博士,讲师,主要从事气体爆炸预防与控制技术的研究,hushoutao@bipt.edu.cn

通信联系人:高建村(1964-),男,博士,教授,主要从事应用化学和安全工程的研究,gaojancun@bipt.edu.cn

杨喜港(1997-),男,硕士,主要从事气体燃烧爆炸的研究,2019520167@bipt.edu.cn

引用本文:胡守涛,李如霞,聂百胜,等. 磁场对乙烯预混气体爆炸自由基影响机理[J]. 含能材料,2022,30(12):1252-1258.

HU Shou-tao, LI Ru-xia, NIE Bai-sheng, et al. Mechanism of Magnetic Field on the Explosive Radical of Ethylene Premixed Gas[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(12):1252-1258.

软件仿真模拟乙烯爆炸自由基链式反应过程,理论分析磁场作用力对乙烯爆炸过程中关键自由基的影响,探讨了磁场对乙烯预混气体爆炸影响机理。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与实验系统

试剂:乙烯和合成空气的纯度均为99.99%,由北京华宇辰气体有限公司提供。

仪器与系统:实验系统为自主设计开发,主要由实验管道、爆速测量系统、瞬态压力采集装置、施加磁场装置、高能点火系统、气体分配系统等组成,实验系统示意图如图1所示。

气体爆炸可视化实验管道为拥有自行产权的封闭式圆柱形管道,其管道有效长度为1000 mm,内径为100 mm,体积为8000 mL,最大承静水压力2 MPa,配有爆破片等安全附件。磁场装置由3对并联磁极和电压调节器组成,可通过调节电压控制磁场强度。磁场类型为直流电磁场,磁场强度用特斯拉计测量,磁场强度为3300 Gs。爆速测量系统由高精度爆速仪和光纤传感器组成。光纤传感器为感光全反射元件。实验管道上有3个光纤传感器,第一个光纤传感器距离管道最左端300 mm,后一个光纤传感器距离前一个光纤传感器轴向距离300 mm。爆速仪通过两个光纤传感器接受光信号的时间差得到爆炸火焰传播速度,可以测量两段距离的爆炸火焰传播速度。瞬态压力采集装

置由传感器、采集装置和电脑组成。压力传感器位置和光纤传感器上下相对。气体分配系统包括气瓶、阀门、真空泵和循环泵。点火装置包括点火头和电能点火仪,通过点火头放电的方式点火,点火位置在实验管道的最左端的中央位置,设定点火能量为500 mJ。

实验管道、磁极、电压调节器、线圈、真空泵、循环泵均由河南海克尔公司加工和提供。爆速仪为OZM高精度多段式爆速仪,特斯拉计为TD8620数字特斯拉计磁力检测仪,点火装置由咸阳西燃电气自动化工程有限公司提供。压力传感器为Kistler-211B3传感器,爆炸压力采集系统为德国DEWE采集器和配套软件。

### 1.2 实验过程

利用真空泵使管道呈负压状态,压力表显示压力5 min没有变化表明管道气密性完好。利用负压注入计算当量体积的乙烯,补足空气至常压。利用循环泵循环管道内气体,再静置使其充分混合均匀。设置爆速仪和压力采集器至待测量状态。打开电压调节器,添加磁场。打开点火器待爆炸结束后,收集爆炸火焰传播速度和压力数据,尾气进行无害化处理。每组实验进行3次重复实验,实验结果误差不超过1%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁场对乙烯爆炸压力影响

