

溶胶凝胶法改性密胺甲醛树脂微胶囊红磷

程晨¹, 杜仕国¹, 鲁彦玲¹, 刘献杰²

(1.陆军工程大学石家庄校区 三系, 石家庄 050000; 2.预备役 76 师, 山东 烟台 264000)

摘要: **目的** 采用溶胶凝胶法对密胺甲醛树脂微胶囊红磷 (MRP) 进行改性, 并探究最佳工艺条件, 以加强其使用性能。**方法** 以正硅酸乙酯 (TEOS) 为原料, 选取 TEOS 添加量为工艺条件, 采用溶胶凝胶法改性 MRP, 制备硅凝胶-密胺甲醛树脂双层包覆微胶囊红磷 (Si-MRP)。利用傅里叶红外光谱 (FT-IR)、扫描电子显微镜 (SEM) 及 X 射线光电子能谱 (XPS) 对 Si-MRP 形态及包覆效果进行表征, 并进行吸湿率测定、热稳定性分析及安定性测定。**结果** 采用溶胶凝胶法在 MRP 表面引入一层硅凝胶结构, 实现了红磷颗粒的硅凝胶-密胺甲醛树脂双层包覆。TEOS 添加量对样品形态及包覆率有一定影响, 随着 TEOS 添加量的增多, Si-MRP 形态从光滑层状结构向颗粒堆积结构过渡, 硅凝胶包覆率由 97.5% 降至 93.6%。硅凝胶结构提高了 MRP 的热稳定性, 降低了吸湿率, 增强了样品安定性。当 TEOS 与待改性 MRP 样品质量比为 1:2.5 时, 制备的 Si-MRP 样品的着火点相对于 MRP 提高 80 °C, 10 d 后吸湿率降至 3.7%, 摩擦感度降至 14%。**结论** 采用溶胶凝胶法可对 MRP 实现有效包覆, 经硅凝胶包覆后的样品使用性能得到进一步提高。

关键词: 微胶囊; 溶胶凝胶法; 硅凝胶; 密胺甲醛树脂; 红磷; 安定性

中图分类号: TQ325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0074-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.010

Melamine-formaldehyde Resin Microencapsulated Red Phosphorus Modified in Sol-Gel Method

CHENG Chen¹, DU Shi-guo¹, LU Yan-ling¹, LIU Xian-jie²

(1.Third Department, Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, China;

2.Reserve Division No.76, Yantai 264000, China)

ABSTRACT: The work aims to improve performance of melamine-formaldehyde resin microencapsulated red phosphorus (MRP), modify it in sol-gel method, and study the optimum technological conditions. With tetraethoxysilane (TEOS) as precursor and TEOS additive amount as process conditions, silica gel-MF resin double layered microencapsulated red phosphorus (Si-MRP) was prepared via sol-gel modification. Surface morphology and coating effect of Si-MRP were characterized by FT-IR, SEM and XPS. Meanwhile, moisture rate, thermal stability and sensitivity of the samples were also tested. A layer of silica gel structure was introduced on the surface of MRP in sol-gel method successfully to coat silica gel-MF resin double layered microencapsulated red phosphorus (Si-MRP). The morphology and coating ratio of Si-MRP was influenced by the TEOS additive amount. With the increase of TEOS, surface morphology of Si-MRP transformed from stratiform structure to particle accumulation structure, and the coating ratio decreased from 97.5% to 93.6%. The silica gel structure enhanced thermal and

收稿日期: 2018-04-18; 修订日期: 2018-06-20

Received: 2018-04-18; Revised: 2018-06-20

作者简介: 程晨 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为军事化学与烟火技术。

Biography: CHENG Chen (1994—), Male, Master, Research focus: military chemistry and pyrotechnics.

通讯作者: 杜仕国 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为军事化学与烟火技术。

Corresponding author: DU Shi-guo (1961—), Male, Doctor, Professor, Research focus: military chemistry and pyrotechnics.

mechanical stability of MRP, and decreased moisture rate. Provided with TEOS-MRP mass ratio of 1:2.5, ignition temperature of Si-MRP prepared increased by 80 °C compared with MRP, and the moisture rate and friction sensitivity decreased to 3.7% and 14%, respectively. MRP can be microencapsulated effectively in sol-gel method, and performance of the samples can be further improved after microencapsulation.

