

二甲醚-氢气-空气混合气预混燃烧的实验研究

陈亘, 陈朝阳, 黄佐华, 苗海燕, 王锡斌

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在定容燃烧弹中,研究了不同燃空当量比、掺氢比和初始压力下的二甲醚-氢气-空气预混合气的一系列层流燃烧特性参数,并且系统地分析了当量比、掺氢比和初始压力对燃烧的影响。结果表明:随着掺氢比的增大,火焰传播速率、层流燃烧速率、燃烧压力升高率和质量燃烧速率都明显增大,火焰发展期和燃烧持续期则随之缩短;当掺氢比较低时,随着当量比的升高,马克斯坦长度不断递减,即稀混合气的燃烧稳定性更高;当掺氢比较高时,随着当量比的升高,马克斯坦长度不断递增,即浓混合气的燃烧稳定性更高;最高燃烧压力随着初始压力的升高而升高,受掺氢比的影响相对较小。

关键词: 二甲醚; 氢气; 预混合气; 燃烧

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0542-04

Experimental Study on Premixed Combustion of Dimethyl Ether-Hydrogen-Air Mixtures

CHEN Gen, CHEN Zhaoyang, HUANG Zuohua, MIAO Haiyan, WANG Xibin

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The laminar combustion characteristics of dimethyl ether-hydrogen-air mixture were studied at various equivalence ratios, hydrogen fractions and initial pressures by using a constant volume combustion bomb. The influences of the equivalence ratio, the hydrogen fraction and the initial pressure on flame speed and combustion characteristics were analyzed. The results show that the flame speed, the laminar burning velocity and the mass burning rate increase with the increase of the hydrogen fraction. Increasing the hydrogen fraction will increase the peak combustion pressure and shorten the combustion duration. For small hydrogen fractions, the Markstein length decreases with the increase of the equivalence ratio, indicating that the lean mixture has higher flame front stability than the rich mixture. For large hydrogen fractions, the Markstein length increases with the increase of the equivalence ratio, indicating that the rich mixture has higher flame front stability than the lean mixture. Maximum combustion pressure increases with the increase of initial pressure, and initial pressure displays greater influence on combustion pressure than doping hydrogen.

Keywords: dimethyl ether; hydrogen; premixed mixture; combustion

随着能源的短缺和排放法规的日益严格,对代用燃料的研究已成为内燃机领域的研究热点,二甲醚和氢气都被认为是比较有应用前景的代用燃料。然而,目前的研究工作大多都是以二甲醚-空气预混

合气,或氢气-空气预混合气为对象,很少有人对二甲醚-氢气-空气预混合气的燃烧机理进行研究,因此很有必要对二甲醚-氢气-空气预混合气的基础燃烧特性展开系统地研究。本文将基于球形扩散火

焰理论,在定容燃烧弹中,利用高速纹影摄像法对不同燃空当量比($\phi=0.8, 1.0, 1.2$)、掺氢比($\varphi_{H_2}=0\% \sim 100\%$)和初始压力($p_0=0.08, 0.097, 0.15$ MPa)下的二甲醚-氢气-空气预混合气的层流燃烧特性进行研究。

1 实验装置与混合气的配制

1.1 实验装置

利用容弹法研究预混层流燃烧特性的实验系统如图1所示^[1]:利用水银压力计测量各组分气体分压;通过控制二甲醚、氢气和压缩空气的分压来配制不同初始压力、掺氢比和燃空当量比的未燃混合气;采用传统的电感放电点火方式点燃混合气;利用高速摄像装置记录火焰发展的纹影照片,并同步采集燃烧弹中的压力。图2所示为实验中所用的定容燃烧弹结构示意图,其内腔为圆柱体,直径及长度均为130 mm^[2]。