无磁场下和磁场下,当量浓度6.5%乙烯/空气预

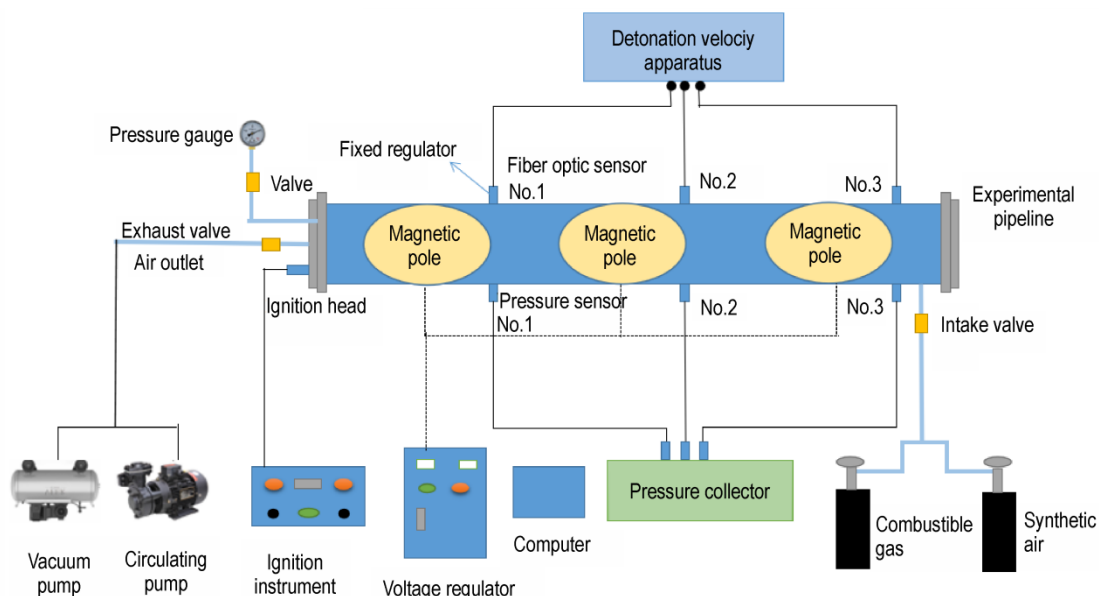


图1 乙烯预混气体爆炸实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of ethylene premixed gas explosion test device

混气体爆炸时间-压力曲线图如图2所示。最左端的异常信号为点火时引起的压力波动。

由图2可知,从点火信号开始,无磁场情况下3个压力传感器分别测得爆炸压力峰值为42,118,346 kPa。在磁场作用下3个压力传感器分别测得爆炸压力峰值为43,117,289 kPa。最大爆炸压力是评价爆炸强度的重要参数,1号与2号压力传感器所测得的压力峰值与3号传感器测得的小得多,因此,选择3号传感器的压力数据进行分析。爆炸压力上升速率是表征爆炸强度的特征之一,根据最大爆炸压力和冲击波到达最大压力时间计算得到。在有无磁场下乙烯爆炸压力曲线和爆炸压力上升速率如图3所示。

由图3可知,在无磁场条件下,当量乙烯爆炸压力峰值为346 kPa,爆炸压力到达峰值时间为93.83 ms,最大爆炸压力上升速率为 $3.69 \text{ kPa}\cdot\text{ms}^{-1}$ 。添加磁场后乙烯爆炸压力峰值为289 kPa,相比于无磁场爆炸峰值压力降低18.18%;爆炸峰值压力对应的时间为96.85 ms,相较于无磁场下到达压力峰值时间延长了3.02 ms;最大爆炸压力上升速率为 $2.98 \text{ kPa}\cdot\text{ms}^{-1}$ ,相较于无磁场下最大爆炸压力上升速率下降了