KEY WORDS: microcapsule; sol-gel; silica gel; melamine-formaldehyde resin; red phosphorus; stability

红磷在军事上常用作发烟剂, 燃烧生成的烟幕对可见光及特定波长的红外光都具有良好的屏蔽性能, 是一种廉价高效的防御手段^[1]。然而红磷在使用过程中存在较为突出的安全问题。红磷着火点低, 感度高, 容易发生自燃或粉尘爆炸事故; 红磷在空气中易吸湿歧化, 并释放剧毒 PH_3 气体, 对存储条件要求较高^[2,3]。为解决上述问题, 国内外学者对红磷进行微胶囊包覆表面处理。密胺甲醛树脂 (MF) 由于制备工艺简单、成本低廉, 被广泛用作囊壳材料^[4,5]。但 MF 耐腐蚀、耐热性较差, 且质地较脆, 因此需要进一步改性以满足实际应用的需要。马千等^[6]用二元醇改性密胺甲醛树脂微胶囊红磷 (MRP), 增加了囊壳结构中三嗪环的分子间距, 进而增强了囊壳韧性。Chang 等^[7]制备了 $\text{Al}(\text{OH})_3$ -MF 双层包覆红磷, 样品热稳定性得到提高。Long 等^[8]以虫胶为囊壳, 制备了多个 MRP 为囊芯的复合颗粒, 以此增强 MRP 的强度。此外, Al_2O_3 ^[9]及氧化石墨烯^[10]等纳米颗粒也常用作 MF 囊壳改性, 改性后的微胶囊导热性能得到明显提高。

本文采用溶胶凝胶法制备了硅凝胶-MF 树脂双层包覆微胶囊红磷, 在国内外文献中未见诸报道。硅凝胶是一种无毒的环境友好型无机材料, 相对于上述金属氢氧化物、金属氧化物及有机物改性囊壳, 其耐热、耐腐蚀性能更为优异。在制得 Si-MRP 的基础上, 进一步优化了工艺条件, 目的在于保证红磷正常使用性能的基础上, 尽可能提高其安定性及热稳定性, 以此作为实际应用的参考。

1 实验材料和方法

1.1 主要试剂

红磷, 纯度>99%, 石家庄市试剂厂。三聚氰胺、柠檬酸、十二烷基苯磺酸钠 (SDBS)、正硅酸乙酯、无水乙醇, 均为分析纯, 天津市博迪化工有限公司。37%甲醛溶液、乳化剂 OP-10、浓氨水, 均为工业纯, 天津恒兴试剂有限公司。

1.2 样品制备

采用原位聚合法制备 MRP^[11], 其过程为: 1) 取 4.2 g 三聚氰胺粉末与 9 mL 甲醛溶液于圆底烧瓶中, 调节 pH=8.5, 70 °C 反应 30 min, 制得透明 MF 预聚物。2) 将 10 g 红磷粉末加入预聚物中, 添加 0.25 g SDBS, 调节 pH=5.5, 75 °C 下搅拌反应 2 h。3) 样品

抽滤并用蒸馏水洗涤, 在 108 °C 条件下干燥 24 h, 得 MRP。

采用溶胶凝胶法改性 MRP, 其过程为: 1) 量取 10 mL 蒸馏水、20 mL 无水乙醇于烧杯中, 滴加浓氨水至 pH=9, 磁力搅拌 10 min。2) 取三份 MRP 样品 (每份 5 g) 加入醇水混合液中, 滴加 0.2 mL 乳化剂 OP-10, 于 45 °C 下水浴加热搅拌 15 min。3) 分别将 2、4、6 g TEOS 与 10 mL 无水乙醇混合, 以每秒 1~2 滴的速度持续滴加至 MRP 分散体系中, 45 °C 保温反应 4 h, 室温陈化 12 h, 80 °C 烘烤 24 h 得硅溶胶改性微胶囊样品, 标号 1[#]Si-MRP、2[#]Si-MRP、3[#]Si-MRP。

1.3 测试与表征

FT-IR: 制备样品溴化钾压片, 设置扫描波数范围 4000 cm^{-1} 至 400 cm^{-1} , 测定样品红外透射光谱。

SEM: 样品表面喷铂处理, 进行样品形貌分析。

XPS: 对样品表面元素进行分析。采用灵敏度因子法计算原子浓度, 并以此分析包覆效果。

吸湿性测试: 样品的吸湿性依据 GB/T16913—2008 进行测定, 绘制吸湿率曲线。

热稳定性测试: 升温速度设置为 15 °C/min, 温度范围 15~600 °C, 氮气氛围。随后分别取一定量样品于陶瓷坩埚中, 放置于马弗炉, 以 5 °C/min 升温速率测定样品着火点。

