

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.01.003

几种光敏推进剂的热分解动力学及气相产物研究*

华佐豪^① 郭宁^① 吴立志^② 章皓男^② 沈瑞琪^②

①上海航天动力技术研究所(上海,201109)

②南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘要] 通过热重差热分析法(TG-DTA)测定了不同配方的光敏推进剂的热分解过程,分别获得了不同升温速率下的峰温。根据 Kissinger 方程,计算了光敏推进剂的表现活化能和指前因子,并分析了不同配方的区别。通过质谱联用分析技术测定了热分解过程的气相产物种类,并使用 NASA-CEA 计算了不同配方绝热燃烧后的气相产物的质量分数。结果表明,纳米碳粉和酚醛树脂的添加稀释了样品的纯度,使不同配方的表现活化能和指前因子存在差异,热分解升温速率会影响反应平衡程度,升温速率提高,对反应热的释放或吸收起到阻碍作用,光敏推进剂热分解后的70%(质量分数)气相产物为氮气。光敏推进剂的激光点火试验表明:硝酸铵(AN)作为氧化剂的效果最好。

[关键词] 光敏推进剂;氧化剂;热分解动力学;气相产物

[分类号] TQ560.7;V51

Study on Thermal Degradation Kinetics and Gaseous Products of Laser Sensitive Propellants

HUA Zuohao^①, GUO Ning^①, WU LiZhi^②, ZHANG Haonan^②, SHEN Ruiqi^②

① Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute (Shanghai, 201109)

② School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Processes of thermal decomposition of laser sensitive propellants were analyzed by TG-DTA, and peak-temperatures at different heating rates were obtained. Activation energy and pre-exponential factor of laser sensitive propellants were calculated and governed by the Kissinger Equation and the differences of different formulations were analyzed. The gaseous products of thermal decomposition were measured by mass-spectrometric, and the mass fraction of gaseous were calculated by NASA-CEA. The results show that the purity of formula is diluted due to the addition of Nano-C and PF, which may vary the activation energy and pre-exponential. The heating rates can influence the equilibrium of reaction, which means the higher heating rates, the lower the reaction heat. The 70% (mass fraction) of gaseous product is nitrogen. Results from laser ignition experiment show that laser sensitive propellant containing AN performs as a superior oxidant.

[KEYWORDS] laser sensitive propellant, thermal decomposition, reaction kinetics, gaseous product

引言

光敏推进剂是在常见的产气剂中加入氧化剂、吸光剂、黏结剂以及其他添加剂制成的一类清洁推进剂^[1]。因产气剂含氮量高,含能较高且热分解后生成气体多为氮气(N₂)等气体,所以这类推进剂在激光照射下可发生剧烈的化学反应,产生大量气体,具有较高的做功能力;激光停止照射后,化学反应释

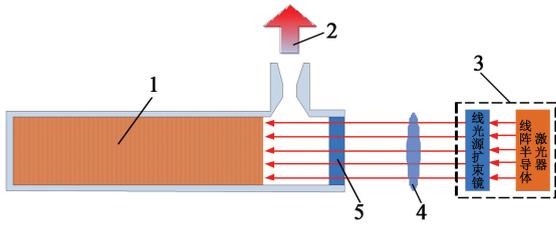
放的热量不足以维持自身持续反应,反应会迅速结束,这种固体推进剂具备了激光可控燃烧的特质,从而成为激光化学联合固体微推进的重要推进剂类型^[2]。激光化学联合推进就是利用激光可控燃烧的技术^[3],如图1所示,其原理如下:激光经光路整理辐照在推进剂表面,推进剂积累能量后燃烧,激光辐照能量可以控制推进剂的点火、熄火和燃速,从而控制燃烧室压强,进而可以调节推力;推进的能量来源于激光能量和化学能量的耦合、叠加作用,使得推

* 收稿日期:2017-11-29

基金项目:国防基础科研预研项目(JCKY2016203B090)

第一作者:华佐豪(1992-),男,硕士,主要研究方向为激光微推进技术。E-mail:1304216979@qq.com

进系统的功率负载大大降低;凝聚相分解的速率取决于光能和燃气热反馈的联合作用。推进器结构和激光化学耦合能量共同决定了推力的调节范围、冲量的精度和比冲的大小^[4-8]。



1 - 推进剂; 2 - 气流; 3 - 激光器系统;
4 - 透镜; 5 - 透窗。

图 1 激光化学联合推进原理图

Fig. 1 Laser assisted combustion of solid propulsion technology

相关文献研究结果表明,红外激光对物质的作用主要为热作用机理^[9],可以认为光敏推进剂在激光的照射下发生的是温度升高的热分解过程。现代热分析技术是研究含能材料热分解过程的科学有效的方法,它获得的结果是物质在较低升温速率下热平衡分解过程的质量变化和能量变化,与其联用的质谱测量技术和傅里叶红外光谱技术可以对热分解的产物进行分析和表征^[10-11]。

