0254-6124/2022/42(3)-0448-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHENG Yanshuai, QIU Yang, XUE Kun, XU Zhengwen, ZHAO Haisheng, XIE Shouzhi. Study on Gasification Method of Metal Materials for Space Experiment (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 448–454. DOI:10.11728/cjss2022.03.210601027

用于空间试验的金属物质气化方法*

郑延帅[1,2] 邱 扬[1] 薛 昆[2]
许正文[2] 赵海生[2] 谢守志[2]

1(西安电子科技大学机电工程学院 西安 717071)

2(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术国家重点实验室 青岛 266107)

摘 要 通过向电离层空间释放金属物质，形成高密度的等离子体云团，实现对电磁波反射与散射的方法，对于改善通信效果具有重要作用，是当前应急通信研究热点之一。根据气态形式释放金属才能充分与电离层相互作用生成电子密度增强区的原理，针对以往采用碱金属和碱土金属作为释放物，产生电子密度增强的机制主要是光致电离所带来的不足（白天效果明显，夜间效果较差），选用镧系金属作为新的释放物，并以镧系金属钐为例，建立了钛硼与钛碳两种自蔓延燃烧合成反应加热气化金属钐的理论模型。通过理论计算，确定了两种自蔓延合成反应体系加热气化金属钐的净放热量以及加热气化金属钐的最大效率。针对理论研究结果，对两种反应体系加热气化金属钐的方案开展试验研究，验证了理论分析的正确性，摆脱了电子密度增强主要依赖光致电离的缺点，提供了一种全天候释放电子密度的方法。

关键词 人工等离子体云团，空间试验，自蔓延燃烧合成，镧系金属钐

中图分类号 P354

Study on Gasification Method of Metal Materials for Space Experiment

ZHENG Yanshuai[1,2] QIU Yang[1] XUE Kun[2]
XU Zhengwen[2] ZHAO Haisheng[2] XIE Shouzhi[2]

1(*School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an* 710071)

2(*National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao* 266107)

Abstract Vaporized metal has been released in the ionosphere for artificially creating plasma clouds, which can realize or enhance the reflection and scattering of radio waves, thereby affecting the propagation of electromagnetic waves in the information system, and it is currently a research hotspot of

* 国家自然科学基金项目 (61871352)，重点实验室稳定支持项目 (JCKY2020210C614240305) 和泰山学者工程项目 (ts20190968) 共同资助

2021-06-01 收到原稿，2021-08-17 收到修定稿

E-mail：yszheng1990@163.com

emergency communication. Only the metal released in the gaseous form can sufficiently interact with the ionosphere to generate an enhanced electron density region. In the early days, a large number of studies on the release of metal gases were carried out, and the releases mainly used alkali metals and alkaline Earth metals. The mechanism by which these metals generate electron density enhancement is mainly photoionization (the effect is obvious during the day, and the nighttime effect is not obvious). In this study, lanthanide metals were selected as new releasers. Taking the lanthanide metal Samarium (Sm) as an example, a theoretical model of the self-propagating combustion synthesis reaction of Titanium Boron (Ti-B) and Titanium Carbon (Ti-C) for gasifying Sm was established. Through theoretical calculations, the pure heat release and the maximum efficiency of gasifying Sm were obtained for the two self-propagating synthesis reaction systems. According to the theoretical research results, the experimental research on the gasification of Sm in two reaction systems is carried out. The experimental results verify the correctness of the theoretical analysis. It gets rid of the disadvantage that electron density enhancement mainly relies on photoionization, and provides a kind of all-weather method of releasing electron density.