感度测试: 样品的撞击感度及摩擦感度依据 GJB 772A—1997 进行测试。

2 实验结果及分析

2.1 FT-IR 光谱分析

由图 1 可知, MRP 样品红外光谱图在 3413 cm^{-1} 存在仲胺特征峰, 1655 cm^{-1} 存在由 C=O 伸缩振动产生的特征峰, 此外 1556 cm^{-1} 及 812 cm^{-1} 处的特征峰由 MF 树脂中的三嗪环振动产生, 1398 cm^{-1} 处出现酰胺 C—N 伸缩振动特征峰^[12]。以上结果证明, 经原位聚合法包覆的红磷已存在 MF 树脂结构。

观察溶胶凝胶改性后的三组样品红外光谱图可知, 除 MF 树脂特征峰外, 三组 Si-MRP 样品在 3469 cm^{-1} 处出现较强特征峰, 且峰位出现漂移, 这是由于 Si—OH 反对称伸缩振动产生的特征峰与仲胺特征峰叠加造成。除此之外, 三组样品均在 1076 cm^{-1} 处出现 Si—O—Si 反对称吸收峰, 在 462 cm^{-1} 处出现

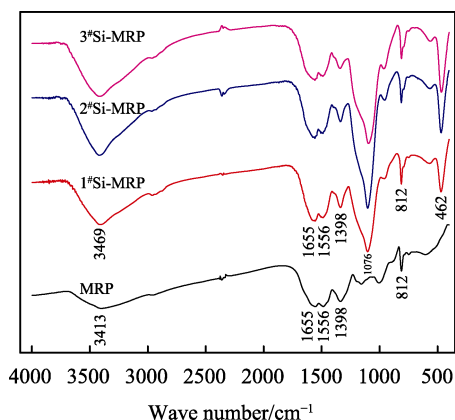


图1 MRP与Si-MRP红外光谱图
Fig.1 FT-IR spectrum of MRP and Si-MRP

Si—O 伸缩振动吸收峰^[13]。FT-IR 谱图证明, 经溶胶凝胶法改性的三组样品均引入了硅凝胶结构。

2.2 SEM 分析

由图 2 可知, MRP 样品表面粗糙, 而经过溶胶凝胶法改性后的 1[#]Si-MRP 表面较为光滑, 附着有少量二氧化硅纳米微球结构, 且在图 2b 标注位置可观察到明显的层状结构。随着 TEOS 添加量的增多, 2[#]Si-MRP 与 3[#]Si-MRP 样品表面变得粗糙, 呈颗粒堆积结构。

根据图 3, 对 Si-MRP 样品形态变化进行分析。在碱性条件下, 由于 OH⁻体积小、电负性大, 可直接对 TEOS 中心硅原子发动亲核进攻, 使得硅原子内电

