

文章编号:1006-9941(2019)04-0282-08

## 直流高压电场对固体燃料 PMMA 燃烧特性的影响

杨小龙<sup>1</sup>,魏志军<sup>1</sup>,张泽霖<sup>1</sup>,张靖佳<sup>1</sup>,王佳兴<sup>2</sup>

(1.北京理工大学宇航学院,北京 100081;2.上海航天动力技术研究所,上海 201109)

**摘要:** 针对固体火箭发动机和固体冲压发动机实现推力控制的需求,开展了直流高压电场对固体燃料燃烧特性影响的实验研究,分析了电场作用下聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)火焰形态、燃速、温度以及火焰电流的变化,并对电场影响固体燃料燃烧特性的作用机理和影响规律进行了分析。结果表明,负电场作用下,施加电压幅值较大时对火焰形态的影响更加显著;高压电场可以明显地改变 PMMA 燃速,PMMA 燃速随着施加正电压幅值的增加而增加,燃速增幅可达 34.2%,负电场作用下 PMMA 燃速随着电压幅值的增大先减小后增加,燃速的降低幅度可达 15.7%,燃速的增幅可达 15.4%;电场作用下 PMMA 火焰最高温度呈降低趋势;PMMA 火焰电流随着施加电压幅值的增大而增大;PMMA 火焰形态、燃速以及温度的变化可能是浮力和电体积力相互作用,导致火焰形状以及火焰对固相的热反馈发生变化的结果。

**关键词:** 推力控制;高压电场;固体燃料;电控燃烧;火焰结构;聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)

中图分类号:TJ55

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018347

### 1 引言

固体火箭发动机和固体冲压发动机的一个显著缺点是可控性较差,目前研制的变推力固体火箭发动机主要采取喉栓<sup>[1-2]</sup>、涡流阀<sup>[3-4]</sup>、气动喉部<sup>[5-6]</sup>等方案实现变推力控制,然而这些方案具有烧蚀严重、比冲低、推力损失较大、工作时间较短、存在运动部件等缺点。实现推力控制的一个更具吸引力的方法是直接改变推进剂的燃速,其优点在于没有运动部件、热防护难度低,适用于高能推进剂和长时间工作。

20世纪60年代,Weinberg等<sup>[7]</sup>根据电场会影响火焰的现象,提出利用外加电场改变推进剂燃速的方案,这为实现固体火箭发动机和固体冲压发动机的推力控制提供一种新的解决途径,引起了一些研究者的重视。Weinberg等<sup>[7]</sup>通过实验发现自然对流情况下,

电场既能使含铝和不含铝推进剂燃速增加,也能使其燃速降低。Bestgen等<sup>[8]</sup>在美国空军火箭推进实验室的支持下,研究了高压电场作用下6种不同电极布局对6种不同固体推进剂燃烧的影响,发现部分电极布局对部分推进剂燃速有影响。Baranov等<sup>[9]</sup>发现高压电场能够使高氯酸铵和聚氨酯橡胶组成的异质燃料燃速增加10%~20%。Abrukov等<sup>[10]</sup>发现纵向高压电场能使由高氯酸铵、聚丁二烯、铝组成的固体推进剂燃速增加约20%~30%,也能使其燃速降低约20%。Young等<sup>[11]</sup>研究了高压电场对高氯酸铵(AP)/端羟基聚丁二烯(HTPB)以及AP/HTPB/Al燃烧特性的影响,发现无论电极极性如何,在常温常压下推进燃速降低约3%~4%,随着实验压强增大,燃速降低幅度会超过15%。国内学者主要开展了电场对气体和液体燃料燃烧特性的影响研究<sup>[12-14]</sup>,电场对固体燃料燃烧影响的研究较少<sup>[15-18]</sup>。

虽然开展了较多的高压电场对推进剂燃烧影响的实验研究,但是能够用于机理研究的实验数据较少,且在电场对推进剂燃烧特性的影响机制方面还存在很大争议,尚无一致的结论。外加电场会对固体推进剂燃烧和流动过程产生影响,将这一原理应用于固体火箭发动机、冲压发动机的推力控制上,为实现推力控制提供了新的解决途径,具有无运动部件、易于热防护等优点,适

收稿日期:2018-12-17;修回日期:2019-01-21

网络出版日期:2019-02-24

基金项目:上海航天科技创新基金(SAST2016104)

作者简介:杨小龙(1989-),男,博士研究生,主要从事电场对燃料燃烧的实验和数值模拟研究。e-mail:yangxl198905@sina.com

通信联系人:魏志军(1971-),男,教授,主要从事固体火箭发动机相关研究。e-mail:wzj@bit.edu.cn

引用本文:杨小龙,魏志军,张泽霖,等.直流高压电场对固体燃料 PMMA 燃烧特性的影响[J].含能材料,2019,27(4):282-289.

YANG Xiao-long, WEI Zhi-jun, ZHANG Ze-lin, et al. Effect of High Voltage Electric Fields on the Combustion Characteristics of PMMA[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(4):282-289.

