

含电磁敏感铁丝推进剂的制备及其燃烧性能研究

杨猛¹, 张旭¹, 王明明², 王宏元¹, 张英佳¹, 段艳娟³, 黄佐华¹, 汤成龙¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 内蒙合成化工研究所, 010010, 呼和浩特;

3. 西安航天动力技术研究所固体推进全国重点实验室, 710100, 西安)

摘要: 针对固体推进剂燃烧智能调控难及燃烧机制不明的问题, 将铁丝嵌入丁羟体系制备电磁敏感推进剂, 获得燃烧特性数据并揭示燃烧调控机制。首先, 筛选出电磁激励下升温较快的铁丝作为电磁敏感材料, 采用化学平衡计算程序对嵌入铁丝的推进剂能量进行模拟; 然后, 利用可视化燃烧实验平台和材料试验机, 开展燃烧及力学性能实验; 最后, 结合电磁场模拟, 阐释了电磁激励下嵌入铁丝推进剂的燃烧速度调控机制。实验结果表明: 随着嵌入铁丝直径的增加, 推进剂固相成分增加, 理论比冲下降, 密度增大且燃烧速度先增加后降低; 嵌入 0.4 mm 直径铁丝推进剂的最大抗拉强度为 0.714 MPa, 在电磁激励下的燃烧速度为 6.10 mm/s, 较无电磁激励下相同推进剂的燃烧速度增加 2.65 倍, 较未嵌入铁丝的推进剂增加 5.26 倍; 含铁丝推进剂在电磁激励下受到高温燃气、铝/含铁氧化物燃烧放热及电磁场的共同作用, 温度升高更快, 未燃推进剂预热区温度更高, 导致其燃烧速度增加更快。该研究可为电磁敏感推进剂设计及燃烧调控提供实验支撑和理论依据。

关键词: 电磁敏感推进剂; 铁丝; 电磁激励; 燃烧速度; 高温燃气

中图分类号: V19; TJ71 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202506005 **文章编号:** 0253-987X(2025)06-0042-10

Preparation and Combustion Performance of Propellant Containing Electromagnetic Sensitive Iron Wire

YANG Meng¹, ZHANG Xu¹, WANG Mingming², WANG Hongyuan¹, ZHANG Yingjia¹,

DUAN Yanjuan³, HUANG Zuohua¹, TANG Chenglong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Inner Mongolia

Institute of Synthetic Chemical Industry, Hohhot 010010, China; 3. The Institute of Xi'an Aerospace Solid Chemical

Propulsion Technology, National Key Laboratory of Solid Rocket Propulsion, Xi'an 710100, China)

Abstract: In response to the difficulty of achieving intelligent combustion control and unclear understanding of the mechanism for solid propellants, an electromagnetic sensitive propellant was prepared by embedding iron wire into a ding hydroxyl system. The combustion characteristic data was obtained. The combustion control mechanism was revealed. Firstly, iron wire was selected as electromagnetic sensitive material due to its fast-heating rate under electromagnetic excitation. The energy of propellant embedded with iron wire was simulated using chemical equilibrium with applications. Then, the combustion and mechanical performance experiments were conducted by

收稿日期: 2024-12-24。 作者简介: 杨猛(1992—), 男, 助理教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52306161, 52236001); 固体推进全国重点实验室开放基金资助项目(SY41F202412066)。

网络出版时间: 2025-02-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250208.1729.002>

using a visual combustion experimental platform and a material testing machine, separately. Finally, the burning rate control mechanism of the propellant containing iron wire under electromagnetic excitation was elucidated. Results showed that as the diameter of the embedded iron wire increased, the solid content of propellant increased, the theoretical specific impulse decreased, the density increased, and the burning rate first increased and then decreased. The maximum tensile strength of the propellant embedded with a 0.4 mm diameter iron wire was 0.714 MPa. The burning rate under electromagnetic excitation was 6.10 mm/s, which is 2.65 times higher than that of same propellant without electromagnetic excitation, and 5.26 times higher than that of the propellant without the embedded iron wire. Under electromagnetic excitation, the propellant containing iron wire was subjected to the combined effects of high-temperature combustion gas, heat release from combustion between Al and oxide with iron, and electromagnetic field, resulting in a faster temperature rise and a higher temperature in the preheating zone of unburned propellant, leading to a faster increase in burning rate. This study provides experimental support and theoretical basis for the design and combustion control of electromagnetic sensitive propellants.

Keywords: electromagnetic sensitive propellant; iron wire; electromagnetic excitation; burning rate; high temperature gas

固体火箭发动机具有结构简单、体积小、发射准备时间短、可长时间存储、成本低等优势,在航天发射、导弹武器、姿轨控动力等方面应用广泛^[1-2]。其中,推力的实时调控技术是未来导弹动力系统的重要发展方向,对智能化装备发展有着极其重要的意义^[3]。固体推进剂燃烧过程智能可变可控,能够为固体发动机提供灵活的推力输出,提高导弹的机动性和灵活性,适应导弹跨域多模作战需求,推进剂燃烧过程智能可控,因此固体发动机可以随时改变其推力模式,实现高效的能量管理,使得导弹在飞行过程中具备随时改变飞行速度的能力。目前,实现固体火箭发动机推力调节及能量管理较为成熟的技术途径主要包括固体多脉冲发动机技术和固体变推力发动机技术^[4-6]。固体多脉冲发动机采用隔离装置将燃烧室或脉冲药柱进行分隔,每级药柱均有一套独立的点火系统,通过合理调节推力及脉冲间隔时间,可实现飞行弹道和发动机能量的控制与管理^[3]。该发动机点火前可预设推力,但实时调控能力有限。固体变推力发动机主要通过新增伺服系统调节燃烧室压力,进而对发动机推力进行实时调控,目前主要采用喉栓式变推力技术^[7-8]、涡流阀式变推力技术^[9-10]等。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。近年来,通过外场激励(电/磁场、微波等)对固体推进剂进行燃烧速度或推力调节的技术逐渐受到关注,该技术主要通过

