

# 非金属凝胶推进剂热力特性计算及分析

张蒙正, 仲伟聪

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 研制了非金属凝胶推进剂热力气动力计算软件, 对某单组元和双组元凝胶推进剂进行了热力气动力计算和分析, 结果表明: 对计算使用的胶凝剂, 胶凝剂质量含量增加, 推力室真空比冲、燃烧室温度和特征速度均下降; 相同条件下, 当胶凝剂在推进剂中质量含量在 1%~3% 范围变化时, 某型单组元凝胶推进剂真空比冲比原推进剂下降约 0.47%~1.94%; 质量含量在 2%~5% 变化时, 在最佳混合比处, 某型双组元凝胶推进剂真空比冲比原推进剂下降约 1%~2.69%。凝胶推进剂的热力特性主要取决于添加的胶凝剂的化学成分和含量。

**关键词:** 凝胶推进剂; 胶凝剂; 热力特性

中图分类号: V513

文献标识码: A

文章编号: (2008) 02-0055-04

## Calculation and analysis of gel propellants thermodynamic characteristics

Zhang Mengzheng, Zhong Weicong

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The calculation and analysis software of no-metallized gel propellants thermodynamic characteristics were developed. The thermodynamic characteristics of gel propellants were calculated and analyzed with this software. The results indicate that increasing of gellant contents in the propellants resulted in lower vacuum specific impulse, combustion temperature and characteristic velocity. The vacuum specific impulse of gel monopropellant is 0.47%~1.94% lower than the original liquid-state propellant at the same calculation condition when gellants content changed from 1% to 3%. The vacuum specific impulse of gel bipropellant is 1%~2.69% lower than the original one at the optimal mixture ratio when gellants content changed from 2% to 5%. The key factors of thermodynamic characteristics of gel propellant are the gellant types and their contents.

**Key words:** gel propellant; gellant; thermodynamic characteristics

收稿日期: 2007-09-26; 修回日期: 2007-10-23。

作者简介: 张蒙正 (1964—), 男, 研究员, 研究领域为喷雾燃烧。

## 1 引言

凝胶推进剂是在液体推进剂中均匀混入固体颗粒(金属或非金属),再添加胶凝剂和助剂(以下简称胶凝剂)而生成的“有形”且与原推进剂物理和化学性质不同的混合物。胶凝剂的主要作用在于通过某种方式将原推进剂分子连接起来,形成一定的网格结构,或者自身形成的结构,使原推进剂填充其中,从而生成凝胶推进剂。胶凝剂的物理化学性质以及与原推进剂的胶凝方式对凝胶推进剂物理化学性能影响极大,国内外学者对此进行了大量研究<sup>[1-3]</sup>。由于多种特定条件的约束,胶凝剂尤其是氧化剂使用的胶凝剂的选择是有限的,生成的非金属类凝胶推进剂的性能通常要比原推进剂低约 2%~5%<sup>[4]</sup>。为了了解胶凝剂对凝胶推进剂热力学参数的影响,进而预估凝胶推进剂热力学特性,分析使用凝胶推进剂的推力室性能,研制了非金属凝胶推进剂热力学参数计算分析软件,并对某单组元和某双组元凝胶推进剂进行了计算分析。

## 2 非金属化凝胶推进剂热力特性计算方法

胶凝剂按化学性质可以分为有机胶凝剂和无机胶凝剂,按其分子结构可以分为高分子胶凝剂、小分子胶凝剂和无机颗粒胶凝剂,而按与原推进剂胶凝过程中分子结合方式又可以分为超分子胶凝剂(也称物理胶凝剂)和化学胶凝剂。就其化学组成而言,通常包括的化学元素有 C、H、O、N、S、Cl、F、Si 等。忽略胶凝剂中含量较小的 S、Cl、F、Si 等微量元素,并假设:

(1) 燃烧室内为等压燃烧,忽略燃烧室中的燃气流速;

(2) 燃烧室中推进剂雾化和混合均匀,燃烧室各个横截面上推进剂混合比处处相等;

(3) 在燃烧室末端,燃烧产物为具有平衡组分的完全气体;

(4) 燃烧产物服从理想气体定律,凝固相的粒子不影响理想气体的特征;

(5) 喷管中的流动为一维定熵过程;

