直流电场对AP/HTPB/Al复合固体推进剂 燃烧特性的影响^{*}

黄 星1, 甘云华1, 敖 文2, 赵明涛2, 罗燕来1, 江政纬1, 陈宁光1

(1. 华南理工大学 电力学院,广东广州 510640;2. 西北工业大学 燃烧、热结构与内流场重点实验室,陕西西安 710072)

摘 要:为研究直流电场对 AP/HTPB/AI 复合固体推进剂的燃烧特性的影响,进行了不同电场下的 推进剂药条燃烧实验;通过高速可视化拍摄方法,对推进剂药条的燃烧火焰、燃面退移过程及铝凝团运 动轨迹进行了观察,分析了不同加载电压对燃烧火焰、燃速及铝凝团散射速度的影响;采用运动学分析 方法计算了铝凝团粒子的平均荷质比和受力情况。结果表明:高压电场产生的离子风可以显著改变药条 燃烧的火焰形状;药条的燃速随着加载电压的升高而增大,且反向电场对燃速的影响更为显著,最大可 提高 37%的燃速;铝凝团粒子带正电,平均荷质比约为(1.58±0.04)×10⁻³C/kg,随着反向电场强度的 增加,铝凝团粒子所受的电场力逐步增大,最大可达重力的19倍,散射速度逐步降低,平均散射速度 最大可降低49%。

关键词:固体推进剂;直流电场;燃速;铝凝团;散射速度;荷质比 中图分类号:TJ55;V512⁺.3 文献标识码:A 文章编号:1001-4055(2023)01-210905-09 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210905

Effects of DC Electric Field on Combustion Characteristics of AP/HTPB/Al Composite Solid Propellant

HUANG Xing¹, GAN Yun-hua¹, AO Wen², ZHAO Ming-tao², LUO Yan-lai¹, JIANG Zheng-wei¹, CHEN Ning-guang¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermo-Structure Laboratory,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to study the effects of DC electric field on the combustion characteristics of AP/HTPB/ Al composite solid propellant, the propellant grain combustion experiments were carried out under different electric fields. Propellant grain flame, burning surface regression and the motion trajectories of Al agglomerations were observed by high-speed visual photography. The effects of different loading voltages on propellant flame, burning rate and scattering velocity of Al agglomerations were analyzed. The average specific charge and force of Al agglomerations particles was calculated by kinematic analysis. The results show that the ionic wind produced by the high voltage electric field can significantly change the flame shape of the propellant grain. The burning rate of propellant grain increases with the increase of loading voltage, and the reverse electric field has a more signifi-

^{*} 收稿日期: 2021-12-27;修订日期: 2022-02-11。

基金项目:国家自然科学基金(51776077);广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515020040; 2019A1515110769);内 燃机燃烧学国家重点实验室开放基金(K2021-01)。

作者简介: 黄 星, 硕士生, 研究领域为新型燃烧技术。

通讯作者:甘云华,博士,教授,研究领域为电场辅助燃烧、荷电喷雾燃烧等。E-mail: ganyh@scut.edu.cn

引用格式:黄星,甘云华,敖文,等.直流电场对AP/HTPB/Al复合固体推进剂燃烧特性的影响[J]. 推进技术, 2023, 44(1):
 210905. (HUANG Xing, GAN Yun-hua, AO Wen, et al. Effects of DC Electric Field on Combustion Characteristics of AP/HTPB/Al Composite Solid Propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(1):210905.)

cant effect on the burning rate, which can increase the burning rate by 37%. Al agglomerations are positively charged, and the average specific charge is about $(1.58\pm0.04)\times10^{-3}$ C/kg. With the increase of the reverse electric field intensity, the electric field force on the Al agglomerations particles increases gradually, up to 19 times of gravity, and the average scattering velocity decreases gradually, by 49 % most.

Key words: Solid propellant; DC electric field; Burning rate; Al agglomerations; Scattering velocity; Specific charge

