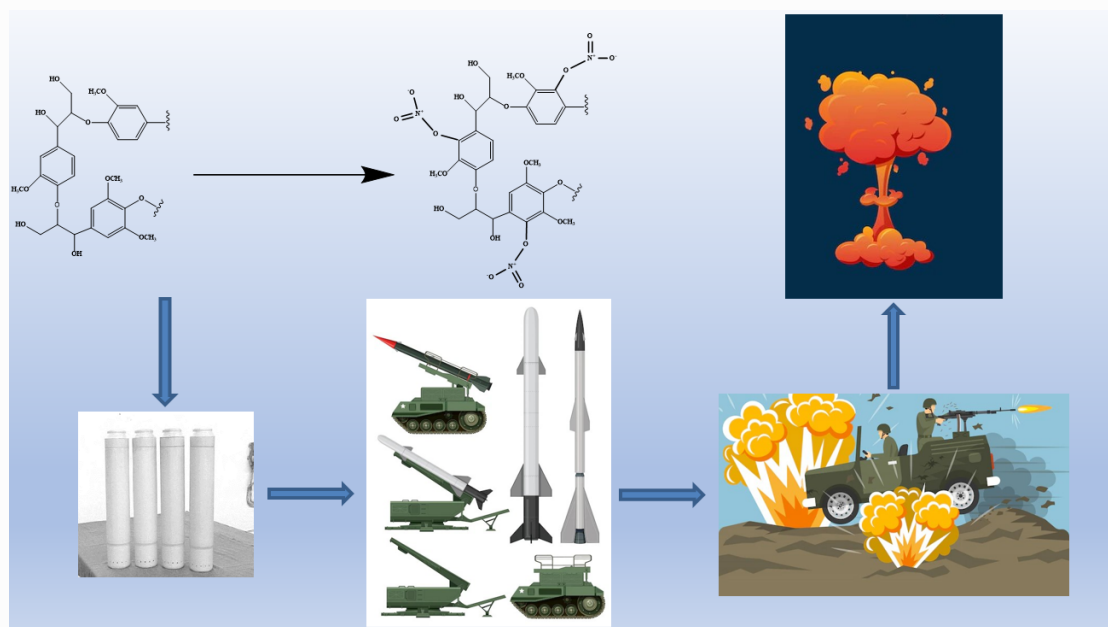


小药筒，大能量

作者：吴孟德，刘超，刘彤彤，杨庭，万炜涵，郭浩然；Email: 1690855057@qq.com



Image by freepik on Freepik



①【图 1】可燃药筒应用示意图

1. 可燃药筒是什么

可燃药筒能装填发射药，可以在膛内燃烧，提高弹药飞行的初速，在射击时自行消失，无需处理废壳^[1-5]。目前，可燃药筒在主战坦克和大中口径自行火炮中得到广泛应用。

2. 为什么要防护可燃药筒

可燃药筒含有硝化纤维素，热感度高、点火温度低，在高射速武器系统中，膛内的高温会引发自燃现象，导致安全事故^[6-8]。为了防止可燃药筒在发射前的意外自燃，需要提升它的耐高温性能。

同时，可燃药筒内部的纤维素网络有很多空隙和外部的多孔结构，导致水分可沿着其表面进入内部空隙中，吸水性强，容易受潮^[9-11]。可燃药筒需要面对恶劣的贮存环境，如海军武器装备常年处于气候潮湿且含有大量盐雾的空气环境中，盐雾与水汽的侵蚀情况十分严重。因此，需要提高可燃药筒的防水、防盐蚀性能。

下面，我们将按照可燃药筒主要组分、含能组分的合成、制备方法优化、研究方法、防护涂层研究和可燃药筒未来研究方向，依次展开介绍。

3. 可燃药筒主要组分有哪些

可燃药筒主要成分是硝化纤维素、纸纤维、粘合剂、安定剂和增强组分。可燃药筒根据材料性质属于聚合物药筒，可以分为半可燃药筒（由金属底座和可燃管组成）和全可燃药筒（实现药筒可消失或最小残留），半可燃药筒是金属药筒改进的产物。其中，硝化纤维素作为主要燃烧剂，起到提供能量的作用；纸纤维不仅可以提高可燃药筒的孔隙结构，提高燃烧效率，还可以减轻可燃药筒的重量；粘合剂起到粘合其他组分的作用；安定剂（如二苯胺和凡士林等）可以中和分解产物、抑制反应速率，提高可燃药筒的化学稳定性；增强组分（如聚酯纤维和碳纤维等）可以有效提高可燃药筒的力学强度和燃烧效率。

