

文章编号: 1006-9941(2012)04-0479-06

# 一种含能硝基化合物对低燃速低燃温双基推进剂性能影响

秦 能, 裴江峰, 王明星

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 为进一步降低低燃速低燃温双基推进剂的燃速、燃温, 对一种含能硝基化合物的降温、降速效果进行了实验研究, 设计了系列含无机铅盐、有机铜盐及过渡元素金属催化剂的双基配方。通过燃速测试及高压差示扫描量热法 (PDSC) 研究上述推进剂的燃烧性能和热分解特性。含该硝基化合物的推进剂 DSC 曲线呈三峰放热, 放热峰峰温分别在 200 °C、280 °C、350 °C 左右, 第三峰不明显。结果表明: 该含能硝基化合物能有效降低推进剂的燃速、燃温, 但使推进剂的压强指数增大, 而加入催化剂能改善推进剂的燃烧性能, 使压强指数降低, 分解热量也降低。

**关键词:** 物理化学; 热分解; 催化; 双基推进剂; 低燃速; 低燃温; 燃烧性能

**中图分类号:** TJ55; V512; O64

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.020

## 1 引 言

目前, 低燃速低燃温推进剂装药 (20 °C、7 MPa 下燃速小于 5 mm · s<sup>-1</sup>, 燃温小于 1900 K) 在燃气发生器领域已获得广泛应用。为满足一些特殊用途, 对该类推进剂提出了更高的要求, 如更低的燃速与燃温<sup>[1]</sup>, 如燃温小于 1200 K, 燃速低于 3 mm · s<sup>-1</sup> (20 °C、7 MPa 下)。目前采用醋酸纤维素和硝酸铵组成的复合推进剂燃速、燃温已能达到上述要求<sup>[2-3]</sup>; 而双基推进剂 7 MPa 燃速则在 4 mm · s<sup>-1</sup> 左右, 燃温在 1800 K 左右。与复合推进剂相比, 双基推进剂具有生产过程不受环境湿度影响, 产品不吸湿、性能稳定、燃烧残渣低等优点, 因而双基低燃速低燃温推进剂在燃气发生器领域仍占有重要地位, 如何降低双基系推进剂的燃速、燃温仍是推进剂研究者的一项重要研究内容。通常是向推进剂中加入大量的惰性物质, 固体降速剂如共聚甲醛和蔗糖八醋酸酯, 液体降速剂如邻苯二甲酸酯类等<sup>[4-6]</sup>, 而惰性物质的加入会使推进剂的压强指数增大, 燃烧性能变差, 以至使推进剂无法使用。为了找到一种既非惰性物质又能降低燃速, 并且加入推进剂配方后, 不会使燃烧性能恶化的材料, 本文将 PQ 引入双基系低燃速低燃温推进剂中, 获得了满

意的降温、降速效果, 燃温小于 1200 K, 燃速低于 3 mm · s<sup>-1</sup> (20 °C、7 MPa 下)。PQ 是一种含硝基的有机含能化合物, 它具有能量适中 (生成热  $\Delta H_f = -300$  kJ · kg<sup>-1</sup> 左右), 感度较低 (冲击感度 0%, 落锤 10 kg, 落高 25 cm; 摩擦感度 0%, 90° 角, 压力 4 MPa), 热稳定性好 (100 °C 热失重试验, 不失重时间超过 90 h) 的特点。同时, 研究了含 PQ 的推进剂在无机铅盐、芳香酸铜盐及过渡金属 (氧化物) 催化剂作用下的燃烧性能及热分解性能, 并探讨了热分解性能与燃烧性能之间的相关性, 初步分析了催化剂催化该类推进剂热分解的机理。

## 2 实验部分

### 2.1 配方及工艺

空白配方 (0<sup>#</sup>) 基本组成为: (NC + NG) 77.5%, 基础配方 (1<sup>#</sup>) 基本组成为: (NC + NG) 47.5%、PQ 30%; 另外, 辅助增塑剂 TA 10%, 降速剂 SOA 10%, II 号中定剂、凡士林 2.5%。在此基础配方上, 加入不同燃烧催化剂, 得到一系列配方, 配方组成如表 1 所示。因低燃速低燃温推进剂的工作压力较低, 为保证推进剂在低压下正常稳定燃烧, 本文中选用了经相关试验证实对降低点火临界压强, 保证推进剂稳定燃烧有较好效果的过渡金属 (氧化物) 作辅助催化剂<sup>[7]</sup>。采用无溶剂压伸工艺制备样品, 燃速在恒压燃速仪上采用靶线法测试。

