

# 壳聚糖包覆微胶囊红磷的制备及性能表征

程晨<sup>1</sup>, 鲁彦玲<sup>1</sup>, 杨金鹏<sup>2</sup>, 杜仕国<sup>1</sup>

(1.陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003; 2.75833 部队, 广州 510000)

**摘要:** **目的** 降低红磷 (RP) 烟火剂的吸湿率及感度, 以此提高其使用过程中的安全性能。**方法** 以生物基材料壳聚糖 (CS) 为囊壳结构, 采用高效简便的工艺, 制备壳聚糖包覆微胶囊红磷 (CSRP), 对 CSRP 进行红外光谱测试 (FTIR)、X 射线电子能谱分析 (XPS)、扫描电子显微镜 (SEM) 测试及热重 (TG) 测试, 并对 RP 及 CSRP 进行吸湿率和感度测试表征实验。**结果** 处理后的红磷 (RP) 表面已包覆一层完整的 CS 囊壳结构, 形貌结构及表面元素含量发生明显改变。RP 及 CSRP 的吸湿性及感度测试结果表明, 相对于未包覆 RP, CSRP 样品的吸湿率从测试前的 15.1% 下降至 10 d 后的 5.13%, 摩擦感度从 81% 下降至 58%, 显示出良好的存储性能, 对后续用于烟火剂装药有利。**结论** CS 囊壳结构能够有效实现对红磷的表面改性, 改性后的红磷具有优良的使用性能。相对于传统囊壳结构, CS 更加绿色环保, 具有较高的实际应用价值。

**关键词:** 红磷; 壳聚糖; 摩擦感度; 吸湿性; 烟火剂; 微胶囊

中图分类号: TJ450; TG174.45

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)02-0072-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.012

## Preparation and Characterization of Chitosan Coated Microencapsulated Red Phosphorus

CHENG Chen<sup>1</sup>, LU Yan-ling<sup>1</sup>, YANG Jin-peng<sup>2</sup>, DU Shi-guo<sup>1</sup>

(1. Army Engineering University (Shijiazhuang Campus), Shijiazhuang 050003, China;

2. 75833 Troops, Guangzhou 510000, China)

**ABSTRACT:** In order to reduce the moisture absorption and sensitivity of red phosphorus (RP) pyrotechnic agent, so as to improve its safety performance in use, chitosan coated microencapsulated red phosphorus (CSRP) was prepared by an efficient and simple process with biological material chitosan (CS) as the shell structure. The CSRP was tested by infrared spectroscopy (FTIR), X-ray electron spectroscopy (XPS), scanning electron microscopy (SEM) and thermogravimetry (TG). The moisture absorption and sensitivity of RP and CSRP were also tested and characterized. The results show that the treated red phosphorus (RP) surface has been coated with a complete CS capsule structure, and the morphology, structure and surface element content have changed significantly. The moisture absorption test and sensitivity test of RP and CSRP were carried out. The experimental results show that compared with uncoated RP, the 10-day moisture absorption of CSRP samples decreased from 15.1% to 5.13%, and the friction sensitivity decreased from 81% to 58%, showing good storage performance, which is helpful for subsequent use

收稿日期: 2022-01-11; 修订日期: 2022-01-26

Received: 2022-01-11; Revised: 2022-01-26

作者简介: 程晨 (1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向防护材料与特种能源技术。

**Biography:** CHENG Chen (1994—), Male, Doctoral candidate, Research focus: protective materials and special energy technologies.

通讯作者: 杜仕国 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为防护材料与特种能源技术。

**Corresponding author:** DU Shi-guo (1961—), Male, Doctor, Professor, Research focus: protective materials and special energy technologies.

引文格式: 程晨, 鲁彦玲, 杨金鹏, 等. 壳聚糖包覆微胶囊红磷的制备及性能表征[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 072-077.

CHENG Chen, LU Yan-ling, YANG Jin-peng, et al. Preparation and Characterization of Chitosan Coated Microencapsulated Red Phosphorus [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 072-077.

in pyrotechnic charge. CS capsule structure can effectively realize the surface modification of red phosphorus, and the modified red phosphorus has excellent performance. Compared with the traditional capsule structure, CS is more environmentally friendly and green, and has high practical application value.

