

文章编号: 1006-9941(2012)06-0799-06

## 磷腈类含能化合物的合成及应用研究进展

肖 啸, 甘孝贤, 蔚红建, 刘 庆, 栗 磊

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 分类综述了环磷腈含能化合物和聚磷腈含能粘合剂的合成及应用研究进展。目前, 国内外关于环磷腈类含能化合物的研究不多, 其中以螺环-叠氮以及螺环-叠氮复合类环磷腈为代表的含能化合物因其优越的性能和特点, 成为绿色起爆药研究领域的重要方向。聚磷腈含能粘合剂主要包括叠氮粘合剂和硝酸酯粘合剂两大类, 其具有比传统含能粘合剂更高的能量密度和分解焓, 低温性能优良, 对开发环境友好型含能粘合剂具有重要意义。

**关键词:** 有机化学; 环磷腈化合物; 聚磷腈化合物; 含能材料; 研究进展

**中图分类号:** TJ55; O62

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.030

### 1 引 言

磷腈类化合物是一类以磷氮单双键交替排列为主体结构无机-有机杂环化合物, 可以分为环磷腈和聚磷腈<sup>[1-3]</sup>。磷腈化合物中含有多个磷、氮原子, 形成的共轭体系具有一定的稳定性, 且磷原子的空 *d* 轨道容易受亲核试剂的进攻, 该特点使磷腈化合物的化学修饰和改性成为可能, 包括增加多个高含氮量的杂环、叠氮基团或环上的硝基化改性等。因此, 磷腈化合物成为含能材料研究工作者关注的热点之一<sup>[4-7]</sup>。

自 20 世纪 50 年代起, 关于多种磷腈含能衍生物的研究已有报道, 但在含能材料领域并未得到足够重视。从 20 世纪 80 年代至今, 多种含有叠氮基和硝基的磷腈化合物因其具有较高的正生成焓和氮含量, 受到各国含能材料工作者的关注<sup>[8-9]</sup>。磷腈含能衍生物可分为环磷腈含能化合物和聚磷腈含能粘合剂两大类, 前者主要包括螺环类、叠氮类和螺环-叠氮复合类环磷腈化合物, 可用于绿色起爆药和环保击发药领域; 而聚磷腈可用于制备叠氮类和硝酸酯类含能粘合剂, 具有比传统粘合剂更加优良的能量性能和低温性能。