收稿日期: 2011-06-29; 修回日期: 2011-08-02

基金项目: 总装火炸药十一五预研基金 (No. 40406030202)

作者简介: 秦能 (1970 -), 男, 博士, 高级工程师, 从事固体推进剂配方及工艺研究。e-mail: qinneng@126.com

## 2.2 高压差热分析 (PDSC)

采用美国 TA 公司 DSC910S 差示扫描量热仪, 测试样品在压力 (3, 5, 7 MPa) 下的恒压热分解性能。氮气充压, 铝样品池, 样品用量约 1 mg, 升温速率为  $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 燃烧性能

配方燃速测试结果如表 2 所示。

从表 1、表 2 可以看出, 用 30% PQ 代替等量的 NC (或 / 和 NG) 后, 燃速、燃温大幅下降。燃速下降幅度在 50% 左右; 10 MPa 燃温从 1790 K, 降至 1179 K, 降幅达 34.13%。PQ 的降速、降温效果十分明显。但降速、降温的同时, 也带来了压强指数增大的弊病, 未加催化剂的基础配方 (1<sup>#</sup> 配方), 燃速随压强的增大而增大。压强指数较大, 最小为 0.79 (7 ~ 12 MPa 压强区间), 最高竟达 1.38 (12 ~ 15 MPa 压强区间)。因此, 加入催化剂对其进行调节。

催化剂的加入, 使含 PQ 的低燃速低燃温推进剂燃烧性能发生变化。2<sup>#</sup> 配方加入金属粉后, 与 1<sup>#</sup> 配方相比 3 ~ 12 MPa 压强区间燃速提高, 15 MPa 燃速降

低。从 Z 值 (不同配方在某一压强下的燃速与基础配方在该压强下的比值, 代表催化效率, Z 值大于 1, 正催化, Z 值小于 1, 负催化, Z 值等于 1, 无催化) 来看, 从低压到高压, Z 值逐渐降低。压强指数得到明显改善, 尤其是高压区 (12 ~ 15 MPa) 的压强指数由 1.38 降至 0.60, 降幅达 56.5%。

与 1<sup>#</sup> 配方相比, 3<sup>#</sup> 配方加入金属氧化物后, 使中、低压 (3 ~ 12 MPa) 下的燃速提高, 在 5 ~ 12 MPa 压强区间, 提高幅度随压强增大而逐渐减小, 高压 15 MPa 的燃速降低, 降幅为 15.6%, 低压区 (3 ~ 7 MPa) 压强指数降幅最大的区间, 出现在 5 ~ 7 MPa 压强指数由 0.98 降至 0.47, 降幅为 52%, 是本试验中该压强区间压强指数最小的配方。通过比较 3<sup>#</sup> 配方和 2<sup>#</sup> 配方的 Z 值可发现, 金属粉的催化效果优于金属氧化物。同样, 与 1<sup>#</sup> 配方相比, 4<sup>#</sup> 配方加入铅盐、铜盐, 使中压、低压 (3 ~ 12 MPa) 下的燃速提高, 提高幅度随着压强 (5 ~ 12 MPa) 的增大而逐渐减小, 高压 15 MPa 的燃速下降, 降幅为 19.5%, 因而使高压区压强指数得以降低, 10 ~ 12 MPa 压强指数由 0.98 降至 0.33, 12 ~ 15 MPa 压强指数由 1.38 降至 0.51。在该压强区间获得了较好的燃烧性能。

表 1 配方组成

Table 1 Formulation compositions

No.	NC + NG	others	PQ	aid plasticizer	burning rate depressant	inorganic Pb salt	organic Cu salt	metal oxide	metal powder	$T_c / \text{K}$
0 <sup>#</sup>	77.5	2.5	-	10	10	-	-	-	-	1790
1 <sup>#</sup>	47.5	2.5	30	10	10	-	-	-	-	1179
2 <sup>#</sup>	45	3	30	10	10	-	-	-	2	1170
3 <sup>#</sup>	45	3	30	10	10	-	-	2	-	1110
4 <sup>#</sup>	45	2.5	30	10	10	2	0.5	-	-	1120
5 <sup>#</sup>	45	2.0	30	10	10	2	0.5	-	0.5	1118
6 <sup>#</sup>	45	2.0	30	10	10	2	0.5	0.5	-	1120

Note:  $T_c$  is calculated results of flame temperature at 10 MPa.