由于激光化学联合固体微推进技术概念较新,国内外缺少对光敏推进剂的热分析试验数据。本文中,通过热重差热分析法(TG-DTA)、差示扫描量热法和四极杆质谱(TG-DSC-DTA)联用技术,对光敏推进剂的反应动力学参数和分解反应进行分析计算,为光敏推进剂的设计提供理论和试验数据。

1 方法

1.1 样品制备

6种光敏推进剂样品由南京理工大学化工学院提供,配方(质量分数)见表1。基础配方中,产气剂均选用五氨基四唑(5-ATZ),区别主要来自其中的氧化剂,分别为硝酸铵(AN)或硝酸胍(GN)。根据不同的基础配方,将测试样品编号记为含AN氧化剂的AN-1、AN-2、AN-3和含GN氧化剂的GN-1、GN-2、GN-3。基础配方材料在自然状态下均为白色粉末,试验用激光不能直接点火使其燃烧。碳黑粉末的添加可以提高推进剂的吸光性,使得推进剂易被激光点燃^[12-13],酚醛树脂作为黏结剂可以提高推进剂和碳黑粉末的结合,以便于药剂的混合和药柱的制备^[14]。药柱的制备方法采用模压成型的方法,

表 1 不同配方光敏推进剂的组成(质量分数)

Tab. 1 Component of different laser sensitive propellants (mass fraction)

配方编号	基础配方 (AN 或 GN)	吸光剂 (碳黑粉末)	黏结剂 (酚醛树脂)	%
AN-1	100	0	0	
AN-2	95	5	0	
AN-3	94	5	1	
GN-1	100	0	0	
GN-2	95	5	0	
GN-3	94	5	1	

将药粉混合均匀后放入模具中,在 500 kg 力下压制成型。

1.2 仪器和测试条件

热重差热分析法: TG-DTA 联合分析仪,德国 Netzsch EXSTAR 6200。试验在流量 20 mL/min 的氮气氛围下进行,常压(0.1 MPa);带盖氧化铝坩埚样品池;升温程序设定为 30 ~ 500 °C,升温速率 β 分别为 5、10、20 和 100 K/min。

差示扫描量热法和四极杆质谱联用技术:德国 Netzsch STA449F3-QMS403C。试验在流量为 30 mL/min 的氮气氛围下进行,常压(0.1 MPa);带盖氧化铝坩埚样品池;升温程序设定为 40 ~ 800 °C,升温速率 β 为 50 K/min。

2 热分析结果

2.1 动力学参数计算

光敏推进剂在升温速率分别为 5、10、20 和 100 K/min 下,氮气环境,压力 0.1 MPa 时的 TG-DTA 曲线见图 2。从图 2 获得光敏推进剂的热分解参数见表 2 和表 3。

从图 2 和表 2 可知,随升温速率 β 的增大,熔融峰温有少许升高,热分解峰温 T_p 有较大升高,熔融吸热增大,分解热变化不大,熔融吸热过程比较明显。根据表 2 中不同配方的光敏推进剂在不同升温速率 β 时的 T_p 数据,用 Kissinger 计算热分解的动力学参数。

Kissinger 方程

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = \ln\frac{AR}{E_a} - \frac{E_a}{RT_p} \quad (1)$$