**KEY WORDS:** red phosphorus; chitosan; friction sensitivity; moisture absorption; pyrotechnic agent; microcapsule

随着装备科技的快速发展,现代战场上精确制导武器被广泛使用<sup>[1-3]</sup>。为了有效提升军事设施和保障人员安全,降低精确制导武器的威胁,发展红外屏蔽烟幕成为各国军事装备研究的重点项目之一<sup>[4-6]</sup>。根据干扰机理,红外屏蔽烟幕主要可以分为以下两类:辐射遮蔽型烟幕,依靠烟幕材料快速燃烧产生的高热气溶胶颗粒,对制导武器进行干扰;衰减屏蔽型烟幕,此类烟幕材料在空气中形成大量的高密度气溶胶结构,使得制导武器的红外制导辐射发生散射、反射或吸收等现象,降低其精度<sup>[7]</sup>。目前,烟幕干扰体系被认为是高效、廉价的防御手段<sup>[8-9]</sup>。

红磷(RP)是目前最常用的烟幕弹装药之一<sup>[10]</sup>。在使用过程中,RP能够在空气中快速燃烧,产生大量热量及高温 $P_2O_5$ 颗粒,能够主动释放红外信号,从而对制导武器造成干扰<sup>[11]</sup>。与此同时, $P_2O_5$ 极易吸湿,在空气中可形成高密度溶胶结构,进而吸收制导武器的红外光,同样达到干扰的目的。因此,RP同时具备两种屏蔽机理,在现代战场上发挥着重要作用<sup>[12-13]</sup>。

然而,RP在实际使用中仍存在着较多缺陷。RP自身无毒,但是在长期储存过程中极易吸湿变性,导致燃烧性能下降。在此过程中,RP会产生剧毒的 $PH_3$ 气体,对人员和环境造成一定的危害<sup>[14-15]</sup>。相对于白磷,RP的化学性质较为稳定,但是着火点很低,仅为 $240\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,并且具有较高的摩擦感度,在存储和运输过程中极易发生自燃,存在较大的安全隐患。为了提高RP的安全性能,需要对其进行表面改性,使之更符合战场条件的需要。

目前,微胶囊技术常用于RP的表面处理。由于表面包覆了致密的囊壳结构,微胶囊红磷(MRP)的吸湿性显著下降,进而降低了 $PH_3$ 气体的释放量<sup>[16]</sup>。同时,囊壳结构使得RP的整体外形更为圆润,摩擦产生的热量不易聚集于一点,从而降低了RP的摩擦感度。目前,密胺甲醛树脂<sup>[17]</sup>、脲醛树脂<sup>[18]</sup>、酚醛树脂<sup>[19]</sup>等已应用于MRP的制备,所得样品的安全性能和实用性能大大提升。然而,在上述传统囊壳材料的制备过程中,必须添加甲醛。甲醛是一种强致癌物,长期接触对人体健康的危害极大。因此,需要进一步改善工艺,制备环保、高效的微胶囊型红磷烟火剂。

壳聚糖(CS)是一种储量丰富的生物高分子聚合物,可由虾、蟹等海洋节肢动物的甲壳、昆虫甲壳、菌类和藻类的细胞膜等加工而成<sup>[20-21]</sup>。壳聚糖无毒、

无臭,具有良好的成膜性能,有望取代传统的微胶囊红磷囊壳结构<sup>[22-23]</sup>。本文采用微胶囊技术,制备了CS包覆微胶囊红磷(CSRP)。对样品的形貌和化学组成进行了表征,同时进行了感度测试。旨在为绿色、高效的微胶囊红磷烟火剂的制备提供参考。

## 1 实验及方法

### 1.1 材料

实验所用材料主要有:红磷(RP,纯度 $>99.8\%$ ,天津永大化学试剂有限公司);壳聚糖(CS,黏度为 $50\sim 800\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,脱乙酰度 $>85\%$ ,山东鲁海蓝生生物科技有限公司);氢氧化钠(AR,天津永大化学试剂有限公司);冰醋酸(AR,上海阿拉丁生化科技有限公司);十二烷基苯磺酸钠(SDBS,山东优索化工科技有限公司)。