用于高能推进剂和长时间工作,具有很好的应用前景。

聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),俗称有机玻璃,是一种无色透明的高分子材料,易加工、透明、价格便宜,常用作于固体燃料冲压发动机的贫氧推进剂。为此,本研究选用PMMA为固体燃料,建立了直流高压电场作用下的固体燃料燃烧的实验装置,测试并分析电场作用下PMMA火焰形态、燃速、火焰温度以及火焰电流的变化情况,并对电场影响固体燃料燃烧特性的作用机理和影响规律进行了分析。

## 2 实验部分

### 2.1 实验系统及测试方法

实验系统由固体燃料、直线供给系统、线位移传感器、数据采集系统、光电开关、控制器、高压电源、红外热像仪、摄像机、PC等组成,实验系统如图1所示。

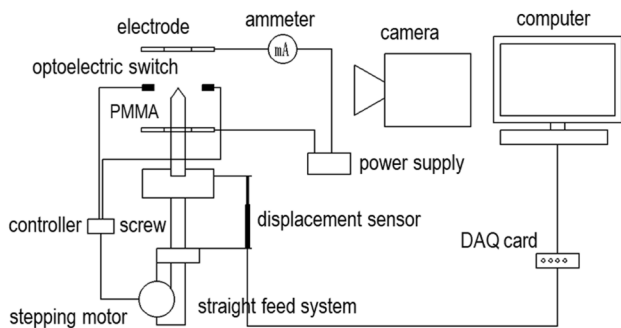


图1 实验系统示意图

Fig.1 The diagram of experimental system

实验中用的PMMA为圆柱状,直径8 mm。PMMA与步进电机螺杆相连,可在控制器的作用下做线性运动,控制器通过光电开关控制。实验中将激光发生源和接收探头分别置于PMMA两侧,且保证光源通过PMMA中心,设置相应的阈值,当接收到的光信号强度大于阈值时,控制器驱动步进电机运动,带动PMMA运动,直至所到达的位置处光信号小于阈值,通过此方式实现PMMA燃面位置保持不变,因此螺杆的速度等于PMMA燃速。实验中采用的位移传感器为MIRAN-ML-F-50 mm电感调频式微位移高精度传感器,量程为50 mm,分辨率小于0.001 mm,线性误差为0.1%~1%,其精度为0.1%。

固体燃料PMMA位于两个环形金属电极之间,研究中采用了与Young等<sup>[11]</sup>相似的电极布局方式,固体燃料的支撑系统以及电极尺寸如图2所示,该支撑系统主要由电极、PMMA、底部的支撑圆台和顶部的电极支撑件等组成。为了确保燃烧区域内只有金属电

极可导电,其余部件均采用PMMA加工而成。实验中使用的电源为ZPS-100高压电源,电压范围为0~100 kV,电流范围为0~1 mA。

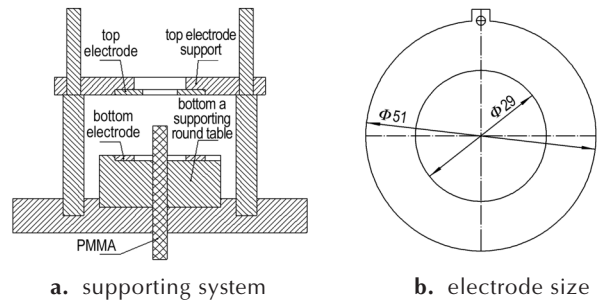


图2 固体燃料支撑系统以及电极尺寸

Fig.2 The solid fuel supporting system and sizes of the electrode

为了观测电场作用下火焰温度的变化,采用红外热像仪进行记录,并用热电偶进行温度标定。实验中使用的热电偶为B型Pt·Rh热电偶,温度为0~2073 K,精度为0.9%。热电偶位置位于PMMA尖端上方,实验中热电偶可移动,便于寻找火焰的最高温度。红外热像仪的型号为FLIR-A40,温度为0~1773 K,精度为0.1%。

### 2.2 电场对PMMA燃烧影响的实验参数

开展了不同电压,不同极性的电场对自然对流下PMMA燃烧特性影响的实验研究。实验中电极间距为53 mm,为便于区分电场极性,规定当下电极接高压电源输出端,上电极接地时的电压记为正电压,产生的电场为正电场;当上电极接高压电源输出端,下电极接地时的电压记为负电压,产生的电场为负电场。实验中每种电压工况下的实验次数均在3次以上,取平均值作为结果。结果见表1。

表1 不同电压作用下PMMA燃烧时间

Table 1 The burning time of PMMA under various voltages

experiment	diameter of PMMA / mm	applied voltage / kV	burning time / s
1	8	0	470
2	8	7	405
3	8	8.5	374
4	8	10.0	350
5	8	-5.5	558
6	8	-7.0	435
7	8	-8.5	407

图3为施加电压为8.5 kV及-8.5 kV时,利用Maxwell 16.0软件计算得到两个金属电极之间的电场强度分布。靠近金属环中心附近的电场不均匀,而位于两个金属环中间部分的电场分布比较均匀,实验

过程中将PMMA燃面的位置固定在电场分布均匀的区域,可以认为PMMA在恒定电场中燃烧。

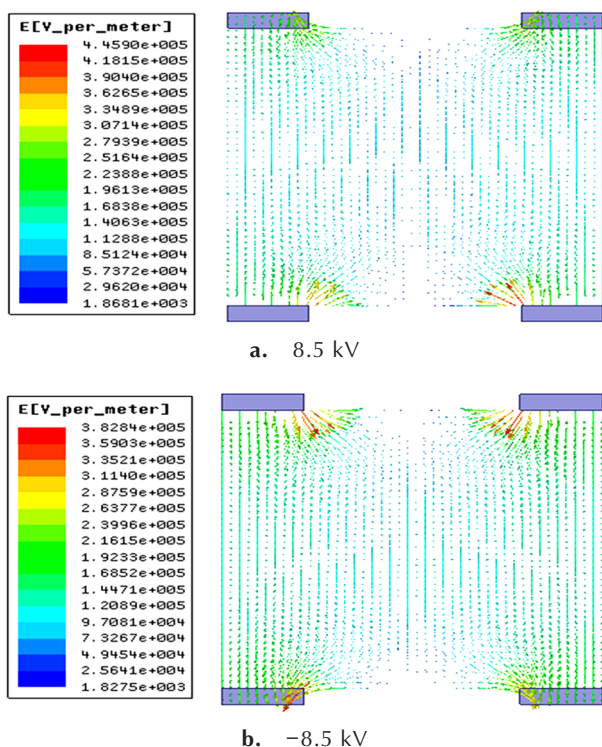


图3 电极间电场强度分布

Fig.3 Electric field intensity distributions between electrodes

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 电场对PMMA火焰形状的影响

自然对流情况下,PMMA燃烧时所需要的氧气来源于空气中,当PMMA表面的温度达到裂解温度时PMMA开始慢慢热分解,裂解产物与空气发生化学反应释放出能量维持PMMA继续燃烧。图4为正负电场作用下PMMA火焰形态。

