

文章编号: 1003-1480 (2023) 05-0044-06

嵌银丝法对复合固体推进剂的性能影响研究

沈肖胤, 姜洪伟, 时志权, 沈业炜, 樊荣, 蒋建霞

(上海航天动力技术研究所, 浙江 湖州, 313000)

摘要: 为研究嵌银丝对复合固体推进剂燃烧性能和安全性能的影响, 制备了嵌银丝推进剂方坯, 分别对嵌银丝和未嵌银丝推进剂的静态燃速、热稳定性、机械感度和静电火花感度进行了测试及对比分析。结果表明: 嵌银丝后复合固体推进剂的静态燃速提高近6倍; 动态升温模式下, 嵌银丝后推进剂的初始分解峰温提前约16°C, 峰形更加尖锐、反应剧烈且对温度的敏感程度更高; 绝热模式下, 嵌银丝后推进剂分解的比反应热、最大升温速率分别提高4.6%和12.5%, 且热分解表观活化能降低28.4%; 嵌银丝后推进剂的5s延滞爆发点温度降低13°C, 摩擦感度提高300%, 热感度、机械感度显著提高, 但静电火花感度极大地降低。

关键词: 固体推进剂; 银丝; 燃烧性能; 安全性能

中图分类号: TJ55 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.05.009

Study on the Influence of Inlaid Silver Wire on the Properties of Composite Solid Propellant

SHEN Xiao-yin, JIANG Hong-wei, SHI Zhi-quan, SHEN Ye-wei, FAN Rong, JIANG Jian-xia

(Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Huzhou, 313000)

Abstract: To study the effect of silver filaments on the properties of composite solid propellant, the silver filament-embedded propellant billet was prepared. The static burning rate, thermal stability, mechanical sensitivity and electrostatic spark sensitivity of silver wire embedded and normal propellant were evaluated and compared. Results show that the static burning rate of propellant is increased nearly 6 times after the silver wire is embedded. Under the dynamic heating mode, the initial decomposition peak temperature of the silver filament-embedded propellant is advanced by about 16 °C, the peak shape is more sharp, the reaction is more intense and more sensitive to the temperature. In adiabatic mode, the specific heat of decomposition and maximum temperature rise rate of the propellant is increased by 4.6% and 12.5%, while the apparent activation energy of thermal decomposition is decreased by 28.4%. After inlaying silver wire, the 5s delay explosion point temperature of propellant is decreased by 13 °C, the friction sensitivity is increased by 300%, thermal sensitivity and mechanical sensitivity increase significantly, while the electrostatic spark sensitivity is lowered greatly.

Key words: Solid propellant; Silver wire; Combustion performance; Safety performance

固体推进剂作为动力源广泛应用于火箭、导弹等发动机, 是一种含能复合材料。由于火箭燃气发生器内压强较低, 固体推进剂通常在贫氧状态下燃烧, 燃速偏低, 不易满足使用要求。为提高燃速, 通常采用嵌银丝的方法。银丝具有良好的导热性, 高温燃气热量沿银丝方向快速传递, 使其周围的推进剂迅速加

热, 形成银丝加热区, 当推进剂被加热到燃烧的临界温度时, 立刻被点燃^[1-2]。嵌银丝药柱的装药形式大幅提高了端面燃烧药柱的燃速, 既可有效满足导弹总体的长时间、大推力性能要求, 又能弥补推进剂燃速调节范围有限的缺陷。因此, 国内外学者对嵌金属丝端燃装药开展了深入的研究, 主要集中于金属丝的材

收稿日期: 2022-08-24

作者简介: 沈肖胤 (1986-), 男, 高级工程师, 从事复合固体推进剂配方与装药设计。

质、直径以及装药的性质、间隙等对嵌金属丝端燃药柱燃速的影响；嵌金属丝端燃装药的增速比；嵌银丝端燃装药耦合传热的内弹道数值分析；药柱银丝位置识别技术等方面^[3-10]，而在嵌银丝对推进剂热动力特性、安全特性等方面的影响研究较少。