施加外界激励场对固体推进剂燃面、燃烧产物等产生促进/抑制作用,进而调控其燃烧过程^[4-5]。

在电场激励方面,Abrukove等^[11]和Baranov等^[12]研究了电场对高氯酸铵/端羟基聚丁二烯(AP/HTPB)推进剂燃烧特性的影响,发现高压电场使得推进剂的燃烧速度增加10%~30%。黄星等^[4]开展了不同电场下丁羟三组元体系推进剂药条的燃烧实验,通过高速可视化拍摄方法,对推进剂药条的燃烧火焰及燃面退移过程进行了观察,分析了不同加载电压对燃烧火焰及燃烧速度的影响,结果表明:高压电场产生的离子风能够显著改变药条燃烧的火焰形状;药条的燃烧速度随着加载电压的升高而增大,且反向电场对燃烧速度的影响更为显著,最大提高幅度可达37%。此外,电控固体推进剂可以通过改变施加的电压来控制推进剂的点火燃烧,进而实现发动机重复启动和推力的实时调节。该类推进剂在通电作用下可分解、燃烧并释放热量,实现有效点火、持续燃烧并产生推力^[5]。国内外学者在电控固体推进剂合成^[13-14]、热解^[15-17]、燃烧^[18]等方面开展了大量研究,推动了固体推进剂推力可调技术的发展。然而,实际应用过程中仍需解决较多问题,如在发动机上需附带大量电源、电控加热响应较慢、高压下电控固体推进剂会自维持燃烧等。在磁场激励方面,Gillon等^[19]发现向上增大的磁场会降低甲烷/空气火焰高度,并认为磁力与顺磁射流结构相互作用,从而影响火焰稳定性。Zhang等^[20]通过施加各种类型的非均匀磁场,发现磁场能够有规

律地调节固体燃料的燃烧速率。综上所述,电/磁等外场激励主要通过作用在固体推进剂燃面附近的气相环境(离子、带电基团、磁性粒子等)来定向改变燃烧状态,但仍存在调节范围有限、响应时间长、有效工作窗口窄等问题。

Barkley 等^[21-22]将磁敏感材料(铜和石墨烯棒)嵌入 AP 复合固体推进剂中合成磁敏感推进剂,利用微波加热方式诱导磁敏感材料温度升高,从而点燃推进剂。通过调节微波能量,控制磁敏感材料温度升高速率,实现对推进剂燃烧速度的主动控制。研究结果表明:推进剂的燃烧速度最大可增加 3.5 倍。由此可知,在典型推进剂中添加电/磁敏感组分,利用电磁外场激励可实现较大范围的燃烧速度调节。然而,加入电磁敏感组分对推进剂成型工艺、力学性能、能量及燃烧性能的影响仍不清晰。因此,需要对含电磁敏感材料的推进剂设计及燃烧调控进行深入研究。

本文通过实验与模拟相结合方法,筛选合适的电磁敏感材料,探究含电磁敏感材料推进剂的制备方法 & 工艺流程,并对电磁敏感推进剂进行能量、力学等性能测试;利用高压可视化实验平台开展含电磁敏感材料推进剂的燃烧特性实验,对不同压力、电磁场强度下推进剂药条燃面附近的火焰、燃面退移过程进行观察与分析,获得对应的燃烧速度及增速比等参数,进一步探究电磁激励下推进剂的燃烧速度增加机制。

1 实验部分

1.1 电磁敏感推进剂制备

为便于分析电磁敏感材料对推进剂性能的影响,本文选取常用的丁羟三组元体系作为电磁敏感推进剂的基础设计配方,将高氯酸铵 AP 作为氧化剂,其中粗粒度(粒径为 250 μm)组分的质量分数为 59.06%,细粒度(粒径为 20 μm)组分的质量分数为 8.44%,Al 粉(粒径为 20 μm)的质量分数为 17.00%,HTPB 及小组分助剂(键合剂、防老剂等)的质量分数为 10.80%,增塑剂的质量分数为 3.40%,燃烧速度调节剂的质量分数为 1.30%。按照国标 GJB770B—2005 中的 706.1 方法(水下声发射法),测定丁羟三组元体系的燃烧速度,测试温度为 25℃,测试压力分别为 4、6、8、10 MPa,测得的燃烧速度分别为 4.58、5.14、5.70、5.89 mm/s,进而采用线性回归方法进行拟合,得到丁羟三组元体系的燃烧速度压力指数为 0.285。

为了获得性能优良的电磁敏感推进剂,需要对电磁敏感材料进行筛选。根据法拉第电磁感应定律和焦耳定律,电磁敏感材料在交变磁场下会产生感应电动势形成涡流,进而在自身电阻的作用下产生焦耳热,使得材料温度上升。圆柱状物体在电磁感应加热作用下产热率 P 的表达式可写为

$$P = \frac{\pi^2 R^2 f^2 B_m^2}{3\rho} \tag{1}$$

式中: R 为圆柱状物体半径; f 为交流电频率; ρ 为电阻率; B_m 为磁感应强度,表达式如下

$$B_m = \mu_r \mu_0 H_m \tag{2}$$

其中, μ_r 为相对磁导率, μ_0 为真空中的磁导率, H_m 为磁场强度。

由于感应加热与激励电流的幅值、电流频率、加热时间、电磁敏感材料的电阻和相对磁导率有关,为了提高产热率,需要选择相对磁导率大、电阻率小的材料,或使用半径较大的电磁敏感材料,表 1 列出了常见的电磁敏感材料的相对磁导率与电阻率。其中,铜、银、铝等材料的相对磁导率接近 1,在电磁场下很难加热;电工纯铁、坡莫合金及镍的相对磁导率较高而电阻率较小,具有较好的电磁感应加热效果。为进一步确认电磁敏感材料基体,采用电磁感应装置(电压为 60 V,频率为 80 kHz,电流幅值为 300 A)及红外热像仪(量程为 0~350℃,频率为 40 Hz)对直径为 1.2 mm 的铁丝、坡莫合金 1J85 和镍丝 3 种材料开展电磁激励条件下的升温测试。实验结果表明:铁丝升温速率最快,可达 170℃/s;坡莫合金 1J85 次之,为 42℃/s;镍丝最慢,仅为 12℃/s。因此,本文选取纯铁作为电磁敏感材料基体。