### 1.2 CSRP的制备

室温条件下,将 $0.5\text{ g}$ 的CS溶于 $1\%$ (质量分数)的醋酸溶液中。在持续搅拌条件下,加入 $2\text{ g}$  RP和少量SDBS。 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 保温反应 $30\text{ min}$ 后,加入氢氧化钠,调节反应体系为碱性,此时CS析出,并附着在RP表面。继续搅拌 $1\text{ h}$ ,由于CS良好的成膜性能,最终可形成囊壳结构,干燥后得到CSRP样品。

### 1.3 测试与表征

采用TENSOR II红外光谱仪(德国布鲁克公司)对RP及CSRP进行红外光谱分析。测试采用压片法,以KBr为基底材料,红外测定波长为 $500\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率设置为 $4\text{ cm}^{-1}$ 。使用JSM-7800 F电子显微镜(日本电子株式会社)观察样品表面形貌。由于RP及CSRP自身不导电,样品表面需经喷金处理后再进行测试。

根据GB/T 16913—2008进行吸湿性测试。RP及CSRP样品通过 $80$ 目标标准筛除杂后,在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥 $4\text{ h}$ ,放在干燥器内自然冷却,准备测定。准备 $6$ 个带盖的称量杯并编号,烘干后在干燥器内冷却,然后称量、记录。每个称量杯中铺撒一层厚约 $1\text{ mm}$ 的干燥样品,在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥至恒重,闭盖放置在干燥器内,冷却后称量,记录称量杯和干燥粉尘的质量。在干燥器底部盛有 $20\%$ (质量分数)的硫酸溶液,内部的相对湿度保持为 $90\%$ 。在干燥器内放置盛有干燥样

品的称量杯,打开称量杯盖,记录日期时间。样品吸湿率按照式(1)计算。

$$W_i = \frac{m_i - m_s}{m_s - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $W_i$  为粉尘在某温湿度范围空气中  $i$  小时后的吸湿率;  $m_i$  是在报时器中放置  $i$  小时后称量杯和粉尘的质量, g;  $m_s$  是称量杯和干燥粉尘的质量, g;  $m_0$  是洁净干燥的空称量杯的质量, g。对 RP 和 CSR P 的 6 组样品进行吸湿率测定,取平均值记录。

使用 SDT Q600 热重分析仪(美国 TA 电子)对样品进行热重分析。测试在氮气条件下进行。升温范围设置为 100~800 °C,升温速率为 15 °C/min。

依照 GJB 772A—97 对样品进行撞击感和摩擦感度测试。撞击感度测试中,落锤的质量为 2000 g,落高设置为(250±1) mm,药量为 30 mg,每组测试 25 发,平行测定 2 组,取平均值。摩擦感度测试中,摆锤的质量为 1500 g,摆臂旋转中心至摆锤轴心的距离为 760 mm,摆角设置为 90°±1°,表压为(3.92±0.07) MPa,药量为 30 mg,每组 25 发,平行测定 2 组,取平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 FTIR 光谱分析

RP 与 CSR P 的红外光谱如图 1 所示。由于 RP 表面存在部分结合水,RP 在 3430、1637  $\text{cm}^{-1}$  处出现了水的特征吸收峰。同时,由于 RP 在空气中缓慢氧化,表面生成了磷酸等物质,其中的 P=O 的伸缩振动在 1184  $\text{cm}^{-1}$  处产生了特征吸收峰<sup>[24]</sup>。对 CSR P 而言,在其红外光谱图中,除了存在上述 RP 特征吸收峰外,在 2390、1391、1040  $\text{cm}^{-1}$  处出现了新的红外特征吸收峰,这是由于 CS 中的 C—H、C—N 及 C—O 振动产生的<sup>[25]</sup>。通过 FTIR 谱图可以证明,处理后的红磷表面已存在 CS。