Key words Artificial plasma cloud, Space test, Self-propagating combustion synthesis, Samarium

0 引言

利用运载器投送,向电离层注入特定的化学物质,在电离层中生成高密度的等离子体云团,实现对无线电波反射与散射的方法,可以增强远程无线信息传输与通信效能。由于具有潜在的应用价值,该方法已成为当前应急通信的研究热点之一。国际上利用火箭等运载平台开展了大量释放金属物质的电离层空间主动实验[1-4]。美国空军剑桥实验室自 20 世纪 50 年代开始,实施了人工电离云(Artifical Ionization Clouds)试验,其释放物主要是碱金属(铯、钾和钠)的硝酸盐形式,通过碱金属硝酸盐与铝粉颗粒混合反应产生金属蒸气[5];在 20 世纪 60 年代,先后实施了萤火虫计划(Project Firefly)、红灯计划(Project Red Lamp)等,释放物主要采用金属铯,通过硝酸铯与铝粉混合反应生成并加热气化碱金属[4];此后为获得更高的加热效率,通过添加黑索金和三硝基甲苯等高能炸药对反应体系进行了优化。此外,还有很多空间试验采用氧化铜与钡反应加热气化多余的钡,释放金属钡蒸气[3]。

进入 21 世纪的近 20 年来,美国空军实验室先后于 2013 年开展了空间金属氧化物云试验(MOSC),2015 年开展了人工电离层控制试验(AIC),产生稳定存在约 25 min 的人工电离层,获得的最大可用频率(MUF)为 10 MHz,高于试验期间背景电离层。试验利用自蔓延燃烧合成加热气化释放金属钐[6]。此外,美国 NASA 分别于 2013 年 1 月和 5 月在瓦拉普斯岛发射基地实施了赤道等离子体涡旋试验(EVEX),研究测试两种产生金属锂蒸气方法的释放试验,研究赤道电离层扩展 F 层暴的触发控制因素,以及对卫星通信和导航的干扰[7]。2016 年美国空军启动电离层炸弹计划(Ionosphere Bomb),采用低成本微小卫星立方体卫星(CubeSats)在高空释放金属气体[8]。

日本在 2007 年开展了太空礼花试验,采用铝热剂加热气化金属锂。2011 年中国子午工程开展了注入金属钡蒸气的空间试验,采用钛硼自蔓延燃烧合成反应加热气化金属钡[9]。

综上可知,早期的释放物以碱金属和碱土金属为主,产生电子密度增强的机制主要是光致电离。由于光照条件限制,仅能在白天释放金属气体开展试验,因此具有一定的局限性[3]。镧系金属与碱金属和碱土金属不同,主要通过与电离层氧原子(O)的化学反应产生自由电子,突破了原来光致电离产生电子的光照条件限制,成为一种全天候的电子密度增强类释放物质[3]。镧系金属与氧原子发生如下反应:

$$\mathrm{LM} + \mathrm{O} \rightarrow \mathrm{LMO}^{+} + \mathrm{e}^{-}. \tag{1}$$

其中,LM 表示镧系金属。常见的镧系金属包括:镧(La,沸点 3457℃),铈(Ce,沸点 3426℃),镨(Pr,沸点 3520℃),钕(Nd,沸点 3074℃),钷(Pm,沸点

3300℃), 钐(Sm, 沸点 1791℃), 钆(Gd, 沸点 3266℃)等[10]。由于金属钐的沸点远低于其他几种镧系金属, 是满足全天候释放条件的较优释放物, 因此这里以金属钐为对象进行研究。金属钐与背景氧原子发生反应释放电子的化学反应式为

$$\mathrm{Sm} + \mathrm{O} \rightarrow \mathrm{SmO}^{+} + \mathrm{e}^{-} + 0.39\ \mathrm{eV}. \tag{2}$$

根据气态形式释放的金属才能充分与电离层背景发生相互作用, 生成高密度增强区的原理, 需要将钐加热至气态, 然后注入电离层空间。因此, 研究在高层大气中将金属钐高效加热气化的方法成为关键。

本文在深入分析空间试验中金属加热气化方法的基础上, 研究确定采用自蔓延燃烧合成技术加热气化金属钐的方法[11]。从理论上分析了钛硼、钛碳两种自蔓延燃烧合成反应加热气化金属钐的可行性, 以金属钐的理化性质为条件, 通过对钛硼、钛碳两种自蔓延燃烧合成反应进行热力学分析, 建立了钛硼、钛碳两种自蔓延燃烧合成反应加热气化金属钐的理论模型, 通过理论计算, 确定了两种自蔓延合成反应体系加热气化金属钐的净放热量以及加热气化金属钐的最大效率。针对理论研究结果, 对两种反应体系加热气化金属钐的方案开展试验研究, 验证了理论分析的正确性, 摆脱了电子密度增强主要依赖光致电离的缺点, 提供一种全天候高效释放电子密度的方法。