传统的可燃药筒制备方法有：织物硝化法、抽滤模压法、注塑模压法、卷制法和绕丝法。

织物硝化法作为最早的制备方法，首先将硝化的有机合成纤维、纸纤维和棉纤维等编织成特定的形状，接着用二氧化氮等氮氧化合物对其进行气相硝化制备出可燃药筒。本制备方法采用后硝化工艺，产品质量稳定性较差，制备难度较大。

抽滤模压法，属于一次成型的制备方法，制备出的可燃药筒具有初始燃烧活度高和渗透性燃烧的特点。作为早期的可燃药筒制备方法，主要制备过程是配料制浆、抽滤制坯和模压成型 3 个步骤。用碎浆机将纤维素完全粉碎，所得的碎屑再同硝化棉（含能材料）、树脂（粘结剂）以及相应的安定剂等一起加入反应器中进行混合搅拌，待混合充分后得到均匀的浆液。接着将所配得的浆液倒入多孔滤板用抽滤罐进行真空抽滤，在特定的压力和设定时间下，制备出一定尺寸的圆形湿坯。然后将湿坯放入热压成型模具中，在设定的模温、蒸汽压和一定的时间下，进行塑模。最后将所得的试样放入真空烘箱中烘干，即可制备出可燃药筒。

注塑模压法与抽滤模压法不同的是粘结剂的加入方式。注塑模压法是将硝化纤维素、木浆纸、含能组分以及增强剂混合均匀，填充到模具中，接着向模具中加入粘结剂，最后加热固化成型，制备出可燃药筒。该生产方法所制备的可燃药筒存在局部粘结剂过多问题，影响了燃烧性能，需要改进注塑模压法的加工工艺。

卷制式可燃药筒，是由浸泡过三硝基甲苯（TNT）或其他高能含能材料的硝化纤维纸卷制而成。此类药筒具有多层结构，组分中含有大量的硝化纤维素，该药筒整体结构呈疏松多孔的巢体或毡

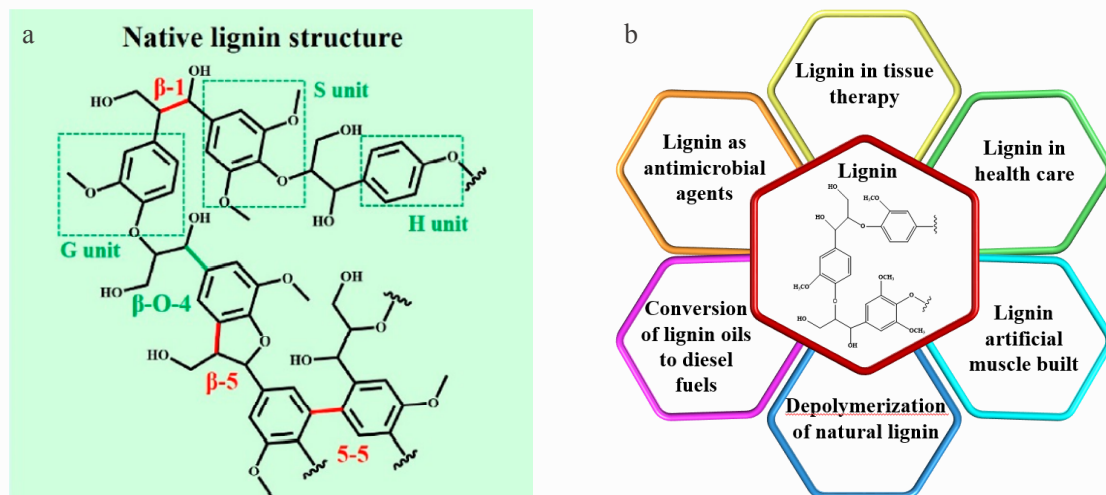
状。该类卷制药筒在潮湿的环境中会快速地吸收水分，并迅速达到吸湿平衡状态，环境湿度越大，所吸收的水分就越多。卷制式可燃药筒受环境湿度的影响较大，随着环境湿度的增加，自身的燃烧性能发生变化，燃烧速率降低，需要采取相应的防水措施，以提高卷制式可燃药筒的防水性能。

可燃药筒绕丝制备法，是将浸泡过树脂的金属或非金属丝线缠绕在适当的轴心上，成型、固化和脱模所制成。首先将切好的硝化纤维素纸卷刷胶并传送至转轴上，每一个药筒都要用绕丝缠绕多层，每层的纸卷（除第一层外）都需要经过供料滚筒给纸的上表面涂覆一层粘合剂，以方便下一次的绕丝，经过多层绕丝固化后得到成品的可燃药筒。该生产方法所制备的可燃药筒具有较好的抗拉强度和延展性，但此类药筒表面的多孔结构和内含的大量亲水纤维素，使它极易吸潮，改变了武器的内弹道性能，产生大量的燃烧残渣，降低弹药的射速，造成膛炸事故。该制备方法相对复杂，需要对整体的制备方法升级与简化。

