

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.04.005

LLM-105 Pb(II)含能配合物的合成 及对 AP 的热分解催化作用*

施群荣^① 刘祖亮^① 成 健^① 赵凤起^② 徐司雨^② 沈盼盼^①^①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)^②西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 合成了 2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM-105)Pb(II)含能配合物,采用 FT-IR 和元素分析表征并分析了其结构,该含能盐分子式为 $\text{Pb}(\text{C}_4\text{H}_2\text{N}_6\text{O}_5)$ 。测试了 LLM-105 Pb(II)含能配合物的撞击感度和摩擦感度,感度值分别为 102 cm 和 18%。采用 TG-DTG 和 DSC 技术研究了 LLM-105 Pb(II)含能配合物的热分解行为,配合物有一个分解放热峰,峰温为 240.7 °C,热分解剩余残渣量为 56.2%。采用 TG-DTG 和 DSC 技术研究了 LLM-105 Pb(II)含能配合物对高氯酸铵(AP)热分解的催化作用,结果表明:LLM-105 Pb(II)含能配合物可使 AP 热分解速度加快,高温分解峰温提前 63.8 °C,对 AP 的热分解具有良好的催化效果。

[关键词] 2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM-105);含能配合物;热分解行为;高氯酸铵(AP);催化

[分类号] O69

引言

高氯酸铵(AP)是复合推进剂、改性双基推进剂和高能硝酸酯增塑聚醚推进剂中最常用的氧化剂。AP 的热分解参数与固体推进剂的燃烧性能,尤其是燃速存在着密切的关系,其高温分解温度越低,则推进剂的点火延迟时间越短,燃速越高^[1-2]。研究含能催化剂对 AP 热分解行为的影响对于预测含能催化剂对以 AP 为主要成分推进剂的催化效果具有重要的参考价值。近年来,含能配合物的研究和应用受到国内外广泛重视。含能配合物一般是指在有机金属盐催化剂分子中,引入含能基团如硝基或叠氮基等制备而得到的配合物,它可作为含能催化剂来调节固体推进剂的燃烧性能,并提高固体推进剂的能量水平^[3]。3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮(NTO)与 Cu(II)、Pb(II)形成的配合物对双基火箭推进剂的燃烧具有很好的调节作用,是一类性能优良的含能催化剂^[4-5]。笔者课题组先后报道了 2,6-二氨基-3,5-二氨基吡啶-1-氧化物(ANPyO)Ni(II)^[6]、Co(III)^[7]、Fe(III)^[7]、Cu(II)^[8]、Pb(II)^[9]等^[10]新型含能配合物的合成、晶体结构、热分解特性及其对 AP 热分解的催化作用。研究结果表明:ANPyO 是一类能量水平高、感度低的新型含能配合物,对 AP 的热分解具有显

著催化效果,在钝感含能催化剂领域具有较好的应用前景。

2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM-105)的结构和性能与 ANPyO 具有相似之处,它的安全性能与 TNT 相当,爆炸性能接近 RDX,是一种含氮量高、稳定性好、感度低、能量高的高能钝感化合物^[11]。笔者课题组前期研究表明,LLM-105 也可作为含能配体与 Cu(II)、Co(III)形成含能配合物^[12],LLM-105 Cu(II)、Co(III)配合物与 AP 混合物的 DSC 测试表明,LLM-105 Cu(II)、Co(III)含能配合物对 AP 的热分解也具有显著的催化作用。目前,国内外未见 LLM-105 Pb(II)含能配合物的合成与性能的相关文献报道。笔者合成了 LLM-105 Pb(II)含能配合物,通过元素分析和 FT-IR 分析了它的结构;通过撞击感度、摩擦感度、TG-DTG 和 DSC 技术研究了它的感度特性和热分解行为;同时,通过 TG-DTG 和 DSC 技术研究了 LLM-105 Pb(II)含能配合物对 AP 的热分解催化作用。

1 试验部分

1.1 试剂、仪器与测试条件

LLM-105 为实验室合成^[11]。其他试剂均为市售化学纯或分析纯产品。

* 收稿日期:2014-12-15

基金项目:国家预研项目(62201070102)

