

一种评定固体推进剂燃烧效率的方法——爆热效率*

王英红¹, 顾涛¹, 梁超¹, 刘佳浩¹, 石玉婷², 李伟²

(1. 西北工业大学 燃烧、热结构与内流场重点实验室, 陕西 西安 710072;
2. 湖北航天化学技术研究所 航天化学动力技术重点实验室, 湖北 襄阳 441003)

摘要: 针对当前理论爆热仅有概念没有计算实例的现象, 通过测试不同样品量的推进剂定容爆热并对最佳质量的燃气进行气相色谱实验, 分析了最小自由能法计算推进剂燃烧产物的应用界限。研究认为, 最小自由能法只能用于计算发动机燃烧室高温下的绝热定压燃烧产物, 不适用于计算常温下的爆热产物。提出并明确了推进剂理论定压和定容爆热的计算方法; 建立并验证了降温到298K燃烧产物的确定方法。针对当前推进剂燃烧效率大多为定性评判的现象, 将爆热效率定义为实际定容爆热与理论定容爆热之比, 用来定量表征推进剂的燃烧效率, 可以实现用少量推进剂对其燃烧效率进行综合评判, 尤其适用于推进剂配方研制阶段。

关键词: 固体推进剂; 燃烧效率; 爆热; 能量性能; 爆热效率

中图分类号: V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 11-2209079-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2209079

A Method for Evaluation on Combustion Efficiency of Solid Propellants—Explosion Heat Efficiency

WANG Ying-hong¹, GU Tao¹, LIANG Chao¹, LIU Jia-hao¹, SHI Yu-ting², LI Wei²

(1. Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermal-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Science and Technology on Aerospace Chemical Power Laboratory, Hubei Institute of Aerospace Chemical Technology, Xiangyang 441003, China)

Abstract: In view of the current lack of calculation samples of theoretical explosion heat, while its concept has long been presented, the constant volume explosion heat of different sample quantities of propellants was tested and the products of maximum explosion heat sample were determined by gas chromatography. Theoretical calculations show that minimum Gibbs free energy method works for calculating the adiabatic constant pressure combustion products at high temperatures in the solid rocket motor chamber, but not suitable for solving the products at ambient temperature(298K), meaning the applications of minimum Gibbs free energy method have the limitation. Accordingly, a new method for calculating constant pressure explosion heat or constant volume explosion heat is proposed based on a proven novel method, which is established for purposes of determining the combustion products that cooled down to 298K. Considering that the classical combustion efficiency is evaluated by quali-

* 收稿日期: 2022-09-26; 修订日期: 2023-01-08。

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC21875061; NSFC21975066); 航天化学动力技术重点实验室基金(STACPL320201B03); 燃烧、热结构与内流场重点实验室基金(6142701220101)。

作者简介: 王英红, 博士, 副教授, 研究领域为推进剂燃烧、工艺、性能预估及测试。

通讯作者: 李伟, 博士, 研究员, 研究领域为固体推进剂技术。E-mail: liwei@casc42.cn

引用格式: 王英红, 顾涛, 梁超, 等. 一种评定固体推进剂燃烧效率的方法——爆热效率[J]. 推进技术, 2023, 44(11): 2209079. (WANG Ying-hong, GU Tao, LIANG Chao, et al. A Method for Evaluation on Combustion Efficiency of Solid Propellants—Explosion Heat Efficiency[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(11):2209079.)

tative comparison, a parameter, named as explosion heat efficiency, is defined by the ratio of the actual constant volume explosion heat to the theoretical constant volume explosion heat, implying that the combustion efficiency of solid propellants can be quantitatively characterized. A small amount of propellants can bring a comprehensive assessment of combustion performance, providing for great convenience to the stage of propellant formulation development.