1 金属物质加热气化方法

1.1 自蔓延燃烧合成加热法

目前, 空间试验中采用过的化学反应加热方法有两种。一种是铝热法, 即将释放物质作为产热反应物质的一种产热方法。该方法中释放物与其他物质发生化学反应时产生高温, 温度可达 2000 K 以上, 将其中一部分未参与反应的释放物质在短时间内加热气化成分子或原子[11-13]。其化学反应方程式如下:

$$n\mathrm{Ba} + \mathrm{CaO} \rightarrow \mathrm{BaO} + \mathrm{Ca} + (n-1)\mathrm{Ba}.$$

其中, $n = [\mathrm{Ba}]/[\mathrm{CaO}]$, 为1.3 ~ 2.5。但是, 该方法不适用于高沸点金属物质释放。

另一种方法是自蔓延燃烧合成(Self-propagating High-temperature Synthesis, SHS)加热法, 是利用化学反应自身放热制备材料的新技术[14]。其利用外部提供的必要能量, 诱发高放热化学反应体系局部发生化学反应(点燃), 形成化学反应前沿(燃烧波), 此后化学反应在自身释放热量的支持下继续进行, 表现为燃烧波蔓延至整个反应体系, 最后利用反应放出的热量实现为金属物质的加热气化。自蔓延燃烧合成加热法容易控制, 产热率高, 加热时间短(秒量级), 反应速度快, 可用于释放沸点较高的化学物质, 特别是碱土金属及稀土金属等。

此外, 自蔓延燃烧合成反应及其产物的饱和蒸气压极低, 在释放装置内反应后突然高温也不会发生爆炸, 使用安全可靠、污染少, 固态反应不需要复杂设备且安全可靠, 也可制作大容积加热装置, 释放大剂量化学物质。因此自蔓延加热法是目前空间释放试验最佳的加热方法[15-18]。这里针对钛碳和钛硼两种自蔓延燃烧合成反应体系, 对金属钐的加热气化开展理论及试验研究。

1.2 钛碳及钛硼两种 SHS 反应体系的热力学

对燃烧体系进行热力学分析是研究 SHS 过程的基础, 其中, 绝热燃烧温度是反应的放热体系能够达到的最高温度, 也是描述 SHS 反应特征最重要的热力学参数[15]。其不仅可以作为判断燃烧反应能否自维持的定性依据, 还可以对燃烧反应产物的状态进行预测, 并为反应体系的成分设计提供依据。Merzhanov 等[13-17] 通过大量实验给出一个经验判据, 当反应体系的绝热燃烧温度 $T_{\mathrm{ad}} \geqslant 1800$ K 时, SHS 反应在点燃后能够自维持。针对钛碳和钛硼两种 SHS 反应体系, Rice 等[15] 计算得到钛碳反应的绝热温度为 3210 K, 钛硼反应的绝热温度为 3190 K。两种反应的绝热温度均大于 1800 K, 且远大于金属钐的沸点, 因此采用这两种 SHS 反应体系加热气化金属钐理论上是可行的[18-21]。

反应体系加热气化金属的过程中, 反应体系本身也要达到一定温度, 造成一定热量损失, 真正用于加热气化金属的有效热量, 即反应体系单位质量的净放热是本文研究关注的重点。以下主要研究加热气化金属钐条件下钛碳和钛硼两种反应体系单位质量的净放热(净放热效率)。为便于研究, 假设反应体系是一个绝热系统, 反应物按 100% 化学计量发生反应, 且不可逆, 系统净放热完全用于加热气化目标金属。

