

文章编号:1006-9941(2009)01-0099-04

含 Cs 盐推进剂燃烧产物导电特性研究

周 霖, 谢中元, 邵庆新

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:运用热力学平衡常数法,在计算磁流体发电机用推进剂燃烧产物组成和燃温等热力学参数的基础上,通过应用沙赫方程和燃烧产物电导率计算模型,计算了磁流体发动机用含 Cs 盐复合推进剂燃烧产物的电导率,揭示了电导率随 Cs 盐、铝含量以及电导率随温度、压力的变化规律。结果表明:铝含量一定,当 Cs 盐含量在 5% ~ 10% 时,燃烧产物电导率达到最大;燃温越高、燃烧室压力越小,燃烧产物电导率越高。

关键词:应用物理学;电子浓度;电导率;Cs 盐复合推进剂;燃温

中图分类号:TJ55; O59

文献标识码:A

1 引 言

随着兵器技术的发展,利用推进剂高温产物的电学特性,使推进剂化学能转化为电能,再由电能转化为电磁能^[1],以实现电子战等目标的毁伤成为可能。高温气体的电导率一般要达到几个西门子每米,才具有导电性,如空气温度在 6000 °C,才能达到几个西门子每米的电导率^[2]。然而通常推进剂燃温只有 3000 °C 左右,为了使燃烧产物充分电离,需要在推进剂中加入电离电位较低的物质,使其产物在较低的温度下(如高于 2000 °C)获得较高的电导率。故研究燃烧产物的导电特性,把握影响燃烧产物导电特性的因素和变化规律,对拓宽推进剂燃烧性能研究领域和提高磁流体发电机的能量转化效率具有重要的理论和应用价值。

推进剂是武器系统的动力能源,以燃烧的形式释放能量,固体推进剂主要有双基和复合两大体系,根据其战术目的,主要围绕推进剂的配方、高能、钝感、燃烧性能、低特征信号等开展相关的研究工作。20 世纪 90 年代中期,俄罗斯将推进剂应用于大功率磁流体(MHD)装置,以进行石油、天然气矿床探测和预测地震。该药柱是在双基推进剂配方的基础上添加硝酸铯、硝酸钾等形成的,经燃烧产生的高离子化的导电离子^[2]。然而,推进剂燃烧产物导电特性没有进行充分研究。

燃烧产物电导率计算包含三个方面的内容:一是燃烧产物组成、燃温等热力学参数的计算;二是燃烧产物电子浓度的计算;三是燃烧产物电导率的计算。对于热力学参数计算,通常有平衡常数法^[3]和最小自由能法^[4]两种主要方法,两者都是在化学反应平衡条件下进行的,前者通过化学平衡常数进行计算,后者应用化学平衡能量最低原理进行计算,两种方法都得到了广泛的应用。本文采用平衡常数法,通过迭代,可获得更为准确的结果。而燃烧产物电子浓度一般运用经典的沙赫方程进行计算。对于燃烧产物电导率,国外研究比较早,强电离和弱电离气体电导率已有比较完善的计算模型^[5],而中等电离气体由于影响因素比较多,没有合适的计算模型,利用强电离和弱电离电导率模型的交错法是目前比较常用的方法^[6]。由于含铯盐推进剂的燃烧产物为中等电离气体,采用交错法进行计算是合理的。

本文在前人理论研究的基础上,针对磁流体发电机用含 Cs 盐复合推进剂,开展了其燃烧产物导电特性的理论研究。首先,针对含 Cs 盐复合推进剂配方体系,运用热力学平衡常数法,通过多次平衡迭代,计算其燃烧产物的组成和爆热、燃温等热力学参数;然后,应用沙赫方程和交错法,计算了含 Cs 盐复合推进剂燃烧产物电子浓度和电导率,揭示了燃烧产物电导率随 Cs 盐、铝含量和电导率随温度、压力的变化规律。

2 计算方法

2.1 模型假设^[2]

(1) 假定燃烧产物是均匀的。

(2) 不考虑电离过程中极小可能出现的双重或多重电离现象。

收稿日期:2008-06-30;修回日期:2008-08-26

作者简介:周霖(1962-),男,副教授,博士,从事含能材料应用研究。
e-mail:zhoulin@bit.edu.cn

谢中元(1982-),男,博士,从事磁流体发电技术研究。
e-mail:20602318@bit.edu.cn

2.2 数学模型

2.2.1 产物组分^[3]