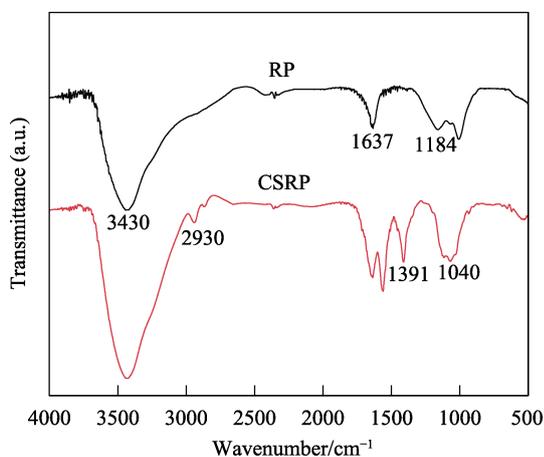


图 1 RP 及 CSR P 的红外光谱  
Fig.1 FTIR spectra of RP and CSR P

### 2.2 XPS 谱图分析

RP 及 CSR P 的 XPS 全谱如图 2 所示,RP 及 CSR P 表面的元素含量见表 1。从图 2 及表 1 可以看到,RP 及 CSR P 表面主要存在有 C、N、O、P 元素,但其含量有较为显著的差异。相对于 RP,经表面处理的 CSR P 的 P2p 及 P2s 峰强显著降低,与之对应的是表面 P 含量较低;相反,由于 CS 囊壳中含有大量的碳链,而 RP 表面的 C 元素主要是由于空气杂质引入,因此 CSR P 表面的 C 元素含量较 RP 有着显著提升。RP 表面元素含量的变化进一步证明了 CSR P 的囊壳结构已经形成。

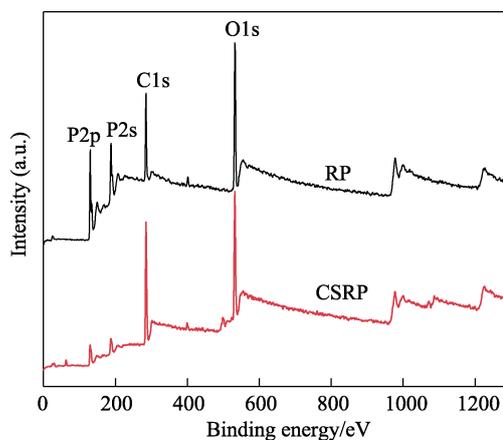


图 2 RP 及 CSR P 的 XPS 谱图  
Fig.2 XPS spectra of RP and CSR P

表 1 RP 和 CSR P 表面元素含量

样品	元素含量(原子数分数)/%				包覆率/%
	C	O	N	P	
RP	38.14	27.8	3.7	30.35	—
CSR P	64.88	23.55	1.98	9.59	68.4

由于 P 元素是红磷的特征元素,因此可以通过式(2)大致计算 CSR P 的包覆率。

$$M = \left(1 - \frac{P_{\text{CSR P}}}{P_{\text{RP}}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $M$  为包覆率;  $P_{\text{CSR P}}$ 、 $P_{\text{RP}}$  分别为 CSR P、RP 表面的磷元素含量。经计算,CSR P 的包覆率约为 68.4%,包覆较为完整。

### 2.3 SEM 表征

RP 及 CSR P 的 SEM 形貌如图 3 所示。从图 3a 可以看到,未处理的红磷表面较为光滑,且棱角较为分明。由于在空气中储存吸湿,RP 的团聚现象较为严重。由图 3b 观察得,经处理后的 CSR P 表面变得较为粗糙,分散性良好,但 RP 的整体形貌未发生明显改变,说明 CS 囊壳结构较薄。SEM 图像进一步证明了 CSR P 已被成功包覆。