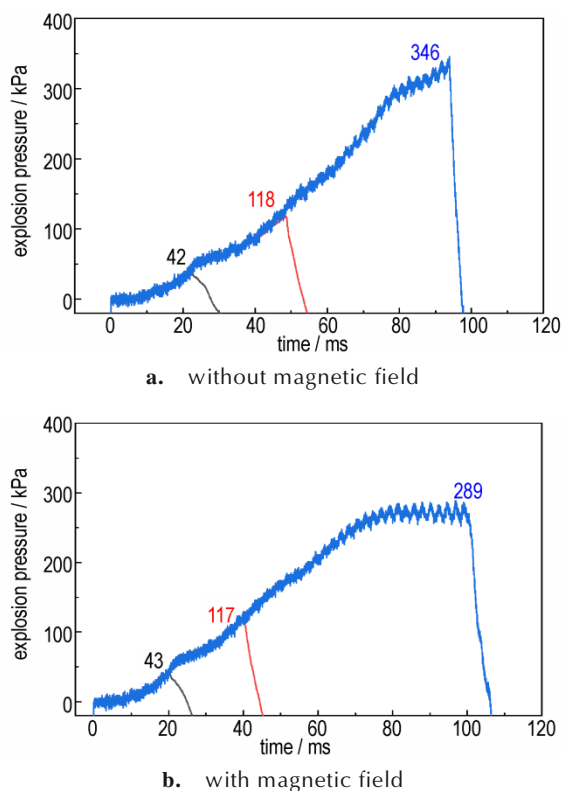


图2 不同条件下乙烯爆炸压力曲线  
Fig. 2 Ethylene explosion pressure curves under different conditions

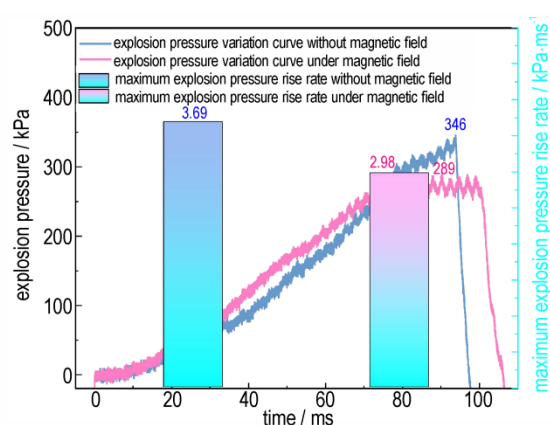


图3 6.5% 乙烯/空气爆炸压力和爆炸压力上升速率  
Fig. 3 Explosion pressure and maximum explosion pressure rise rate of 6.5% ethylene/air

17.33%。这表明磁场可以降低最大爆炸压力,延长了最大压力峰值到达时间,减小了最大爆炸压力上升速率,即磁场可以抑制乙烯爆炸。

## 2.2 磁场对乙烯爆炸火焰传播速度影响

把光纤传感器到1~2号之间的管段定义为第一段,把光纤传感器2~3号之间的管段定义为第二段。每段距离均为300 mm。光纤传感器的精度为 $0.01 \mu\text{s}$ 。爆速仪测得无磁场和磁场下6.5% 乙烯/空气爆炸火焰传播速度如图4所示。

由图4可知,与无磁场相比,在磁场下乙烯第一段火焰传播速度和第二段火焰传播速度出现了很大程度的变化。取三次实验结果的平均值,无磁场下,6.5% $\text{C}_2\text{H}_4/\text{Air}$ 爆炸火焰第一段传播速度为 $4.64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,第二段爆炸火焰传播速度为 $77.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。添加磁场后,第一段爆炸火焰传播速度为 $62.71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,增加了1250%,第二段爆炸火焰传播速度为 $13.98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,减弱了81.88%。磁场可以削弱C—H键联系<sup>[16]</sup>,在磁场作用下,乙烯C=C键和C—H键加速断裂,链引发反

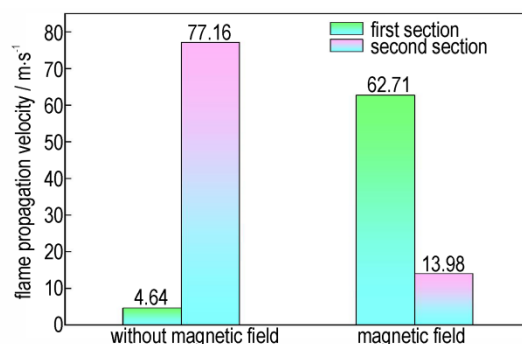


图4 不同条件下爆炸火焰传播速度  
Fig. 4 Propagation velocity of explosive flame under different conditions