钛碳和钛硼自蔓延燃烧合成反应的化学方程式如下:

$$\mathrm{Ti(s)} + \mathrm{C(s)} = \mathrm{TiC(s)} + Q_1, \tag{3}$$

$$\mathrm{Ti(s)+2B(s)=TiB_2(s)}+Q_2. \tag{4}$$

其中, s 表示固态, Q_1 和 Q_2 表示放热量。生成物的相对摩尔焓为

$$H_{\mathrm{T}}^0-H_{298}^0=\int_{298}^{T_{\mathrm{tr}}}C_{\mathrm{p}}\mathrm{d}T+\Delta H_{\mathrm{tr}}+\int_{T_{\mathrm{tr}}}^{T_{\mathrm{m}}}C'_{\mathrm{p}}\mathrm{d}T+\Delta H_{\mathrm{m}}+\int_{T_{\mathrm{m}}}^{T_{\mathrm{B}}}C''_{\mathrm{p}}\mathrm{d}T+\Delta H_{\mathrm{B}}+\int_{T_{\mathrm{B}}}^{T_{\mathrm{ad}}}C'''_{\mathrm{p}}\mathrm{d}T. \tag{5}$$

其中, T_{tr}、T_{m}、T_{B}分别表示相变温度、熔点和沸点。ΔH_{tr}、ΔH_{m}、ΔH_{B}分别表示相变热、熔化热和气化热。C_{p}、C'_{p}、C''_{p}、C'''_{p}分别为反应产物的低温固态、高温固态、液态和气态的摩尔热容[16-18]。由于金属钐的沸点为 2064 K(1791℃), 假设在反应混合体系中添加金属钐后, 反应放热使产物和金属钐均处在 2064 K。由于碳化钛(TiC)、硼化钛(TiB_2)的熔点均远大于 2064 K, 因此上述两种产物均在低温固态和高温固态, 且固态摩尔热容可由下式得出[21-25]:

$$C_{\mathrm{p}}=a+b\times10^{-3}T+c\times10^{5}T^{-2}. \tag{6}$$

上述计算过程中相关金属及化合物的各项热物性参数列于表 1[10]。

根据表 1 中各热物性参数及式(5)和式(6), 可计算得到碳化钛 H_{2064}–H_{298} 焓变值为 95.4 kJ·mol^{-1}。同理, 硼化钛 H_{2064}–H_{298} 的焓变值为 97.0 kJ·mol^{-1}。金属钐 H_{2064}–H_{298} 焓变值为 55.9 kJ·mol^{-1}。得到钛碳和钛硼两种自蔓延燃烧合成反应的净放热结果分别列于表 2 和表 3。

由上述计算可知, 1 mol 钛碳反应体系完全反应放出的净热量为 89.06 kJ, 相当于 1.49 kJ·g^{-1}。同理, 1 mol 钛硼反应体系完全反应放出的净热量为 213.8 kJ, 相当于 3.07 kJ ·g^{-1}。因此, 对于相同质量的

表 1　相关金属及化合物的各热物性参数

Table 1　Thermal properties of related metals and compounds

材料种类	熔化		比热系数(固态)			形成热$\Delta H_{\mathrm{f}(298)}$/(kJ · mol^{-1})	气化	
	熔点/℃	熔化热ΔH/(kJ · mol^{-1})	a	b	c		沸点/℃	气化热ΔH/(kJ · mol^{-1})
Ti	1660	5.0	19.8	7.9	0	0	3287	112.5
B	2180	50.2	32.10	–0.07	–96.75	0	3650	489.7
C	3500	—	0.11	38.9	–1.48	0	4827	355.8
TiC	3140	83.6	49.45	3.35	–14.96	–184.46	4820	—
TiB_2	2980	50.2	54.07	–0.03	–21.63	–310.8	>3500	—
Sm	1072	8.63	32.15	–0.49	–1.59	0	1791	166.4

注　表中金属及化合物包括钛(Ti), 硼(B), 碳(C), 碳化钛(TiC), 硼化钛(TiB_2), 钐(Sm)。

表 2　钛碳反应净热量计算

Table 2　Calculation of net heat of Ti-C reaction

反应方程式	C	+	Ti	=	TiC	总计	净放热/(kJ·mol^{-1})
mol. weight	12.01		47.90		59.9	59.91	–89.06
$\Delta H_{(298)}$/(kJ · mol^{-1})	0		0		–184.46	–184.46	–1.49
焓变H_{2064}–H_{298} /(kJ·mol^{-1})	—		—		95.4	95.4	—