本文以嵌银丝与未嵌银丝推进剂为研究对象，采用靶线法静态燃速测试仪、热重-差热量热仪、绝热量热仪、5s 延滞爆发点测试仪、撞击感度仪、摩擦感度仪、静电感度仪等对试样的静态燃速、热分解温度、放热量、活化能、绝热温升、温升速率、压升速率、 TD_{24} 、5s 延滞爆发点温度、摩擦感度、静电感度等参数进行了对比分析，为嵌银丝端燃装药推进剂的安全生产、使用、贮存等提供数据支撑。

1 实验

1.1 主要材料

推进剂方坯为上海航天动力技术研究所生产，配方为：高氯酸铵（AP），58%；铝粉，16%；丁羟胶（HTPB），10%；其他组分，16%。方坯由嵌银丝部分和未嵌银丝部分组成（两部分配方完全一致），根据试验制样需求，分别取方坯不同部位制样并进行对比试验。

1.2 燃速测试

参照 GJB 770B-2005 方法 706.1 燃速 靶线法对嵌银丝与未嵌银丝推进剂进行燃速测试。

1.3 热分解性能测试

采用热重-差热量热仪，以 5, 10, 15, 20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 共 4 个升温速率，在敞口铝制坩埚中对嵌银丝与未嵌银丝推进剂进行动态热分解试验；采用 NETZSCH MMC274 绝热加速量热仪对嵌银丝与未嵌银丝推进剂进行绝热分解试验。

1.4 5s 延滞爆发点测试

参照 GJB 770B-2005 方法 606.1 爆发点 5s 延滞期法对嵌银丝与未嵌银丝推进剂进行 5s 爆发点测试。

1.5 机械感度测试

参照 GJB 772A-97 方法 601.1 撞击感度-爆炸概率

法、方法 602.1 摩擦感度-爆炸概率法对嵌银丝与未嵌银丝推进剂的机械感度进行测试（方法 601.1 测试条件：落锤质量 10 kg，落高 25 cm；方法 601.2 测试条件：测试压强 2.45 MPa，摆角 66° ）。

1.6 静电火花感度测试

参照 GJB 736.11A-2019 火工品试验方法第 11 部分：火工品静电感度试验对嵌银丝与未嵌银丝推进剂进行静电火花感度测试，测试电容 0.1 μF 。

2 结果与讨论

2.1 嵌银丝对复合固体推进剂静态燃速的影响

分别选用嵌入银丝前后的同配方复合固体推进剂作为研究对象，采用靶线法静态燃速测试其燃速并进行对比，结果见表 1。嵌银丝与未嵌银丝推进剂燃速与测试压强的关系曲线见图 1。

表 1 嵌银丝与未嵌银丝推进剂的静态燃速
Tab.1 Static burning rate of sliver wire embedded propellant and normal propellant

测试压力 /MPa	静态燃速 / ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	未嵌银丝推进剂	嵌银丝推进剂
3	10.8	75.5
4	12.2	82.7
7	13.6	92.2
9	14.3	97.8
12	15.0	106.3
压强指数	0.228	0.236

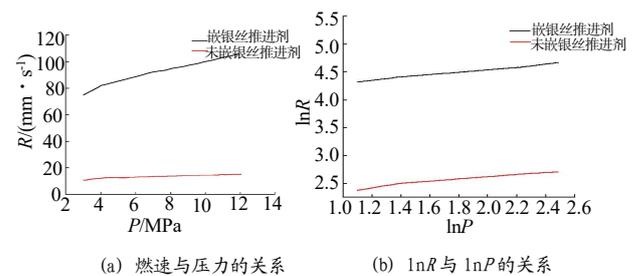


图 1 嵌银丝与未嵌银丝推进剂燃速与测试压强关系曲线
Fig.1 Curves of burning rate and test pressure of sliver wire embedded propellant and normal propellant

由表 1 静态燃速测试结果可知，嵌银丝可显著提高固体推进剂的燃烧速率，提高约 6 倍。同时由图 1 (a) 所示，嵌银丝推进剂与未嵌银丝推进剂的静态燃烧速率差异和压强大小直接相关，压强越大，两者的差异越大；将静态燃烧速率和压强值取对数后作图，由图 1 (b) 可见，两者的斜率基本一致，即在推

