DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202403019

基于合金材料的固体推进剂燃速增速方法

吴 秋[1,3],任全彬[2]

(1.西北工业大学固体推进全国重点实验室,陕西 西安 710072;2.航天动力技术研究院,陕西 西安 710025;
3.西安航天动力技术研究所,陕西 西安 710025)

摘 要:为了研究金属丝对固体火箭发动机药柱燃速的影响,选择 6 种导热性能和力学性能均较优的材料,做成细丝嵌入到 HTPB 推进剂内开展点火试验。分析了材料增速比与抗拉强度的关系以及压强对增速比的影响,开展了基于传热理论及燃面反算的增速比瞬态分析,对比分析了不同材料物性参数对增速比的影响。结果表明,铜银合金、银镍合金的抗拉强度是纯银的 2.1 倍、3.6 倍,增速比分别为纯银的 94% 和 43%,合金材料的增速比和强度更均衡;工作平稳段平均压强从 3.8 MPa 上升至 9.1 MPa 时,银镍合金最大增速比从 2.5 提升至 2.8;高压下增速比从 0 升至最高 3.25,随后降至 2.65 并趋于稳定,增速效果波动较大;低压下基本无上升下降趋势,增速效果更稳定,与理论分析趋势吻合较好;不同材料熔点、比热容与增速比呈负相关,与导热系数呈现正相关。

关键词:物理化学;固体火箭发动机;增速材料;增速比;合金材料

中图分类号:TJ55;V512 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-7812(2025)01-0088-07

Method for Increasing the Burning Rate of Propellant Based on Alloy Materials

WU Qiu[1,3],REN Quan-bin[2]

(1. National Key Laboratory of Solid Rocket Propulsion, Northwestern Polytechnical University, Xi′an 710072, China;
2. Academy of Aerospace Solid Propulsion Technology, Xi′an 710025, China;
3. The Institute of Xi′an Aerospace Solid Propulsion Technology , Xi′an 710025, China)

Abstract: To study the effect of metal wires on the burning rate of solid rocket motor grain, six materials wires with superior thermal conductive and mechanical properties were selected and embedded into HTPB to conduct ignition tests. The relationship between the materials′ burning rate enhancement ratio and tensile strength, and the effect of pressure on the burning rate enhancement ratio were analyzed, a transient analysis of the burning rate enhancement ratio based on heat transfer theory and burning surface back-calculation was conducted, and a comparative analysis on the impact of different materials property parameters on the burning rate enhancement ratio was carried out. The results indicate that the tensile strengths of the copper-silver and silver-nickel alloys are found to be 2.1 times and 3.6 times that of pure silver, the burning rate enhancement ratio at 94% and 43% of pure silver, respectively, the alloys have a more balanced performance combination of burning rate enhancement ratio and strength. When the average pressure increases from 3.8 MPa to 9.1 MPa, the max burning rate enhancement ratio of the silver-nickel alloy increases from 2.5 to 2.8. Under high pressure, the burning rate enhancement ratio increases from 0 to the maximum of 3.25, then decreases to 2.65 and stabilized, showing large fluctuations in the burning rate enhancement ratio. In contrast, under low pressure, there is hardly any rising or falling trend, leading to a more stable burning rate enhancement effect, which better match the theoretical analysis. The melting points and specific heat capacities of different materials are negatively correlated with the burning rate enhancement ratio, while the thermal conductivity shows a positive correlation.

Keywords: physical chemistry; solid rocket motor; materials of increasing burning rate; burning rate enhancement ratio; alloy material

收稿日期:2024-03-26; **修回日期**:2024-07-03

作者简介:吴秋(1988－),男,硕士,高级工程师。E-mail:wuqiu215@163.com

引用本文:吴秋,任全彬. 基于合金材料的固体推进剂燃速增速方法[J]. 火炸药学报,2025,48(1):88-94.