Key words: Solid propellant; Combustion efficiency; Explosion heat; Energetic property; Explosion heat efficiency

1 引言

能量是固体推进剂的核心性能,常用的描述能量性能的参数包括比冲、密度、密度比冲和特征速度,实际工作过程中推进剂的燃烧效率、流动中的热量损失、喷管里的喷管效率等都会影响到推进剂的能量水平^[1-2]。对于高能固体推进剂,燃烧效率更是限制其能量大小的关键^[3],故合理表征燃烧效率就成为必要。

目前对燃烧效率的表征,主要有三种方式,较为传统的有两种方法,一是进行真空定容爆热测试^[4],二是对燃烧残渣的活性铝进行分析^[5-6]。文献[7-8]采取这两种办法研究高能推进剂的组分及粒度对燃烧效率的影响。吴雄岗等^[9]又引入高速摄影技术,拍摄推进剂火焰照片,通过对比火焰结构分析不同配方的燃烧效率。周梦圆等^[10]综合采用上述三种方法研究得到GAP/硝胺推进剂燃烧效率规律。胡云逸等^[11]则向GAP/HMX推进剂中加入铝基合金,观察燃烧效率受到的影响。总的来说,可以通过爆热值、活性铝含量、火焰结构与亮度等进行相对表征,分析影响燃烧效率的因素,但是这些方法不能定量地描述燃烧效率。

江强等^[12]研究发动机燃烧效率时指出定量的燃烧效率应当是某种燃烧过程中的实际性能与理论性能之比。文献[13-15]采用特征速度效率评估燃烧效率绝对值的大小,因此必须通过发动机实测得到实际特征速度,显然这样试验需求的推进剂会达到千克级。欲研制一种新型燃烧效率表征方式,其选定的实际性能在试验时推进剂用量要求明显少于特征速度法。又考虑到选定的性能应当与燃烧过程密切相关,因此选用定容爆热作为考量的参数。

爆热是一种度量推进剂经燃烧化学反应可释放能量的参数,定义为1kg推进剂在298K且隔绝氧气的条件下绝热燃烧,其产物冷却回到298K时所放出

的全部热量^[16]。近些年涉及爆热的论文主要是运用定容爆热衡量配方不同的推进剂能量高低^[17],对于爆热本身的研究则集中在提高定容爆热测试的准确度^[18-19]和影响定容爆热测试的因素^[20-21]上,尚无对理论爆热的讨论。教科书里提及理论爆热的计算方法多指求解定压爆热,具体做法是先求出定压绝热燃烧产物的组成,然后用各产物的平均定压摩尔热容对温度进行积分。实际上定压绝热燃烧产物从绝热温度下降至298K的过程中组分及含量一定发生了变化,因此无法确定相应的平均定压摩尔热容,所以这种计算方法只是理论上可行而无实际操作意义。

本文研究推进剂理论爆热计算方法,并结合实验验证本方法的合理性,最终以实际定容爆热与理论定容爆热之比定义爆热效率,此效率可以为推进剂配方研制提供更好的指导。

2 试验

2.1 推进剂定容爆热测试

测试用推进剂NEPE系我方自制,主要成分包含铝粉、高氯酸铵、奥克托金、硝化甘油、硝酸酯,具体信息参见表1。

按照GJB770B-2005的测试要求,采用氧弹量热法测试推进剂的爆热。测试仪器为ZDHW—HN7000C微机全自动量热仪,点火丝为直径0.12mm,长10mm的镍铬合金丝。考虑到样品质量对爆热值测试的影响,称取样品的质量从2g起逐步增加,每个质量点进行3次爆热测试,取其结果的平均值。组装好氧弹后,用2MPa氩气给氧弹充排3次。一系列的爆热结果见表2。

表2的结果显示NEPE推进剂的爆热随着样品质量的增加而增大,当质量从4.5g增至5g时测的爆热值只增加了1.4kJ/kg,相较于总量占比不足0.02%,可

Table 1 Introduction to propellant

Name	Assumed chemical formula	Raw material enthalpy/(kJ/kg)
NEPE	$C_{11.5578}H_{28.0034}O_{26.0144}N_{13.9206}Cl_{1.1363}Al_{6.7350}$	-787.78

