

文章编号:1006-9941(2023)10-1013-13

点火具装药状态对其工作过程能量释放特性的影响规律

田小涛^{1,2},李玉雪¹,肖冰²,王帅中²,马伊凡¹,刘佩进¹,严启龙¹

(1. 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; 2. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了研究火箭发动机传统颗粒型点火具工作过程中点火药与包装纤维素材料的相互作用,及其药型结构对能量释放特性的影响规律,制备了系列点火药/纤维素复合样品,并采用同步热分析(DSC-TG)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)联用仪,研究了纤维素外壳对点火药热反应性能的影响。在此基础上,利用模拟点火腔研究了装药结构、装药量及配方组成对能量释放过程及燃温分布的影响规律。主要通过高速相机和高速红外热像仪获得了不同点火具的火焰结构及火焰温度分布,并与采集的压力数据进行了关联。结果表明:纤维素壳体会降低黑火药和Mg/PTFE点火药的总凝聚相反应放热量,当纤维素含量为33.33%时,2种点火药的总放热量分别降低了66.36%和29.98%,然而B/KNO₃点火药的放热量却提高了2.39倍。气相分解产物和燃烧凝相产物分析表明纤维素并未改变黑火药和Mg/PTFE热反应路径。模拟点火过程研究表明,药型为大圆柱体形装药量10g的黑火药点火具在点火燃烧过程中会发生预点火现象,点火药生成大量气体携带部分未着火颗粒先破壳再实现点火。纤维素壳体起到了一定的增压效应,为初始火焰的建立奠定了压强基础。装药结构和装药量对点火具燃温的影响不显著,燃温的差值不超过50℃。但方形和环形点火药盒的点火具工作时间较短,比小圆柱体形和异形点火药盒的点火具工作时间缩短42.4%左右,有利于提高点火效率。在配方影响方面,Mg/PTFE点火药的燃温最高,工作时间最短;而大粒径黑火药燃温比小粒径高,因此前者工作时间更长。

关键词: 点火药;热相互作用;火焰结构;火焰传播特性

中图分类号: TJ55;V512

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023029

0 引言

点火具能在瞬间提供足够的能量点燃发动机主装药并稳定火焰,对固体火箭发动机初始压强的建立至关重要,是影响固体火箭发动机工作性能的关键因素之一^[1]。因此,对点火装置真实工况下的工作性能开展研究,对固体火箭发动机设计具有重要的指导意义。

点火具最常见的结构为点火药盒(壳体)中装填点火药,在点火药中埋入发火元件。点火药盒在点火过程中,为点火药燃烧提供一定的压强,从而保证点火药完全燃烧同时,在强瞬态的点火过程中,点火药盒能够

有效控制燃气气流,使药剂得以被均匀点燃^[1]。因此,壳体在点火装置中的作用十分重要,很大程度影响了点火药的点火效果及工作状态。研究表明,点火药盒开孔大小会影响火箭发动机点火过程的流场特性^[2]。此外,在点火具的破膜过程中,除推进剂表面压力会急剧上升外,还会产生压强振荡现象^[3]。不同壳体材料的点火具具有不同的特性^[4],使用硝基软片制作壳体材料的点火具加工简单、成本低,但性能不理想;铁丝网壳体材料能够有效提高壳体强度,但铁与胶之间两相界面融合不佳;铝管壳结构的点火具强度较高,对外界电磁干扰具有屏蔽作用。赛璐珞(纤维素)作为最常用的点火药盒材料,其优点为易于冲压成型、成本低、质量轻。此外,赛璐珞作为可燃壳体材料不仅减少了发动机消极质量,而且燃烧后不会形成碎片损坏药柱表面、堵塞喷管。但长期贮存时,赛璐珞会出现氧化现象^[1,5]。

黑火药^[6-8]、镁/聚四氟乙烯^[9-10]、硼/硝酸钾^[11-14]作为常见的点火药,在火箭发动机中得到了广泛的应用。

收稿日期:2023-02-24;修回日期:2023-04-29

网络出版日期:2023-06-19

基金项目:国家自然科学基金(51776176),陕西省重点研发计划(2021ZDLGY11)

作者简介:田小涛(1975-),男,博士生,主要从事固体火箭发动机设计研究工作。e-mail:18991203127@189.cn

通信联系人:严启龙(1983-),男,教授,博导,主要从事含能材料制备及应用研究。e-mail:qilongyan@nwpu.edu.cn

引用本文:田小涛,李玉雪,肖冰,等.点火具装药状态对其工作过程能量释放特性的影响规律[J].含能材料,2023,31(10):1013-1025.

TIAN Xiao-tao, LI Yu-xue, XIAO Bing, et al. Influence of the Charge State of the Igniter on the its Energy Release Characteristics during Its Working Process[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(10):1013-1025.

其中黑火药主要由硝酸钾(氧化剂)、碳(可燃剂)和硫磺(主要起粘合剂作用^[15])组成。黑火药具有良好的储存稳定性,在较低的温度和压力下即可点燃,燃烧速度快,火焰感度好,工艺简单,原料丰富^[16-17]。但黑火药燃烧残渣率大,燃烧产物易腐蚀武器系统、污染环境且吸湿性强,燃气烟雾量大。研究表明,黑火药药柱在低压下的燃速与环境压力呈线性关系,且环境压力低至 20 kPa 时,黑火药药柱会出现瞎火或熄火现象^[18]。黑火药中硫磺受热熔化后能填补碳与硝酸钾界面的间隙,使体系导热性变好,且硫磺会使黑火药机械感度增大^[19]。在镁/聚四氟乙烯(Mg/PTFE)点火药中,聚四氟乙烯作为氧化剂具有热稳定性好、能量高、化学性质稳定等优点^[20];金属镁燃烧具有高热值、高反应活性的特点,与聚四氟乙烯反应可释放出大量热量。Mg/PTFE 在氮气和空气 2 种环境下的反应机理不同,氧气会参与 Mg 的反应且抑制 PTFE 和 Mg 的中间反应^[21]。研究表明,Mg/PTFE 燃烧速率及其敏感性与 Mg 浓度呈负相关关系^[22]。硼/硝酸钾(B/KNO₃)作为一种高能点火药,由氧化剂(KNO₃)、可燃剂(B)和粘合剂组成。硼/硝酸钾具有点火能力强、燃烧热值高、燃烧稳定、钝感、受环境影响小等优点^[23-24]。但目前,硼/硝酸钾作为点火药还存在以下问题:硝酸钾与硼混合不均匀;硼表面易形成氧化层,导致点火药中活性硼含量不高^[25]。B/KNO₃ 具有高温稳定性^[26]。对比不同氧燃比的 B/KNO₃ 激光点火特性,表明具有较低激光点火能量阈值的 B/KNO₃ 配方具有较短的激光点火延迟时间^[27]。烟火剂 Mg/PTFE、B/KNO₃ 与黑火药相比,能量更高,燃速更快,含气量较少不易产生过高压强峰。但烟火剂发火点均比黑火药发火点温度高,且 Mg 和 B 易氧化,贮存稳定性更差,此外,大多数烟火剂都具有较强的吸湿性^[1]。

上述研究主要针对点火药盒和点火药的性能等方面,但尚未有点火具工作过程中点火药与包装赛璐珞(纤维素)材料相互作用及其药型结构对火焰传播特性影响的相关研究报道。为了更好分析点火药在实际工况下的点火反应过程,本研究选用 3 种典型点火药,并以壳体材料为纤维素的点火药盒,按照一定质量比制成样品,从热分解特性以及热解气相产物等方面,研究了黑火药、镁/聚四氟乙烯、硼/硝酸钾点火过程中与纤维素壳体材料的热相互作用。同时,通过点火腔模拟了点火具在发动机中的自由点火过程,研究了点火具装药结构、装药量及配方组成等因素对其工作过程中能量释放特性及燃温分布的影响规律。

1 实验方法

1.1 实验材料

黑火药(HY-2),粒径为 2.8~5.6 mm;黑火药(HY-5),粒径为 0.63~1.18 mm。镁/聚四氟乙烯(Mg/PTFE)、硼/硝酸钾(B/KNO₃)由西安北方庆华机电集团有限公司生产。纤维素壳体的生产厂商为上海赛璐珞板厂。

1.2 装药配方与装药结构

为研究纤维素壳体材料与点火药的热相互作用,按照实际装药中材料的质量比设计并制备了 3 种点火药与纤维素的复合物样品。由于涉及的 2 种黑火药配方粒径不同,因此黑火药只取 HY-2 制备黑火药/纤维素复合物。制备过程如下:研钵中加入酒精研磨点火药,将酒精和点火药混合物进行抽滤后自然风干。研钵中倒入丙酮溶液,加入剪成小块的纤维素不断研磨,待纤维素溶于丙酮后,加入研磨后的点火药不断搅拌(点火药与纤维质量比为 2:1),直至丙酮挥发得到点火药/纤维素复合物,自然风干后得到最终样品。点火药的配方组成、点火药与纤维素复合物的配方与各样品代号如表 1 所示(纤维素缩写为 XWS)。

表 1 所测样品基本配方

Table 1 Formulations of the involved samples

nomenclatures	ingredients and their mass fractions
HY-2	C/S/KNO ₃ =15/10/75
Mg/PTFE	Mg/PTFE/Adhesive=47/47/6
B/KNO ₃	B/KNO ₃ /Adhesive=24/71/5
HY-2/XWS	C/S/KNO ₃ /Cellulose=15/10/75/50
Mg/PTFE/XWS	Mg/PTFE/Adhesive/ Cellulose=47/47/6/50
B/KNO ₃ /XWS	B/KNO ₃ /Adhesive/ Cellulose=24/71/5/50

Note: The proportion of these samples is not turned in to percentages in order to show their connection of corresponding normal igniting pyrotechnics expressly.