作者简介:施群荣(1983~),男,助理研究员,主要从事含能材料的研究。E-mail:shiqunrong@163.com

通信作者:刘祖亮(1951~),男,博导,研究员,主要从事含能材料、化学工艺等研究。E-mail:liuzuliang302@163.com

DSC823e 差示扫描量热仪,瑞士 METTLER TOLEDO 公司,试样量为 1.16 mg,升温速率 10 K/min,升温区间 50 ~ 500 ℃,N₂ 流量为 30 mL/min;热重分析仪,瑞士 METTLER TOLEDO TGA/SDTA851e 热分析仪,试样量为 1 mg,升温速率 10 K/min,升温区间 50 ~ 500 ℃,N₂ 流量为 30 mL/min;MAGNA-760 型傅立叶变换红外光谱分析仪(KBr 压片),美国 NICOLET 公司;德国 Vario EL III CHNOS 元素分析仪;MEL-TEMP 熔点仪,美瑞泰克集团-先德科技仪器。

撞击感度测试条件:落锤 2.5 kg,落高为(250 ± 1) mm,样品质量(50 ± 2) mg;摩擦感度测试条件:摆锤 1.5 kg,样品质量(30 ± 1) mg,表压 4.9 MPa。测试结果为平行两组取其平均值。

1.2 LLM-105 Pb(II)含能配合物的合成

依次将 LLM-105 (2.16 g, 10 mmol) 和 Pb(CH₃COO)₂ · 3H₂O(3.8 g, 10 mmol) 加入到 80 mL H₂O 中,升温至 60 ℃ 反应 1 h,反应结束过滤,水洗,干燥得 3.99 g 粉红色 LLM-105 Pb(II)含能配合物固体,收率 95.0% (以 LLM-105 为标准)。元素分析(%):计算值,C, 11.39; H, 0.47; N, 19.94; Pb, 49.19。实测值,C, 11.45; H, 0.45; N, 19.98; Pb, 49.21。

2 结果与讨论

2.1 LLM-105 Pb(II)含能配合物的结构

为确定 LLM-105 Pb(II)含能配合物的结构,分别测试了 LLM-105 及其 Pb(II)配合物的 FT-IR。LLM-105 及其 Pb(II)配合物的 FT-IR 对比、特征官能团吸收频率和强度的变化情况见图 1 和表 1。

由 LLM-105 及其 Pb(II)配合物 FT-IR 对比(图 1,表 1) 中 NH₂、N→O 吸收频率和强度的变化情况可知,LLM-105 Pb(II)配合物的特征官能团

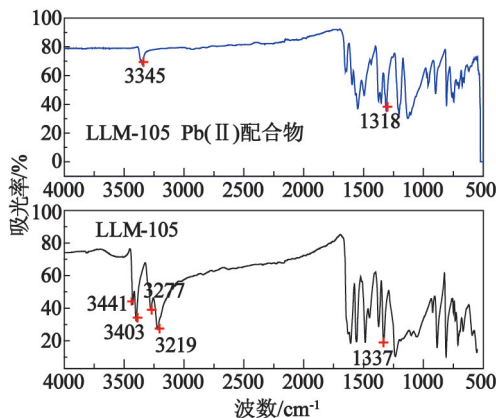


图 1 LLM-105 及其 Pb(II)配合物的 FT-IR 对比

Fig. 1 FT-IR spectra comparison of LLM-105 and its Pb(II) complex

表 1 LLM-105 及其 Pb(II)配合物的特征官能团的吸收频率和强度对比

Tab. 1 Main FT-IR bands comparison of LLM-105 and its Pb(II) complex

化合物	特征官能团的吸收频率/cm ⁻¹			
	$\nu_{as}(\text{NH}_2)$	$\nu_s(\text{NH}_2)$	$\nu(\text{NH})$	$\nu(\text{N}\rightarrow\text{O})$
LLM-105	3 441(中), 3 277(中)	3 403(中), 3 219(中)	—	1 337(强)
LLM-105 Pb(II) 配合物	—	—	3 345(弱)	1 318(中)