本文主要对近几年来国内外磷腈化合物的合成、理论和应用研究方面的最新进展进行了综述。

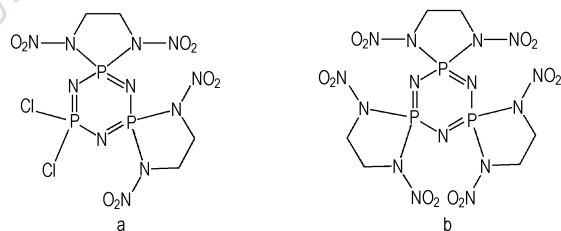
### 2 环磷腈含能化合物的研究

收稿日期: 2011-10-10; 修回日期: 2011-12-07

作者简介: 肖啸(1987-), 男, 硕士研究生, 现从事磷腈类功能材料的合成研究。e-mail: l\_j5506@163.com

#### 2.1 螺环类环磷腈化合物

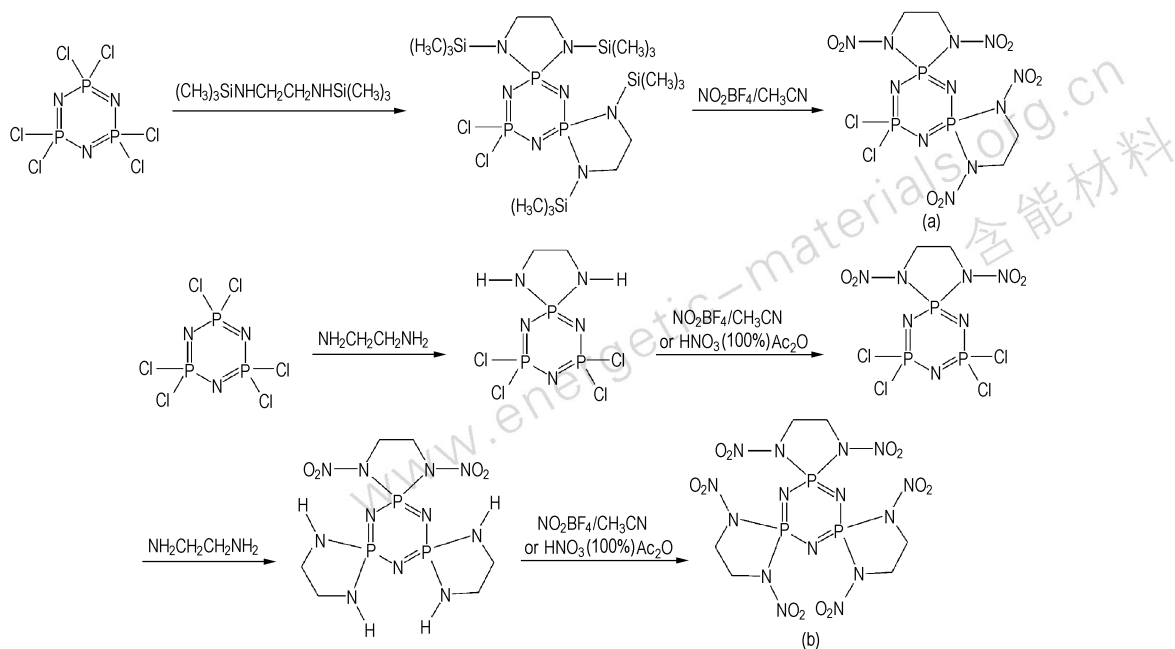
1994 年, Dave 等人<sup>[10]</sup> 通过两种不同方法将 *N,N'*-乙二硝胺单元引入环三磷腈结构中, 从而形成新型螺环取代物 1,1,3,3-二螺环(*N,N'*-乙二硝胺)-5,5-二氯环三磷腈 [Scheme 1a], 在此基础上又合成了一系列的螺环环三磷腈化合物, 并最终得到了 1,1,3,3,5,5-三螺环(*N,N'*-乙二硝胺)环三磷腈 [Scheme 1b]。1,1,3,3-二螺环(*N,N'*-乙二硝胺)-5,5-二氯环三磷腈和 1,1,3,3,5,5-三螺环(*N,N'*-乙二硝胺)环三磷腈均为晶体结构(熔点分别为 242~244 °C 和 203~205 °C, 密度分别为 1.898 g·cm<sup>-3</sup> 和 1.887 g·cm<sup>-3</sup>)。此外, 研究发现 1,1,3,3,5,5-三螺环(*N,N'*-乙二硝胺)环三磷腈结构比较稳定, 其撞击感度和摩擦感度与 RDX 相似<sup>[9]</sup>。



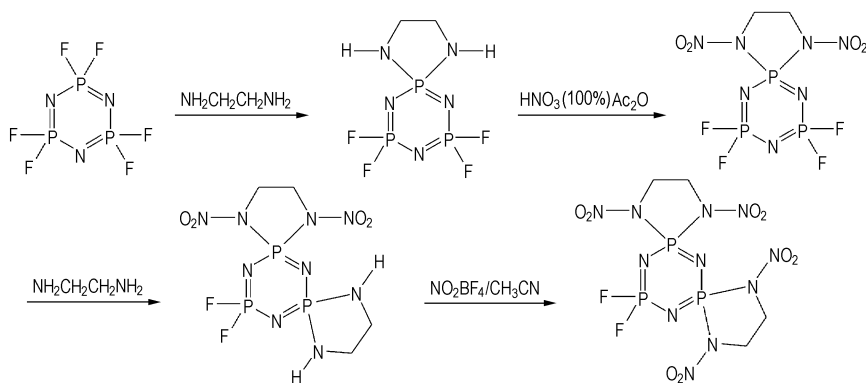
Scheme 1

其合成路线如 Scheme 2 所示。

1995 年, Forohar 等人<sup>[5]</sup> 合成了含 *N,N'*-乙二硝胺单元的氟代环三磷腈衍生物, 培养了 1,1,3,3-二螺环(*N,N'*-乙二硝胺)-5,5-二氟环三磷腈 (Scheme 3) 的单晶, 测得晶体密度为 1.913 g·cm<sup>-3</sup>。美国专利<sup>[11]</sup> 也详细介绍了该系列化合物的合成方法, 认为其可用作火炸药的成分和氧化剂, 具有较高的能量和爆炸性能。