(6) 喷管中化学反应与流动状态的关系服从下列 3 种流动模型之一:平衡流、冻结流及平衡冻结流。

推力室的热力计算是对给定的推进剂在给定条件下,从能量指标上预估推进剂和推力室的理论性能。针对液体推进剂可能选择的高分子或小分子类胶凝剂和助剂,将胶凝剂分子包含的 C、H、O、N 原子的个数和焓值(燃烧热)作为变量,以适应不同胶凝剂和助剂成分;将燃料和氧化剂中胶凝剂的质量含量作为变量,以考虑胶凝剂在推进剂中质量含量的变化;将燃烧室室压、推进剂的混合比、喷管面积比等作为变量,以考虑推力室设计参数的变化,研制了非金属凝胶推进剂热力学参数计算软件。C、H、O、N 系列元素的单组元和双组元液体推进剂热力学参数和热物理参数计算方法在相关文献中均有详细叙述,这里不再赘述。软件计算结果包括燃烧室、温度、特征速度;喷管给定面积比处的燃气温度、理论比冲、气体速度、马赫数、气体常数以及包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、OH、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、NO、CO、H、O、N、 $\text{CH}_4$ 、HCO、HCN、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$  和  $\text{C}_2\text{H}_2$  等在内的燃气成分及摩尔分数。

## 3 典型计算结果及分析

针对某单组元和双组元凝胶推进剂拟选的高分子类胶凝剂和助剂,在不同燃烧室压力和胶凝剂含量下进行了推力室热力学参数计算,预估并分析胶凝剂含量对推力室性能影响。

### 3.1 某单组元凝胶推进剂热力计算

计算条件如下:胶凝剂在推进剂中的质量含量( $\delta$ ): 1%~3%;燃烧室压力( $p_c$ ): 2~12 MPa;喷管面积比: 10。

图 1 是推力室真空比冲( $I_{sv}$ )与氨离解度( $X$ )和 $\delta$ 的关系,图 2 是 $I_{sv}$ 与 $p_c$ 和 $\delta$ 的关系。

分析图 1 和图 2 可见:

(1) 其他参数不变时, $I_{sv}$ 随 $X$ 的增大而减小;

(2) 其他参数不变时, $I_{sv}$ 随 $\delta$ 的增加而降低;

(3) 其他参数相同的条件下, $p_c$ 高则 $I_{sv}$ 高;

(4) 相同条件下, $\delta$ 在 1%~3% 范围内变化时,某单组元凝胶推进剂的 $I_{sv}$ 比原推进剂降低 0.47%~1.94%。

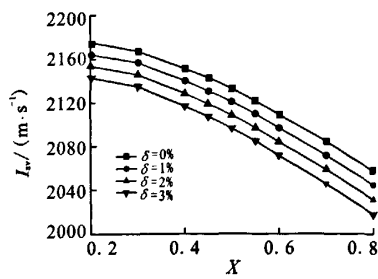


图 1  $I_w$  与  $X$  和  $\delta$  的关系 ( $p_c=4.0\text{MPa}$ )  
Fig.1 Relationship between  $I_w$ - $X$ ,  $I_w$ - $\delta$  ( $p_c=4.0\text{MPa}$ )

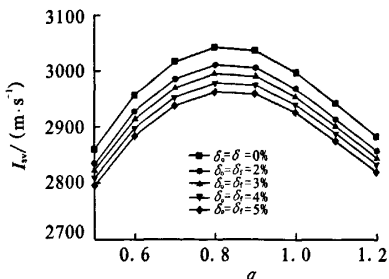


图 3  $I_w$  与  $\alpha$  和  $\delta$  的关系 ( $p_c=4.0\text{MPa}$ )  
Fig.3 Relationship between  $I_w$ - $\alpha$ ,  $I_w$ - $\delta$  ( $p_c=4.0\text{MPa}$ )

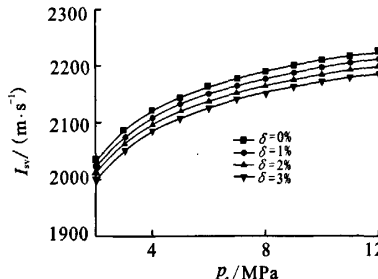


图 2  $I_w$  与  $p_c$  和  $\delta$  的关系 ( $X=0.55$ )  
Fig.2 Fig.1 Relationship between  $I_w$ - $p_c$ ,  $I_w$ - $\delta$  ( $X=0.55$ )