注: ν_{as} :不对称伸缩振动; ν_s :对称伸缩振动; ν :伸缩振动

(NH₂, N→O) FT-IR 相对 LLM-105 发生显著的变化:LLM-105 分子中的 NH₂ 有 4 重峰: ν_{as} 3 441 cm⁻¹、 ν_{as} 3 277 cm⁻¹、 ν_s 3 403 cm⁻¹、 ν_s 3 219 cm⁻¹,它们分别是 LLM-105 分子中的 2-位和 6-位 NH₂ 不对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰,吸收强度为中。而 LLM-105 Pb(II)配合物中 NH₂ 的不对称伸缩振动峰和对称伸缩振动峰消失,出现一个强度较弱的单峰 $\nu(\text{NH})$ 3 345 cm⁻¹。这说明 LLM-105 与 Pb(II)形成配合物后,2-位和 6-位的 NH₂ 消失,并产生新的 NH 结构单元。以文献的研究结果为参考^[13-14],这可能表明 LLM-105 分子中的 2-位和 6-位 NH₂ 分别脱去一个质子与 Pb(II)形成配合物。此外,LLM-105Pb(II)配合物的 N→O 吸收强度相对 LLM-105 由强变弱,同时发生一定的位移,这也可能表明 LLM-105 分子中 N→O 与 Pb(II)形成配合键^[13-14]。

文中 1.2 元素分析以及 2.1 红外分析结果表明 LLM-105 Pb(II)配合物的分子式为 Pb(C₄H₂N₆O₅),配体 LLM-105 可能脱去两个质子以 NH 和 N→O 与 Pb(II)形成配位键。

2.2 LLM-105 Pb(II)含能配合物的机械感度

LLM-105 及其 Pb(II)配合物的撞击感度和摩擦感度见表 2。

LLM-105 为多氨基多硝基氮杂环氮氧化物,分子结构具有高度的对称性。分子中氨基与硝基分别形成分子内、分子间氢键,使 LLM-105 形成类似于

表 2 LLM-105 及其 Pb(II)配合物的撞击感度和摩擦感度测试结果

Tab. 2 Impact sensitivity and friction sensitivity of LLM-105 and its Pb(II) complex

化合物	撞击感度/cm	摩擦感度/%
LLM-105	113	0
Pb(C ₄ H ₂ N ₆ O ₅)	102	18

石墨的平面层状的晶体结构^[12]。当受到能量作用时,能量可以在整个平面间传递,使得单个 LLM-105 分子承受的能量减少。同时,类似于石墨的层状结构可作为边界润滑剂,能够有效降低界面与界面之间、颗粒与颗粒之间的摩擦,减少热点发生的概率,这是 LLM-105 感度较低的主要原因。此外, π 电子共轭效应、氨基供电子效应也是 LLM-105 感度较低的原因。由表 2 可知,LLM-105 Pb(II)含能配合物的撞击感度和摩擦感度分别为 102 cm 和 18%,感度值相对 LLM-105 略有升高。基于对 LLM-105 含能配合物的结构分析,笔者认为 LLM-105 与 Pb(II)形成配位键后,由于 2-、6-位 NH_2 分别脱去了一个氢原子,削弱了 LLM-105 分子中的氨基与硝基的分子内和分子间氢键作用,使得 LLM-105 类似于石墨的平面层状遭到破坏,因此 Pb(II)含能配合物机械感度相对 LLM-105 略有升高。总体而言,LLM-105 含能配合物为不敏感含能材料。