表 1 20℃时常见金属材料的电阻率与相对磁导率^[23]

Table 1 Electrical resistivity and relative magnetic permeability of metal materials at 20℃^[23]

材料	相对磁导率	电阻率/(Ω·m)
电工纯铁	4 000	9.78×10^{-8}
铸铁	200~400	8.00×10^{-7}
镍	1 120	6.84×10^{-8}
铁氧体	10~1 000	$5.00 \times 10^6 \sim 1.00 \times 10^6$
钴	174	6.24×10^{-8}
铝	1.000 3	2.40×10^{-8}
铜	0.999 99	1.70×10^{-8}
银	0.999 97	1.65×10^{-8}
坡莫合金	20 000~200 000	$6.00 \times 10^{-7} \sim 8.50 \times 10^{-7}$
铁钴合金	3 000~12 000	$1.00 \times 10^{-7} \sim 5.00 \times 10^{-7}$
铁硅铝合金	120 000	8.00×10^{-7}

为了制备含铁丝的电磁敏感推进剂,本文选用5 L立式混合机在50℃下对物料进行搅拌混合,具体工艺为:①将少量粘合剂HTPB、键合剂、防老剂及增塑剂等混合均匀,少量多次加入Al粉,预混均匀后加入混合机,并以 $25\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度搅拌5 min;②继续加入氧化剂AP,以 $25\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度搅拌5 min;③加入燃烧速度调节剂,以 $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度搅拌40 min;④加入固化剂,以 $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度搅拌25 min;⑤清理团聚颗粒及未混合物料,以 $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度搅拌20 min,最终出料获得药浆。设计含铁丝推进剂药条浇注模具,该模具一次可浇注12根药条,每根药条的尺寸为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,采用锁紧装置将铁丝固定在药条的中心位置。根据电磁场激励下的升温测试结果,选取铁丝直径为0、0.2、0.4、0.6 mm。采用真空浇注方法,将混合好的药浆倒入浇注漏斗,缓慢开启下料堵头并观察下料,浇注过程中将真空度控制在0.67 kPa以下,浇注温度为 $(50\pm 2)^\circ\text{C}$,浇注时间为25~30 min;然后清理试件表面,利用压板固定按压保证药面平整;最后在50℃下硫化7 d,脱模后即可获得含铁丝的推进剂药条并用于燃烧测试实验。图1给出了推进剂药条的浇注过程。

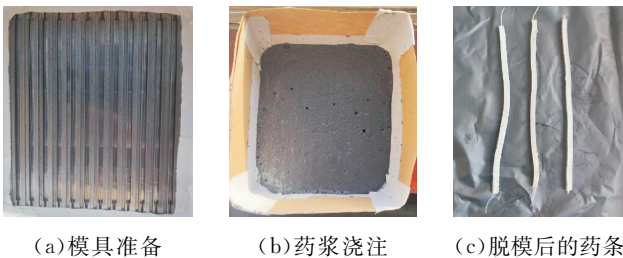


图1 推进剂药条浇注过程

Fig. 1 Process of propellant pouring

1.2 实验系统及方法

为研究添加电磁敏感材料后推进剂的力学性能,采用浇注成型工艺,按照国标GJB 770B—2005规定的力学性能测试要求制备哑铃型试件,样品如图2所示,不嵌铁丝与嵌入直径为0.4 mm铁丝的哑铃型试件尺寸保持一致。嵌入铁丝的推进剂试件制备方法为:采用锁紧装置将铁丝固定后,沿图2中模具纵向中心位置进行浇注成型,该模具一次可浇注5个哑铃型试件。力学性能测试方法为:采用Instron 5967材料试验机(载荷施加范围为5~50 kN,有效拉伸空间为1 256~1 756 mm)沿纵轴方向对哑铃型试件施加静态单向拉伸载荷,直至试件破

坏失去力学强度后,得到试件所承受应力与应变响应的关系。测试时,拉伸速率为100 mm/s,环境温度 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$ 。

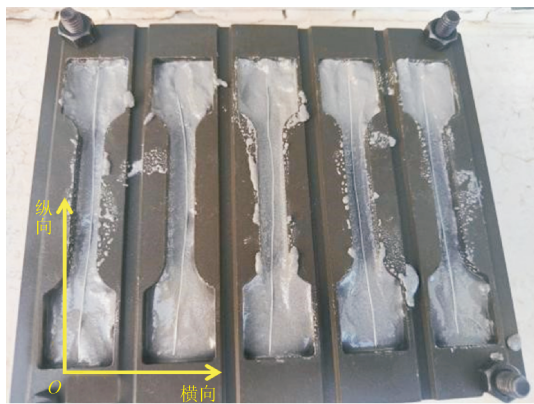


图2 嵌入0.4 mm直径铁丝的推进剂力学性能测试试件

Fig. 2 Test specimen for mechanical property testing of propellant embedded with a diameter of 0.4 mm iron wire

