

文章编号: 1006-9941(2015)07-0613-06

含能纤维素凝胶推进剂体系燃烧特征与稳定性

张云华¹, 王飞俊¹, 聂中原¹, 吕少一¹, 李洋², 邵自强¹

(1. 北京理工大学北京市纤维素及其衍生材料工程技术研究中心, 北京 100081; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 以羧甲基纤维素甘油醚硝酸酯(CMNGEC)为含能胶凝剂,通过配方设计,得到多组分凝胶推进剂体系。采用平板燃烧测试、热重-微商热重和差示扫描量热法,高速离心稳定性实验分析了新型凝胶推进剂体系的燃烧火焰特征、燃烧残渣量与体系稳定性。结果表明,CMNGEC凝胶推进剂体系燃烧具有周期性的膨胀、破裂、喷射及胶凝剂燃烧四个过程,燃烧残渣比SiO₂凝胶推进剂体系少,其热分解可分成液体组分挥发、CMNGEC热分解和高氯酸铵热分解三个阶段。当CMNGEC胶凝剂含量达到3%,凝胶推进剂体系在670,2000,7000 g高速离心30 min条件下稳定,液体析出率均小于1%。

关键词: 羧甲基纤维素甘油醚硝酸酯(CMNGEC); 胶凝剂; 凝胶推进剂体系; 燃烧特征; 热分解; 稳定性

中图分类号: TJ55; O63

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.001

1 引言

对凝胶推进剂体系的研究,从理论设计与模型建立到火箭发动机地面试验和飞行验证试验,已形成了诸多类别和应用方向^[1-4]。寻找新型含能胶凝剂,提高凝胶推进剂体系能量、贮存与使用的稳定性,改善其燃烧性能是近年来发展的方向,也是凝胶推进剂体系研究的关键问题与技术瓶颈。近年来,通过对惰性纤维素基胶凝剂进行化学改性,已得到两种新型含能纤维素基胶凝剂——羧甲基纤维素硝酸酯(CMCN)和羧甲基纤维素甘油醚硝酸酯(carboxymethyl cellulose nitrate glyceryl ether,CMNGEC)^[5-9]。利用多种测试表征手段对两种含能胶凝剂结构和性能、胶凝剂及凝胶推进剂体系的流变性研究表明:与国外普通惰性胶凝剂羟乙基纤维素(HEC)、羟丙基甲基纤维素(HPMC)、乙基纤维素(EC)等相比,CMCN和CMNGEC不仅具有优良的凝胶性能,且含有一定能量,可考虑用作凝胶推进剂体系的胶凝剂。

凝胶推进剂体系除包括胶凝剂外,一般还包括主要通过物理混合方式加入的金属粉末(Al粉、Mg粉)、高能固体粉末添加剂(如RDX、HMX)等组分。物理

混合制备的含能纤维素基凝胶推进剂体系属于介于固体与液体间的多组分体系,其燃烧性能既不同于固体推进剂的固体端面燃烧,也不同于传统液体推进剂雾化后产生的液滴燃烧^[10-11],燃烧过程中表现出复杂的物理化学现象,目前的研究报道较少。此外,凝胶推进剂弹体、箭体或飞行器在发射等过载运动中,可能会有部分液体组分析出,甚至发生“水击”现象,导致严重后果,这就需要凝胶推进剂体系具有优良的稳定性。

本研究采用CMNGEC含能纤维素作胶凝剂,通过配方设计,得到含纳米铝与不含纳米铝两种新型凝胶推进剂体系。研究了其热分解性能及稳定性,并以SiO₂胶凝剂为参照,对比分析研究了凝胶推进剂体系的燃烧火焰与燃烧残渣。

2 实验部分

2.1 材料与试剂

硝基甲烷(nitromethane, NM),乙二醇丁醚(butyl cellosolve, BCS),分析纯,北京化工厂;亲水型气相SiO₂,99.8%,比表面积380 m²·g⁻¹,粒径7~40 nm;纳米铝粉(AlNPs):平均尺寸40 nm,均为北京科技大学提供;普通铝粉Al(13 μm),高氯酸铵(ammonium perchlorate, AP):6~8目、60~80目与100~140目,西安近代化学研究所提供。羧甲基纤维素甘油醚硝酸酯(CMNGEC):羧甲基取代度DS=0.24,二羟丙基摩尔取代度MS=0.38,含氮量为11.23%,北京理工大学提供。

