

文章编号: 1006-9941(2018)07-0550-07

铝粉粒度和含量对 NEPE 推进剂燃烧产物颗粒阻尼的影响

胡翔, 张林, 唐泉, 李伟, 廖海东, 庞爱民

(湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441003)

摘要: 为研究铝粉粒度和含量对 NEPE 推进剂燃烧产物颗粒阻尼的影响, 采用密闭弹燃烧法收集了 NEPE 推进剂的凝相燃烧产物并开展粒度分析, 根据 Culick 线性颗粒阻尼理论计算了燃烧产物对声不稳定燃烧的颗粒阻尼。结果表明, 铝粉的粒度和含量均显著影响 NEPE 推进剂燃烧产物对声不稳定燃烧的颗粒阻尼, 主要是由于铝粉粒度和含量影响了凝相燃烧产物的粒度分布。对一定频率声不稳定燃烧, 凝相燃烧产物中粒径处于 $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ (D_{opt} 为最佳颗粒粒径) 区间的颗粒质量分数越高, 燃烧产物的颗粒阻尼效率系数越大, 产生的颗粒阻尼越大。燃烧产物中凝相燃烧产物的质量分数是决定颗粒阻尼大小的因素之一, 与推进剂中铝粉含量呈正相关。

关键词: 硝酸酯增塑聚醚 (NEPE) 推进剂; 铝粉; 燃烧产物; 颗粒阻尼

中图分类号: TJ55; V512

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.07.001

1 引言

固体火箭发动机 (SRM) 中声不稳定燃烧是声振荡与燃烧过程的耦合, 轻则引起压强振荡和燃烧效率下降, 严重者甚至导致 SRM 失控、爆炸等灾难性后果, 是 SRM 设计、研制过程中必须克服的难题之一。文献 [1] 列举了国外 1951~1997 年间出现声不稳定燃烧的 SRM 实例, 其中部分 SRM 通过增加颗粒阻尼的技术途径有效抑制了声不稳定燃烧。对一定频率声振荡, 颗粒阻尼越大, 声振荡衰减越快, 声不稳定燃烧抑制效果越好, SRM 工作稳定性越好^[2]。对于含铝固体推进剂而言, 颗粒阻尼是铝粉的凝相燃烧产物 (CCP) 在燃气中运动产生的动力弛豫和热弛豫对声振荡的衰减作用, 受 CCP 的粒度和其在燃烧产物中的质量分数 (文中简称浓度) 影响^[2-5]。CCP 的粒度、浓度均与含铝固体推进剂配方有关, 因此颗粒阻尼与含铝固体推进剂的配方有关。

国外早期开展了大量声不稳定燃烧的研究工作, 包括声不稳定燃烧产生机理、影响机制等理论研究以及模拟、验证、抑制声不稳定燃烧的实验研究^[6-10]。其中, Culick 的颗粒阻尼理论^[10-11] 指出, 颗粒阻尼的大小与

声振荡频率、CCP 粒度和浓度呈强函数关系。国内则在 20 世纪八九十年代开展了大量 T 型燃烧器、模拟燃烧室等实验研究, 积累了大量数据; 而近年则偏向数值模拟、理论计算以及抑制技术等研究, 且基本为双基、改性双基以及丁羟体系推进剂的研究成果^[12-15]。能量更高、燃烧机理复杂的硝酸酯增塑聚醚类 (NEPE) 推进剂的声不稳定燃烧、颗粒阻尼研究未见公开报道。

NEPE 推进剂 CCP 的粒度和浓度是影响其对一定频率声振荡的颗粒阻尼大小的关键性因素, 而 CCP 的粒度和浓度与推进剂中铝粉的条件, 如粒度、含量有关^[16]。T 型燃烧器法可直接测量 CCP 的颗粒阻尼, 从而获得铝粉粒度或含量变化对 CCP 颗粒阻尼的影响, 但不能揭示这种影响的内在规律, 不能满足本研究需求^[5, 17]。为此, 本研究采取另一种思路, 即先获得 CCP 的粒度、浓度等数据, 再根据线性颗粒阻尼理论计算燃烧产物的颗粒阻尼, 从而开展 NEPE 推进剂配方中铝粉粒度、含量-CCP 粒度、浓度-颗粒阻尼三者的内在规律研究。

2 实验与计算

2.1 原材料与仪器

原材料: 铝粉 (Al), 西安航天化学动力厂提供, 牌号为 FLQT0、FLQT1、FLQT3、FLQT5, 文中分别简称为 Q0、Q1、Q3 和 Q5, 各牌号铝粉的活性铝含量、 D_{50} 和 D_{43} 见表 1, 均符合固体推进剂使用特细球形铝粉规范要求; 黑索今 (RDX), 山西永济北化关铝化工有限公

