

文章编号: 1006-9941(2011)03-0287-04

## 改性双基推进剂组合装药界面力学性能

王 瑛, 张晓宏, 陈雪莉, 谢五喜, 付小龙

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为探究由不同配方、不同工艺组合制备而成的固体推进剂组合装药界面的力学性能,在一定温度下(20 ℃, 50 ℃, -40 ℃),采用材料拉伸实验机测定了基于 NC/NG/RDX 改性双基推进剂体系的粒铸和浇铸推进剂配方及其组合药柱的抗拉强度和伸长率,并利用扫描电镜-能谱联合分析仪分析了断裂面的形貌及元素分布。结果表明:由粒铸工艺制备的改性双基推进剂和由浇铸工艺制备的改性双基推进剂组合而成的推进剂组合药柱间界面的力学性能与浇铸推进剂接近,界面强度对组合装药整体力学性能的影响非常小,组合装药力学性能由力学性能相对较弱的一级推进剂决定;另外,推进剂配方中所含的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在界面处形成堆积,其对组合药柱燃烧性能,尤其是过渡燃烧稳定性产生的影响有待进一步研究。

**关键词:** 物理化学; 固体推进剂; 组合装药; 界面; 力学性能

**中图分类号:** TJ55; V512; O64

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.010

### 1 引言

为提高导弹的机动性、突防能力和命中精度,作为动力装置的火箭发动机需要具有推力可控和多次启动的能力,即需要对火箭发动机的能量输出方式进行管理<sup>[1-2]</sup>。多级推力发动机设计方案主要包括多级发动机和单室多推力两种,尤其是单室多推力发动机技术以其结构简单、推力调节方便、发动机综合性能优良等优势已经开始在火箭弹及战术导弹中得到了应用。

单室多推力发动机利用一台发动机,装填药型、能量或燃速不同的推进剂组合装药就可实现导弹的发射、增速、续航、加速等功能。按照总体技术指标,单室多推力发动机可由不同燃速、不同药型、甚至不同工艺的推进剂药柱组合而成。组成组合装药的两种推进剂组分在界面之间的运动和相互作用,导致此界面处的力学性能发生变化,这会直接影响组合装药结构的完整性、推力和内弹道等性能的过渡,进而影响单室多推力发动机整体综合技术指标的实现。

刘美珍等<sup>[3]</sup>初步研究了两种不同燃速的丁羟复合推进剂(HTPB/AP/Al)药柱之间的粘结性能,认为粘结工艺直接影响粘结性能。目前国内尚未开展固体

推进剂组合装药界面力学性能的系统研究,相应的研究方法也很不成熟,本实验着重对改性双基体系粒铸工艺制备的改性双基推进剂和浇铸工艺制备的改性双基推进剂组合药柱的界面力学性能进行了探索研究,以期为相关研制提供借鉴。

### 2 实验

#### 2.1 推进剂配方及组合药柱制备

粒铸推进剂和浇铸推进剂配方: NC + NG 47% ~ 57%; RDX 30% ~ 35%; 燃速催化剂(铅盐、铜盐) 3.5% ~ 4.5%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  及其它助剂 6%。两种推进剂配方差异主要是燃速催化剂品种及含量不同,工艺助剂不同。

采用粒铸工艺先制备一种推进剂,70 ℃一天预固化成型后将其一端面用中粗粒度的砂纸打磨,然后采用淤浆浇铸工艺浇铸上另一种推进剂,70 ℃固化三天后脱模制备成推进剂组合药柱。

#### 2.2 抗拉强度、伸长率测定

将粒铸推进剂(以下称 A 推进剂)、浇铸推进剂(以下称 B 推进剂)以及推进剂组合药柱(以下称 AB 推进剂)分别切成 10 mm × 25 mm × 120 mm 的拉伸片,组合药柱界面处于拉伸片中部。依据 GB770A-97 方法 413.1,采用 Instron 4505 材料拉伸机进行了初温为 20 ℃、50 ℃ 和 -40 ℃ 条件下拉伸实验,拉伸速度 100 mm · min<sup>-1</sup>。实验分别测定了两种推进剂及推进剂组合药柱在不同初温下的抗拉强度  $\sigma_m$  和伸长率  $\varepsilon_m$ ,

收稿日期: 2010-07-02; 修回日期: 2010-07-27

基金项目: 国防科技工业基础产品创新计划火炸药科研专项

作者简介: 王瑛(1971-),女,高级工程师,研究领域为固体推进剂性能检测及燃烧。e-mail: lwmg924@126.com

并记录推进剂组合药柱拉伸后的断裂位置(见表1)。

表1 力学性能测试结果

Table 1 Mechanical properties of different samples

propellant sample	20 °C		50 °C		-40 °C	
	$\sigma_m$	$\varepsilon_m$	$\sigma_m$	$\varepsilon_m$	$\sigma_m$	$\varepsilon_m$
	/MPa	/%	/MPa	/%	/MPa	/%
A	4.426	42.429	0.697	65.995	21.395	3.102
B	2.302	15.876	0.450	23.067	17.627	2.769
AB	2.382	14.382	0.419	28.507	17.980	2.162

Note:  $\sigma_m$ , the maximum stress of the propellant;  $\varepsilon_m$ , the maximum elongation of the propellant.