此外,研究还模拟构建了火箭发动机自由点火腔室,并在其中对不同装药结构、不同装药量及不同配方组成装药的点火具样品进行了模拟点火实验。点火药盒形状分为大圆柱体形、小圆柱体形、方形、环形和异形 5 种,如图 1 所示。

1.3 测试方法与实验条件

热分析:采用 TG-DSC 同步热分析仪器,在流速为 50 mL·min⁻¹ 的 Ar 气氛下,研究了样品的热分解行为,样品质量 1~2 mg,升温速率 5 °C·min⁻¹,升温范围 50~500 °C(Mg/PTFE 升温范围 50~800 °C)。

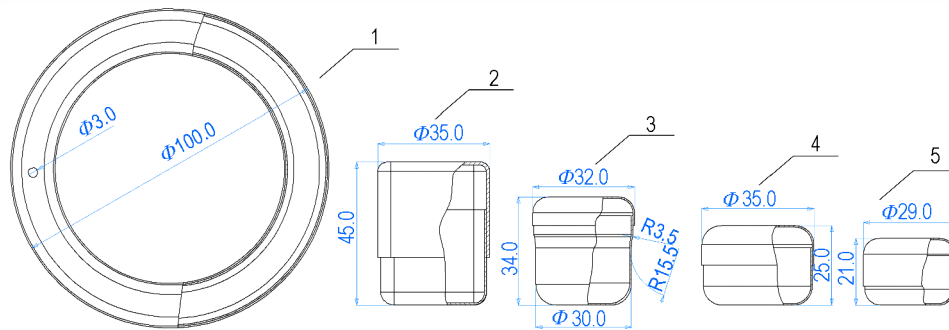


图1 本文所涉及的典型点火药盒形状及其编号

1—环形, 2—方形, 3—异形, 4—大圆柱体形, 5—小圆柱体形

Fig. 1 Typical ignition cartridge shape and number in the article

1—ring, 2—square, 3—irregular, 4—large cylindrical, 5—small cylindrical

同时,热解气体通过一根加热管道传输至 Bruker Tensor II 傅里叶变换红外光谱仪,光谱仪扫描速度 $40 \text{ 张} \cdot \text{秒}^{-1}$,分辨率 0.4 cm^{-1} ,波数范围 $8000 \sim 350 \text{ cm}^{-1}$,设置参数为每次扫描时长 8 s ,扫描间隔 4 s ,即升温速率 $5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下每 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 扫描一次。点火过程与燃温测量:将实验样品用双面胶固定在燃烧室内样品放置处,燃烧室结构如图 2 所示。点火线通过图 2a 燃烧室中的点火线接孔点燃样品。燃烧室开有透明视窗,其中点火药点火过程由高速摄像机(Phantom M340)以 1000 帧/秒 的速度通过普通玻璃视窗记录。同样,通过蓝宝石玻璃视窗采用高速红外热像仪(x6520sc)对火焰温度分布进行测试。

燃烧室压强测量方法:将压力传感器(型号 HS-H-4M,侧压板范围 $0 \sim 10 \text{ MPa}$,采样率 50 kHz)安装在燃烧室上侧开的测压孔上采集压力数据。

凝相燃烧产物分析:采用 X 射线衍射仪(XRD,日本,ULTIMA IV)分析凝相燃烧产物的物相组成,扫描范围为 $5^\circ \sim 80^\circ$,步长为 0.02 fs 。

2 结果与讨论

2.1 配方的热分解特性及热解气相产物分析

为了评价纤维素作用下不同点火药的热反应行为的变化情况,测试了点火药及其纤维素复合物非等温热反应过程。相应的非等温 DSC(Differential Scanning Calorimetry)与 TGA(Thermogravimetry Analysis)曲线如图 3 所示,详细热分析参数见表 2 和表 3。

黑火药的热分解过程主要包含 S、 KNO_3 的转晶和熔化,以及 C、S 与 KNO_3 之间的化学反应^[28]。主要有 4 个吸热过程: $114 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近 S 的转晶过程、 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近 KNO_3 转晶过程、 $270 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $330 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右 S 和 KNO_3 分

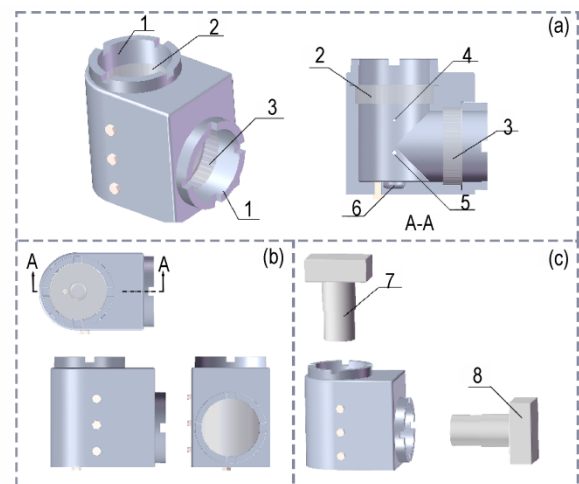


图2 模拟火箭发动机自由点火腔室结构示意图:(a)燃烧室整体结构布局;(b)燃烧室三视图;(c)相机布局

1—封头,2—蓝宝石玻璃视窗,3—普通玻璃视窗,4—点火线接孔,5—测压孔,6—样品放置处,7—红外相机,8—高速相机

Fig. 2 Schematic diagram of the simulated rocket engine ignition chamber: (a) the overall structure of the combustion chamber layout; (b) three views of combustion chamber; (c) two camera layouts

1—seal head, 2—sapphire glass window, 3—ordinary glass window, 4—igniter connection hole, 5—pressure hole, 6—sample placement, 7—infrared camera, 8—high speed camera

别熔化过程。以上 4 个吸热过程均无质量损失。 $403 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近为 C、S 与 KNO_3 的三元复合物的主放热反应过程,该阶段质量损失达到 30% 以上。此外,黑火药另一热分解质量损失发生在 $218.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近,此时 S 与 KNO_3 发生了凝聚相反应。如图 3b 所示, HY-2 在 $133.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $333.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 出现了由于 KNO_3 转晶和熔化导致的吸热峰,但均未观察到 S 的转晶和熔化过程,其主要原因是 S 含量较少,其吸热过程被黑火药的放热所掩盖。此外, HY-2 在 $409.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近的放热峰为 C、S 与

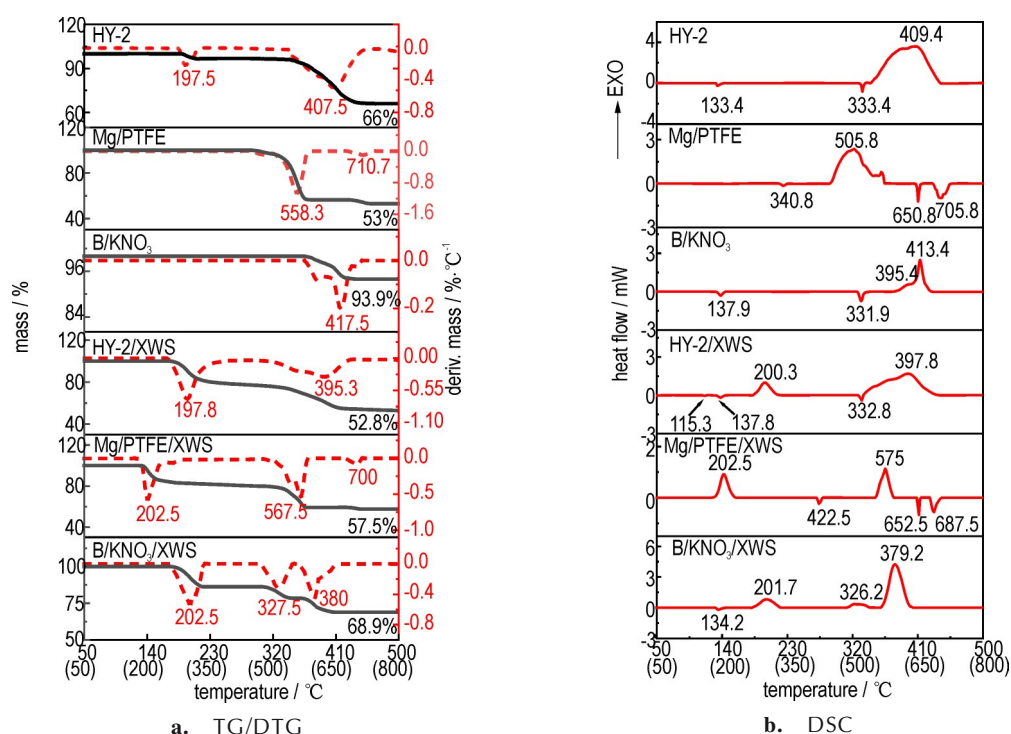


图3 点火药及其纤维素复合物的TG/DTG和DSC曲线(括号中的温度对应于Mg/PTFE和Mg/PTFE/XWS)