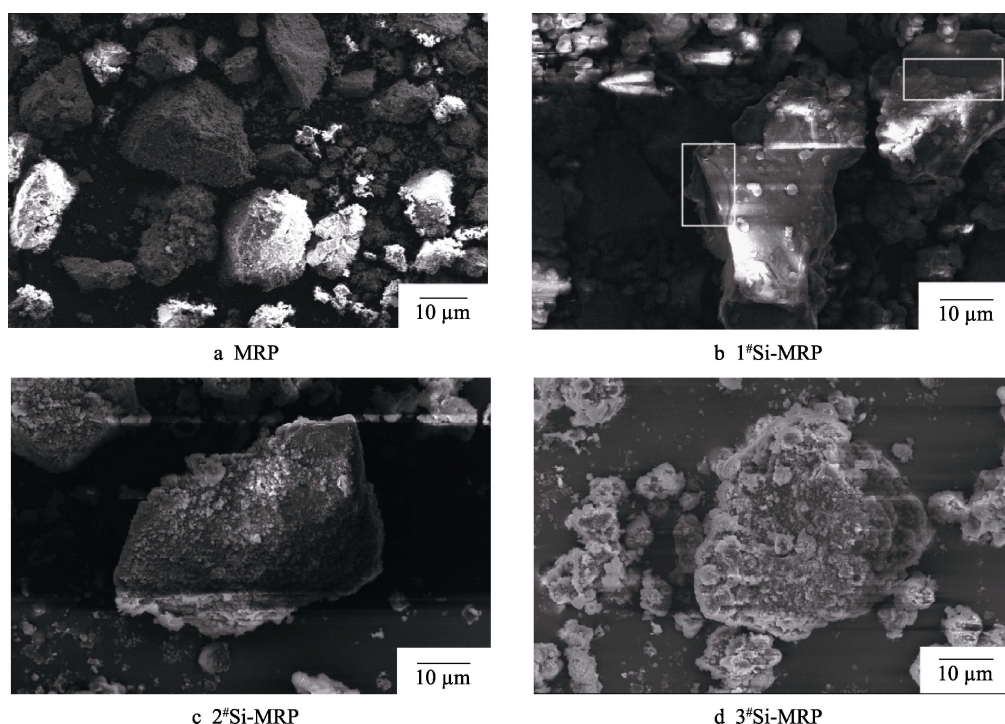


图2 MRP与Si-MRP样品SEM图像
Fig.2 SEM images of MRP and Si-MRP

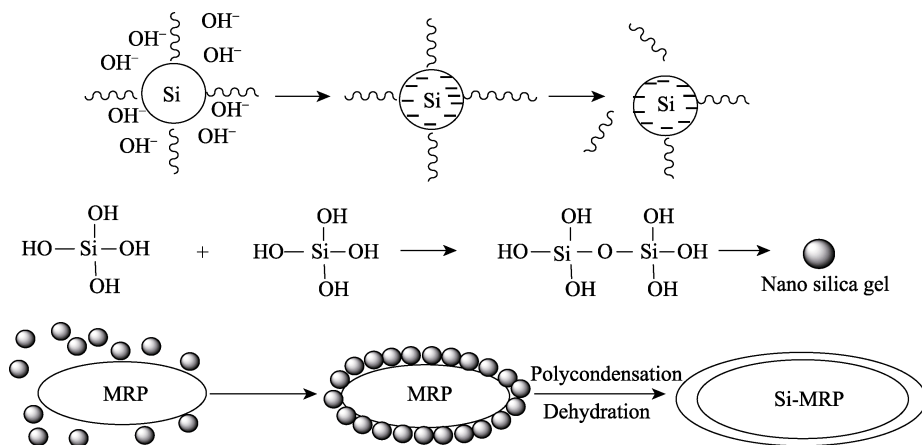


图3 溶胶凝胶法改性过程
Fig.3 Process of sol-gel modification

子云偏离，表面带负电，导致 Si—OR 键断裂，完成水解反应^[14]。在水含量充足的条件下，可认为 TEOS 完全水解，生成 Si(OH)₄。水解得到的可溶性产物发生脱水缩合反应，生成短链结构；该链状结构进一步交联聚合，生成纳米二氧化硅晶核^[15]。这种未生长完全的晶核易附着在粗糙的 MRP 表面，晶核之间进一步缩聚，最终形成光滑致密的二氧化硅囊壳结构。提高 TEOS 含量，水解产物浓度相应提高，因此大量二氧化硅晶核在未附着于 MRP 表面之前即生长完全，随后沉积在 MRP 表面，导致生成的 2[#]Si-MRP 和 3[#]Si-MRP 样品表面较为粗糙。

2.3 XPS 分析

在 MRP 全谱图中（图 4），O1s、N1s、C1s 特征峰是由 MF 树脂囊壳键能分裂产生，说明红磷表面已包覆有树脂结构。在三组 Si-MRP 样品全谱图中，属于 MF 树脂的 N1s 特征峰消失，新出现了 Si2s 及 Si2p 特征峰，说明 MRP 表面已出现硅凝胶结构。

进一步分析硅凝胶分子结构，结果见图 5。由图 5a 可知，MRP 样品在 532.8 eV 处出现 O1s 峰，该峰是由 MF 树脂囊壳 C—O—C 键能级分裂产生的。三组 Si-MRP 样品的 O1s 峰位较 MRP 均向高能级出现轻微偏移，这是由于硅凝胶结构的 Si—O 键能级分裂所造成的^[16]。对三组 Si-MRP 样品的 Si2p 峰进行分析，发现 Si2p 峰位均位于 103 eV，这是由于 Si—O 键能分裂产生。根据 O1s 及 Si2p 峰位图可判断样品的硅凝胶主要化学键组成为 Si—O—Si 键^[17]。