通过平衡常数法计算气体平衡组分、爆热、燃温等热力学参数,为电子浓度和电导率计算提供基础参数。假定气相产物分成两组,一组为含量较大的,另一组为含量微少的。一般成分如下:

一组(主要成分): CO_2 CO H_2O H_2 N_2 HCl

二组(次要成分): OH O_2 NO Cl_2 O H N Cl

凝相成分为: Al_2O_3 Fe_2O_3 Cs

硝酸铯在高温下分解生成氧化铯,而氧化铯在高温下不稳定,2500~4000 K时,铯以原子铯存在^[2]。

对于1 kg含铯盐推进剂燃烧后,凝聚相产物质量 Y_s 和气相产物质量 Y_g 分别为:

$$\begin{cases} Y_s = M_{\text{Al}_2\text{O}_3} + M_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + M_{\text{Cs}} \\ Y_g = 1 - Y_s \end{cases} \quad (1)$$

其中, $M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 表示 Al_2O_3 的质量, $M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ 表示 Fe_2O_3 的质量, M_{Cs} 表示Cs的质量。

燃烧气相产物组成由化学平衡方程和质量守恒方程计算。爆热、燃温由化学反应方程和热力学盖斯定律计算。

2.2.2 电子浓度

采用热力学方法计算得到推进剂燃温后,应用沙

赫方程^[5]计算燃烧产物电子浓度,即:

$$\frac{n_e n_i}{n_s} = \frac{(2\pi m_e K T)^{\frac{3}{2}} 2g_i}{h^3 g_0} \exp\left[-\frac{e\varepsilon_i}{kT}\right] \quad (2)$$

其中, n_e 为电子浓度; n_i 为离子浓度,对于平衡等离子体有 $n_i = n_e$; n_s 为中性粒子的浓度; h 为普朗克常量; g_i 为离子基态的统计权重; g_0 为中性原子基态的统计权重; ε_i 为Cs原子的电离电位; k 为玻耳兹曼常数; e 为电子电荷; m_e 为电子质量。

2.2.3 电导率

有了燃烧产物电子浓度和燃烧产物各成分含量,考虑霍尔效应,电导率计算如下^[6-8]:

$$1/\sigma = 1/\sigma_L + 1/\sigma_H \quad (3)$$

式中, σ_L 为弱电离子气体电导率,采用Chapman和Cowling^[6-8]给出的公式计算:

$$\sigma_L = 3.85 \times 10^{-8} n_e / (\sqrt{T} Q) \quad (4)$$

式中, Q 为电子与中性粒子总的碰撞截面, $Q = \sum_{i=1}^k x_i Q_i$, x_i 为第*i*种气体成分摩尔百分数, Q_i 为第*i*种气体成分与电子的碰撞截面。 σ_H 为完全电离气体电导率,采用Spitzer给出的公式^[6-8]:

$$\sigma_H = 1.56 \times 10^{-2} T^{3/2} / \ln(1.23 \times 10^7 T^{3/2} \sqrt{n_e}) \quad (5)$$

表1 电子-中性重粒子平均碰撞截面的近似表达式

Table 1 Approximately expression of average collision section between electron and heavy particle

heavy particle	collision section(10-20 m ²)	source	heavy particle	collision section(10-20 m ²)	source
CO	$(9.5-8.6)\frac{T-2000}{1000}+8.6$	[2]	H ₂	$(12-11)\frac{T-2000}{1000}+11$	[2]
CO ₂	$(20-30)\frac{T-2000}{1000}+30$	[2]	HCl	10	[9]
N ₂	6.9	[2]	Cs	900	[5]
H ₂ O	$(48-63)\frac{T-2000}{1000}+63$	[2]			

3 结果与讨论

磁流体发电机用含铯盐推进剂主要由以下物质组成:HTPB、甲苯二异氰酸酯(TDI)、AP、Al、CsNO₃、添加剂等。计算过程中HTPB、TDI、DOS(癸二酸二异辛酯)以及添加剂的含量固定不变。在给定的压力下,利用2.2.1中所表示的方法求得燃烧产物的组成与温度,由计算得到的燃烧产物求得电子与各成分的碰撞截面并且由2.2.2中沙赫方程求得电子浓度,将碰撞截面和电子浓度代入2.2.3中电导率计算模型求得燃

烧产物电导率,调节铝和硝酸铯的含量得到电导率随两者的变化规律,结果如图1~图3所示。为研究温度和压力对电导率的影响规律,推进剂配方固定不变(硝酸铯含量为6%,铝含量为18%),调节温度和压力得到电导率随两者的变化规律,结果如图4所示。