1 引 言

相比于液体火箭发动机,固体火箭发动机的燃 烧可控性能较差,亟需高效和主动的调控方法。目 前实现固体火箭发动机能量管理的技术方案主要是 固体多脉冲发动机技术和固体变推力发动机技术^[1]。 固体多脉冲火箭发动机需预先装药,采用隔离装置 对燃烧室或药柱进行分隔,按照点火前设定的推力 控制方案进行工作,无法根据即时需求对推力大小 进行无级调节,紧急处置能力较差。固体变推力发 动机主要通过新增伺服系统调节燃烧室压强,进而 对发动机推力进行无级调节,目前主要采用喉栓式 变推力技术[2-4]、气动喉部式变推力技术[5-7]、涡流阀 式变推力技术[8-10]。由于新增伺服系统具有烧蚀严 重、结构复杂的缺点,一般只适用于能量较低的推进 剂,发动机的比冲较低,系统可靠性较差。实现固体 火箭发动机推力控制的另一种方法是通过外加电场 控制固体推进剂的质量燃速,进而调节固体火箭发 动机的推力,这种方法得以应用的前提是探明电场 对固体推进剂燃烧的影响机理。

国内外众多研究表明,电场对液体和气体燃料 的燃烧和流动过程有显著的影响[11-14],研究者也在电 场对新型推进剂/固体燃料燃烧影响方面开展了众多 研究。在高氯酸锂(LiClO₄)/聚乙烯醇(PVA)固体推 进剂和HAN基电控固体推进剂方面,胡建新等^[15]开 展了常压下 LiClO₄/PVA 固体推进剂的热分解特性、 点火过程以及稳态燃烧研究,研究观察到燃烧火焰 结构呈现出预混火焰结构,并总结了该类推进剂热 分解的三个主要过程。He 等^[16]制备了 LiClO₄/PVA/ Al固体推进剂,并研究了电场对固体推进剂的热分 解和燃烧特性,发现推进剂的燃速随着电场强度的 增大而增大,质量燃速在 0.2 MPa下可提高 8.19 倍。 王新强等^[17]研究了常压下电极对硝酸羟胺(HAN)/聚 乙烯醇(PVA)复合固体推进剂点火及熄火过程的影 响,发现随着电压增大,HAN/PVA固体推进剂的点火 性能越好,并总结了不同材料的电极点火先后顺序。 鲍立荣等^[18-19]对HAN基电控固体推进剂的热分解和 燃烧特性进行实验研究,发现HAN基电控固体推进 剂的热分解历程主要分为三步,推进剂的燃速随着 电场强度和环境压强的增大而增大。在固体燃料方 面,Barmina等^[20]研究了直流电场对麦秸颗粒/固体燃 料颗粒(木材、泥炭)燃烧特性的影响,发现施加电场 能改善燃料的燃烧效果,提高设备14%的产热量。 杨小龙等^[21-23]进行了直流高压电场对固体燃料PM-MA燃烧特性影响的实验研究和数值模拟,发现高压 电场可显著改变PMMA燃速,燃速在正向高压电场 的作用下可增大34.2%,在反向高压电场的作用下先 减小后增大,降幅可达15.7%,增幅可达15.4%,反向 电场对火焰形态的影响更为显著。

目前,国内外在电场对高氯酸铵(AP)/端羟基聚 丁二烯(HTPB)复合固体推进剂的影响研究较少,且 存在较多矛盾的观察和结论。Abrukov等^[24]研究了 电场对 AP/HTPB 复合固体推进剂燃烧的影响,发现 反向高压电场能使固体推进剂燃速增加约20%~ 30%,并认为主要原因是电场产生的强离子风将反应 产物再循环到相对于推进剂表面的不同空间位置, 这影响了推进剂固气界面的热传递过程,从而导致 推进剂的燃速发生改变。Baranov 等^[25]研究了开放系 统下不同方向电场对AP基固体燃料燃速的影响,发 现高压电场能使燃速增加10%~20%,并认为推进剂 燃速变化的主要原因是高压电场影响了固体推进剂 的化学反应动力学机理,因为实验产生电场的设备 功率很小,产生的焦耳热不可能显著改变推进剂的 温度,且实验分布采用了正反两个方向上的高压电 场,但不同方向的离子风并未改变推进剂燃速随电 场强度的变化趋势。Young等^[26]研究了开放系统下 电场对 AP/HTPB 复合固体推进剂燃烧特性的影响, 但其发现无论电极极性如何,固体推进剂的燃速在 高压电场的作用下都有所下降,并认为电场对火焰 中离子的作用可能是推进剂燃速降低的原因,这种 作用引起了火焰形状的变化,进而导致火焰对推进 剂表面的热反馈降低,进而减小推进剂的燃速。因 此,电场对AP/HTPB固体推进剂燃烧特性的影响机 制方面还存在较大争议。