2.3 LLM-105 Pb(II)含能配合物的热分解行为

采用 TG-DTG 和 DSC 对 LLM-105 Pb(II)含能配合物的热分解行为进行了分析,其 TG-DTG 和 DSC 曲线见图 2 和图 3。

由图 2 曲线可知,LLM-105 Pb(II)含能配合物的热失重过程有 3 个阶段:第一失重阶段为剧烈失

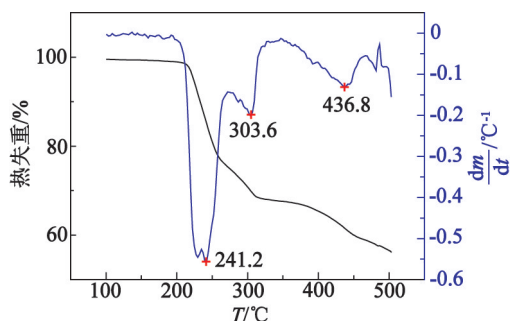


图 2 LLM-105Pb(II)含能配合物的 TG-DTG 曲线

Fig. 2 TG-DTG curves of the energetic Pb(II) complex of LLM-105

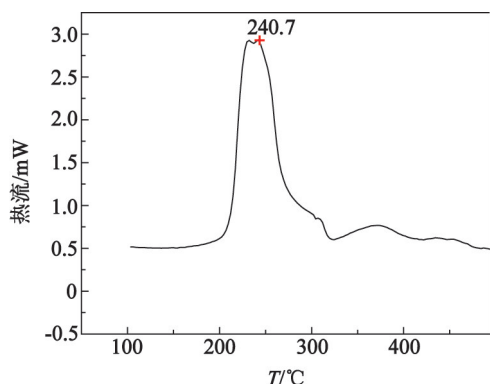


图 3 LLM-105Pb(II)含能配合物的 DSC 曲线

Fig. 3 DSC curve of the energetic Pb(II) complex of LLM-105

重过程,发生于 192.5 ~ 275.6 °C,失重 24.8%,最大失重率发生于 241.2 °C。对于相应的 DSC 曲线,第一失重阶段发生了剧烈放热过程,始于约 193.9 °C,峰顶温度为 240.7 °C。第二失重阶段为缓慢失重过程,发生于 275.6 ~ 327.9 °C,失重 7.0%,最大失重率发生于 303.6 °C。对于相应的 DSC 曲线,第二失重阶段继续发生了剧烈放热过程,终于 323.0 °C。第三失重阶段为缓慢失重过程,发生于 327.9 ~ 500 °C,失重 12.0%,最大失重率发生于 436.8 °C。对于相应的 DSC 曲线,第三失重阶段没有发生明显变化。热分解残渣的质量分数为 56.2%,推测最终产物可能为 PbO (理论质量分数为 52.9%)。

2.4 LLM-105 Pb(II)含能配合物对 AP 热分解的催化作用

在 AP 中加入 10% (质量分数) 的 LLM-105 Pb(II)含能配合物,分别测试了纯 AP 和 AP 混合物的 TG-DTG、DSC 曲线,通过 TG-DTG 曲线和 DSC 曲线特征峰的峰形和峰位变化考察 LLM-105 Pb(II)含能配合物对 AP 热分解行为的影响。图 4、图 5、图 6 分别是纯 AP 和 AP 混合物的 TG-DTG 及 DSC 曲线。

由图 4 的 TG-DTG 曲线可知,纯 AP 的热分解分两步进行,在低温分解阶段(264.3 ~ 345.1 °C),AP 的质量损失了 21% 左右。在高温分解阶段