Scheme 2



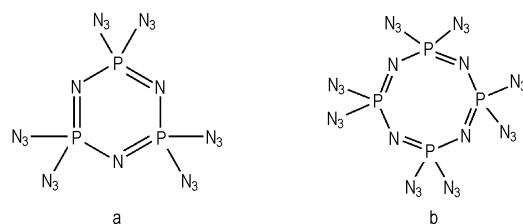
Scheme 3

2008年,北京理工大学的张建国等人<sup>[12]</sup>报导了1,1-螺环(乙二胺)-3,3,5,5-四氯环三磷腈及其硝化产物1,1-螺环(*N,N'*-乙二硝胺)-3,3,5,5-四氯环三磷腈的制备、结构表征、热分解机理及理论研究,培养了1,1-螺环(乙二胺)-3,3,5,5-四氯环三磷腈的单晶,测定了其晶体结构,属于单斜晶系, $C2/c$ 空间群,晶胞参数为 $a = 2.3263(3) \text{ nm}$ ,  $b = 0.8886(12) \text{ nm}$ ,  $c = 1.9615(3) \text{ nm}$ ,  $\beta = 114.732(2)^\circ$ ,  $V = 3.6828(9) \text{ nm}^3$ 。热分析结果表明,该类化合物均具有一强放热峰,有可能用作含能材料。

## 2.2 叠氮类环磷腈化合物

含有叠氮基团的高氮化合物,在能量上非常有吸引力。而在磷腈环上引入叠氮基所形成的共价叠氮化合物可能具有非常高的生成热和能量密度,可应用于高能量密度材料研究领域,所以近几年人们对这类化合物逐渐重视起来。

1955年,Grundmann<sup>[13]</sup>等人以丙酮为溶剂,六氯环三磷腈与叠氮化钠反应生成油状的叠氮化合物 $\text{N}_3\text{P}_3(\text{N}_3)_6$  [Scheme 4a],这是第一次合成出含能磷腈化合物,是一种性能优良的高氮类含能材料。



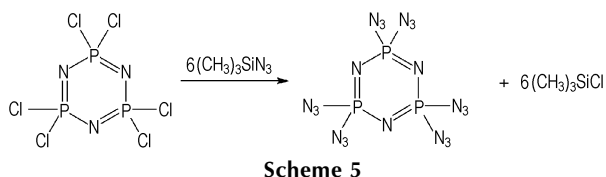
Scheme 4

2006年,Göbel等人<sup>[14]</sup>改进了 $\text{N}_3\text{P}_3(\text{N}_3)_6$ 的合成方法(Scheme 5),对其结构进行了核磁、拉曼、红外光谱表征并进行了DSC分析。DSC结果表明,该化合物初始分解温度为 $220^\circ\text{C}$ ,室温下撞击感度小于

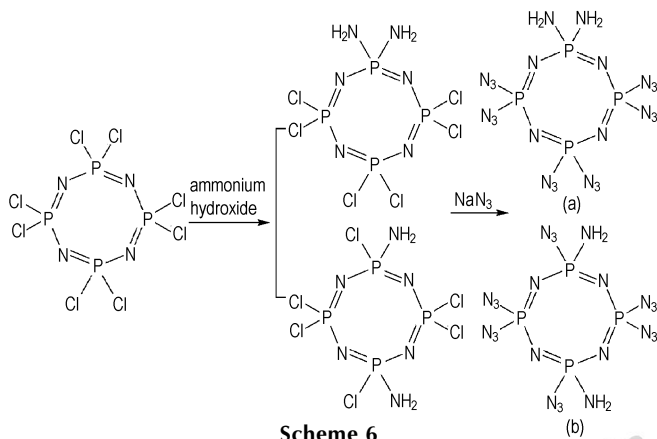
1 J)。另外,对气相  $N_3P_3(N_3)_6$  分子进行了理论研究,计算得到其气相生成热为  $1428.4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 说明其作为一种敏感的高能量化合物。

北京理工大学的张建国等<sup>[15]</sup>用量子化学计算方法分别研究了六叠氮环三磷腈和八叠氮环四磷腈 [Scheme 4(b)] 的分子和晶体结构, 得到其电子结构参数, 并进行了轨道分析、生成热、能带结构、态密度等物化参数的计算研究, 预测了其感度性质和热分解特性。

为了解决上述化合物感度高的问题, 2001 年, Forohar<sup>[10]</sup> 等人合成出了两种新型的环四磷腈化合物: 1,1-二氨基-3,3,5,5,7,7-六叠氮基环四磷腈和 1,5-二氨基-1,3,3,5,7,7-六叠氮基环四磷腈 (Scheme 6)。实验证明, 这两种环磷腈化合物可以作为绿色起爆药和环保击发药组分应用于含能材料领域。