收稿日期: 2017-12-21; 修回日期: 2018-03-12

作者简介: 胡翔 (1990-), 男, 助理工程师, 主要从事固体推进剂配方与性能研究。e-mail: hxzgz1990@sina.com

通信联系人: 庞爱民 (1967-), 男, 研究员, 主要从事固体推进剂配方与性能研究。e-mail: ppam@163.com

司, $D_{50} = 84.62 \mu\text{m}$, $D_{43} = 91.31 \mu\text{m}$; 高氯酸铵 (AP), 黎明化工研究院, $D_{50} = 145.2 \mu\text{m}$, $D_{43} = 147.6 \mu\text{m}$; NEPE 粘合剂, 湖北航天化学技术研究所, 由端羟基环氧乙烷-四氢呋喃共聚醚 (PET)、硝化甘油 (NG) 和三羟甲基乙烷三硝酸酯 (TMETN) 配制而成, 其中 PET 为高分子粘合剂, NG 和 TMETN 为增塑剂, 增塑比 2.5。

表 1 铝粉性能参数

Table 1 Property parameters of Al powders

Al type	active Al/%	$D_{50} / \mu\text{m}$	$D_{43} / \mu\text{m}$
FLQT0(Q0)	99.60	46.67	50.70
FLQT1(Q1)	99.38	30.14	35.51
FLQT3(Q3)	99.18	13.61	14.20
FLQT5(Q5)	97.54	1.68	1.86

主要仪器: VKM-5L 立式混合机, 湖北航天化学技术研究所; GR-3500 型氧弹, 长沙仪器厂; 80-3 型离心机, 江苏金坛市中大仪器厂; TopSizer 激光粒度分析仪, 珠海欧美克仪器有限公司。

2.2 推进剂制备

推进剂 (Al/AP/RDX/NEPE 粘合剂体系) 配方为: $w_{\text{Al}} = 9\% \sim 21\%$, $w_{\text{AP}} = 35\% \sim 42\%$, $w_{\text{RDX}} = 18\% \sim 30\%$, $w_{\text{NEPE}} = 19\% \sim 21\%$, 其他添加剂 $\leq 3\%$ 。基础配方中铝粉含量为 18%, 牌号为 FLQT1, 即 Q1。设计其他配方时, 铝粉粒度变化, 配方中其它组分保持不变; 铝粉含量 w_{Al} 变化, RDX 含量等量逆向变化, 其他组分保持不变。推进剂制备的操作参见文献 [18], 使用 VKM-5L 立式混合机制备推进剂药浆, 混合温度为 50~55 °C; 50 °C 真空浇注和固化, 固化时间为 168 h。

2.3 CCP 收集实验

CCP 的收集方法有燃烧室药条法、密闭容器法和密闭弹燃烧法等^[19], 其中密闭弹燃烧法的实验可重复性好, 收集的 CCP 颗粒表面光滑、颗粒间粘连少, 故本研究采取密闭弹燃烧法。实验采用 GR-3500 型氧弹作为密闭弹燃烧室, 弹内耐高温金属坩埚装填 4.0 g 推进剂样品, 抽真空除空气并使用高纯 N_2 填充至 3.0 MPa, 25 °C 保温 0.5 h, 电控点火丝引燃推进剂样品。根据密闭弹结构、推进剂爆热和气体热力学等参数计算, 弹内最高压强低于 4.8 MPa。待样品燃烧完, 水浴冷却密闭弹至常温, 泄压, 使用无水乙醇收集弹中 CCP。收集液经简单沉降后, 进行 4000~6000 $\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心, 得到 CCP 初样。CCP 初样经多次洗涤、离心至乙醇不再变色, 干燥, 得 CCP 样品。

2.4 CCP 粒度测试

采用基于全量程米氏光散射原理的 TopSizer 激光粒度分析仪对 CCP 样品进行粒度测试, 可测粒径范围为 0.02~2000 μm 。参照 GB/T19077.1-2008《粒度分析 激光衍射法》, 对 CCP 样品选用湿法测试。由于 CCP 样品主要成分为 Al_2O_3 , 与中性水不反应, 因此使用蒸馏水作为分散介质, 并加入中性分散剂酒石酸钠。将待测 CCP 样品混合均匀并分散, 从不同位置取样, 不少于 5 份样品, 取样量为 $(0.3 \pm 0.1) \text{g}$, 加入分散溶液中, 样品的浓度为 5%~10%, 搅拌均匀后超声波振荡 5 min, 得到悬浮液。激光粒度分析仪对悬浮液进行测定, 得到粒度分布数据。实验结果以三次平行测定结果的平均值表示。

2.5 CCP 浓度计算

由于 SRM 中燃烧产物在一定工作条件下容易达到平衡状态, 故采用燃烧产物的平衡成分计算 CCP 浓度。在给定推进剂配方组成、初始温度、燃烧室压力的条件下, 可计算推进剂燃烧过程中燃烧产物的平衡成分, 且求解方法很多。本研究采用最小自由能法^[19], 具体计算由能量计算程序 RAMJ 执行。RAMJ 为湖北航天化学技术研究所内部使用的能量计算程序, 基于最小自由能法原理设计, 并根据大量实验数据优化而成, 与实验结果一致性好。使用 RAMJ 程序计算时, 输入推进剂配方组成、初始温度 298.15 K、燃烧室压力 3 MPa 等信息, 得到燃烧产物平衡成分、燃烧温度以及其他热力参数如燃气比热容等参数。