高氯酸铵(AP)/端羟基聚丁二烯(HTPB)是目前 应用最为广泛的复合固体推进剂^[27],掺混部分Al后, 燃烧的特性得到极大改善。目前在国内电场对其固 体推进剂的燃烧调控研究主要为新型基电控材料固 体推进剂的配方研究^[28],电场对传统 AP/HTPB/Al复 合固体推进剂燃烧特性的影响的实验研究较少,且 在实验上多为开放系统[25-26],并未排除环境下中氧气 的影响;在方法上也缺少对推进剂燃面附近火焰、铝 凝团粒子荷质比和受力情况的分析,得出的电场影 响分析结果较片面。本研究采用了密闭绝缘透明燃 烧器,实验前通入氮气排除了环境中氧气的影响,通 过高速可视化拍摄方法,对不同加载电压下推进剂 药条燃烧的燃面附近火焰、燃面退移过程及铝凝团 运动轨迹进行了观察,分析了加载电压对推进剂燃 烧火焰、燃速及铝凝团散射速度的影响:采用运动学 分析方法计算了铝凝团粒子的平均荷质比。

2 方 法

2.1 实验系统

直流电场下 AP/HTPB/A1复合固体推进剂的燃烧 特性实验系统主要由外加电场系统、透明绝缘燃烧 器、高速可视化拍摄系统、点火控制系统、进气及排 气系统、数据采集系统及尾气处理系统组成,实验系 统如图1所示,实验装置实物如图2所示。

为避免实验装置对外加电场的影响,燃烧器、电极托盘和固定螺杆均由绝缘良好的PMMA有机玻璃制成,燃烧室高180mm,外径300mm,壁厚20mm,具有较好的耐温性。高压电极选用内径18mm、外径30mm、壁厚2mm的304不锈钢环形电极,具有良好的导电性,电极通过导电布胶带与电极托盘连接,电极托盘的距离可通过调节螺母的位置进行调整。

为保证燃烧室内压力稳定,减少燃烧过程中产

生的烟雾的影响,从制备的固体推进剂中切割出 2mm×4mm×40mm的小长条样品进行实验。AP/HT-PB/Al复合固体推进剂由湖北航天化学技术研究所 提供,其组成成分和粒度分布见表1,表内粒径为颗 粒的体积4次矩平均径。

2.2 实验方法

为避免空气中的氧气影响燃烧和燃烧产物的淬火,实验前充入过量氮气将空气排出。实验压力为0.1MPa,压力变送器量程为0~1MPa,精度为0.1。药条的点火过程由0.3mm的电热点火丝引燃,点火电压为24V,药条的燃烧过程由高速摄像机记录,像素为2560×1600,高速摄像机以200帧/秒的帧速拍摄药条燃面附近的宏观燃烧火焰、燃面退移过程及铝凝团粒子的运动轨迹,重复多次实验以确保实验数据可靠,剔除铝凝团起始帧尚附着在燃面上的数据,确保铝凝团在电场区域的飞行速度准确测量。

通过对高速摄像机拍摄的药条燃面退移过程进行尺寸标定,可得到推进剂药条在电场区域的燃烧 长度,根据推进剂在电场区域燃烧的起始帧信息,药 条的燃速r依据式(1)进行计算,即

$$r = \frac{200L_1}{f_2 - f_1} \tag{1}$$

通过对高速摄像机拍摄的铝凝团运动轨迹进行 尺寸标定和逐帧分析,可得到铝凝团在电场区域的 飞行距离,铝凝团爆破后的散射速度v依据式(2)进 行计算,即

$$v = \frac{200L_2}{f_{\rm b} - f_{\rm a}}$$
(2)

式中L₁为推进剂药条在电场区域的燃烧长度,单位 为mm;f₁为药条在电场区域燃烧的起始帧;f₂为药条 在电场区域燃烧的结束帧;L₂为铝凝团在电场区域的 可见飞行距离,m;f_a为铝凝团发生爆破后的可见起始 帧;f_b为铝凝团离开电场区域前的可见结束帧。



Fig. 1 Diagram of experimental system

210905-3



Fig. 2 Photo of experimental facility

Table 1 Propellant formulations

| Component | | Mass/% | Particle size/µm |
|-----------|----------|--------|------------------|
| AP | Type I | 38.1 | 424 |
| AP | Type II | 25 | 298 |
| AP | Type III | 6 | 142 |
| Al | | 18 | 13 |
| HTPB | | 12.9 | - |