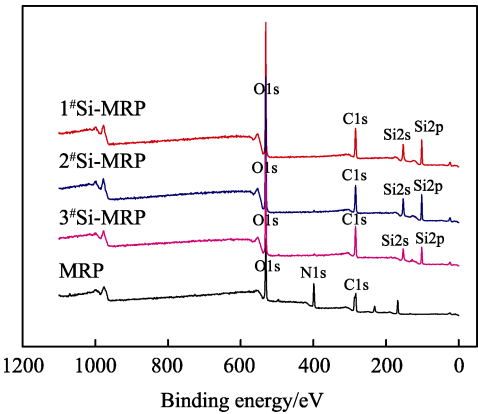


图 4 样品 XPS 全谱图
Fig.4 XPS of MRP and Si-MRP

采用灵敏度因子法计算各样品原子浓度，以此判断硅凝胶包覆效果。样品原子浓度见表 1。

N 元素是密胺甲醛树脂囊壳的特征元素，未处理红磷及硅凝胶结构理论上不存在 N 元素，因此可根据其原子浓度判断硅凝胶包覆效果。三组 Si-MRP 样品包覆效果如表 2。

随着溶胶凝胶法改性加入 TEOS 量的增加，包覆率呈下降趋势。这是由于在氨浓度较高的情况下，反应体系中加入的 TEOS 能迅速水解生成 Si(OH)₄ 等水解产物。水解产物浓度过高时，自身易交联聚合形成 SiO₂ 颗粒，不易附着在 MRP 表面形成囊壳，因而导致包覆率下降。

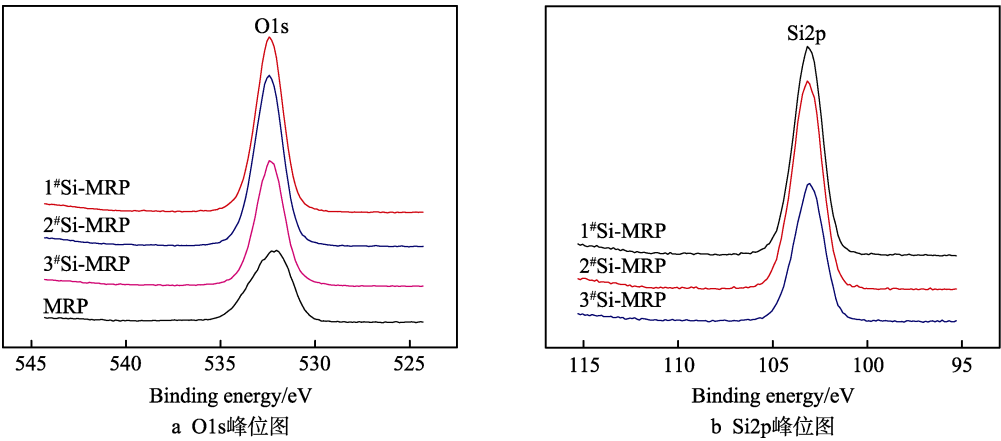


图 5 MRP 与 Si-MRP 峰位图
Fig.5 Peak position figures of MRP and Si-MRP

表 1 MRP 与 Si-MRP 样品原子浓度 Tab.1 Atomic concentration of MRP and Si-MRP				
Samples	Atomic concentration/%			
	C	N	O	Si
MRP	41.94	20.95	37.12	—
1 [#] Si-MRP	34.90	0.53	47.41	17.16
2 [#] Si-MRP	35.99	0.93	46.37	16.72
3 [#] Si-MRP	42.33	1.35	42.64	13.69

表 2 Si-MRP 样品包覆率 Tab.2 Coating ratio of Si-MRP			
Samples	1 [#] Si-MRP	2 [#] Si-MRP	3 [#] Si-MRP
Coating ratio/%	97.5	95.6	93.6

2.4 吸湿性分析

由图 6 可知，Si-MRP 的抗吸湿性能较 MRP 有明

显提高。这是由于双层包覆进一步降低了红磷与空气中水分的接触,且经过 OP-10 改性后的硅凝胶表面呈疏水性,达到抗吸湿目的。对比三组 Si-MRP 样品,发现 1[#]Si-MRP 10 d 后吸湿率为 3.7%,而 2[#]Si-MRP 及 3[#]Si-MRP 吸湿率为 5%左右。这是由于 1[#]Si-MRP 表面形态光滑,相对于 2[#]Si-MRP 及 3[#]Si-MRP,吸湿