WU Qiu, REN Quan-bin. Method for Increasing the Burning Rate of Propellant Based on Alloy Materials[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants (Huozhayao Xuebao), 2025, 48(1): 88-94.

引　言

固体火箭发动机由于结构简单，可靠性高，在航空航天等多个领域被广泛使用。近年来，为实现飞行器综合性能最优化，发动机冲质比要求越来越高，药柱满装填方案是提高冲质比的重要途径之一。然而满装填药柱端面燃面小，燃速要求高，常规的推进剂往往难以实现。因此，国内外均将导热性能好的材料做成细丝嵌入药柱中提高推进剂的综合燃速[1-2]，进而达到提高推力的目的。

银丝由于导热效果优异，在国内外固体火箭发动机领域得到了广泛应用，国外 Gossant[3]、Merrill[4] 对嵌金属丝增速原理进行了详细推导，建立了金属丝增速比计算方法，并重点分析了推进剂基础燃速、初温及金属丝直径对增速效果的影响；同时分析了金属丝种类（银、铜、钨、铝等）对增速效果的影响。Isert 等[5] 对铝丝、铜丝、镍丝及电熔丝在药柱中的燃烧过程进行高速拍摄，观察金属丝在药柱中的燃烧特性，发现当燃烧室压强升高时，金属丝燃烧形成的角度在减小，但总的燃速是提高的；还发现常规金属丝的加入可能会增加两相流损失，具有纳米特征的机械活化富铝/聚四氟乙烯线可有效提升气体温度及比冲。Lee[6] 和 Kubota[7] 等对嵌金属丝药柱燃烧过程进行研究，对比的金属丝包含银丝、铜丝、铁丝、钨丝等，发现金属丝最佳直径为 0.1～0.4mm，此时增速效果最好。Lee 等[8] 研究了金属丝位置、根数对燃面的影响，金属丝根数增加，燃面曲线上升段和下降段缩短，不同分度圆上分布金属丝对燃面的快速提高有很大益处。Paul 等[9] 发现金属丝断裂对内弹道曲线存在先下降后回升的特点，且金属丝对总冲有益处。国内张有为[10]、肖志平[11]、魏然[12] 等对嵌金属丝药柱的燃烧过程进行数值模拟，建立了金属丝传热及推进剂着火模型，对金属丝增速效果计算和内弹道计算建立了系统的方法，并探讨了外部因素如压强、内部因素如金属丝特性参数与增速效果的关系。熊文波等[13] 开展了基于 SolidWorks 开发的嵌金属丝药柱燃面计算方法研究，对端侧开槽自由装填药柱燃面推移具有较好的精确度。张明等[14] 针对双燃速嵌金属丝药柱燃烧过程及内弹道计算进行了分析，重点对两种推进剂界面如何进行燃面推移、内弹道计算进行了分析。张有为等[15] 对水下点火工作过程进行了模拟，阐述了水深对嵌金属丝药柱点火的影响。阳洁等[16] 对多种嵌金属丝药柱燃速测试方法进行了对比分析，提出了一种新型的嵌金属丝燃速测试方法，能够准确计算嵌金属丝药柱在稳定燃烧段的增速比。

固体火箭发动机中常用的银丝虽导热性能好，但由于其强度低，工程应用时容易发生断裂，给可靠使用带来了隐患。在金属银中熔入一些高强度金属，如铜、镍等，一方面能够有效利用银的高导热性，一方面也能提高强度，国内外还鲜见相关报道。因此本研究开展多种合金材料与纯金属材料的增速比测试与分析，获得不同材料的增速比，为合金材料在固体推进剂中的应用提供参考。

1　试验方法

1.1　增速材料

纯金属选择银、铜、钢，合金材料选择铜银合金、银镍合金。由于碳纤维具有较好的轴向导热性，如在外表面镀上一层银，将有效提高径向的导热性能，也作为一种增速材料进行测试。本研究选用的 6 种材料物性参数见表 1。