由图4可见,不加电场时,直接与空气接触部分比中间部分的燃速快,随着燃烧过程的推移,PMMA会由最初的平面变成“锥形”,且该锥形在燃烧过程中能够保持平稳。由图4a可知,在PMMA根部出现了蓝色火焰区域,PMMA尖端附近火焰为黄色。

正电场作用下,PMMA根部均存在蓝色火焰。施加电压为8.5 kV和10 kV时,PMMA火焰宽度均增大(宽度定义见参考文献[19])。正电场作用下PMMA燃烧发出较大“嗤嗤声”,且比不加电场时声音大,火焰根部的燃烧增强。

负电场作用下,PMMA根部的蓝色火焰消失。这可能是由于负电场作用时产生的电场力方向与浮力驱

动的方向相反,阻碍了PMMA根部的氧气补充,使得火焰中的某些活性基团消失导致的。施加电压为-5.5 kV时,火焰宽度增加。施加电压幅值增大到-7.0 kV时,火焰高度(高度定义见参考文献[19])减小,宽度增加;当电压为-8.5 kV时,火焰高度进一步降低,宽度增加,火焰呈“帽子型”,火焰顶端靠近PMMA燃烧表面。实验中还发现,负电场作用下PMMA火焰的振荡幅度较大。

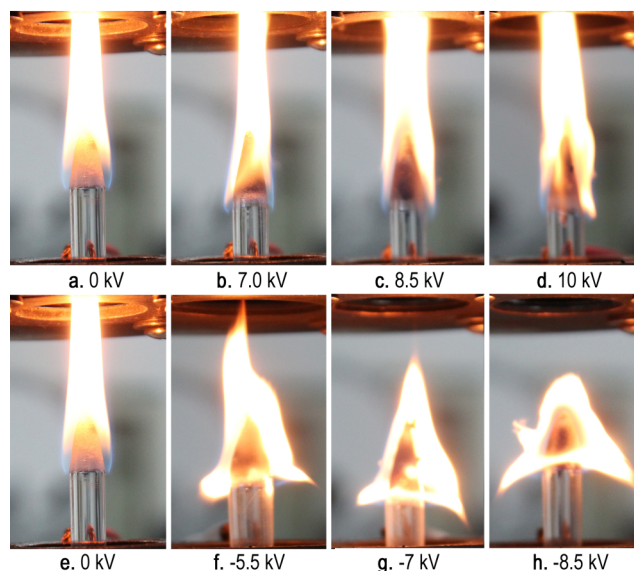


图4 正负电场作用下PMMA火焰的变化

Fig.4 Variation of PMMA flame under positive and negative electric fields

电场作用下火焰形态的变化与火焰中带电粒子受到电场力的作用有关。火焰形态的变化将影响火焰温度分布,而温度分布的改变将影响火焰中带电粒子的分布,使得不同位置受到的电场力发生变化。

#### 3.2 电场对PMMA燃速的影响

图5为正负电场作用下部分PMMA燃烧位移与时间的关系。由图5可知,不同电压作用下测试系统的稳定性较好。

图6为施加0,7.0,8.5,10.0,-5.5,-7.0,-8.5 kV共计7种电压下(每种电压下平行测定5次)的PMMA燃速分布结果。

定义电场作用下PMMA燃速与不加电场时PMMA燃速的比值为相对燃速,可定量地衡量电场对PMMA燃速的影响效果。根据图6中的燃速结果,对相同工况下的PMMA燃速进行平均,得到的不同电压作用下PMMA平均燃速,再进行归一化处理便可得到相对燃速,结果如表2所示。由表2可知,正电场作用下,随着施加电压幅值的增大,PMMA燃速增大;负电

场作用下,随着施加电压幅值的增大,PMMA 燃速先降低后增大。

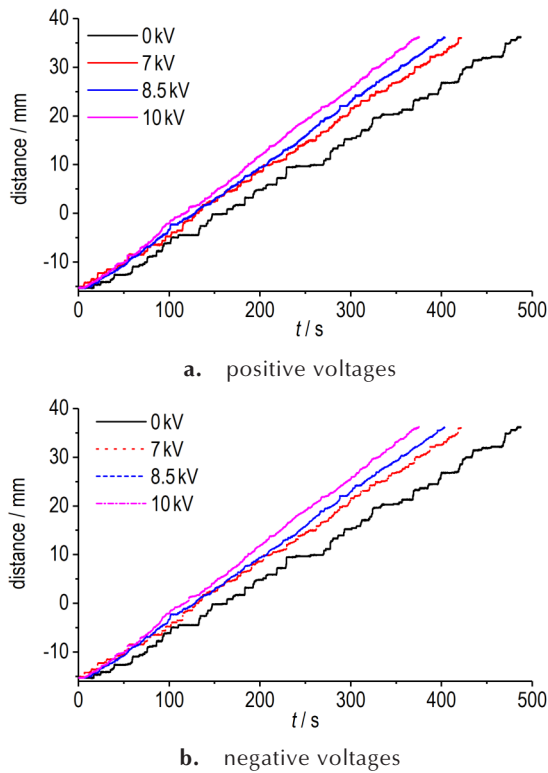


图5 电场作用下位移与时间的关系  
Fig.5 The dependences of the displacement on time under various electric fields