如图3所示,电磁激励下含铁丝推进剂的燃烧特性实验系统主要由外加电磁场系统、可视化高压燃烧器、高速可视化拍摄系统、点火控制系统、进排气系统及数据采集系统组成。其中,外加电磁场系统选用的电磁发生器电源功率为1 300 W,交变电流频率为80 kHz,电磁线圈直径为52 mm,线径为2.5 mm,间隔为5 mm,线圈匝数为6;可视化高压燃烧器的容积为13.8 L,视窗尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,石英玻璃厚度为40 mm;phantom V2012高速相机的拍摄频率为2 000 帧/s,拍摄方法为直接拍摄和纹影法;激光点火器功率为30~150 W连续可调,本文实验采用的点火功率为66.2 W。为保证制备的推进剂燃烧行为发生在端面,防止药条侧面和底部发生点火现象,对制备的推进剂药条进行表面包覆处理,其中包覆液由质量浓度为8%的聚乙烯醇缩丁醛和质量浓度为92%的无水乙醇组成。与此同时,为减少燃烧过程产生的烟雾影响,从已包覆的推进剂中切割出尺寸为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的长条样品进行实验。推进剂燃烧过程中燃烧速度的计算方法为:利用MATLAB软件程序中的rgb2gray函数,将高速相机获得的彩色图像转化为黑白图像,即灰度图。灰度图中着火区域和未着火区域的灰度值分别为(225,225,225)、(0,0,0),设定灰度阈值为(220,220,220),计算过程中灰度值大于该阈值为着火区域,小于该阈值为未着火区域,由此可确定推进剂的燃面位置。计算单个像素对应的实际长度,确

定每张图像的燃面高度;计算从燃烧开始到结束燃面退移的高度 L 和时间 t , 则推进剂的燃烧速度可通过 L/t 得到。

本文开展了3类推进剂燃烧实验,包括:①不含电磁敏感材料(铁丝)的推进剂在压力为0.1 MPa、无电磁激励下的燃烧实验;②含不同直径(0.2~0.6 mm)铁丝的推进剂在压力为0.1~3.0 MPa、无电磁激励下的燃烧实验;③含不同直径(0.2~0.6 mm)铁丝的推进剂在压力为0.1 MPa、有电磁激励下的燃烧实验。

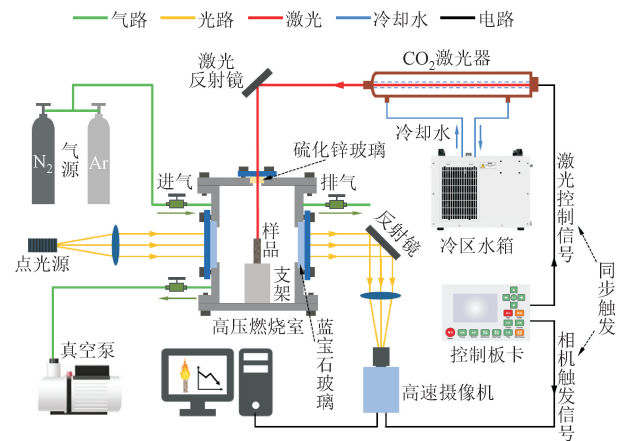


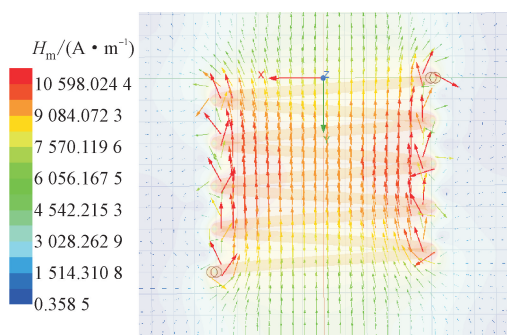
图3 推进剂燃烧装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of combustion setup

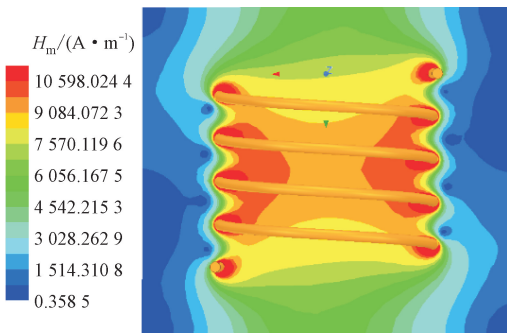
2 结果与讨论

2.1 电磁激励下的场分析

为便于研究电磁激励下铁丝的响应特性,对实验用电磁场进行模拟分析。将上接线柱接入电磁发生器输出端(正极),下接线柱接入电磁发生器接收端(负极),此时产生的磁场方向为正向。采用ANSYS Maxwell电磁场分析软件对电磁线圈形成的电磁场进行分析,选取电压为60 V,交变电流频率为80 kHz,电磁线圈直径为52 mm,线径为2.5 mm,间隔为5 mm,线圈匝数为5,得到的电磁场数值仿真结果如图4所示。图4(a)为环形电磁线圈间电磁场的线分布,可以看到,加载正向磁场,电磁线圈形成的磁场线由下方指向上方,形成的磁场线关于中轴线对称分布。图4(b)为环形电磁线圈的磁场强度分布,可以看出,电磁线圈中心区域的场强分布均匀,而靠近电磁线圈及两端的磁场强度变化较大。此外,从上端中心(z 轴原点)到下端中心的磁场强度先增大后减小,且对称分布;从电磁线圈中轴线沿 x 轴方向,磁场强度逐渐增大。