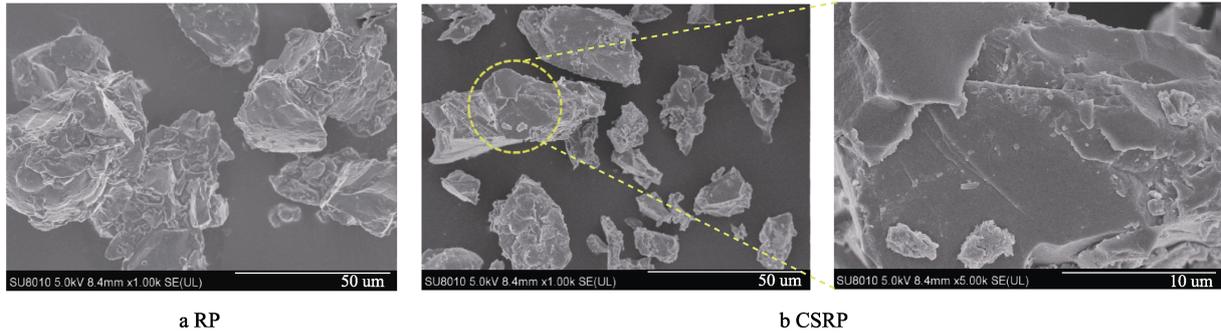


图 3 RP、CSRP 的 SEM 照片  
Fig.3 SEM micrographs of RP and CSRP

## 2.4 TG 测试

RP 及 CSRP 的热重曲线如图 4 所示。从图 4a 中可以看出, RP 的  $t_{\text{onset}}$  (样品质量损失 5%时所对应的温度) 较高, 为 409.2 °C, 且仅在 400~515 °C 处存在一个明显的质量损失平台, 这主要是由于高温下 RP 的升华造成的。CSRP 的热失重行为较 RP 发生明显变化。从图 4b 可以看出, 在 200~300 °C 内, CSRP 出现了一

个热失重平台, 这主要是由于 CS 受热分解造成的, 这一现象同时造成了 CSRP 的  $t_{\text{onset}}$  较 RP 明显降低。随着温度升高, CSRP 中的红磷也出现了升华现象, CSRP 的最大热失重速率要明显低于 RP。这主要是由于在高温条件下, RP 能与 CS 囊壳发生反应, 生成热稳定的碳材料<sup>[26]</sup>。这一反应一方面阻碍了红磷的升华速率, 与此同时, CSRP 的残碳量较 RP 有一定的提升。TG 测试说明了 CSRP 的热稳定性较 RP 有了一定提升。

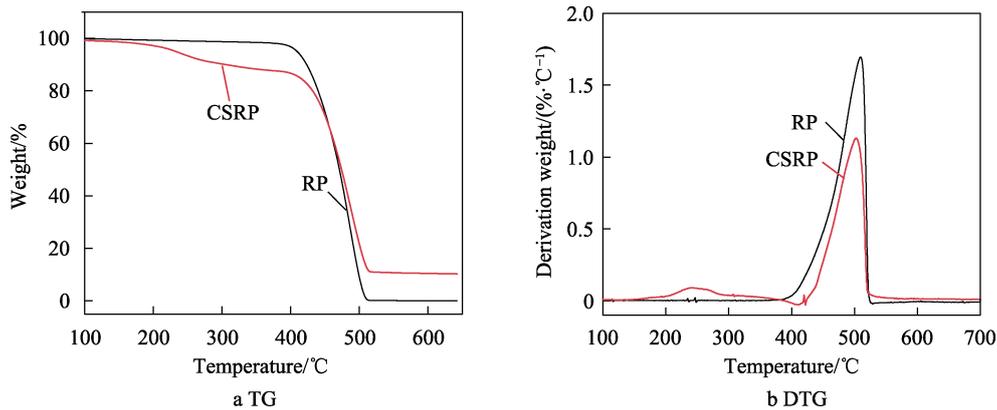


图 4 RP 和 CSRP 样品的 TG 与 DTG 曲线  
Fig.4 TG and DTG curves of RP and CSRP

## 2.5 吸湿性测试

RP 与 CSRP 的吸湿率曲线如图 5 所示。随着时间的延长, RP 的吸湿率呈现不断上升的趋势, 在 10 d 后达到了 15.1%, 并且 RP 表面已完全润湿, 团聚现象较为严重。这主要是由于 RP 在空气中缓慢氧化, 并在表面生成了  $P_2O_5$ ,  $P_2O_5$  具有较强的吸湿性能, 吸收空气中的水, 形成了磷酸等物质。磷酸具有较强的黏性, 最终导致了 RP 的严重团聚。在此过程中, 剧毒  $PH_3$  随之形成, 对人员身体健康造成了一定的安全隐患。吸湿后的 RP, 烟火性能急剧下降, 不利于后续的装药使用。CSRP 的吸湿性较 RP 明显下降。这是由于在红磷表面形成了一层致密的 CS 囊壳结构, 阻碍了 RP 囊核与  $O_2$  和水的接触。在潮湿环境中存储的 CSRP, 其性能受环境的影响较小, 仍具有良好的分散性, 说明 CS 囊壳结构提高了 RP 的存储性能。