Fig.3 DSC and TG/DTG curves of igniting pyrotechnics and its cellulose composites (The temperature in brackets corresponds to Mg/PTFE and Mg/PTFE/XWS)

表2 点火药及其纤维素复合物在加热速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的氩气气氛下的TG/DTG参数

Table 2 TG/DTG parameters of igniting pyrotechnics and the corresponding composites at a heating rate of $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ at Ar atmosphere

samples	TG				DTG	
	T_i / $^{\circ}\text{C}$	T_o / $^{\circ}\text{C}$	T_e / $^{\circ}\text{C}$	ML / $\%$	T_p / $^{\circ}\text{C}$	L_{\max} / $\% \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
HY-2-1 st	190.0	195.3	215.0	3.4	192.5	-0.2
HY-2-2 nd	345.0	345.2	442.5	29.3	407.5	-0.5
Mg/PTFE-1 st	450.8	536.0	578.3	42.1	558.3	-1.0
Mg/PTFE-2 nd	690.7	690.7	725.7	2.8	710.7	-0.1
B/KNO ₃	367.5	369.6	432.5	5.8	417.5	-0.2
HY-2/XWS-1 st	177.8	188.2	220.3	19.3	200.3	-0.7
HY-2/XWS-2 nd	337.8	359.7	420.3	20.2	395.3	-0.3
Mg/PTFE/XWS-1 st	185.0	194.7	235.0	14.3	202.5	-0.6
Mg/PTFE/XWS-2 nd	517.5	555.9	577.5	18.7	567.5	-0.5
Mg/PTFE/XWS-3 rd	672.5	682.8	707.5	1.7	700.0	-0.1
B/KNO ₃ /XWS-1 st	172.5	190.1	222.5	13.8	202.5	-0.5
B/KNO ₃ /XWS-2 nd	307.0	318.6	347.5	7.8	327.5	-0.3
B/KNO ₃ /XWS-3 rd	360.0	371.1	405.0	9.4	380.0	-0.5

Note: T_i , the initial temperature of thermal decomposition. T_o , initial thermal decomposition temperature. T_e , the end temperature for heat change. ML represents mass losses. T_p , the peak temperature of thermal decomposition. L_{\max} , the maximum thermal decomposition rate. 1st, 2nd, 3rd represent the peak temperatures of the first, second and third weight loss peaks, respectively.

KNO₃之间的氧化还原放热反应,其放热量为 $3108\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。该过程的质量变化对应于图3a中 $345\sim 442.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内较宽的失重峰。HY-2在 $190\sim 215\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的失重峰是由于S和KNO₃发生预热反应所致。Mg/PTFE在 340.8 、 650.8 、 $703.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的吸热峰分别为PTFE熔化、Mg吸热熔化和中间产物的分解^[21,29]。其中,中间产物的分解吸热对应于Mg/PTFE在 $690.7\sim 725.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热损失, $450.8\sim 578.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热损失为PTFE与Mg的放热反应,放热量为 $505.8\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。B/KNO₃在 137.9 、 331.9 、 $413.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近分别出现了吸热峰、吸热峰和放热峰,分别表示KNO₃的转晶、熔融^[26,30],以及B和KNO₃的放热反应^[31]。 $359.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处出现了微弱放热峰,为非稳态KNO₃的固相解放热过程。B/KNO₃只有一个质量损失过程,如图3a所示,为B和KNO₃的反应。

3种点火药与纤维素复合后,均在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近出现放热峰,为纤维素的分解放热。由表3计算得,HY-2/XWS和Mg/PTFE/XWS的总放热量分别为 $1045.4\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $810.4\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$,均低于原点火药的总放热量(HY-2和Mg/PTFE的放热量分别为 $3108\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $1157.4\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$),而B/KNO₃/XWS的总放热量为 $1397.4\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$,比B/KNO₃的放热量高出2.39倍。从表2中的DTG参数容易看出,纤维素的加入使得HY-2和Mg/PTFE放热反应时的热

表 3 点火药及其纤维素复合物的热分解 DSC 参数

Table 3 The DSC parameters of igniting pyrotechnics and the corresponding composites under Ar atmosphere

samples	exothermic peak / °C		$T_{p1}-T_i$ / °C	$\Delta H / \text{J}\cdot\text{g}^{-1}$
	T_i	$T_{p1}/T_{p2}/T_{p3}$		
HY-2	344.4	409.4/none/none	65	3108.0
Mg/PTFE	445.7	505.8/none/none	60.1	1157.4
B/ KNO_3	377.3	413.4/none/none	36.1	412.0
HY-2/XWS	180.3	200.3/397.8/none	20	215.2/830.2
Mg/PTFE/XWS	182.5	202.5/575.0/none	27	234.6/575.8
B/ KNO_3 /XWS	179.7	201.7/326.2/379.2	22	263.4/84.0/1050.0

Note: T_i , the initial temperature of thermal decomposition. T_p , the peak temperature of thermal decomposition. T_{p1} , T_{p2} and T_{p3} represent the first, second and third exothermic peak temperature, respectively. ΔH , heat release.

解速率降低,却加速了B/ KNO_3 放热反应的热解速率,且B/ KNO_3 /XWS相比于B/ KNO_3 热解过程多出2个放热峰,因此表现出上述现象。下文将分析纤维素对不同种类点火药热解过程的影响。

如图3b, HY-2/XWS相较于HY-2均多了1个吸热峰和1个放热峰,分别为S的转晶和纤维素的分解。从图3b中可以明显看出, HY-2/XWS的主放热峰(第二个放热峰)紧跟在 KNO_3 的熔化峰之后,而不是在 KNO_3 熔化吸热峰结束后一段温升才开始放热,说明纤维素降低了黑火药的起始反应(C、S和 KNO_3 间的化学反应)温度, HY-2/XWS的峰温前移也说明了这一现象。HY-2/XWS第一阶段的质量损失发生在177.8~220.3 °C, 相较于HY-2同阶段的质量损失在190~215 °C, 黑火药的失重峰增宽。但是由于黑火药/纤维素复合物在该质量损失阶段同时包含了S和 KNO_3 的预反应和纤维素的分解,因此,难以确定该失重阶段2种反应的反应温度和界限,要确定是否因为纤维素的存在降低了黑火药预反应的温度、延长了预反应的时间,还需要更深入的研究。

Mg/PTFE在340.8 °C附近发生PTFE的融化吸热,但在Mg/PTFE/XWS的热解曲线没有出现该吸热峰,是因为该过程被Mg/PTFE/XWS的吸热所掩盖。422.5 °C附近Mg/PTFE/XWS热解曲线出现Mg/PTFE的分解吸热峰,在Mg/PTFE热解曲线中并未出现,这是由于Mg/PTFE的分解温度接近Mg/PTFE的初始反应温度(450.8 °C),被Mg/PTFE的放热反应掩盖。而添加了纤维素的样品,其放热反应起始温度较高(552.5 °C),远离Mg/PTFE的分解温度,因此该过程显现。同时,纤维素也使得Mg/PTFE的放热峰向高温移动:Mg/PTFE的放热峰峰温为505.8 °C, Mg/PTFE/XWS的放热峰峰温为575 °C。

为进一步研究纤维素对不同类型点火药热解过程化学反应路径的影响,对点火药及其纤维素复合物的热分解气相产物进行FTIR表征,其结果如图4。

B/ KNO_3 的热解曲线在331.9 °C表现为吸热峰,而在B/ KNO_3 /XWS热解曲线中表现为放热峰,且该放热峰对应于TG/DTG曲线存在1个失重峰,说明该温度下可能发生了反应。该部分反应可能为 KNO_3 与纤维素热解碳物质的反应。从峰温来看,纤维素同时也使B/ KNO_3 反应放热峰向低温移动(该反应在B/ KNO_3 、B/ KNO_3 /XWS热解曲线中的放热峰峰温分别为413.4, 379.2 °C)。