Scheme 5



Scheme 6

1,1-二氨基-3,3,5,5,7,7-六叠氮基环四磷腈为白色晶体, 熔点  $72 \sim 74 \text{ }^\circ\text{C}$ 。Forohar 等人<sup>[16]</sup> 还对所得产物进行了 DSC 和点火药测试 (FA-956 标准击发药), 并与叠氮化铅 ( $Pb(N_3)_2$ ) 进行了比较。结果表明, 1,1-二氨基-3,3,5,5,7,7-六叠氮基环四磷腈在  $230 \text{ }^\circ\text{C}$  开始剧烈分解, 伴随着分解焓为  $-2451 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 而  $Pb(N_3)_2$  分解焓为  $-2148 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这说明该化合物在同等条件下分解要比叠氮化铅多释放出 15% 的能量。点火药测试的结果表明, 1,1-二氨基-3,3,5,5,7,7-六叠氮基环四磷腈爆炸时间为  $0.0015 \text{ s}$ , 最大爆压为  $296.49 \text{ MPa}$ ; 而含有斯蒂酚酸铅、三硫化二碲、硝酸钡的 FA-956 配方的起爆时间为  $0.002 \text{ s}$ , 最大爆压为  $275.80$

MPa。结果说明, 1,1-二氨基-3,3,5,5,7,7-六叠氮基环四磷腈比传统配方能量高, 爆轰时间短, 爆压大。

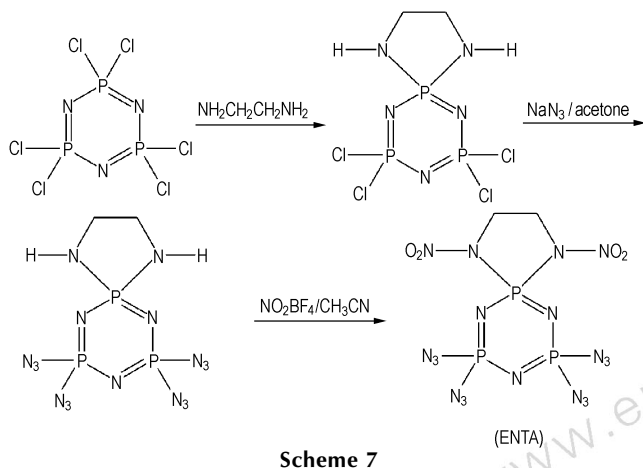
2002 年, John<sup>[17]</sup> 实验测试了环聚磷腈类含能材料 1,1-二氨基-3,3,5,5,7,7-六叠氮基环四磷腈的爆炸性能, 实验表明, 该含能材料具有一定的撞击感度、摩擦感度和静电感度, 是一种强力起爆药。初步测试显示, 1,1-二氨基-3,3,5,5,7,7-六叠氮基环四磷腈能作为起爆药柱应用于大尺寸弹药中, 但能否在中型尺寸的弹药中应用尚未进行测试和评估。实验还研究了 1,1-二氨基-3,3,5,5,7,7-六叠氮基环四磷腈的爆燃转爆轰 (DDT) 性能, 测试结果表明, 1,1-二氨基-3,3,5,5,7,7-六叠氮基环四磷腈能作为传爆装药应用于爆炸序列中。

1,5-二氨基-1,3,3,5,7,7-六叠氮基环四磷腈为无色液体, 分解温度为  $234 \text{ }^\circ\text{C}$ , 分解焓为  $-2671 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ , 起爆时间为  $0.0012 \text{ s}$ , 最大爆压  $318 \text{ MPa}$ , 且具有较低的撞击和摩擦感度, 将其溶于丙酮等溶剂中, 可用于六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20) 和 1,3,3-三硝基氮杂环丁烷 (TNAZ) 等含能材料的钝感包覆, 此包覆层在爆轰时将会产生巨大的能量。1,5-二氨基-1,3,3,5,7,7-六叠氮基环四磷腈也可用于液体起爆药, 由于其分子结构含氮量高, 燃烧过程中产生大量的氮气, 爆速和爆压均较等当量的  $Pb(N_3)_2$  和  $(P_4N_4)(N_3)(NH_2)_2$  高。

2005 年, Muralidharan 等人<sup>[4]</sup> 对连有叠氮基的环磷腈化合物作为高能量密度材料展开了进一步研究。通过  $N_3P_3Cl_6$ ,  $N_3P_3Cl_5(NMe_2)$ ,  $N_3P_3Cl_4(NH_2)_2$  分别与叠氮化钠反应制备得到液态化合物  $N_3P_3(N_3)_6$ ,  $N_3P_3(NMe_2)(N_3)_5$  及固态化合物  $N_3P_3(N_3)_4(NH_2)_2$ , 并对其进行结构表征, 在实验燃烧热基础上利用盖斯定律计算得到其标准生成热分别为  $1904.3$ ,  $1528.6$ ,  $1869.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