Table 2 Test results of constant volume explosive heat of NEPE propellant

Mass/g	Constant volume explosion heat/(kJ/kg)	Mean value/(kJ/kg)	Mass/g	Constant volume explosion heat/(kJ/kg)	Mean value/(kJ/kg)
1.9994	6326		3.9644	7023	
2.0874	6321	6293.0	4.0016	7118	7073.3
2.0362	6232		3.9958	7079	
3.0031	6795		4.5060	7063	
3.0084	6731	6758.7	4.4996	7132	7095.3
3.0065	6750		4.5022	7091	
3.4889	6844		5.0129	7065	
3.4970	6916	6896.3	5.0032	7123	7096.7
3.4960	6929		4.9952	7102	

以认为增加到5g时爆热值基本稳定,故而认定NEPE推进剂的实际定容爆热值 Q_{v_exp} 为7096.7kJ/kg。

2.2 氧弹气体气相色谱检验

将5g的NEPE推进剂爆热实验后的氧弹内气体经过通气软管、排气阀导入容量为0.5L的比克曼铝箔采气袋,对收集好的气体进行气相色谱检测,得到其主要气体的成分和体积分数,见表3。

Table 3 Gas chromatographic results of main combustion gases of NEPE propellant

Gas type	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
Volume fraction	0.3266	0.2303	0.0090	0.0003

3 理论爆热的计算与分析

爆热就是推进剂燃烧产生的热效应^[22],它与过程中进行的条件有关。1kg温度为298K的固体推进剂在惰性气体中定容燃烧,当产物由定容燃烧温度降至298K时所释放的全部热量称为定容爆热。而1kg推进剂燃烧过程若是在绝热和定压条件下完成,燃烧产物从定压绝热燃烧温度降至298K时释放的全部热量则称为定压爆热。无论定容爆热还是定压爆热,其末状态的温度均为298K。

由于爆热定义放热为正,根据热力学基本原理可知,定容爆热等于初态与末态的内能 U 之差,定压爆热等于初态与末态的焓 H 之差。

$$Q_v = -\Delta U \quad (1)$$

$$Q_p = -\Delta H \quad (2)$$

由于推进剂的初态是凝聚态,其内能与焓相等且数值已知,故计算理论爆热的关键在于确定燃烧产物末态下的内能或焓,这就需要先确定爆热末态产物(298K)的组成和物质的量。

3.1 最小自由能法计算定容爆热产物

前述实验测得NEPE推进剂的实际定容爆热,为表征燃烧效率需得到该推进剂的理论定容爆热,因此需计算定容条件下的爆热末态产物。

所谓“最小自由能法计算推进剂定容爆热产物”是指推进剂爆热测试的末状态为298K时自由能最小对应的产物组成。根据JJG259-2005标准金属量器检定规程对实验使用的氧弹容积进行标定。分别使用蒸馏水和密度为0.789g/cm³的乙醇标定三次,得到氧弹的有效容积为0.287L。应用热力学软件Fact-Sage计算298K下样品量为5g的定容燃烧产物,输入末态约束条件温度 $T=298K$ 和体积 $V=0.287L$,输出结果中的主要产物见表4。

因为凝聚相的内能与焓相等,所以本推进剂的初始内能 U_1 为-787.78kJ/kg,产物中的凝聚相内能 U_i 也等于相应的 H_i 。而产物中的气相内能则遵照 $U_i = H_i - n_g RT$,这里的 n_g 指的是对应气体在1kg推进剂产物中的摩尔数, R 为气体常数,取 $8.314 \times 10^{-3} \text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, T 是末态温度,取298K。算出气相的内能后,将各组分加和得到产物的内能 U_2 为-10321.45kJ/kg,理论定容爆热按照式(1)为 $U_1 - U_2$,计算结果是9533.67kJ/kg。计算得到的理论定容爆热与实际定容爆热值显然有较大差异。

分析计算结果显示298K下推进剂气相产物主要是N₂和CO₂,凝聚相主要产物包含C,这与研究人员的经验认知不相符。根据推进剂的贫氧特性,主要的气相产物应是CO和H₂且凝聚相一般不含C,气相色谱实验的结果也验证了这个趋势,因此认为最小自由能法不能用来确定推进剂的爆热末态产物。原因可能是最小自由能法只能确定体系的最稳态组成,因而可以用于计算推进剂理想燃烧时的组分构