如图4, HY-2的主要气相产物有 H_2O 、 CO_2 、 NO_2 、 N_2O , Mg/PTFE的气相产物主要包括 H_2O 、 CO_2 、 CF_2 、HF,与文献[28-29]结果较为符合。其中HY-2气相产物中 N_2O 可能为杂质气体,且FTIR图谱中并没有 SO_2 等黑火药热分解主要气相产物的明显峰值,这可能是因为所使用的黑火药样品中S含量较低, SO_2 浓度较低无法被红外检测设备准确记录。HY-2/XWS的气相产物种类与HY-2一致,表明纤维素的加入并未改变黑火药原有的分解路径,同时可以看出复合物图谱中各个峰的强度相比于黑火药均明显增强。纤维素分解时可能会产生 H_2O 、 CO_2 、 NO_2 等气体导致复合物图谱中峰强度增强,同时如果纤维素的加入能提高黑火药的分解速率,同样也会使复合物峰强度增强,要确定什么因素增强峰强度还需更深入的研究。Mg/PTFE/XWS与Mg/PTFE气相产物一致,除 CO_2 外其余气相产物浓度基本一致,可见纤维素在Mg/PTFE热解过程中生成的主要气相产物为 CO_2 。B/ KNO_3 及其纤维素复合物气相产物较少,未被红外检测设备记录。

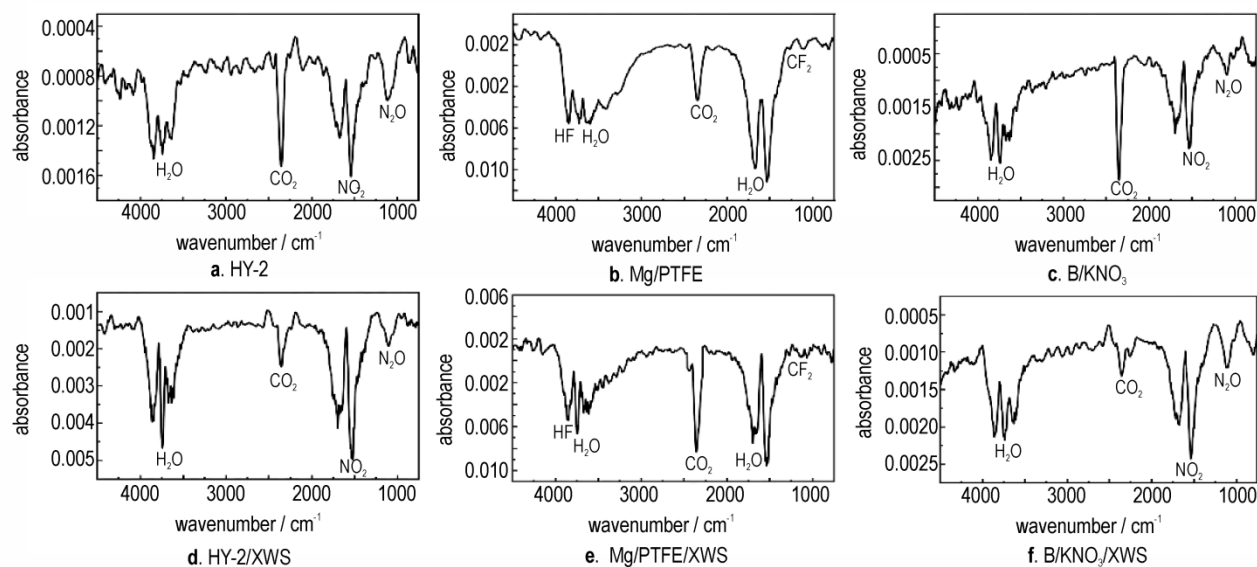


图4 典型火药在纤维素作用下的热分解峰温处气相产物红外吸收光谱图

Fig.4 FTIR spectra of the decomposition gaseous products at peak temperature

2.2 点火燃烧能量释放特性

由上文可知,纤维素通过改变点火药的放热量、热分解速率、反应温度等影响点火药热分解过程。为进一步研究点火具工作过程中纤维素壳体及其药型结构对点火具工作过程的影响,研究还通过模拟点火具在火箭发动机中自由点火的燃烧室对不同装药结构、不同装药量及不同配方组成装药的点火具样品进行了模拟点火实验。其中,不同装药结构模拟点火实验采用HY-5点火药,其装药量为10 g。不同装药量模拟点火实验样品为HY-5,有10,14,18 g和20 g 4种典型装药量,点火药盒为大圆柱体形。针对不同点火药配方模拟点火实验,样品药盒也采用大圆柱体装药,点火药种类有黑火药(HY-2、HY-5)、Mg/PTFE、B/KNO₃,其装药量都为10 g。

2.2.1 火焰结构

采用自制燃烧室对各点火具样品的模拟点火燃烧过程进行研究,如图5~7分别为不同配方组成样品、不同装药结构样品和不同装药量点火具的模拟点火燃烧过程。

图5a~5b为HY-5、HY-2的点火燃烧过程,可见明显的预燃过程。点火具首先局部预燃(图5a为0.6 ms、图5b为0.6 ms处图像),随后主装药被局部点燃后完全点燃,燃烧瞬间生成大团火焰且释放出大量气体,火焰颜色呈现为亮黄色。爆炸瞬间生成大量气体,携带黑火药颗粒从点火药盒溅射到整个燃烧室(如图5a为6.3 ms、图5b为7.5 ms处图像),燃烧剧烈可见明显的黑火药颗粒。纤维素壳体在点火具模拟点火过程中起到了一定的增压效应,为初始火焰的确立奠定了压强

基础。Mg/PTFE和B/KNO₃的点火燃烧过程与黑火药类似,但并未观察到预燃过程。Mg/PTFE点火瞬间主装药先局部点燃,随后完全点燃,火焰颜色为亮黄色。如图5d、B/KNO₃的点火发展过程短暂,几乎在点火瞬间主装药就被全部点燃,同时可以观察到明显的颗粒燃烧。从点火具的工作时间来看,10 g装药量下,对比图5a和5b,可见大粒径黑火药点火具比小粒径黑火药点火具工作时间长,而B/KNO₃点火具的工作最长,Mg/PTFE工作时间最短。

图6为不同装药结构样品的模拟点火燃烧过程,各样品点火燃烧过程都是由局部点燃发展为全面点燃。小圆柱体形、方形、异形药盒样品分别在4.6,0.5,2.3 ms观察到药盒壳体被爆炸瞬间生成的气体冲破,同时也可以看到大量点火药颗粒被带出(点火药盒及点火药颗粒位置在图中标出)。从燃烧剧烈程度上来看,异形药盒样品火焰明亮度最高,异形药盒点火具工作时间最长,与小圆柱体形药盒点火具工作时间接近。同时,方形和环形药盒点火具工作时间较短。图7为不同装药量样品的模拟点火燃烧过程。如图7所示,装药量对点火具工作时间影响不大。装药量分别为10,14,20 g的样品从完全点燃到点火结束的时间分别为126,157,145 ms左右(18 g装药量样品由于未拍摄到点火结束,未作对比)。各样品的点火燃烧及火焰传播过程如表4所示。

2.2.2 能量释放过程实时温度分布

利用高速红外相机获得了火焰温度分布图和火焰特征点的温度变化曲线,图8~9为不同配方组成样品、

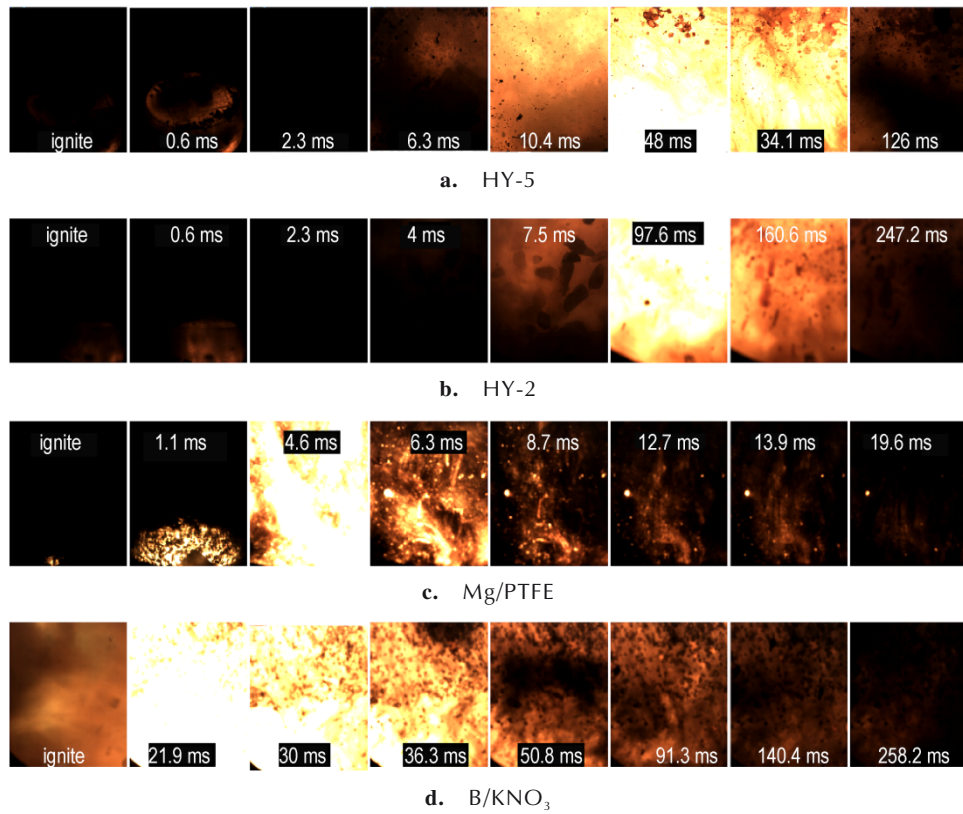


图5 不同配方装药点火具点火与火焰增长过程

Fig.5 Ignition process and flame propagation of igniters with different formula charge