应加速,因此,在前半段磁场对乙烯爆炸火焰传播速度起促进作用,随着反应继续进行,自由基数量越来越多,自由基本身的孤对电子自旋产生磁矩,磁场干扰自由基运动<sup>[7,21]</sup>,最终抑制乙烯爆炸火焰传播速度。

### 2.3 乙烯链式简化机理

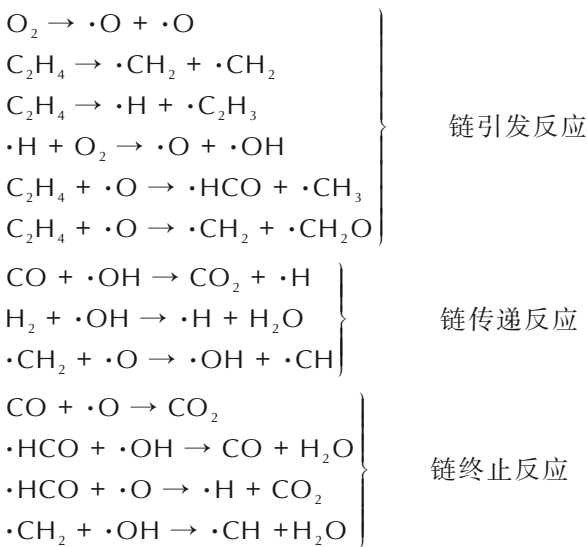
为了研究磁场影响乙烯爆炸更深层的原因,通过Chemkin-Pro软件仿真模拟乙烯爆炸自由基反应过程。按照实验条件设置气体浓度、初始压力等参数,点火温度设置1200 K,封闭式0-D均质间歇反应模型,并设置恒定体积反应器。自由基活性大,反应迅速,反应时间设置0.05 s。机理文件选择王海团队的C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>机理<sup>[22]</sup>,模拟参数设置见表1。

表1 乙烯爆炸过程模拟起始参数

Table 1 Simulation initial parameters of ethylene explosion process

gas concentration/%			ignition	initial	
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	temperature /K	environmental pressure /atm	time/s
6.5	73.865	19.635	1200	1	0.05

乙烯的简要机理如下:



在乙烯链式简化机理中,在链式引发阶段有大量·H、·O、·OH生成,乙烯自分解为·CH<sub>2</sub>和·C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>等自由基。在链传递反应阶段有·CH、·CH<sub>2</sub>O、·HCO等自由基参与反应,链终止反应阶段是自由基销毁生成CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O的反应。

### 2.4 乙烯敏感性分析

敏感性系数的变化代表组分浓度也发生变化。即敏感性系数越大代表对此组分受到该反应的影响程度越大。敏感性系数为正代表利于此组分生成,反之,代

表利于此组分消耗。乙烯的敏感性分析如图5所示。

从图5可以看出,在乙烯爆炸反应中,某些基元反应不能直接影响乙烯,而是通过链式反应间接影响乙烯。对乙烯敏感性影响最大的反应是R194·C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>+O<sub>2</sub>=·O+·CH<sub>2</sub>CHO,其次有R96·CH<sub>3</sub>+·HO<sub>2</sub>=·OH+·CH<sub>3</sub>O、R254C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>+·OH=·C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O、R1·H+O<sub>2</sub>=·O+·OH和R195·C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>+O<sub>2</sub>=·HCO+·CH<sub>2</sub>O。R194、R96、R254、R1敏感性系数为负,利于乙烯消耗,R195敏感性系数为正,抑制乙烯消耗。从敏感性分析可知,·H、·O、·OH、·CH<sub>3</sub>、·HCO、·CH<sub>2</sub>CHO在乙烯反应中占据重要地位。