进剂内部嵌入银丝后,可显著提高推进剂的静态燃烧速率,但对推进剂燃速压强指数无显著影响。

2.2 嵌银丝对复合固体推进剂热分解(动态升温)特性的影响

采用TG/DTA,在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率下考察嵌银丝对复合固体推进剂热分解性能的影响,结果见图2~3。同时根据图2分别对放热量进行积分计算,结果见表2。

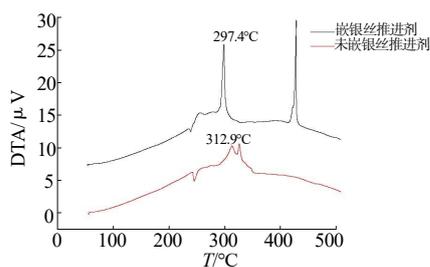


图2 嵌银丝与未嵌银丝推进剂动态升温下的DTA曲线
Fig.2 DTA curves of silver wire embedded propellant and normal propellant

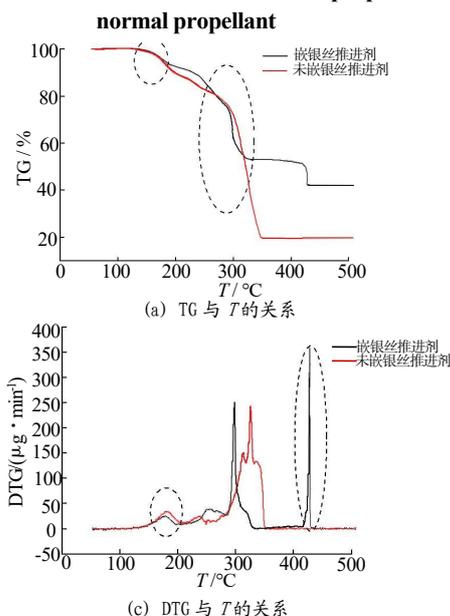


图3 嵌银丝与未嵌银丝推进剂失重(率)与温度的关系曲线
Fig.3 TG and DTG curves of silver wire embedded propellant and normal propellant

表2 嵌银丝与未嵌银丝推进剂动态升温模式下的放热量
Tab.2 Heat release of silver wire embedded propellant and normal propellant under dynamic heating mode

样品	比放热量/($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)
嵌银丝推进剂	99.2
未嵌银丝推进剂	80.2

由图2、表2可见,嵌银丝对推进剂的热分解影响较大;与未嵌银丝推进剂相比,嵌入银丝推进剂的初始分解峰提前约 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,且峰形尖锐,热分解更剧烈,放热在更短的时间内完成;银丝对推进剂的影响

不仅在低温分解段,对高温分解段的影响同样明显,未嵌银丝推进剂分解的2个分解峰有重合的趋势,且放热缓慢,而嵌银丝后推进剂的高低分解峰明显分离,两者温差近 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$,且出现了明显的爆燃现象。在总的放热量方面,嵌银丝后推进剂的比放热量提高23.7%。

由图3可见,在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前,两者推进剂的失重率和失重速率基本一致,该阶段失重主要为推进剂内的一些小分子物质;嵌银丝推进剂中AP的初始失重温度更低,失重速率更快,热分解反应提前且更加剧烈,同时嵌银丝推进剂的热失重具有明显的2个步骤,且高温段的失重速率要远大于低温段,即高温段的分解反应较低温段更加剧烈;而未嵌银丝推进剂热失重主要集中于 $280\sim 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,分解相对缓慢且低、高温分解有重合趋势。不同升温速率下2种推进剂热分解峰温见表3。

表3 嵌银丝与未嵌银丝推进剂的热分解峰温

Tab.3 Peak temperature of thermal decomposition of silver wire embedded propellant and normal propellant

