

# 嵌入多孔球形颗粒的超高燃速推进剂内弹道研究\*

李永盛<sup>1</sup>, 蔺向阳<sup>2</sup>, 李世鹏<sup>3</sup>, 易黎明<sup>1</sup>

(1. 内蒙动力机械研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010;

2. 南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094;

3. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对现有多孔推进剂性能一致性差、燃速和密度难以调节的不足, 本文提出了在复合推进剂中嵌入多孔球形颗粒以实现超高燃速的方案。介绍了多孔球形颗粒的配方和成型工艺, 对其内弹道和撞击感度进行了测试。研制了不同配方的嵌入多孔球形颗粒的超高燃速推进剂, 通过内弹道性能测试, 研究和分析了该类推进剂的燃烧特性。研制和试验结果表明, 高孔隙率、低密度的多孔球形颗粒容易产生对流燃烧, 但安全性能良好; 在复合推进剂中嵌入多孔球形颗粒以实现超高燃速的方案可行, 能够通过调节多孔球形颗粒自身的孔隙率和能量密度以及其在推进剂中的比例, 实现从常规推进剂到超高燃速推进剂密度和燃速的有效调节。

**关键词:** 超高燃速; 多孔球形颗粒; 内弹道; 固体发动机; 固体推进剂

中图分类号: V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 11-210428-05

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210428

## Interior Ballistics of Ultra-High Burning Rate Propellant Embedded with Porous Spherical Particles

LI Yong-sheng<sup>1</sup>, LIN Xiang-yang<sup>2</sup>, LI Shi-peng<sup>3</sup>, YI Li-ming<sup>1</sup>

(1. Inner-Mongolia Power Machinery Institute, Hohhot 010010, China;

2. College of Chemistry and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China;

3. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of poor performance consistency and difficult adjustment of burning rate and density of monolithic porous propellant, a scheme of embedding porous spherical particles in composite propellant to achieve ultra-high burning rate is proposed. The formulation and forming process of porous spherical particles are introduced. The interior ballistics and impact sensitivity are tested. Ultra-high burning rate propellants with different formulations embedded with porous spherical particles were developed. The combustion characteristics of this kind of propellants were studied and analyzed through the internal ballistic performance test. The development and test results show that the porous spherical particles with high porosity and low density are easy to produce convective combustion, but the safety performance is good. The scheme of embedding porous spherical particles in composite propellant to achieve ultra-high burning rate is feasible. It can effectively adjust the density and burning rate from conventional propellant to ultra-high burning rate propellant by adjusting the porosity and energy density of porous spherical particles and their proportion in propellant.

\* 收稿日期: 2021-07-03; 修订日期: 2022-01-06。

基金项目: 国防创新特区 (17-863-03-ZT-005-001-01)。

通讯作者: 李永盛, 硕士, 高级工程师, 研究领域为特种发动机与飞行器设计。

引用格式: 李永盛, 蔺向阳, 李世鹏, 等. 嵌入多孔球形颗粒的超高燃速推进剂内弹道研究[J]. 推进技术, 2022, 43(11): 210428. (LI Yong-sheng, LIN Xiang-yang, LI Shi-peng, et al. Interior Ballistics of Ultra-High Burning Rate Propellant Embedded with Porous Spherical Particles[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11):210428.)

**Key words:** Ultra-high burning rate; Porous spherical particle; Interior ballistics; Solid motor; Solid propellant

## 1 引言

超高燃速推进剂燃速能够达到1m/s以上,远高于常规推进剂,能够使固体发动机在短时间内产生大推力<sup>[1]</sup>,甚至实现发动机满装填端面燃烧并输出大推力,避免了内孔型装药带来的工艺、成本、质量等问题。采用超高燃速推进剂是固体发动机发展的重要方向。

目前提高推进剂燃速的方法主要有燃烧催化法<sup>[2-3]</sup>、增加热传导法<sup>[4]</sup>、采用纳米微粉或超细固体粒子法<sup>[5-6]</sup>、新型含能材料法<sup>[7]</sup>、金属粉/氧化剂复合粒子法<sup>[8-9]</sup>、基于对流燃烧机理的方法<sup>[10-11]</sup>等。以对流燃烧为主的透气性多孔推进剂自20世纪70年代提出以来,高效的对流传热使其具有明显的燃速优势,成为超高燃速推进剂发展的趋势。其技术途径是在固体推进剂中产生大量透气性微孔,燃烧时高温高压气态产物渗入微孔中,将燃烧模式从传统的平行层燃烧改变为对流燃烧,使燃速达到常规推进剂的上百倍。部分国内外学者使用多孔高氯酸铵(AP)代替部分普通AP,使推进剂燃速明显增加。也有学者采用热收缩球的方式产生多孔结构<sup>[12]</sup>。但目前的透气性多孔推进剂在发展中遇到很多问题,主要原因是微孔的成型中难以保证一致性,造成燃烧性能重复性差、燃速和密度调节难度大、对压力敏感等,造成该类推进剂的工程化应用进度缓慢。