表 1　增速材料物性参数

Table 1　Physical property parameters of burning rate enhancement materials

materials	thermal conductivity/ ($W \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$)	density/ ($10^3 kg \cdot m^{-3}$)	specific heat capacity/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	tensile strength/MPa
silver	386	8.9	390	320
copper	429	10.5	232	125
steel	45	7.8	460	1080
copper-silver alloy	403	10.1	270	260
silver-nickel alloy	305	10.2	276	450
carbon fiber silver-plated	X:150;Y:1.4	2.1	712	4200

表 1 中,碳纤维镀银材料用的为 1k 的 T700 碳纤维束(1k 是指由 1000 根纤维单丝组成的纤维束)。使用无极镀银的方法制备了镀银碳纤维,碳纤维表面银层平均厚度为 500 nm[17]。X 表示沿碳纤维轴向,Y 表示碳纤维的径向。

1.2 增速理论分析

(1)增速比定义

增速比(ξ)定义为:在相同压强下,嵌金属丝后得到综合燃速与推进剂基础燃速的比值,也可以视为燃面的比值为增速比;在药柱结构中,也可折算为金属丝在药柱中形成锥角相关的值[1],见公式(1):

$$\xi = \frac{Ab_1}{Ab_2} = \frac{1}{\sin\theta} \tag{1}$$

式中:Ab_1 为嵌金属丝药柱工作平衡段的燃面,单位 cm^2,通过 PRO/E 二次开发燃面推移软件计算获得;Ab_2 为未嵌金属丝药柱工作平衡段的燃面,单位 cm^2,由实测压强根据内弹道计算公式反算获得;θ 为嵌金属丝药柱工作时燃面与金属丝的锥角,如图 1 所示。

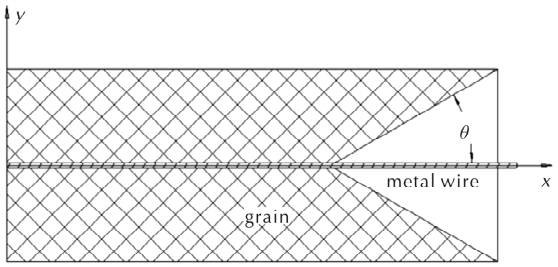


图 1 嵌金属丝推进剂稳定燃烧时的典型燃面

Fig. 1 Typical combustion surface of stabilized burning of propellant embedded metal wire

(2)传热计算

传热计算理论推导过程参考文献[10, 12],这里选择银镍合金开展传热计算,计算所用的主要参数见表 2,通过计算可以获得理论增速比。

(3)燃面反算计算

对于发动机工作平衡段,根据试验测得的压强曲线,可以采用零维内弹道计算公式反算得到药柱工作的实际燃面,见公式(2):

$$A_{b2} = p_c^{1-n} A_t / \rho_p c^* a \tag{2}$$

式中:p_c、A_{b2}、a、n、ρ_p、A_t、c^* 分别表示燃烧室总压、燃面面积、燃速系数、压强指数、药柱密度、喷管喉部面积、特征速度。

通过上述增速比理论分析可知,从传热计算可以正向获得增速比大小,也可通过燃面计算($\xi = Ab_1/Ab_2$)获得增速比。

表 2 传热计算主要参数

Table 2 The main parameters for heat transfer calculation

parameters	value
metal material	silver-nickel alloy
metal wire diameter	Φ0.4 mm
blackening of metal wire	0.8
standard burning rate (6.86 MPa, 20℃)	22 mm/s
heat conduction coefficient of the grain	1 W/(m·K)
grain density	1780 kg/m^3
specific heat capacity of the grain	1200 J/(kg·K)
Ignition temperature of the Grain	650 K
heat convection coefficient between combustion gas and the metal wire	50 W/(m^2·K)
heat convection coefficient between combustion gas and the grain	2.4 W/(m^2·K)
initial temperature of the grain	300 K