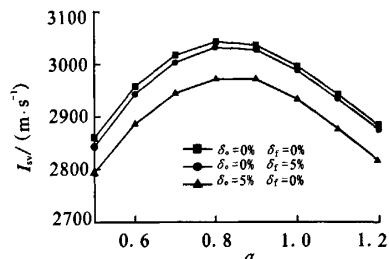


图 4  $I_w$  与  $\alpha$  和  $\delta$  的关系 ( $p_c=4.0\text{MPa}$ )  
Fig.4 Relationship between  $I_w$ - $\alpha$ ,  $I_w$ - $\delta$  ( $p_c=4.0\text{MPa}$ )

目前,某单组元凝胶推进剂已经进行了热试车。试车结果表明:同等条件下,凝胶推进剂比冲确实比原推进剂低。但由于试车的台次较少,试车测量的推力、推进剂质量流量等参数不是很准确,尚不足以验证热力计算参数。

3.2 某双组元凝胶推进剂热力计算

推进剂计算条件如下:胶凝剂在燃料中的质量含量  $\delta_f$ : 0%~5%; 胶凝剂在氧化剂中的质量含量  $\delta_o$ : 0%~5%; 余氧系数  $\alpha$ : 0.1~1.5; 燃烧室压力  $p_c$ : 4~12MPa; 出口面积比: 10。

图 3 是不同的胶凝剂含量 (但  $\delta_f$  与  $\delta_o$  相同) 条件下,  $I_w$  与  $\alpha$  的关系; 图 4 是  $\delta_f$  与  $\delta_o$  不同条件下,  $I_w$  与  $\alpha$  的关系。

图 5 是不同胶凝剂含量 (但  $\delta_o$  与  $\delta_f$  相同) 条件下, 燃烧室理论特征速度 ( $C_{th}^*$ ) 与  $\delta$  的关系; 图 6 是不同胶凝剂含量 (但  $\delta_o$  与  $\delta_f$  相同) 条件下, 燃烧室温度 ( $T$ ) 与  $\delta$  的关系。

图 7~8 是  $\delta_o$  与  $\delta_f$  不同条件下,  $T$  与  $\alpha$  和  $p_c$  的关系。

图 9~10 是  $\delta_o$  与  $\delta_f$  不同条件下,  $C_{th}^*$  与  $\alpha$  和  $p_c$  的关系。

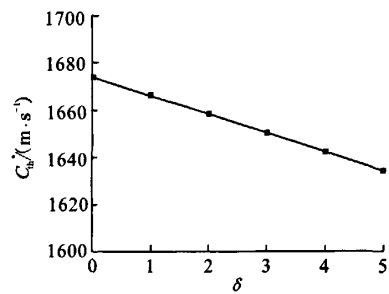


图 5  $C_{th}^*$  与  $\delta$  的关系 ( $p_c=4.0\text{MPa}$ ,  $\alpha=1.0$ )  
Fig.5 Relationship between  $C_{th}^*$ - $\delta$  ( $p_c=4.0\text{MPa}$ ,  $\alpha=1.0$ )

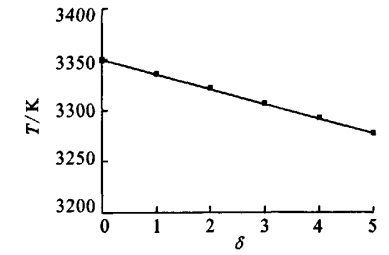
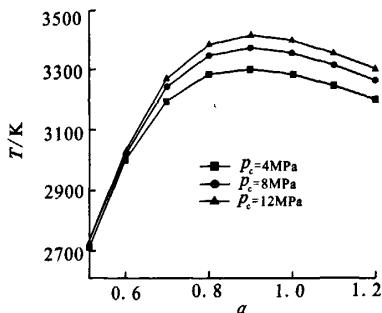
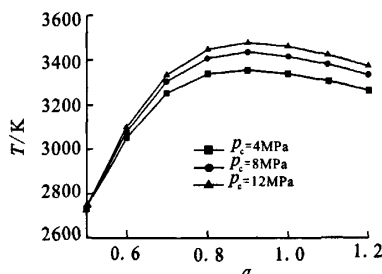
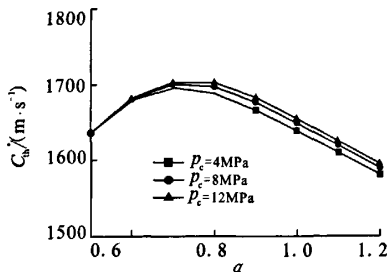
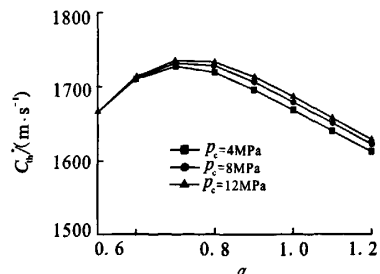