### 2.3 叠氮/螺环复合类环磷腈化合物

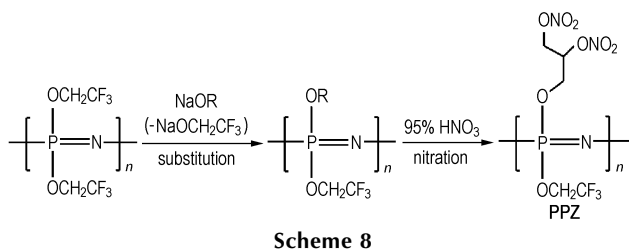
2003 年, 在美国陆军研发工程中心 ARDEC (U. S. Army Armaments Research and Development Engineering Center) 的组织下, Millar 等<sup>[18]</sup> 研究了叠氮/螺环复合类环磷腈化合物 1,1-螺环 (*N,N'*-乙二硝胺)-3,3,5,5-四叠氮基环三磷腈 (ENTA, 见 Scheme 7) 的合成方法和爆轰性能, SEMC (Pacific Scientific Energetic Materials Company) 公司对该化合物做了安全性能评估。测试结果表明, ENTA 具有较高的分解温度 ( $254 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 和分解焓 ( $-2894 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 且感度可控, 对光不敏感, 吸湿性小, 不含有毒金属和高氯酸盐, 可消除重金属和高氯酸带来的环境污染。



### 3 聚磷腈含能粘合剂的研究

#### 3.1 聚磷腈硝酸酯粘合剂

2004年,英国的 Anthony<sup>[19]</sup>等人用聚二氯化磷腈与三氟乙醇钠作用生成三氟乙基醚取代的聚磷腈,再用缩醛醇进行取代反应转化为缩醛基取代的聚磷腈,然后硝解,最终得到硝酸酯基取代的聚磷腈 PPZ (Scheme 8)。



将上述 PPZ 与现有含能粘合剂 3-硝酸酯甲基-3-甲基氧杂环丁烷的均聚物 PolyNIMMO 和硝酸酯缩水甘油醚的均聚物 PolyGLYN 按不同比例进行混合,通过测定混合物的  $T_g$  和能量密度,可以初步了解 PPZ 的能量和性能,见表 1 和表 2。

由表 1 和表 2 可知,随着 PPZ 含量的增大,混合物 PPZ/PolyNIMMO 和 PPZ/PolyGLYN 的玻璃化温度  $T_g$  逐渐降低,同时能量密度不断增大。这就说明聚磷腈硝酸酯粘合剂具有良好的低温性能和较传统粘合剂高的能量密度。

为了进一步提高聚磷腈硝酸酯粘合剂的能量水平,2006年, Peter 等<sup>[20-22]</sup>在已有研究的基础上,用改进的方法合成了三种不同结构的双取代聚磷腈硝酸酯粘合剂 PPZ-E<sub>1</sub>, PPZ-E<sub>2</sub> 和 PPZ-E<sub>3</sub> (Scheme 9)。

由表 3 可见,所形成的硝酸酯聚磷腈与 PolyNIMMO

或 PolyGLYN 相比,有较高的能量密度和分解焓。PPZ-E<sub>1</sub>、PPZ-E<sub>2</sub> 和 PPZ-E<sub>3</sub> 其能量密度比现有含能粘合剂 PolyGLYN 分别高出 57%、63% 和 38%。同时也可以看出,硝酸酯基取代的聚磷腈依然具有很好的低温性能,  $T_g$  为  $-24 \sim -33$  °C。

表 1 PPZ/polyNIMMO 混合物的性能

Table 1 Properties of PPZ/polyNIMMO

mass fraction	$T_g$ / °C	energy density / J · cm <sup>-3</sup>
100	-32.8	1638
80	-28.7	2064
60	-29.6	2490
40	-30.4	2916
0	-45.8	3768