1.3 固体火箭发动机增速比测试方法

(1) 常用增速比测试方法对比

目前金属丝增速比测试方法主要有药条法、发动机中止燃烧法、发动机工作过程 X 射线实时成像法、模拟发动机测试法等。其中药条法因与靶线熔化丝和金属丝为异面直线且燃烧时间短,测试精度偏低;发动机中止燃烧法因存在一定危险且需要的辅助设备多较为复杂;发动机工作过程 X 射线实时成像法成本较高,设备多且昂贵;模拟发动机测试法其工作环境与实际最接近,采用试后数据处理也能较为准确地获得增速比数据,且不需要额外的特殊设备,是理想的增速比测试方法。

(2) 增速比测试发动机设计

本研究设计一种模拟发动机,用以测试所有增速材料的增速效果,模拟发动机由绝热壳体、点火装置、包覆药柱、喷管组成。各部件主要材料见表 3。

表 3 模拟发动机主要材料

Table 3 Main materials of the simulated solid rocket motor

name	materials
ignition device	carbon steel + black powder
shell	carbon steel
insulating material of combustion chamber	nitrile-butadiene rubber
propellant	HTPB
nozzle shell	45# stell
throat	copper infiltrated tungsten
insulating material of nozzle	silica phenolic resin molded

喉衬采用钨渗铜耐烧蚀材料,其具有承受高压

强及抗烧蚀的性能，短时间内几乎不烧蚀，发动机工作压强变化可认为是完全由燃面引起，通过压强曲线能够较好地识别药柱燃烧时刻结束点。

发动机平衡段内弹道性能与金属丝数量、位置分布无关，只与金属丝导热性能、直径相关，因此这里按照工艺最简单的原则对金属丝安装位置进行设计，分度圆直径为药柱直径的二分之一，药柱结构见图 2。模拟发动机主要参数见表 4。药柱中嵌入了 3 根金属丝，金属丝分度圆为 Φ42 mm。

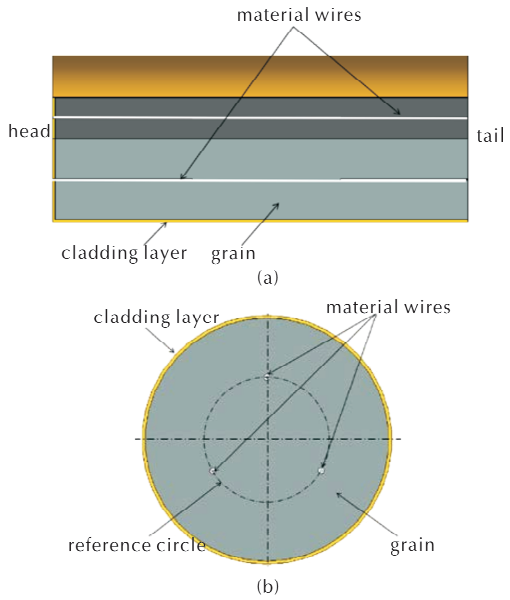


图 2　包覆药柱结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the coated grain structure

表 4　模拟固体火箭发动机主要设计参数

Table 4　Main design parameters of the simulated solid rocket motor

parameters	value
grain length	210 mm
grain diameter	Φ84 mm
pressure exponent of the propellant	0.3
temperature sensitivity coefficient of the propellant	0.0015 ℃
standard burning rate(6.86 MPa, 20 ℃)	22 mm/s
grain density	1770 kg/m^3
characteristic velocity of the propellant	1530 m/s
ablation rate of nozzle throat insert	0 mm/s
nozzle outlet inner diameter	Φ42 mm