表 2 燃速结果

Table 2 The results of burning rate

No.	3 MPa		5 MPa		7 MPa		10 MPa		12 MPa		15 MPa		pressure exponent $n$		
	$r$	Z	$r$	Z	$r$	Z	$r$	Z	$r$	Z	$r$	Z	(3-7) MPa	(7-12) MPa	(12-15) MPa
0 <sup>#</sup>	1.84		2.85		3.67		4.60		5.12		5.70		0.82	0.62	0.48
1 <sup>#</sup>	0.87	1	1.31	1	1.82	1	2.41	1	2.88	1	3.92	1	0.87	0.79	1.38
2 <sup>#</sup>	1.22	1.40	1.71	1.31	2.21	1.21	2.74	1.14	2.99	1.04	3.42	0.87	0.70	0.57	0.60
3 <sup>#</sup>	1.12	1.29	1.70	1.30	1.99	1.09	2.57	1.07	3.01	1.05	3.39	0.86	0.69	0.76	0.53
4 <sup>#</sup>	1.10	1.26	1.83	1.40	2.37	1.30	2.76	1.15	2.93	1.02	3.28	0.84	0.91	0.40	0.51
5 <sup>#</sup>	1.29	1.48	2.01	1.53	2.66	1.46	3.42	1.42	3.80	1.32	4.81	1.23	0.86	0.67	1.06
6 <sup>#</sup>	1.00	1.15	1.56	1.19	2.06	1.13	2.50	1.04	2.77	0.96	3.13	0.80	0.85	0.52	0.55

Note: Z is the ratio that the burning rate of every formulation and formulation 1<sup>#</sup> (foundation formulation) at different pressure, and it represents efficiency of catalysts.  $r$  is burning rate,  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

通过比较发现,催化剂复合使用,会产生两种相反的作用效果,包括协同作用和消减作用。如2<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>配方中,催化剂的催化作用趋势相同,与基础配方相比,在3~12 MPa区间提高燃速,15 MPa下降低燃速,催化效果也基本相同,两个配方的Z值基本相同。当将2<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>配方中的催化剂同时加入到5<sup>#</sup>配方中(金属粉的含量有所降低),催化作用趋势发生了明显变化,在整个测试的压强范围内使燃速提高,且提高幅度比前两个配方都大,很显然,三种催化剂组合在一起产生了协同催化作用。通过比较Z值发现,5<sup>#</sup>配方的Z值是最大的。与此相反,6<sup>#</sup>配方中的催化剂是3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>配方中的组合,但催化结果却发生了变化,在低压区,6<sup>#</sup>配方虽然同3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>配方催化趋势一样,催化剂虽提高了燃速,但提高幅度却低于3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>配方的提高幅度,这里三种催化剂组合产生的催化作用相互消减,催化作

用降低,Z值是含催化剂配方中最低的。但在高压15 MPa下又产生了协同负催化作用,燃速降低幅度比3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>配方相同压强区都大,Z值小于1。可见,催化剂组合(复合催化剂)产生的协同和消减催化作用与催化剂的催化活性范围、压强等因素有关。实验数据还表明,催化剂组合后(6<sup>#</sup>配方)其降速作用的压强范围扩大了,12 MPa下的燃速也低于基础配方相同压强下的燃速。

### 3.2 高压差热分析

样品在不同压力下的DSC实验数据如表3所示。推进剂样品是以NC、NG、PQ为主要原料组成的双基体系,热分解行为是各组分共同作用的结果<sup>[8]</sup>,在DSC曲线上表现出多个分解放热峰。各配方在不同压强下的起始放热温度180℃左右。第一放热峰峰温在200℃左右,与文献[9]报道的纯NC、NG在压

