

脉冲激光束在研究推进剂高速分解反应中的作用*

王 伯 羲

(北京理工大学化工与材料学院, 北京, 100081)

摘 要: 叙述了钕玻璃脉冲激光束对研究推进剂凝聚相高速分解反应动力学的作用。应用自制的钕玻璃脉冲激光测试仪测试了双基推进剂的高速分解反应动力学参数。试验表明, 测试结果对研究分解和燃烧反应动力学, 判断催化效果及催化剂作用部位等都可起到积极的作用。

主题词: 脉冲激光器, 激光技术, 固体推进剂, 推进剂分解, 反应动力学

分类号: V512

AN APPLICATION OF PULSE LASER BUNDLE IN RESEARCH ON HIGH SPEED DECOMPOSITION REACTION OF PROPELLANTS

Wang Boxi

(Coll. of Chemical Engineering and Material, Beijing Inst. of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: The dynamics of high speed decomposition of condensed phase of propellants was studied by the pulse laser bundle. The test results show that the pulse laser bundle can play an important role in research on decomposition, combustion and catalytical combustion of propellants.

Subject terms: Pulsed laser, Laser technology, Solid propellant, Propellant decomposition, Reaction kinetics

1 引 言

激光技术早在60年代中, 国外就开始用来研究推进剂及组份的点火、分解、燃烧、火焰结构、发动机喷气流体场中颗粒大小的分布和储存性能等方面。特别美国的 Summerfield 等人在这方面作了许多工作。^[1~4]。但未见有直接用激光束测定推进剂高速分解动力学参数的报道, 并且多数是用 CO₂ 激光器作辐射源。我们从80年代初开始了这方面的探索, 主要是应用短脉冲钕玻璃激光束来研究推进剂凝聚相的高速分解动力学。

2 试验部分

2.1 仪器结构

自行安装调试的 JSL-79型脉冲钕玻璃激光分解仪结构如图1所示。采用钕玻璃脉冲激光束, 波长1.06 μ m, 脉冲能量0.1~15J (可调), 光斑直径0.1~30mm (透镜调节), 激光脉宽

* 本文1995年9月1日收到, 修改稿1996年4月5日收到

100~1500 μ s (可调)。试件尺寸为 $\phi 10 \times 0.5$ mm, 试验条件为常温常压。

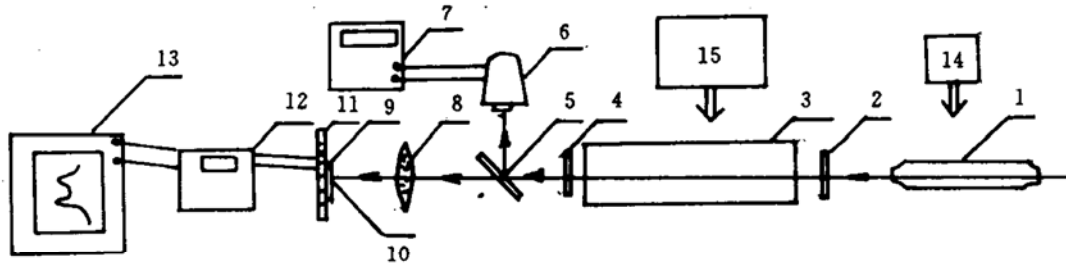


Fig. 1 Sketch of decomposition apparatus with neodymium glass pulse laser

1. He-Ne laser 2. All reflecting glass 3. Work cavity of neodymium glass laser
4. Half reflecting glass 5. Bit of glass 6. Carbon small room 7. Micro-gavanometer
8. Lens 9. Sample 10. Thermocouple 11. Tongs 12. Enlarger 13. Recorder
14、15. Source of electricity of laser

2.2 所测的动力学参数

(1) 激光分解速率 (V_j): 在一定激光能量下推进剂试件所分解的质量 (G) 除以激光脉宽 (t_j)。 $V_j = G/t_j$ (g/s) (G 为激光分解量, t_j 为激光脉宽) (图2)。

(2) 激光分解温度 (T_s): 将微热偶头压入试件表面, 激光光斑对准热偶头, 通过记录仪测定推进剂分解时表面升温的最高值。测温范围: $\sim 500^\circ\text{C}$ 。

(3) 点燃辐射通量 (N_L): 调整激光辐射能量使推进剂刚刚点燃的最低能量再除以脉宽和光斑直径 ($\text{J/s}\cdot\text{cm}^2$)。