### 2.3 断裂面形貌、元素分析

利用日本JSM-5800扫描电子显微镜和牛津LINKSIS能谱仪联合分析系统对拉伸断裂面进行表面形貌和表面元素质量分布的测定。结果见图1、表2。

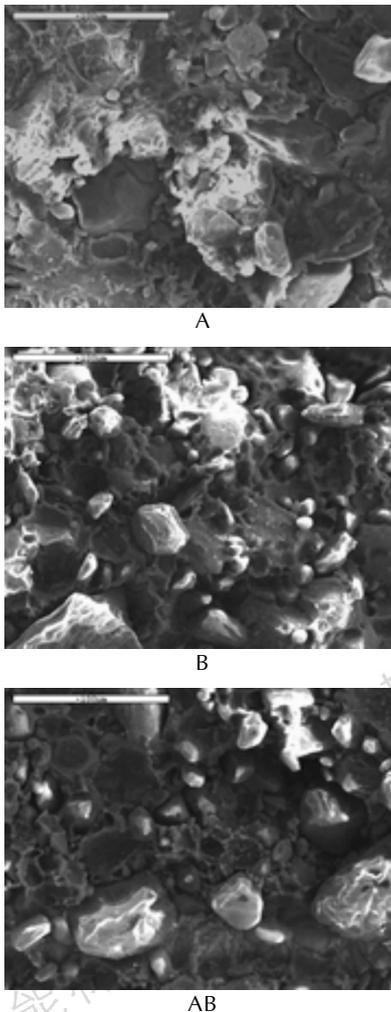


图1 样品拉伸断裂面形貌SEM照片(20 °C, 500倍)

Fig.1 SEM photographs of tensile failure surface of different samples (20 °C, 500 ×)

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 单级推进剂力学性能对界面力学性能的影响

AB推进剂的力学性能应包括A推进剂力学性能、B推进剂力学性能以及组合界面的力学性能三个环节。

由表1可见,A样品在20 °C、50 °C、-40 °C下的抗拉强度和伸长率均高于B样品,也就是说组成组合药柱的两个单级推进剂中A推进剂的力学性能明显优于B推进剂。分析认为:两种推进剂配方主组分相同,仅催化剂品种、含量不同,力学性能的差异主要与工艺过程有关。改性双基推进剂的力学性能取决于硝化纤维素的塑化均匀程度,浇铸法制备的球形药的预塑化程度及组分分布的均匀性不如粒铸法机械造粒工艺制备的药粒好,因此浇铸工艺制成的推进剂硝化纤维素的塑化均匀程度不如粒铸工艺。

图1所示为放大500倍的拉伸断裂面扫描电镜照片,B样品的氧化剂颗粒堆积在粘合剂基体表面,颗粒与粘合剂基体之间有明显的界面,颗粒表面比较光滑,未被粘合剂包覆,粘合剂基体上分布着一些凹坑,表明推进剂样品受到拉伸应力作用时,颗粒从粘合剂基体中剥落、脱离出来,发生了比较严重的脱湿现象,直接影响固体推进剂力学性能的提高。A样品中大块填料与粘合剂体系塑化得比较均匀,脱湿的颗粒较B样品少得多,因此力学性能较好。

AB样品组合推进剂20 °C、50 °C下拉伸后断裂位置在界面,-40 °C下拉伸后断裂位置在B推进剂,断裂处距离界面2~5 mm。可见在推进剂A、B和界面三个环节中组合药柱界面的常温和高温力学性能最弱,而低温下界面力学性能优于B推进剂。但从表1可以看出:在20 °C和50 °C下,AB样品界面抗拉强度和伸长率数据与B推进剂相同条件下的数据非常接近,并且图1所示AB样品拉伸断裂界面500倍电镜照片中固体颗粒的大小、颗粒在粘合剂基体上的分布状态以及颗粒脱湿情况也与B推进剂一致。至此可以得出:组合推进剂界面是一层很薄的混合区,其力学性能与单级推进剂中力学性能较弱的B推进剂相当,组合推进剂样品拉伸后肉眼观察到的界面处的断裂实际上是单级推进剂中力学性能相对较弱的B推进剂的断裂。