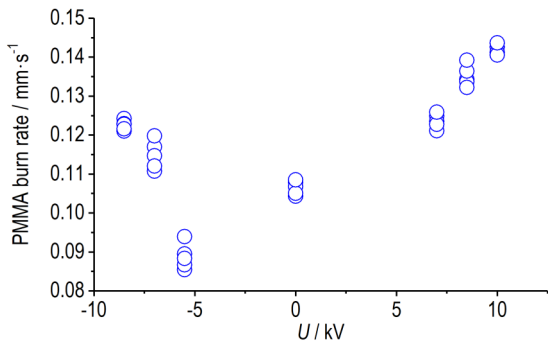


图6 不同电场作用下的 PMMA 燃速分布  
Fig.6 Burn rate distributions of PMMA under different electric fields

3.3 电场对火焰温度的影响

火焰温度直接影响着火焰对固相的热反馈,为了解电场作用下 PMMA 火焰温度的变化,采用红外热像获取 PMMA 火焰的热像图。由于 PMMA 火焰的辐射率无法直接获得,因此先用热电偶测量火焰的温度,实验测得 PMMA 火焰的最大温度约为 980 K。在程序中通过调试发现辐射率为 0.05 时,红外热象仪得到的 PMMA 火焰最大温度约为 930 K,与使用热电偶测得的

表2 不同电压作用下固体燃料的燃速

Table 2 Burn rate of solid fuel at various voltages

No.	applied voltage / kV	averaged burning rate / mm·s <sup>-1</sup>	normalized burning rate
1	0	0.1063	1
2	7	0.1233	1.16
3	8.5	0.1335	1.256
4	10	0.1427	1.342
5	-5.5	0.0896	0.843
6	-7.0	0.1148	1.08
7	-8.5	0.1227	1.154

数值较为接近,因此在后续的观测中,物体的辐射率均设置为 0.05。实验中焦距设为 0.9 m,环境温度为 291 K,由于 PMMA 燃速较低,为了节省存储空间,设置每秒的保存帧数为 3 张。图 7 给出了不同电压作用下 PMMA 火焰的热像图。由图 7a 可知,不加电场时,随着燃烧的进行,PMMA 火焰逐渐将能量传递给未燃区域的固体,最终形成一个较为稳定的温度分布,火焰的最高温度约为 927 K。

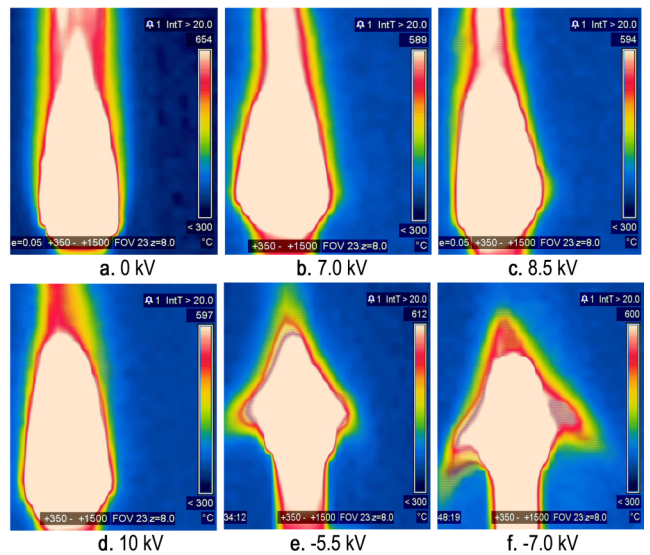


图7 不同电压作用下 PMMA 火焰的热像图  
Fig.7 Infrared thermography images of PMMA flame under various voltages

正电场作用下,施加 7.0 kV 电压时,火焰稳定后的温度约为 862 K,较不加电场时低约 65 K;施加 8.5 kV 电压时,火焰稳定后的温度约为 867 K,较不加电场时低约 60 K;施加 10.0 kV 电压时,火焰稳定后的温度约为 870 K,较不加电场时低约 57 K。

负电场作用下,施加 -5.5 kV 电压时,火焰稳定后的温度约为 885 K,较不加电场时低约 42 K;施加 -7.0 kV 电压时,火焰稳定后的温度约为 873 K,较

不加电场时低约 54 K。-7.0 kV 电压作用下,火焰离燃烧表面更近,同时离接地的电极也会更近,随着燃烧过程进行,传递给电极的热量不断聚集,实验中发现,保持其他条件不变时,施加-7.0 kV 电压时,燃烧完成后接地电极的温度明显高于施加-5.5 kV 时的温度。

### 3.4 电场作用下 PMMA 火焰电流

火焰是发光发热的剧烈的氧化反应,火焰内部充满了大量不带电的自由基和带电的阴阳离子以及自由电子。这些带电的粒子可以影响碳黑形成的化学过程,而碳黑形成后,粒子撞到颗粒表面或热离子化作用又可以使碳黑颗粒带电<sup>[20]</sup>。火焰燃烧产生的带电粒子在电场的作用下会定向运动,形成火焰电流。火焰电流通量的计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$\vec{j} = K_+ c_i e \vec{E} \quad (1)$$