式中: β 为热重分析升温速率, K/s; T_p 为热分解峰温, K; A 为反应速度常数指前因子, s^{-1} ; R 为摩尔气

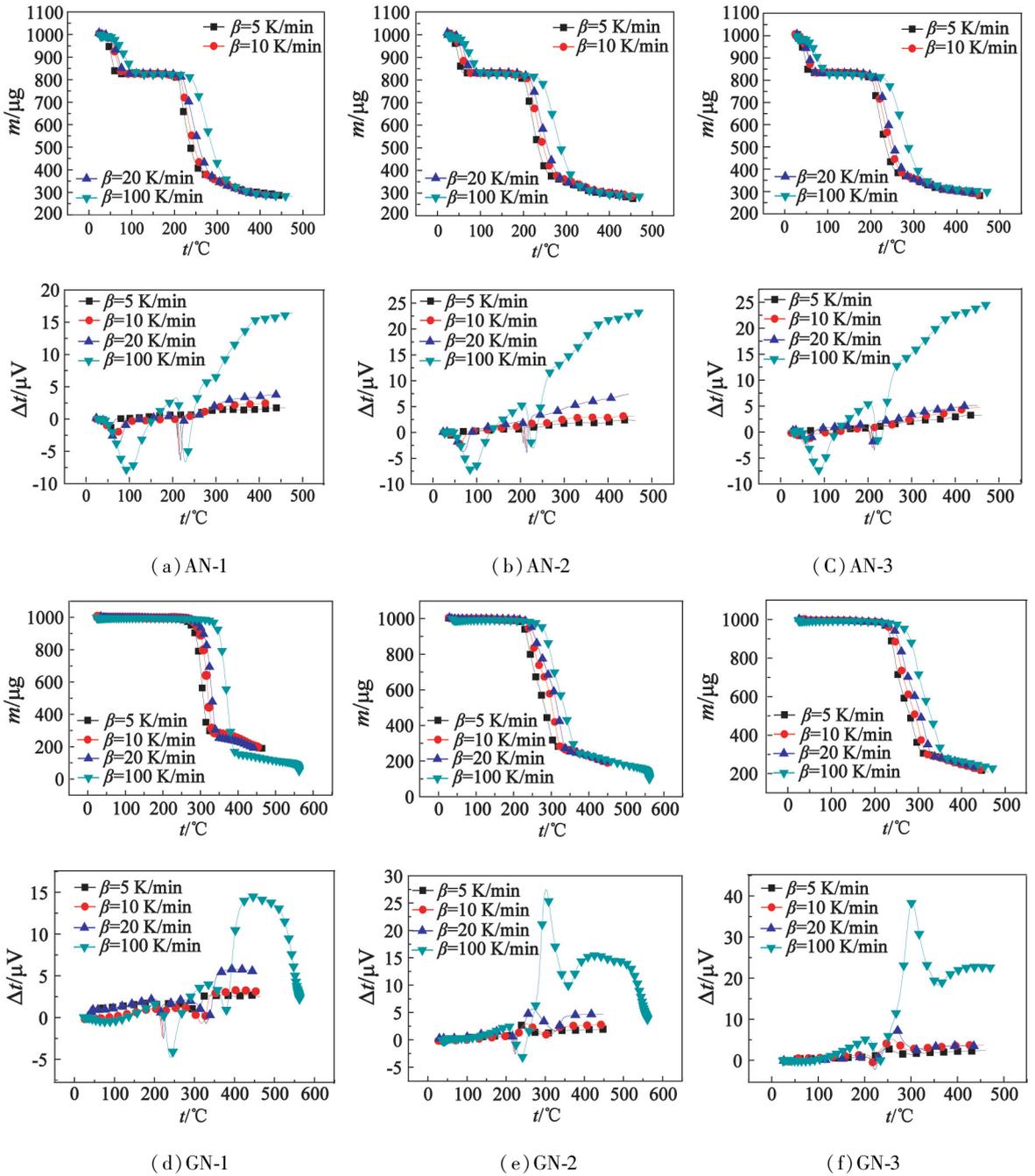


图2 不同光敏推进剂的TG-DTA曲线
Fig.2 TG-DTA curves of different laser sensitive propellants

体常数; E_a 为表观活化能, J/mol。

将式(1)进行 $\ln(\beta/T_p^2) \sim 1/T_p$ 的线性回归, 获得表观活化能 E_a 和 A 。

从表3中可以看出, 对于配方 AN、GN 系列, 吸热峰与放热峰的分布较为分散, 相互之间的影响较小, 线性回归得到的相关系数都在 0.99 以上, 计算得到的指前因子和活化能准确可信; 在 AN-2、AN-3 和 GN-2、GN-3 配方中, 碳黑粉末、酚醛树脂的添加量只占总质量的 6% 以下, 但其对动力学参数的影

响较大, 两种物质在热分解过程中不参与固相反应, 其作用相当于“稀释”了样品的纯度, 降低了反应速率, 因此对指前因子和活化能的影响较大。

2.2 热效应计算

在进行多配方的光敏推进剂的热分解试验中, 除了得到以上的反应动力学参数, 还得到了热分解反应中的吸、放热参数, 将各个反应峰对应的吸、放热量求和, 选取升温速率 10、100 K/min 的数据进行统计, 如表 4。

表 2 不同光敏推进剂的热分解峰温

Tab. 2 Peak-temperature of thermal decomposition of different laser sensitive propellants

样品 编号	热分解峰温 $T_p/^\circ\text{C}$			
	$\beta = 5$ K/min	$\beta = 10$ K/min	$\beta = 20$ K/min	$\beta = 100$ K/min
AN-1	330.0	340.5	346.6	371.0
	484.7	488.2	491.4	502.6
AN-2	326.2	335.3	341.4	362.3
	479.4	484.9	487.5	502.1
AN-3	323.8	331.0	334.9	360.5
	479.3	483.0	486.1	499.6
GN-1	577.8	589.3	602.2	650.2
GN-2	513.6	525.8	542.8	575.2
GN-3	518.8	530.4	540.6	575.3