Table 4 Main constant volume combustion products of NEPE propellant obtained by the minimum Gibbs free energy method (298K)

Main product		Molar number of product components of 5g propellant/mol	Molar number of product components of 1kg propellant n_i /mol	Standard enthalpy/(kJ/mol)	Enthalpy value of components of 1kg combustion products H_i /kJ	Internal energy of 1kg combustion products U_i /kJ
Gas phase	N ₂	3.196050×10 ⁻²	6.3921	0	0	-15.84
	CO ₂	1.045700×10 ⁻²	2.0914	-393.52	-823.01	-828.19
	H ₂ O	3.6470×10 ⁻⁴	0.0729	-241.83	-17.64	-17.82
Condensed phase	C	4.733200×10 ⁻²	9.4664	0	0	0
	H ₂ O	4.144300×10 ⁻²	8.2886	-285.83	-2369.13	-2369.13
	Al ₂ O ₃ (H ₂ O)	1.683750×10 ⁻²	3.3675	-1999.15	-6732.14	-6732.14
	NH ₄ Cl	5.68150×10 ⁻³	1.1363	-315.35	-358.33	-358.33
Total	-	-	-	-	-10300.25	-10321.45

成,但对于爆热末态的计算环境,此时的产物并非处于最稳状态,因而该方法失效。

3.2 理论定压爆热的计算

3.2.1 定压爆热末态产物的确定

直接求解理论定容爆热的计算结果并不理想,因此需要一种间接的途径来求理论定容爆热。由于定容爆热和定压爆热之间存在某种联系,所以可以先计算理论定压爆热,再反算出理论定容爆热。根据式(2)可知,要计算定压爆热需已知爆热末态产物的产物焓,也就是说需要求解推进剂的定压绝热燃烧产物降温到298K的组成。

向FactSage中输入NEPE推进剂的假定化学式,在终态的约束条件上选择压强为6.86MPa,终态焓为-787.78kJ,这样得到的是推进剂在定压绝热燃烧温度下的燃烧产物。表5是1kg该推进剂定压绝热燃烧的产物组分,此时的定压绝热燃烧温度为3721.9K。

以表5为依据,剔除掉产物中质量分数小于0.1%的微小物质(O, Al, AlCl₂, O₂, Al₂O₂, AlH, HCO, N, HCN, NH₃, AlO₂, NH₂, NH)和298K下不可能存在的解离产物(H, OH, Cl, AlCl, NO, AlOH, AlO, OAlOH, AlOCl, Al₂O),则仅剩的推进剂燃烧产物有CO₂, CO, H₂O, H₂, N₂, HCl及Al₂O₃,认为解离产物降温过程中反应生成上述7种产物,而文献[23-24]指出AlCl低温下会形成AlCl₃,因此298K下的最终产物定为8种。主要气相组分为:H₂、CO、N₂、CO₂、HCl;凝聚相组分为:Al₂O₃、H₂O、HCl(aq)、AlCl₃。

高温燃烧产物降温到298K过程中会发生复合反

Table 5 Adiabatic combustion products of 1kg NEPE propellant at constant pressure (6.86MPa, 3721.9K)

Product	Amount of substance/mol	Product	Amount of substance/mol
CO	11.0250	Al	0.0293
H ₂	8.7087	OAlCl	0.0263
N ₂	6.9234	Al ₂ O	0.0144
H ₂ O	3.4699	O ₂	0.0107
H	2.2136	Al ₂ O ₂	0.0061
HCl	0.8508	AlCl ₂	0.0045
CO ₂	0.5297	AlH	0.0043
OH	0.4813	HCO	0.0020
Cl	0.1415	N	0.0014
AlCl	0.1080	AlO ₂	0.0010
NO	0.0695	HCN	0.0008
O	0.0692	NH ₃	0.0006
OAlOH	0.0470	NH ₂	0.0006
AlO	0.0452	NH	0.0005
AlOH	0.0420	Al ₂ O ₃ (1)	3.1931