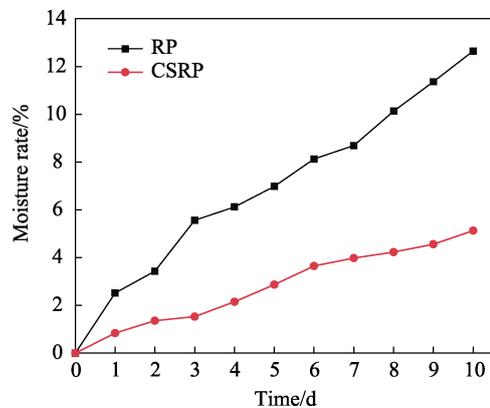


图 5 RP 与 CSRP 的吸湿率曲线  
Fig.5 Moisture rate curves of RP and CSRP

## 2.6 感度测试

RP 与 CSRP 的摩擦感度分别为 81%、58%。在

撞击感度测试中均未发生燃烧或爆炸,表明这两种样品都具有较低的撞击感度。摩擦感度的测试结果显示,CSRP 的感度较 RP 明显下降。RP 的摩擦感度较高,主要是由于在摩擦条件下热量极易聚集在红磷颗粒的某点,造成热聚集效应,而红磷自身着火点较低,且极易燃烧,因此摩擦产生的热量导致红磷整体快速燃烧,显示为红磷具有较高的摩擦感度。经 CS 囊壳包覆后,摩擦产生的热量首先作用于囊壳结构,导致部分热量散失,不易引起 RP 的燃烧。与此同时,CS 囊壳将红磷与 O<sub>2</sub> 隔绝,进一步降低了 RP 的摩擦感度。感度测试结果表明,CSRP 在使用过程中的安全性能较红磷有显著提升。

### 3 结论

利用 CS 的高成膜性能,通过改变反应体系的 pH 值,制备得到 CS 包覆微胶囊红磷。整个制备过程简单高效,且相对于传统囊壳材料,CS 囊材更为绿色环保。

FTIR、XPS 及 SEM 结果表明,CSRP 表面已包覆有一层完整的囊壳结构,有效提升了 RP 的热稳定性。由于囊壳结构有效地将 RP 与空气隔绝,RP 的吸湿性显著下降。CS 囊壳结构相对于 RP 不易燃,因此摩擦产生的热量不易产生热聚集效应,使得 CSRP 的摩擦感度下降,有效提高了 RP 使用过程中的安全性能。

在后续工作中,需要对 CSRP 的发烟性能及烟幕遮蔽效率进行进一步测试,以此确定其作为烟火剂装药的可行性。此外,需要对 CSRP 的粒度分布进行测试,以确定其对燃烧速率的影响。