表 3 不同光敏推进剂的热分解动力学参数

Tab. 3 Thermal degradation kinetic parameters of different laser sensitive propellants

样品 编号	温度范围/ $^\circ\text{C}$	活化能/ $(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	指前因子/ s^{-1}	相关系数
AN-1	40 ~ 90	69.54	6.28×10^8	0.993 2
	180 ~ 280	326.18	2.16×10^{33}	0.997 9
AN-2	40 ~ 90	76.86	1.41×10^{10}	0.996 5
	180 ~ 280	255.73	8.60×10^{25}	0.992 1
AN-3	40 ~ 90	69.50	5.71×10^8	0.999 5
	180 ~ 280	327.08	2.51×10^{33}	0.992 5
GN-1	200 ~ 400	116.00	1.22×10^8	0.995 6
GN-2	200 ~ 400	109.00	5.00×10^8	0.996 7
GN-3	200 ~ 400	122.20	9.52×10^9	0.995 7

表 4 质量流率与热流率

Tab. 4 Mass flow rates and heat flow rates

配方	升温速率/ $(\text{K} \cdot \text{min}^{-1})$	综合吸热量/ $(\text{g} \cdot \text{J}^{-1})$
AN-1	10	616.0
	100	543.0
AN-2	10	576.0
	100	518.0
AN-3	10	537.0
	100	512.0
GN-1	10	678.0
	100	274.0
GN-2	10	-370.0
	100	-311.0
GN-3	10	-580.0
	100	-511.2

从表 4 中可以发现,升温速率 100 K/min 的反应吸热量均低于升温速率 10 K/min 的反应吸热量;这是因为,升温速率越高,热分解过程发生的化学反应

越难达到平衡^[15],反应越难完全。而对于综合热效应是放热的配方,同样由于升温速率的过高影响了化学反应的平衡,导致升温速率 100 K/min 的反应放热量低于升温速率 10 K/min 的反应放热量。激光照射在光敏推进剂上时,燃面升温速率极高,可以达到每秒几百 K,因此可推测反应过程也是处于不平衡状态。

2.3 气相产物分析

2.3.1 产气药分解产物

5-ATZ 的含氮质量分数高达 82.3%,熔点为 200 ~ 205 $^\circ\text{C}$,分子式 CH_3N_5 ,标准生成焓为 207.94 kJ/mol。四唑环是目前能够稳定存在的、含氮量最高的一种结构单元,也是唑类化合物中生成焓最高的结构,且表现出较好的热力学稳定性和较低的感受度。5-ATZ 分子结构式见图 3。

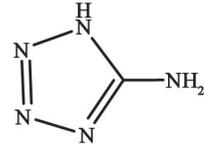


图 3 5-ATZ 的分子结构式

Fig. 3 Molecular structural formula of 5-ATZ

5-ATZ 分解时的生成物大多为 N_2 ,因此可达到少烟甚至无烟的效果。5-ATZ 常被作为产气剂,用在汽车安全气囊等领域。国内外关于 5-ATZ 热分析研究成果表明:5-ATZ 分解的主要气相产物有 N_2 、 HN_3 、 NH_2CN 、 NH_3 、 HCN ,凝聚相产物有密勒胺 ($\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_{10}$)、交联三唑等碳氢残渣。

2.3.2 氧化剂分解产物

1) AN 是一种重要的氧化剂,分子中不含卤族元素,由于化学安定性和热安定性良好,热感度和冲击感度低,因此广泛用作低特征信号、低易损性和低污染固体推进剂或燃气发生剂的主要氧化剂成分,其分子式 NH_4NO_3 ,标准生成焓 -265.50 kJ/mol,在常温、常压下是一种稳定白色晶体。虽然 AN 结构简单,但是其分解过程相当复杂。其热分解基本特性如下:AN 在 170 $^\circ\text{C}$ 前转晶熔化并逐渐开始热分解,在不同的温度,AN 有多种可能的热分解形式并伴随着大量的放热。AN 分解的主要气相产物有 N_2 、 HN_3 、 N_2O 、 H_2O 。AN 分子结构式见图 4。

AN 热分解的质谱分析中存在 NH_3 和 HNO_3 ,同时还存在 NH_3 和 HNO_3 的继续分解和相互作用生成的各种产物。AN 的分解方程式如下。

110 $^\circ\text{C}$ 分解:

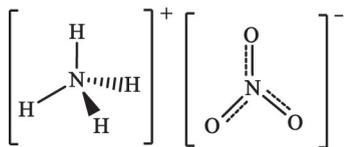
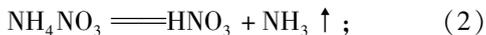
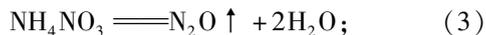