式中, $K_+$ 为阳离子迁移率,为  $0.0001 \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ <sup>[21-23]</sup>;  $c_i$  为单位体积内的带电离子数目密度,  $\text{m}^{-3}$ ;  $e$  为电子电量 ( $e=1.602\times 10^{-19}\text{C}$ );  $E$  为电场强度,  $\text{V}\cdot\text{m}$ 。火焰电流通量与离子迁移率,单位体积内的带电离子数目密度以及电场强度相关。可根据实验测得的火焰电流估算火焰中带电粒子的数目浓度。表 3 列出了施加电压、火焰电流、电流通量、带电粒子数目密度等参数。不加电场时,无法用式(1)计算带电粒子数目,故未在表 3 中列出。

表 3 电场作用下火焰电流与带电粒子数目

Table 3 Flame current and number of charged particles under various electric fields

applied voltage/kV	flame current /mA	flame current flux/A·m <sup>-2</sup>	number of charged particles/m <sup>-3</sup>
7	$(1.0-1.3)\times 10^{-2}$	$(4.9-6.4)\times 10^{-3}$	$(1.71-2.15)\times 10^{15}$
8.5	$(1.5-1.7)\times 10^{-2}$	$(7.3-8.3)\times 10^{-3}$	$(1.71-2.15)\times 10^{15}$
10	$(1.8-2.2)\times 10^{-2}$	$(8.8-10.8)\times 10^{-3}$	$(4.16-5.09)\times 10^{15}$
-5.5	$(0.5-0.6)\times 10^{-2}$	$(2.5-2.9)\times 10^{-3}$	$(1.48-1.77)\times 10^{15}$
-7.0	$(1.3-1.5)\times 10^{-2}$	$(6.4-7.4)\times 10^{-3}$	$(3.03-3.50)\times 10^{15}$
-8.5	$(1.7-1.9)\times 10^{-2}$	$(8.3-9.3)\times 10^{-3}$	$(3.93-4.40)\times 10^{15}$

由表 3 可知,电场作用下,直径 8 mm 的 PMMA 燃烧时的火焰电流量级为微安级,火焰电流呈现区间分布。电流呈现区间分布的原因是:PMMA 火焰温度分布存在差异,使得火焰中带电粒子的分布不均匀,受到的电场力大小不同,这将对火焰形态产生影响,进一步影响火焰的温度分布。

施加正电压时,随着电压幅值的增大,火焰电流也随着增大;施加负电压时,随着电压幅值的增大,火焰电流也随之增大。由火焰电流通量的计算公式可知,火焰

电流通量与电场强度成正比。当电极间距保持不变时,随着电压幅值的增大,电场强度的大小会增大,电场强度增大会使得带电粒子的定向运动增强。此外,电场作用下 PMMA 燃速的改变,也会使得火焰中产生的带电粒子数目发生变化。这两个因素共同影响火焰电流大小。

电场作用下,火焰中的带电粒子数目密度量级约为  $10^{15} \text{ m}^{-3}$ ,介于  $10^{14}\sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$ <sup>[20]</sup>,这将为数值仿真计算中带电粒子的浓度计算提供一个参考值。正电场作用下,火焰中的带电粒子数目随着施加电压幅值的增大而增大;负电场作用下,火焰中的带电粒子数目也随着施加电压幅值的增大而增大。带电粒子的数目密度与 PMMA 燃烧不完全、火焰温度分布以及空气电离有关。自然对流下,不加电场时 PMMA 容易发生不完全燃烧,电场作用下 PMMA 燃速升高时,燃烧不完全程度会加剧,使得燃烧生成的碳烟增多,而碳烟多带正电<sup>[20]</sup>;火焰形状的变化会影响着火焰的温度分布,火焰温度直接影响火焰的电离;自然对流下,施加的电压较大时,空气也会产生一部分电离。以上三种因素共同作用造成电场作用下带电粒子浓度的变化。

### 3.5 电场对 PMMA 火焰影响机理

PMMA 在燃烧时,火焰中由于化学电离会产生一定量的正、负离子,且正负离子的组成主要受生成离子的相关反应的组分浓度和化学反应动力学数据的影响。其中正离子主要有  $\text{H}_3\text{O}^+$ 、 $\text{CHO}^+$ 、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$  等,负离子主要有  $\text{O}_2^-$ 、 $\text{O}^-$ 、 $\text{OH}^-$  等以及电子  $e^-$ ,负离子浓度较小,忽略其影响,正离子和电子的浓度较大。但由于电子的质量很小,且其电迁移率很大,故电子对体积力的贡献可以忽略<sup>[21,24-25]</sup>,主要考虑正离子的体积力贡献。直流电场对火焰的影响机理主要是离子风效应的作用<sup>[21-28]</sup>。在电极环上施加电压后,主要形成沿着竖直方向的电场,火焰中的离子在电场力的作用下定向运动,运动过程与中性分子发生碰撞,并将从电场中获得的部分动量和能量传递给中性分子,离子在每次碰撞后会在电场力的作用下继续加速运动,继而引起流场的变化,即为离子风效应<sup>[21-27]</sup>。离子风效应的本质是电场对火焰产生一个定向的电体积力而引起离子的定向迁移的累计过程,在火焰中形成流体动力学效应<sup>[24,27]</sup>。

自然对流燃烧下,不加电场时火焰主要受浮力驱动,浮力的计算公式为<sup>[21]</sup>  $F_g=(\rho-\rho_0)g$ ,其中  $\rho_0$  为参考密度, $g$  为重力加速度。在竖直方向施加电场后会存在一个方向与重力方向平行的电体积力,单位电体积力的计算公式为  $F_e=ec_iE=j/K_+$ <sup>[19,24-25]</sup>。离子风效应与电场强度、离子数密度呈正相关。电压幅值增大,电场强