### 3.2 推进剂组分以及界面组分与力学性能的关联

A、B、AB样品常温下拉伸断裂面元素分析结果见表2。C、N、O元素主要来源于配方中的NC、NG、RDX,而A、B推进剂配方主组分几乎完全一致,因此

三个断裂面上的 C、N、O 元素的质量百分数很相近,但从催化剂所含的 Pb、Cu 元素以及弹道稳定剂  $Al_2O_3$  中所含的 Al 元素可以看出:AB 样品组合推进剂界面处 Pb、Cu 元素质量百分数与 B 样品 Pb、Cu 元素质量百分数相近,这一点与形貌分析结果完全相同;界面处 Al 元素质量百分比与 A、B 样品 Al 元素质量百分比之和接近,说明在组合推进剂界面处  $Al_2O_3$  产生了堆积。20 世纪 90 年代王宁飞<sup>[6]</sup>、程丽萍<sup>[7]</sup>等的研究都表明  $Al_2O_3$  用于燃烧稳定剂存在最佳含量和最佳粒径。因此弹道稳定剂  $Al_2O_3$  在组合推进剂界面处的堆积对组合装药燃烧稳定性等其它性能的影响有待进一步研究。

表 2 样品拉伸断裂面元素分析结果

Table 2 Elemental analysis of tensile surface of different samples(20 °C) %

propellant samples	C	N	O	Al	Cu	Pb
A	12.64	30.96	49.90	1.64	0.82	3.71
B	12.07	34.53	48.23	3.93	0.49	0.64
AB	10.19	33.02	50.69	5.23	0.48	0.59

### 3.3 推进剂组合过程中界面固化过程对其力学性能的影响

改性双基推进剂固化过程就是硝化纤维素(NC)被硝化甘油(NG)等增塑剂溶塑,形成高分子浓溶液的过程,溶塑过程是靠分子的热运动——扩散完成的。因为 NC 是分子量很大的高分子,其扩散速度很小,只能是 NG 等低分子溶剂向聚集态的 NC 大分子之间扩散,使 NC 的分子间距离变大,体积增大,发生溶胀。如果溶剂的量足够,溶胀可持续进行,当 NC 大分子达到一定溶胀程度,形成高分子浓溶液,固液混合物的推进剂药浆降温后即变成固体推进剂。

如 2.1 所述,本研究中 A 推进剂经过了 70 °C 一天的预固化,再与 B 推进剂一起又经过了 70 °C 三天的固化而成组合装药(图 2)。A、B 推进剂中 NC 和 NG 含量完全相同,组合固化过程中由于 A 推进剂预先固化了一天,在组合界面处由 A 推进剂固化形成的高分子浓溶液和由 B 推进剂固化形成的高分子浓溶液之间必然存在浓度差,再加上重力沉降作用,使得界面处的一薄层 A 推进剂的 NC 溶胀程度更高,这一薄层推进剂的玻璃化温度也就略低,力学性能略好。然而这一微观上的微小差异在高温和常温下表现得不明显(组合药柱 AB 在 20 °C、50 °C 下拉伸后断裂于界面

处的 B 推进剂),在条件恶劣的低温环境下就表现出来了(组合药柱 AB 在 -40 °C 下拉伸后断裂于远离界面的 B 推进剂)。

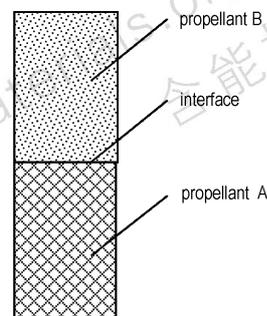


图 2 固体推进剂组合装药结构示意图

Fig.2 Single-chamber dual thrust grain

## 4 结论

(1) 基于 NC/NG/RDX 改性双基推进剂体系,由粒铸工艺制备的推进剂和淤浆浇铸工艺制备的推进剂组合而成的固体推进剂组合药柱间界面为一薄层混合区,其力学性能在 20 °C、50 °C 下同浇铸推进剂相当,在 -40 °C 下优于浇铸推进剂,界面力学性能对组合药柱整体力学性能几乎没有影响。