(a) 磁场线矢量图



(b) 磁场强度分布

图4 电磁场数值仿真结果

Fig. 4 Numerical simulation results of electromagnetic field

2.2 含铁丝电磁敏感推进剂能量性能

为研究电磁敏感材料铁丝的嵌入对推进剂能量的影响,采用美国国家航空航天局(NASA)化学平衡计算软件对样品的理论比冲 I_{sp} 和密度等开展计算。计算的初始条件设定为:采用火箭模型,燃烧室压力为7.0 MPa,出口压力为0.1 MPa,初始温度为298.15 K。本文中,铁丝嵌入替代的是相同体积的丁羟三组元,根据铁的密度和直径与丁羟三组元密度,计算出相对于横截面尺寸为4 mm×4 mm的推进剂,0.2、0.4、0.6 mm直径铁丝的质量分数分别为0.9%、3.5%和7.7%。由于电磁敏感推进剂中铁以丝状存在,为便于分析铁丝加入对推进剂能量性能的影响,在计算过程中将铁丝等效为铁粉。表2给出了4种不同推进剂样品的组成及能量性能,可以看出,不含铁丝推进剂样品的固含量(AP、Al和铁丝占推进剂的质量分数之和)为84.5%,理论比冲为263.9 s,密度为1.739 g/cm³;随着嵌入铁丝含量的增加,推进剂样品的固含量增大,理论比冲下降,密度增大。铁丝的嵌入导致理论比冲下降的主要原因为:铁的燃烧热(372.8 kJ/mol)较低。因此,在对含电磁敏感材料(铁丝)推进剂配方开展设计时,需要充分考虑材料含量及结构带来的影响。

表 2 不同直径铁丝对推进剂能量性能的影响

Table 2 Influence of different diameter iron wires on the energy performance of propellants

推进剂类型	AP 的 质量分数/%	Al 的 质量分数/%	铁丝的 质量分数/%	HTPB 及其他组分的 质量分数/%	I_{sp}/s	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$
未嵌铁丝	67.5	17.0	0	15.5	263.9	1.739
嵌 0.2 mm 直径铁丝	66.9	16.8	0.9	15.4	262.4	1.751
嵌 0.4 mm 直径铁丝	65.1	16.4	3.5	15.0	258.0	1.787
嵌 0.6 mm 直径铁丝	62.3	15.7	7.7	14.3	250.7	1.850

2.3 含铁丝电磁敏感推进剂燃烧性能

燃面火焰是固体推进剂燃烧的重要特征,直接影响推进剂燃面处的温度及燃烧速度。丁羟推进剂药条燃面处火焰的本质为固体推进剂受热分解后气相产物发生的复杂化学反应^[4]。图 5 给出了 0.1 MPa 压力下,采用纹影法获得的不含铁丝基础推进剂燃烧过程的高速图像。由图可见,燃烧过程可分为惰性加热、热分解、点火和稳定燃烧 4 个阶段。设定打开激光器时刻为 0,激光辐射到推进剂药条表面后,表面吸收激光能量温度逐渐升高,当达到推进剂熔点时发生部分熔化,在激光作用区形成固液混合区。部分液相发生热解反应产生气相可燃气体,与环境中的氧气反应后释放大热量,形成不附着在推进剂表面的初始火焰。随后,初始火焰继续扩散发生二次燃烧,产生的火焰向推进剂表面扩张并膨胀,推进剂的 Al 颗粒达到着火点开始燃烧,并与其他可燃成分逐步形成稳定火焰。采用 MATLAB 软件对高速图像进行处理,得到不含铁丝推进剂的基础燃烧速度(直线斜率)为 1.16 mm/s,结果如图 6 所示。

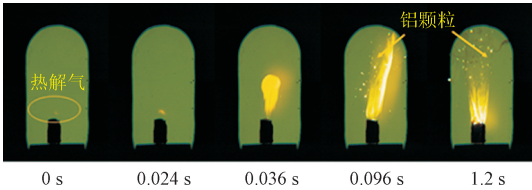


图 5 0.1 MPa 压力下不含铁丝基础推进剂的燃烧过程

Fig. 5 Combustion process of basic propellant without iron wire at a pressure of 0.1 MPa

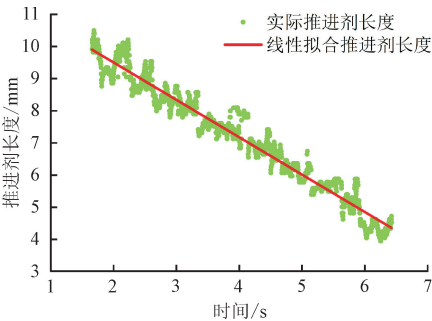


图 6 0.1 MPa 压力下不含铁丝推进剂长度随时间的变化

Fig. 6 Time dependent variation of propellant length without iron wire at a pressure of 0.1 MPa

为更加直观地对比含电磁敏感材料(铁丝)的推进剂在不同压力下的燃烧特性,采用直接拍摄方法对推进剂的燃烧过程进行记录和分析。本文开展了压力为 0.1~3.0 MPa 下电磁敏感推进剂的燃烧实验。图 7 给出了压力为 0.1 MPa 和 1.0 MPa 下,含 3 种直径铁丝推进剂燃烧时的高速图像。

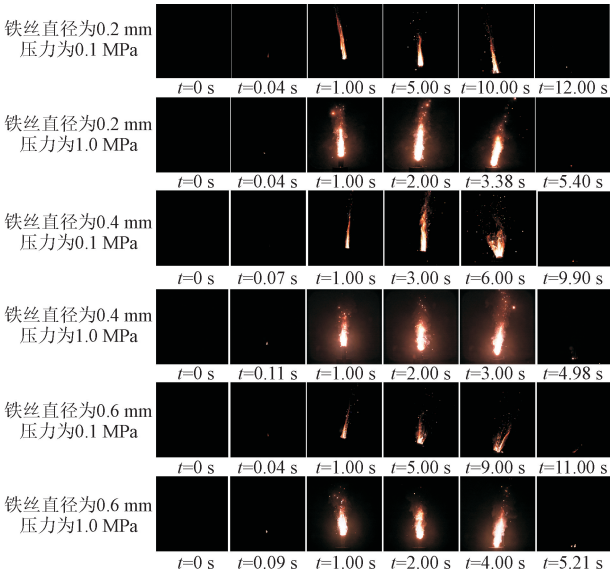


图 7 不同压力下电磁敏感推进剂的高速图像

Fig. 7 High-speed images of electromagnetic sensitive propellants under different pressures