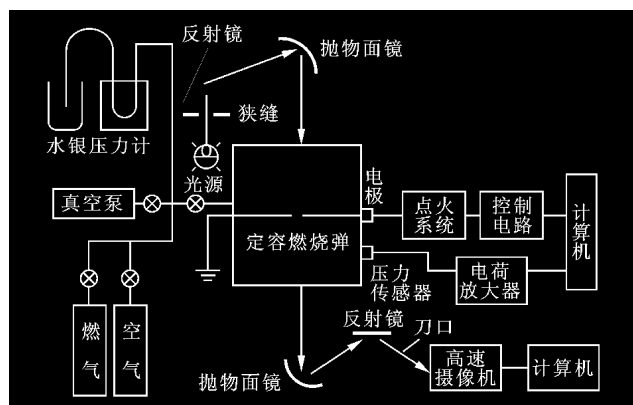


图1 实验系统布置图

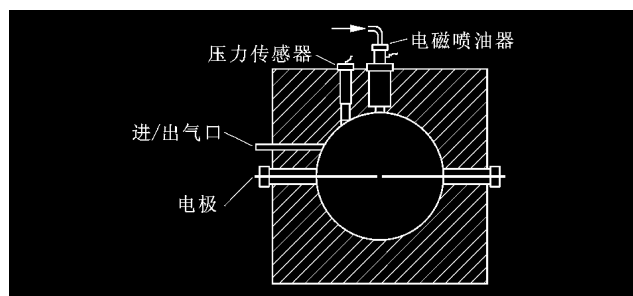


图2 定容燃烧弹结构图

1.2 混合气的配制

设二甲醚的分子式为 $C_aH_\beta O_\gamma$, 掺氢比 φ_{H_2} 定义为混合燃气(DME+ H_2)中氢气的体积分数, 空气由氧气和氮气组成, 则1 mol 燃气完全燃烧时理论上消耗空气的量 n_0 可表示为

$$n_0 = 4.762 \left(\left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma+1}{2} \right) (1 - \varphi_{H_2}) + \frac{1}{2} \right)$$

1 mol 燃气完全燃烧时实际消耗的空气的量 n 可表示为

$$n = n_0 / \phi$$

这样,根据给定的掺氢比和燃空当量比 ϕ 就可以计算充入容弹内的各组分气体的含量。由气体分压定律可知,对于气态混合燃料,各组分分压比等于摩尔数之比,因此有如下关系式

$$p_{DME} : p_{H_2} : p_{air} = (1 - \varphi_{H_2}) : \varphi_{H_2} : n$$

且 $p_{DME} + p_{H_2} + p_{air} = p_0$

联立上述两式,可以求得:

$$\text{二甲醚的压力} \quad p_{DME} = \frac{1 - \varphi_{H_2}}{1 + n} p_0$$

$$\text{氢气的压力} \quad p_{H_2} = \frac{\varphi_{H_2}}{1 + n} p_0$$

$$\text{空气的压力} \quad p_{air} = \frac{n}{1 + n} p_0$$

2 实验数据及分析

2.1 火焰传播速率与马赫斯坦长度的测量

文献[3]给出了不同点火能量 E 下,天然气-空气火焰传播速率 S_n 与火焰半径 r_F 之间的关系。从图3可以看出,在火焰发展的初期,点火能量对火焰影响较大,但随着火焰半径的增大,其影响越来越小。文献[4]表明,点火能量对火焰的影响在火焰半径大于5 mm时就消失了。此外,文献[5-6]给出火焰半径相应的值大致都在5~6 mm内。同时,文献[4]表明,当火焰半径小于30 mm时,压力的变化较小。因此,为了避免点火能量和压力的影响,本文将研究范围选择在火焰半径为5~25 mm之间。

从图4可以看出:由于在研究范围的选择上避免了点火能量和火焰传播后期压力升高的影响,拉伸火焰传播速率与火焰拉伸率 α 之间有着较好的线性关系,拟合出的直线在 S_n 轴上的截距即为无拉伸火焰传播速率 S_l ,斜率的负值即为马赫斯坦长度 L_b 。如图4所示,随着掺氢比的增大,拉伸火焰传播速率不断增大。

从图5可以看出:随着掺氢比的增大,无拉伸火焰传播速率也不断增大;同时,它取得最大值时所对应的当量比向浓混合气区移动。在文献[3]中,天然气掺氢燃烧时的无拉伸火焰传播速率也有着类似的变化趋势。图6表明,当掺氢比在40%以下时,随着当量比的升高,马赫斯坦长度不断递减,这意味着浓混合气的燃烧稳定性更低;当掺氢比超过40%后,随着当量比的升高,马赫斯坦长度不断递增,这意味