表 3　钛硼反应净热量计算

Table 3　Calculation of net heat of Ti-B reaction

反应方程式	2 B	+	Ti	=	TiB_2	总计	净放热 /(kJ·mol^{-1})
mol. weight	2×10.8		47.90		69.54	69.54	–213.8
$\Delta H_{(298)}$/(kJ · mol^{-1})	0		0		–310.8	–310.8	–3.07
焓变H_{2064}–H_{298} /(kJ·mol^{-1})	—		—		97.0	97.0	—

钛碳和钛硼反应体系，钛硼反应体系加热气化金属钐的净放热效率更高，更适用于金属钐的加热气化。

1.3 钛碳及钛硼反应加热气化金属钐数值计算

在自蔓延燃烧合成反应加热气化金属钐时，将金属钐以粉末形式添加到反应体系中，金属钐作为稀释剂，均匀弥散到反应体系的混合粉末中。不考虑热损失，假定反应体系的净热量全部用于加热气化金属钐，结合金属钐的熔化热、焓变、气化热可知，金属钐从初始状态到气态的焓值变化可由下式计算：

$$\Delta H = \Delta H_{\mathrm{m}} + \int_{298}^{T_{2064}} C_{\mathrm{p}}\mathrm{d}T + \Delta H_{\mathrm{B}}. \tag{7}$$

经计算，1 mol 金属钐从初始状态到气态吸收的热量为 230.93 kJ，相当于 1 g 的金属钐从初始状态到气态吸收的热量为 1.54 kJ。

进一步，按照图 1 所示钛碳和钛硼反应加热气化金属钐的计算流程，根据上述两种反应的净放热，通过理论计算得到，最多 0.38 mol(57.3 g)的金属钐可以被 1 mol(59.91 g)钛碳自蔓延燃烧合成反应加热气化，因此钛碳反应体系加热气化金属钐的最大效率为 48.9%。另外，最多 0.92 mol(139.2 g)的金属钐可以被 1 mol(69.54 g)钛硼自蔓延燃烧合成反应气化，因此钛硼反应体系加热气化金属钐的最大效率为 66.6%，明显高于钛碳反应。

2 钛碳和钛硼反应加热气化金属钐试验

为了验证理论研究结果，对两种反应体系加热气化金属钐的方案进行试验研究。分别采用钛碳和钛硼粉末按照上述理论混合均匀，然后将金属钐粉末以 40% 和 30% 的质量比均匀添加至两种反应粉末中，准备 4 种配方的试验用粉末，混合好的试验用粉末如图 2(a)所示。采用专用粉末成型机将粉末压制成圆柱形压坯，如图 2(b)所示，开展钛碳及钛硼自蔓延燃烧加热气化金属钐燃烧测试试验。通过燃烧试验观测发现，两种反应体系燃烧时，会产生大量烟雾，试验后静置一段时间，烟雾会冷却沉积。经化学检测分析可知，沉积粉末即蒸发出去的金属钐。

此时，通过燃烧前后钛碳钐(钛硼钐)压坯质量 M_1 与燃烧产物质量 M_2(不包括冷却沉积在燃烧底部的粉末)的差值，结合金属钐质量 M，可以估算金属钐的气化效率，即得到两种反应体系下加热气化金属钐的效率，计算公式为

$$\eta = \frac{(M_1 - M_2) \times 100\%}{M}. \tag{8}$$

在采用 40% 金属钐含量的反应体系开展试验时，试验中自蔓延燃烧反应存在偶发不维持现象，因此这里针对金属钐含量为 30% 的情况展开讨论。相同试验条件下，钛碳钐和钛硼钐两种反应体系得到的金属钐气化效率统计结果见图 3，金属钐平均气化效率分别为 29% 和 41%。试验结果表明，钛硼反应体系加热气化金属钐的效率优于钛碳反应体系。

通过图 3 可以看出，实际测试得到的金属钐加热气化效率远低于理论预测，其原因主要有三方面：一是理论计算假设化学反应完全，而实际反应体系不可避免会存在残留，不可能完全反应；二是理论计算中