测试时，模拟发动机水平放置，测试前模拟发动机进行 + 20 ℃ 保温，确保测试结果不受温度偏差的影响，测试安装示意图见图 3。

模拟发动机共测试 2 路压强，压力传感器量程为 0 ～ 25 MPa，采样频率 5 kHz，测试不确定度为 0.05 % FS。

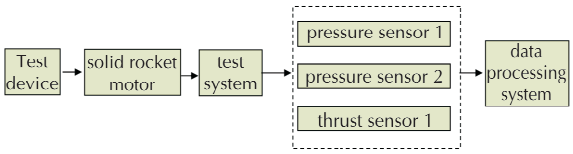


图 3　测试系统示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the test system

(3) 金属丝选择及喉径确定

从已有文献[1,3,4]可以初步查询出纯金属丝的增速比范围，合金金属丝增速效果应在两种纯金属丝增速比之间。增速材料选用典型直径 Φ0.4 mm，为确保测试发动机安全，防止发动机工作过程中燃烧残渣、绝热层碎片等飞出堵塞喉径，最小喉径不小于 Φ5.0 mm。综合增速材料丝线的预估增速比及喉径设计原则，确定了不同增速材料丝线直径(D)及模拟发动机喉径(d)，具体见表 5。

表 5　模拟发动机喉径及增速材料直径

Table 5　Throat diameter of simulated solid rocket motor and diameter of burning rate enhancement Materials

material	d/mm	D/mm
silver	7.0	0.4
copper	7.0	0.4
steel	5.5	0.4
copper-silver alloy	7.5	0.4
silver-nickel alloy	7.5	0.4
carbon fiber silver-plated	6.0	

2　结果与分析

2.1　增速比测试结果分析

不同增速材料模拟发动机压强测试结果见图 4。从图 4 看出，在相同的基础燃速下，不同材料做成的增速丝线具有不同的增速效果。嵌银丝和铜银合金丝药柱的发动机压强曲线几乎无平直段，表明药柱模拟发动机药柱长度偏短。

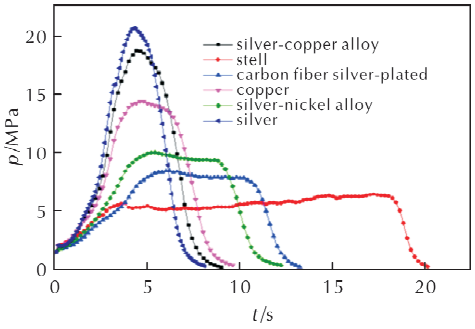


图 4　不同增速材料压强测试曲线

Fig. 4　Pressure test curves of different burning rate enhancement materials

由于药柱为圆柱形，可以判定增速材料烧穿药柱时为压强下降拐点，对于银丝和铜银合金，这里按照最高点作为金属丝烧穿药柱的时刻来处理。通过燃面反算确定最大增速比，具体见表 6，纯银的增速效果最好，增速比为 4.7；其次是铜银合金 4.4，碳纤维镀银和纯钢效果最差，增速比分别为 1.6 和 1.03。碳纤维镀银虽然也有一定的增速效果，但因生产工艺复杂且一致性难以保证，不建议作为增速材料使用。

表 6 不同材料增速比计算结果

Table 6 Calculated results of the burning rate enhancement ratios for different materials

No.	material	max burning rate ratio
1	silver	4.7
2	copper-silver alloy	4.4
3	copper	3.2
4	silver-nickel alloy	2.4
5	carbon fiber silver-plated	1.6
6	steel	1.03

表 7 给出了两种纯金属、两种合金的增速比和抗拉强度之间的关系。由表 7 可看出，铜铜银合金、银镍合金相对于纯银，抗拉强度增加了 2.1 倍、3.6 倍，增速比为纯银的 94% 和 43%，合金性能更加均衡，可以作为增速材料。

表 7 金属材料增速比与抗拉强度之间的关系

Table 7 Relationship between burning rate enhancement ratio and tensile strength of meal materials

No.	material	max burning rate ratio	tensile strength/MPa
1	silver	4.7	125
2	copper-silver alloy	4.4	260
3	copper	3.2	320
4	silver-nickel alloy	2.4	450