由图 7 可见,压力为 0.1 MPa 下,嵌入直径为 0.2 mm 铁丝推进剂的点火延迟时间为 0.04 s,在 12 s 时推进剂燃烧完全,对中间稳定燃烧阶段进行燃烧速度计算,得到的结果为 2.51 mm/s。增大环境压力至 1.0 MPa 时,推进剂点火延迟无明显差别,但燃烧更加剧烈,燃面退移速度加快,使得铁丝附件丁羟组分温度提升变缓,且当退移速度达到一定程度时,燃面上被加热的推进剂的温度无法继续升高^[24],最终达到稳定的锥形燃面燃烧状态。在 5.4 s 时,推进剂燃烧完全,其燃烧速度为 4.16 mm/s。嵌入不同直径铁丝推进剂的点火延迟时间均集中在 0.04~0.11 s,变化程度不大,表明所用铁丝直径对推进剂的点火延迟影响较小。这主要是因为实验所

用激光束直径为 2 mm,大于实验选用的铁丝直径(0.2~0.6 mm)范围,由于铁丝截面积相对较小,使得激光束不但能完全覆盖铁丝,而且能确保激光能量直接作用于推进剂表面,从而弱化了铁丝直径差异对点火延迟产生的影响。压力为 0.1 MPa 和 1.0 MPa 下,相较于嵌入铁丝直径为 0.2 mm 和 0.6 mm 的推进剂,嵌入铁丝直径为 0.4 mm 的推进剂燃烧得更为剧烈,稳定燃烧时形成的锥形燃面更大,燃烧速度更快。

如图 8 所示,嵌入铁丝直径相同时,推进剂的燃烧速度随压力升高而增大。对于尺寸为 4 mm×4 mm×20 mm 的药条,随着嵌入铁丝直径从 0.2 mm 增加到 0.6 mm,燃烧速度呈现出非单调变化,压力相同时,嵌入铁丝直径为 0.4 mm 推进剂的燃烧速度较高。由于受到高温燃气及铝/含铁氧化物燃烧的影响,铁丝温度升高,但能量积累后向周围推进剂进行热传导的作用区域有限,直径为 0.2 mm 的铁丝不能将较多的能量传递给丁羟组分,因此难以将附近丁羟组分加热到点火温度。与直径为 0.2 mm 铁丝相比,直径为 0.4 mm 铁丝的热传导表面积较大,作用在丁羟组分上的有效面积较大,能够增加燃烧锥面,使得燃烧速度增加。嵌入直径为 0.4 mm 铁丝的推进剂整体能量降低,燃烧过程温度有所下降,对燃烧速度产生负面影响。通过实验可以发现,嵌入 0.4 mm 直径的铁丝对推进剂燃烧具有促进作用,且效果明显优于嵌入 0.2 mm 直径铁丝的推进剂;而 0.6 mm 直径的铁丝表面积/体积比较小,周长较大,传入推进剂的热量被分散到较大体积的推进剂中,且大直径铁丝的嵌入使得推进剂整体能量水平下降,燃烧温度降低,不利于促进推进剂燃烧^[25]。因此,后续选择嵌入铁丝直径为 0.4 mm 的推进剂,进行力学性能及电磁刺激下的燃烧测试实验。

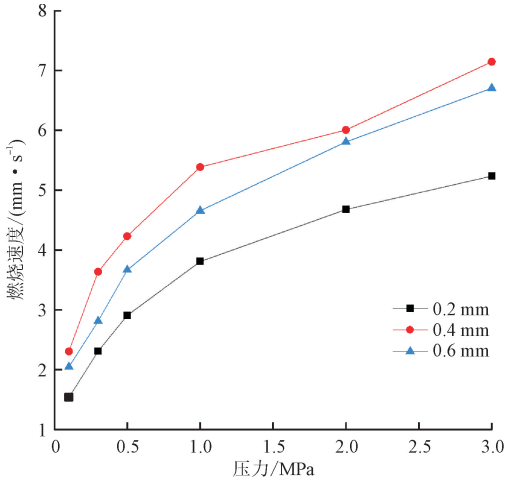


图 8 不同铁丝直径下电磁敏感推进剂燃烧速度随压力的变化
Fig. 8 Variation of burning rate of electromagnetic sensitive propellants with pressure under different iron wire diameters

为验证嵌入铁丝直径为 0.4 mm 推进剂的力学性能,对不含铁丝和含铁丝直径为 0.4 mm 推进剂的哑铃试件,沿铁丝布置方向(试件纵向方向)开展拉伸测试,结果如表 3 所示。可以看出,随着电磁敏感材料(直径为 0.4 mm 铁丝)的嵌入,推进剂纵向的抗拉强度得到一定提升,表明电磁敏感材料与推进剂界面处的粘接强度良好,推进剂在纵向方向的抗拉强度得到增强,有效避免了界面处的脱粘现象。

表 3 嵌入电磁敏感材料对推进剂纵向力学性能的影响
Table 3 Influence of embedded electromagnetic sensitive materials on the longitudinal mechanical properties of propellants

参数	数值	
	不含铁丝 推进剂	含 0.4 mm 直径铁丝 推进剂
最大抗拉强度/MPa	0.683	0.714
最大伸长率/%	72.8	70.1
断裂伸长率/%	86.4	82.9
弹性模量/MPa	4.57	4.75

压力为 0.1 MPa 下,对嵌入铁丝直径为 0.4 mm 的推进剂开展电磁激励下的燃烧实验。首先,为保证铁丝在电磁场激励下加热的均匀性,根据图 4 中电磁场强度和分布的模拟结果,将嵌入铁丝直径为 0.4 mm 的推进剂放置在电磁线圈中心,获得的高速图像如图 9 所示。