表3 DSC实验结果

Table 3 The DSC results of sample

sample No.	$p$ /MPa	$T_o$ /°C	$T_p$ /°C	$\Delta H$ /J·g <sup>-1</sup>	$\Delta H$ totalled /J·g <sup>-1</sup>	sample No.	$p$ /MPa	$T_o$ /°C	$T_p$ /°C	$\Delta H$ /J·g <sup>-1</sup>	$\Delta H$ totalled /J·g <sup>-1</sup>
1 <sup>#</sup>	3	180.78	203.74	1931.0	3065.7	3		178.79	203.19	1677.0	2643.8
			283.78	442.2					282.30	558.8	
			348.45	692.5					351.05	408.0	
	5	179.99	203.19	2004	3607.5	4 <sup>#</sup>	5	180.08	202.0	2080.0	2944.0
			287.37	577.5					289.86	583.7	
			323.52	1026.0					340.88	280.1	
7	182.31	202.40	2155.0	2632.0	7		182.18	203.95	1834	2950.0	
		284.16	306.0					287.07	641.8		
		350.19	171.0					355.19	473.8		
2 <sup>#</sup>	3	180.50	202.36	1874.0	2828.0	3		179.49	201.45	1815.0	2100.0
			285.94	434.9					285.48	452.8	
			345.23	519.1							
	5	183.24	203.38	2065.0	3101.2	5 <sup>#</sup>	5	181.6	201.56	1759.0	2389.0
			285.25	497.8					286.41	437.2	
			350.04	538.4					334.55	193.6	
7	182.80	203.36	1772.0	2387.0	7		181.38	202.94	1919.0	2567.0	
		289.68	333.0					294.74	648.1		
		354.75	282.0								
3 <sup>#</sup>	3	180.13	202.10	1872.0	2954.6	3		178.76	202.58	1914.0	2679.9
			286.37	486.1					281.65	513.6	
			345.84	596.5					353.87	252.3	
	5	180.84	201.97	1868	3117.3	6 <sup>#</sup>	5	181.36	201.31	1884.0	2789.0
			284.73	489.5					287.62	417.7	
			352.86	759.8					343.41	487.4	
7	184.98	204.13	2087.0	3218.0	7		183.28	199.94	1956.0	2550.0	
		285.05	388.0					287.23	337.8		
		353.58	743.0					343.39	256.1		

力下的热分解峰温有一定差别,比纯 NC 约低  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,比纯 NG 约低  $5\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但与 NC/NG 双基配方的放热峰非常接近,因此第一放热峰应是 NC、NG 混合作用的放热峰。第二放热峰在  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,第三放热峰在  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,第二、三放热峰的放热量均较低,某些压强下,第三放热峰甚至消失。第二放热峰应是 PQ 的放热峰,比纯 PQ 的放热峰(3 MPa 时为  $297.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )约低  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。第三放热峰可能是 NC、NG、PQ 分解产物之间或与未分解的 PQ 作用的放热峰。可见,PQ 加入到双基配方体系,其与 NC、NG 之间相互影响,加速了热分解,使它们各自的热分解峰温提前。

在 PQ 的 DSC 曲线上(见图 1),不论在常压或 3 MPa 压力下, $216\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右均有一个很尖的吸热峰,常压下紧接着还有一个较小的吸热峰,压力下紧接着吸热峰就是一个放热峰,常压下放热峰较弱,放热量较少,压力下有较强的放热峰,放热量大增。证明 PQ 的热分解属于液相分解,而且是在融化以后紧接着就开始进行分解, $297\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右分解放热速率达到最大。从  $0.1\text{ MPa}$  到  $3\text{ MPa}$ ,DSC 曲线上吸热峰和放热峰均在变高变大。PQ 的分解速率随压力的升高而后增大。实验表明:PQ 的热分解对压力是十分敏感的,可能导致了本文研究的含 PQ 双基低燃速低燃温推进剂的燃速对压强的敏感程度也增加,这一点从燃速-压强曲线上可看出来,这也可能是该类推进剂燃速调节困难、压强指数较高的原因之一。