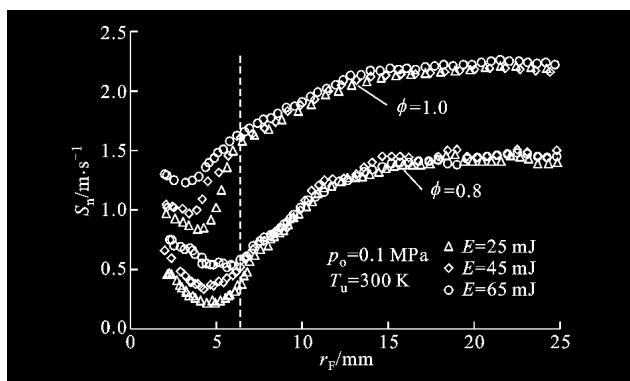
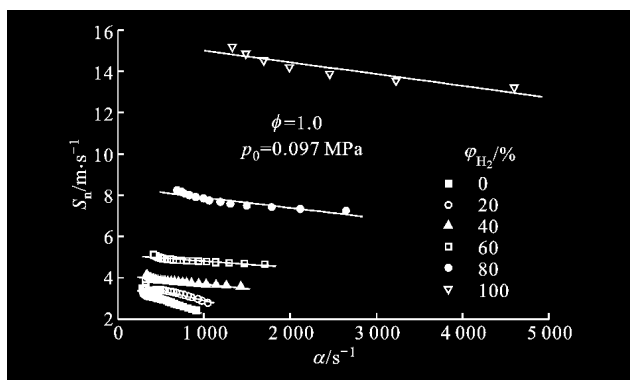
图3 不同点火能量时的火焰传播速率^[3]

图4 不同掺氢比下拉伸火焰传播速率与拉伸率的关系

着稀混合气的燃烧稳定性更低。

2.2 层流燃烧速率

层流燃烧速率分为拉伸层流燃烧速率和无拉伸层流燃烧速率 u_l 两种。拉伸层流燃烧速率又可分为 u_n 和 u_{nr} 。前者定义在火焰锋面的外侧,取决于未燃混合气体的卷吸率;后者定义在火焰锋面的内侧,取决于燃烧产物的生成率^[5]。

从图7可以看出,在不同的初始状态下, u_n 几乎随拉伸率的增大而增大, u_{nr} 随拉伸率的增大而减小。随着拉伸率的增加, $(u_n - u_{nr})$ 的值不断增大,这表明了火焰厚度对燃烧速率的影响增大。由拉伸率的定义可知:大的拉伸对应着小的火焰半径,此时火焰厚度的影响相对较大,故 $(u_n - u_{nr})$ 的值也比较大;当拉伸率较小甚至趋于0时,火焰半径趋于无穷,此时火焰厚度的影响趋于0, u_n 和 u_{nr} 趋于同一个值,即无拉伸层流燃烧速率。

2.3 燃烧特性分析

2.3.1 燃烧压力 从图8中可以看出,随着掺氢比的增大,混合气燃烧的压力升高率明显增大。从图9可以看出,最高燃烧压力 p_m 受初始压力的影响比较大,且随着初始压力的升高而升高,而受掺氢比的影响则相对较小,在整个测量范围内,最高燃烧压力