应,所确定的298K下燃烧产物的量会不低于高温下对应燃烧产物的量。以表5燃烧产物的量为依据,根据假定化学式1kg推进剂中N元素的总量为13.9206mol,含N元素的燃烧产物仅有N₂,故N₂为6.9603mol/kg;1kg推进剂中Cl元素的总量为1.1363mol,含Cl元素的燃烧产物有HCl,AlCl₃,HCl的物质的量不小于0.8508mol,可根据Cl元素守恒确定AlCl₃的量最多为0.0952mol,即高温产物中0.108mol的AlCl不能全部复合生成AlCl₃,故综合考虑,HCl为

0.8508mol/kg, AlCl_3 为 0.0952mol/kg; 含 Al 元素的燃烧产物有 AlCl_3 , Al_2O_3 , 以 Al 元素守恒确定 Al_2O_3 的量为 3.3199mol; 1kg 推进剂中 C 元素的总量为 11.5578mol, 含 C 元素的燃烧产物有 CO , CO_2 , 暂定 CO 和 CO_2 的量不变, 则 C 元素的量剩余 0.0031mol, 由于降温过程气氛贫氧, 故降温过程中 C 元素更容易复合为 CO 而不是 CO_2 , 故确定 CO 的物质的量为 11.0281mol, CO_2 的物质的量为 0.5297mol; 1kg 推进剂中 O 元素的总量为 26.0144mol, 含 O 元素的燃烧产物有 CO , CO_2 , H_2O 和 Al_2O_3 , 由于前面 CO , CO_2 和 Al_2O_3 的量均已确定, 根据 O 元素守恒可以确定 H_2O 物质的量为 3.9672mol; 1kg 推进剂中 H 元素的总量为 28.0034mol, 含 H 元素的燃烧产物有 H_2O , HCl 和 H_2 , H_2O 和 HCl 的量已确定, 根据 H 元素守恒, 对 H_2 的物质的量 9.6091mol。此外考虑到 HCl 在水中的溶解性为 0.7g/ml, 根据产物水的摩尔数 3.9672mol, 水的相对分子质量 18g/mol 和水的密度 1g/ml, 可以得产物中水的体积, 故能溶解的 HCl 质量为 49.9867g, 转化成 HCl 物质的量为 1.3695mol。

而 HCl 的总物质的量显然少于该值, 因此所有 HCl 溶于水, 即 NEPE 推进剂的爆热末态氧弹中 HCl 是凝聚态。最终产物结果见表 6。

3.2.2 定压爆热末态产物法结果检验

上一节中以 6.86MPa 恒压绝热燃烧产物作为确定爆热产物的依据, 本节采用其他压强验证爆热结果的稳定性。分别以 10MPa, 15MPa, 20MPa 的定压绝热燃烧产物为依据, 计算出 298K 下对应的燃烧产物及产物焓, 并与 6.86MPa 时的计算结果进行对比。表 7 显示不同压强对总焓的影响不超过千分之一, 这种误差太小可以忽略不计, 也就是说压强对这种理论定压爆热计算方法影响很小, 理论定压爆热值恒定。由于结果的相似性, 选取 6.86MPa 作为该方法中定压的参考压强。

另外, 定压爆热末态产物的计算结果表明气相产物中 H_2 和 CO 占主导地位, 这与表 3 的气相色谱结果相吻合, 进一步证明了本计算方法的合理性。

Table 6 Compositions of the products of constant pressure adiabatic combustion of 1kg NEPE propellant cooled to 298K

Type	Product	Amount of substance/mol	Standard enthalpy/(kJ/mol)	Enthalpy value/(kJ/kg)
Gas phase	H_2	9.6091	0	0.00
	CO	11.0281	-110.527	-1218.90
	N_2	6.9603	0	0.00
	CO_2	0.5297	-393.522	-208.45
Condensed phase	HCl(aq)	0.8508	-175.95	-149.70
	H_2O	3.9672	-285.83	-1133.94
	Al_2O_3	3.3199	-1675.70	-5563.16
	AlCl_3	0.0952	-706.03	-67.21
Total	-	-	-	-8341.36

Table 7 Results of cooling the adiabatic combustion products at different pressures to 298K