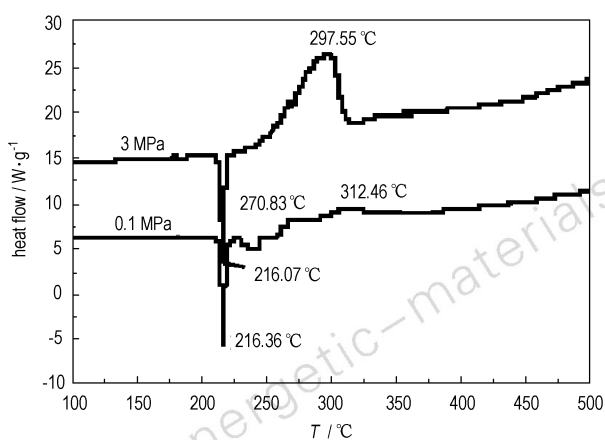


图 1 PQ 的 DSC 曲线

Fig. 1 DSC curves of PQ

含 PQ 30% 的基础配方,随压力升高,第一热分解峰温(双基组分的分解峰温)降低,分解放热量增大。常压下 NG 的挥发在加压条件下受到了抑制,它的初期分解气相产物也不易从凝聚相逸出,自身分解产物对凝聚

相产生了催化作用。这种自催化作用随压强的升高而增强,同时也促进了 NC 的分解,因而出现了第一热分解峰温随压强升高而降低的现象。压强影响起始放热温度,5 MPa 最低,7 MPa 最高,相差  $0.7\sim 2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。压强同时也影响第二、第三放热峰温和放热量。5 MPa 时,第二放热峰温和放热量最大,第二、第三放热峰的峰温差最小,两个峰形在半腰处连到了一起(见图 2),第三峰温的放热量也较大,说明此压强下放热反应较为完全。7 MPa 下的第三峰温比 5 MPa 下的高出近  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,说明分解反应速度降低,放热量也随之减少。上述分析说明该推进剂配方热分解对压强是敏感的。

金属粉加入使推进剂(2<sup>#</sup>配方)中,热分解性能发生改变,热分解曲线(见图 3)与基础配方(1<sup>#</sup>配方)的曲线差别不大。各压强下总的放热量均降低,降幅最大为 14%(5 MPa),但燃速却提高,与基础配方相比,3 MPa、5 MPa、7 MPa 提高幅度分别为 40.23%、30.53%、21.43%。放热量减少,燃速提高,说明催化剂改变了热分解反应历程。

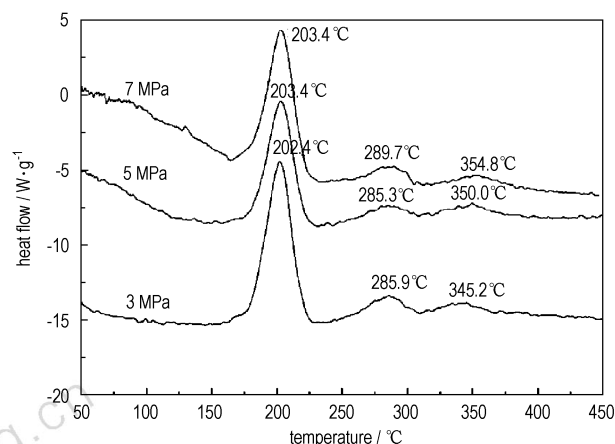


图 2 1<sup>#</sup>配方的 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curves of 1<sup>#</sup> propellant

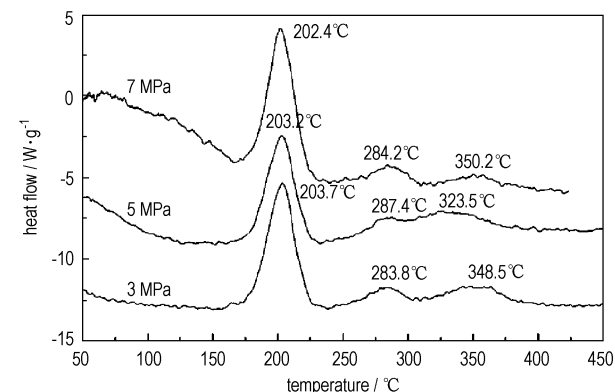


图 3 2<sup>#</sup>配方的 DSC 曲线

Fig. 3 DSC curves of 2<sup>#</sup> propellant

金属氧化物加入推进剂中(3<sup>#</sup>配方),总放热量随压强增大而增大。与基础配方相比,3, 5 MPa 下的总放热量降低,7 MPa 总放热量增大  $586 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ,增幅达 22.3%。通过对比 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>配方热分解数据和燃速数据发现,燃速提高幅度与总放热量增大幅度正好相反,放热量增幅越大,燃速降低幅度越大。从 3, 5, 7 MPa 放热量看,加入金属氧化物的配方比加入金属粉的配方放热量有所增加,增幅分别为 4.48%, 0.52%, 34.8%,而燃速变化幅度分别为 -8.20%, -0.59%, -9.95%。