2.5 颗粒阻尼计算

颗粒阻尼的大小以颗粒阻尼系数 α_p 表示, 无量纲, 通常为负值, 为了简便, 文中 α_p 均以绝对值表示。 α_p 的具体推导过程参见文献 [5], 粒径为 D 的 CCP 颗粒的 α_p 表达式如下:

$$\alpha_p = \frac{C_m \omega}{2(1+C_m)} \left[\frac{\omega \tau_v}{1+\omega^2 \tau_v^2} + (\gamma-1) \frac{C_s}{C_p} \frac{\omega \tau_t}{1+\omega^2 \tau_t^2} \right] \quad (1)$$

式中, $C_m = m_s/m_g$, 为燃烧产物中 CCP 与燃气的质量比, 无量纲;

$\omega = 2\pi f$ 为燃烧室声腔共振频率 (角频率), $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$;

$\tau_v = \frac{m_s}{6\pi\mu\gamma} = \frac{\rho_s D^2}{18\mu}$ 为 CCP 颗粒动力弛豫时间, s;

$\tau_t = \frac{3c_s}{2c_p} \text{Pr} \tau_v$ 为 CCP 颗粒热弛豫时间, s;

γ 为燃气比热比, 在 SRM 中 $1.1 < \gamma < 1.3$, 无量纲;

c_s 为 CCP 的比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$;

c_p 为燃气的比热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$;

ρ_s 为 CCP 密度, $kg \cdot m^{-3}$;

$Pr = c_p \mu / k$ 为燃气普朗特数, 无量纲;

D 为 CCP 颗粒粒径, m ;

μ 为燃气动力粘度, $Pa \cdot s$, 可由(2)式计算

$$\mu = 8.885 \times 10^{-5} (T/3500)^{0.66} \quad (2)$$

由于 $1.1 < \gamma < 1.3$, 根据式(1)可知, 在 $\omega \tau_v = 1$ 时 α_p 可取得最大值 $\alpha_{p \max}$, 表达式如式(3), 此时对应的 CCP 粒径即为最佳粒径 D_{opt} 。

将 $\tau_v = \frac{\rho_s D^2}{18\mu}$ 代入式 $\omega \tau_v = 1$ 中可导出 D_{opt} , 如式(4)。

$$\alpha_{p \max} = \frac{C_m \omega}{2(1+C_m)} \left[\frac{1}{2} + 6(\gamma-1) \frac{c_s^2 Pr}{4c_p^2 + 9c_s^2 Pr^2} \right] \quad (3)$$

$$D_{opt} = \sqrt{\frac{18\mu}{\omega \rho_s}} = \sqrt{\frac{9}{\pi}} \sqrt{\frac{\mu}{\dot{\rho}_s}} \quad (4)$$

式(1)计算的是声振荡频率 f 下粒径为 D 的 CCP 的 α_p , 但实际上 CCP 粒度分布范围较宽, 导致仅以该粒径计算的 α_p 不能准确反映整个粒度分布区间内 CCP 的综合颗粒阻尼大小。为了提高计算精度, 将 CCP 颗粒粒径分为 n 个分散段, 分别按各分散段的加权平均粒径计算其 α_p , 再以各分散段 CCP 颗粒的质量分数 X_i 为权系数, 计算出统计上的综合 α_p , 如下:

$$\alpha_p = \frac{C_m \omega}{2(1+C_m)} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\omega \tau_{vi}}{1 + \omega^2 \tau_{vi}^2} + (\gamma-1) \frac{c_s}{c_p} \frac{\omega \tau_{ti}}{1 + \omega^2 \tau_{ti}^2} \right] X_i \quad (5)$$

f 取文献[20]中所研究的纵向高频 216 Hz, 其他参数取值如下: $\gamma = 1.23^{[5,21-22]}$, $\rho_s = 3970 kg \cdot m^{-3}^{[5]}$, $c_s = 900 J \cdot (kg \cdot K)^{-1}^{[22]}$, 燃气热导率 $k = 0.2 W \cdot (m \cdot K)^{-1}^{[22]}$ 。

3 结果与讨论

3.1 CCP 的粒度

改变推进剂配方中铝粉的粒度, 如仅改变铝粉规格, 保持其他组分的含量和规格不变, 得到的 CCP 粒度分布如图 1 所示, CCP 粒度呈双峰或三峰分布。铝粉粒度不同时, 得到的 CCP 粒度分布具有显著差异: Q0 铝粉燃烧生成的 CCP 中中间粒径颗粒的质量分数最大, 小粒径颗粒的质量分数最小; Q1 铝粉生成的 CCP 中小粒径的质量分数最大; Q3 铝粉生成的 CCP 中小粒径的质量分数最大, 且高于 Q1, 而大粒径的质量分数较小; Q5 铝粉的 CCP 中大粒径的质量分数超过 80%, 但其粒度分布区间 $[25 \mu m, 300 \mu m]$ 明显小于其他三种粒度铝粉。