多孔球形颗粒内部含有大量孔隙,高压下燃速能够达到10m/s的水平。多孔球形颗粒以单基材料(硝化棉)或双基材料(硝化棉和硝化纤维)为主要原料,也可以加入HMX和AP氧化剂,以及铝粉等高能燃料,改善能量特性,其制备方法主要有双乳液法<sup>[13]</sup>和溶剂浸析法<sup>[14]</sup>。多孔球形颗粒可以作为速燃发射药提高弹药的出口速度,也可作为超高燃速推进剂改善内弹道特性。

本文尝试将该球形颗粒嵌入密实型推进剂中,空隙的大小和分布均匀性应好于整体发泡多孔推进剂,通过控制球形颗粒的数量和其自身的孔隙率等实现推进剂燃速和密度的有效调节,提高内弹道性能的一致性。

## 2 多孔球形颗粒

### 2.1 多孔球形颗粒成型工艺

由于双基球形颗粒(硝化纤维和硝化甘油)的球

形化工艺已经非常成熟,在双基球形颗粒的基础上进行多孔化成型,采用乳液分离法,经过物料溶解、乳化发泡、成球、驱离溶剂、分离、后处理、干燥等工艺,成型多孔颗粒。

多孔球形颗粒是以球形药成型技术基础上发展而来的,其内部孔结构非常丰富,孔的直径在微米级甚至更小的尺度。采用扫描电镜对典型的多孔球形颗粒样品进行切片及表面状态观察结果如图1所示。多孔球形颗粒内部孔隙、外部孔隙的孔径均匀性控制主要通过乳化液用量、引入第三相挥发性溶剂介质等方式实现,而球形颗粒粒径则主要通过控制溶剂与双基材料的比例实现控制。

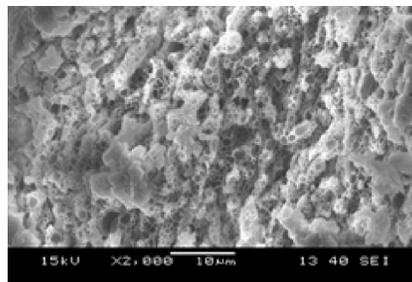


Fig. 1 Internal pore structure of porous spherical particle<sup>[15]</sup>

为增加多孔球形颗粒的能量密度,引入高能氧化剂和高能燃料提高体积能量密度,氧化剂主要选择HMX和AP,其比例不超过18%,高能燃料主要选择金属铝粉,铝粉的含量不超过5%,多孔球形颗粒的粒径不大于0.8mm。加入了粘合剂再通过磨具压制后制备出药柱,研制了不同孔隙率的六种多孔推进剂样品(如图2所示),相应的密度为0.37~1.2g/cm<sup>3</sup>。其孔隙率主要通过控制乳化用水的比例调节,药柱密度与孔隙率基本呈线性关系。从样品制备情况看,多孔球形颗粒的孔隙率控制较好。药柱长度50mm,直径15mm,采用端面燃烧模式。



Fig. 2 Porous spherical grain with different porosity

## 2.2 内弹道特性

通过不同喉径的试验器试验表明,尽管多孔球形颗粒的建压过程非常快,但仍需要较高的点火压强要求,点火压强低于3MPa时不能有效建压,这与李兆民等<sup>[16]</sup>对超高燃速多孔推进剂发动机点火特性的研究结论相似。初始燃面与发动机喉部面积比小于3时,燃烧室压强迅速下降,无法产生稳定的对流燃烧。

多孔球形颗粒药柱孔隙率越高,密度越低,越容易产生对流燃烧,当密度超过 $0.66\text{g/cm}^3$ 后推进剂燃烧性能的重复性较差。图3为 $0.66\text{g/cm}^3$ 多孔球形颗粒药柱的内弹道数据(压力传感器采用频率为10kHz),经过初始段的平行层燃烧后,转变为对流燃烧,燃烧室压强迅速增加。药柱的燃烧时间约为1.4ms,平均燃速达到35.7m/s,压强指数也超过1。尽管燃烧室压强接近40MPa,但对于短时间工作的冲量发动机来说满足设计要求。