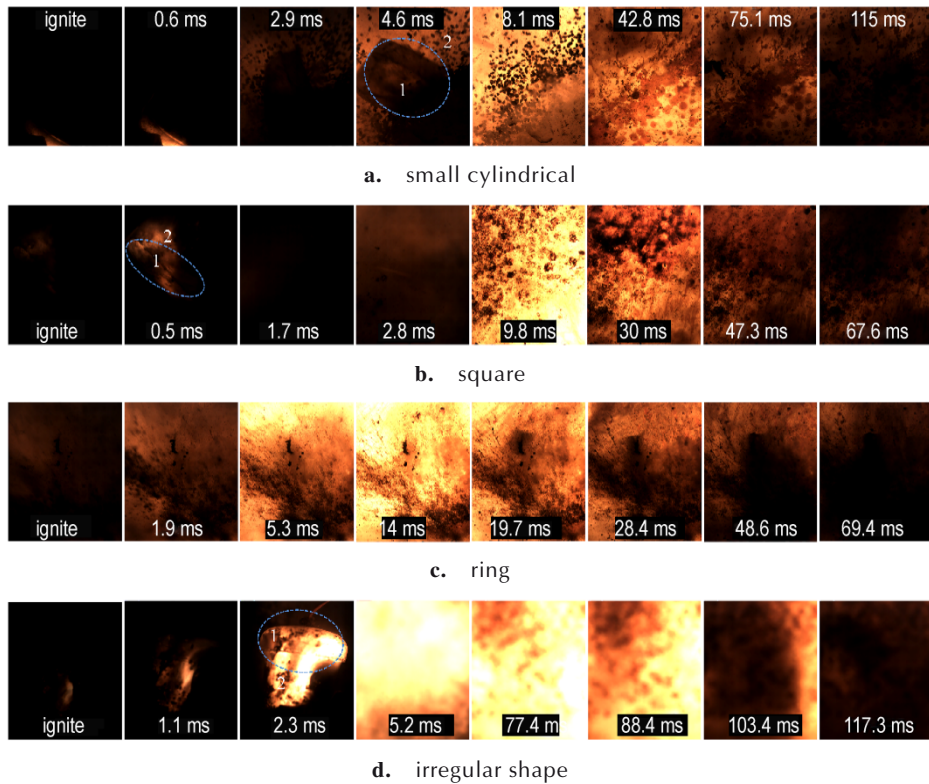


图6 装药结构对点火与火焰增长过程的影响(1—药盒壳体, 2—点火药颗粒)

Fig.6 Effect of charge structure on ignition and flame propagation(1—Shell, 2— Igniting pyrotechnics particles)

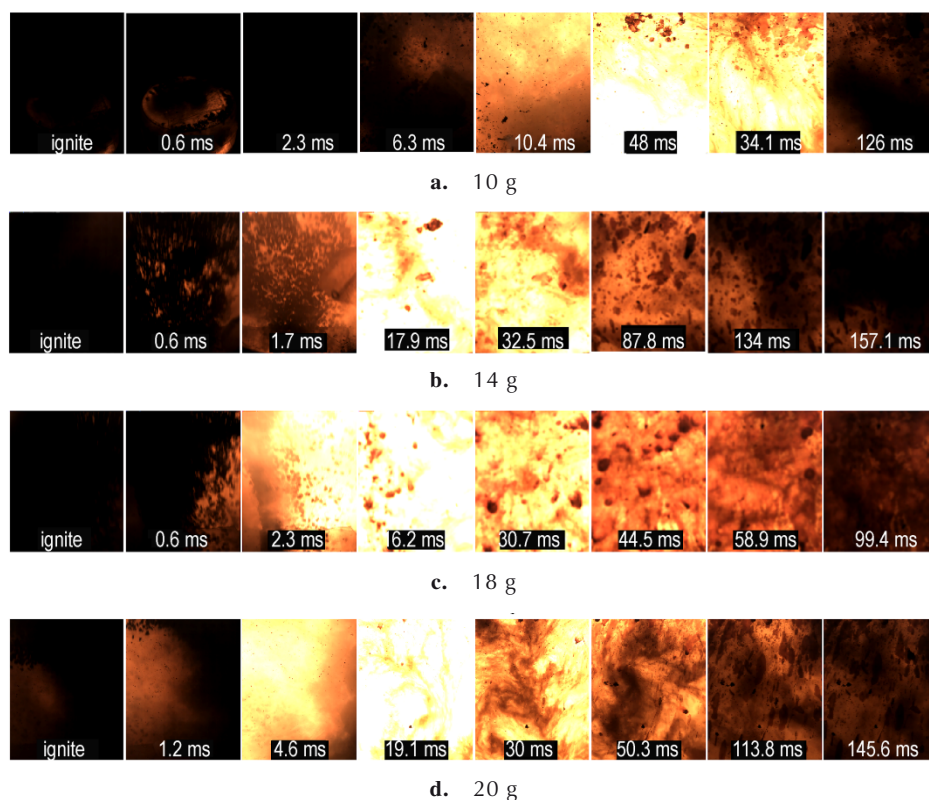


图7 装药量对点火与火焰增长过程的影响

Fig.7 Effect of charge mass on ignition and flame propagation

表4 各样品燃烧节点时间

Table 4 The burning node time of each sample

samples		precombustion / ms	completely ignited / ms	fierce burning / ms	finish burning / ms
different formula charge igniter	HY-5	0.6	6.3	48.0	126.0
	HY-2	0.6	7.5	96.7	247.2
	Mg/PTFE	-	4.6	4.6	19.6
	B/KNO ₃	-	0	21.9	258.2
charge structure	small cylindrical	-	2.9	42.8	115.0
	Square	-	2.8	9.8	67.6
	ring	-	1.9	14.0	69.4
	irregular shape	-	2.3	77.4	117.3
charge mass	10 g	0.6	6.3	48.0	126.0
	14 g	-	0.6	17.9	157.1
	18 g	-	0.6	16.2	-
	20 g	-	1.2	19.1	145.6

不同装药结构样品和不同装药量样品的最高温度对比图和温度变化曲线。如图8,各样品的温度分布规律较为接近,温度分布以点火药盒为中心向外辐射(图8中各图中心为点火药盒位置,因为红外相机拍摄时,点火药盒位于图像中心),温度由低到高,颗粒燃烧明显。燃烧产生大量气体携带装药颗粒喷射而出,中心温度较低是因为中心聚集颗粒较多,颗粒间的相互传热吸

收了部分热量,从而使中心温度低于辐射外缘。

如图9c~9d可知, HY-5点火具最高温为768℃, HY-2点火具最高温为820℃, HY-5的最高温比HY-2低6.8%。由图9c~9d温度变化曲线可知, HY-2点火具点燃后,温度迅速攀升,到达最高温后突然下降,最高温处温度曲线尖锐;而HY-5点火具温度曲线则相对平缓,表明HY-2燃烧更剧烈,释能速率更快更聚