收稿日期:2014-05-19;修回日期:2014-08-28

作者简介:张云华(1987-),男,博士,主要从事天然高分子含能材料研究。e-mail:yunhuazh@126.com

通信联系人:王飞俊(1972-),女,讲师,主要从事含能材料与天然高分子材料功能化研究。e-mail:wangfj@bit.edu.cn

2.2 凝胶推进剂体系制备

(1) 含胶凝胶剂与 NM/CMNGEC 凝胶推进剂体系的制备见文献[7-9]。

(2) AINPs/CMNGEC/NM 凝胶推进剂体系的制备: 将 2.2 g AINPs 分散于准确称量的 31.75 g 硝基甲烷中, 超声处理 15 min, 再缓慢加入 2.05 g 的 CMNGEC, 待完全溶胀后加入 5 g 乙二醇丁醚助溶剂, 高速搅拌 25 min 后静置 30 min, 即形成均匀的 AINPs/CMNGEC/NM 凝胶推进剂体系。采用不含 AP 的体系测试燃烧残渣量和燃烧火焰的推进剂组分, 配方见表 1; 采用含 AP 的多组分体系测试凝胶推进剂体系的热性能, 制备出固体组分和 CMNGEC 含量不同的三类样品, 依次编号为 Gel-1-65%、Gel-2-70% 和 Gel-3-70%, 配方见表 2。

表 1 凝胶推进剂体系燃烧残渣量和燃烧火焰试验配方(不含 AP)

Table 1 Formulations for combustion residue and burning flame test (excluding AP)

gelling agent/%	gelling agent/g		liquid fuel(NM) /g	additives/g	
	CMNGEC	SiO ₂		AINPs	BCS
5	1.84	-	31.75	-	5.00
5	2.05	-	31.75	2.20	5.00
7	-	2.71	38.75	-	-

表 2 凝胶推进剂体系热性能测试配方(含 AP)

Table 2 Formulation for thermal performance test (including AP)

	sample	mass/g		
		Gel-1-65%	Gel-2-70%	Gel-3-70%
liquid ingredients	NH	30	26	26
	BCS	4.5	4	4
	CMNGEC	0.7	0.6	0.9
solid ingredients	Al (13 μm)	9	14	14
	AP(100 ~140 mesh)	21	21	21
	AP(60 ~80 mesh)	15	15	15
	AP(6 ~8 mesh)	19	19	19

Note: 65%, 70% are the total solid component, respectively.

(3) SiO₂凝胶推进剂体系制备: 将 2.71 g SiO₂ 分散于 38.75 g 硝基甲烷(NM)中, 超声处理 10 min 并高速搅拌 20 min 后静置 30 min, 即可形成所需要的 NM/SiO₂凝胶推进剂体系(表 1)。

2.3 测试表征与计算

(1) 平板燃烧测试^[11]: 将配置好的凝胶推进剂体系(表 1), 取 1 g 放置在金属板或网上, 点燃后观察燃烧过程, 准确称量燃烧残渣量, 测试环境温度 25 °C。

(2) 热性能测试分析^[12]: 将配置好的凝胶推进剂

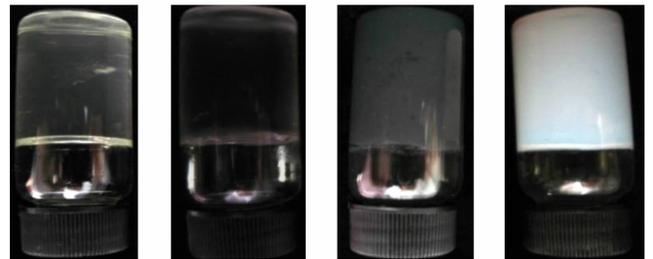
体系(表 2), 采用梅特勒(Mettler Toledo) TGA/DSC1 STAR[®] System 同步热分析仪, 升温速度是 10 °C · min⁻¹, 氮气流量 20 mL · min⁻¹。