Product	Amount of substance/mol				
	$p_0=6.86\text{MPa}$	$p_0=10\text{MPa}$	$p_0=15\text{MPa}$	$p_0=20\text{MPa}$	
Gas phase	H_2	9.6091	9.6075	9.6055	9.6044
	CO	11.0281	11.0300	11.0318	11.0330
	N_2	6.9603	6.9603	6.9603	6.9603
	CO_2	0.5297	0.5278	0.5260	0.5248
Condensed phase	HCl(aq)	0.8508	0.8695	0.8896	0.9038
	H_2O	3.9672	3.9595	3.9514	3.9454
	Al_2O_3	3.3199	3.3231	3.3264	3.3288
	AlCl_3	0.0952	0.0889	0.0822	0.0775
Total enthalpy(kJ/kg)	-8341.37	-8342.83	-8344.34	-8345.49	

3.3 理论定容爆热的计算

得到 NEPE 推进剂的产物焓 H_2 为 -8341.37kJ/kg 后,又因为已知 NEPE 推进剂的原料焓 H_1 是 -787.78kJ/kg ,代入推进剂理论定压爆热计算式(2)中,最终计算出理论定压爆热

$$Q_{p,\text{th}} = 7295.51\text{kJ/kg}$$

而理论定容爆热 $Q_{v,\text{th}}$ 与理论定压爆热 $Q_{p,\text{th}}$ 之间的关系按照式(3)进行换算。

$$Q_{v,\text{th}} = Q_{p,\text{th}} + n_g RT \quad (3)$$

式中 n_g 指 1kg 推进剂燃烧产物中气态产物物质的量。即确定定压爆热产物后可以根据焓降得到理论定压爆热 $Q_{p,\text{th}}$ 和相应的 n_g ,最终算得理论定容爆热 $Q_{v,\text{th}}$ 。从表6可知气相产物之和 $n_g = 29.2269\text{mol}$, R 取 $8.314 \times 10^{-3} \text{kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, T 取 298K ,计算得到的理论定容爆热 $Q_{v,\text{th}} = 7367.92\text{kJ/kg}$ 。最终的爆热效率

$$\eta = \frac{Q_{v,\text{exp}}}{Q_{v,\text{th}}} \times 100\% = 96.32\% \quad (4)$$

4 结 论

本文对推进剂理论爆热计算方法进行了研究,可以得到如下结论:

(1)最小自由能法计算推进剂燃烧产物的使用是有界限的,只能用于计算发动机燃烧室高温下的绝热定压燃烧产物,不适用于计算常温下的爆热产物。

(2)建立并验证了降温到 298K 燃烧产物的确定方法,即剔除掉高温产物中质量分数小于 0.1% 的微小物质和 298K 下不可能存在的解离产物,增加常温下存在可能大的 AlCl_3 ,基于元素守恒最终确定各组分含量。

(3)提出推进剂理论定压爆热计算的关键是确定爆热末状态的燃烧产物,然后依据盖斯定律计算得到理论定压爆热;通过理论定压爆热和定压爆热产物中的燃气摩尔数计算得到理论定容爆热。

(4)爆热作为一个与放热量有关的参数,其实际值与理论值之比能反应推进剂自身的在燃烧过程中的实际性能。因此将爆热效率定义为实际定容爆热与理论定容爆热之比,可以用来表征推进剂的燃烧效率。