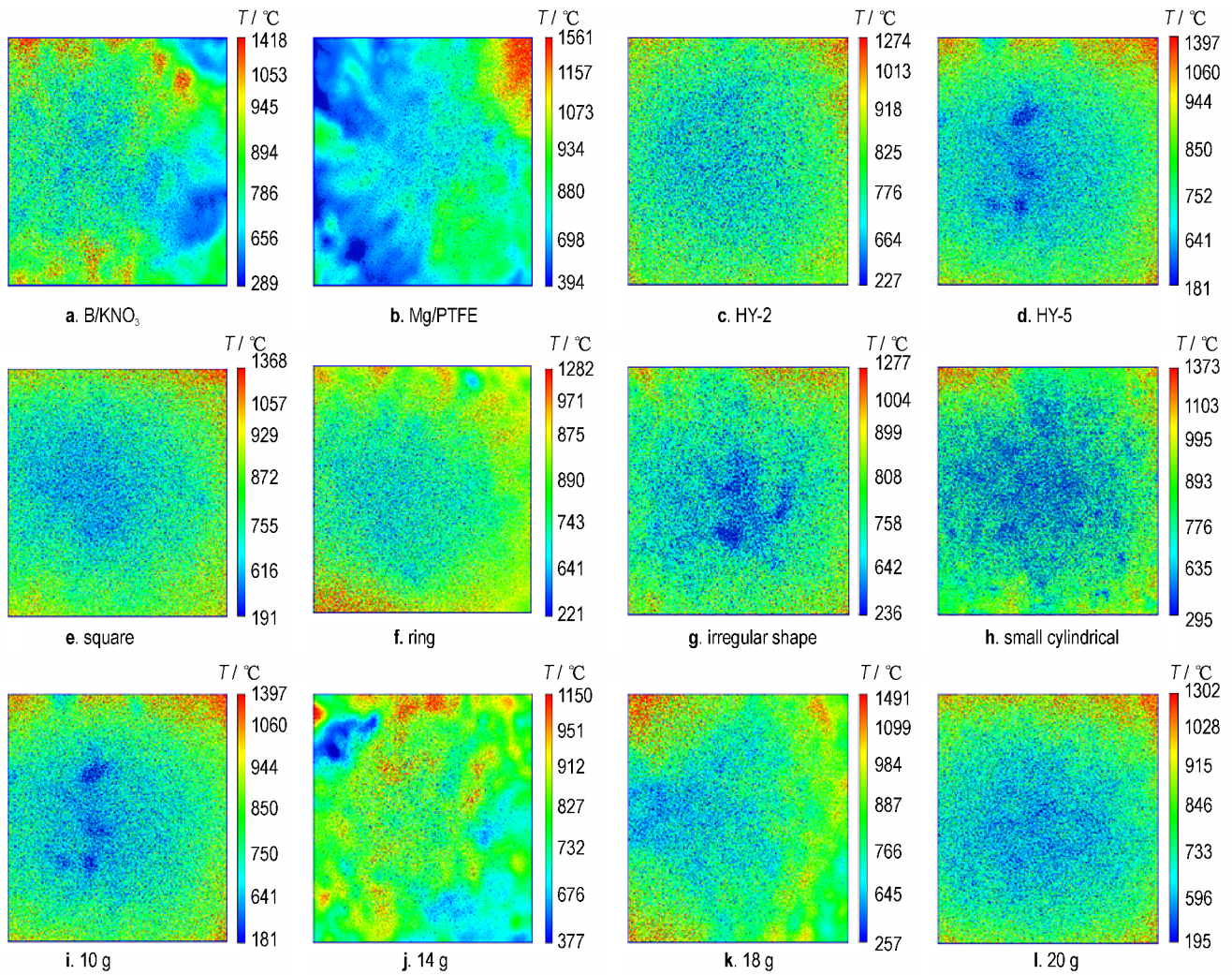


图8 (a~d)不同配方组成样品;(e~h)不同装药结构样品;(i~l)不同装药量样品的最高火焰温度出现时刻的温度分布对比
 Fig. 8 Comparison of the highest flame temperature distribution of each sample

焦,因此燃温也更高。可见粒径较小的黑火药点火具具有较低的燃烧温度。由图9a~9d可知,3种点火药中Mg/PTFE的燃烧温度最高,约为1226℃,同时,到达最高温时其温度变化曲线相对其他点火药更尖锐。根据图9e~9h,装药结构对点火具的燃烧温度影响不显著,环形药盒样品温度最低,为738℃,方形药盒样品温度最高,为788℃,二者温差仅为50℃。

图9为各样品的燃烧室压强和燃烧温度随能量释放过程的变化曲线。分析图9g~9i不同装药量点火具的温度变化曲线(如红色曲线所示),可见装药量对样品的燃烧温度影响不大,4种装药量的样品温度变化曲线趋势基本一致,且最高温无显著差异,温差不超过50℃。此外,实验还记录了样品模拟点火燃烧过程中的压力变化。由压力变化曲线可见,压力变化紧接着温度变化,趋势与温度变化基本一致。不同的是,点火之后,温度曲线和压力曲线均迅速上

升,到达最高点之后,温度快速降低,而压力曲线则迅速下降至略低于最高处压力数值后,维持几乎不变一段时间再快速下降,使得温度与压力变化不同步。这是因为,燃烧室在达到最高温度后,由于装药燃烧完毕,没有新的热量释放,因此燃烧室自然对流散热,温度降低。燃烧过程中不断生成气体,同时燃烧室中的气体不断向外逸散,燃烧室内压力越高,气体向外排处的速度越快。当燃烧过程生成气体的速率高于排气速率,压力升高;当燃烧过程生成气体的速率等于排气速率,压力不变;当燃烧过程生成气体的速率低于排气速率,压力降低。从最高压强来看,对于不同配方(如图9a~9d)和不同装药结构(如图9i~9l)的点火具,B/KNO₃和环形点火药盒更有利于建立高压强点火环境。且随着装药量增加,点火具所建立的最高压强也增加(如图9e~9h)。点火具在点火过程中压强和温度的建立过程对装药燃面的

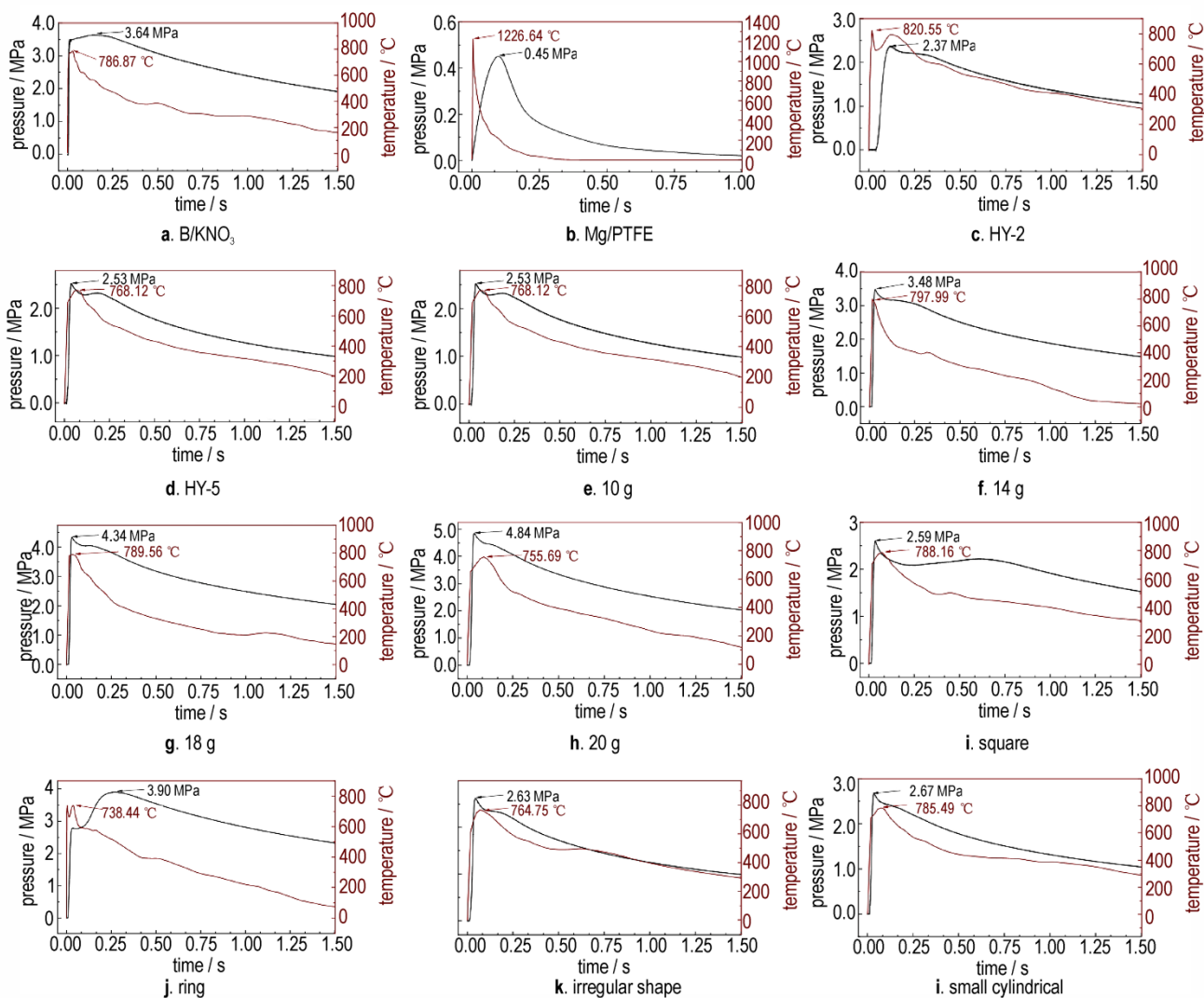


图9 (a~d)不同配方组成样品;(e~h)不同装药量样品;(i~l)不同装药结构样品的燃烧室压强和燃烧温度随能量释放过程的变化

Fig.9 The combustion chamber pressure and combustion temperature of each sample change with the flame propagation process

着火过程至关重要。例如,低温时利用黑火药点燃复合推进剂主装药,容易引起“喘气”燃烧现象^[3];点火具温度、压强要达到点火区域自持燃烧温度阈值,才能使点火域快速升温升压实现固体推进剂初始燃面可靠点火。从点火信号给出指令起到燃烧室初始压强建立,其间所对应的间隔称为点火延迟时间。点火延迟是衡量发动机点火性能的主要指标。若点火延迟时间超过规定值,便认为该发动机点火性能不可靠。而点火具药盒破裂瞬间和发动机被点燃瞬间极大地影响了发动机的点火延迟时间。一般来讲,点火具的燃烧气体温度越高,点火延迟时间越短^[1]。