4. 能量担当——硝化木质素

为了提高可燃药筒的整体性能，采用木质素取代传统的纤维素制备硝化木质素，作为可燃药筒的含能组分。如图 2 所示，木质素是自然界丰富的有机资源，主要由 3 种单体组成（G、S 和 H 单体）。这些不同的结构由 C—O 键和 C—C 键连接。由于含有多种官能团，木质素发生多种化学反应，如：氧化反应、还原反应、硝化反应、光解反应和缩聚反应等。科研人员拟采用木质素作为原料，采用硝化法以合成出新型的含能材料硝化木质素。

如图 3 所示，共设计出 3 种木质素硝化反应路线，以制备出硝化木质素。



【图 2】 (a) 木质素化学结构和 (b) 应用领域^[12-13]



【图 3】 硝化木质素合成方法

4.1 NO₂ 直接硝化

在反应釜中加入木质素原料和硝化催化剂(如: Mg(NO₃)₂·6H₂O, Ni(CH₃COO)₂·4H₂O, NiSO₄·6H₂O 和

Na-ZSM-5), 常用的硝化催化剂如表 1 所示。将一定压力的 NO₂ 气体注入反应釜中, 在反应釜中进行硝化反应, 考察催化剂、NO₂ 气体压力和反应时间对

木质素硝化反应的影响。

4.2 液相硝化

表 1 硝化反应有机溶剂

	Organic solvent
1	Benzene
2	Methylbenzene
3	Cyclohexane
4	Anhydrous ethanol
5	Naphthalene

4.3 N_2O_5 - O_3 混合硝化

采用固态的绿色硝化源 N_2O_5 ，通入 O_3 气体对木质素进行硝化反应。选择三口烧瓶，实验装置如图 4 所示。在烧瓶中加入木质素原料、催化剂和有机溶剂，并控制 N_2O_5 和 O_3 的气体流速，考察不同气体流速下木质素的硝化反应效果。