3 结果与讨论

3.1 燃烧室内电场分析

为便于区分电场方向,规定当上电极接高压电 源输出端,下电极接地时产生电场为正向电场;当下 电极接高压电源输出端,上电极接地时产生电场为 反向电场。采用Ansys Maxwell电磁场分析软件对电 极间的电场进行分析,设置环形电极内径为18mm, 外径为30mm,厚度为2mm,环形电极间距为10mm, 电极材料选用不锈钢,给予上环形电极5kV电压激 励,下环形电极电压设置为0kV,环形电极间电场数 值分析情况如图3所示。

图 3(a)为环形电极间的电场线分布情况,加载 正向电场,电极间形成的电场线由上环形电极指向







下环形电极,形成的电场线关于中轴线对称分布;图 3(b)为环形电极间的电场强度分布情况,环形电极 中心区域的场强分布均匀,而环形电极附近的电场 强度变化较大。若给予上环形电极 2.5kV 电压激励, 电场线的分布形式基本不变,电场强度等比减小。

环形电极中轴线上电势分布与电场分布如图4 所示,从下电极底部中心到上电极顶部中心,电势逐步增加,电势的增速先增后减;电场强度随电势增速 先增后减,且强度关于中心点z=7mm对称。



(a) Variation of potential at different axial distances



Fig. 4 Electric field simulation on axis of ring electrode

由图可知,图4(a)曲线基本符合回归式抛物线的基本特征,图4(b)曲线基本符合二次抛物线的基本特征,采用最小二乘法进行拟合,可得到中轴线上的电势与上电极施加的电压大小的近似关系式(3)和中轴线上的电场与上电极施加的电压大小的近似关系式(4)。

$$U_{0} = \left(-0.25z_{0}^{3} + 5.248z_{0}^{2} - 2.348z_{0} + 345\right)U_{a}(3)$$

$$E_0 = \left(0.7264z_0^2 + 10.17z_0 - 1.43\right)U_a \tag{4}$$

式中 U_0 是环形电极中轴线上 $z = z_0$ 上的电势大小,V; E 是环形电极中轴线上 $z = z_0$ 上的电场强度,kV/m; z_0 为环形电极中轴线上某点的高度,mm; U_a 为上环形 电极施加的电压,kV。

3.2 电场对燃面火焰特征的影响

燃面火焰是固体推进剂燃烧的重要特征,燃面 火焰直接影响到推进剂燃面处的温度高低,是影响 燃速的重要因素之一。AP/HTPB/A1复合固体推进剂 药条燃面处火焰的本质是固体推进剂受热分解后的 气相产物之间发生的复杂物理化学反应。田德余^[29] 考虑到AP在低压下燃面呈熔融态,提出了AP的凝聚 相分解历程,其气相终产物为H₂O(g),NO(g)和ClO (g);Radhakrishnan等^[30]采用气相色谱技术研究了 HTPB的气相降解产物,在温度高于1170K时,HTPB 主要气相产物为C₂H₄。在低压下,这些气相中间产 物预混后点燃即可产生预混火焰,燃烧的热量维持 推进剂的热分解反应。

图 5 对比了不同方向电场下的 AP/HTPB/Al复合 固体推进剂药条燃面处的火焰,从左至右加载电压 情况依次为反向 5kV、不施加电压和正向 5kV。由于 推进剂燃烧产生的烟尘和高亮度退移燃面加大了燃 面火焰的观测难度,燃面的边界已用白色实线在原 图中标记出,燃面附近火焰的基本特征已用白色虚 线在原图中描绘出。



Fig. 5 Burning surface flame of AP/HTPB/Al solid propellant grain at different electric field

由图 5 可以看出,药条燃面处的燃烧均呈现出多 火焰的特征。在不施加电场的情况下,药条燃面处 的火焰较暗,火焰距离燃面较远,火焰细长,自然向 下;在反向 5kV 的加载电压下,药条燃面处的火焰明 亮,火焰距离燃面更近,火焰变长,部分火焰向上卷 起呈现出"对钩"状;在正向 5kV 的加载电压下,药条 燃面处的火焰亮度相比于不施加电场更亮,火焰距 离燃面更近,火焰变短,自然向下。火焰亮度与 Young 等^[26]的实验研究的结果类似,随着电场强度增 加,AP/HTPB/A1推进剂的火焰亮度明显增加,这是因 为推进剂的可见火焰向外延伸而造成的明显亮度差 异;正向电场下的火焰结构与 Gan 等^[31]实验所研究的 结果类似,随着电场强度增加,燃烧火焰向内收缩, 火焰变短。