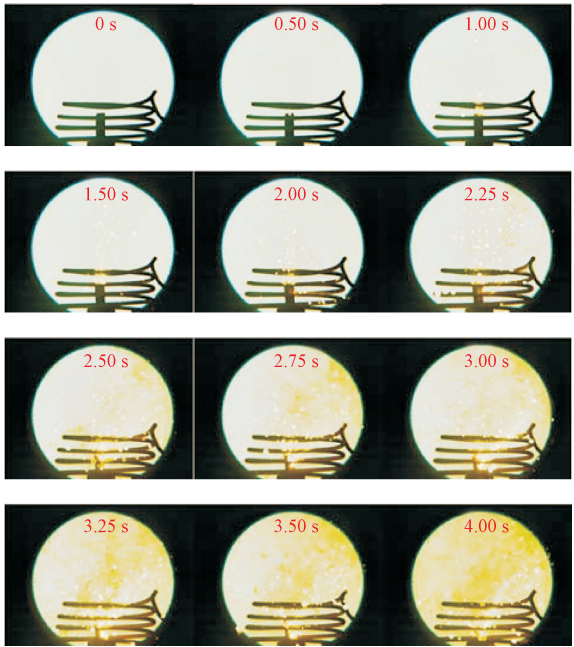


图 9 0.1 MPa 压力下嵌入铁丝直径为 0.4 mm 推进剂燃烧时的高速图像
Fig. 9 High speed image of combustion of 0.4 mm diameter wire propellant embedded at a pressure of 0.1 MPa

由图 9 可见,推进剂在前 2.25 s 经历了加热、热分解、点火和稳定燃烧阶段,稳定燃烧时的燃烧速度为 2.30 mm/s。2.25 s 时,对推进剂进行电磁激励加载,在电磁场作用下,铁丝温度迅速上升,推进剂燃烧速度开始增加,2.5 s 时燃烧程度更加剧烈,增速效果显著,计算可得燃烧速度已提升至 6.10 mm/s,与电磁激励施加前推进剂的稳定燃烧速度相比,增速比为 2.65。

2.4 含铁丝电磁敏感推进剂燃烧调控机制

目前,已有大量针对金属丝增速的相关研究,其原理主要为:在推进剂中嵌入金属丝,利用已燃区高温燃气加热金属丝,金属丝温度升高,并通过热传导方式在未燃推进剂区域形成预热区及热点,促进其燃烧过程,使得燃烧速度增加^[24]。此原理中,金属丝的热量均来自推进剂燃气的热传导,并不能选择性地控制金属丝热分布和动态调控。本文利用电磁场激励与燃烧温度场共同作用的原理,对电磁敏感(含铁丝)推进剂进行燃烧性能调控,主要的工作原理如图 10 所示。

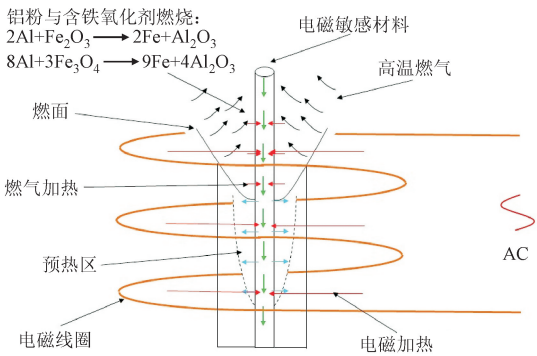


图 10 电磁场激励下电磁敏感推进剂燃烧速度增强原理
Fig. 10 Mechanism of electromagnetic sensitive propellant burning rate enhancement under electromagnetic field excitation

首先,电磁敏感推进剂通过激光点火方式发生着火,已燃区的高温燃气以热传导方式开始加热电磁敏感材料(铁丝),温度升高;与此同时,在已燃区高温环境下,铁丝发生氧化反应生成氧化铁和四氧化三铁,并与推进剂中的铝粉发生燃烧反应,放出热量,并逐渐向未燃推进剂中的电磁敏感材料传热,在未燃区形成预热区,促进推进剂燃烧,最终形成稳定的锥面燃烧。电磁发生器通电后,电磁线圈形成交变磁场,电磁敏感材料(铁丝)在线圈内切割交变磁力线产生交变电流(即涡流),在涡流作用下电磁敏感材料中的载流子相互碰撞、摩擦产生热量,使得铁

丝温度进一步升高,并以热传导的方式向未燃推进剂传热。在高温燃气、铝/含铁氧化物燃烧放热和电磁场共同作用下,电磁敏感推进剂预热区温度更高,热解及燃烧速度更快。由图 4 中电磁线圈磁场的模拟结果可知,中心位置上电磁场强度先增大后减小,因此电磁激励下铁丝升温速率的促进作用也呈现先增大后减小趋势。此外,通过控制电磁线圈的电压、频率、线圈直径、线圈间距、线径等可对电磁敏感材料(铁丝)升温速率进行主动调控,进而实现推进剂燃烧速度的主动调控。

3 结 论

(1)随着嵌入铁丝直径的增加,电磁敏感推进剂样品的固含量增加、理论比冲下降且密度增加;嵌入铁丝直径为 0.4 mm 推进剂的最大抗拉强度为 0.714 MPa,明显优于未嵌铁丝的推进剂。

(2)未嵌入铁丝推进剂的基础燃烧速度为 1.16 mm/s;嵌入直径为 0.2、0.4、0.6 mm 铁丝后,推进剂的燃烧速度均有所增加。这是因为推进剂燃烧时,铁丝被高温燃气加热,温度升高后燃烧生成氧化铁与四氧化三铁,与铝发生反应后放热,由于铁丝热导率高,能够迅速将热量传至未燃推进剂形成预热区,使得燃烧速度加快。其中,嵌入铁丝直径为 0.4 mm 的推进剂燃烧速度增速最大。