(3) 高速离心稳定性试验: 配置好 NM/AINPs/BCS 组成为 31.75/1.1/5.0 (g), CMNGEC 含量为 0.5%、1%、2% 和 3% 的凝胶推进剂体系, 30 g 放入 50 mL 离心管内, 室温下分别在 670, 2000 g 和 7000 g 下离心 30 min。每个离心实验结束节点进行拍照, 取上层液体计算液体析出率。高速离心机: 中佳 HC-3018 型号。

3 结果与讨论

3.1 燃烧火焰和燃烧残渣量

各凝胶推进剂体系外观图片见图 1。由图 1 可见, 纯 CMNGEC 凝胶推进剂体系为透明凝胶, 加入 AINPs、AP 后, 颜色都变为深灰色; SiO₂凝胶推进剂体系呈乳白色。



a. pure CMNGEC b. with AINPs c. with AP and AINPs d. pure SiO₂

图 1 不同凝胶推进剂体系照片

Fig. 1 Photos of different gel propellant systems

图 2 是表 1 中 3 种凝胶推进剂体系平板燃烧图。不含 AINPs 的 CMNGEC 凝胶推进剂体系的平板燃烧测试中, 形成带有一股或多股射流的喷射火焰, 形如特角状(标红圈部分), 具有明显的“簇焰喷射”现象(图 2a)。这可能是由于胶凝剂 CMNGEC 极易成膜, 包裹凝胶推进剂体系外壳, 导致凝胶推进剂体系内部产生气泡所致。当壳内的气压达到某极限值, 就会冲破该凝胶推进剂体系膜壳, 产生爆喷; 当凝胶推进剂体系膜壳内的气体释放完后, 液滴又重新回到前一阶段, 继续燃烧, 接着又形成新的气泡, 再破裂、再喷射, 周期进行; 当推进剂配方中含有 AINPs 时, 凝胶推进剂体系仍有喷射现象, 但与纯 CMNGEC 凝胶推进剂体系相比, 喷射现象明显减弱, 且火焰中有“亮线”出现(图 2b), 这可能是 AINPs 颗粒从凝胶推进剂体系

内部暴露至表面后进一步被点燃产生的；图 2c 为纯 SiO_2 凝胶推进剂体系的平板燃烧测试火焰图。由图 2c 可见，纯 SiO_2 凝胶推进剂体系燃烧较平稳，高温下燃气不断从凝胶推进剂体系内部穿至表面，原因是 SiO_2 属于惰性无机胶凝剂，不像聚合物类胶凝剂会形成包裹层，在燃烧过程中火焰平稳。反复实验表明，含能 CMNGEC 基凝胶推进剂体系的燃烧过程与纯 SiO_2 凝胶推进剂体系不同，CMNGEC 凝胶推进剂体系具有凝胶液滴周期性的膨胀、破裂、喷射等特征，其燃烧机理如图 3 所示：燃烧过程中，液体燃料硝基甲烷在凝胶液滴表面不断蒸发，导致液滴表面胶凝剂含量增加并最终形成弹性胶凝剂膜；胶凝剂膜形成后，液滴内部的液体燃料进一步蒸发且蒸气不能穿透胶凝剂膜，导致凝胶液滴内部产生大量气泡且胶凝剂膜厚度随液滴尺寸增大而逐渐变薄；当膜内气压达到极限值，胶凝剂膜破裂，液滴内的燃料蒸气喷出，形成喷射火焰。之后再重复上述膨胀-破裂-喷射过程；液滴内部液体燃料蒸发-燃烧殆尽后；含能胶凝剂的壳受热开始分解并最终引燃、燃烧，产生极少量的含碳残渣。