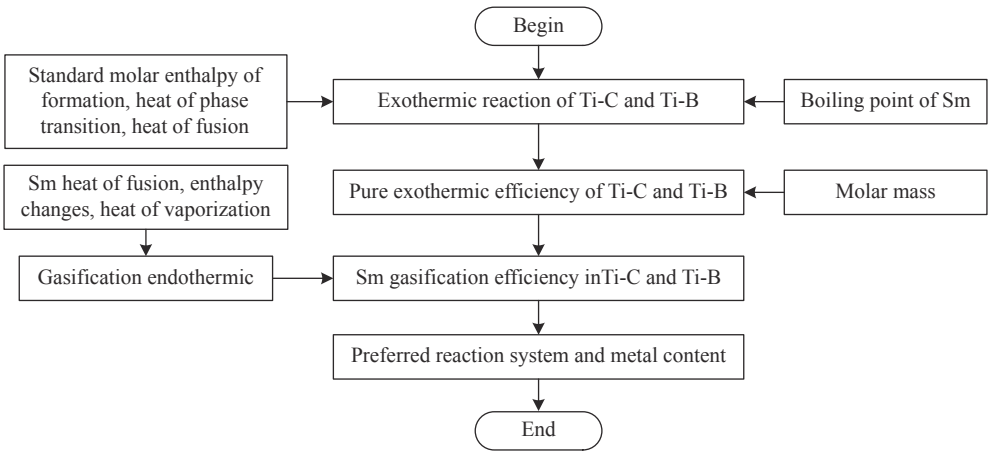


图 1 钛碳和钛硼反应加热气化金属钐理论计算流程

Fig. 1 Theoretical calculation flow chart of Ti-C and Ti-B reaction vaporization samarium

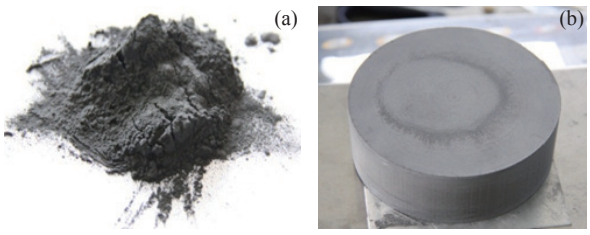


图 2 试验用混合好的粉末（a）及压坯（b）

Fig. 2 Mixed powder (a) and green compact (b) for experiment

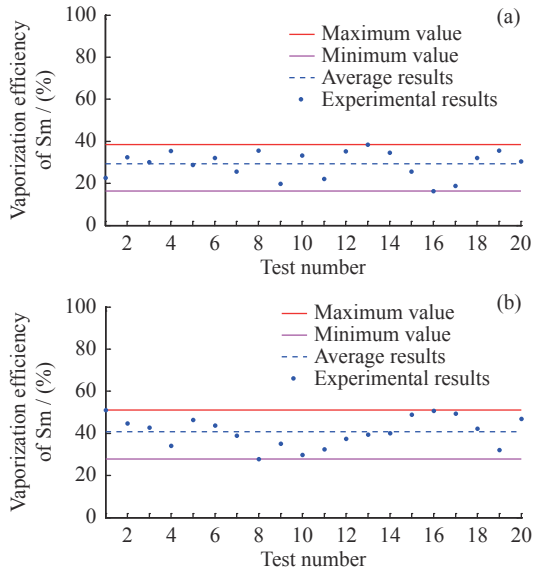


图 3 钛碳（a）与钛硼（b）气化金属钐的效率统计

Fig. 3 Efficiency statistics of Ti-C (a) and Ti-B (b) gasification Sm

假设反应体系释放的热量全部用于加热气化金属钐，而实际燃烧并不是绝热过程，必然伴随着能量损失；三是收集燃烧产物时只考虑了通过烟雾冷却形成的金属钐，而实际燃烧残骸中还存在少量剩余未完全蒸发的金属钐。上述三方面都会对金属钐气化效率的估算带来不利影响，因此实测结果小于理论计算结果，但是试验结果依然具有现实指导意义，验证了理论计算结果，并为后续反应体系和金属钐含量的设计提供了支撑。