#### 参考文献:

- [1] 李根, 吕卫民, 刘陵顺, 等. 精确制导武器惯导系统动态对准技术发展综述[J]. 兵工自动化, 2021, 40(12): 16-19.  
LI Gen, LYU Wei-min, LIU Ling-shun, et al. Review on Development of Dynamic Alignment Technology for INS of Precision Guided Weapons[J]. Ordnance Industry Automation, 2021, 40(12): 16-19.
- [2] 李朝龙, 林德群, 赵寒. 构建反制激光红外制导武器的陆域防御体系思考[J]. 激光与红外, 2021, 51(10): 1279-1285.  
LI Chao-long, LIN De-qun, ZHAO Han. Land Defense System Based on Anti Laser Infrared Guided Weapon[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(10): 1279-1285.
- [3] 尚震, 马晓华. 微波光子技术在制导领域中的应用研究[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(1): 111-116.  
SHANG Zhen, MA Xiao-hua. Application of Microwave Photon Technology in Guidance Field[J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(1): 111-116.
- [4] 丁楠, 张其土, 王庭慰. 红外烟幕干扰材料的制备与性能研究[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 452-453.  
DING Nan, ZHANG Qi-tu, WANG Ting-wei. Preparation and Properties of IR Aerosol Material[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 452-453.
- [5] 邓传加, 鲍珊. 某型对陆攻击红外成像制导武器抗烟幕干扰试验研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(12): 16-19.  
DENG Chuan-jia, BAO Shan. Testing Research on Anti-Smoke Jamming of Certain Type Infrared Imaging Aim-to-Land Guidance Missile[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(12): 16-19.
- [6] 智存, 吕明山, 王龙涛. 基于多源信息的舷外有源+烟幕协同干扰研究[J]. 现代防御技术, 2021, 49(6): 90-95.  
ZHI Cun, LYU Ming-shan, WANG Long-tao. Research on Outboard Active+Smoke Cooperation Jamming Based on Multi-Information[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(6): 90-95.
- [7] 孙世安, 费逸伟, 王协旗, 等. 红外烟幕材料及其发展趋势[J]. 红外技术, 2005, 27(2): 164-166.  
SUN Shi-an, FEI Yi-wei, WANG Xie-qi, et al. IR Smoke Screen Material and Its Developing Trends[J]. Infrared Technology, 2005, 27(2): 164-166.
- [8] 李楠. 烟幕干扰对红外成像导引头命中概率影响[J]. 激光与红外, 2021, 51(3): 358-362.  
LI Nan. Impact of Smoke Jamming on the Probability of Seeker Hit by Infrared Imaging[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(3): 358-362.
- [9] 江飞, 谢强, 刘威, 等. 一种燃烧型干扰剂的设计及其多频谱消光性能研究[J]. 爆破器材, 2021, 50(2): 29-33.  
JIANG Fei, XIE Qiang, LIU Wei, et al. Design of a Combustion Type Interference Agent and Its Multi-Spectrum Extinction Performance[J]. Explosive Materials, 2021, 50(2): 29-33.
- [10] 白林, 李宁, 郭永利. 铜粉烟幕的消光特性及其红外遮蔽效果对比试验[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(5): 161-163.  
BAI Lin, LI Ning, GUO Yong-li. Extinction Characteristic of the Copper Powder Smoke Screen and the Comparative Trial of the Infrared[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(5): 161-163.
- [11] 王玄玉, 潘功配. 红磷烟幕使用特性及其对红外激光的最佳消光直径[J]. 兵工学报, 2007, 28(9): 1138-1143.  
WANG Xuan-yu, PAN Gong-pei. Red Phosphorus Smoke Usage Characteristic and Optimal Extinction Diameter to Emissions of Infrared Laser[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(9): 1138-1143.
- [12] 王玄玉, 潘功配. 红磷烟幕对 10.6 μm 激光的消光系数测试研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6): 636-640.  
WANG Xuan-yu, PAN Gong-pei. Study and Test of Extinction Coefficient of Red Phosphorus Smoke to 10.6 μm Laser Emission[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(6): 636-640.
- [13] 王玄玉, 潘功配. 红磷与纳米氧化铝组合烟幕对 10.6