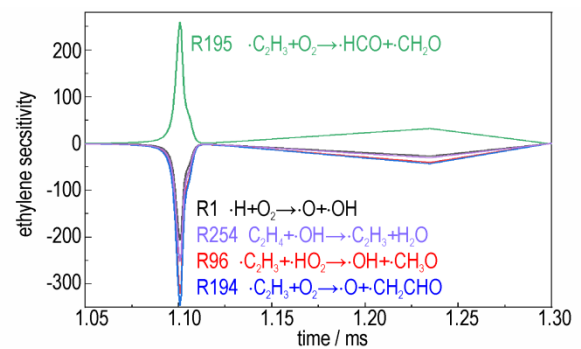


图5 乙烯敏感性分析

Fig.5 Ethylene sensitivity analysis

结合乙烯链式简化机理和敏感性分析可以得到·H、·O、·OH、·CH<sub>2</sub>、·C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>、·CH<sub>2</sub>CHO是乙烯爆炸过程中的关键自由基。

### 2.5 磁场作用机理分析

自由基拥有未成对电子,电子自旋产生磁矩,因此,每个自由基都是磁性物质。爆炸过程中会产生大量自由基,不同自由基产生磁矩方向是随机的,在无外加磁场时,自由基的磁矩方向不相同,因此整体不显示宏观磁化。当施加外加磁场时,自由基磁矩沿外磁场方向有序排列,自由基被强烈磁化。在不均匀磁场中,从理论上分析自由基会受到梯度磁场力<sup>[23-24]</sup>。自由基虽然拥有孤对电子,但自由基本身不带电,因此自由基不受洛伦兹力作用。

自由基的磁矩:

$$\mu_s = g_e \mu_B \sqrt{S(S+1)} \quad (1)$$

式中,μ<sub>s</sub>为磁矩;g<sub>e</sub>为朗德因子;μ<sub>B</sub>为波尔磁子;S为自由基自旋角动量。

根据式(1)可知,自由基的磁矩由自由基的孤对电子数决定,自由基的孤对电子数由本身结构决定。乙烯爆炸过程关键自由基的磁矩μ<sub>s</sub>如表2所示。



表2 乙烯爆炸过程关键自由基磁矩

Table 2 Magnetic moment of key free radical in ethylene explosion process

free radical	$n$	$S_i$	$\mu_s/10^{-23} \text{ A}\cdot\text{m}^2$
$\cdot\text{H}$	1	1/2	1.61
$\cdot\text{O}$	2	2/2	2.62
$\cdot\text{OH}$	1	1/2	1.61
$\cdot\text{CH}_2$	2	2/2	2.62
$\cdot\text{C}_2\text{H}_3$	1	1/2	1.61
$\cdot\text{CH}_2\text{CHO}$	1	1/2	1.61

Note:  $n$ 代表自由基的孤对电子数;  $S_i$ 代表自旋角动量; 下标  $i$ 代表自由基;  $\mu_s$ 代表自由基磁矩。

磁化率表征物质的磁场特征,通常用  $\chi_i$  表示,由 Curie 定律可得:

$$\chi_i = \frac{N_A g_e^2 \mu_B^2 S(S+1) \mu_0}{3kTn_i} \quad (2)$$

式中,下标  $i$ 为自由基物质;  $\chi_i$ 为磁化率;  $N_A$ 为阿伏伽德罗常数;  $\mu_0$ 为真空磁导率;  $k$ 为玻尔兹曼常数;  $T$ 为反应温度;  $n_i$ 为自由基的摩尔质量。

根据式(2)可知,自由基磁化率与自由基孤对电子数、反应为温度和摩尔质量有关,计算 298 K 下乙烯爆炸过程中关键自由基的磁化率  $\chi_i$  如表 3 所示。

表3 298 K下乙烯爆炸过程中关键自由基磁化率

Table 3 Magnetic susceptibility of key free radicals in ethylene explosion under 298 K

free radical	magnetic susceptibility/ $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
$\cdot\text{H}$	39.4
$\cdot\text{O}$	6.56
$\cdot\text{OH}$	1.74
$\cdot\text{CH}_2$	7.50
$\cdot\text{C}_2\text{H}_3$	1.46
$\cdot\text{CH}_2\text{CHO}$	0.92

由表 3 可知,  $\cdot\text{H}$  的磁化率最大,其次是  $\cdot\text{O}$  和  $\cdot\text{CH}_2$ , 自由基的磁化率与自身的摩尔质量和孤对电子数有关。