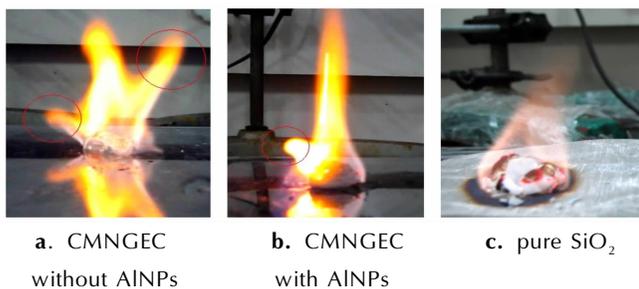


图 2 不同凝胶推进剂体系的平板燃烧火焰图

Fig. 2 Flat flame of different gel propellant systems

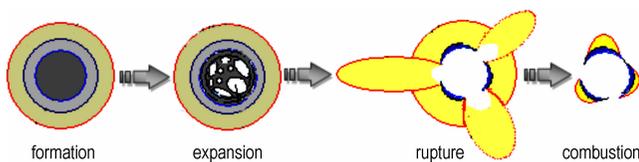


图 3 CMNGEC 凝胶液滴燃烧过程机理

Fig. 3 Combustion mechanism of CMNGEC gel droplet

燃烧后，纯 CMNGEC、 SiO_2 、含 AlNPs 凝胶推进剂体系的燃烧残渣见图 4。由图 4 可见，纯 CMNGEC 凝胶推进剂体系燃烧残渣最少（图 4a），残渣量小于 0.2%，其原因是氮含量为 11.23% 的 CMNGEC 属于含能胶凝剂，在推进剂燃烧后燃尽；其次是含 AlNPs 的 CMNGEC 凝胶推进剂体系（图 4b），残渣率约为 2%，残渣除了残碳，还有 AlNPs 的未燃尽残渣； SiO_2 凝胶推进剂体系残渣率高达 7%（图 4c），原因是 SiO_2

本身并不能燃烧，致使残渣量最大。残渣率高不但影响凝胶推进剂体系燃烧效率，还会对火箭发动机的燃烧室产生很大的影响，固体残渣颗粒会造成堵塞、燃烧室长期冲刷破坏等。

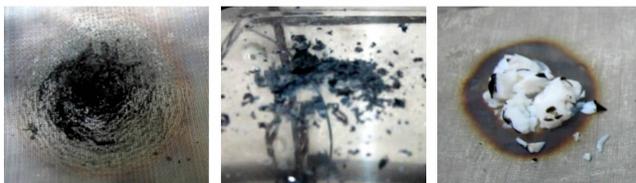
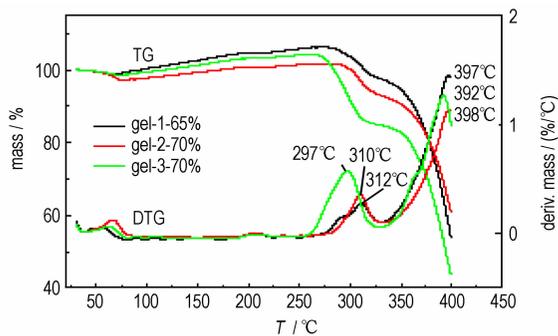


图 4 各凝胶推进剂体系的燃烧残渣

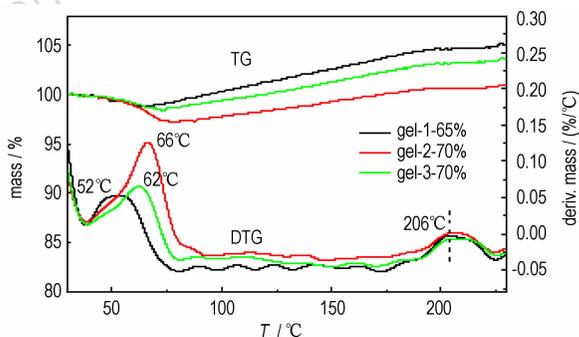
Fig. 4 Combustion residues of different gel propellant systems