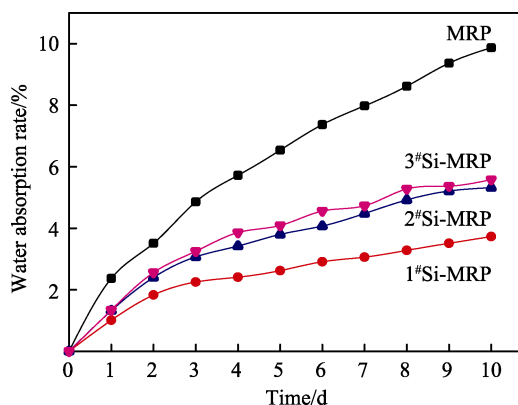


图6 样品吸湿率曲线图
Fig.6 Curve of moisture rate

面积更小,因此吸湿率较低。

2.5 热稳定性分析

由图7可知,MRP与Si-MRP样品的TG曲线大致可分为3个阶段。20℃~100℃是热失重的第一阶段,失重的主要原因是样品表面水分及硅凝胶结合水受热蒸发;350℃~400℃是样品失重的第二阶段,该温度范围内微胶囊壳受热分解,造成样品失重;450℃~550℃是样品失重的第三阶段,在该温度范围内,红磷受热升华并生成白磷。根据四组样品的DTG曲线可以得出,MRP样品第一个热失重峰约为0.8%/℃,而经过溶胶凝胶改性后的Si-MRP样品由于囊壳表面包覆有硅凝胶结构,对有机囊壳进行了良好的保护,Si-MRP热失重峰值相对于MRP样品明显降低。此外,Si-MRP样品第三阶段红磷升华热失重峰相对于MRP样品也有明显的削弱。据此可知,Si-MRP的热稳定性相对于MRP具有一定的提高。对比三组Si-MRP样品可得,1[#]Si-MRP燃烧后残碳量最少,红磷分解速率最快,燃烧性能受到的影响较小。