采用纯铜丝和纯钢丝再次进行试验，模拟发动机技术状态、试验状态均完全相同，对比结果见图 5。从图 5 可以看出，相同模拟发动机状态测试重现性良好，表明上述数据可信。

2.2 压强对增速比的影响

开展相同推进剂、相同增速材料、不同压强下的两台模拟发动机测试，对比不同压强下增速比的变化。增速材料为银镍合金，直径为 Φ0.4 mm，推进剂仍然采用常规的 HTPB 推进剂，基础燃速均为 22 mm/s(6.86 MPa，20 ℃)。金属丝分布见图 2，喷管喉径分别为 Φ7.5 mm、Φ9.5 mm。试验曲线见图 6。

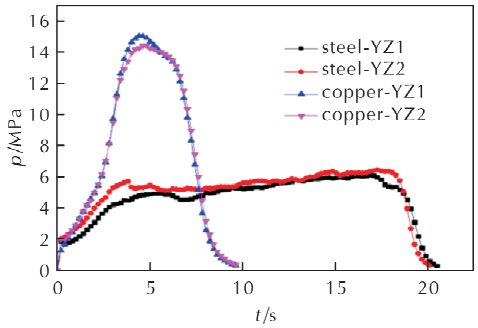


图 5 重现性试验曲线对比

Fig. 5 Comparison of reproducibility test curves

按照 2.1 节相同的数据处理方法，得到 Φ0.4 mm 银镍合金增速比，详见表 8。从表 8 可以看出，当发动机平稳段平均压强从 3.8 MPa 提高至 9.1 MPa 时，银镍合金的增速比呈正相关关系。其中平稳段平均压强是指以压强从点火上升至最高点为起点、以燃烧结束点为终点的时间段内压强积分与时间间隔的比值。

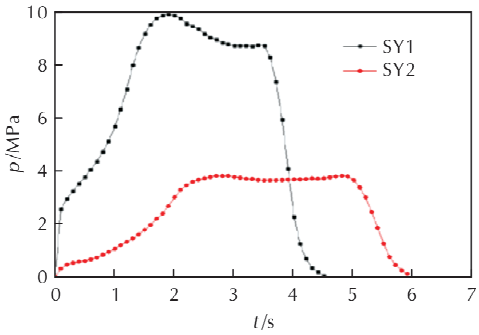


图 6 相同增速材料、不同喉径下的压强曲线

Fig. 6 Pressure curves for the same burning rate enhancement material under different throat diameters

表 8 银镍合金不同压强下增速比

Table 8 Burning rate enhancement ratio of silver-nickel alloy under different pressures

test number	average pressure in the steady state/MPa	max burning rate ratio
SY1	9.1	2.8
SY2	3.8	2.5

从图 6 看出，SY1 和 SY2 压强曲线变化规律还有一定的差异，SY1 压强曲线稳定段呈现先上升、后降低的趋势，而 SY2 则基本无上升下降趋势，由于喉衬均采用钨渗铜喉衬，短时间内烧蚀可忽略，燃面变化主要由金属丝增速比不同引起的，通过反算燃面可得到实测增速比。同时根据文献[10，12]增速比计算方法，可以预测金属丝的增速比。预测和实测反算得到的增速比变化规律见图 7。银镍合金丝在药柱中的增速作用是变化的，高压下增速比从初

始上升至最高 3.25，随后降至 2.65 并趋于稳定，增速效果变化较剧烈；低压下基本无上升下降趋势，范围在 2.23～2.36 之间。这与文献[9,11]中的结果吻合，主要由金属丝增速变化导致形成的锥角母线变化所致。