(2) 在组合工艺合适的前提下,由浇铸工艺制备的推进剂力学性能对组合药柱力学性能起决定作用。

(3) 两种推进剂配方中的  $Al_2O_3$  在组合药柱界面处形成堆积,其对组合药柱力学性能虽然没有影响,但对界面过渡燃烧稳定性的影响有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 张淑慧,胡波,孟雅桃. 推力可控固体火箭发动机应用及发展[J]. 固体火箭技术,2002,25(4): 12-15.  
ZHANG Shu-hui, HU Bo, MENG Ya-tao. Application and development of controllable solid rocket motor[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2002, 25(4): 12-15.
- [2] 徐温干. 固体火箭发动机推力大小调节技术的发展[J]. 推进技术,1994(1): 39-44.  
XU Wen-gan. The development for technique of adjusting thrust of solid rocket motor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1994(1): 39-44.
- [3] 刘美珍. 单室双推力发动机内两种不同燃速推进剂粘结性能研究[J]. 湖北航天科技,2000(4): 37-40.  
LIU Mei-zhen. Felt properties of two propellants with different burning rate in the single-chamber dual thrust rocket[J]. *Hubei Journal of Spaceflight Science and Technology*, 2000(4): 37-40.
- [4] 庞军,蔚红建,刘小刚,等. 碳纤维对低特征信号 XLDB 推进剂力学性能影响的初步研究[J]. 火箭推进,2005,31(3): 23-25.  
PANG Jun, YU Hong-jian, LIU Xiao-gang, et al. Influences of carbon fiber on mechanical characteristics of minimum signature

- XLDB propellant[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2005, 31(3): 23-25.
- [5] 李吉祯, 樊学忠, 钟雷, 等. NC/NG/AP/Al 复合改性双基推进剂力学性能研究[J]. 含能材料, 2007, 15(4): 345-348.  
Li Ji-zhen, FAN Xue-zhong, ZHONG Lei, et al. Mechanical properties of NC/NG/AP/Al composite modified double-base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(4): 345-348.
- [6] 王宁飞, 陈龙, 赵崇信, 等. 固体火箭燃烧室内微粒分布的实验研究[J]. 推进技术, 1995(4): 24-27.  
WANG Ning-fei, CHEN Long, ZHAO Chong-xin, et al. An experimental study on distribution of particulates in solid rocket motors [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995(4): 24-27.
- [7] 程丽萍, 王宁飞, 冯伟. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在发动机燃烧室中尺寸分布的实验研究[J]. 火炸药学报, 2000, 23(4): 21-23.  
CHENG Li-ping, WANG Ning-fei, FENG Wei. Sizes distribution study of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in motor chamber [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (Huozhayao Xuebao)*, 2000, 23(4): 21-23.
- [8] 任务正, 王泽山. 火炸药理论与实践[M]. 北京: 中国北方化学工业总公司编辑出版, 2001.

## Interfacial Mechanical Properties of Single-chamber Dual Thrust Grain for Modified Double-based Propellant

WANG Ying, ZHANG Xiao-hong, CHEN Xue-li, XIE Wu-xi, FU Xiao-long

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The mechanical properties of single-chamber dual thrust grain were studied especially on the interface of the two propellant grains. The tensile strength and the elongation of propellants with different compositions prepared by different technologies were measured at 20 °C, 50 °C, and -40 °C. The surface appearance and the element distribution on the failure surface were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray photoelectron spectrum (XPS). Results show that the interfacial mechanical properties are close to that of cast propellant, and the mechanical properties of the interface has almost no effect on the whole mechanical properties of propellant. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders, one of the components in the propellant, are found to cumulate around the interface.

**Key words:** physical chemistry; double-based propellant; single-chamber dual thrust grain; interface; mechanical property

**CLC number:** TJ55; V512; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.010



## 中国化学会第五届全国化学推进剂学术交流会通知

由中国化学会主办的中国化学会第五届全国化学推进剂学术交流会将于 2011 年 9 月上旬在大连举行。本届会议由中国科学院大连化学物理研究所承办。

本届会议的主题是：**高能燃料科学与技术**

征文范围：

- 1、化学推进剂的研究进展与发展前景；
- 2、推进剂配方研制技术,包括绿色化学推进剂、凝胶/膏体推进剂、高能/吸热型/高密度碳氢燃料、氟胺类推进剂、高氮材料、高能富燃料推进剂、高能量密度物质,等等；
- 3、推进剂的分析测试、发动机推进技术及催化剂技术、理论计算；
- 4、推进剂安全防护、毒理及病理研究,污染控制与三废处理等。

征文要求：

- 1、论文观点明确,数据真实,文字精练、流畅,图表清晰,未在国内外公开刊物和全国性学术会议上发表过；
- 2、文责自负,论文应不涉密；
- 3、论文模板及编排规则可在会议网站下载；
- 4、论文通过会议网站在线投稿,根据在线投稿的说明,选择稿件主题与投稿类别；
- 5、征文截止时间为 2011 年 6 月 30 日。

会议主席：李俊贤

副主席：张涛 方智

会务组联系方式：秘书长：王晓东 丛昱 地址：大连市中山路 457 号 邮编：116023

电话/传真：0411-84379680-9676/84685940 E-mail: nccp5@dicp.ac.cn

http://www.5nccp.dicp.ac.cn