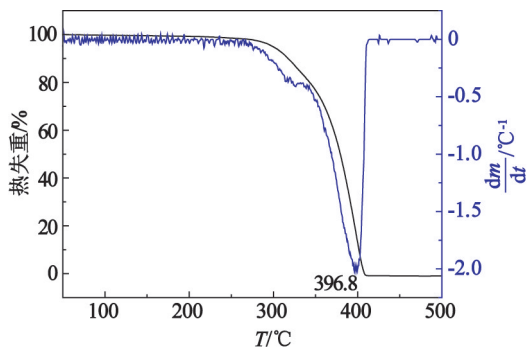


图 4 纯 AP 的 TG-DTG 曲线

Fig. 4 TG-DTG curves of the pure AP

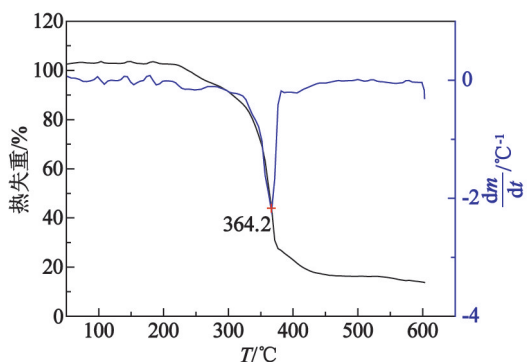


图 5 AP + 10% LLM-105 Pb(II)含能配合物的 TG-DTG 曲线

Fig. 5 TG-DTG curves of the AP with 10% Pb(II) complex of LLM-105

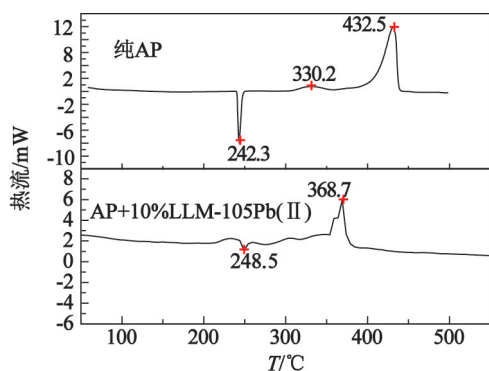


图 6 纯 AP 和 AP + 10% LLM-105 Pb(II) 含能配合物的 DSC

Fig. 6 DSC curves of pure AP and AP with 10% Pb(II) complex of LLM-105

(345.1 ~ 409.7 °C), AP 的质量损失了 79% 左右。由图 5 的 TG-DTG 曲线可知,在 LLM-105 Pb(II)含能配合物的催化作用下,AP 的热分解为一步失重过程。AP 在 207.7 ~ 376.2 °C 温度范围内即分解完全,显示出温度范围很窄的失重区间,说明 AP 混合物在温度达到 364.2 °C 左右时反应非常剧烈,失重几乎在瞬间完成,表明 AP 的热分解在 LLM-105 Pb(II)含能配合物催化作用下加快,热分解反应历程发生了改变。

从图 6 可知,242.3 °C 左右为纯 AP 的熔化温度,加入 LLM-105 Pb(II)含能配合物后对 AP 的熔化过程没有影响,330.2 °C 左右是纯 AP 热分解的低温分解阶段,432.5 °C 左右是纯 AP 热分解的高温分解阶段。图 4 表明纯 AP 有两步失重过程。如图 6 所示,在 LLM-105 Pb(II)含能配合物的催化作用下,混合物的低温分解峰消失,高温分解峰在 368.7 °C 出现。而图 5 表明 AP 混合物只有一步失重过程,失重率为 86.4%。在图 6 中可见,LLM-105 Pb(II)含能配合物与 AP 混合物的高温分解峰峰顶温度相对纯 AP 提前了 63.8 °C,这说明 LLM-105 Pb(II)含能配合物加速了 AP 的分解,使 AP 的热分解温度提前,分解速度加快,对 AP 的热分解具有良好的催化效果。

AP 低温热分解阶段主要是固-气多相反应,存在离解与升华过程: $\text{NH}_4^+ + \text{ClO}_4^- \rightarrow \text{NH}_3(\text{s}) + \text{HClO}_4(\text{s}) \rightarrow \text{NH}_3(\text{g}) + \text{HClO}_4(\text{g})$ 。进入气相的 NH_3 和 HClO_4 接着发生系列反应,产物有 N_2O 、 O_2 、 Cl_2 、 H_2O 和少量的 NO ; AP 的高温分解阶段主要是气相反应,产物有 NO 、 O_2 、 Cl_2 和 H_2O 等。AP 的热分解过程是个复杂的氧化还原反应过程,同时存在复杂的电子转移过程。催化剂在这个过程中加速了 AP 热分解过程电子的转移,有利于 AP 的热分解,从而表现出良好的催化效果^[15]。