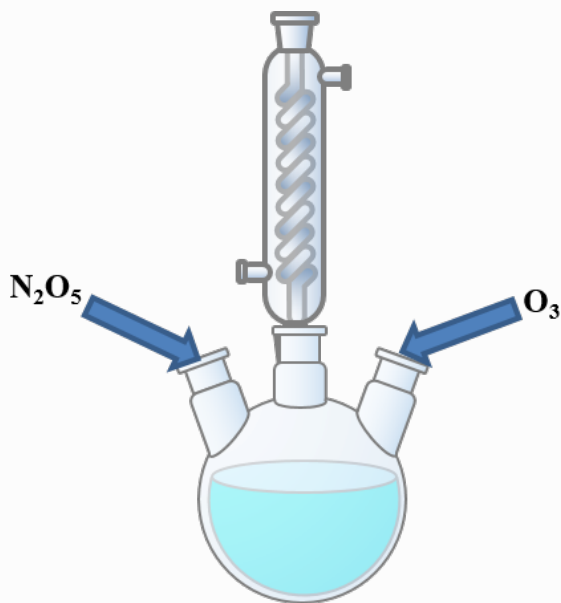


图 4 N_2O_5 - O_3 混合硝化实验装置

5. 如何优化可燃药筒制备方法

结合抽滤、模压法、卷制法和绕丝法等早期的可燃药筒制备方法^[14-19]，设计出可燃药筒的全新制备方法，具体制备过程如图 5 所示。

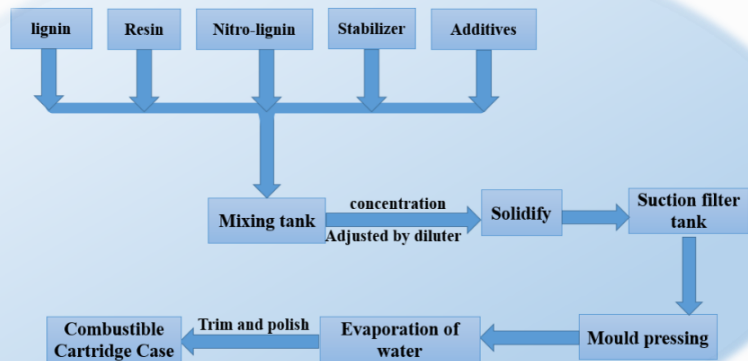


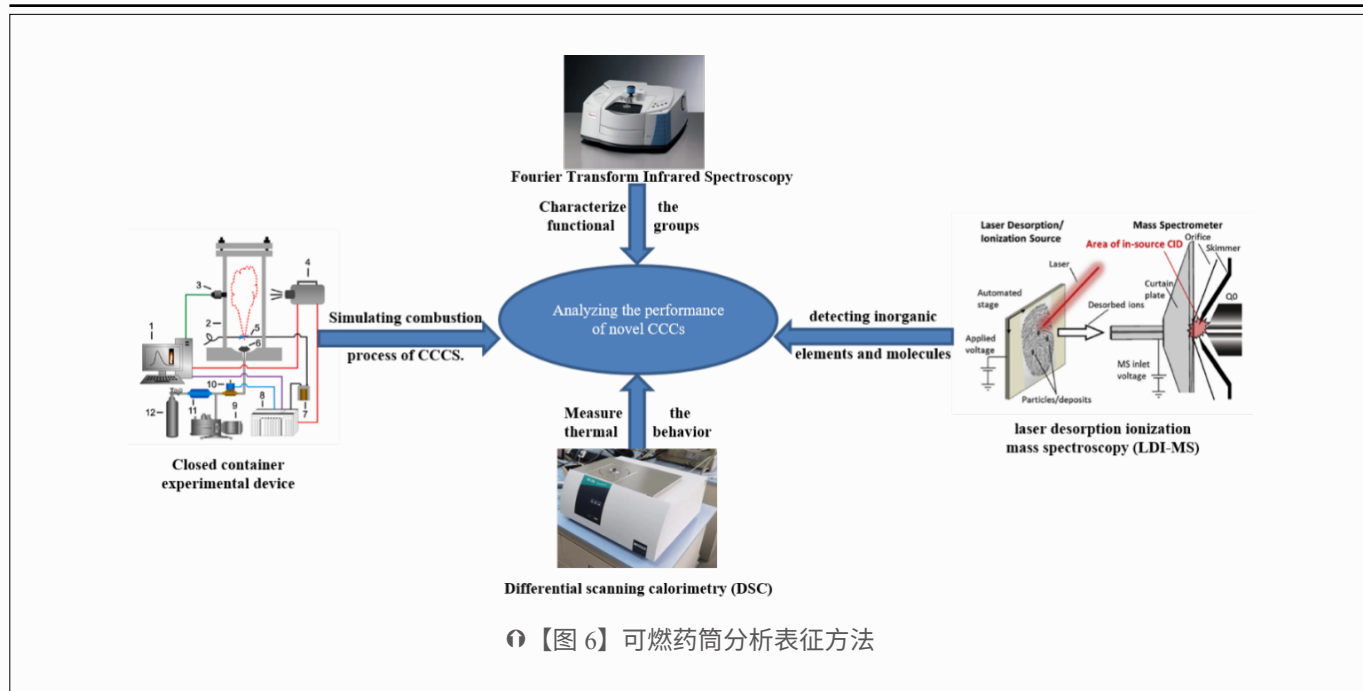
图 5 可燃药筒制备方法优化

6. 可燃药筒有哪些研究方法

如图 6 所示, 通过傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 分析所合成的硝化木质素的化学结构, 确定最佳的合成路线及实验条件。采用密闭爆发器试验研究新型可燃药筒的内弹道性能。采用差示扫描量热 (DSC) 获取硝化木质素与新型可燃药筒在温度程序过程中

的吸热、放热和比热变化等相关热效应信息, 研究其熔融与结晶过程、玻璃化转变、相转变、氧化稳定性、反应温度与反应热焓, 比热、结晶度和反应动力学参数。

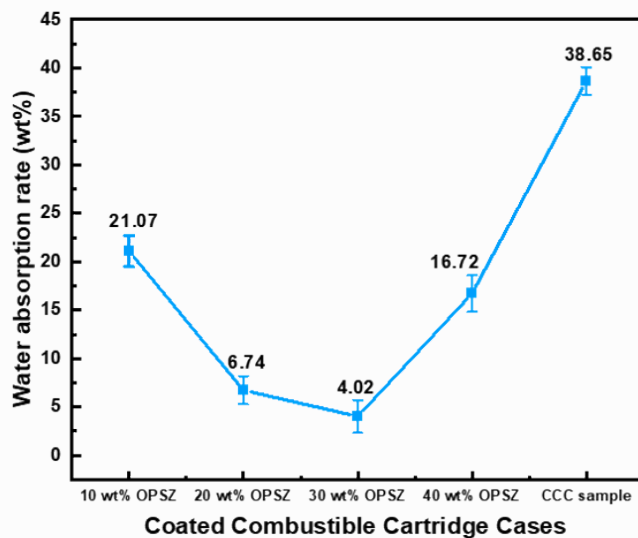
综合多种分析表征方法以研究不同制备方法下可燃药筒的性能, 确定最佳的设计配方及制备方法。