度增大,电体积力增大,离子风效应增大。根据实验测得的火焰电流数据可估算电场作用下产生的单位电体积力,如表4所示。

表4 电场作用下单位电体积力估算

Table 4 Estimations of unit electric volume force under electric fields

applied voltage / kV	flame current / mA	electric volume force / $N \cdot m^{-3}$
7	$(1.0-1.3) \times 10^{-2}$	$(1.0-1.3) \times 10^{-1}$
8.5	$(1.5-1.7) \times 10^{-2}$	$(1.5-1.7) \times 10^{-1}$
10	$(1.8-2.2) \times 10^{-2}$	$(1.8-2.2) \times 10^{-1}$
-5.5	$(5.0-6.0) \times 10^{-3}$	$-(5.0-6.0) \times 10^{-2}$
-7.0	$(1.3-1.5) \times 10^{-2}$	$-(1.3-1.5) \times 10^{-1}$
-8.5	$(1.7-1.9) \times 10^{-2}$	$-(1.7-1.9) \times 10^{-1}$

由表4可知,极性相同的电场作用下,产生的电体积力会随着施加电压幅值的增大而增大。实验中电场作用下产生的电体积力约为 $0.1 \sim 0.2 N \cdot m^{-3}$ 。

PMMA火焰形态的变化与火焰中带电粒子受到的电体积力有关。由前面的规定的正负电场方式以及图3中仿真所得到的电极间电场强度分布可知,电场强度分布均匀的区域,正电场的电场强度方向与重力加速度方向相反,负电场的电场强度方向与重力加速度方向相同。正电场作用下,火焰区的带电粒子受到的电体积力与浮力方向相同,起到促进浮力驱动的作用。负电场作用下,火焰区的带电粒子受到的电体积力与浮力方向相反,电体积力起到阻碍浮力驱动的作用,电体积力与浮力之间存在一个平衡的电场强度,其大小为 $|E_{平衡}| = -(\rho - \rho_0)g / (ec_i)$ 。当施加的负电场强度 $|E| > |E_{平衡}|$ 时,电体积力的作用强于浮力的驱动作用,此时浮力的驱动作用会受到抑制;当施加的负电场强度 $|E| < |E_{平衡}|$ 时,浮力的驱动作用下强于电体积力的作用,浮力驱动仍展主导地位。正电场作用下,电体积力的方向与浮力的驱动方向一致,此时的离子风有助于促进浮力的驱动作用,一方面能够促进空气从PMMA根部方向进行补充,增强PMMA根部附近的氧气补充;另一方面能够促进燃烧生成的物质从上部电极排出。正电场作用下,PMMA根部的燃烧增强,当施加电压为8.5 kV和10.0 kV时,PMMA火焰宽度增加。负电场作用下,当施加电压为-5.5 kV时,火焰宽度变宽,意味着此时产生的电体积力不足以完全克服浮力的驱动作用;当施加电压为-7.0 kV时,产生的电体积力随着电压幅值的增大而增大,对浮力的抵抗作

用增强,火焰高度降低,火焰宽度增大;当施加的负电压幅值增加到-8.5 kV时,产生的电体积力能够完全克服浮力的驱动作用,火焰高度继续降低,火焰宽度增大,火焰离燃面更近,火焰呈现“帽子型”。

PMMA燃速受加热速率、压力以及氧气等因素的影响<sup>[28-30]</sup>。PMMA在自然对流作用下燃烧,压力的变化很小,故压力对电场作用下火焰的影响可以忽略。加热速率和氧气的作用是PMMA燃速变化的主要因素。电场作用下PMMA燃速的变化可能是由于电场作用下PMMA火焰形状发生变化,改变了火焰对固相的热反馈造成的。正电场作用下,火焰中的正离子向上定向迁移,产生向上的离子风促进了PMMA火焰根部的氧气补充,使得火焰根部的放热增强,促进了火焰根部的继续燃烧。正电场作用下火焰温度降低可能是因为正电场作用下产生的离子风加强了火焰对固相的热反馈。负电场作用下,产生的离子风方向向下,起阻碍火焰根部的氧气补充的作用,使得火焰根部的放热减弱。但是负电场作用下火焰高度降低和宽度增大,将会增强火焰对固相区域的热反馈。这两者的共同作用,最终影响PMMA燃速。当施加的电压为-5.5 kV时,由于火焰高度略微降低,PMMA火焰对火焰根部的热反馈增强不足以弥补PMMA根部由于氧气少导致的放热减小量,使得火焰根部得到的热反馈减弱,最终使得PMMA燃速降低;当电压增大至-7.0 kV时,PMMA火焰对火焰根部的热反馈增强,能够弥补PMMA根部由于氧气少导致的放热减小量,故而PMMA燃速增大;当电压增大至-8.5 kV时,由于火焰离PMMA燃面更近,PMMA对火焰根部的热反馈进一步增强,故而燃速继续增大。

## 4 结论

(1) 正电场作用下,施加电压为8.5 kV和10.0 kV时火焰宽度略微增大;负电场作用下,施加电压较大时,火焰高度降低,宽度增大,且施加电压幅值越大,其影响效果更显著。

(2) 正电场作用下,随着电压幅值的增大,PMMA燃速逐渐增加,燃速增幅可达34.2%;负电场作用下PMMA燃速先减小,后增加,燃速的降低幅度可达15.7%,燃速的增幅可达15.4%。