(4) 点燃延迟期 (τ): 当辐射能量增加到可点燃试件时, 由测得的温度和时间 ($T-t$) 关系图可知, 激光辐射到试件, 不是立即点燃, 而是经过一定的延迟时间后才点燃 (图3), 由记录曲线可得到不同试验条件下的 τ 。

由测定不同温度下的分解速率还可计算高速分解活化能 (E)、频率因子 (Z) 等。

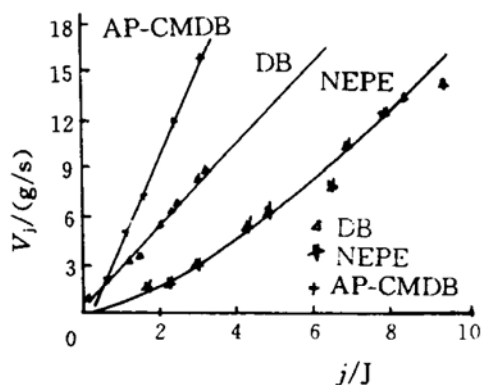


Fig. 2 Laser decomposition rate of propellants

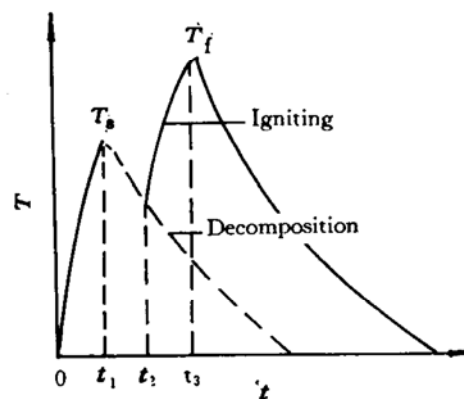


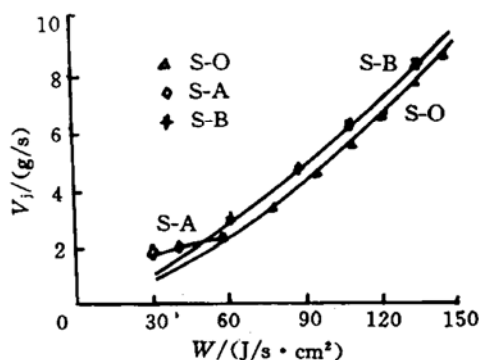
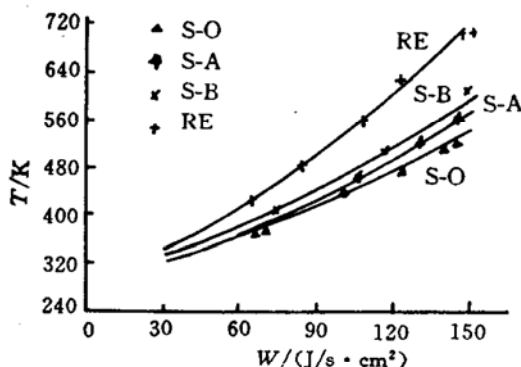
Fig. 3 Curve of surface temperature of the radiated propellant

3 结果和讨论

3.1 固体推进剂激光分解和燃烧机理的探索

选择空白双基推进剂试件<S-0>和分别向 S-0 中加入约 5% 的平台复合催化剂 ($\Phi\text{Pb} + \text{己}$)

—Cu+TiO₂) <S-A> 以及复合超速催化剂 (TaPb+LaCu) <S-B> 的三种试件。同时还测定的三种试件在不同激光辐射通量下的分解速率和分解表面温度, 如图4、5所示, 并计算了它们的分解活化能和频率因子, 如表1所示。图5中 RE 表示激光束单纯照射热偶头时的温度变化曲线。

Fig. 4 V_j - W curveFig. 5 T_s - W curve

由实验结果可获得以下认识:

(1) 平台和超速催化剂都可降低双基推进剂的高速分解活化能, 从而使空白药的分解速率提高或易于点燃。

(2) 由图4可知, 热偶压入三种试件表面, 测得的 T - W 曲线都低于单纯辐射热偶时的 T - W 曲线, 说明激光辐射所引起的反应是固相初始吸热反应大于放热的二次反应。