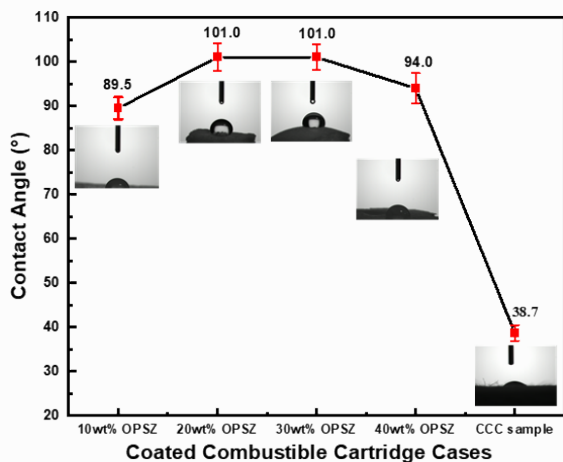
7. 可燃药筒防护涂层有哪些效果

在环氧树脂化学结构上接枝有机聚硅氮烷 (OPSZ), 形成一种新型的交联改性树脂, 制备出 OPSZ 复合涂层, 用以防护可燃药筒。在 30% 的 OPSZ 防护下, 可燃药筒具有最低的盐水吸收率 4.02%, 水接触角达 101.0 (°) (图 7 和图 8), 耐腐蚀性最佳。

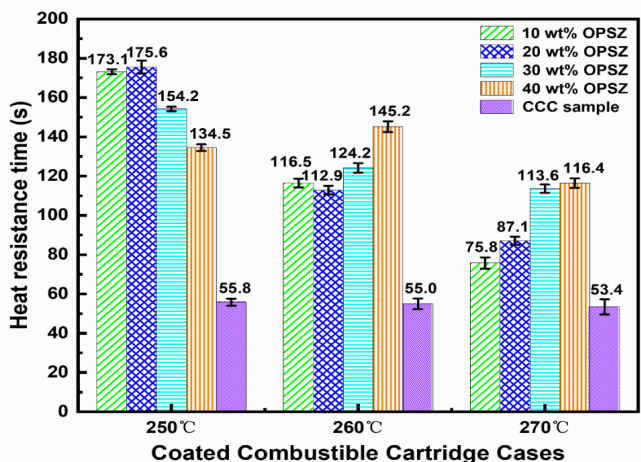
如图 9 所示, 在 250 °C 下, 随着 OPSZ 含量的增加, 可燃药筒的防护时间先增加后降低, 其中, 20% 的 OPSZ 涂层耐热性能最优。在 OPSZ 复合涂层保护下, 可燃药筒在 27.83 MPa 时断裂伸长率最高达 72.96%, 拉伸附着力最高达 18 MPa (图 10)。