可见,含量相同的金属粉和金属氧化物对分解放热量产生不同的影响。与基础配方相比,在 3, 5 MPa 下,金属粉和金属氧化物都使放热量降低;7 MPa 下,金属粉仍使放热量降低,而金属氧化物却使放热量增加。很显然,金属粉和金属氧化物对热分解的催化作用机理存在不同。

铅、铜盐催化剂加入(4<sup>#</sup>配方),与基础配方相比,只有 7 MPa 的总放热量高出基础配方  $318 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ,增幅 12.1%,其余均比基础配方低。然而 4<sup>#</sup>配方在 3, 5, 7 MPa 下的燃速却高于基础配方相同压强下的燃速,7 MPa 增幅达 30%。铅、铜盐催化剂的加入,使放热量呈现随压强增大而增大的趋势。

铅、铜盐及金属粉同时加入 5<sup>#</sup>配方中,与只加入铅、铜盐的 4<sup>#</sup>配方相比,各压强下放热量降低,燃速却提高了。5<sup>#</sup>配方放热量随压强增大而增大,不同于基础配方 7 MPa 放热量反而低于 3, 5 MPa 的情况。通过对比 2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>配方发现,催化剂组合后,对热分解放热量产生重要影响。催化剂组合后配方各压强下放热量基本上低于组合前各自配方和基础配方相应压强下的放热量。但从热量与压强的关系上看,催化剂组合前后却有明显不同,组合后,放热量随压强增大而增大,与铅、铜盐催化剂加入配方中放热量随压强增大而增大的规律相一致;与加入金属粉的配方放热量随压强变化趋势不同,在铅、铜盐催化剂及金属粉的组合催化剂配方中,铅、铜盐催化剂的催化作用是主要的,使配方放热量随压强变化的趋势与只有铅、铜盐催化剂的配方相一致。

铅、铜盐及金属氧化物同时加入 6<sup>#</sup>配方中,3 MPa 放热量略增  $36 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ,燃速比只加铅、铜盐的 4<sup>#</sup>配方相同压强下低 11%;5 MPa 放热量比 4<sup>#</sup>配方降低  $155 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ,燃速比 4<sup>#</sup>配方低 21%,7 MPa 放热量比 4<sup>#</sup>配方降低  $400 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ,燃速比 4<sup>#</sup>配方低 17%。

前面已提到金属粉和金属氧化物对热分解的催化

作用机理是有所不同的,金属氧化物和铅、铜盐催化剂加入配方后(6<sup>#</sup>配方),配方的放热量与压强的关系发生了变化,不再是随压强增大而增大,7 MPa 下的放热量低于 3, 5 MPa 下的放热量,与基础配方的放热趋势相同。而基础配方是不含催化剂的,这一催化剂组合的效果,从表观上看,在热分解测试压强范围内催化剂未发挥作用。同时也印证了上述燃烧性能上的分析,即金属氧化物加入铅、铜盐催化剂中,存在催化剂相互消减现象,产生排斥效应。相对而言,6<sup>#</sup>配方各压强下的分解放热量更接近 4<sup>#</sup>配方(含铅、铜盐催化剂)的分解放热量,可见,铅、铜盐催化剂的催化作用占据了主导地位。

与基础配方相比,在 3, 5 MPa 下,含催化剂的配方分解放热量降低,燃速却比相应压强下基础配方的高。其原因可能是催化剂既加速了  $\text{NO}_2$  与硝酸酯(或醛类)分解产物间的反应,该反应为放热反应,放出热量,利于提高燃速;同时催化剂又加速吸热的硝酸酯( $\text{R}-\text{NO}_2$ )的分解反应,该反应消耗热量,这两个反应互相制约达到动态平衡,最终表现为含催化剂配方燃速提高,反应放热量反而降低。