由图1可知,在一定的范围内燃烧产物电导率随铯盐含量先增大后减少,当铝含量一定时电导率存在最大值,其中初始阶段电导率随铯增加较为剧烈,到达最大值后,降低较为平缓。由图2可知,当铝含量为10%、12%、14%、16%、18%时,铯盐含量的最佳值出现在

5% ~ 10%, 对应电导率最大值分别为 $95.825 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, $112 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, $129.7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, $148.88 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, $169.49 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。由于铯的电离能较低, 燃烧产物电导率开始随着铯含量增加, 产物中导电粒子浓度增加, 燃烧产物导电性显著增加。电导率达到最大值后, 虽然导电粒子浓度较大, 但是铯原子碰撞截面大, 导致导电粒子与导电粒子、导电粒子与中性粒子碰撞机率增加, 燃烧产物中有效导电粒子数降低, 从而导致燃烧产物电导率下降。

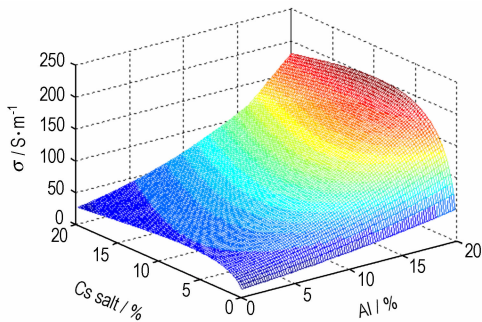


图 1 7 MPa 压力下, 电导率随 Cs 盐含量和铝含量的变化规律

Fig. 1 The change of electrical conductivity along with the change of Cs salt and aluminum content at the pressure of 7 MPa

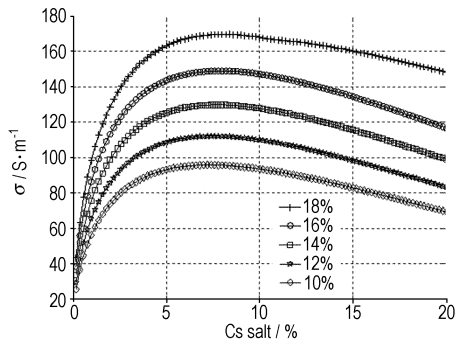


图 2 7 MPa 压力下, 铝含量 10%、12%、14%、16%、18% 电导率与铯盐含量的关系

Fig. 2 Relationship between electrical conductivity and Cs salt content as aluminum content is 10%, 12%, 14%, 16%, 18% at the pressure of 7 MPa

由图 3 可知当铯盐含量为 2%、4%、6%、8%、10% 时, 燃烧产物电导率随着铝含量的增加而增大。这是由于随着铝的增加, 反应释放的热量增加, 燃烧反应温度增加, 有利于产物的电离, 使得燃烧产物电导率增加。由图 3 可以看出当铯盐含量在 5% ~ 10%, 产物电导率随铝含量变化规律是一致, 电导率主要受到燃烧产物温度的影响。

图 4 为电导率随温度和压力的变化规律, 由图 4

可以看出, 电导率随温度的增加而增加, 随着压强的增大而减小。温度增高, 燃烧产物易于电离, 有效导电粒子浓度增加, 导致燃烧产物电导率增加; 压力增大, 使得导电粒子碰撞机率增加, 有效导电粒子数量下降, 导致燃烧产物电导率下降。当压力大于 5 MPa, 温度低于 2740 K 时, 电导率在 $10 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 以下, 而过低的电导率相对于用固体推进剂作为能源的磁流体发电机来说, 工程应用价值不大。

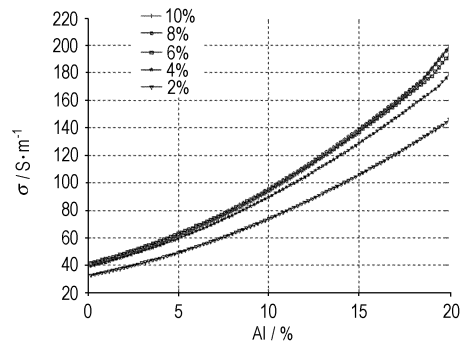


图 3 7 MPa 压力下, Cs 盐含量为 2%、4%、6%、8%、10% 电导率随铝含量的变化规律

Fig. 3 Relationship between electrical conductivity and aluminum content as Cs salt content is 2%, 4%, 6%, 8%, 10% at the pressure of 7 MPa