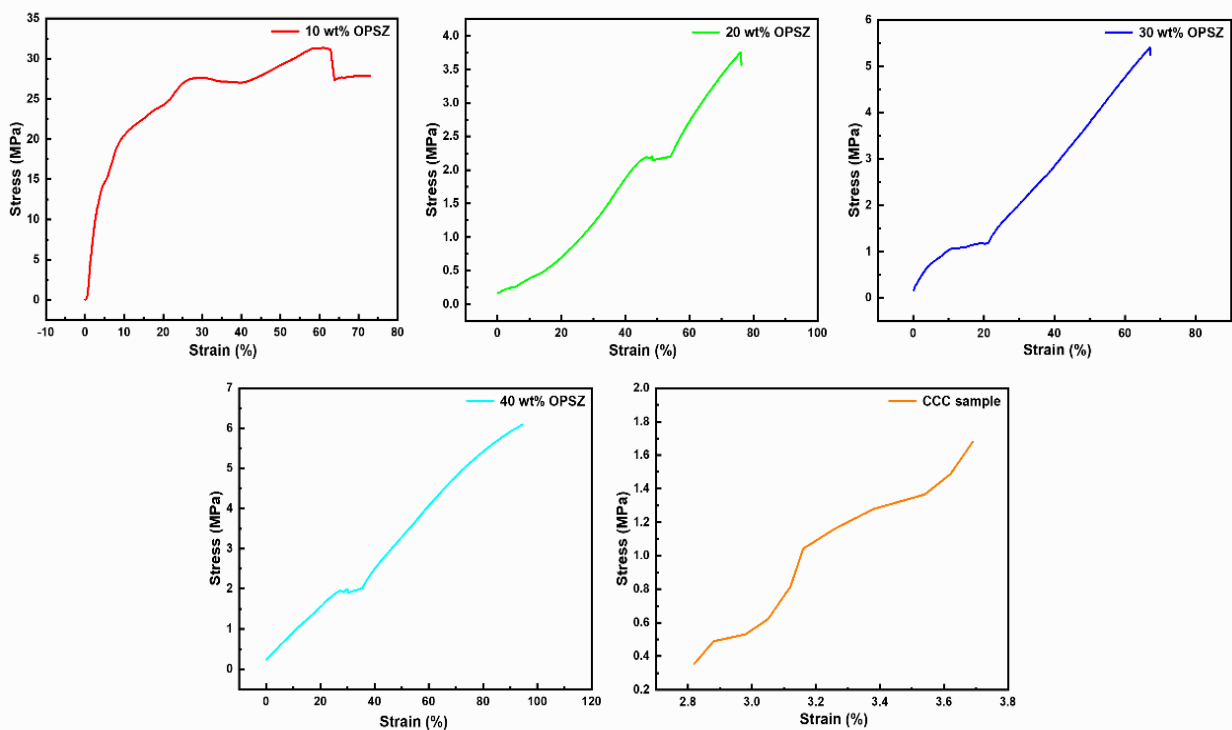
① 【图 7】不同 OPSZ 涂层浸没盐水 3 天后吸水率



【图 8】不同 OPSZ 复合涂层的水接触角数值



【图 9】OPSZ 涂覆下可燃药筒的平均耐热时间的柱状图



【图 10】OPSZ 涂覆下可燃药筒的非线性应力 - 应变曲线

以环氧树脂和聚酰亚胺 (PI) 为前驱体, *N*-甲基吡咯烷酮为引发剂, 合成 NPMF 复合涂层。如图 11 所示,

NPMF 复合涂层可以在可燃药筒的体表形成致密的交联网络, 有效地提高了可燃药筒的防水性能。

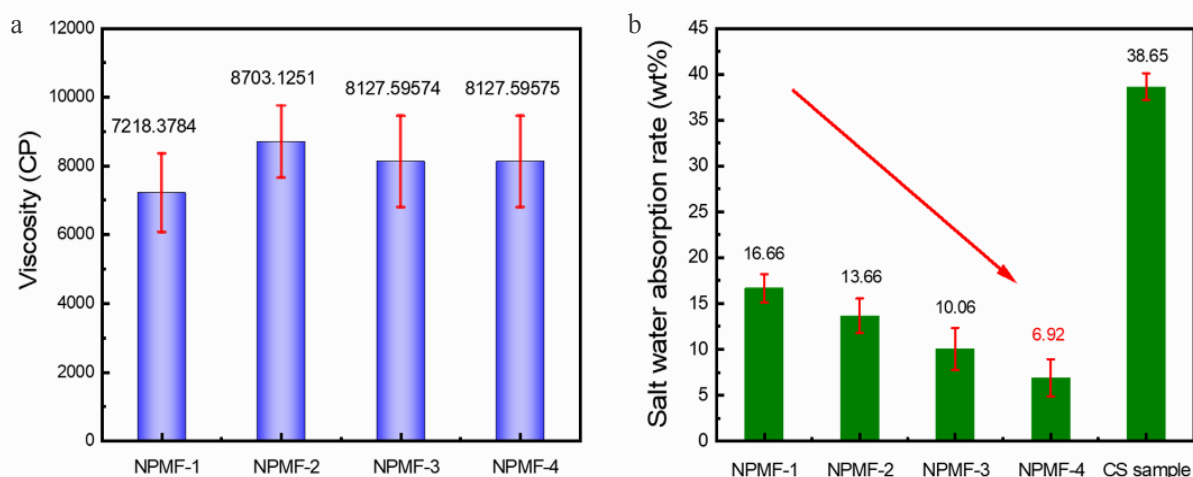


图 11 (a) NPMFs 涂层粘度和 (b) NPMFs 涂层盐吸水率

NPMF 涂层具有优良的抗腐蚀能力 (图 12 和图 13)。其中, NPMF-4 具有最高的电阻值 (53488.3Ω), 抗腐蚀性能最优。

8. 可燃药筒未来研究方向有哪些

为了推动可燃药筒在武器弹药领域的进一步应用, 仍需要在耐热性能的优化、粘合剂的选择、制备方法的改进、燃烧机理的研究和可燃药筒与发射药燃烧匹配性的研究等 5 个方面进行探究:

8.1 可燃药筒耐热性能的优化

可燃药筒中的含能组分硝化纤维素可以瞬时燃烧, 以保证可燃药筒燃烧的完全性和提供弹丸射击的部分能量。但硝化纤维素自身的热敏性高, 降低了可燃药筒的耐热性能。早期, 为了提高可燃药筒的耐热性能, 加入聚丙烯酸纤维, 不仅可以增强可燃药筒的力学性能, 还可以提升其耐热性能, 但聚丙烯酸纤维的高吸水性会降低可燃药筒的燃烧速率, 产生燃烧残渣。因此, 仍需要继续改进可燃药