3 结论

对金属物质释放试验采用的金属释放物质以及加热气化方法进行分析，确定采用了自蔓延燃烧合成加热方法加热气化金属钐。通过对钛碳、钛硼两种自蔓延燃烧合成反应的热力学研究，得到两种反应的净放热分别为 1.49 $kJ\cdot g^{-1}$ 和 3.07 $kJ\cdot g^{-1}$。将作为稀释剂的金属钐以粉末形式分别添加到两种反应体系中，理论计算给出两种反应体系加热气化金属钐的最大效率分别为 48.9% 和 66.6%。最后，分别对金属钐含量 40% 和 30% 的两种反应体系开展地面模拟试验，试验结果验证了理论计算结果，进一步确认钛硼反应体系加热气化金属钐的效率优于钛碳反应体系，为后续反应体系的设计和探索最优金属钐添加量提供了理论依据。

参考文献

[1] KLOBUCHAR J A, ABDU M A. Equatorial ionospheric irregularities produced by the Brazilian ionospheric modification experiment (BIME)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1989, **94**(A3): 2721-2726

[2] XU Zhengwen, ZHAO Haisheng, XU Bin, *et al*. Latest development of chemical releases in ionosphere[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2017, **32**(2): 221-226 (许正文, 赵海生, 徐彬, 等. 电离层化学物质释放实验最新研究进展[J]. 电波科学学报, 2017, **32**(2): 221-226)

[3] HU Yaogai, ZHAO Zhengyu, ZHANG Yuannong. Numerical simulation on the early dynamics of barium clouds released in the ionosphere[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(8): 089401 (胡耀垓, 赵正予, 张援农. 电离层钡云释放早期动力学行为的数值模拟[J]. 物理学报, 2012, **61**(8): 089401)

[4] ZHU Xiaoli, HU Yaogai, ZHAO Zhengyu, *et al*. Comparison between ionospheric disturbances caused by barium and cesium[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, **69**(2): 029401 (朱肖丽, 胡耀垓, 赵正予, 等. 钡和铯释放的电离层扰动效应对比[J]. 物理学报, 2020, **69**(2): 029401)

[5] ZHAO Haisheng, XU Zhengwen, XU Zhaohui, *et al*. Ionospheric scintillation suppression based on chemical release[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, **68**(10): 109401 (赵海生, 许正文, 徐朝辉, 等. 基于化学物质释放的电离层闪烁抑制方法研究[J]. 物理学报, 2019, **68**(10): 109401)

[6] BERNHARDT P A, SIEFRING C L, BRICZINSKI S J, *et al*. A physics-based model for the ionization of samarium by the MOSC chemical releases in the upper atmosphere[J]. *Radio Science*, 2017, **52**(5): 559-577

[7] BERNHARDT P A, BALLENTHIN J O, BAUMGARDNER J L, *et al*. Ground and space-based measurement of rocket engine burns in the ionosphere[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, **40**(5): 1267-1286

[8] GAO J F, GUO L X, XU Z W, *et al*. Simulation of plasma instabilities artificially induced in the equatorial ionosphere[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, **27**(9): 092902

[9] WANG Jindong, LI Lei, TAO Ran, *et al*. Research on active plasma release experiment in ionosphere[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, **34**(6): 837-842 (王劲东, 李磊, 陶然, 等. 电离层等离子体主动释放试验研究[J]. 空间科学学报, 2004, **34**(6): 837-842)

[10] LIANG Yingjiao, CHE Yinchang, LIU Xiaoxia, *et al*. Thermodynamics Databook of Ingornic Compound[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1993: 339-382 (梁英教, 车荫昌, 刘晓霞, 等. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993: 339-382)

[11] GOLOMB D, HOFFMAN H S, BEST G T. Chemiluminescence of sodium released at night and its relation to the sodium nightglow[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1975, **80**(10): 1363-1366

[12] LI Jianping, NI Wen, QIU Yongxia, *et al*. The application situation and the developping prospect of SHS refractory[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 1999, **18**(4): 309-311 (李建平, 倪文, 邱永侠, 等. SHS耐火材料的应用现状及发展前景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, **18**(4): 309-311)

[13] WANG Xiaofeng, LI Jianwei, CAO Qincun. Study on the thermodynamics of Ti-Si-C system in SHS[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2008, **26**(4): 286-290 (王晓峰, 李建伟, 曹钦存. Ti-Si-C三元体系自蔓延高温合成的反应热力学研究[J]. 粉末冶金技术, 2008, **26**(4): 286-290)