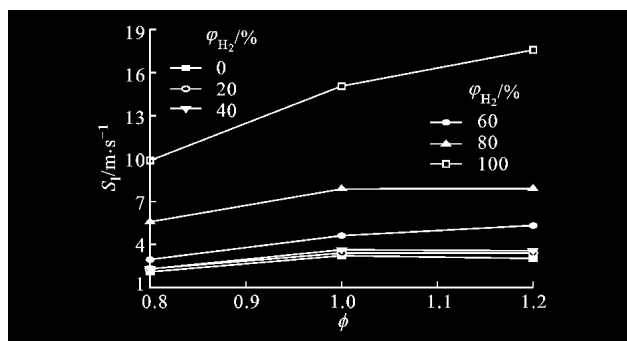


图5 不同掺氢比下无拉伸火焰传播速率与当量比的关系

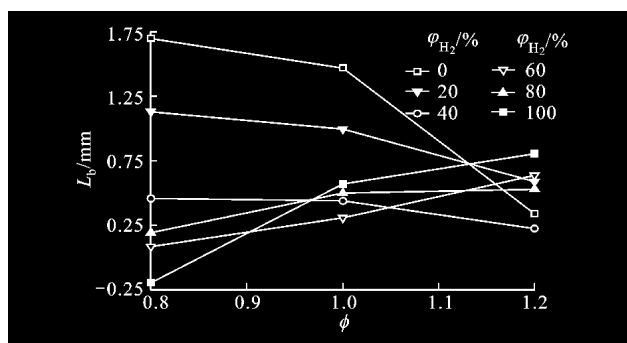


图6 不同掺氢比下马克斯坦长度与当量比的关系

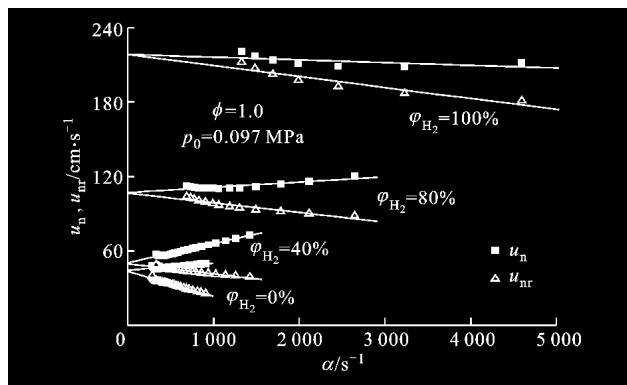


图7 不同掺氢比下拉伸层流燃烧速率与拉伸率的关系

随着掺氢比的增大只略有降低。

2.3.2 规范化质量燃烧速率 规范化质量燃烧速率 f_m (简称质量燃烧速率) 定义为 $\frac{1}{m} \frac{dm_b}{dt}$ (m 为可燃气体质量, m_b 为已燃气体质量), 它直观地反映出整个燃烧过程的燃烧速率。从图10可以看出,随着掺氢比的增大,质量燃烧速率逐渐增大,达到最大质量燃烧速率所需要的时间也明显缩短。

2.3.3 燃烧火焰发展期和燃烧持续期 从图11可以看出,在所有掺氢比下,火焰发展期 D_F 均随当量比的增大而缩短,而且掺氢比越小,这个变化越明显。对于当量比一定的混合气来说,掺氢比越大,火焰发展期越短。燃烧持续期有着与火焰发展期相同的变化趋势。