筒配方的设计, 在保证可燃药筒高燃烧速率的同时优化其耐热性能。

8.2 可燃药筒粘合剂的选择

不同种类的粘合剂对可燃药筒力学性能的影响各不相同, 性能优异的粘合剂能够提高可燃药筒的力学强度, 以满足使用要求。如采用树脂基粘合剂合

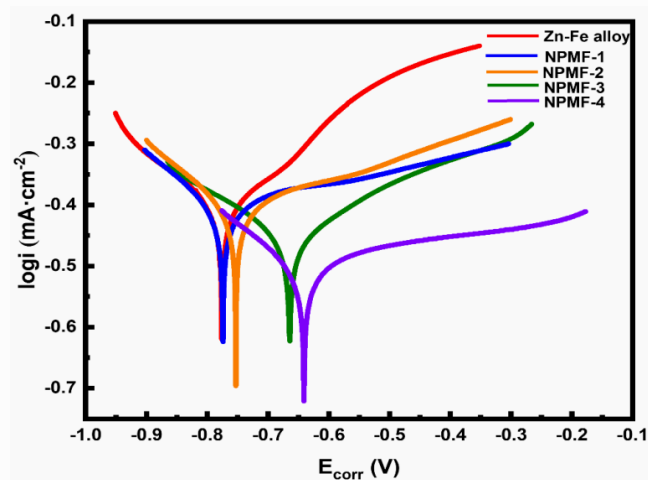


图 12 NPMFs 涂层样品的 Tafel 曲线

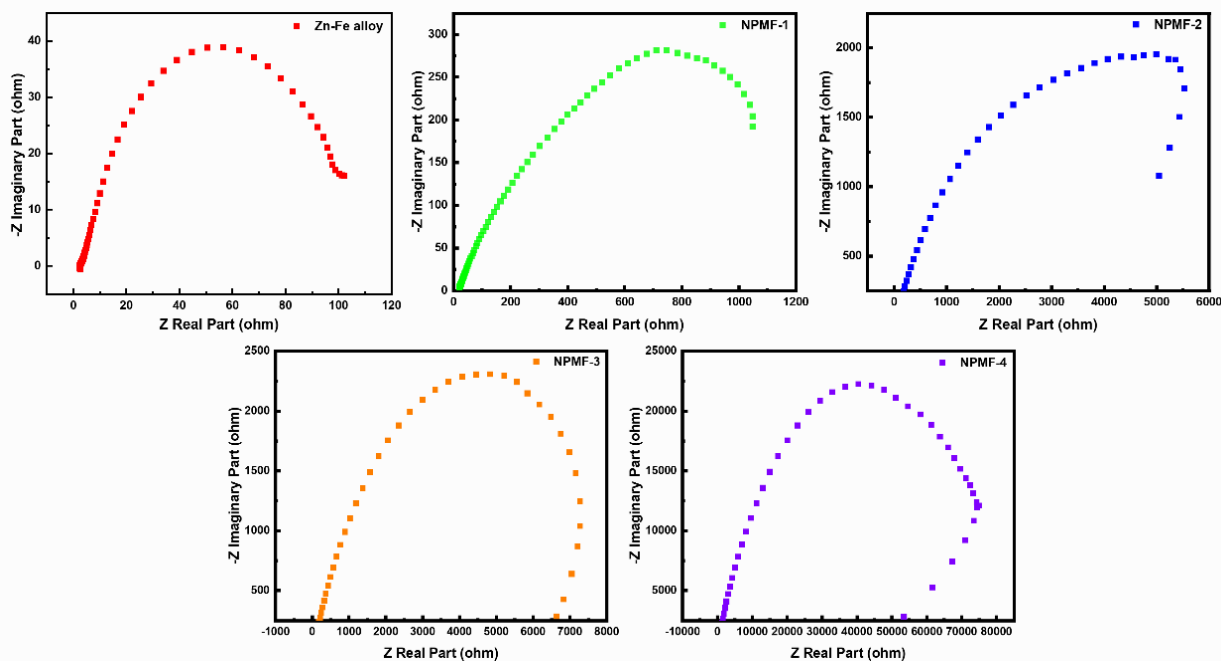


图 13 NPMFs 涂层 Nyquist 图

成的树脂基可燃药筒，具有优良的粘结性和延展性。

8.3 可燃药筒制备方法的改进

可燃药筒的改进制备方法主要有：超临界流体发泡法、真空吸附法和离心驱水法等。超临界流体发泡法采用 SC- CO_2 发泡剂，制备出新型的微孔型可燃药筒。其中，微孔结构增加了含能材料的内表面和空隙率，不仅可以提高燃烧面积，还可以增强气流穿透和对流燃烧。同时，低密度的微孔型可燃药筒还具有较低的点火延误，增加了可燃药筒在发射过程中的高燃速和高消耗，具有能量含量可控、燃烧速率快、易损性低和耐热性能好等优点。真空吸附法以网模为过滤介质，采用过滤吸附使过滤介质两侧形成压力差，浆液中的溶剂从回流管中排出，而浆液中的固体组分被过滤介质滤出，形成