电场对推进剂燃面火焰的影响的本质原因是 AP/HTPB/Al复合固体推进剂药条燃面处火焰因气相 产物的化学电离会产生一定量的带电离子。Young 等^[26]采用NASA CEA程序计算了AP/HTPB/Al推进剂 燃烧的预期平衡浓度,其中正离子主要有Al⁺,Al₂O⁺, AlCl⁺和H₃O⁺,负离子主要有Cl⁻,AlO⁻,OH⁻,H⁻和电子 e⁻。在外加电场下,带电离子在电场力的作用下作定 向移动,与火焰中的中性粒子发生碰撞,带电离子自 身的运动和对中性粒子不断碰撞引起了流场的变 化,进而影响 AP/HTPB/Al复合固体推进剂药条燃面 处火焰的形状。

3.3 电场对药条燃速的影响

图 6 为施加不同加载电压的电场作用下的 AP/ HTPB/Al复合固体推进剂药条平均燃速的变化情况。 由图可知,在反向电场的作用下,随着电压增大,推 进剂的燃速以接近线性趋势逐渐增大,且燃速在更 大的反向电场下还有继续提升的趋势。这是因为离 子风效应使得靠近药条燃面处的火焰与燃面之间的 距离减小,且向上卷起的火焰对推进剂未燃部分的 药条有一定的预热作用,共同导致了燃面的温度升 高,推进剂的热分解反应加快,药条的燃速增加。在 正向电场作用下,随着电压增大,推进剂的燃速逐渐 增大,但燃速增速逐步放缓。这说明正向电场对燃 速有一定的促进作用,但存在促进的极限值。这是 因为正向电场电压大小施加到一定程度后,燃烧火 焰减小,火焰产生在离燃面更近的位置,距离燃面较 近的火焰使得推进剂的热分解反应加快,自然向下 火焰对推进剂未燃部分药条的预热效果降低,达到 平衡状态后,药条的燃速略微增加。

为定量衡量电场对 AP/HTPB/Al复合推进剂药条 燃速的影响效果,定义电场作用下推进剂平均燃速 与不施加电场时推进剂平均燃速的比值为相对燃



Fig. 6 Burning rate of AP/HTPB/Al solid propellant grain at different electric field

速,表2为推进剂药条的相对燃速变化情况。由表 2可知,反向电场对推进剂的燃速提升较为显著, 在-5.00kV下可提高37%的燃速,在不产生电弧的 前提下,燃速在更大的反向电场下还有继续提升的 可能性。正向电场对固体推进剂的燃速提升有限, 在3.75kV时达到最大值,最大可提高12%的燃速。 因此,外加合适电场可适当加快AP/HTPB/AI推进剂 的燃速。

 Table 2
 Burn rate of AP/HTPB/Al solid fuel at various voltages

| Voltage/kV | Burning rate/(mm/s) | Relative burning rate |
|------------|---------------------|-----------------------|
| -5.00 | 1.58 | 1.37 |
| -3.75 | 1.44 | 1.25 |
| -2.50 | 1.32 | 1.15 |
| -1.25 | 1.21 | 1.05 |
| 0.00 | 1.15 | 1.00 |
| 1.25 | 1.16 | 1.01 |
| 2.50 | 1.26 | 1.10 |
| 3.75 | 1.29 | 1.12 |
| 5.00 | 1.29 | 1.12 |

3.4 反向电场对铝凝团散射速度的影响

铝的熔点为923K,汽化温度为2723K,在一般的 推进剂燃面温度下,铝不会汽化,附着在燃面上与其 它铝粒子凝结形成凝团。随着 AP 和 HTPB 的分解, 铝凝团不断受热,其表面和中心温度的严重不平衡, 在表面张力的作用下发生爆破,向四周散射^[29]。

在分析高速摄像数据过程中,发现铝凝团粒子 在反向电场下的散射速度有明显的降低,取不同反 向电场下铝凝团粒子爆破后沿着竖直方向下落的特 殊情况进行分析,令铝凝团粒子爆破初始在同一高 度,粒子的运动轨迹如图7所示。图7可定性分析铝 凝团的散射速度,红色水平横直线为铝凝团粒子爆 破初始所在竖直位置,在不施加外加电场的情况 下,铝凝团粒子第10ms时已飞离可视区域;在施 加-1.25kV和-2.50kV的反向电场的情况下,铝凝团 粒子第15ms时已飞离可视区域,且铝凝团粒子 在-2.50kV时的下落距离略小于在-1.25kV时的下落 距离;在施加-3.75kV的反向电场下,铝凝团粒子第 15ms时仍处于可视区域。在上述情形下,铝凝团粒 子在反向电场下的散射速度有明显的降低。