磁化强度是描述磁介质磁化状态的物理矢量,磁化强度越大,磁场对其作用力也越大,磁化强度通常用  $M$  表示:

$$M = \chi_i H \quad (3)$$

式中,  $M$  为自由基磁化强度;  $H$  为磁场强度。

从表 4 可以看出,乙烯爆炸关键自由基  $\cdot\text{H}$  的磁化强度最大,  $\cdot\text{O}$  和  $\cdot\text{CH}_2$  磁化强度比  $\cdot\text{H}$  的磁化强度小得多。这表明磁场对的  $\cdot\text{H}$  作用力最大,然后是  $\cdot\text{O}$  和

表4 乙烯爆炸过程中关键自由基磁化强度

Table 4 Magnetization intensity of key free radicals during ethylene explosion

free radical	magnetic intensity / $\text{Am}^2\cdot\text{kg}^{-1}$
$\cdot\text{H}$	13.002
$\cdot\text{O}$	2.166
$\cdot\text{OH}$	0.5742
$\cdot\text{CH}_2$	2.475
$\cdot\text{C}_2\text{H}_3$	0.4818
$\cdot\text{CH}_2\text{CHO}$	0.3036

$\text{CH}_2$ 。在甲烷温和燃烧火焰中,磁场使  $\cdot\text{OH}$  聚集在磁场强度高的区域<sup>[25]</sup>。磁场通过影响乙烯爆炸过程中关键自由基影响乙烯爆炸。根据 298 K 下自由基磁化强度可知,  $\cdot\text{H}$  受磁场影响最大,被吸引到磁感线密集的区域,其次是  $\cdot\text{O}$  和  $\cdot\text{CH}_2$  受磁场影响大,被吸引到  $\cdot\text{H}$  的外一层,其它关键自由基受磁场影响小,被吸引到  $\cdot\text{O}$  和  $\cdot\text{CH}_2$  的外层区域,乙烯爆炸过程中的其它自由基对于乙烯爆炸影响较小,可忽略不计。

梯度磁场力影响自由基理论计算:不同磁化率的气体在梯度磁场中会表现出不同的特性:顺磁化率物质的原子占据了固定的偶极矩,会向更强的磁场区域移动。梯度磁场对单位体积自由基组分  $i$  的作用力  $F_i$ ,可用下式计算:

$$F_i = \left(1/2\mu_0\right) \rho Y_i \chi_i \nabla(B^2) \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为自由基密度;  $Y_i$  为自由基质量分数;  $\nabla(B^2)$  为磁场强度的平方梯度。

根据式(4)可知,梯度磁场力的大小与自由基密度、摩尔质量和磁场平方梯度有关。磁场平方梯度固定不变,在乙烯爆炸过程中,密度和摩尔质量大的自由基受到的梯度磁场力越大。

磁场改变自由基运动轨迹,不同种类自由基由于磁化强度不同,受磁场影响也不同,磁化强度大的自由基被吸引到磁感线密集的区域,使不同种类自由基出现分层现象,减少了不同自由基之间的碰撞,降低基元反应速率。

### 3 结论

(1) 磁场抑制乙烯爆炸。磁场降低了最大爆炸压力,延长了冲击波到达最大压力峰值时间,减小了爆炸压力上升速率。最大爆炸压力降低 18.18%; 到达最大压力峰值时间延长了 3.02 ms; 爆炸压力上升速率下降了 17.33%。

(2) 沿着火焰传播方向,磁场对气体爆炸火焰传播速度是先促进后抑制的效果,第一段爆炸火焰传播速度增加了1250%,第二段爆炸火焰传播速度减弱了81.88%。

(3) 在乙烯爆炸过程关键按自由基中, $\cdot\text{H}$ 的磁化强度最大,其次是 $\cdot\text{O}$ 和 $\cdot\text{CH}_2$ ,其他自由基磁化强度较小。磁场改变了磁化强度大的自由基的运动轨迹,磁化强度大的自由基被吸引到磁感线密集的区域,不同种类自由基出现分层,减少了不同自由基之间的碰撞几率,降低反应速率,从而降低乙烯爆炸强度。

参考文献:

[1] KUMAR V, RASTOGI V, AGARWAL S, et al. Investigation of temperature profile and temperature stability of micro diffusion flame under the influence of magnetic field by use of a holo-shear lens-based interferometer[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(6): 1-17.