表 2 PPZ/polyGLYN 混合物的性能

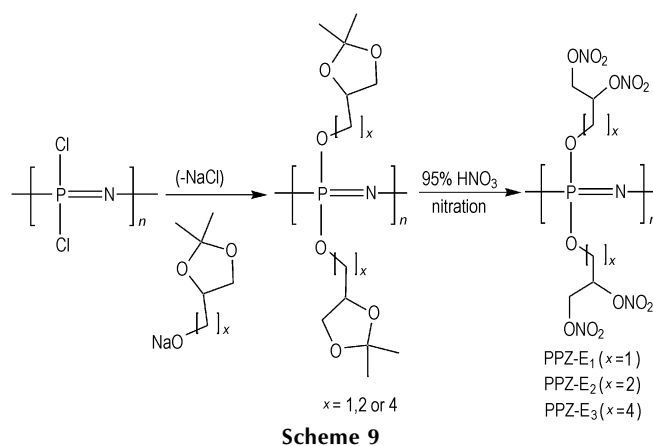
Table 2 Properties of PPZ/polyGLYN

mass fraction	$T_g$ / °C	energy density / J · cm <sup>-3</sup>
100	-30.0	2900
75	-32.4	3117
60	-32.7	3247
50	-37.3	3334
40	-40.3	3421
25	-43.3	3551
0	-45.8	3768

表 3 PPZ-E 的性能

Table 3 Properties of PPZ-E

energetic binder	density / g · cm <sup>-3</sup>	$T_g$ / °C	decomposition energy / J · g <sup>-1</sup>	energy density / J · cm <sup>-3</sup>
PPZ-E <sub>1</sub>	1.69	-32.5	2690	4550
PPZ-E <sub>2</sub>	1.65	-23.8	2880	4750
PPZ-E <sub>3</sub>	1.45	-35.2	2760	4002
polyGLYN	1.45	-30.0	2000	2900
polyNIMMO	1.26	-33.0	1300	1638



### 3.2 聚磷腈叠氮粘合剂

除了聚磷腈硝酸酯粘合剂外,通过化学改性还可以合成聚磷腈为主链的叠氮粘合剂。2008年,Kason等人<sup>[23]</sup>报道了四类聚磷腈叠氮粘合剂(Scheme 10),并研究了其非异氰酸酯固化条件及交联体的相关性能。

以上四类叠氮基取代聚磷腈的合成技术路径如Scheme 11所示。

四类叠氮基取代聚磷腈与PolyGLYN和PolyNIMMO的性能对比见表4。由表4数据可明显看出,聚磷腈主链的引入使其具有良好的柔顺性,其 $T_g$ 为 $-70 \sim -100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,低温性能非常优良,这对于要求具有良好低温力学性能的含能粘合剂非常重要。

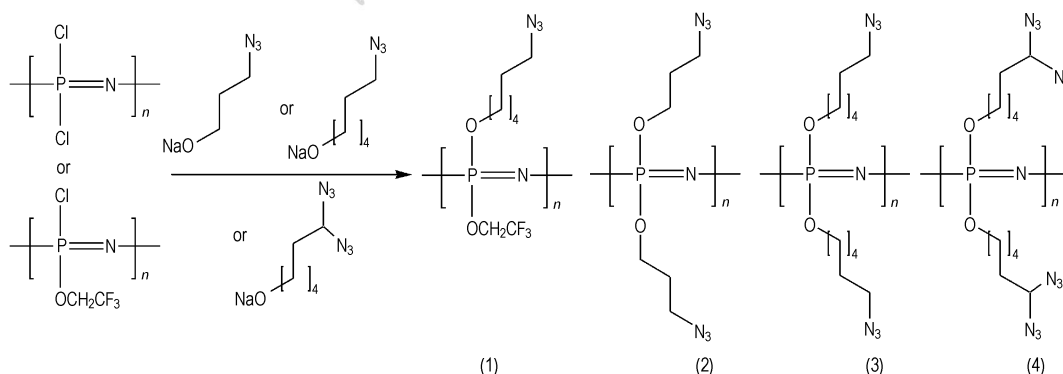
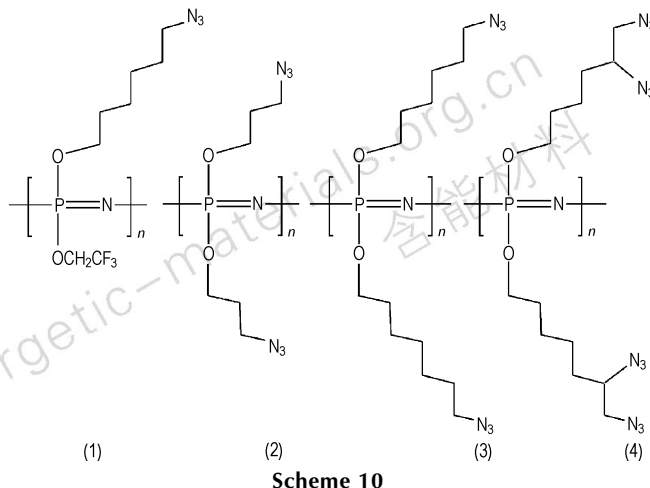