LLM-105 Pb(II)含能配合物表现出较好的催化活性。由 2.3 的分析结果可知,LLM-105 Pb(II)含能配合物热分解的最终产物可能是 PbO 。 PbO 为 P 型半导体,其空 d 轨道可提供良好的电子转移轨道,对 AP 热分解过程中的电子转移可起到桥梁作用。此外,LLM-105 Pb(II)含能配合物在热分解过程中,可能微小的 PbO 颗粒包覆在 AP 表面,这可能进一步促进对 AP 的热分解催化作用。

3 结论

以 LLM-105 和 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为原料,合成新型 LLM-105 Pb(II)含能配合物,通过 FT-IR、元素分析、撞击感度、摩擦感度、TG-DTG 和 DSC 等手段对其结构、感度、热分解特性和催化性能进行了测试和分析。

结果表明:LLM-105 Pb(II)含能配合物的分子式为 $\text{Pb}(\text{C}_4\text{H}_2\text{N}_6\text{O}_5)$,配体 LLM-105 脱去两个质子以 NH 和 $\text{N} \rightarrow \text{O}$ 与 Pb(II) 形成配位键;LLM-105 Pb(II)含能配合物的撞击感度和摩擦感度相对 LLM-105 略有升高,为不敏感含能材料;LLM-105 Pb(II)含能配合物有一个分解放热峰,峰温为 240.7 °C,热分解剩余残渣质量分数为 56.2%;LLM-105 Pb(II)含能配合物可使 AP 的热分解速度加快,低温分解峰消失,高温分解峰温提前 63.8 °C,对 AP 热分解具有良好的催化效果。

参 考 文 献

- [1] Liu Hongbo, Jiao Qingze, Zhao Yun, et al. Mixed oxides derived from Cu-Co layered double hydroxide nanorods: preparation, characterization and their catalytic activities [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 496 (1-2): 317-323.
- [2] Xia Zhengqiang, Chen Sanping, Wei Qing, et al. Syntheses and characterization of energetic compounds constructed from alkaline earth metal cations (Sr and Ba) and 1,2-bis (tetrazol-5-yl) ethane [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2011, 184 (7): 1777-1783.
- [3] 张国涛,周遵宁,张同来,等. 固体推进剂含能催化剂研究进展[J]. 固体火箭技术,2011,34(3):319-323. Zhang Guotao, Zhou Zunning, Zhang Tonglai, et al. Advance on energetic catalysts for solid propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(3):319-323.
- [4] 李加荣,陈博仁,欧玉湘,等. 3-硝基-1,2,4-三唑酮-5-(NTO)的铅盐 $[\text{Pb}(\text{NTO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 的晶体结构[J]. 北京理工大学学报,1993,13(2): 157-162. Li Jiarong, Chen Boren, Ou Yuxiang, et al. The crystal structure of lead 3-nitro-1,2,4-triazolone-5 (NTO) [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1993, 13 (2):