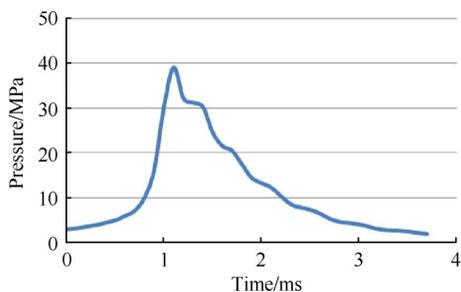


Fig. 3 Interior ballistic curve of porous spherical grain with high porosity

## 2.3 安全性

为将常规丁羟复合推进剂燃速提高至100mm/s以上,常采用超细原材料(高氯酸铵、铝粉)的方法,导致推进剂感度较高,存在安全隐患。多孔球形颗粒的燃速非常高,其安全性成为关注点之一。多孔球形颗粒通过物理手段产生高燃速,其组分和组分规格均为常规形态,理论上多孔球形颗粒的安全性能良好。

研制了密度 $0.66 \sim 1.27\text{g/cm}^3$ 的6组多孔球形颗粒样品,将待测样品置于 $50^\circ\text{C}$ 水浴烘箱内烘干24h,储存于干燥器内备用。根据GJB772A-97中601.2测试实验方法,采用HGZ-3撞击感度仪进行撞击感度测试,其中落锤重量2.5kg,落高250mm,实验药量35mg。试验结果如表1所示。除样品4的撞击感度低于12%外,其它样品均低于4%,远低于采用超细原料的高燃速复合推进剂。

Table 1 Impact sensitivity test results of porous spherical particle

| Number | Granularity/mesh | Aluminum content/% | Density/ $(\text{g/cm}^3)$ | Impact sensitivity/% |
|--------|------------------|--------------------|----------------------------|----------------------|
| 1      | <40              | 11.7               | 1.27                       | <4                   |
| 2      | <40              | 15.3               | 0.66                       | <4                   |
| 3      | <40              | 19.9               | 0.99                       | <4                   |
| 4      | <40              | 19.9               | 0.74                       | <12                  |
| 5      | <40              | 22.9               | 1.18                       | <4                   |
| 6      | <40              | 20.2               | 0.85                       | <4                   |

## 3 嵌入多孔球形颗粒的超高燃速推进剂

### 3.1 推进剂体制

多孔球形颗粒直接用于超高燃速推进剂(图4)仅满足小型冲量发动机等特殊装置的要求,要应用于大中型固体火箭发动机,实现满装填端面燃烧,其密度较低,并不具备优势。同时其高压强指数容易产生燃烧转爆轰效应,难以满足固体火箭发动机稳定燃烧的要求。

高孔隙率多孔球形颗粒能够产生稳定的对流燃烧,燃速达到了10m/s量级,孔隙结构和能量密度也能够调节。将这种超高燃速颗粒嵌入到密实型常规推进剂中,合理控制球形颗粒的比例,应能够研制出较高密度的超高燃速固体推进剂,实现固体发动机满装填端面燃烧。同时,通过调节多孔球形颗粒自身的孔隙率和能量密度、多孔球形颗粒在推进剂中的比例,能够实现从常规推进剂到超高燃速推进剂密度和燃速的无级调节,满足不同固体发动机对推进剂的要求。

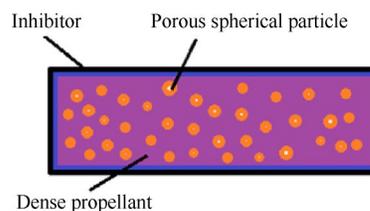


Fig. 4 Structure of ultra-high burning rate propellant embedded with porous spherical particle

### 3.2 推进配方与试制

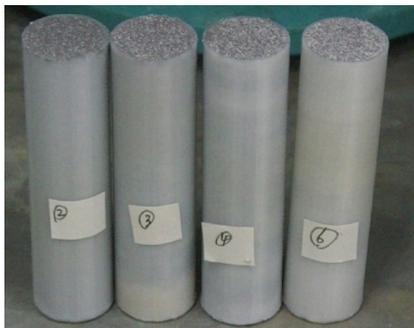
如果超高燃速推进剂密度能够达到 $1.6\text{g/cm}^3$ ,将其作为固体火箭发动机的助推推进剂,续航段采用较高燃速的常规推进剂,按巡航级与助推级推进剂总冲4:1计,相当于采用常规推进剂发动机的装填比达到98%,使发动机在综合性能、成本、生产周期、质量等方面均得到综合提升。因此,密度 $1.6\text{g/cm}^3$ 是超