表4 四类叠氮基取代聚磷腈的性能

Table 4 Properties of four azide-substituted polyphosphazene

energetic binders	density /g · cm <sup>-3</sup>	$T_g$ / $^\circ\text{C}$	decomposition energy /J · g <sup>-1</sup>	energy density /J · cm <sup>-3</sup>
(1)	1.12	-92.5	1425	1872
(2)	1.35	-73.4	1825	2465
(3)	1.16	-99.5	1665	1930
(4)	1.29	-64.0	1830	2360
polyGLYN	1.45	-30.0	2000	2900
polyNIMMO	1.26	-33.0	1300	1638

### 4 含磷组分对能量贡献的影响

无论是磷腈类含能化合物或磷腈类含能粘合剂,其分子结构中均含有磷元素,爆轰或燃烧过程会产生 $\text{H}_3\text{PO}_4$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_2$ 、 $\text{HPO}_3$ 或 $\text{P}_2\text{O}_5$ 等小分子含磷衍生物,它们的存在对能量的贡献极为不利。究其原因,一方面,此类小分子含磷衍生物由于自身的化学惰性而不会参与爆炸或燃烧过程,它们的存在将会稀释含能中间组分的浓度,延缓燃烧或爆轰过程;另一方面,如 $\text{H}_3\text{PO}_4$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_2$ 等可能在含能组分表面形成阻燃性的薄膜,阻碍

含能组分的进一步分解;此外,含磷衍生物在分解过程中可能会生成磷氧自由基( $\text{PO}\cdot$ ),会与燃烧或爆轰环境内的 $\text{H}\cdot$ 或 $\text{OH}\cdot$ 结合,一定程度上终止分解反应的进行。

然而,磷元素的存在给爆炸方程式的确定和爆炸参数的理论计算带来极大的困难,国内外在这方面的研究尚未见公开文献报道。因此,含磷组分对磷腈含能材料能量贡献的影响,还有待进一步研究。

### 5 结束语

(1) 环磷腈类含能化合物具有较高的能量密度和生成热,是一类很有发展潜力的新型高氮含能材料。但其感度相对较高,这对材料的安全性能不利,限制了该类材料的应用范围和前景。因此,开发低感度、高能量密度的环磷腈化合物是解决该类材料技术瓶颈的关键。