图4 AN的分子结构式

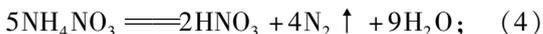
Fig.4 Molecular structural formula of AN



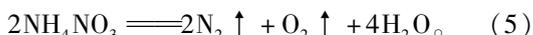
185 ~ 200 °C 分解:



300 °C 左右分解:



若激光辐照迅速加热到高温:



2)GN,化学名二氨基硝酸胍,分子式 $\text{CH}_3\text{N}_3 \cdot \text{HNO}_3$,标准生成焓 - 387.05 kJ/mol. 白色结晶粉末,有较强氧化性,受到摩擦、振动、撞击时可发生爆炸,在高温时加热至 150 °C 时分解并爆炸. GN 的用途十分广泛,主要用于安全气囊、火箭推进剂、油漆工业、照相材料和消毒剂等领域. GN 分子结构式见图 5.

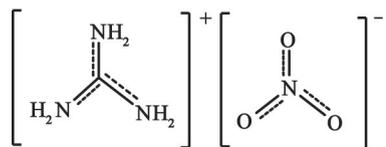
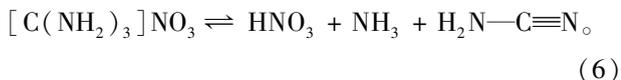


图5 GN的分子结构式

Fig.5 Molecular structural formula of GN

GN 的分解方程式为:



然后,上步分解产物 $\text{H}_2\text{N}-\text{C}\equiv\text{N}$ 经多步聚合反应生成高聚物密弄(Melon),释放 3 个 NH_3 , NH_3 和 HNO_3 的继续分解和相互作用生成各种产物,最后是密弄的高温分解.

2.3.3 试验分析

热分析的分解热量和质量损失数据是分解的总包过程,很难紧紧依靠热分析的数据获得分解机理,为了探索热分解历程,必须作产物分析. 采用四级杆质谱 TG-DSC-MS 联用技术测定了光敏推进剂热分解的气体产物的相对分子质量,并推测了可能的气体组分,所得数据见图 6.

图 6 中,标号 1# ~ 8# 的线分别代表了相对分子质量为 1、28、18、17、14、44、30、12 g/mol 的气体组分. 各个颜色的线代表了不同气体组分的丰度,可根据相对分子质量推测热分解的气相产物包含 H、C、N、 NH_3 、 H_2O 、CO、 N_2 、NO 和 CO_2 .

为了确定气体的具体组分和含量,利用 NASA-CEA 软件对光敏推进剂进行等压绝热燃烧计算,考虑到固相产物中应有碳黑,采用限制燃烧产物的方法,对燃烧产物进行计算,计算结果见表 5 和表 6.

根据表 5 和表 6 可以看出,光敏推进剂燃烧的主要产物为气态 N_2 、 H_2O 、 NH_3 ,以及凝聚态的碳. 随着碳黑和酚醛树脂添加,推进剂负氧程度增大,不完全燃烧更明显,凝聚态产物碳增多, N_2 相对减少,

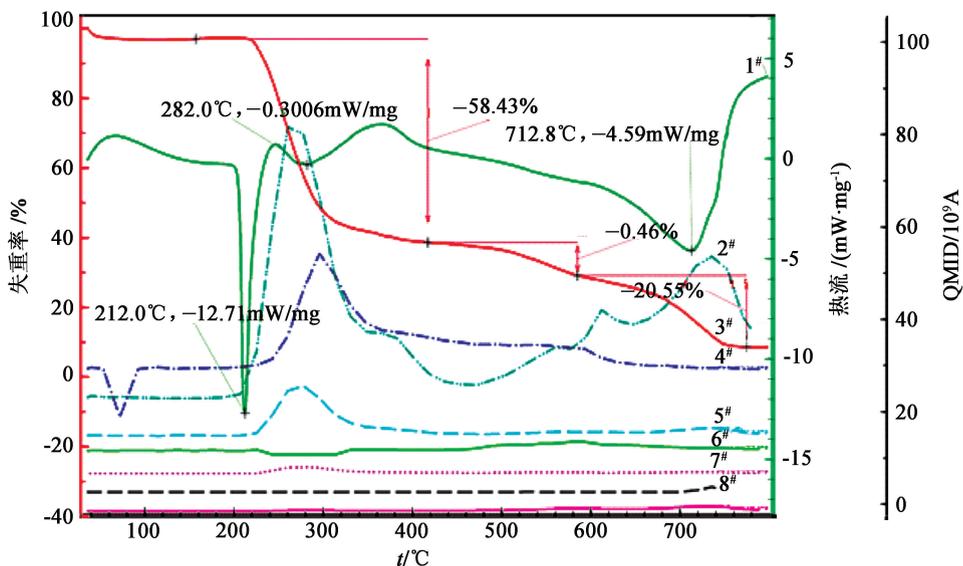


图6 质谱技术测定气体产物相对分子质量

Fig.6 Molecular of gaseous products measured by mass-spectrometric

表 5 光敏推进剂的热力学计算结果

Tab. 5 Thermodynamic calculation results of laser sensitive propellants mass fraction are ed by NASA-CEA