(3) 正负电场作用下PMMA火焰的最高温度呈降低趋势,可降低约50 K。

(4) PMMA火焰形状、温度以及燃速的变化可能是浮力和火焰中的带电粒子在电场作用下产生的电体

积力相互作用,导致火焰形状以及火焰对固相的热反馈发生变化的结果。

#### 参考文献:

- [1] 王佳兴,魏志军,王宁飞.变推力固体火箭发动机非稳态影响因素研究[J].北京理工大学学报,2011,31(9):1018-1022.  
WANG Jia-xing, WEI Zhi-jun, WANG Ning-fei. Study on the unsteady factors of variable thrust solid rocket engine[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(9): 1018-1022.
- [2] 王佳兴,魏志军,王宁飞.高燃温喉栓式变推力固体火箭发动机实验[J].推进技术,2012,33(1):89-92.  
WANG Jia-xing, WEI Zhi-jun, WANG Ning-fei. Experiment of high-flammable temperature throat bolt-type variable thrust solid rocket engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(1): 89-92.
- [3] 魏祥庚,何国强,李江,等.控制流参数对涡流阀变推力固体发动机性能的影响[J].推进技术,2009,30(5):571-575.  
WEI Xiang-geng, HE Guo-qiang, LI Jiang, et al. Influence of control flow parameters on performance of vortex valve variable thrust solid-state engine [J]. *Propulsion Technology*, 2009, 30(5): 571-575.
- [4] 余晓京,何国强,李江,等.涡流阀式变推力发动机性能影响因素数值研究[J].西北工业大学学报,2009,27(2):178-183.  
YU Xiao-jing, HE Guo-qiang, LI Jiang, et al. Numerical study on factors affecting the performance of vortex valve variable thrust engine[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2009, 27(2): 178-183.
- [5] 郭常超,于新宇,李博,等.流体喉部推力调节特性实验[J].航空动力学报,2015,30(4):999-1007.  
GUO Chang-chao, YU Xin-yu, LI Bo, et al. Experimental study on thrust regulation characteristics of fluid throat[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(4): 999-1007.
- [6] GUO Chang-chao, WEI Zhi-jun, XIE Kan, et al. Thrust control by fluidic injection in solid rocket motors [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2017, 33(4): 1-15.
- [7] Mayo P J, Watermeier L A, Weinberg F J. Electrical control of solid propellant burning [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1965, 284(1399): 488-498.
- [8] Bestgen R F. A study of the effects of electric fields on solid propellant burning rates[R]. Technical report AFRPL-TR-71-87, 1971.
- [9] Baranov A A, Buldakov V F, Shelukhin G G. Influence of the electric field on the combustion rate of a heterogeneous condensed system [J]. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 1976, 12(5): 618-621.
- [10] Abrukov S A, Isaev N A, Kachushkin V I, et al. Effects of an electric field on combustion in condensed systems [J]. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 1975, 11(1): 110-111.
- [11] Young G, Koeck J J, Conlin N T, et al. Influence of an electric field on the burning behavior of solid fuels and propellants [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2012, 37(1): 122-130.
- [12] 唐安东,孟祥文,周蓉芳,等.非均匀电场对火焰传播速率的影响[J].西安交通大学学报,2012,46(9):16-20.  
TANG An-dong, MENG Xiang-wen, ZHOU Rong-fang, et al. Effect of non-uniform electric field on flame propagation rate [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(9): 16-20.
- [13] 陈邵有,甘云华,杨泽亮,等.电场对乙醇扩散小火焰的影响[J].节能技术,2009(27):293-295.  
CHEN Shao-you, GAN Yun-hua, YANG Ze-liang, et al. Influence of electric field on small flame of ethanol diffusion [J]. *Energy Saving Technology*, 2009(27): 293-295.
- [14] 夏云春,吴静.电场对旋转火焰温度的影响[J].燃烧合成技术,2007,13(2):127-130.  
XIA Yun-chun, WU Jing. Effect of electric field on rotating flame temperature [J]. *Combustion Synthesis Technology*, 2007, 13(2): 127-130.
- [15] 王新强,邓康清,李洪旭,等.一种燃烧可控固体推进剂及其动力装置技术综述[J].飞航导弹,2017,(1):91-93.  
WANG Xin-qiang, DENG Kang-qing, LI Hong-xu, et al. A review of a combustion controllable solid propellant and its power plant technology [J]. *Flying Missiles*, 2017, (1): 91-93.
- [16] 王新强,邓康清,李洪旭,等.电控固体推进剂点火技术研究[J].固体火箭技术,2017,40(3):313-318.  
WANG Xin-qiang, DENG Kang-qing, LI Hong-xu, et al. Research on ignition technology of electronically controlled solid propellant [J]. *Solid State Rocket Technology*, 2017, 40(3): 313-318.
- [17] 胡建新,李洋,何志成,等.电控固体推进剂热分解和燃烧性能研究[J].推进技术,2018,39(11):2588-2595.  
HU Jian-xin, LI Yang, HE Zhi-cheng, et al. Study on thermal decomposition and combustion performance of electronically controlled solid propellant [J]. *Propulsion Technology*, 2018, 39(11): 2588-2595.
- [18] 段炼,胡建新,李洋,等.通电启动时固体推进剂电流密度仿真分析[J].固体火箭技术,2018,(1):28-34.  
DUAN Lian, HU Jian-xin, LI Yang, et al. Current density simulation of electrically controlled-solid propellant when energized [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, (1): 28-34.
- [19] Hu J, Rivin B, Sher E. The effect of an electric field on the shape of co-flowing and candle-type methane-air flames [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2000, 21(1): 124-133.
- [20] 王宇,姚强.电场对火焰形状及碳烟沉积特性的影响[J].工程热物理学报,2007,28(z2):237-239.  
WANG Yu, YAO Qiang. Influence of electric fields on flame shape and soot deposition characteristics [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(z2): 237-239.
- [21] Yamashita K, Karnani S, Dunn-Rankin D. Numerical prediction of ion current from a small methane jet flame [J]. *Combustion & Flame*, 2009, 156(6): 1227-1233.
- [22] Belhi M, Domingo P, Vervisch P. Direct numerical simulation of the effect of an electric field on flame stability [J]. *Combustion & Flame*, 2010, 157(12): 2286-2297.
- [23] Belhi M, Domingo P, Vervisch P. Modelling of the effect of DC and AC electric fields on the stability of a lifted diffusion methane / air flame [J]. *Combustion Theory & Modelling*, 2013, 17(4): 749-787.
- [24] Lawton J, Weinberg F J. Maximum ion currents from flames and the maximum practical effects of applied electric fields [C]//Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Proceedings of the Royal Society, 1964, 277(1371): 468-497.
- [25] Lawton J, Weinberg F J. Electrical aspects of combustion [M]. Oxford: Clarendon Press, 1969: 141-155.
- [26] Kuhl J, Seeger T, Zigan L, et al. On the effect of ionic wind on structure and temperature of laminar premixed flames influenced by electric fields [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 176: 391-399.
- [27] 侯俊才,李超,贾伟东,等.负直流电场对不同初始压力预混甲烷/空气火焰的影响[J].化工学报,2018,69(4):1602-1610.