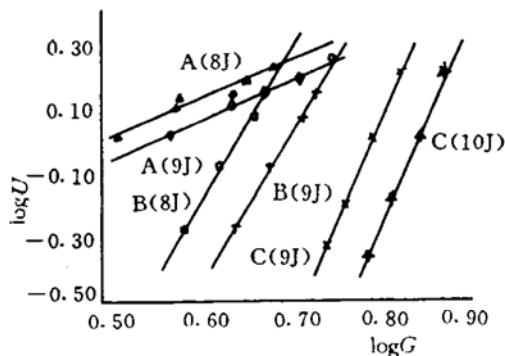
(3) 由图4、5可知超速催化剂可提高双基药试件的激光分解速率和表面的温度。而平台催化剂使双基药在低的辐射能量下易于点燃, 且表面温度较空白和超速试件都高, 分解速率低能下较空白药也有较大提高。这说明两组催化剂的作用部位和催化反应类型是不同的。可推测超速催化剂主要是加速了固相的吸热分解反应, 使分解速率提高。而平台催化剂的作用可能主要是加速了放热的二次反应, 使表面附近的热效应增大, 加速了热量的积累, 从而在较低的辐射通量下就可使试件点燃^[4,5]。

3.2 推进剂激光分解量与燃速关系的探索

由于激光辐射推进剂在短时间内供给推进剂较高能量, 因而表面升温速率很高, 与推进剂燃烧时的表面升温速率接近。这使我们考虑推进剂的激光分解量 (或分解速率) 与其燃速应有一定相关性。限于条件, 我们先探索了常压下二者的关系, 先选择了三组双基推进剂, A组是六种制式推进剂; B组是不含催化剂的五种双基推进剂, C组是双基加不同含量的惰性溶剂 (苯二甲酸二丁酯) 的四种配方。分别测定了它们在常压下的燃速 V 和激光分解量 G 。经过数据关联, 发现二者存在下述关

Table1 Dynamical reference of high rate decomposition of three propellant

Sample	Range of temperature	$E/$ (kJ/mol)	Z
S-O	397-588K	11.07	108.85
S-A	426-652K	8.53	35.01
S-B	399-464K	10.12	88.52

Fig. 6 G - U curve of propellant

系: $U=aG^b$ 式中 a 、 b 是与推进剂的类型和辐射能量范围有关的常数。图6为 $\lg G$ 和 $\lg U$ 的关系图。

2.3 由推进剂组份的激光分解量预估推进剂燃速的探索

分别测定了 NC、NG、DNT、DiNa 四种组份在不同激光能量下的分解量。另外还测定的两种三组份推进剂的激光分解量和常压燃速。通过数据关联,发现组份和推进剂的激光分解量之间有倒数加和的规律: $1/G=\Sigma (\eta_i/G_i)$

式中: G_i ——推进剂第 i 组份的激光分解量, η_i ——第 i 组份的重量百分数。由于推进剂的激光分解量与其燃速之间又有指数关系。因此,由推进剂的组份激光分解量可计算推进剂全配方的分解量,再由 $U=aG^b$ 的关系可以估算推进剂的燃速。我们对两个三组份配方的推进剂进行了估算,与实测燃速值相符合。

4 结 论

(1) 短脉冲激光束作为一种方便可调并可准确测量的能源用于推进剂的分解和燃烧研究是可行的。它有两个显著的优点:一是可获得固相表面高的升温速率,能与推进剂燃烧时表面的升温速率相当,因而具有模拟性;二是瞬间提供能量,使初始产物进一步反应缺乏足够的能量,与推进剂燃烧时相比可减弱二次反应对固相分解的影响。

(2) 由上述第二条优点可知,短脉冲激光束有利于在研究催化剂的作用部位和作用机理方面发挥独特的作用。再加上真空和充压下的试验,有可能分辨催化剂究竟是催化固相分解、分解产物与固相的气-固反应,还是催化初始产物间的气相反应,为搞清催化机理和选择有效催化剂提供依据。

(3) 由激光分解量来估算推进剂的燃速是有可能的。但还有待进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Ohlemiller T J, Summerfield M. Radial ignition of polymeric fuel in O_2/N_2 mixture. Thirteenth Symposium (International) on Combustion, 1970: 1087~1094
- 2 Pellett G L, Saunders A R. Heterogeneous ammonium perchlorate decomposition at high temperatures and low pressures using pulsed laser mass spectrometry. AD-828010, 1976: 513~519
- 3 Andrews James R, et al. The development of an optically active laser schlieren system with application to high pressure solid propellant combustion. AD-A017 574, 1975: 1~39
- 4 王伯羲, 任竹生. 催化双基推进剂激光分解的研究. 兵工学报(火化分册), 1981(4): 10~16
- 5 王伯羲, 蔡毓芳, 任竹生. 由组份激光分解量预估推进剂燃速的探索研究. 工程热物理学报, 1986, 7(1): 75~77