- $\mu\text{m}$  激光的消光系数研究[J]. 含能材料, 2007, 15(6): 612-615.
- WANG Xuan-yu, PAN Gong-pei. Extinction Coefficient of Red Phosphorus Smoke Combined with Nanometer Alumina to 10.6  $\mu\text{m}$  Laser Emission[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(6): 612-615.
- [14] 魏占锋, 郭玉花, 原泽坤, 等. 微胶囊红磷阻燃木塑复合材料的性能研究[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 133-137.
- WEI Zhan-feng, GUO Yu-hua, YUAN Ze-kun, et al. Properties of Microencapsulated Red Phosphorus Flame Retardant Wood-Plastic Composites[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 133-137.
- [15] 张德虎, 谭良源, 邓佳明, 等. 三聚氰胺甲醛树脂包覆红磷的制备及其稳定性研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(3): 143-147.
- ZHANG De-hu, TAN Liang-yuan, DENG Jia-ming, et al. Preparation and Stability of Encapsulated Red Phosphorus with Melamine Formaldehyde Resin[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(3): 143-147.
- [16] 钟柔潮, 林修端, 黄少淮, 等. 哌嗪改性木质素/磷酸铝双重包覆红磷的制备与阻燃性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(12): 143-148.
- ZHONG Rou-chao, LIN Xiu-duan, HUANG Shao-huai, et al. Preparation and Flame Retardancy of Piperazine Modified Lignin/Aluminum Phosphate Double-Coated Red Phosphorus[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(12): 143-148.
- [17] 付晓婷, 李谦, 李先红, 等. 三聚氰胺甲醛树脂包覆不同目数红磷的稳定化研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(3): 122-125.
- FU Xiao-ting, LI Qian, LI Xian-hong, et al. Study on the Stability of Melamine-Formaldehyde Resin Encapsulated Red Phosphorus with Different Mesh Number[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(3): 122-125.
- [18] 吴志平, 舒万良, 胡云楚, 等. 脲醛树脂微胶囊包覆红磷阻燃剂制备工艺的研究 I 预聚物合成工艺研究[J]. 应用化工, 2005, 34(6): 340-343.
- WU Zhi-ping, SHU Wan-gen, HU Yun-chu, et al. Study on Preparation Technology of Flame Retardant of Red Phosphorus Coated by Urea-Formaldehyde Resin I Synthetic Condition of Preformed Polymer[J]. Shaanxi Chemical Industry, 2005, 34(6): 340-343.
- [19] 李谦, 郭岳, 李旭清. 微胶囊红磷的制备与性能研究[J]. 四川化工, 2018, 21(1): 5-7.
- LI Qian, GUO Yue, LI Xu-qing. Preparation and Properties of Microencapsulated Red Phosphorus[J]. Sichuan Chemical Industry, 2018, 21(1): 5-7.
- [20] 张天奇, 陈彦廷, 崔延如, 等. 壳聚糖/马铃薯蛋白/山茶籽油微胶囊的研制[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(2): 53-57.
- ZHANG Tian-qi, CHEN Yan-ting, CUI Yan-ru, et al. Development of Chitosan-Potato Protein-Camellia Oil Microcapsules[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 36(2): 53-57.
- [21] 王根女, 徐春明, 周城, 等. 壳聚糖改性对蒙脱石吸附茶饮料中咖啡碱的影响[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-7[2022-01-13]. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029752.
- WANG Gen-nv, XU Chun-ming, ZHOU Cheng, et al. Chitosan Modified Montmorillonite and Adsorption Effect on Caffeine from Tea Beverage [J]. Food and Fermentation Industries, 1-7[2022-01-13]. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ ts.029752.
- [22] 何荣, 张玄, 李荣全, 等. 柠檬香精微胶囊的制备及其在香味纸品中的应用[J]. 东莞理工学院学报, 2021, 28(5): 118-123.
- HE Xing, ZHANG Xuan, LI Rong-quan, et al. Preparation of Flavor Microcapsule and Its Application in Fragrant Paper[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2021, 28(5): 118-123.
- [23] 翟媛媛, 刘艳君, 王进, 等. 艾草精油抗菌微胶囊的制备与应用[J]. 纺织科学与工程学报, 2021, 38(4): 50-56.
- ZHAI Yuan-yuan, LIU Yan-jun, WANG Jin, et al. Preparation and Application of Wormwood Essential Oil Antibacterial Microcapsules[J]. Journal of Textile Science & Engineering, 2021, 38(4): 50-56.
- [24] CHANG Shao-kun, ZENG Chao, YUAN Wei-zhong, 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(4): 3014-3022.
- [25] LUO Hui, SHEN Qing, YE Fan, et al. Structure and Properties of Layer-by-Layer Self-Assembled Chitosan/Lignosulfonate Multilayer Film[J]. Materials Science and Engineering: C, 2012, 32(7): 2001-2006.
- [26] PAN Ying, ZHAN Jing, PAN Hai-feng, et al. Effect of Fully Biobased Coatings Constructed via Layer-by-Layer Assembly of Chitosan and Lignosulfonate on the Thermal, Flame Retardant, and Mechanical Properties of Flexible Polyurethane Foam[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(3): 1431-1438.