[14] MUKASYAN A S, ROGACHEV A S. Discrete reaction waves: Gasless combustion of solid powder mixtures[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, **34**(3): 377-416

[15] YIN Sheng. Combustion Synthesis[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999: 6 (殷声. 燃烧合成[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 6)

[16] XU Qiang, ZHANG Xinghong, HAO Xiaodong, *et al*. Self-propagating high-temperature synthesis of TiB/Ti composites[J]. *Material Science and Technology*, 2001, **9**(4): 347-351 (徐强, 张幸红, 赫晓东, 等. TiB/Ti复合材料自蔓延高温燃烧合成的研究[J]. 材料科学与工艺, 2001, **9**(4): 347-351)

[17] WANG Guoliang, GAO Yimin, LI Yefei, *et al*. Theoretical study on the stabilities, mechanical and thermal properties of titanium borides[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, **43**(3): 595-600 (王国亮, 高义民, 李烨飞, 等. 硼化钛结构稳定性、力学和热力学性能理论研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, **43**(3): 595-600)

[18] CHEN Yanqun, JIANG Mingxue. Thermodynamic calculation with self -propagating and high-temperature synthesis of TiB_2 powder[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology* (*Natural Science Edition*), 2006, **38**(5): 728-730 (陈燕群, 蒋明学. 自蔓延高温合成TiB_2微粉的热力学计算[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, **38**(5): 728-730)

[19] HE Zuming, FENG Wangjun, XIA Yongmei, *et al*. The thermodynamic calculation and analysis of Self-propagating High-temperature Synthesis TiC-Al[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2008, **20**(3): 35-38 (何祖明, 冯旺军, 夏咏梅, 等. 自蔓延高温合成TiC-Al的热力学计算与分析[J]. 甘肃科学学报, 2008, **20**(3): 35-38)

[20] SHI Jianwen, WANG Yinzhen, LI Xiaolong. Computation and analysis of thermodynamics of self-propagating high-temperature synthesis TiC-Ni cermets[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2005, **26**(1): 93-96 (石建稳, 王引真, 李小龙. 自蔓延高温合成TiC-Ni金属陶瓷的热力学编程计算与分析[J]. 材料热处理学报, 2005, **26**(1): 93-96)

[21] YIN Danfeng. Study on thermodynamics of vanadium self-propagating high-temperature synthesis[J]. *Nonferrous Metals* (*Extractive Metallurgy*), 2014(1): 37-39 (尹丹凤. 自蔓延高温合成金属钒的热力学研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(1): 37-39)

[22] HE Zuming, XIA Yongmei, ZHENG Mingfang, *et al*. Thermodynamics calculation and analysis of self-propagating high-temperature synthesis $MgCNi_3$[J]. *Journal of Jiangsu Polytechnic University*, 2010, **22**(4): 11-14 (何祖明, 夏咏梅, 郑明芳, 等. 自蔓延高温合成$MgCNi_3$的热力学计算与分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2010, **22**(4): 11-14)

[23] LIANG Jianjun, WANG Suwen, CHEN Long, *et al*. Thermodynamics of chemical reaction between H_2S and O_2 in in-situ combustion exhaust[J]. *Journal of Xi 'an Shiyou University* (*Natural Science Edition*), 2019, **34**(1): 95-99,114 (梁建军, 王苏雯, 陈龙, 等. 火驱尾气中H_2S与O_2化学反应热力学研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, **34**(1): 95-99,114)

[24] CHEN Guoxing, CHEN Yun, XIONG Zhenxing. Thermodynamics analysis and influence factor on thermal explosion process of Ti-C-Al-Ni[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2008, **29**(5): 5-10 (陈国星, 陈云, 熊振兴. Ti-C-Al-Ni体系热爆反应的热力学理论分析及其影响因素[J]. 热处理技术与装备, 2008, **29**(5): 5-10)

[25] SONG Mousheng. Investigation of the Formation Process and Growth Kinetics of Combustion Synthesized TiC and ZrC Crystals[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009 (宋谋胜. 燃烧合成TiC、ZrC晶体的形成过程与生长动力学研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009)

(责任编辑: 宋雅娜)