温升速率 β ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)	第1分解峰/ $^{\circ}\text{C}$		第2分解峰/ $^{\circ}\text{C}$	
	嵌银丝 推进剂	未嵌银丝 推进剂	嵌银丝 推进剂	未嵌银丝 推进剂
5	291.3	299.8	414.4	310.7
10	297.9	312.8	425.5	325.6
15	304.3	319.7	423.6	337.1
20	309.0	324.1	442.3	337.9

将表3中4种不同升温速率下的热分解峰温(第1分解峰)与升温速率作图,见图4。由图4可见,嵌银丝推进剂试样 $\lg\beta$ — T_{p1} 的斜率更高,即试样对升温速率的敏感程度增加。

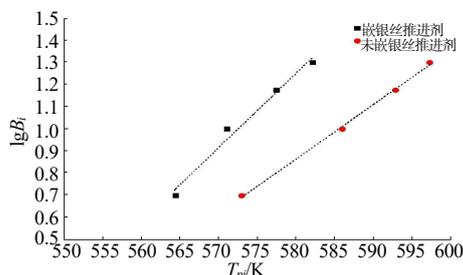


图4 热分解峰温与升温速率关系曲线

Fig.4 Relation curve between peak temperature and heating rate of thermal decomposition

分析认为,在升温速率较慢的情况下,外界作用于试样的热辐射能量较低,推进剂试样内部有较长的时间进行热传递及扩散,此时,银丝起到的导热作用较弱,故在升温速率较低的情况下,银丝推进剂和未

嵌银丝推进剂的低温分解峰差异相对较小；而当升温速率增加时，由于推进剂的导热性能较弱，无法在较短的时间内将外界的热辐射传递至试样内部，导致试样内部的温度滞后于外界温度；而由于银丝优异的导热性能，能在短时间内将外界热源传递至试样并进行热传递，故升温速率越快，银丝的作用越明显，两者的初始热分解温度差异越大。

2.3 嵌银丝对复合固体推进剂热分解（绝热升温）特性的影响

在 H-W-S(加热-等待-探测)的绝热模式下进行嵌银丝与未嵌银丝推进剂的热分解特性研究，设定程序升温速率、温度跨度、等待时间等参数。试样首先在初始设定温度处恒温等待，仪器实时检测试样温度与压强变化，待等待设定的时间后，如没有探测到试样温度和压强的变化，仪器将按升温速率升高 5°C，然后继续等待，重复按阶梯式运行，直至试样在某温度恒温区域内发生温度或压强的变化；测试过程中样品和炉膛不进行热交换，保证样品处于绝热条件下进行，测试获得起始放热温度、反应绝热温升、反应放热量、温升速率、压升速率等重要热力学参数，测试结果见图 5。

由图 5 可见，推进剂试样在测试过程中，存在明显的温度、压强与温升率陡升阶段，由于在 ARC 测试过程中，初期反应时试样缓慢反应放热并进行热积累，当热积累到达燃烧或爆炸界限，试样发生激烈的反应，产生温度、压强与温升率的陡升；而在热积累过程中，热量一部分用于积累，一部分被样品池吸收，因此，需要对相关参数进行校正。如果将试样系统（包括试样+样品池）视为绝热状态，则：

$$M_s c_{ps} \Delta T_s = (M_s c_{ps} + M_b c_{pb}) \Delta T \quad (1)$$

式(1)中： M_s 为试样质量； c_{ps} 为试样平均比热容； ΔT_s 为仅试样时绝热温升； M_b 为样品球质量； c_{pb} 为样品池平均比热容； ΔT 为实测绝热温升。

$$\Delta T_s = \left(1 + \frac{M_b c_{pb}}{M_s c_{ps}}\right) \Delta T \quad (2)$$

令 $1 + \frac{M_b c_{pb}}{M_s c_{ps}} = \varphi$ ， φ 为热惰性修正因子，即修正

系数；修正后，测试结果结果见表 4。

由表 4 可知，在绝热条件下，嵌入银丝后推进剂的最大压升速率 m_{pm} 、最大温升速率 m_{Tm} 、比反应热 Q 分别提高 22.9%、12.5%和 4.6%，热分解表观活化能 E_a 降低 28.4%， TD_{24} 降低 2.3 °C。