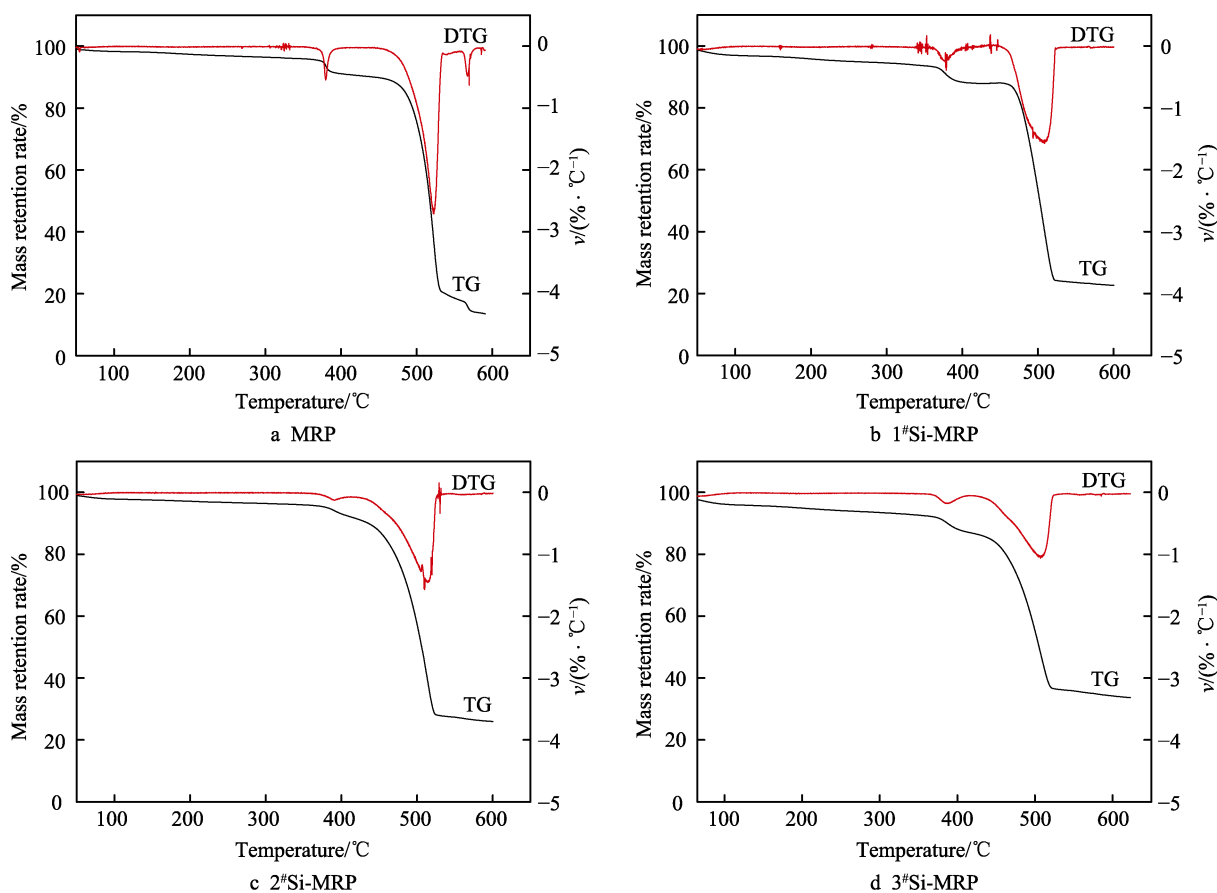


图7 样品TG与DTG图像
Fig.7 TG and DTG of samples

根据表3可知,硅凝胶提高了样品的着火点温度。这是由于硅凝胶结构中的 Si—O—Si 键化学键能为 452 kJ/mol,相对于 MF 树脂的 N—O 键(201 kJ/mol)、

C—O (358 kJ/mol)、C—C (346 kJ/mol) 热稳定性更强,在加热过程中囊壳结构不易被破坏,减少了 MF 树脂及红磷与空气接触的几率,表现为 Si-MRP 着火

点升高。此外，观察到 3[#]Si-MRP 样品着火点低于 1[#]Si-MRP 与 2[#]Si-MRP,这是由于硅凝胶包覆不完全，导致部分 MF 树脂囊壳裸露造成的。

表 3 MRP 与 Si-MRP 着火点
Tab.3 Ignition temperature of MRP and Si-MRP

Samples	MRP	1 [#] Si-MRP	2 [#] Si-MRP	3 [#] Si-MRP
Ignition temperature/℃	370	450	440	385

2.6 感度分析

MRP 与 Si-MRP 在撞击感度试验中均未发生燃烧现象。摩擦感度结果见表 4。经溶胶凝胶法改性后的 Si-MRP 样品摩擦感度降低。根据热点学说，样品在摩擦作用下产生的热量会聚集于某一点，一旦该点温度超过样品着火点，即造成整组样品的燃烧^[18]。经溶胶凝胶法改性的 Si-MRP，表面硅凝胶结构在机械冲击下不易被破坏，且该结构耐热性强，因而有效地降低了摩擦感度。此外，可以发现，3[#]Si-MRP 的摩擦感度高于 1[#]Si-MRP 和 2[#]Si-MRP，这是由于 3[#]Si-MRP 并没有对 MRP 实现有效的包覆，硅凝胶结构易被破坏，降感效果略差。

表 4 样品摩擦感度试验结果
Tab.4 Friction sensitivity test of samples

Samples	MRP	1 [#] Si-MRP	2 [#] Si-MRP	3 [#] Si-MRP
Friction sensitivity/%	36	14	12	22

3 结论

1) 以氨为催化剂，采用溶胶凝胶法可实现 MRP 的改性。硅凝胶结构可有效保护有机树脂囊壳，进而提高 MRP 热稳定性、安定性，降低吸湿率，有利于红磷的实际生产和应用。

2) 过高的 TEOS 添加量会导致水解产物自聚合成 SiO₂ 颗粒，影响样品形态，降低包覆率，进而影响 Si-MRP 产品的使用性能。在尽可能小地对红磷燃烧成烟性能造成影响的前提下，依据实验结果，军事上可选用 $m(\text{TEOS}):m(\text{MRP})=1:2.5$ 作为工艺条件来制备 Si-MRP，所得样品的热稳定性、安定性满足实际应用的需要。

参考文献：

[1] 郑付兴, 王玄玉, 宋黎, 等. 氧化剂对红磷烟幕抗 10.6 μm 激光性能的影响研究[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 155-157.
ZHENG Fu-xing, WANG Xuan-yu, SONG Li, et al. Ef-

fects of oxidants on RP smoke to anti-10.6μm laser[J]. Chinese journal of energetic materials, 2007, 15(2): 155-157.

[2] WANG H T, MENG X F, WEN B, et al. A simple route for the preparation of red phosphorus microcapsule with fine particle distribution[J]. Materials letters, 2008, 62: 3745-3747.

[3] 朱超, 李惠萍, 陈世军, 等. 白度化微胶囊红磷阻燃剂的研究与制备[J]. 现代化工, 2015, 342(4): 138-140.
ZHU Chao, LI Hui-ping, CHEN Shi-jun, et al. Preparation of whitening red phosphorus microcapsule flame retardant[J]. Modern chemical industry, 2015, 342(4): 138-140.