配方	AN-1	AN-2	AN-3	GN-1	GN-2	GN-3
压强/kPa	1	1	1	1	1	1
初温/K	300	300	300	300	300	300
绝热燃烧温度/K	1 744. 22	1 613. 69	1 616. 00	1 794. 31	1 742. 10	1 747. 06
生成焓/(kJ · kg ⁻¹)	2 443. 22	2 321. 13	2 301. 45	-3 170. 13	-3 011. 56	-2 976. 20
气体摩尔质量/(g · mol ⁻¹)	26. 977	28. 089	28. 227	24. 421	25. 707	25. 844
平衡流比热容/(kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	2. 096 4	2. 131 7	2. 137 0	2. 024 0	2. 011 3	2. 018 0
平衡流热导率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	1. 531 1	1. 430 7	1. 435 2	1. 762 7	1. 711 3	1. 719 0
冻结流比热容/(kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	1. 920 9	1. 892 6	1. 898 6	2. 024 0	2. 011 3	2. 018 0
冻结流热导率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	1. 429 1	1. 294 0	1. 298 7	1. 762 7	1. 711 3	1. 719 0

表 6 光敏推进剂燃烧产物的质量分数

Tab. 6 Mass fraction of gaseous combustion products of laser sensitive propellants

组分	AN-1	AN-2	AN-3	GN-1	GN-2	GN-3
CO ₂	< 10 ⁻³	< 10 ⁻³	0. 360	5. 923	4. 968	4. 932
C ₂ H ₄	15. 175	17. 661	17. 792	3. 709	3. 096	3. 186
C ₂ H ₆	1. 408	1. 747	1. 741	0. 047	0. 051	0. 052
C ₃ H ₈	0. 001	0. 001	0. 001	< 10 ⁻³	< 10 ⁻³	< 10 ⁻³
NH ₃	6. 142	2. 743	2. 723	< 10 ⁻³	< 10 ⁻³	< 10 ⁻³
H ₂ O	< 10 ⁻³	< 10 ⁻³	< 10 ⁻³	39. 420	37. 989	37. 871
N ₂	77. 275	75. 954	75. 147	45. 892	43. 598	43. 139
C(s)	< 10 ⁻³	1. 894	2. 235	5. 007	10. 299	10. 821

燃烧室温度出现相应程度的降低。

表 7 试验推进剂的组分(质量分数)

Tab. 7 Component of laser sensitive propellants used in test

编号	氧化剂	产气剂	吸光剂	氧平衡
GN1	80(GN)	10	10(Nano-C)	-0. 54
GN2	60(GN)	30	10(Nano-C)	-0. 62
GN3	40(GN)	50	10(Nano-C)	-0. 70
GN4	20(GN)	70	10(Nano-C)	-0. 78
AP1	35(AP)	55	10(Nano-C)	-0. 33
AP2	30(AP)	60	10(Nano-C)	-0. 41
AP3	20(AP)	70	10(Nano-C)	-0. 49
AP4	15(AP)	75	10(Nano-C)	-0. 57
AP5	35(AP)	55	10(CuO)	-0. 25
AP6	30(AP)	60	10(CuO)	-0. 32
AN1	75(AN)	15	10(Nano-C)	-0. 22
AN2	65(AN)	25	10(Nano-C)	-0. 30
AN3	55(AN)	35	10(Nano-C)	-0. 39
AN4	40(AN)	50	10(Nano-C)	-0. 52

3 激光点火试验

为验证激光烧蚀光敏推进剂的燃烧性能,进行了激光点火试验。设计了一组高氯酸铵(AP)系列配方作为性能对比。推进剂的具体组分见表 7。试验结果如表 8 和图 7 所示。推进剂中的氧化剂为 AN、GN 或 AP,产气剂为 5-ATZ,吸光剂为纳米碳或 CuO,黏结剂采用酚醛树脂。