3.2 含 AlNPs 和 AP 的 CMNGEC 凝胶推进剂体系的热分解性能

分析 Gel-1-65%、Gel-2-70% 和 Gel-3-70% 三个配方的热分解与吸热/放热过程，三种凝胶推进剂体系 TG/DTG 曲线见图 5。



a. overall view



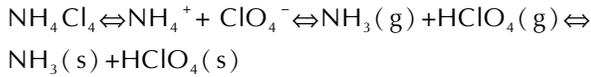
b. partial view

图 5 三种凝胶推进剂体系的 TG-DTG 曲线

Fig. 5 TG-DTG curves of three gel propellant systems

由图 5 可知，含 AP 和 Al 粉的凝胶推进剂体系热分解可分成三个阶段：第一阶段，在 40 ~ 90 °C，属于液体燃料组分的受热挥发阶段，在 DTG 曲线上也出现明显吸热峰。液体组分含量较高的 Gel-1-65% 初

始挥发温度最低,为 52 °C; 第二阶段,在 150 ~ 250 °C,为含能胶凝剂的热分解阶段,CMNGEC 实测分解温度在 206 °C 左右(图 5b),由于其在组分中含量不到 1%,该分解峰只在图 5b 中看到; 第三阶段,在 250 ~ 450 °C,该阶段为 AP 的分解阶段,明显分两个阶段^[3]: 首先是 250 ~ 330 °C,为 AP 离解和升华过程的低温放热分解阶段:



接着是 $\text{HClO}_4(\text{g})$ 的系列降解过程及产物对部分 $\text{NH}_3(\text{g})$ 的氧化反应; 其次是 350 ~ 450 °C,为 AP 的高温分解阶段,也是主要的分解阶段,该阶段不仅在气相中进行 ClO_4^- 氧化 NH_3 的反应,也在凝聚相表面发生 AP 的分解过程。

图 6 为三种凝胶推进剂体系的 DSC 曲线。与图 5 不同的是,DSC 曲线上 CMNGEC 分解峰大部分被 AP 的吸热尖峰和放热尖峰所掩盖。240 ~ 250 °C 为 AP 的晶型转变吸热过程,AP 由低温的斜方晶型可逆的转变到高温的立方晶型^[4]。280 ~ 320 °C 为 AP 第一分解放热阶段,该阶段为 AP 的低温分解,AP 部分