为进一步说明实验的可靠性,同时考虑到高压 电场形成的区域大小有限(10mm×18mm),铝凝团爆 破后的散射速度较快,若不预留足够的可视散射空 间,摄像机无法记录铝凝团的运动轨迹,取高速摄像



Fig. 7 Trajectories of Al agglomerations at different negative electric field

药条燃烧过程的后 25% 的逐帧图像进行统计学分析,铝凝团爆破后的散射速度的平均值的计算依据 下式,即

$$\bar{v} = \frac{1}{k_1} \sum_{i=1}^{k_1} v_i \tag{5}$$

式中*k*₁为施加某一电场作用下的铝凝团的可见运动 轨迹数,为保证铝凝团粒子在垂直于可视面上运动, 只统计粒子运动过程粒径*d*变化不超过5%的可见运 动轨迹;*v_i*为某一运动轨迹的飞行速度,m/s,其计算 依据式(2)。

图 8 为施加反向不同加载电压的电场作用下的 推进剂铝凝团散射速度变化情况。由图可知,在反 向电场的作用下,随着电压增大,铝凝团爆破后的散 射速度逐步降低,平均散射速度可降低49%,这也说 明铝凝团粒子带正电,在爆破后受到了与电场方向 相同、阻碍其运动的电场力。



Fig. 8 Scattering velocity of Al agglomerations at different negative electric field

3.5 铝凝团荷质比及受力分析计算

带电粒子的荷质比是分析电场影响的重要物理 参数之一。对于单个球形带电液滴,施加电场后,液 滴运动受到的力主要为电场力、重力和气动曳力^[32]。 直径为*d*的单个铝凝团粒子受到的各力表达式为

$$F_a = qE \tag{6}$$

$$F_{x} = mg \tag{7}$$

$$F_{d} = 3\pi\mu d \left(v_{e} - v_{p} \right) \left(1 + \frac{3}{16} Re \right)$$
(8)

$$Re = \frac{\left| v_{\rm c} - v_{\rm P} \right|}{v_{\rm c}} \rho_{\rm c} d \tag{9}$$

$$m = \frac{1}{6}\rho\pi d^3 \tag{10}$$

式中 F_q 为铝凝团粒子受到的电场力,N; F_g 为铝凝团 粒子受到的重力,N; F_d 为铝凝团粒子受到的气动曳 力,N;Re为铝凝团粒子的雷诺数;q为Al凝团粒子的 带电量,C;m为Al凝团粒子的质量,kg;g为重力加速度,取9.8m/s²进行计算;d为铝凝团粒子的粒径,m;v_e为连续相的速度,即氮气速度,取为0m/s;v_p为铝凝团 粒子的速度,m/s;v_e为氮气的动力粘度,Pa·s; ρ_e 为氮 气的密度,kg/m³; ρ 为铝凝团粒子的密度,kg/m³。

考虑粒子以图7方式竖直下落,在不施加电场的 情况下,针对铝凝团粒子从爆破后的初速度v₀至达到 平均散射速度v₁的过程,依据动能定理,可列下式为

$$\left(F_{g} - F_{d}\right)L_{i} = \frac{1}{2}\left(mv_{1}^{2} - mv_{0}^{2}\right)$$
(11)

在施加反向电场后,铝凝团粒子额外受到电场 力的作用,针对铝凝团粒子从爆破后的初速度v₀至达 到平均散射速度的过程 v_i,依据动能定理,可列下 式为

$$\left(F_{g} - F_{q} - F_{d}\right)L_{i} = \frac{1}{2}\left(mv_{i}^{2} - mv_{0}^{2}\right)$$
(12)

由于 Al凝团粒子的粒径 d 和在电场区域的飞行 距离 L_i受电场影响很小,重力做功变化很小。反向电 场的作用力对铝凝团粒子产生了减速作用,根据式 (8)可知气动曳力减小,即阻力减小,但合力效果仍 为明显减速效果,因此电场力才是影响铝凝团散射 速度的主要原因,重力做功的变化、气动曳力的减小 效应可忽略计算,根据式(11),(12)计算 Al凝团粒子 荷质比β_i为

$$\beta_i = \frac{q}{m} = \frac{1}{2E_i} \frac{(v_1^2 - v_i^2)}{L_i}$$
(13)