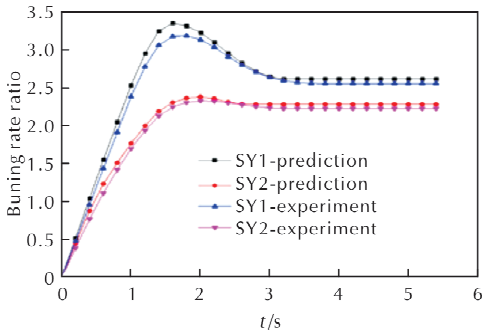


图 7　金属丝增速比随时间的变化

Fig.7　Variation of metal wire burning rate enhancement ratio over time

从 SY1 和 SY2 对比结果可以看出，在相同推进剂配方、增速材料种类及直径、相同喉衬材料条件下，不同压强下银镍合金的增速比的变化规律有一定的差异，高压下增速效果变化较剧烈，低压下相对增速效果更稳定。

对比预示和实测结果，预示值普遍高于实测值，初步分析有两个原因：一是模型简化带来的计算误差；二是计算时选取的金属导热率均取常温定值，实际上金属导热率随温度升高而减小，导热率降低会影响金属丝本体、金属丝与药柱之间的传热降低，增速效果降低。

2.3　增速比与热扩散率的关系

金属材料的热扩散系数 α（$\alpha=\lambda/(\rho c)$，其中 λ 为导热系数，ρ 为密度，c 为比热）代表热量扩散的快慢，热扩散系数高代表热传递快。对比增速比与热扩散系数之间的关系，按照图 7 预示增速比计算方式，得到每种材料 6 MPa 下的增速比，对比结果见表 9，从对比结果看，在金属丝直径相同的情况下，热扩散系数与增速比呈正相关。

表 9　不同材料增速比与热扩散系数的关系(6 MPa)

Table 9　Relationship between burning rate enhancement ratio and thermal diffusivity of different materials (6 MPa)

material	thermal diffusivity/ ($cm^2 \cdot s^{-1}$)	diameter/ mm	burning rate ratio(6 MPa)
silver	0.176	0.4	4.2
copper	0.111	0.4	3.0
steel	0.013	0.4	1.1
copper-silver alloy	0.148	0.4	3.8
silver-nickel alloy	0.108	0.4	2.3

2.4　增速比与熔点的关系

对比增速比与金属丝熔点之间的关系，计算得到每种材料 6 MPa 下的增速比，结果见表 10，从对比结果看，在金属丝直径相同的情况下，增速材料熔点与增速比呈负相关。

表 10　不同材料增速比与熔点的关系(6 MPa)

Table 10　Relationship between burning rate enhancement ratio and melting point of different materials (6 MPa)

material	melting point/K	diameter/mm	burning rate ratio (6 MPa)
silver	1235	0.4	4.2
copper	1358	0.4	3.0
steel	1773	0.4	1.1
copper-silver alloy	1287	0.4	3.8
silver-nickel alloy	1523	0.4	2.3

从本研究选择的几种材料看，熔点高的金属如钢丝、银镍合金等，虽然能够暴露在燃气中更长时间，受燃气的加热量也大，但由于其比热容大、导热系数低的原因，吸收的热量被用来自身加热，金属丝自身温度上升较慢，对推进剂的增速并无益处。

3　结　论

(1)6 种增速材料增速比测试结果表明，铜银合金、银镍合金相对于纯银来讲，抗拉强度增加了 2.1 倍、3.6 倍，增速比为纯银的 94% 和 43%，铜银合金、银镍合金性能更均衡，可以作为增速材料。

(2)对银镍合金而言，当工作平稳段平均压强从 3.8 MPa 上升至 9.1 MPa，增速比与压强呈正相关。对不同的增速材料，当热扩散系数从 0.013 到 0.176，增速比与热扩散系数也呈现正相关；增速材料熔点从 1235K 到 1773K，增速比与熔点呈负相关。

(3)金属丝增速比在药柱燃烧过程中是变化的，存在先增大、后减小、最后趋于平稳的变化规律，压强越高，上述变化趋势越明显；压强较低时，该现象不明显，理论分析和试验结果较吻合。

参考文献：

[1] HSING Y，WU S，KUO J. Burning rate of HTPB composite propellant grains with embedded metal wires[C]//Proceedings of the 28th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando：FL，1990.