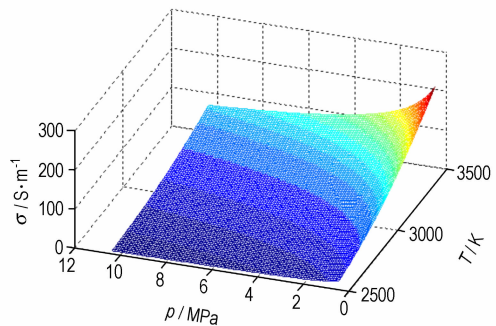


图 4 铯盐浓度为 6%, 铝含量为 18%, 电导率随温度和压力的变化规律

Fig. 4 The change of electrical conductivity along with the change of temperature and pressure when Cs salt content is 6% and aluminum content is 18%

4 结 论

(1) 对于以 HTPB 为基的复合推进剂体系, 磁流体发电机用推进剂的铯盐含量应控制在 5% ~ 10% 范围, 燃烧产物以获得较高的电导率。这为磁流体发电用固体推进剂研制提供理论依据。

(2) 在推进剂中添加铝粉来提高燃烧产物温度和电导率是一种有效的方法, 应用时尽量增大铝含量。

(3) 磁流体发电机用推进剂燃温越高、燃烧室压力越低,越有利于燃烧产物电导率的提高。对于磁流体发电机用发动机,其燃温应不低于 3000 K,发动机设计不宜采用拉瓦尔喷管,而应采用 5 MPa 左右的低压燃烧的设计方案。

参考文献:

- [1] 李希南,严陆光. 爆炸磁流体发电机研究进展及其关键问题[J]. 华北电力技术,2005(5): 13-17.
- [2] 居滋象,吕友昌,荆伯弘,等. 开环磁流体发电[M]. 北京:北京工业大学出版社,1998: 13-28.
- [3] 万俊华. 复合推进剂燃烧产物平衡成分迭代法[J]. 兵工学报,1982(1): 38-46.
- WAN Jun-hua. Iterative calculation method of the combustion products of composite propellants[J]. *Acta Armamentarii*,1982(1): 38-46.
- [4] 宋东明,潘功配,王乃岩. 基于最小自由能法的烟火药燃烧产物预测模型[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(1): 120-122.
- SONG Dong-ming, PAN Gong-pei, WANG Nai-yan. Computational model of pyrotechnical combustion products based on minimum free energy[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006,26(1): 120-122.
- [5] Rosa R J. 磁流体发电[M]. 南京工学院磁流体发电教研组译. 北京:科学出版社,1975: 20-25.
- [6] Hsuan-Cheng Liu, Scott Stuessy W, Frank K Lu. Design of an electrical conductivity channel for shock tunnel[J]. *AIAA*,96-2198,1996.
- [7] Richard J Rosa, Charles H, Krueger. Plasmas in MHD power generation[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*,1991,19(6): 1-15.
- [8] Wilson D R. Experiments on weakly-ionized air and nitrogen plasmas for hypersonic propulsion facility development[J]. *AIAA*, 99-2448, 1999.
- [9] 清泉,杨向东. 慢电子与 HCl 分子弹性碰撞截面的计算[J]. 原子与分子物理学报,1989,6(1): 921-928.
- QING Quan, YANG Xiang-dong. Calculation for total cross-sections and momentum-transfer cross-sections of the elastic scattering of slow electrons by HCl[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*,1989, 6(1): 921-928.

Electrical Conductivity of Combustion Products of Composite Propellant Containing Cs Salt

ZHOU Lin, XIE Zhong-yuan, SHAO Qing-xin

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The electrical conductivity of combustion products of composite propellant containing Cs salt which used in magneto-hydro-dynamic (MHD) generator were calculated through Sahe equation and model of electrical conductivity. The basic thermodynamic parameters used in the model of electrical conductivity were calculated by applying thermodynamic equilibrium constant equation. Through theoretical calculation, the change of electrical conductivity along with the Cs salt content and aluminum content was obtained. The results show that for the given aluminum content, the optimal range of Cs salt content (mass percent) is 5% - 10%; the higher combustion temperature and lower pressure of combustion chamber promote higher electrical conductivity.

Key words: applied physics; electron number density; electrical conductivity; composite propellant containing Cs salt; combustion temperature