图 6  $T$  与  $\delta$  的关系 ( $p_c=4.0\text{MPa}$ ,  $\alpha=1.0$ )  
Fig.6 Relationship between  $T$ - $\delta$  ( $p_c=4.0\text{MPa}$ ,  $\alpha=1.0$ )

图7  $T$  与  $\alpha$  和  $p_c$  的关系 ( $\delta_o=5\%$ ;  $\delta_r=0\%$ )Fig.7 Relationship between  $T$ - $\alpha$ ,  $T$ - $p_c$  ( $\delta_o=5\%$ ;  $\delta_r=0\%$ )图8  $T$  与  $\alpha$  和  $p_c$  的关系 ( $\delta_o=0\%$ ;  $\delta_r=5\%$ )Fig.8 Relationship between  $T$ - $\alpha$ ,  $T$ - $p_c$  ( $\delta_o=0\%$ ;  $\delta_r=5\%$ )图9  $C_h^*$  与  $\alpha$  的关系 ( $\delta_o=5\%$ ;  $\delta_r=0\%$ )Fig.9 Relationship between  $C_h^*$ - $\alpha$  ( $\delta_o=5\%$ ;  $\delta_r=0\%$ )图10  $C_h^*$  与  $\alpha$  的关系 ( $\delta_o=0\%$ ;  $\delta_r=5\%$ )Fig.10 Relationship between  $C_h^*$ - $\alpha$  ( $\delta_o=0\%$ ;  $\delta_r=5\%$ )

算结果可以看出:

(1) 其他参数不变的条件下, 随着  $\alpha$  从小到大,  $I_w$ 、 $T$  和  $C_h^*$  均呈现先上升后下降的趋势, 并均存在一个最佳  $\alpha$ , 这一点与原推进剂特性相同;

(2) 其他参数不变的条件下,  $p_c$  增加导致  $T$  和  $C_h^*$  均增加, 这也与原推进剂特性相同;

(3) 其他参数不变的条件下,  $\delta$  增加导致  $I_w$ 、 $T$  和  $C_h^*$  均减小;

(4) 胶凝剂质量含量在 2%~5% 变化时, 最佳混合比附近的凝胶推进剂  $I_w$  比原推进剂下降约 1%~2.69%;

(5) 对于本文使用的氧化剂和燃料胶凝剂, 燃料胶凝剂的特性优于氧化剂胶凝剂特性。

## 4 结束语

研制的计算软件能在胶凝剂成分和含量变化条件下进行凝胶推进剂推力室热力气动计算, 能用于胶凝剂品质分析, 用于凝胶推进剂性能和推力室性能预估。某单组元凝胶和某双组元凝胶推进剂的热力计算结果表明, 胶凝剂成分和含量对推进剂性能有一定影响。凝胶推进剂的关键在于胶凝剂, 其对推进剂性能的影响主要体现在氧化剂和燃料的胶凝剂能否分别与原氧化剂和燃料相容, 并能有效地参加化学反应并释热。提高胶凝剂能量含量或者采用高能物质胶凝剂是提高凝胶推进剂性能的有效手段。

## 参考文献:

- [1] Shai Rahimi, Dov Hasan, Arie Peretz, et al. Preparation and Characterization of Gel Propellants and Simulants [R]. AIAA 2001-3264.
- [2] 刘凯强, 屈育龙, 王明珍, 等. 小分子有机胶凝剂和凝胶推进剂的研究进展[J]. 火炸药学报, 2006, 26(4): 23-26.
- [3] 符全军, 杜宗翌, 兰海平, 等. UDMH/NTO 双组元凝胶推进剂的制备及其性能研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 48-53.
- [4] Benvebiste Natan, Shai Rahimi. The Status of Gel Propellants in Year 2000 [C]. Combustion of Energetic Materials. Boca Raton: Begel House, 2001: 172-194.

分析图 3~10, 从获得的双组元推进剂热力计

(编辑: 陈红霞)