[4] LIU J, GUAN H. Preparation, characterisation and performance of microencapsulated red phosphorus[J]. Propellants, explosives, pyrotechnics, 2017, 42: 1-9.

[5] CAO Z J, DONG X, FU T, et al. Coated vs. naked red phosphorus: A comparative study on their fire retardancy and smoke suppression for rigid polyurethane foams[J]. Polymer degradation and stability, 2017, 136: 103-111.

[6] 马千, 刘增杰, 梁轶, 等. 二元醇改性密胺甲醛树脂包覆红磷[J]. 应用化学, 2015, 32(10): 1153-1158.
MA Qian, LIU Zeng-jie, LIANG Yi, et al. Encapsulated red phosphorus in dihydric alcohol modified melamine formaldehyde resin[J]. Chinese journal of applied chemistry, 2015, 32(10): 1153-1158.

[7] CHANG S K, ZENG C, YUAN W Z, et al. Preparation and characterization of double-layered microencapsulated red phosphorus and its flame retardance in poly(lactic acid)[J]. Journal of applied polymer science, 2012, 125: 3014-3022.

[8] LONG Y, SONG K, YORK D, et al. Composite microcapsules with enhanced mechanical stability and reduced active ingredient leakage[J]. Particuology, 2016, 26: 40-46.

[9] JIANG X, LUO R L, PENG F F, et al. Synthesis, characterization and thermal properties of paraffin microcapsules modified with nano-Al₂O₃[J]. Applied energy, 2015, 137: 731-737.

[10] CHEN Z H, WANG J C, YU F, et al. Preparation and properties of graphene oxide-modified poly (melamine-formaldehyde) microcapsules containing phase change material n-dodecanol for thermal energy storage[J]. Journal of materials chemistry A, 2015, 3: 11624-11630.

[11] WU Q, LV J P, QU B J. Preparation and characterization of microcapsulated red phosphorus and its flame-retardant mechanism in halogen-free flame retardant polyolefins[J]. Polymer international, 2003, 52: 1326-1331.

[12] CHAI Y Q, ZHAO T B, GAO X, et al. Low cracking ratio of paraffin microcapsules shelled by hydroxyl terminated polydimethylsiloxane modified melamine-formaldehyde resin[J]. Colloids and surfaces: Aphysicochemical and engineering aspects, 2018, 538: 86-93.

[13] 倪健雄. 核-壳型聚磷酸铵阻燃剂的制备及其阻燃聚氨酯性能和机理的研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2009.

- NI Jian-xiong. Preparation of core-shell ammonium polyphosphate flame retardant and mechanism of polyurethane[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [14] 赵丽, 余家国, 程蓓, 等. 单分散二氧化硅球形颗粒的制备与形成机理[J]. 化学学报, 2003, 61(4): 562-566.
- ZHAO Li, YU Jia-guo, CHENG Bei, et al. Preparation and formation mechanisms of monodispersed silicon dioxide spherical particles[J]. Acta chimica sinica, 2003, 61(4): 562-566.
- [15] 朱远平, 汤国荣, 张渝宁, 等. 酸碱对正硅酸乙酯水解液凝胶速度的影响[J]. 武汉大学学报(医学版), 2010, 31(6): 782-787.
- ZHU Yuan-ping, TANG Guo-rong, ZHANG Yu-ning, et al. Impact of acid and base on the gelling process of tetraethoxysilane hydrolysate[J]. Medical journal of Wuhan University, 2010, 31(6): 782-787.
- [16] NI J X, CHEN L J, ZHAO K M, et al. Preparation of gel-silica ammonium polyphosphate core-shell flame retardant and properties of polyurethane composites[J]. Polymers for advanced technologies, 2009, 22: 1824-1831.
- [17] 纪少思, 周万立, 刘鹏清, 等. 硅凝胶包覆三聚氰胺焦磷酸盐阻燃改性聚乙烯醇薄膜[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(3): 693-699.
- JI Shao-si, ZHOU Wan-li, LIU Peng-qing, et al. Micro-encapsulation of melamine pyrophosphate with silicon dioxide for flame retardant modification of polyvinyl alcohol[J]. Journal of chemical engineering of chinese universities, 2016, 30(3): 693-699.
- [18] 鲁涛, 赵雁, 欧阳的华. 含能材料表面分形维数计算及其对摩擦感度影响[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(2): 226-230.
- LU Tao, ZHAO Yan, OUYANG Di-hua. Estimation of surface fractal dimension of energetic materials and influence on friction sensitivity[J]. Computers and applied chemistry, 2014, 31(2): 226-230.