致 谢:感谢国家自然科学基金、航天化学动力技术重点实验室基金和燃烧、热结构与内流场重点实验室基金的资助。

参考文献

- [1] 胡松启,李葆萱. 固体火箭发动机燃烧基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2014.
- [2] 庞爱民. 固体火箭推进剂理论与工程[M]. 北京:中国宇航出版社,2014.
- [3] 庞维强, De Luca TLuigi, 樊学忠,等. 高活性铝粉的改性及在化学推进剂中燃烧团聚研究进展[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(1): 42-53.
- [4] 卢洪义,杨兴根. 高精度固体推进剂爆热测试系统[J]. 推进技术, 2000, 21(5): 83-85. (LU Hong-yi, YANG Xing-gen. High Accuracy Test System for Solid Propellant Combustion Heat Measurement[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(5): 83-85.)
- [5] 李疏芬,金荣超. 含金属固体推进剂燃烧残渣的成分分析[J]. 推进技术, 1996, 17(1): 83-88. (LI Shu-feng, JIN Rong-chao. Composition Analysis of Combustion Residues of Metallized Solid Propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1996, 17(1): 83-88.)
- [6] 吴婉娥,毛根旺,王英红. 富燃料固体推进剂燃烧残渣分析方法研究[C]. 成都:中国宇航学会固体火箭推进第22届年会论文集(推进剂分册), 2005.
- [7] 王世英,钱 勳. 高能推进剂主要组分对燃烧效率影响研究[J]. 固体火箭技术, 2000, 23(2): 32-35.
- [8] 胡润芝,张小平,郑 剑,等. 高能推进剂燃烧效率研究和实测比冲预估[J]. 推进技术, 2001, 22(5): 415-417. (HU Run-zhi, ZHANG Xiao-ping, ZHENG Jian, et al. Combustion Efficiency Study and Prediction of Specific Impulse of High-Energy Propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(5): 415-417.)
- [9] 吴雄岗,严启龙,李军强,等. 含金属燃料改性双基推进剂燃烧效率研究[C]. 大连:中国化学会第五届全国化学推进剂学术会议论文集, 2011.
- [10] 周梦圆,王艳萍,唐 根,等. GAP/硝酸推进剂燃烧效率实验研究[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(3): 385-391.
- [11] 胡云逸,钱 勳,周梦圆,等. 铝基合金燃料对低燃速 GAP/HMX 推进剂燃烧效率的影响[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(4): 547-554.
- [12] 江 强,王 辽,郭金鑫,等. 基于总温测量的超燃冲压发动机燃烧效率研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(4): 1-5.
- [13] 单睿子,曹军伟,莫 展,等. 基于试验设计的固体火箭冲压发动机燃烧效率规律研究[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 2859-2868.
- [14] Li Lian-bo, Chen Xiong, Zhou Chang-sheng, et al. Experimental and Model Investigation on Agglomeration of Aluminized Fuel-Rich Propellant in Solid Fuel Ramjet

- [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 219: 437-448.
- [15] 王 印, 胡松启, 刘林林, 等. 含石蜡燃料在固液混合发动机中的燃烧效率研究[J]. 推进技术, 2020, 41(8): 1807-1813. (WANG Yin, HU Song-qi, LIU Lin-lin, et al. Combustion Efficiency of Paraffin-Based Fuels in Hybrid Rocket Motor [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(8): 1807-1813.)
- [16] 谭惠民. 固体推进剂化学与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [17] 汪慧思, 张 鑫, 王艳薇, 等. 铝基微单元复合燃料在NEPE固体推进剂中的应用[J]. 含能材料, 2022, 30(8): 819-825.
- [18] 赵宏立. 火药爆热标准物质标准值的不确定度分析[J]. 计测技术, 2005(4): 41-44.
- [19] 赵宏立, 李 强. 火药爆热热量计检定用标准物质的研制[J]. 火炸药学报, 2006, 29(1): 72-74.
- [20] 赵宏立, 靳建伟. 充氮法测量双基发射药爆热值的影响因素[J]. 火炸药学报, 2010, 33(5): 87-90.
- [21] 李玲霞, 丁茂元, 白伟利, 等. Al/KClO₄点火药爆热测定的影响因素[J]. 火工品, 2012(6): 40-43.
- [22] 冯 青, 李世武, 张 丽. 工程热力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [23] Swihart M T, Catoire L, Legrand B, et al. Rate Constants for the Homogeneous Gas-Phase Al/HCl Combustion Chemistry [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 132(1-2): 91-101.
- [24] CHEN Xiu-min, YANG Bin, TAO Dong-ping, et al. Theoretical Study of the AlCl Disproportionation Reaction Mechanism on the Al(100) Surface [J]. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, 2011, 30(7): 931-942.

(编辑:白 鹭)