从试验结果可以看出,GN 系列配方的燃烧性能较差,虽然可以非自持燃烧,但产烟多且污染严重,而氧平衡升高时会产生大量的水汽,热值低;AP 系列配方的燃烧性能过强,推进剂在激光照射下会剧烈地燃烧,燃烧自持,火焰明亮,产气量大,缺点是由于含有氯元素,导致燃烧产物不洁净,且会产生 HCl 等气体,对光路具有腐蚀作用;AN 系列配方的燃烧性能中等,AN 的氧化性能适中,不含有卤族元素,火焰纯净透明,其产物也较为清洁,缺点是火焰

温度不高,导致生成的水大多沉积在燃烧室中,使得

表 8 试验结果
Tab. 8 Test results

编号	光路输出功率 P_L/W		燃烧情况
	点火前	燃烧结束后	
GN1	20.00	12.13	点火成功,随后熄灭
GN2	20.00	10.80	点火失败,少量水汽
GN3	20.00	10.00	点火失败,少量白烟
GN4	20.00	7.50	点火失败,大量白烟
AP1	20.00	6.70	点火成功,自持燃烧
AP2	20.00	8.50	点火成功,间歇燃烧
AP3	20.00	4.30	点火失败,大量灰烟
AP4	20.00	3.80	点火失败,大量灰烟
AP5	20.00	0.30	间歇燃烧,蓝紫火焰
AP6	20.00	0.25	间歇燃烧,蓝紫火焰
AN1	20.00	15.20	点火成功,非自持燃烧
AN2	20.00	14.30	点火成功,随后熄灭
AN3	20.00	13.70	点火失败,少量水汽
AN4	20.00	16.80	点火失败,大量水汽

产气量降低。吸光剂而言,碳粉的黑度高,对激光的吸收强,但燃烧非自持导致火焰较弱,很难将所有碳粉燃烧掉,导致碳粉的烟气污染透窗,凝聚态的碳聚集在燃面附近阻碍激光的传播。氧化铜虽然具有一

定的氧化性,对配方里的氧平衡具有积极意义,但生成产物铜由于质量大,很难被燃气吹除,因此聚集在燃面处阻碍激光的传播,使推进剂出现不稳定燃烧。

4 结论

对于光敏推进剂的配方开展了热分析和激光点火试验,得到了如下结论:

1) 光敏推进剂中的碳黑和酚醛树脂的质量分数不到 6%,但对动力学因子影响较大,其作用相当于“稀释”了样品的纯度,降低了反应速率。

2) 升温速率越高,推进剂的热分解化学反应越难以达到平衡,其吸放热量越低。

3) 碳黑和酚醛树脂会使推进剂的负氧程度增大,使燃烧变得不充分。

4) GN 的氧化性能较差,产烟多,污染大;AP 燃烧过于剧烈,污染严重,激光控制燃烧的能力较弱;AN 火焰纯净透明,产物也较为清洁,燃烧可控性好。因此,AN 在 3 种氧化剂中最适合作为光敏推进剂的氧化剂组分。纳米碳粉的吸光性能较好,而氧化铜燃烧产物污染严重不能作为吸光剂。