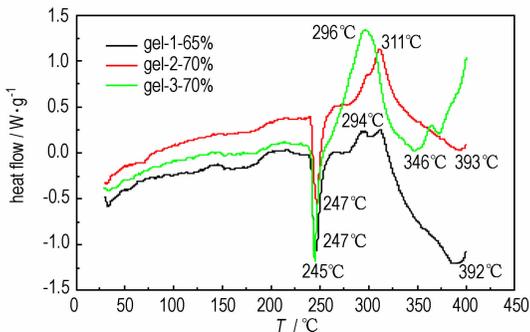


图 6 三种凝胶推进剂体系的 DSC 曲线

Fig. 6 DSC curves of three gel propellant systems

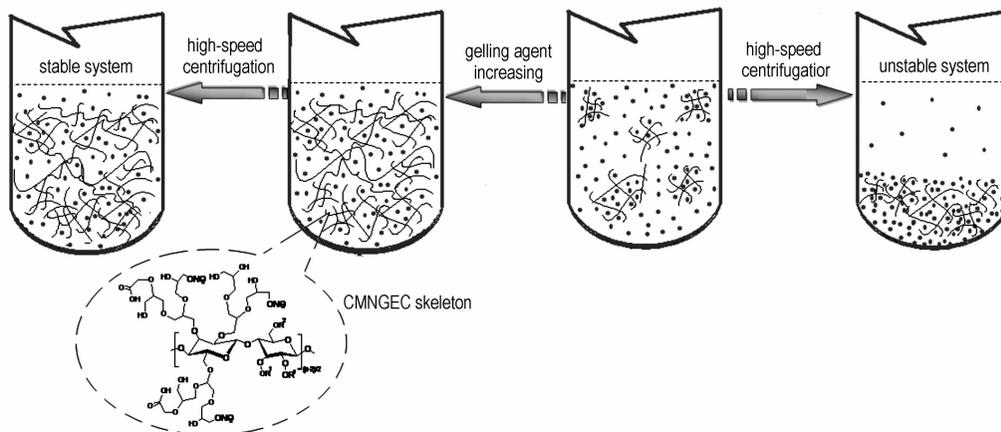


图 7 含 AINPs 的 CMNGEC 凝胶推进剂体系稳定性机理

Fig. 7 Stability mechanism of CMNGEC gel propellant system with AINPs

分解生成中间产物,与纯的 AP 在 320 °C^[13] 左右出现第一个放热峰相比,凝胶推进剂体系中 AP 的放热峰提前了; 纯的 AP 在 480 °C 左右出现第二阶段热分解峰,为 AP 的高温分解峰^[12],AP 完全分解为挥发性产物,由于测试范围有限,仅能看到曲线的拐点,不能观察到凝胶推进剂体系中第二个明显的放热峰。但不难看出,各凝胶推进剂体系中 AP 的第二个放热峰均比纯 AP 的放热峰有所提前。这可能是因为,Al 对 AP 高温分解反应有很好的催化活性,铝粉可使 AP 高温分解温度降低^[9]。

3.3 含 AINPs 的 CMNGEC 凝胶推进剂体系稳定性

不同凝胶推进剂体系离心沉降稳定性机理如图 7 所示(小黑点代表 AINPs)。由图 7 可见,随着胶凝剂含量的增加,胶凝剂大分子链形成的三维网络结构相对密度逐渐变大,并能包裹一定量 AINPs,部分或完全抵抗离心力作用,AINPs 仅有少量沉降,甚至无沉降。

稳定性试验结果见图 8 和表 3,从图 8 和表 3 可知,AINPs 含量相同,CMNGEC 含量不同的凝胶推进剂体系抗离心能力有明显差别。初始状态下,各凝胶推进剂体系均保持均匀稳定的状态(图 8a),离心 30 min 后,除含 3% CMNGEC 样品无分层,其他样品均出现部分分层,且分层现象随着胶凝剂含量增加而减弱(图 8b,图 8c,图 8d); 670 g 离心力作用 30 min 后,含 0.5% 和 1% CMNGEC 样品液体析出率大于 70%,含 2% CMNGEC 样品液体析出率仅 8%,含 3% CMNGEC 样品液体析出率不到 0.5%; 2000 g 离心力持续 30 min 后,含 2% CMNGEC 样品液体析出率达到 32%,含 0.5%、1% 和 3% CMNGEC 样品的液体析出率相比 670 g 离心力条件下几乎无变化; 在 7000 g 离心力持续 30 min 后,含 2% CMNGEC 样品

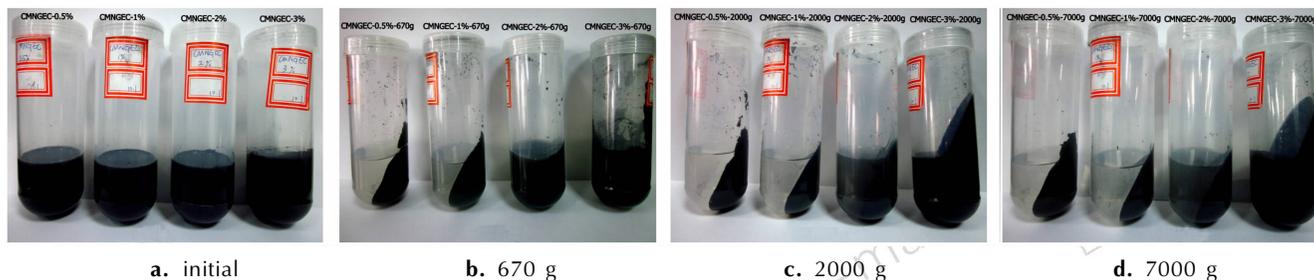


图8 不同胶凝剂含量凝胶推进剂体系离心实验后照片

Fig.8 Photos of gel propellant systems with different gelling agent contents after centrifugal test