2.3 凝相产物成分分析

图10为点火药及其纤维素复合物凝相燃烧产物(Combustion Condensed Products, CCPs)的XRD光谱。由图10可知,黑火药CCPs的主要相是KHCO₃和

K₂SO₄,其中前者与报道的K₂CO₃^[28]不同。原因可能是黑火药冷却过程中K₂CO₃与冷凝水蒸气产生了反应。HY-2/XWS的CCPs没有产生黑火药凝相燃烧产物外的新物质,进一步表明了纤维素在燃烧过程中没有改变黑火药的反应路径。同样,Mg/PTFE/XWS的CCPs不含纤维素的燃烧相关产物,表明其完全降解为气体。除未反应的Mg外,MgF₂是Mg/PTFE的主要CCPs^[29]。Mg/PTFE和Mg/PTFE/XWS的凝相燃烧产物中都含有Mg,表明其未能完全燃烧。而Mg/PTFE/XWS的凝相燃烧产物中Mg的特征峰强度相对较低,表明纤维素会增强Mg燃烧。此外,MgO可能是由Mg与纤维素释放的O反应生成。由于B/KNO₃及其纤维素复合材料的CCPs是无定形的,因此,采用XRD仪器难以检测到。这些复合材料更详细的反应途径未来还需要通过量子化学计算和分子动力学模拟进行进一步研究。

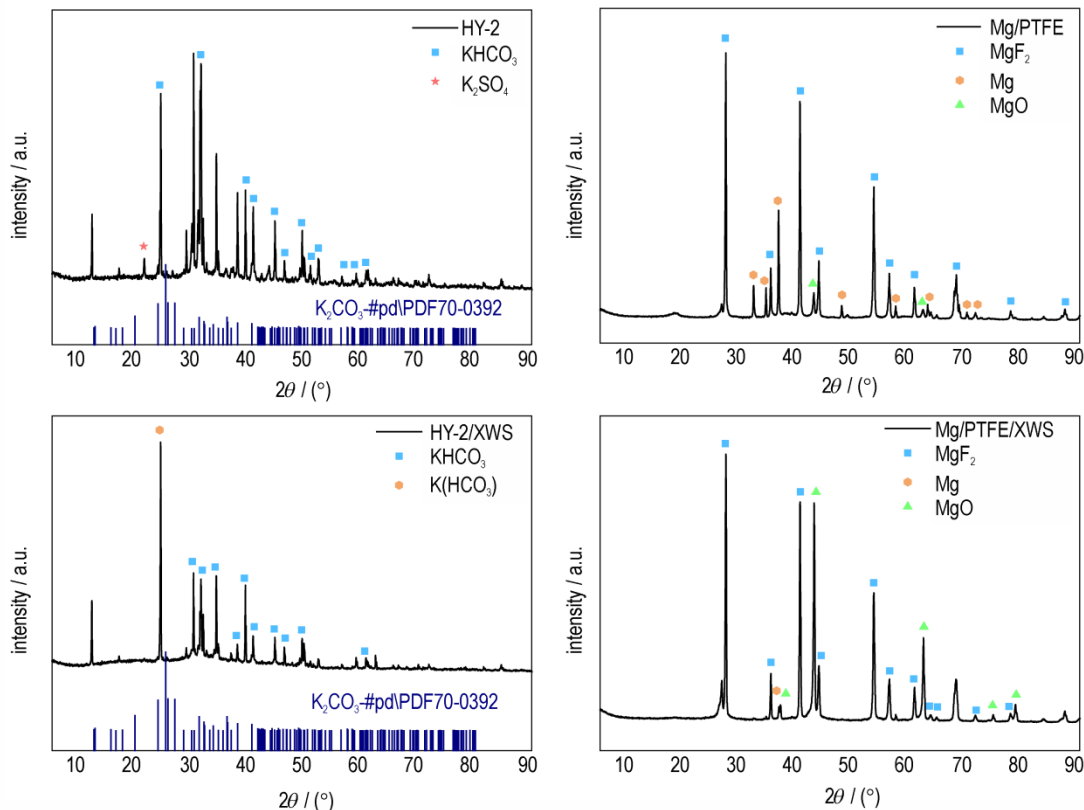


图 10 HY-2、Mg/PTFE 及其纤维素复合物的凝相燃烧产物 XRD 光谱

Fig.10 XRD spectra of combustion products of HY-2、Mg/PTFE and their cellulose composites

3 结论及展望

本研究制备了含 33.3% 纤维素的点火药复合样品以研究纤维素外壳对点火药热反应性能的影响,此外还研究了装药结构、装药量及配方组成对点火药能量释放过程及燃温分布的影响规律。可以得出以下结论:

(1) 纤维素会降低黑火药和 Mg/PTFE 的总放热量,降幅分别为 66.4%,58.5%。然而,纤维素却使 B/KNO₃ 的总放热量提高了 2.39 倍。

(2) 对样品热解气相产物分析表明,纤维素并未改变黑火药和 Mg/PTFE 的分解路径。此外,燃烧凝相产物分析结果显示,模拟点火过程点火药的燃烧产物与点火药原材料燃烧产物一致,进一步说明纤维素在燃烧过程中没有改变点火药的反应路径。

(3) 在配方影响方面,B/KNO₃ 点火药工作最长,Mg/PTFE 点火药工作时间最短。且大粒径黑火药比小粒径黑火药燃温更高,大粒径黑火药点火药具有更短的工作时间。此外,Mg/PTFE 点火药的燃烧温度最高,约为 1226 °C,燃烧最剧烈。

(4) 在装药结构影响方面,方形和环形药盒点火

具工作时间较小圆柱体形和异形点火药盒的点火药工作时间缩短 42% 左右,具有更高的点火效率。此外,装药结构对燃温影响不显著,最大温差仅为 49.7 °C。

(5) 在装药量影响方面,装药量对点火药的工作时间和燃烧火焰温度影响不显著,温差不超过 50 °C。模拟点火过程研究表明,药形为大圆柱体形、装药量 10 g 的黑火药点火药在点火燃烧过程中会发生预点火现象。点火药生成大量气体携带未点燃点火药颗粒破壳再实现点火。

本研究探索了火箭发动机传统颗粒型点火药的工作过程中火药与包装纤维素材料相互作用及其药型结构对能量释放特性的影响规律,但是研究中一些现象机理尚未得到解释。如配方的热分解特性分析部分,黑火药的失重峰增宽的机理仅从热重曲线的变化无法得到解释,需要进行更深入的研究。B/KNO₃ 在热分解曲线中 KNO₃ 可能与纤维素热解碳物质发生了放热反应,但是在热解气相产物和燃烧凝相产物分析中由于相关物质无法被仪器采集,因此这一推测无法得到验证。此外,文章仅对点火药点火过程进行了实验研究,还可以通过数值模拟的方法更深入的认识点火药壳体与点火药在点火过程中的相互作用。

参考文献:

- [1] 鲍福延,侯晓. 固体火箭发动机设计[M]. 中国宇航出版社, 2016.
BAO Fu-yan, HOU Xiao. Solid rocket motor design[M]. China Astronautic Publishing House, 2016.
- [2] 周柏航,王浩,齐治. 点火药盒开孔大小对点火燃气内流场特性影响[J]. 弹道学报, 2021, 33(2): 78-84.
ZHOU Bo-hang, WANG Hao, QI Zhi. Influence of ignition cartridge opening-size on inner flow-field characteristics of ignition Gas[J]. *Journal of Ballistics*, 2021, 33(2): 78-84.
- [3] Tang B S, Chen J, Feng F, et al. Numerical simulation of diaphragm rupture process of igniter in ignition process of solid rocket motor[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013.
- [4] 崔庆忠,冯代英,任慧. 几种火箭弹点火具的对比研究[J]. 火工品, 1998(4): 32-35.
CUI Qing-zhong, FENG Dai-yin, REN Hui. Comparative analysis of several types of igniter for rocket projectile[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1998(4): 32-35.
- [5] 屠小昌. 药盒式可燃点火器的设计和应用[J]. 推进技术, 1997, 18(6): 3.
TU Xiao-chang. The design and application of case-type combustible ignitor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1997, 18(6): 3.
- [6] 成一,陈守文. 点火药点火性能的研究[J]. 火工品, 2001(4): 21-22+31.
CHENG Yi, CHEN Shou-wen. Study on ignition characteristics of ignition compositions[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001, (4): 21-22+31.
- [7] 毕一凡,邓寒玉,廖文和,等. 黑火药在真空环境下点火性能试验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 390-397.
BI Yi-fan, DENG Han-yu, LIAO Wen-he, et al. Experimental investigation on ignition performance of black powder in vacuum [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43 (8) : 390-397.
- [8] 黄阳,朱军,胡灿,等. 气相色谱-质谱法测定黑火药中硫磺[J]. 分析实验室, 2022, 41(8): 930-933.
HUANG Yang, ZHU Jun, HU Can, et al. Determination of sulfur in black powder by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2022, 41(8): 930-933.
- [9] WANG H F, LIU Z W, WANG H, et al. Impact-initiated characteristics of reactive material fragments[C]//International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics, Xi'an, 2007.
- [10] VALLURI S K, SCHOENITZ M, DREIZIN E. Fluorine-containing oxidizers for metal fuels in energetic formulations[J]. *Defence Technology*, 2019, 15(1): 1-22.
- [11] 吴飞春,俞鑫. 多孔药型B-KNO₃点火药在点火发动机中的应用[J]. 火工品, 2015(3): 19-21.
WU Fei-chun, YU Xin. The application of porous B-KNO₃ ignition powder to ignition [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015 (3): 19-21.
- [12] SIVAN J, HAAS Y. Spectroscopic characterization of B/KNO₃ diode-laser induced combustion[J]. *Journal of Physical Chemistry A*, 2013, 117(46): 11808-11814.
- [13] 湛赞,薛太旭,杨立欣,等. B/KNO₃激光感度和点火延迟时间试验研究[J]. 火工品, 2022, 207(4): 7-10.
ZHAN Zan, XUE Tai-xu, YANG Li-xin, et al. Experimental research on laser sensitivity and ignition delay time of B/KNO₃ [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2022, 207(4): 7-10.
- [14] SIVAN J, HASS Y, GRINSTEIN D, et al. Boron particle size effect on B/KNO₃ Ignition by a diode laser[J]. *Combustion & Flame*, 2015, 162(2): 516-527.
- [15] 崔庆忠,焦清介. 二元无硫黑火药研究[J]. 北京理工大学学报, 2004(11): 1012-1015.
CUI Qing-zhong, JIAO Qing-jie. Study on Sulfur-free black powder of two ingredients compositions [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2004(11): 1012-1015.
- [16] 崔庆忠,焦清介. 基于最小自由能原理设计黑火药组成[J]. 含能材料, 2004(4): 214-217.
CUI Qing-zhong, JIAO Qing-jie. Design of the ingredients of black powder based on the least free-energy law [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004(4) : 214-217.
- [17] 程龙,刘攀,杨洪涛,等. 低压环境下高密度压实黑火药柱燃速规律研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(2): 290-295.
CHENG Long, LIU Pan, YANG Hong-tao, et al. Research on burning rate law of high density compacted black powder in low pressure environment [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39 (2): 290-295.
- [18] CHENG L, LIU P, YANG H T, et al. Research on burning rate law of high density compacted black powder in low pressure environment [J]. *Binggongxuebao/Acta Armamentarii*, 2018, 39(2): 290-295.
- [19] YU J Y, CHEN L P, JIANG X B, et al. Thermal kinetics of sulphur-free black powder[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2011.
- [20] 张静元,赵非玉,高旭恒,等. 聚四氟乙烯在烟火药及新型含能材料中的研究[J]. 光电技术应用, 2020, 35(6): 28-31+49.
ZHANG Jing-yuan, ZHAO Fei-yu, GAO Xu-heng, et al. Research on application of polytetrafluoroethylene in pyrotechnics and new energetic materials [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2020, 35(6): 28-31+49.
- [21] LIN C J, WANG H, JIANG S Y, et al. Thermal decomposition of Mg-PTFE based pyrolant in nitrogen and air environments [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 24 (3): 5.
- [22] Kuwahara T, Matsuo S, Shinozaki N. Combustion and sensitivity characteristics of Mg/TF pyrolants [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2010, 22(4): 198-202.
- [23] 余协正,叶迎华,沈瑞琪,等. 微细石英玻璃管中B/KNO₃的燃烧特性[J]. 火工品, 2011(5): 5-8.
YU Xie-zheng, YE Ying-hua, SHEN Rui-qi, et al. Combustion characteristics of B/KNO₃ in microscale quartz tube [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(5): 5-8.
- [24] 叶淑琴,陈红俊,彭素青,等. 储存时间对硼-硝酸钾点火药性能的影响[J]. 火工品, 2018(4): 24-27.
YE Shu-qin, CHEN Hong-jun, PENG Su-qing, et al. Influence of storage time on the properties of boron-potassium nitrate ignition powder [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018(4): 24-27.
- [25] 王飞,姜夏冰,马丽,等. 硼粉界面改性及其在点火药中的性能研究[J]. 火工品, 2022(2): 39-42.
WANG Fei, JIANG Xia-bing, MA Li, et al. Study on Interface Modification of Boron Powder and It's Properties in Ignition Powder [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2022(2): 39-42.
- [26] LI C, YAN N, YE Y, et al. Thermal analysis and stability of boron/potassium nitrate pyrotechnic composition at 180 °C [J]. *ApplSci*, 2019 9(17): 3630.
- [27] 沈瑞琪,叶迎华,胡艳,不同氧/燃比的硼-硝酸钾的激光点火特性[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 338-341.

- SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, HU Yan. Laser ignition performance of boron-potassium nitrate composite at different oxy-fuel ratio [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36 (2): 338-341.
- [28] 任慧, 崔庆忠, 焦清介. 黑火药的热分解过程与反应动力学参数研究[J]. 含能材料, 2007(1): 29-32.
REN Hui, CUI Qing-zhong, JIAO Qing-jie. Thermal decomposition and kinetic parameters of black powder reaction[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007 (1): 29-32.
- [29] 林长津, 王浩, 蒋淑园, 等. DSC法研究镁/聚四氟乙烯和镁/聚四氟乙烯/氟橡胶烟火药在高压条件下的固相热分解性能[J]. 火炸药学报, 2016, 39(2): 32-35.
LIN Chang-jing, WANG Hao, JIANG Shu-yuan, et al. Research on thermal decomposition properties in solid-phase of Mg/PTFE and Mg/PTFE/Viton pyrolants under high pressure with DSC [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(2): 32-35.
- [30] BHINGARKAR V, SINGH H. Influence of cellulosic binders on sensitivity and combustion behaviour of B-KNO₃ ignition system[J]. *Defence Science Journal*, 2006, 56(3): 345-351.
- [31] 李晨阳, 文坤, 安崇伟, 等. 黏结剂对B/KNO₃微笔直写样品成型效果及燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2022, 30(4): 332-340.
LI Cheng-yang, WENG Kun, AN chong-wei, et al. Effect of binder on formability and combustion performance of B/KNO₃ samples by direct ink writing[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(4): 332-340.

Influence of the Charge State of the Igniter on the its Energy Release Characteristics during Its Working Process

TIAN Xiao-tao^{1,2}, LI Yu-xue¹, XIAO Bing², WANG Shuai-zhong², MA Yi-fan¹, LIU Pe-ijin¹, YAN Qi-long¹

(1. *Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermostructure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*;
2. *Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China*)

Abstract: In order to study the interaction between igniting pyrotechnics and packaging cellulose materials during the working process of traditional igniters for rocket engines and the influence of the structure of igniting pyrotechnics on flame propagation characteristics, igniting pyrotechnics/cellulose composite samples were prepared. The effects of cellulose shell on the thermal reaction performance of igniting pyrotechnics were studied by simultaneous thermal analysis (DSC-TG) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). On this basis, the influence of charge structure, charge amount and formula composition on flame propagation process and combustion temperature distribution was studied by using simulated combustion chamber. The flame structure and flame temperature distribution of different igniters were obtained by high-speed camera and high-speed infrared thermal imager, and correlated with the collected pressure data. The results show that the cellulose shell reduces the total heat release of the condensed phase reaction of the black powder and the Mg/PTFE ignition powder. When the cellulose content is 33.33%, the total heat release of the two igniting pyrotechnics is reduced by 66.36% and 29.98%, respectively. However, the heat release of B/KNO₃ increased by 2.39 times. The analysis of gas phase decomposition products and combustion condensed phase products showed that cellulose did not change the thermal reaction path of black powder and Mg/PTFE. The simulation of ignition process shows that the pre-ignition phenomenon will occur in the ignition and combustion process of the black powder igniter with a cylindrical charge of 10 g. The igniting pyrotechnics generates a large amount of gas to carry some unburned particles to break the shell before ignition. The cellulose shell has a certain pressurization effect, which lays a pressure foundation for the establishment of the initial flame. The charge structure and charge quantity have no significant effect on the combustion temperature of the igniter, and the difference of the combustion temperature does not exceed 50 °C. However, the working time of the igniter of the square and annular igniter cartridges is shorter, which is about 42.4% shorter than that of the small cylindrical and shaped igniter cartridges, which is beneficial to improve the ignition efficiency. In terms of formula influence, Mg/PTFE has the highest combustion temperature and the shortest working time, while the combustion temperature of large particle size black powder is higher than that of small particle size, so the former works longer.

Key words: igniting pyrotechnics; thermal interaction; flame structure; flame propagation characteristics

CLC number: TJ55; V512

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023029

Grant support: National Natural Science Foundation of China(No. 51776176), Key R&D Plan of Shaanxi Province(No. 2021ZDLGY11)

(责编: 姜梅)