[2] OMMEN L P, NARAYANAPPA K G, VIJAYALAKSHMI S K. Experimental analysis of synergetic effect of part-cooled exhaust gas recirculation on magnetic field-assisted combustion of liquefied petroleum gas[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45(11): 9187-9196.

[3] 高建村, 杨喜港, 胡守涛, 等. 外加磁场对乙炔气体爆炸反应影响研究[J/OL]. *爆炸与冲击*, 2022: 1-11.  
GAO Jian-cun, YANG Xi-gang, HU Shou-tao, et al. Effect of external magnetic field on explosive reaction of acetylene gas [J]. *Explosion and Shock*, 2022: 1-11.

[4] RAMNATH V, LYONS K M. The potential of simple, low-cost permanent magnets for flame manipulation in flow fields[J]. *Aeron Aero Open Access J*, 2018, 2(1): 1-5.

[5] AGARWAL S, KUMAR M, SHAKHER C. Experimental investigation of the effect of magnetic field on temperature and temperature profile of diffusion flame using circular grating Talbot interferometer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 68: 214-221.

[6] KALIS H, MARINAKI M, STRAUTINS U, et al. On the numerical simulation of the vortex breakdown in the combustion process with simple chemical reaction and axial magnetic field [J]. *International Journal of Differential Equations and Applications*, 2015, 14(3): 235-250.

[7] SHINODA M, YAMADA E, KAJIMOTO T, et al. Mechanism of magnetic field effect on OH density distribution in a methane-air premixed jet flame [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1), 277-284.

[8] PANDEY P K, KUMAR M, KUMAR V, et al. Measurement of temperature and temperature profile of wick stabilized micro diffusion flame under the effect of magnetic field using digital speckle pattern interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 1-10.

[9] AGARWAL S, KUMAR V, SHAKHER C. Temperature measurement of wick stabilized micro diffusion flame under the influence of magnetic field using digital holographic interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 161-169.

[10] AGARWAL S, SHAKHER C. Effect of magnetic field on temperature profile and flame flow characteristics of micro flame us-

ing Talbot interferometer[J]. *Optik*, 2018, 168: 817-826.

[11] ZHANG Z, WEI Z. Experiment and simulation of the effects of non-uniform magnetic field on the regression rate of PMMA [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 223: 337-348.

[12] GILLON P, BLANCHARD J N, Gilard V. Methane/air-lifted flames in magnetic gradients[J]. *Combustion science and technology*, 2010, 182(11-12): 1805-1819.

[13] NIAKI S R A, ZADEH F G, Niaki S B A, et al. Experimental investigation of effects of magnetic field on performance, combustion, and emission characteristics of a spark ignition engine [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2020, 39(2): 1-9.

[14] JIANG B, WANG P, LIU D. Effects of magnetic fields on morphology and nanostructure evolution of incipient soot particles from n-heptane/2, 5-dimethylfuran inverse diffusion flames [J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 29(3): 820-839.

[15] OOMMEN L P, NARAYANAPPA K G. Assimilative capacity approach for air pollution control in automotive engines through magnetic field-assisted combustion of hydrocarbons [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021: 1-11.

[16] OOMMEN L P, KUMAR G N. A study on the effect of magnetic field on the properties and combustion of hydrocarbon fuels [J]. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2019, 9(3): 89-98.

[17] ZHOU S, GAO J, LUO Z, et al. Role of ferromagnetic metal velvet and DC magnetic field on the explosion of a  $\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$  mixture-effect on reaction mechanism [J]. *Energy*, 2022, 239: 1-9.