高燃速推进剂研制的重要指标。

将孔隙率为60%的双基多孔球形颗粒与丁羟推进剂组分混合,根据不同的组分配比,研制出密度从 $1.59 \sim 1.77 \text{g/cm}^3$ 的高密度超高燃速推进剂,详细配方如表2所示。图5为密度为 $1.62 \text{g/cm}^3$ 的样品实物。为了提高内弹道稳定性,在推进剂混合时慢速反复搅拌丁羟胶、AP和多孔球形颗粒,尽量使多孔球形颗粒在推进剂分布均匀。

**Table 2 Formulation design of ultra-high burning rate composite propellant**

| Propellant porosity/%                  | 3.4  | 5.5  | 7.5  | 9.5  | 11.5 | 13.5 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| HTPB/g                                 | 5.88 | 5.39 | 5.01 | 4.94 | 4.59 | 4.44 |
| AP/g                                   | 27.5 | 27.2 | 25.9 | 24.6 | 23.4 | 22.3 |
| AL/g                                   | 2.76 | 2.72 | 2.59 | 2.37 | 2.35 | 2.23 |
| Porous spherical particles/g           | 1.77 | 2.77 | 3.72 | 4.64 | 5.51 | 6.35 |
| Propellant density/( $\text{g/cm}^3$ ) | 1.77 | 1.73 | 1.69 | 1.66 | 1.62 | 1.59 |



**Fig. 5 Ultra-high burning rate propellant samples embedded with porous spherical particles**

### 3.3 低压燃烧特性

图6为常压下嵌入多孔球形颗粒的超高燃速推进剂样品的燃烧装填,密度为 $1.62 \text{g/cm}^3$ 样品的平均燃速为 $1.25 \text{mm/s}$ 。图7为推进剂样品常压燃烧过程的连续摄像图,可以看出火焰传播规律基本为线性规律。

通过不同球形颗粒添加比例条件下制备的复合推进剂样品常压测试结果表明,随着孔隙率的提高燃速呈线性提高。

### 3.4 复合推进剂内弹道特性

嵌入多孔球形颗粒的超高燃速推进剂药柱长度为 $40 \text{mm}$ ,工作时间为毫米级。为了适应超短时间发动机的试验要求,研制了小型化立式试车台,固体发动机的安装板可通过两根高精度滑竿上下移动,能够更加准确地测试出发动机推力。试验情况如图8所示。



**Fig. 6 Combustion of propellant samples at atmospheric pressure**

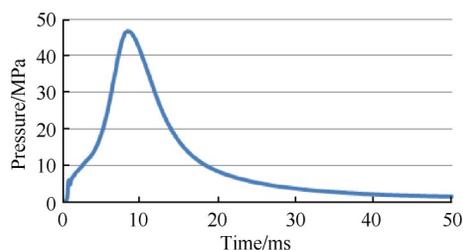


**Fig. 7 Flame propagation of propellant samples during atmospheric combustion**

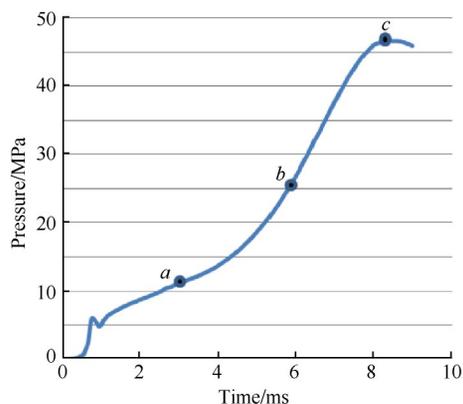


**Fig. 8 Tester test of ultra-high burning rate propellant embedded with porous spherical particles**

试验器为厚壁试验装置,采用黑火药+芯片式点火器点火,堵盖为紫铜片。嵌入密度为孔隙率为60%的双基多孔球形颗粒,超高燃速推进剂样品整体密度为 $1.62 \text{g/cm}^3$ ,采用图4所示的包覆结构,仅留尾端面燃烧。图9(a)为试验获取的完整内弹道数据,(b)为燃烧段内弹道曲线。点火压强为 $5.98 \text{MPa}$ ,点火压强振荡后,嵌入多孔球形颗粒的超高燃速推进剂以平行层燃烧为主,压力缓慢上升。至a点后,推进剂燃烧逐步转向对流燃烧,压强快速增加。b点后,燃速压力梯度随着压力的增加快速增加。c点为燃烧室压力峰值点,参考文献[17]的论述,c点后的较短时间内燃烧波接近药柱底端,有一段减面燃烧段,之后燃烧室压力快速下降。该内弹道曲线与王伯羲等<sup>[17]</sup>提出的透气性推进剂燃烧过程非常相似。