铝粉粒度的另一种变化来自于不同粒度之间的级

配。在基础配方上使用更小粒径的 Q3 或 Q5 铝粉与 Q1 进行二元级配, 得到的 CCP 粒度分布见图 2。与

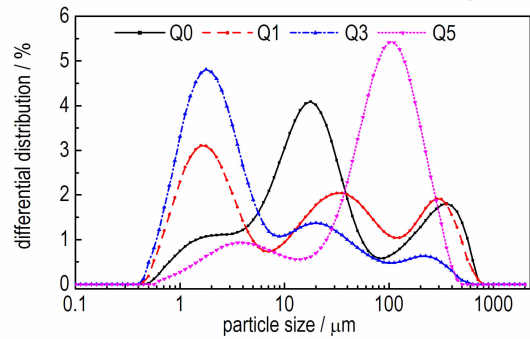
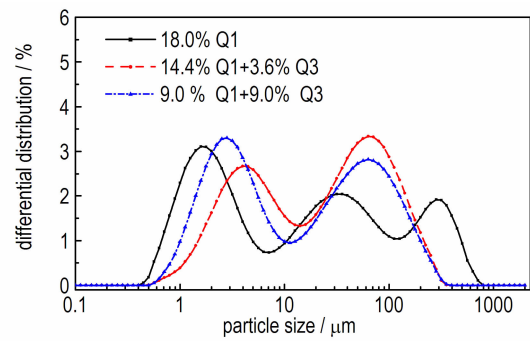
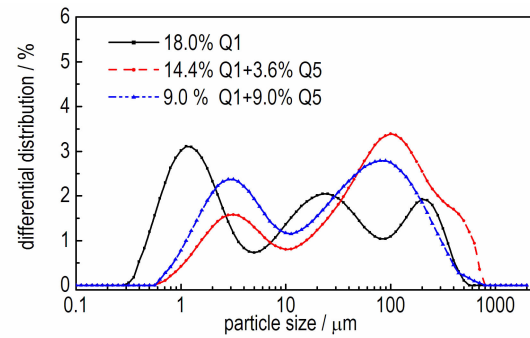


图 1 不同铝粉粒度时的 CCP 粒度分布曲线

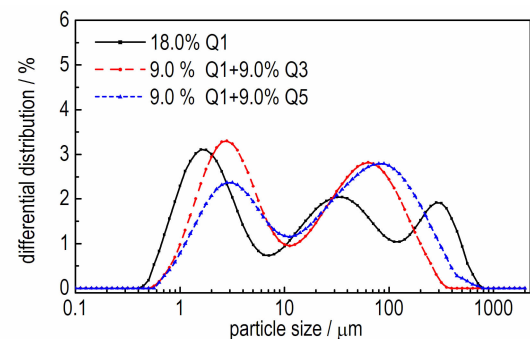
Fig. 1 Particle size distribution curves of CCP with different Al powder size



a. Q1/Q3 combination



b. Q1/Q5 combination



c. comparison with different particle size gradation

图 2 不同铝粉级配时的 CCP 粒度分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curves of CCP with different Al powder gradation

单规格 Q1 配方对比, Q1/Q3 级配中级配比为 14.4 : 3.6 时, CCP 中小颗粒分布峰粒径明显增加, 而大颗粒分布峰粒径则显著减小; 增加 Q3 的质量分数, 当级配比为 9 : 9 时, CCP 的粒度分布继续变化。Q1/Q5 级配中, 级配比的变化同样引起 CCP 的粒度分布变化; 而级配比一定时, 级配的粒度组合不同时, CCP 的粒度分布也产生明显差异。因此, 推进剂配方中, 无论是单规格铝粉粒度变化, 还是铝粉级配中级配比或粒度组合的变化, 均影响 CCP 粒度分布。

在推进剂中 AP 质量分数和粒度均不变的情况下, 改变推进剂中铝粉含量可影响到 AP 形成的“口袋”中铝粉含量。口袋模型理论指出推进剂中 AP 形成的“口袋”结构中铝粉的含量影响形成的铝凝团的粒径, 铝粉含量在一定范围内越高, 铝凝团越大, CCP 的粒度越大^[23-24]。因此, 设计了铝粉规格相同(Q1)、含量不同的推进剂配方, 得到的 CCP 粒度分布如图 3 所示。

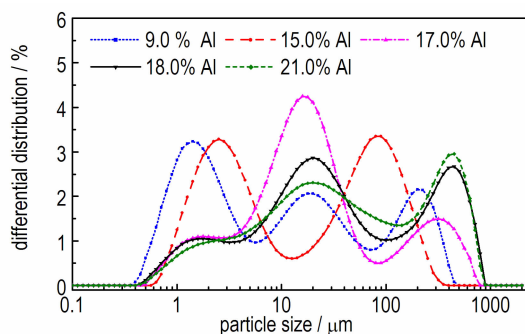


图 3 不同铝粉含量时的 CCP 粒度分布曲线

Fig. 3 Particle size distribution curves of CCP with different Al powder content

从图 3 可看出, 铝粉含量减少可导致 CCP 中小颗粒粒径的粒径减小和质量分数增加; 铝粉含量增加则导致大颗粒的粒径和质量分数增加, 以及中间粒径的质量分数减少, 该结果与口袋模型理论一致。因此, 推进剂中铝粉含量也是影响 CCP 粒度分布的重要因素。