[18] ZHOU S, GAO J, LUO Z, et al. Effects of mesh aluminium alloy and aluminium velvet on the explosion of  $\text{H}_2/\text{air}$ ,  $\text{CH}_4/\text{air}$  and  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{air}$  mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(27): 14871-14880.

[19] 高建村, 王乐, 胡守涛, 等. 不同磁性金属丝对丙烷爆炸反应抑制机理研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(7): 125-130.  
GAO Jian-cun, WANG Le, HU Shou-tao, et al. Study on inhibiting mechanism of propane explosion reaction with different magnetic wires [J]. *China Safety Science and Technology*, 2020, 16(7): 125-130.

[20] YANG X G, HU S T, WANG L, et al. Effect of magnetic field on dynamics of 5% propane/air premixed gases [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1948: 012133.

[21] XU G Z. *Fundamental Principles of Electron Spin Resonance Spectroscopy* [M]. Beijing: China Science Press, 1978. 1-4.

[22] WANG H, FRENKLACH M. A detailed kinetic modeling study of aromatics formation in laminar premixed acetylene and ethylene flames [J]. *Combustion and Flame*, 1997, 110: 173-221.

[23] BAKER J, CALVERT M E. A study of the characteristics of slotted laminar jet diffusion flames in the presence of non-uniform magnetic fields [J]. *Combustion and flame*, 2003, 133(3): 345-357.

[24] BARMINA I, VALDMANIS R, ZAKE M, et al. Magnetic field control of combustion dynamics [J]. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2016, 53(4): 36-47.

[25] YAMADA E. Experimental and numerical analyses of magnetic effect on OH radical distribution in a hydrogen oxygen diffusion flame [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 135: 365-379.

## Mechanism of Magnetic Field on the Explosive Radical of Ethylene Premixed Gas

HU Shou-tao<sup>1,2</sup>, LI Ru-xia<sup>1</sup>, NIE Bai-sheng<sup>3</sup>, HONG Zi-jin<sup>1</sup>, GAO Jian-cun<sup>1,2</sup>, YANG Xi-gang<sup>1</sup>, SUN Xu<sup>4</sup>

(1. School of Safety Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Beijing Institute of Engineering and Technology for Safety Production, Beijing 102617, China; 3. School of Resources and Safety, Chongqing University, Chongqing 400044; 4. Beijing Hengan Tiancheng Technology Co., Ltd, Beijing 101299, China)

**Abstract:** To explore the effect of magnetic field on the explosion characteristics of premixed gas and its mechanism, taking ethylene as an example, the influence law of magnetic field on the explosion characteristics of premixed ethylene/air was experimentally studied. The chain reaction process of ethylene explosion was numerically simulated. The influence of magnetic field force on key free radicals was theoretically analyzed. The transient pressure of ethylene explosion was measured by pressure sensors and the flame propagation velocities were measured by explosion velocity apparatus. Results show that under the maximum magnetic field intensity of 3300 Gs, the maximum explosion pressure of 6.5% ethylene decreased by 18.18% and the explosion pressure rise rate reduced by 17.33%. Along the flame propagation direction, the magnetic field firstly promoted and then suppressed the flame propagation speed of ethylene explosion, in which the suppression effect was greater than the promotion effect. The ethylene explosion was simulated by Chemkin-pro software, and the key free radicals in ethylene explosion were obtained. Different types of free radicals have different intensities of magnetization. Force of free radical under magnetic field is proportional to magnetization of free radical. The magnetic field force has a greater impact on free radicals with high magnetization, and no impact on anti-magnetic substances. Different types of free radicals appear stratification phenomenon under magnetic field. The collisions between different types of free radicals were reduced, and the elementary reaction rate was decreased, which suppressed the ethylene explosion.

**Key words:** magnetic field; ethylene premixed gas; flame propagation velocity; key free radical; reaction rate

**CLC number:** TJ5; X9

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022143

**Grant support:** Science and Technology Program of Beijing Municipal Education Commission (KM201910017001); Youth Program of Beijing Natural Science Foundation (2214071)

(责编:姜梅)