液体析出率增加到54%，含3%CMNGEC样品液体析出率仍不到1%。可见，CMNGEC胶凝剂含量达到3%时，凝胶推进剂体系具有很好的稳定性。

将不同胶凝剂含量的凝胶推进剂体系分别在80℃放置24,48 h及室温25℃下放置7 d，液体析出率见表4。由表4可见，初始各凝胶推进剂体系均保持均匀、稳定；80℃放置24 h后，含0.5%和1%CMNGEC样品液体开始析出，含0.5%CMNGEC样品液体析出率接近40%，1%CMNGEC样品液体析出率接近30%；含2%CMNGEC样品有微量液体析出，析出率接近2%；但含3%CMNGEC样品基本无析出(0.2%)。

表3 不同离心力作用下凝胶推进剂体系的液体析出率随胶凝剂含量的变化

Table 3 Liquid precipitation rates of gel propellant system changing with different gelling agent content under different centrifugal force

CMNGEC/%	liquid precipitation rate/%		
	670 g	2000 g	7000 g
0.5	74.11	74.38	74.73
1	70.29	72.61	73.88
2	8.28	32.45	54.67
3	0.45	0.51	0.56

表4 不同胶凝剂含量和不同温度下放置不同时间后凝胶推进剂体系的液体析出率

Table 4 Liquid precipitation rate of gel system with different gelling agent content under different temperature after different aging time

CMNGEC /%	liquid precipitation rate at 80℃/%		liquid precipitation rate at 25℃/%
	24 h	48 h	7 days
1	29.68	35.46	44.41
2	1.96	4.43	2.88
3	0.21	0.89	0

80℃放置48 h后，含0.5%、1%、2%和3%CMNGEC各样品液体析出率分别增加至50.17%、35.46%、4.43%和0.89%；室温25℃下放置7 d后，含0.5%、1%CMNGEC样品液体析出率达到64.59%和44.41%；含2%CMNGEC样品液体析出率为2.88%，含3%CMNGEC样品无液体析出。可见，升高温度，凝胶推进剂体系在较短时间内出现较大液体析出率；同一凝胶推进剂体系的液体析出率随测试时间的延长而增大；相同测试条件下，随着胶凝剂含量的增加，凝胶推进剂体系的抗析出能力逐渐增强，到临界值(3%)则几乎无析出。

4 结论

(1) 纯CMNGEC凝胶推进剂体系燃烧火焰出现“簇焰喷射”现象，燃气喷发而连续伴有犄角状的喷射火焰，具有凝胶液滴的周期性的膨胀、破裂、喷射及凝胶剂燃烧特征。含AINPs的CMNGEC凝胶推进剂体系燃烧火焰出现“亮线”或“亮点”，仍保留“簇焰喷射”现象，而SiO₂凝胶推进剂体系则没有“簇焰喷射”这一特征。

(2) 纯CMNGEC凝胶推进剂体系的燃烧残渣量最小，其次是添加AINPs的凝胶推进剂体系，残渣量最大的是SiO₂凝胶推进剂体系。

(3) 含AP和Al粉的凝胶推进剂体系热分解测试结果表明，凝胶推进剂体系热分解可分成液体组分挥发、含能胶凝剂热分解和AP热分解三个阶段，且凝胶推进剂体系中加入Al, AP, 放热峰提前。

(4) CMNGEC胶凝剂含量达到3%时，在670, 2000, 7000 g高速离心30 min条件下，液体析出率均小于1%，凝胶推进剂体系相对稳定。

参考文献：

[1] 宋明德. 一种新型膏体脉冲火箭发动机的理论和试验研究[D].