3.2 CCP 的浓度

由于推进剂配方中铝粉粒度变化不改变其理论热值, 因而不影响基于最小自由能法计算得到的平衡产物的组成, 从而不影响燃烧产物中 CCP 的浓度。计算得到的铝粉含量 18%、粒度分别为 Q0、Q1、Q3 和 Q5 的系列配方 C_m 都为 0.317。改变铝粉含量时, CCP 的浓度变化如图 4 所示, 铝粉含量越高, C_m 值越大。

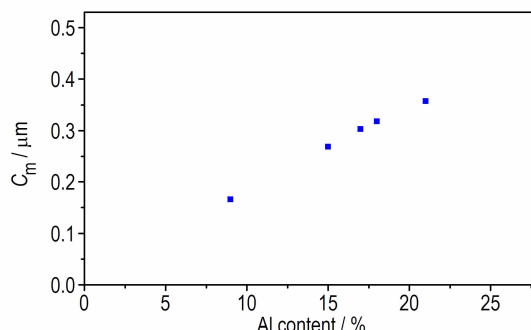


图 4 CCP 浓度与铝粉含量的关系

Fig. 4 Relationship between CCP concentration and Al powder content

3.3 颗粒阻尼

根据式(3)~式(5), 开展了 $\alpha_{p \max}$ 和 α_p 的计算。铝粉含量为 18% 的系列推进剂配方的计算结果见表 2。 $\alpha_{p \max}$ 为理论最大值, 是以 D_{opt} 为粒度参数的计算结果, 与 CCP 的实际粒度分布无关, 因此得到的各配方的 $\alpha_{p \max}$ 相同, 为 112.12。 α_p 与 CCP 的粒度分布有关, 而 CCP 的粒度分布与推进剂中铝粉的粒度有关。从表 2 中可看出, 不同铝粉粒度时的 α_p 存在显著差异, Q0 铝粉生成 CCP 的 α_p 最大而 Q5 的最小; 铝粉级配的粒度组合变化和级配比变化均引起了 α_p 的显著变化, 表明配方中铝粉粒度是决定燃烧产物 α_p 大小的重要因素。由式(1)~(5)推导可知, 对于给定频率声振荡, 决定 α_p 大小的变量因素有 C_m 、 T 、 c_p 和 CCP 粒度分布。推进剂配方中铝粉粒度变化不影响 C_m 、 T 和 c_p , 但显著改变了 CCP 的粒度。因此, 推进剂配方中铝粉粒度变化导致燃烧产物颗粒阻尼变化的原因是由于铝粉粒度变化引起了 CCP 的粒度分布变化。

表 2 不同铝粉粒度时的颗粒阻尼

Table 2 Particle damping with different particle sizes of Al powders

Al component/%	$\alpha_{p \max}$	α_p	$\alpha_p / \alpha_{p \max}$
Q0, 18.0	112.12	34.70	0.309
Q1, 18.0		17.83	0.159
Q3, 18.0		15.10	0.135
Q5, 18.0		13.79	0.123
Q1/Q3, 14.4/3.6		22.41	0.200
Q1/Q3, 9.0/9.0		19.14	0.171
Q1/Q5, 14.4%/3.6%		6.13	0.144
Q1/Q5, 9.0%/9.0%		19.50	0.174

Note: 1) $\alpha_{p \max}$ is the theoretical maximum of particle damping; 2) α_p is the particle damping value, which means the damping effect of CCP particles; 3) $\alpha_p / \alpha_{p \max}$ means the efficiency of particle damping by CCP particles for acoustic oscillation.

改变铝粉含量,并保持铝粉规格(Q1)不变,得到的燃烧产物颗粒阻尼结果见表3。由表3可知,推进剂配方中铝粉含量变化,也是影响燃烧产物颗粒阻尼的重要因素。推进剂中铝粉含量变化,一方面导致 C_m 的变化,另一方面引起CCP粒度分布的变化。由 α_p 的计算式(5)可知,提高 C_m 有利于增加 α_p 。实际上,推进剂中铝粉含量由9%增加至21%时,尽管 C_m 不断增加(如图4所示),但 α_p 先增加后减小,说明CCP粒度分布的变化对 α_p 的影响可大于 C_m 。通过表3中 α_p 的效率系数($\alpha_p/\alpha_{p\max}$)一栏可知,随着推进剂中铝粉含量增加,燃烧产物的 α_p 先增加后减小, α_p 的效率系数亦呈先增后减趋势。因此,对于低铝粉含量的推进剂配方,可通过适当提高铝粉含量来增加燃烧产物的颗粒阻尼;而对于高铝粉含量的推进剂配方,增加颗粒阻尼的技术重点应放在改变CCP的粒度分布上。