- HOU Jun-cai, LI Chao, JIA Wei-dong, et al. Effect of negative DC electric field on premixed methane/air flame at different initial pressures[J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(4): 1602-1610.
- [28] Farre-Rius F, Guiochon G, Chem A. Conditions of flash pyrolysis of polymers as used in pyrolysis-gas chromatography[J]. *Analytical Chemistry*, 1968, 40(6): 998-1000.
- [29] Kashiwagi T, Hirata T, Brown J E. Thermal and oxidative degradation of poly(methyl methacrylate) molecular weight [J]. *Macromolecules*, 1985, 18(2): 1410-1418.
- [30] Wilde J P. Fuel pyrolysis effect on hybrid rocket and solid fuel ramjet combustor performance[D]. Delft: Delft University of Technology, 1991.

## Effect of High Voltage Electric Fields on the Combustion Characteristics of PMMA

YANG Xiao-long<sup>1</sup>, WEI Zhi-jun<sup>1</sup>, ZHANG Ze-lin<sup>1</sup>, ZHANG Jing-jia<sup>1</sup>, WANG Jia-xing<sup>2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Due to great demands on solid rocket motor and solid ramjet for thrust control, the experimental study on the effect of high voltage electric fields on the combustion characteristics of solid fuel polymethyl methacrylate (PMMA) was carried out. The effect of electric fields on the flame structure of PMMA, as well as its burn rate, temperature and flame flow-field was analyzed. The results show that the deformation of PMMA flame is significant under the negative electric fields. When larger electric fields are imposed, their effects on the flame become more significant. The high-voltage electric fields can greatly change the burn rate of PMMA. The burn rate of PMMA increases with the applied positive voltage amplitude by about 34.2%. Under the negative electric fields, the burn rate of PMMA decreases firstly with the increase of the voltage amplitude, and then increases. The burn rate can be decreased by about 15.7%, and it can also be increased by about 15.4%. The maximum temperature of PMMA is decreased when it is subject to the electric fields. The PMMA flame flow increases with the amplitude increase of the voltage. The interaction of buoyancy and electric volume force may be the factors that lead to the change of flame shape, temperature and the thermal feedback of the flame to the solid phase.

**Key words:** thrust control; high voltage electric field; solid fuel; electronically controlled combustion; flame structure; polymethyl methacrylate (PMMA)

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018347

(责编:张琪)



### 深切缅怀含能材料热分析专家——胡荣祖先生

《含能材料》特邀顾问,含能材料热化学热分析专家胡荣祖先生 2019 年 4 月 1 日因病于西安辞世,享年 81 岁。《含能材料》编辑部为失去这样一位德高望重的老前辈、老朋友而深表哀痛!

胡荣祖先生 1938 年 6 月 1 日出生于江苏无锡,毕业于浙江大学工程力学系,随后进入西安近代化学研究所从事材料热化学热分析研究。曾任“国际热分析与量热学协会”理事(1998-2000),《J. Therm. Anal. Cal.》中国区编委(1993-2000),中国化学会化学热力学与热分析专业委员会委员、副主任委员(1994-2002),陕西省学位委员会学科评议组成员,西北大学化学系、曲阜师范大学化学系、中国工程物理研究院化工材料研究所等高校和研究所兼职教授,主持和参加了多项基金项目,发表研究论文 420 余篇,是我国该研究领域的著名专家和学者,为含能材料热化学、热分析研究做出了积极贡献。

胡荣祖先生是《含能材料》的创刊人董海山院士的学术挚友,他们曾合著《含能材料热谱集》一书。在《含能材料》创刊之初,胡荣祖先生就应董院士之邀担任编委,此后二十多年间,胡荣祖先生为刊物发展倾注了大量心血。他为创刊号撰文《3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO)根锰(II)盐[Mn(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>](NTO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O的制备和晶体结构》,并先后在《含能材料》署名发文 50 余篇。他长期以来为期刊审校英文,即便在古稀之年也保持着严谨、缜密的治学态度。胡荣祖先生为提升《含能材料》的学术质量和国际化发展做出了重要贡献。

胡荣祖先生深厚的学术功底和勤勉务实的学术作风一直影响着《含能材料》编辑部的全体同仁。在创刊 20 周年之际,胡荣祖先生曾为期刊题词“传承学术,再铸辉煌”,他的鼓励与期望激励着《含能材料》不断进步!

胡荣祖先生的赤诚之心和大家风范将永远铭刻在我们心中。