- 西安: 西北工业大学, 1997.
SONG Ming-de Theoretical and experimental study on a new paste pulse rocket engine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1997.
- [2] Schindler R C, Olson A M, Arnold C J. A gelled propellant sustainer stage[J]. *AIAA*, 1992: 1122
- [3] Song M D, Ye D Y. Study of a new pasty propellant multi-pulse rocket motor[J]. *AIAA*, 1998: 3489
- [4] Yasuhara W K, Olson A M, Finato S R. Advanced gel propulsion controls for kill vehicles[J]. *AIAA*, 1993: 1993-2636
- [5] 吕少一, 邵自强, 王飞俊, 等. 羧甲基纤维素醋酸丁酸酯水分散体的流变性能研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 2010, 26(8): 54-57.
Lü Shao-yi, SHAO Zi-qiang, WANG Fei-jun, et al. Rheological properties of carboxymethyl cellulose acetate butyrate water dispersions[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2010, 26(8): 54-57.
- [6] 吕少一, 邵自强, 王飞俊, 等. 水可分散体羧甲基纤维素醋酸丁酸酯结构与性能研究[J]. *高分子通报*, 2011(12): 92-98.
Lü Shao-yi, SHAO Zi-qiang, WANG Fei-jun, et al. Studies on structure and properties of water dispersible carboxymethyl cellulose acetate butyrate[J]. *Polymer Bulletin*, 2011(12): 92-98.
- [7] 吕少一, 邵自强, 王飞俊, 等. 新型含能胶凝剂的制备及其凝胶流变性能[J]. *火炸药学报*, 2011, 34(1): 49-53.
Lü Shao-yi, SHAO Zi-qiang, WANG Fei-jun, et al. Preparation of new energetic gelator and rheological properties of its gel[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(1): 49-53.
- [8] 吕少一, 邵自强, 张振玲, 等. 新型刺激响应性纤维素基含能凝胶的流变性能研究[J]. *高等学校化学学报*, 2012, 33(2): 208-214.
Lü Shao-yi, SHAO Zi-qiang, ZHANG Zhen-ling, et al. Rheological properties of new stimuli-responsive energetic gels[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2011, 34(1): 49-53.
- [9] 吕少一, 邵自强, 张振玲, 等. 新型含能纤维素基凝胶推进剂流变性能研究[J]. *化学学报*, 2012, 70(2): 104-110.
Lü Shao-yi, SHAO Zi-qiang, ZHANG Zhen-ling, et al. Studies on rheological properties of new energetic cellulose based gelled propellant[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2012, 70(2): 104-110.
- [10] Yair Solomon, Benveniste Natan, Yachin Cohen. Combustion of gel fuels based on organic gellants[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156: 261-268.
- [11] 张蒙正. 凝胶燃料单滴燃烧的建模、实验及应用[J]. *火箭推进*, 2010, 36(3): 1-9.
ZHANG Meng-zheng. Modeling, experiment and application of single droplet combustion for gel fuel[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2010, 36(3): 1-9.
- [12] 刘继华. 火药物理化学性能[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
LIU Ji-hua. Physical and chemical properties of gunpowder[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [13] 刘子如, 阴翠梅, 孔扬辉, 等. 高氯酸铵的热分解[J]. *含能材料*, 2000, 8(2): 75-79.
LIU Zi-ru, YIN Cui-mei, KONG Yang-hui, et al. Thermal decomposition of ammonium perchlorate[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000, 8(2): 75-79.

Combustion Characteristics and Stability of Energetic Cellulose Based Gel Propellant System

ZHANG Yun-hua¹, WANG Fei-jun¹, NIE Zhong-yuan¹, Lü Shao-yi¹, LI Yang², SHAO Zi-qiang¹

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing Cellulose and its Derivatives Materials Engineering Technology Research Center, Beijing 100081, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Multi-component gel propellant systems were obtained using carboxymethyl cellulose nitrate glycerol ether (CMNGEC) as gelling agent. The combustion flame characteristics, combustion residues and system stability of the gel propellant systems were analyzed by flat flame test, thermogravimetry-derivative thermogravimetry, differential scanning calorimetry techniques and high speed centrifugal stability test. Results show that the combustion behavior of CMNGEC system contains processes of periodic swelling, cracking, jet and burning of gelling agent, and the combustion residues are less than that of SiO₂ gel propellant system. The thermal decomposition of CMNGEC gel propellant system can be divided into three stages: the volatilization of liquid component, thermal decomposition of CMNGEC gelling agent and thermal decomposition of ammonium perchlorate. When the content of gelling agent is up to 3%, the gel propellant system is stable at 670 g, 2000 g and 7000 g centrifugation conditions for 30 min and the liquid precipitation rate is less than 1%.

Key words: carboxymethyl cellulose nitrate glycerol ether (CMNGEC); gelling agent; gel propellant system; combustion characteristics; thermal decomposition; stability

CLC number: TJ55; O63

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.001