则AI凝团粒子的平均荷质比为

$$\bar{\beta} = \frac{1}{2k_1} \sum_{i}^{k_1} \beta_i = \frac{1}{2k_1} \sum_{i}^{k_1} \left(\frac{v_1^2 - v_i^2}{E_i \times L_i} \right)$$
(14)

式中 β_i 为铝凝团粒子的荷质比, C/kg; $\bar{\beta}$ 为Al凝团粒子的平均荷质比, C/kg; L_i 为施加电场作用下某一铝 凝团粒子的可见运动轨迹长度, m;E为铝凝团飞行的可见初始点与结束点区域内的平均电场强度, 根据式(4)可计算药条燃烧后 25% 区域的平均电场强度, kV/m。

通过此方法可计算铝凝团粒子的平均荷质比 $\bar{\beta}$ =(1.58±0.04)×10⁻³C/kg,取铝凝团粒子的粒径 d= 5×10⁻²m,不同反向电场下铝凝团粒子的平均荷质比 $\bar{\beta}$,电场力与重力之比 F_q/F_g 变化情况见图9,由于本 实验高压电极未与推进剂药条直接接触,铝凝团粒 子平均荷质比受电场强度变化的影响小于3%,反向 5kV电场下铝凝团粒子的荷质比可直接根据平均荷 质比进行计算。由图9可知,随着反向电场强度的增 加,铝凝团粒子所受的电场力逐步增强,约从5 F_g 增 加至19F_s,而气动曳力F_d显然不可能大于重力F_s,这 与假设计算的情况一致,电场力才是影响铝凝团散 射速度的主要原因,通过此方法估算的铝凝团荷质 比合理。



Fig. 9 F_q/F_s and $\bar{\beta}$ of Al agglomerations under different negative electric field

4 结 论

本文针对高压电场对 AP/HTPB/AI 推进剂燃烧特性的影响进行了研究,可以得到以下结论:

(1)高压电场产生的离子风可以显著改变 AP/ HTPB/AI推进剂燃面附近的火焰形状。

(2)推进剂的燃速随着加载电压的升高而增大, 且反向电场对燃速的影响更为显著,外加合适电场 可加快 AP/HTPB/AI 推进剂的燃速,在反向高压电场 下,燃速增幅最大可达 37%,在正向高压电场下,燃速 增幅最大可达 12%。

(3) 铝凝团粒子带正电, 在反向电场下, 在爆破 后受到了与电场方向相同、阻碍其运动的电场力, 随 着电压增大, 铝凝团的散射速度逐步降低, 平均散射 速度最大可降低 49%。

(4) 铝凝团粒子的荷质比约为(1.58±0.04)× 10⁻³C/kg,随着反向电场强度的增加,铝凝团粒子所受的电场力逐步增大,最大可达重力的19倍。

致 谢:感谢国家自然科学基金、广东省基础与应用基 础研究基金、内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金的 资助。

参考文献

- [1] 侯 晓,付 鹏,武 渊.固体火箭发动机能量管理 技术及其新进展[J].固体火箭技术,2017,40(1): 1-6.
- [2] 成 沉. 喉栓式固体变推力发动机推力调控方法及性 能仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.

- [3] 唐金兰,宋慧敏,李进贤,等.基于动网格的喉栓式 推力可调喷管内流场数值模拟[J].固体火箭技术, 2014,37(5):634-639.
- [4] 王佳兴,魏志军,王宁飞.高燃温喉栓式变推力固体 火箭发动机试验[J].推进技术,2012,33(1):89-92.
 (WANG Jia-xing, WEI Zhi-jun, WANG Ning-fei. High Burning Temperature Experiment on Pintle Controlled Solid Motor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(1):89-92.)
- [5] 谢 侃,王一白,刘 宇.固体火箭发动机气动喉部 非定常过程[J].推进技术,2011,32(1):103-108.
 (XIE Kan, WANG Yi-bai, LIU Yu. Unsteady Process of Aerodynamic Throat for Solid Rocket Motor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(1):103-108.)
- [6] 谢 侃,李 博,郭常超,等.固体火箭发动机气动 喉部的推力调控特性[J].推进技术,2015,36(2): 194-199. (XIE Kan, LI Bo, GUO Chang-chao, et al. Thrust Control Features for Aerodynamic Throat for Solid Rocket Motor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015,36(2):194-199.)
- [7] 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.
- [8] 魏祥庚,李 娜,李 江,等.涡流阀固体变推力发动机控制流参数影响规律研究[J].推进技术,2017,38(6):1235-1240. (WEI Xiang-geng, LI Na, LI Jiang, et al. Research on Influence Law of Vortex Valve SRM Thrust Modulation Affected by Control Flow Parameters [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017,38(6):1235-1240.)
- [9] 魏祥庚,李 江,陈 剑,等.变控制流供应角度涡 流阀固体变推力火箭发动机调节方案[J].航空动力 学报,2017,32(11):2737-2742.
- [10] Wei X, Li J, He G. Influence of Structural Parameters on the Performance of Vortex Valve Variable-Thrust Solid Rocket Motor [J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2017, 34(1): 1-9.
- [11] Jiang Z, Gan Y, Ju Y, et al. Experimental Study on the Electrospray and Combustion Characteristics of Biodiesel-Ethanol Blends in a Meso-Scale Combustor[J]. Energy, 2019, 179: 843-849.
- Luo Y, Gan Y, Jiang X. Investigation of the Effect of DC Electric Field on a Small Ethanol Diffusion Flame [J].
 Fuel, 2017, 188: 621-627.
- Gan Y, Tong Y, Jiang Z, et al. Electro Spraying and Catalytic Combustion Characteristics of Ethanol in Meso-Scale Combustors with Steel and Platinum Meshes [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 410-416.
- [14] 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.