表3 Q1 铝粉含量不同时的颗粒阻尼

Table 3 Particle damping with different content of Q1 type Al powders

Al content/%	$D_{opt}/\mu\text{m}$	$\alpha_{p\max}$	α_p	$\alpha_p/\alpha_{p\max}$
9.0	16.88	58.97	11.56	0.196
15.0	17.21	75.14	12.94	0.174
17.0	17.24	106.98	34.67	0.324
18.0	17.27	112.15	26.15	0.233
21.0	17.36	125.85	25.27	0.201

Note: D_{opt} is the optimum diameter of CCP particles which can generate the largest damping to acoustic oscillation.

为了进一步揭示铝粉粒度和含量变化对CCP颗粒阻尼影响的内在规律,对CCP的 α_p 分布和粒度分布进行了剖析。对比 α_p 分布与粒度分布,以基础配方为例,如图5所示,两者差异明显:粒度呈多峰分布;而 α_p 为单峰分布,且较为对称,对称轴所对应的横坐标位置与 D_{opt} 非常接近。尽管CCP中小粒径和大粒径的质量分数均超过20%,但其对应的 α_p 分布曲线下方面积较小,表明所产生的颗粒阻尼较少;中间粒径产生的颗粒阻尼较大。不同铝粉粒度时, α_p 分布曲线如图6所示,Q0、Q1、Q3和Q5铝粉燃烧产物 α_p 均为单峰且对称分布,其中Q0、Q1和Q3三者的 α_p 分布峰对称轴接近且在 $D_i = D_{opt}$ 左右,峰的高度明显不同;Q5铝粉的 α_p 分布峰对称轴偏离 $D_i = D_{opt}$,峰的高度最小。不同铝粉含量时, α_p 分布曲线如图7所示,四条分布曲线均为单峰分布且对称,各分布峰的对称轴非常接近且对应的横坐标均在各自的 D_{opt} 左右;

主要差别在于各分布峰的大小不同。因此,无论是铝粉粒度的变化,还是铝粉含量的变化,对 α_p 分布的最显著影响是分布峰的大小不同。

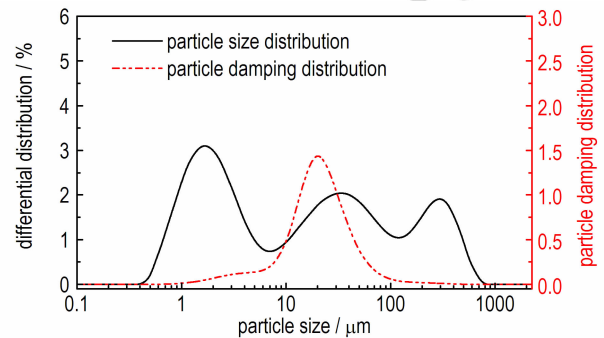


图5 颗粒阻尼与粒度分布曲线的对比

Fig. 5 Comparison of distribution curves for particle damping and particle size

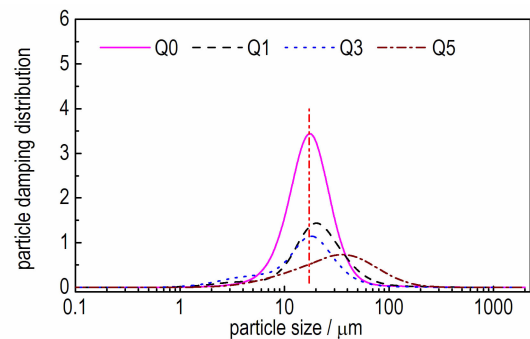


图6 不同铝粉粒度时CCP的 α_p 分布曲线

Fig. 6 Particle damping distribution curves of CCP with different Al powder

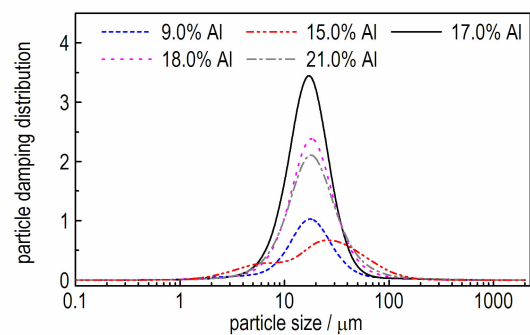


图7 不同铝粉含量时CCP的 α_p 分布曲线

Fig. 7 Particle damping distribution curves of CCP with different Al powder content

根据式(1)计算得到的216 Hz声振荡的 α_p 相对值与粒度的关系曲线如图8所示,在横坐标以对数形式的坐标图中 α_p 相对值曲线以 $D_i = D_{opt}$ 为对称轴呈