(3)电磁激励下,嵌入铁丝直径为 0.4 mm 推进剂的燃烧速度为 6.10 mm/s,相较于无电磁激励下嵌入相同直径铁丝推进剂的燃烧速度(2.3 mm/s),增加了 2.65 倍,相较于未嵌入铁丝推进剂的燃烧速度,增加了 5.26 倍。

后续工作中,将进一步深入研究不同电磁激励强度对含铁丝推进剂的燃烧性能影响。

参考文献:

[1] 吕翔,何国强,刘佩进,等. 固体发动机燃烧流动基础问题与研究建议 [J]. 宇航学报, 2019, 40(10): 1157-1166.
LÜ Xiang, HE Guoqiang, LIU Peijin, et al. Requests and suggests for basic research on SRM combustion and flow [J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(10): 1157-1166.
[2] 田维平,王立武,王伟. 固体火箭发动机技术发展和面临的关键技术问题 [J]. 固体火箭技术, 2021, 44(1): 4-8.
TIAN Weiping, WANG Liwu, WANG Wei. Technological development and key technical problems in solid

- rocket motors [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2021, 44(1): 4-8.
- [3] 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.
HOU Xiao, FU Peng, WU Yuan. Energy management technology of SRM and its development [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(1): 1-6.
- [4] 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): 265-273.
HUANG Xing, GAN Yunhua, 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): 265-273.
- [5] 吴建军, 胡泽君, 何志成, 等. 电控固体推进技术研究进展 [J]. *航空学报*, 2023, 44(15): 53-73.
WU Jianjun, HU Zejun, HE Zhicheng, et al. Research progress of electrically controlled solid propulsion technology [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(15): 53-73.
- [6] 胡松启, 韩进朝, 刘林林. 丁羟推进剂高压燃速及其调控方法研究进展 [J]. *火炸药学报*, 2022, 45(4): 452-465.
HU Songqi, HAN Jinzhao, LIU Linlin. Research progress on high-pressure burning rate and regulation methods of HTPB propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(4): 452-465.
- [7] 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.
- [8] 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.
TANG Jinlan, SONG Huimin, LI Jinxian, et al. Numerical simulation of pintle-controlled nozzle flow field based on dynamic grid [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2014, 37(5): 634-639.
- [9] 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 Xianggeng, 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.
- [10] 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.
WEI Xianggeng, LI Jiang, CHEN Jian, et al. Variable control flow supply angle regulation scheme of vortex valve solid rocket motor thrust modulation [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(11): 2737-2742.
- [11] 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*, 1975, 11(1): 110-111.
- [12] 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.
- [13] 何志成, 夏智勋, 胡建新, 等. 电控固体推进剂制备方法 & 性能研究进展 [J]. *含能材料*, 2020, 28(12): 1190-1199.
HE Zhicheng, XIA Zhixun, HU Jianxin, et al. Review on preparation methods and properties of electrically controlled solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(12): 1190-1199.
- [14] AMROUSSE R, KATSUMI T, AZUMA N, et al. Hydroxylammonium nitrate (HAN)-based green propellant as alternative energy resource for potential hydrazine substitution: from lab scale to pilot plant scale-up [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 176: 334-348.
- [15] YANG Meng, YOH J J, TANG Chenglong, et al. Effect of tungsten size on thermal analysis and mechanism of lithium perchlorate-based electrically controlled solid propellant [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 47: 103135.
- [16] 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.
BAO Lirong, ZHANG Wei, CHEN Yongyi, et al. Thermal decomposition and conductivity characteristics of HAN-based electrically controlled solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(9): 743-748.
- [17] GNANAPRAKASH K, YANG Meng, YOH J J. Thermal decomposition behavior and chemical kinetics of tungsten based electrically controlled solid propellants [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 238: 111752.
- [18] 李洋, 夏智勋, 马立坤, 等. 电控固体推进剂的点火、燃烧及熄灭特性研究进展 [J]. *含能材料*, 2023, 31(9): 931-948.
LI Yang, XIA Zhixun, MA Likun, et al. Research progress on ignition, combustion and extinction characteristics of electrically controlled solid propellant [J]. *Chinese*

- Journal of Energetic Materials, 2023, 31(9): 931-948.
- [19] 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.
- [20] ZHANG Zelin, WEI Zhijun. 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.
- [21] BARKLEY S J, KINDEM D K, ZHU Keke, et al. Microwave control of composite solid propellant flame spread through eddy current heating of wired/foiled propellant [C]//AIAA Scitech 2019 Forum. [S. l.]: [s. n.], 2019: AIAA 2019-1239.
- [22] BARKLEY S J, ZHU Keke, LYNCH J E, et al. Microwave plasma enhancement of multiphase flames: on-demand control of solid propellant burning rate [J]. Combustion and Flame, 2019, 199: 14-23.
- [23] 严密, 彭晓领. 磁学基础与磁性材料 [M]. 2 版. 杭州: 浙江大学出版社, 2019.
- [24] 肖志平, 韩波, 张亮, 等. 嵌银丝端燃装药耦合传热的内弹道数值分析 [J]. 固体火箭技术, 2016, 39(2): 188-193.
- XIAO Zhiping, HAN Bo, ZHANG Liang, et al. Numerical study on the interior ballistics of grain embedded with silver-wire coupled convective heat transfer process [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(2): 188-193.
- [25] 魏然, 鲍福廷, 刘旸. 嵌金属丝推进剂燃烧起始阶段增速特性研究 [J]. 固体火箭技术, 2015, 38(1): 55-60.
- WEI Ran, BAO Futing, LIU Yang. Acceleration effect on initial stage of burning rate of grain with embedded metal wires [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(1): 55-60.

(编辑 李慧敏)