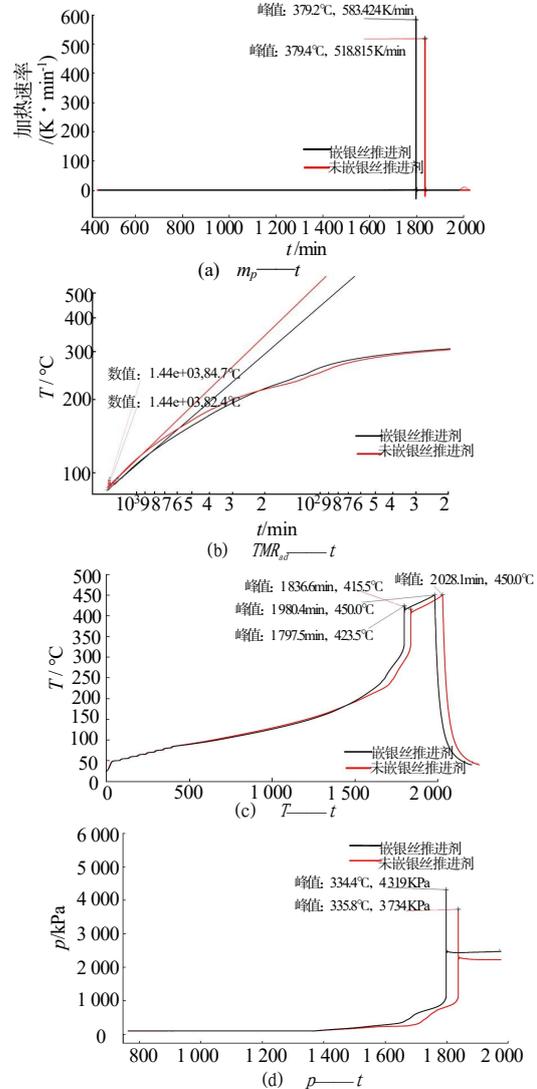


图5 绝热条件下嵌银丝与未嵌银丝推进剂热分解对比
Fig.5 Comparison of thermal decomposition under adiabatic conditions

表4 嵌银丝与未嵌银丝推进剂绝热分解特性参数（校正后）

Tab.4 Adiabatic decomposition characteristic data of sliver wire embedded propellant and normal propellant

样品	ϕ	$m_{pm} \times 10^6 / (\text{Pa} \cdot \text{min}^2)$	$m_{Tm} / (^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1})$	$\log A / \text{s}^{-1}$	$E_a / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$Q / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$TD_{24} / ^\circ\text{C}$
嵌银丝推进剂	28.43	102	583.42	8.915	134.62	15 460.21	82.4
未嵌银丝推进剂	31.34	83	518.82	13.629	188.11	14 779.13	84.7

注： ϕ 为热惰性因子； m_{pm} 为最大压升速率； m_{Tm} 为最大温升速率； A 为指前因子； E_a 为分解活化能； Q 为比反应热； TD_{24} 为达到最大反应速率为24h时的初始分解温度。

上述各结果均表明，绝热条件下嵌银丝推进剂较未嵌银丝推进剂更易发生分解反应，且反应速率更快、释放热量更高。分析认为：在绝热环境下，对推进剂的刺激热源变成了自反应后的热积累，依靠自反应的热积累到达分解临界温度后发生反应，在该测试环境下，热源并未均匀分布在推进剂内部，大部分热量聚集在局部区域内，产生了多个“热点”。由于“热点”的温度相对较高，通过热辐射影响到附近，并进一步发生反应，如果热点足够多且覆盖范围足够大，在“热点”处可形成强烈反应，进而引起部分甚至全部推进剂发生爆炸；银丝的存在可以将“热点”处产生的热量迅速传达至附近区域，缩短热辐射的时间，诱发更多的“热点”产生，导致热稳定性变差。