典型 Gaussian 分布, 曲线中 $D_i = 1/x D_{opt}$ 与 $D_i = x D_{opt}$ 所对应的 α_p 相对值相同。通过曲线下方面积计算, 71.7% 的 α_p 相对值分布在 $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ 区间内。图 6 和图 7 中不同铝粉粒度、含量时的 α_p 分布曲线的形状与图 8 中曲线相似, 也主要分布在 $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ 区间内。结合粒度分布和 α_p 分布结果(图 1、图 3、图 6、图 7、表 3、表 4) 分析, CCP 中 $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ 区间内颗粒的质量分数越高, 颗粒的阻尼效率越高, α_p 越大。如图 9 所示, CCP 的颗粒阻尼效率系数与 $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ 区间颗粒质量分数的正线性相关性较好。因此, 认为提高推进剂燃烧产物颗粒阻尼效率的关键在于增加 CCP 中 $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ 区间颗粒的质量分数。

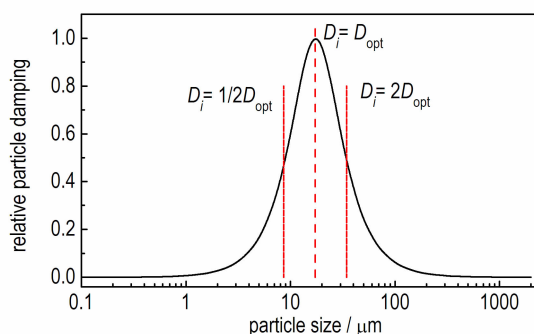


图 8 216 Hz 声振荡的 α_p 相对值分布曲线

Fig. 8 Relative particle damping distribution curve of CCP under 216 Hz acoustic oscillation

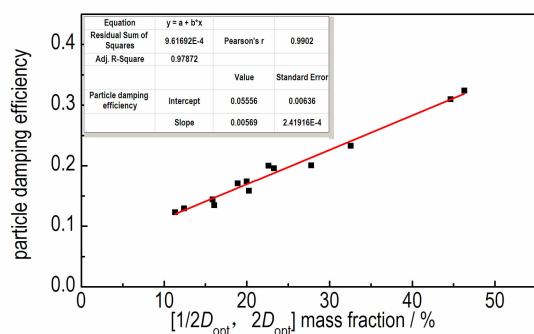


图 9 CCP 颗粒阻尼效率与 $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ 区间颗粒质量分数关系

Fig. 9 Relationship between particle damping efficiency and mass fraction of particles in $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ interval

4 结论

(1) NEPE 推进剂中铝粉粒度因素, 如单规格铝粉的粒度、二元级配中铝粉级配比和粒度组合, 均由于改

变了 CCP 的粒度分布而影响到燃烧产物的颗粒阻尼。

(2) NEPE 推进剂中铝粉含量对燃烧产物颗粒阻尼影响的内在因素为: 铝粉含量变化对 CCP 粒度分布的影响, 以及对 CCP 浓度的影响。

(3) 含铝推进剂燃烧产物的 α_p 呈单峰分布, 峰的大小与 CCP 的粒度分布有关。CCP 中 $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ 区间颗粒质量分数越高, 颗粒阻尼效率系数越大, 产生的 α_p 越大, 越有利于抑制声不稳定燃烧。

参考文献:

- [1] Blomshield F S. Historical perspective of combustion instability in motors: case studies [R]. AIAA 2001-3875.
- [2] 谢蔚民. 固体火箭发动机不稳定燃烧 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1984: 238-254.
XIE Wei-min. Combustion instability in solid rocket motors [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1984: 238-254.
- [3] Blomshield F S. Lessons learned in solid rocket combustion instability [R]. AIAA 2007-5803.
- [4] Blomshield F S, Stalnaker R A. Combustion instability additive investigation [R]. AIAA 99-2226.
- [5] 孙维申. 固体火箭发动机不稳定燃烧 [M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1987: 229-326.
SUN Wei-shen. Combustion instability in solid rocket motors [M]. Beijing: Beijing Institute of Engineering Press, 1987: 229-326.
- [6] Sehgal R, Strand L. A theory of low-frequency combustion instability in solid rocket motors [J]. AIAA Journal, 1964, 2(4): 696-702.
- [7] Wilbur C A, Robert J S. The T-burner test method for determining the combustion response of solid propellants [R]. AIAA 72-1053.
- [8] Stany G, Emmanuel R, Franck G. Thermoacoustic instabilities in solid rocket motors [R]. AIAA 2009-5252.
- [9] Spurling J A. Modeling effects of initial temperatures on a propellant's pressure-coupled response using a pseudo propellant model [R]. AIAA 2014-3494.
- [10] Culick F E C. Research on combustion instability and application to solid propellant rocket motors [R]. AIAA 71-753.
- [11] 郜冶. Culick 的线性声振荡燃烧理论研究 [J]. 推进技术, 1983, 4(4): 43-52.
GAO Ye. Research on Culick linear acoustic oscillation combustion theory [J]. Journal of Propulsion Technology, 1983, 4(4): 43-52.
- [12] 袁佩珍, 许登峰, 冯文澜. HMX 推进剂的燃烧不稳定性 [J]. 推进技术, 1986, 7(3): 31-36.
YUAN Pei-zhen, XU Deng-feng, FENG Wen-lan. Combustion instability of HMX propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 1986, 7(3): 31-36.
- [13] 金秉宁, 刘佩进, 杜小坤, 等. 复合推进剂中铝粉粒度对分布式燃烧响应和粒子阻尼特性影响 [J]. 推进技术, 2014, 35(12): 1701-1706.
JIN Bing-ning, LIU Pei-jin, DU Xiao-kun, et al. Effects of different aluminum particle sizes in composite propellant on distributed combustion response and particle damping [J]. Journal of Propul-