[2] 张有为，王晓宏. 利用嵌金属丝药柱调节固体火箭发动机推力计算研究[J]. 兵工学报，2007，28(10)：1218-1222.
ZHANG You-wei，WANG Xiao-hong. Numerical research

for adjusting thrust of solid rocket motor by using the embedded wire grain [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(10):1218-1222.

[3] GOSSANT B, GODFREY F. Theoretical calculus of burning rate ratio in grains with embedded metal wires[C]// Proceedings of the 26th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reno:NV, 1988.

[4] KING M. Analytical modeling of effects of wires on solid motor ballistics [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1991,7(3):312-321.

[5] ISERT S, LANE C D, GUNDUZ I E, et al. Tailoring burning rates using reactive wires in composite solid rocket propellants [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2016, 36: 2283-2290.

[6] LEE H, OH J Y, YANG H, et al. Study on combustion characteristics of thermoplastic solid propellants embedded with metal wires [J]. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2022, 26(4): 21-27.

[7] KUBOTA N, ICHIDA M, FUJISAWA T. Combustion processes of the propellants with embedded metal wires [J]. *AIAA Journal*, 1982, 20(1):25-37.

[8] LEE H, OH J, YANG H, et al. Burn-back analysis for propellant grains with embedded metal wires [J]. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2022. DOI: 1016108/kspe.2022.26.2.012.

[9] PAUL B. Tactical missile performance for single and multi-wire embedded propellant configurations with discontinuities [D]. [S. l.]: Department of the Air Force Air University, 2019.

[10] 张有为,王晓宏,杨举贤.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.
ZHANG You-wei, WANG Xiao-hong, YANG Ju-xian. Numerical study of end-burning solid motor embedded with wire[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(1): 4-8.

[11] 肖志平, 韩波, 张亮, 等. 嵌金属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 Zhi-ping, HAN Bo, ZHANG Liang, et al. Numerical study on the interior ballistics silver wire coupled convective heat of grain embedded with transfer process [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2016, 39(2):188-193.

[12] 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 Fu-ting, 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.

[13] 熊文波, 刘宇, 杨劲松. 基于 SolidWorks 二次开发的嵌金属丝药柱燃面计算[J].北京航空航天大学学报, 2007,33(12):1400-1403.
XIONG Wen-bo, LIU Yu, YANG Jin-song. Burning surface calculation for grain embedded metal wires based on solid works API[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(12):1400-1403.

[14] 张明, 熊波, 涂四华,等.嵌金属丝串装双燃速药柱燃烧分析及发动机内弹道计算[J].固体火箭技术,2015, 38(5):36-39.
ZHANG Ming, XIONG Bo, TU Si-hua, et al. Analysis of combustion process of dual burning rate grain with series embedded metal wires and calculation of motor internal ballistic[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2015, 38(5):36-39.

[15] 张有为, 王晓宏. 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,2007,20(1): 30-38.
ZHANG You-wei, WANG Xiao-hong. Study on numerical simulation of underwater launch for end-burning grain so-lid motor with embedded wire [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2007,20(1):30-38.

[16] 阳洁, 张鲁, 张伟青.嵌长金属丝药柱燃速测试方法研究[J].上海航天,2015,32(1):54-57.
YANG Jie, ZHANG Lu, ZHANG Wei-qing. Research on testing methods for burning rate of grain embedded metal wire [J]. *Aerospace Shanghai*, 2015,32(1):54-57.

[17] 李珺鹏. 功能型聚合物基导热/导电复合材料的制备与应用[D].西安:西北工业大学,2016.
LI Jun-peng. Synthesis and application of functional polymer-based composites with thermal and electrical conductivity [D]. Xi′an:Northwestern Polytechnical University,2016.