- [15] 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):2588-2594. (HU Jian-xin, LI Yang, HE Zhi-cheng, et al. Study on Thermal Decomposition and Combustion Performance of Electrically Controlled Solid Propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(11):2588-2594.)
- [16] He Z, Xia Z, Hu J, et al. Lithium-Perchlorate/Polyvinyl-Alcohol-Based Aluminized Solid Propellants with Adjustable Burning Rate[J]. Journal of Propulsion and Power, 2019, 35(3): 512-519.
- [17] 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.
- [18] 鲍立荣,张 伟,陈永义,等.HAN基电控固体推进 剂的热分解和电导率特性[J].含能材料,2019,27
 (9):743-748.
- [19] 鲍立荣,汪 辉,王志文,等.HAN基电控固体推进 剂电热耦合特性及燃烧特性实验研究[J].推进技术, 2021,42(6):1410-1417.(BAO Li-rong, WANG Hui, WANG Zhi-wen, et al. Experimental Study on Electrothermal Coupling and Combustion Characteristics of HAN-Based Electrically Controlled Solid Propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021,42(6): 1410-1417.)
- [20] Barmina I, Kolmickovs A, Valdmanis R, et al. Electric Field Effect on the Thermal Decomposition and Co-Combustion of Straw with Solid Fuel Pellets [J]. Energies, 2019, 12(8): 1522-1542.
- [21] 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.
- [22] Yang X L, Wei Z J, Zhang Z L, et al. Study of the Effect of DC High-Voltage Electric Fields on the Regression Rate of PMMA[J]. Acta Astronautica, 2019, 165: 117– 128.

- [23] Yang X L, Wei Z J, Zhang J J, et al. Numerical Study of the Effect of Electric Fields on the Combustion Characteristics of PMMA under Lateral Inflow[J]. Acta Astronautica, 2020, 167: 418-428.
- [24] Abrukov S A, Isaev N A, Kachushkin V I, et al. Effects of an Electric Field on Combustion in Condensed Systems
 [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1976, 11(1): 110-111.
- [25] 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, and Shock Waves, 1976, 12(5): 618-621.
- [26] 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.
- [27] Chaturvedi S, Dave P N. Solid Propellants: AP/HTPB Composite Propellants [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(8): 2061-2068.
- [28] 鲍立荣,陈永义,陈苏杭,等.可控固体推进技术研究进展[J].推进技术,2020,41(5):961-973.(BAO Li-rong, CHEN Yong-yi, CHEN Su-hang, et al. Research Progress on Controllable Solid Propulsion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(5):961-973.)
- [29] 田德余.复合推进剂燃速模拟计算[M].北京:国防 工业出版社,2019.
- [30] Radhakrishnan T S, Rao M R. Thermal Decomposition of Polybutadienes by Pyrolysis Gas Chromatography [J]. Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition, 1981, 19(12): 3197-3208.
- [31] Gan Y, Wang M, Luo Y, et al. Thermal Effects of Direct-Current Electric Field on Flame Shape and Combustion Characteristics of Ethanol in Small Scale [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(1): 1-14.
- [32] 甘云华,江政纬,李海鸽.锥射流模式下乙醇静电喷雾液滴速度特性分析[J].力学学报,2017,49(6): 1272-1279.

(编辑:朱立影)