- sion Technology, 2014, 35(12): 1701-1706.
- [14] 苏万兴. 大长径比固体火箭发动机不稳定燃烧预示及抑制方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
SU Wan-xing. Prediction and suppression methods of combustion instability in large aspect ratio solid rocket motors [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [15] 刘伟凯, 何国强, 王春光. 双脉冲固体火箭发动机压强振荡特性研究[J]. 航空动力学报, 2015, 30(10): 2553-2560.
LIU Wei-kai, HE Guo-qiang, WANG Chun-guang. Research on the pressure oscillation characteristics of double pulse solid rocket motor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(10): 2553-2560.
- [16] 唐泉, 汪越, 尹欣梅, 等. NEPE推进剂主要组分对凝聚相燃烧产物粒径的影响[J]. 固体火箭技术, 2016, 39(6): 775-778.
TANG Quan, WANG Yue, YIN Xin-mei, et al. Effect of main components of NEPE propellant on aluminum combustion efficiency[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2016, 39(6): 775-778.
- [17] 刘佩进, 齐宗满, 金秉宁, 等. 两种含铝复合推进剂压强耦合响应的实验对比[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(1): 83-88.
LIU Pei-jin, QI Zong-man, JIN Bing-ning, et al. Experiment comparison of pressure coupled response of the aluminized composite propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2013, 36(1): 83-88.
- [18] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1994: 460~495.
HOU Lin-fa. Composite solid propellant[M]. Beijing: China Astronautics Publishing Company, 1994: 460-495.
- [19] 胡翔, 庞爱民, 汪越, 等. 收集方法对 NEPE 推进剂凝聚相燃烧产物特性的影响[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(1): 65-69.
HU Xiang, PANG Ai-min, WANG Yue, et al. Effects of collection methods on characteristics of condensed combustion products of NEPE propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(1): 65-69.
- [20] 檀叶. 过载条件下固体火箭发动机燃烧稳定性分析[D]. 西安: 航天动力技术研究院, 2015.
TAN Ye. Combustion stability analysis for solid rocket motor under overload [D]. Xi'an: Academy of Aerospace Propulsion Technology, 2015.
- [21] Dupays J, Prevost M, Tarrin P, et al. Effects of particle phase on vortex shedding driven oscillation in solid rocket motors[C]//The 32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Lake Buena Vista, FL, July 1-3, 1996.
- [22] David R G. Inert particles for axial-combustion-instability suppression in a solid rocket motor[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(6): 1347-1354.
- [23] Cohen N S. A pocket model for aluminum agglomeration in composite propellants[J]. *AIAA Journal*, 1989, 21(5): 720-726.
- [24] 唐泉, 庞爱民, 汪越. 固体推进剂铝粉燃烧特性及机理研究进展分析[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(2): 232-238.
TANG Quan, PANG Ai-min, WANG Yue. A summary of aluminum combustion property and mechanism in solid propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2015, 38(2): 232-238.

Effects of Particle Size and Content of Al Powders on the Particle Damping of Combustion Products of NEPE Propellant

HU Xiang, ZHANG Lin, TANG Quan, LI Wei, LIAO Hai-dong, PANG Ai-min

(Hubei Institute of Aerospace Chemo-technology, Xiangyang 441003, China)

Abstract: To study the effects of particle size and content of Al powders on the particle damping generated by nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant combustion products, the condensed phase combustion products of NEPE propellant were collected by a sealed bomb method and the particle size analysis was performed. The particle damping of combustion products on acoustic instability was calculated according to the theory of Culick linear particle damping. Results show that the particle size and content of Al powders significantly affect the particle damping of NEPE propellant combustion products on acoustic instability combustion, which mainly is due to the particle size and content of Al powders affect the particle size distribution of condensed phase combustion products. For a certain frequency acoustic instability combustion, the higher the mass fraction of particle in $[1/2D_{opt}, 2D_{opt}]$ particle size interval in the condensed phase combustion products is, the greater the efficiency coefficient of particle damping of combustion products is, the larger the produced particle damping is. The mass fraction of condensed phase combustion products in combustion products is one of the factors determining the scale of particle damping, and which is positively correlated with the content of Al powders in propellant.

Key words: nitrate ester plasticized polyether (NEPE) propellant; aluminum powders; combustion product; particle damping

CLC number: TJ55; V512

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.07.001