(2) 将聚磷腈主链引入含能粘合剂体系,不仅提高了材料的能量密度,而且使其具有较传统粘合剂更为优良的低温性能,这将成为新型含能粘合剂研究领域的一个热点。

(3) 磷腈类含能材料中含有磷元素,其爆炸方程

式的确定和爆炸参数的理论计算仍是难点。因此, 应将实验研究与理论研究相结合, 首先从理论上预估相关参数, 再用以指导合成工艺路线。

(4) 磷腈含能材料爆轰和燃烧产物的组成、形成机理及其对能量贡献的影响仍然是该类材料研究的热点和重点。

#### 参考文献:

- [1] Allcock H R. Phosphorus-nitrogen Compounds[M]. New York: Academic Press, 1972: 58-94.
- [2] Allcock H R. Polyphosphazene[J]. *Chem Brit*, 1974, 10: 118.
- [3] Allcock H R. Chemistry and Applications of Polyphosphazenes [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2003: 1-100.
- [4] Muralidharan K, Omotowa B A, Twamley B. High energy density materials from azidocyclophosphazenes[J]. *Chem Commun*, 2005: 5193-5195.
- [5] 郑慧慧, 张建国, 张同来, 等. 环磷腈类高能量密度化合物研究. VI. 环磷腈化合物及其在含能材料中的应用[J]. *含能材料*, 2008, 16(6): 758-761.  
ZHENG Hui-hui, ZHANG Jian-guo, ZHANG Tong-lai, et al. High energy density compounds cyclotriphosphazene. VI. Cyclotriphosphazene compounds and their application on energetic materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(6): 758-761.
- [6] Forohar F, Dave P R, Axenrod T, et al. Synthesis of ethylenedinitramine derivatives of fluorocyclotriphosphazene[J]. *Phosphorus, Sulfur & Silicon*, 1995, 101: 161-166.
- [7] Chandrasekhar V, Thomas K. Coordination and organometallic chemistry of cyclophosphazenes and polyphosphazenes[J]. *Appl Organomet Chem*, 1993, 7(1): 1-31.
- [8] Chang M S, Matuszko A J. Synthesis of triphosphonitrilic diamidetetraazide[J]. *J Am Chem Soc*, 1960, 82: 5756-5757.
- [9] Bezoari M D, Rouge B. Aminophenoxyphosphazenes and process for producing same: US4864047[P], 1-89.
- [10] Dave P R, Forohar F, Chaykovsky M, et al. Spiro(N, N'-dinitroethylenediamino) cyclotriphosphazenes: US5352829[P], 1994.
- [11] Forohar F, Dave P R, Iyer S. Substituted cyclotetraphosphazene compound and method of producing the same: US 6218554 B1 [P], 2001.
- [12] Zhang J G, Zheng H H, Bi Y G, et al. High energy density compounds from cyclophosphazene. II. The preparation, structural characterization, and theoretical studies of 1, 1-spiro(ethylenediamino)-3, 3, 5, 5-tetrachlorocyclotriphosphazene and its nitration product[J]. *Struct Chem*, 2008, 19: 297-305.
- [13] Grundmann C, Ratz R. A new phosphorus-nitrogen compound, P<sub>3</sub>N<sub>21</sub>[J]. *Z Naturforsch B*, 1955, 10: 116-117.
- [14] Göbel M, Karaghiosoff K, Klapötke T M. The first structural characterization of a binary P-N molecule: The highly energetic compound P<sub>3</sub>N<sub>21</sub>[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2006, 45: 6037-6040.
- [15] ZHANG Jian-guo, ZHENG Hui-hui, ZHANG Tong-lai, et al. Theoretical study for high energy density compounds from cyclophosphazene. III. A quantum chemistry study: High nitrogen-contented energetic compound of 1, 1, 3, 3, 5, 5, 7, 7-octaazidocyclotetraphosphazene[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2008, 3, 125.
- [16] Forohar F, Dave P R, Iyer S. Substituted cyclotetraphosphazene compound and method of producing the same: US 6232479 [P], 2001.
- [17] John H. Investigation of Alternative Energetic Compositions for Small Electro-Explosive Devices for Medium Caliber Ammunition. U. S[R]. Army Armament Research, Development and Engineering Center (ARDE-C). 2002.
- [18] Millar R W. Lead-Free Initiators for Electro-Explosive Devices for Medium-Caliber Munitions. U. S[R]. Army T-ACOM-ARDEC/SERDP. 2003.
- [19] Anthony J B, Peter B. Energetic polyphosphazenes - A new Category of binders for energetic formulations[C] // Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, Defence Academy, Cranfield University, 2004.
- [20] Peter G, Paul B D, Adrian K, et al. Energetic polyphosphazenebinders - The impotential of trifluoroethoxy/5, 6-dinitrohexan-1-oxy polyphosphazene [C] // Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, Hilton Hotel, San Francisco, November 15th, 2004.
- [21] Anthony W A, Peter G, Stephen J T. Scale-up of energetic polyphosphazenes development of a continuous nitration process[C] // NDIA 2006 Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, Thistle Hotel, Bristol, 24th-28th, April, 2006.
- [22] Peter G, Peter B. Enhanced energetic polyphosphazenes [C] // Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, International Conference of ICT, 2006.
- [23] Kason B, Peter G. Non-isocyanate curable, energetic (azido) polyphosphazenes [C] // NDIA Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, Hilton Hotel, San Francisco, CA, USA, November 15-17, 2008.

## Development of Synthesis and Application on Phosphazene Energetic Compounds

XIAO Xiao, GAN Xiao-xian, YU Hong-jian, LIU Qing, LI Lei

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

**Abstract:** The development and application of cyclophosphazene and polyphosphazene compounds in energetic materials in recent years were classifiedly reviewed. Some synthesis and research trends of phosphazene-energetic materials were introduced. Spiro-, azide- and spiro-azide energetic cyclophosphazene compound are the three most important hazard primary explosives which have attracted more and more attention due to their excellent performance and distinctive structure characteristics. Azide- and nitric polyphosphazene will be of important significance to development environment-friendly energetic binders because of higher energy density and decomposition energy compared to conventional ones.

**Key words:** organic chemistry; cyclophosphazene compound; polyphosphazene compound; energetic materials; research progress

**CLC number:** TJ55; O62

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.030