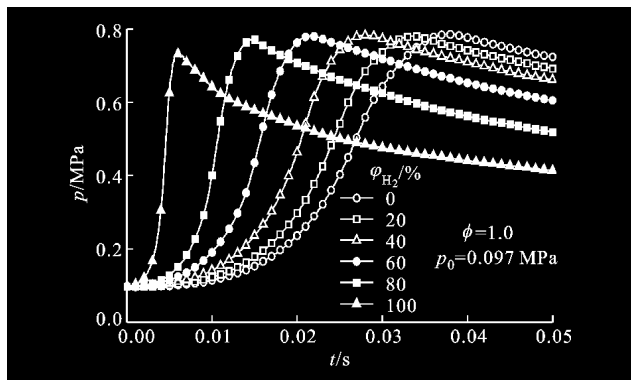


图8 不同掺氢比下燃烧压力随时间的变化

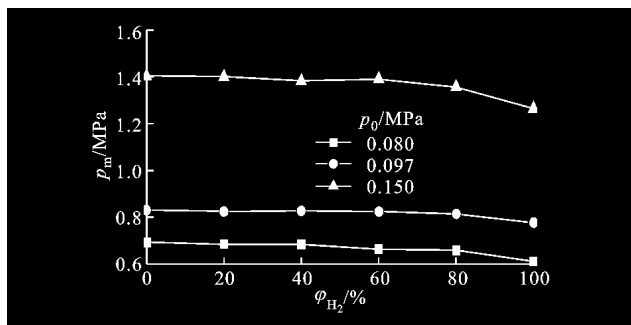


图9 不同初始压力下最高压力与掺氢比的关系

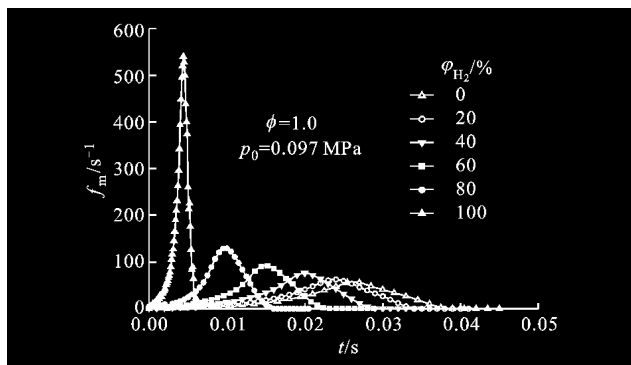


图10 不同掺氢比下质量燃烧率随时间的变化

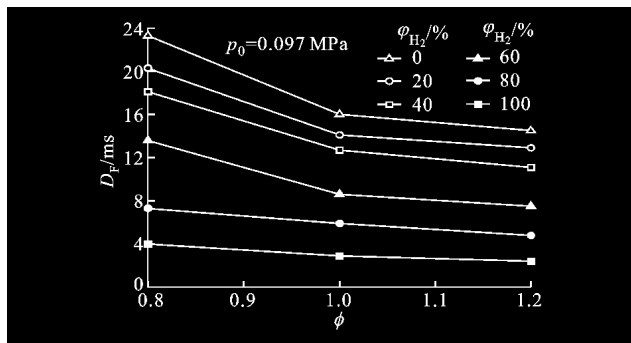


图11 不同掺氢比下火焰发展期与当量比的关系

3 结 论

(1)随着掺氢比的增大,火焰传播速率和层流燃

烧速率逐渐增大,无拉伸火焰传播速率和无拉伸层流燃烧速率取得最大值时所对应的当量比向浓混合气区移动.当掺氢比小于40%时,随着当量比的升高马克斯坦长度不断递减,此时混合气越稀,燃烧越稳定;当掺氢比超过40%后,随着当量比的升高马克斯坦长度不断递增,此时混合气越浓,燃烧越稳定.

(2)随着掺氢比的增大,混合气燃烧的压力升高率都明显增高.最高燃烧压力随着初始压力的升高而升高,而受掺氢比的影响较小.质量燃烧速率随掺氢比的增大而增大,达到最大质量燃烧速率所需要的时间也逐渐缩短.火焰发展期和燃烧持续期随当量比和掺氢比的增大而缩短.

参考文献:

- [1] 王倩. 二甲醚-空气混合气层流燃烧速度的测定[J]. 内燃机学报, 2007, 25(4): 372-378.
WANG Qian. Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-air mixtures [J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(4): 372-378.
- [2] 余金荣. 天然气及天然气掺氢喷射燃烧特性基础研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.
- [3] HUANG Zuohua, ZHANG Yong, ZENG Ke, et al. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2006(146): 302-311.
- [4] HUANG Zuohua, WANG Qian, YU Jinrong, et al. Measurement of laminar burning velocity of dimethyl ether-air premixed mixtures[J]. Fuel, 2007, 86(15): 2360-2366.
- [5] BRADLEY D, HICKS R A, LAWES M, et al. The measurement of laminar burning velocities and Markstein numbers for iso-octane-air and iso-octane-n-heptane-air mixtures at elevated temperatures and pressures in an explosion Bomb [J]. Combust and Flame, 1998, 115(1/2): 126-144.
- [6] LAMOUREUX N, DJEBAYLI-CHAUMEIX N, PAIL-LARD C E. Laminar flame velocity determination for H₂-air-He-CO₂ mixtures using the spherical bomb method [J]. Exp Therm Fluid Sci, 2003, 27 (4): 385-393.

(编辑 王焕雪)