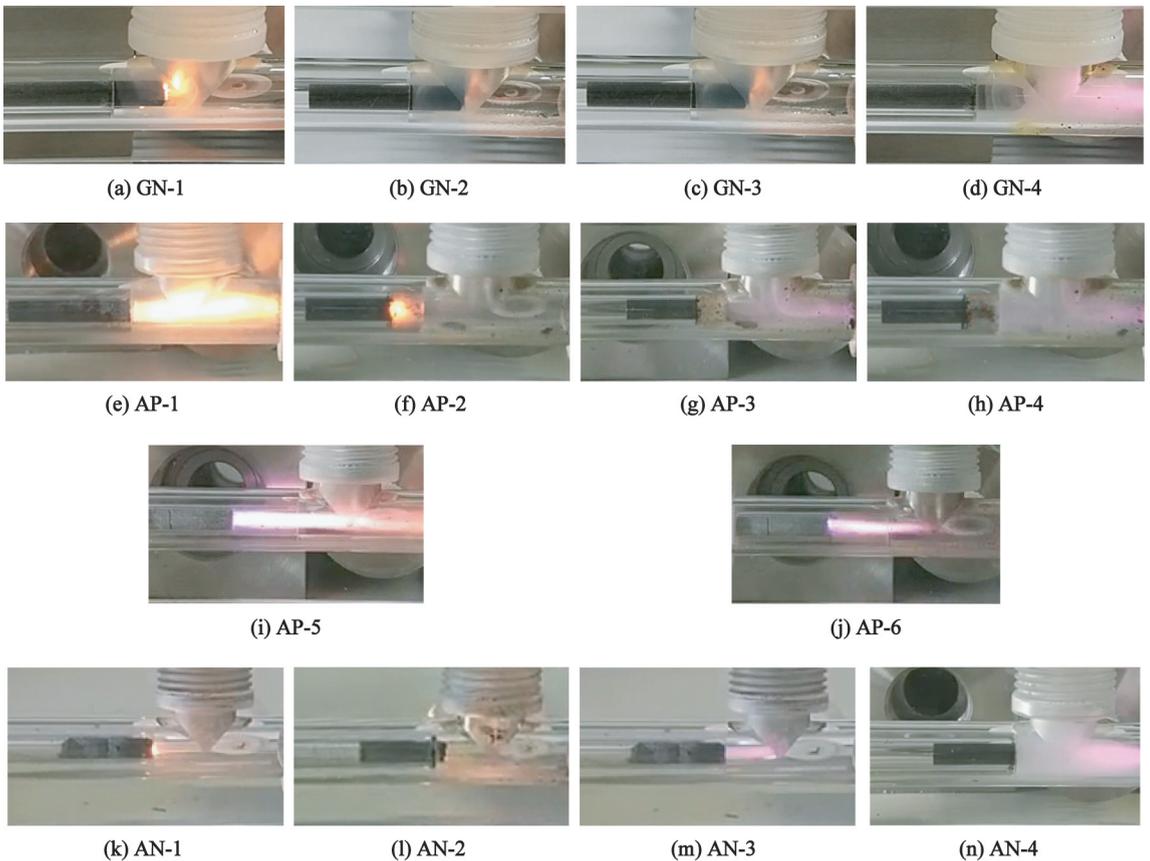


图 7 试验燃烧情况

Fig. 7 Combustion condition in test

5)以 AN 为氧化剂、5-ATZ 为产气剂的光敏推进剂,燃烧产生的气体洁净,N₂ 占气相产物的质量分数超过 70%。

参 考 文 献

[1] PAKHOMOV A V, THOMPSON M S, GREGORY D A. Ablative laser propulsion: a study of specific impulse, thrust and efficiency [J]. AIP Conference Proceedings, 2003, 664:194-205.

[2] 窦志国,姚宏林,王军,等. 激光推进工质推进性能研究[J]. 装备指挥技术学院学报,2006,17(6):99-103. DOU Z G, YAO H L, WANG J, et al. Research on the propulsive performance of laser propulsive working medium [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2006, 17(6): 99-103.

[3] PIRRI A N, MONSLER M J, NEBOLSINE P E. Propulsion by absorption of laser radiation[J]. AIAA Journal, 1974, 12(9): 1254-1261.

[4] 沈瑞琪,叶迎华,戴实之,等. 激光与含能材料相互作用的化学反应过程[J]. 激光技术,1997,21(4):193-195. SHEN R Q, YE Y H, DAI S Z, et al. Chemical reaction process of interaction of laser and energetical materials [J]. Laser Technology, 1997, 21(4): 193-195.

[5] 沈瑞琪. KONDERIKOV B N, DENISUKE A P,等. 激光辐射下的固体双基推进剂的燃烧特性[J]. 应用激光, 2003,23(1):29-32,28. SHEN R Q, KONDERIKOV B N, DENISUKE A P, et al. Combustion characteristics of double base propellants under laser radiation [J]. Applied Laser, 2003, 23(1): 29-32, 28.

[6] 杜江媛. 激光辐射下固体推进剂燃烧特性及规律研究 [D]. 南京:南京理工大学,2009. DU J Y. The study of combustion characteristics of solid propellants under laser radiation [D]. Nanjing: Nanjing

University of Science and Technology, 2009.

[7] 王晓勇. 基于 GAP 含能靶带的激光烧蚀微推进技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2015. WANG X Y. Study on the technology of laser ablation micro-propulsion based on the GAP [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.

[8] 吴修伟. GAP 含能工质工艺优化及其激光微推进性能测试[D]. 南京:南京理工大学,2016. WU X W. Optimization of GAP energetic target process and it's laser micro-propulsion performance test [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[9] 陈鹤鸣,赵新彦. 激光原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2013:318-319.

[10] 刘子如. 含能材料热分析[M]. 北京:国防工业出版社,2008:1-10,59-61. LIU Z R. Thermal analyses for energetic materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 1-10, 59-61.

[11] 王泽山. 含能材料概论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005:134-142.

[12] KAKAMI A, MASAKI S, HORISAWA H ,et al. Solid propellant microthruster using laser-assisted combustion [C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Florida,2004.

[13] KAKAMI A, HIYAMZU R, SHUZENJI K. Laser-assisted combustion of solid propellants [C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cincinnati,2007.

[14] SCHAL W O. Characterization of the absorption wave produced by CO₂ laser ablation of a solid propellant; FA8655-04-1-3067[R]. 2005.

[15] 项仕标. 激光点火原理与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社,2004:88-92

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部