- 157-162.
- [5] 张同来,胡荣祖,李福平. $[\text{Pb}(\text{NTO})_2(\text{H}_2\text{O})]$ 的制备、分子结构和热分解机理研究[J]. 化学学报, 1994, 52(6): 545-550.
- Zhang Tonglai, Hu Rongzu, Li Fuping. Preparation, molecular structure and thermal decomposition mechanisms of $[\text{Pb}(\text{NTO})_2(\text{H}_2\text{O})]$ [J]. Acta Chimica Sinica, 1994, 52(6): 545-550.
- [6] 刘进剑,刘祖亮,成健. 含能配合物 $\text{Ni}(\text{C}_5\text{N}_5\text{O}_5\text{H}_4)_2(\text{by})_2$ 的晶体结构和热分解性能[J]. 火炸药学报, 2012, 35(2): 36-39.
- Liu Jinjian, Liu Zuliang, Cheng Jian. Crystal structure and thermal decomposition properties of energetic complex $\text{Ni}(\text{C}_5\text{N}_5\text{O}_5\text{H}_4)_2(\text{by})_2$ [J]. Chinese Journal of Explosive & Propellant, 2012, 35(2): 36-39.
- [7] Liu Jinjian, Liu Zuliang, Cheng Jian, et al. Synthesis, crystal structure and properties of energetic complexes constructed from transition metal cations (Fe and Co) and ANPyO [J]. RSC Advance, 2013, 9(3): 2917-2923.
- [8] Liu Jinjian, Liu Zuliang, Cheng Jian. Synthesis, crystal structure and properties of a novel tetra-nuclear Cu complex of ANPyO [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2013, 197: 198-203.
- [9] Liu Jinjian, Liu Zuliang, Cheng Jian. Synthesis, crystal structure and catalytic effect on thermal decomposition of RDX and AP: an energetic coordination polymer $[\text{Pb}_2(\text{C}_5\text{H}_3\text{N}_5\text{O}_5)_2(\text{NMP}) \cdot \text{NMP}]_n$ [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2013, 200: 43-48.
- [10] 刘进剑,刘祖亮,蔺向阳,等. 2,6-二氨基-3,5-二硝基吡啶-1-氧化物含能配合物的制备及性能研究[J]. 南京理工大学学报:自然科学版, 2013, 37(4): 640-646.
- Liu Jinjian, Liu Zuliang, Lin Xiangyang, et al. Preparation and properties of three novel energetic complexes of 2,6-diamino-3,5-dinitropyridine-1-oxide [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2013, 37(4): 640-646.
- [11] 刘进全,陈树森,欧育湘,等. 1-氧-2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪(LLM-105)的合成[J]. 化学通报, 2006, 69(2): 151-153.
- Liu Jinquan, Chen Shusen, Ou Yuxiang, et al. Synthesis of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide [J]. Chemistry, 2006, 69(2): 151-153.
- [12] 刘进剑,刘祖亮,成健. 两个2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物含能配合物的合成,晶体结构及催化性能(英文)[J]. 无机化学学报, 2014, 30(3): 696-704.
- Liu Jinjian, Liu Zuliang, Cheng Jian. Synthesis, crystal structure and catalytic properties of two energetic complexes containing 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2014, 30(3): 696-704.
- [13] Carolina U, Marisol V, Maria T, et al. Cytotoxic palladium complexes of bioreductive quinoxaline N-1, N-4-dioxide prodrugs [J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 2009, 17(4): 1623-1629.
- [14] Belen T M, Carolina U, Antonio M, et al. Design against of novel iron tuberculosis compounds as potential therapeutic agents [J]. Journal of Inorganic Biochemistry, 2010, 104(11): 1164-1170.
- [15] Wang Yanping, Zhu Junwu, Yang Xujie, et al. Preparation of NiO nanoparticles and their catalytic activity in the thermal decomposition of ammonium perchlorate [J]. Thermochim Acta, 2005, 437(1): 106-109.

Synthesis of an Energetic Pb(II) Complex of LLM-105 and Its Catalytic Effect on the Thermal Decomposition Behavior of AP

SHI Qunrong^①, LIU Zuliang^①, CHENG Jian^①, ZHAO Fengqi^②, XU Siyu^②, SHEN Panpan^①

^①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

^②Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] An energetic Pb(II) complex of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105) was synthesized, and its structure was characterized with FT-IR spectroscopy and elemental analysis. The chemical composition of Pb(II) complex of LLM-105 can be recognized as $\text{Pb}(\text{C}_4\text{H}_2\text{N}_6\text{O}_5)$. Impact sensitivity and friction sensitivity of Pb(II) complex of LLM-105 is 102 cm and 18%, respectively. The thermal decomposition process of the title complex and catalytic effect of Pb(II) complex of LLM-105 on the thermal decomposition of ammonium perchlorate (AP) was studied by means of the TG, DTG and DSC. The energetic complex presents one violent exothermic peak (240.7 °C) with 56.2% residues. Measurements show that the energetic complex could accelerate the thermal decomposition of AP for which the decomposition temperature is reduced by 63.8 °C. The energetic complex has a good catalytic effect on the thermal decomposition of AP.

[KEY WORDS] 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105); energetic complex; thermal decomposition behavior; ammonium perchlorate (AP); catalytic effect