2.4 嵌银丝对复合固体推进剂5s延滞爆点温度的影响

为模拟外界高温热源突然刺激下嵌银丝推进剂的热安全性能，开展了5s延滞爆点测试工作。测试结果见表5、图6。

表5 嵌银丝与未嵌银丝推进剂5s延滞爆点温度

Tab.5 5s delay explosion point temperature of sliver wire embedded propellant and normal propellant

样品	5s延滞爆点温度 / °C
嵌银丝推进剂	379
未嵌银丝推进剂	392

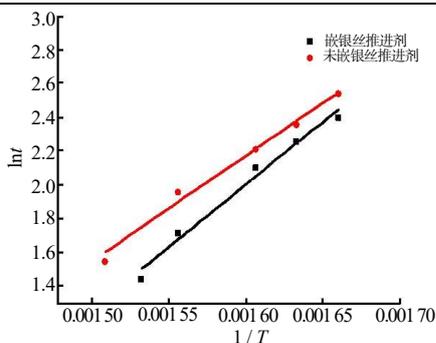


图6 嵌银丝前后推进剂爆发时间与环境温度相关性

Fig.6 Relationship between explosion time and ambient temperature of sliver wire embedded propellant and normal propellant

对一定重量的试样在某一特定温度下进行加热，试样经过加热后分解，发生燃烧、爆炸现象，记录试样加热到产生爆炸所需要的时间，即延滞期，根据计算公式，推算求出试样5s延滞爆点的温度。爆发延滞期 t (s)与爆发温度 T (K)的关系如式(3)，对式(3)对数处理，即式(4)：

$$t = \frac{CE}{RT} \quad (3)$$

$$\ln t = \frac{E}{RT} + \ln C \quad (4)$$

式(3)~(4)中： t 为爆炸延滞期，s； C 为常数； E 为活化能， $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ； R 为气体常数，取 $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ； T 为爆炸温度，K。

由表5可知，嵌银丝推进剂5s延滞爆点温度较未嵌银丝推进剂提前了 $13\text{ }^\circ\text{C}$ ，说明在外界高温热源刺激下，嵌银丝推进剂更易发生分解、燃烧甚至爆炸，测试结果与2.2节讨论结果吻合。分析认为：银丝具备优异的导热性能，在外界高温热源的刺激下，银丝加快了热源在推进剂内的传导速率，使推进剂内部温度迅速升高，在更短的时间内达到热分解温度；而未嵌银丝推进剂相对导热较慢，热传导周期更久，因此，在外界高温热源刺激下，嵌银丝推进剂较未嵌银丝推进剂更加敏感。

2.5 嵌银丝对复合固体推进剂机械感度的影响

对嵌银丝与未嵌银丝推进剂的撞击感度、摩擦感度进行测试，结果见表6。

表6 嵌银丝与未嵌银丝推进剂的机械感度

Tab.6 Mechanical sensitivity of sliver wire embedded propellant and normal propellant

样品	撞击感度 / %	摩擦感度 / %
嵌银丝推进剂	20	48
未嵌银丝推进剂	20	12

由表6结果可知，嵌入银丝后，推进剂的撞击感度未变而摩擦感度增大300%，推进剂对摩擦刺激的敏感程度显著提高。

根据热点机理可知，当固体或液体含能材料受到诸如撞击或者摩擦时，机械能首先被转变为热能，然而，所产生的这些热能并不是均匀分布在炸药中，大部分热量聚集在炸药的局部区域，产生了“热点”。由于“热点”的温度相对较高，所以，炸药分子在其周围发生了分解反应，分解反应所放出的热量又进一步促使反应继续进行。如果热点足够多且覆盖的范围足够大，在“热点”处形成的强烈反应将引起部分或全部炸药的爆炸。摩擦作用形成热点的主要原因是试样颗粒表面凸起或棱角间的摩擦，以及颗粒之间或与器壁之间的摩擦生热。摩擦产生热点条件见式(5)：

$$T - T_0 = \left(\frac{\mu W v}{4aJ} \right) \times \left(\frac{1}{K_1 + K_2} \right) \quad (5)$$