(a) Complete interior ballistic data curve



(b) Interior ballistic curve of combustion section

Fig. 9 Interior ballistic curve

## 4 结论

本文通过研究,得到如下结论:

(1)多孔球形颗粒内部含有大量孔隙,本身能够产生对流燃烧。由于通过物理原理产生超高燃速,其安全性能良好。当密度较高时,燃烧稳定性降低。高孔隙率、低密度的多孔球形颗粒容易产生对流燃烧,对压强较为敏感。

(2)将低密度多孔球形颗粒嵌入密实型丁羟复合推进剂中,能够产生对流燃烧,平均燃速超高1m/s。通过调节多孔球形颗粒自身的孔隙率和能量密度、多孔球形颗粒在推进剂中的比例,能够实现从常规推进剂到超高燃速推进剂密度和燃速的无级调节。研制出密度 $1.62\text{g/cm}^3$ 的嵌入多孔球形颗粒的推进剂,平均燃速达到6.2m/s,说明多孔球形颗粒改性丁羟复合推进剂实现超高燃速的方案具有可行性。

## 参考文献

[1] 李晓东,杨荣杰,李建民. 超高燃速推进剂的限燃包覆盖层[J]. 火炸药学报, 2004, 27(4): 63-65.

- [2] 唐青松,丁宏勋. 丁羟推进剂的高效燃速催化剂[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2004, 2(1): 8-11.
- [3] 封锋,陈军,郑亚,等. 高燃速推进剂燃速可调节性研究[J]. 弹道学报, 2010, 22(1): 77-78.
- [4] 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.
- [5] 赵凤起,覃光明,蔡炳源. 纳米材料技术在固体推进剂中的应用研究现状及发展方向[J]. 火炸药学报, 2001(4): 61-65.
- [6] 胥会祥,樊学忠,刘关利. 纳米材料在推进剂中的研究进展[J]. 含能材料, 2003, 11(2): 94-98.
- [7] 解德富,黄振亚,张成. 高燃速功能材料对高能发射药性能的影响[J]. 爆破器材, 2020, 49(6): 27-31.
- [8] 付廷明,李凤生. 包覆式超细复合粒子的制备[J]. 火炸药学报, 2002, 1(1): 33-36.
- [9] 杨毅,徐建华,罗付生,等. RDX/Al超细复合粒子的制备及性能研究[J]. 火炸药学报, 2002, 25(1): 29-32.
- [10] 冉秀伦,杨荣杰. 高燃速推进剂研制现状分析[J]. 飞航导弹, 2006(9): 44-48.
- [11] Kuo K K, Summerfield M. Theory of Steady Burning of Porous Propellant by Means of a Gas-Penetrative Mechanism[R]. AIAA 73-221.
- [12] Sayles D C. Mechanical Enhancement of the Burning Rate of Solid Propellants by Means of Shrink Tubes or Spheres[P]. US: 4952341, 1990.
- [13] 蔺向阳,李瀚,郑文芳. 双乳液法制备微孔球形药的孔结构形成机制[J]. 兵工学报, 2016, 37(9): 1633-1638.
- [14] 王萍,张磊,蔺向阳. 溶剂浸析法制备硝化棉基微孔球形药[J]. 含能材料, 2015, 23(11): 1107-1110.
- [15] 蔺向阳. 含能高分子材料球形化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [16] 李兆民,周生国,王春利. 超高燃速多孔推进剂发动机的点火特性[J]. 推进技术, 1996, 17(1): 54-57. (LI Zhao-min, ZHOU Sheng-guo, WANG Chun-li. Ignition Characteristics of Solid Rocket Motors with Ultra-high Burning Rate Porous Propellants[J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(1): 54-57.)
- [17] 王伯羲,罗善国. 透气性推进剂对流燃烧特性的影响因素[J]. 推进技术, 1993, 10(5): 59-65. (WANG Bo-xi, LUO Shan-guo. Effective Factors for Convective Combustion Behavior of Gas-Permeable Propellants[J]. Journal of Propulsion Technology, 1993, 10(5): 59-65.)

(编辑:刘萝威)