## 4 结 论

(1) 含能化合物 PQ 加入到双基低燃速低燃温推进剂中,能有效降低该类推进剂的燃温、燃速,但使压强指数增大。

(2) 含 PQ 的双基低燃速低燃温推进剂 DSC 曲线呈三峰放热,第一峰是 NC、NG 的放热峰,第二峰是 PQ 的放热峰,峰温均比纯 NC、NG、PQ 的放热峰有所提前,第三放热峰不明显,甚至消失。PQ 降低燃速、燃温的原因是加入 PQ 后推进剂的能量水平下降及 PQ 在分解时的熔化吸热,降低了化学反应速率。

(3) 在含 PQ 的双基低燃速低燃温推进剂中,无机铅盐、芳香酸铜盐及过渡元素金属和金属氧化物催化剂仍具有催化作用,同时表现出正负两种催化效果。催化剂影响推进剂热分解的起使分解温度、分解峰温、分解放热量等热分解特征量,其中分解放热量受催化剂影响最大。

### 参考文献:

- [1] 邓康清,陶自成. 国外气体发生剂研制动向[J]. 固体火箭技术, 1996,19(3): 34-40.  
DENG Kang-qing,TAO Zi-cheng. The new development on gas generator propellants[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1996,19(3): 34-40.

- [2] Willer Rodney L, McGrath, David K. Clean space motor/gas generator solid propellants: USP 5, 591, 936[P]. Jan. 7, 1997.
- [3] Fleming Wayne C, McSpadden H J, Dlander D E. Ammonium nitrate propellants: USP 6, 364, 975[P], Apr. 2, 2002.
- [4] Engelen K, Lefebvre M H, De Ruyck J. Combustion properties of gas-generating pyrotechnics[J]. *Combustion Science and Technology*, 2001, 163: 49-76.
- [5] Richard V Cartwright, Sussex N J. Extrudable gas generating propellants, method and apparatus: USP 5, 125, 684[P], Oct. 15, 1991.
- [6] 秦能, 张超, 王明星. 低燃速低燃温双基推进剂燃速与燃烧波特征量的相关性研究[J]. 含能材料, 2010, 18(1): 110-114.  
QIN Neng, ZHANG Chao, WANG Ming-xing. Relationship between burning rate and combustion wave characteristic value of double-base propellant with low burning rate and low flame temperature[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(1): 110-114.
- [7] 秦能, 汪亮, 王宁飞. 低燃速低燃温双基推进剂燃烧性能的调节[J]. 火炸药学报, 2003(3): 16-19.  
QIN Neng, WANG Liang, WANG Ning-fei. Adjustment on the combustion performance of low flame temperature and low burning rate DB propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2003(3): 16-19.
- [8] 田林祥. 固体推进剂的热分析[J]. 火炸药, 1990(4): 43-45.  
TIAN Lin-xiang. Thermal analysis of solid propellant[J]. *Explosives & Propellants*, 1990(4): 43-45.
- [9] 刘所恩, 赵凤起, 李上文, 等. 改性双基推进剂主要组分的高压热分解特性[J]. 火炸药学报, 1998(2): 27-29.  
LIU Suo-en, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, et al. Thermal decomposition characteristics of several main ingredients used in CMDB propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1998(2): 27-29.

## Experimental Study on Some Energetic Nitro-compound in DB Propellant with Low Burning Rate and Low Flame Temperature

QIN Neng, PEI Jiang-feng, WANG Ming-xing

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

**Abstract:** To decrease farther the burning rate and the flame temperature of DB propellant with low burning rate and low flame temperature, an experimental study was carried out to explore the effect of a nitro compound on the burning rate and the flame temperature. Series of DB formulations were designed with inorganic lead, organic copper salt and transition metal catalysts. The thermal decomposition and combustion of the propellants were studied by testing the burning rate and PDSC. There are three peaks of heat release on the DSC curves of DB propellant containing the energetic nitro compound, and the heat release temperatures are around 200 °C, 280 °C and 350 °C, but the third peak is not obvious. Results show that the energetic nitro compounds can effectively decrease the burning rate and the flame temperature of the DB propellant, but increase the pressure exponent, which can be improved by adding catalysts. The collaborations of the energetic nitro compounds and the catalysts can provide DB propellant lower burning rate, lower flame temperature, smaller pressure exponent, and less quantity of decomposition heat.

**Key words:** physical chemistry; thermal decomposition; catalyze; DB propellant; low burning rate; low flame temperature; combustion performance

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

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.020