式(5)中： T_0 为试样起始温度； T 为摩擦后的温度； μ 为摩擦因数； W 为作用在摩擦表面的荷重； v 为滑动速度； a 为接触面半径； J 为热功当量； K_1 、 K_2 为摩擦物体的导热率。

由于测试条件一致， W 、 v 、 a 、 J 均一致，尽管推进剂内嵌入了银丝，增加了试样整体的导热率，但由于 K_1 （试样） $< K_2$ （滑柱），故假设认为 K_1+K_2 整体未变。一方面，在推进剂内添加银丝等同于在推进剂内增加了金属颗粒物，大大增加了试样的摩擦因数 μ ，导致在同等试验条件下，试样将产生更大的摩擦力，进而转化成热能，导致 ΔT 增加，使试样产生更多的热点；另一方面，由2.2节试验结果可知，在外界突然热源刺激下，含有银丝推进剂的热分解温度要低于未嵌银丝推进剂，更易发生热分解反应；两者共同作用大大增加了试样发生剧烈反应的概率，导致摩擦感度增大。

2.6 嵌银丝对复合固体推进剂静电感度的影响

针对嵌入银丝对复合固体推进剂静电感度的影响开展了静电火花感度测试，结果见表7。

表7 嵌银丝与未嵌银丝推进剂的静电火花感度

Tab.7 Electrostatic spark sensitivity of sliver wire embedded propellant and normal propellant

样品	E_{50}/J
嵌银丝推进剂	-
未嵌银丝推进剂	0.148

由表7测试结果可知，未嵌银丝推进剂静电火花感度 E_{50} 为0.148 J，而嵌银丝推进剂在仪器测试范围内均无发火现象；分析认为：银丝不仅具有优异的导热性能，还兼具优良的导电性能，放电瞬间电容中的电荷通过银丝导走，无法击穿空气发生静电发火现象，极大降低了推进剂的静电火花感度。

3 结论

(1) 嵌银丝后复合固体推进剂较未嵌银丝推进剂的燃烧速率提高约6倍，且压强越大，燃烧速率提高越明显，但对推进剂燃速压强指数无明显影响。

(2) 在外界热源刺激下，由于银丝优异的导热性能，嵌银丝的推进剂更易发生分解反应，在动态升

温模式下，其初始分解峰温提前约16℃，热分解反应较未嵌银丝推进剂更激烈，释放热量多23.7%，且升温速率越快，银丝的作用越明显，初始热分解温度差异越大，即嵌入银丝推进剂具有更高的温度敏感系数。

(3) 绝热模式下，嵌银丝后推进剂分解的比反应热、最大温升速率分别提高4.6%和12.5%，且热分解表观活化能降低28.4%。

(4) 嵌银丝后，推进剂的5s延滞爆点温度降低13℃。

(5) 嵌银丝后复合固体推进剂的摩擦感度提高300%，静电火花感度极大地降低。

参考文献：

- [1] 于宁. 嵌银丝端燃药柱燃气发生器理论性能分析[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1): 180-183.
- [2] 张伟. 嵌银丝贫氧推进剂燃烧特性[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(6): 17-19.
- [3] 姜春英. 基于离散度的药柱端面银丝位置视觉识别方法[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(1): 59-65.
- [4] 肖志平. 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.
- [5] 杨时敏. 药柱银丝位置多重算法识别技[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(5): 43-47.
- [6] King M, Analytical modeling of effects of wires on solid motor ballistics[R]. AIAA 89-2784, 1989.
- [7] Gossant B, Godfroy F, R obert P H. Theoretical calculus of burning rate ratio in grains with embedded metal wires [R]. AIAA 88-3255, 1988.
- [8] 张有为. 嵌金属丝端燃药柱固体发动机水下点火数值模拟研究[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(1): 30-38.
- [9] 张有为. 利用嵌金属丝药柱调节固体火箭发动机推力的计算研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(10): 1 218-1 222.
- [10] 张有为. 嵌金属丝端燃药柱燃烧过程的数值研究[J]. 推进技术, 2007, 28(1): 4-8.