湿坯，最后将湿坯脱水、热压成型后制备可燃药筒。此制备方法可以高效排除浆液中的溶剂，有效地缩短可燃药筒的制备时间，同时，也节约其生产成本。离心驱水法是利用驱水机的离心力作用，以实现浆液中固体和液体的分离，从而得到固体组分，再将固体组分进行模压成型，干燥制备可燃药筒。真空吸附法和离心驱水法所制备的可燃药筒空隙率较高，燃烧性能良好，但力学性能较差，不利于模块装药。

8.4 可燃药筒燃烧机理的研究

由于可燃药筒的多孔性结构，导致其发生渗透性燃烧。目前，科研人员主要利用密闭爆发器试验测试可燃药筒的燃烧过程，以获得压力与时间曲线，再变换为质量与时间曲线得到质量燃烧速率，

采用多孔火药的药型计算公式反演燃烧规律，预设其药型参数经验公式，最后经过大量试验确定各个参数，从而研究可燃药筒的燃烧特性。但这种研究方法只能从表观上分析其燃烧规律，很难对其渗透性燃烧做出合理的解释。因此，需要深入研究可燃药筒的燃烧规律，从而揭示其渗透性燃烧机理。

8.5 可燃药筒与发射药燃烧匹配性的研究

可燃药筒与主装药燃烧匹配性是一个关键性的研究内容，二者燃烧匹配合理，有助于可燃药筒的完全燃烧和提高主装药的燃速，以充分释放能量，从而提高弹丸的射速；燃烧匹配不合理，

会导致可燃药筒燃烧不完全，产生大量残渣。可燃药筒的燃烧过程与其装填条件密切相关，因此，需要测试不同装填条件下可燃药筒与主装药的燃烧过程，以研究二者之间的燃烧匹配性差异，从而促进可燃药筒在武器弹药领域的应用。

9. 结语

目前，科研人员制备出了碱性硅树脂复合涂层、环氧乙烯基树脂复合涂层、聚硅氮烷改性复合涂层、聚酰亚胺复合涂层、乙烯基树脂改性复合涂层（图 14）^[20-24]，对可燃药筒进行了全方位的强化，在不远的未来，可燃药筒将在军事领域不断发光、发热。



① 【图 14】 复合涂层防护下的可燃药筒

参考文献

- [1] Ho C H, Tomkins B A, Ramsey R S, et al. Determination of nitroester and stabilizer migration in combustible cartridge case wall[J]. Propell Explos Pyrot, 1996, 21(2): 79-84.
- [2] Miguel S A. Design criteria for inert or consumable polymer cartridge materials[J]. J Spacecraft Rockets, 1973, 10(5): 333-340.
- [3] Zimmerman F J. Development of 7.62 mm and 30 mm combustible cartridge case ammunition[J]. J Spacecraft Rockets, 1969, 6(3): 312-314.
- [4] Yang W, Ying S. Burning characteristics of microcellular combustible ordnance materials[J]. Propell Explos Pyrot, 2016, 41(1): 136-141.
- [5] Dey A, Athar J, Gogoi S, et al. Improvements in the structural integrity of resin based combustible cartridge Cases (CCC) at elevated temperatures[J]. Central Europ J Energetic Mater, 2015, 12(1): 117-127.
- [6] Shedge M T, Patel C H, Tadmok S K, et al. Polyvinyl acetate resin as a binder effecting mechanical and combustion properties of combustible cartridge case formulations[J]. Defence Sci J, 2008, 58(3): 390-397.
- [7] Peter L D. Fibrillated polyacrylic fiber in combustible cartridge cases[J]. Ind Eng Chem Res, 1984, 23(3): 438-441.
- [8] Syal R K, Sindker D V, Narr P S, et al. Hazard assessment for manufacture of combustible cartridge cases using picrite[J]. Defence Sci J, 1996, 46(2): 71-75.
- [9] Jia H, Lu G, Jiang J, et al. The influence of humidity on burning perfectibility of molded combustible cartridge case[J]. Adv Mater Res, 2011, 295-297: 446-449.
- [10] Syal R K, Narr P S. Study of brass obturator design for combustible cartridge case for 105 mm tank gun ammunition[J]. Defence Sci J, 2013, 47(3): 373-381.
- [11] Eliška J, Vojtěch Z, Pavel K, et al. Combustible cartridge case material characteristics evaluation[J]. Propell Explos Pyrot, 2024, 49(9): e202400100.
- [12] Cao Y, Zhang C, Tsang D C, et al. Hydrothermal liquefaction of lignin to aromatic chemicals: Impact of lignin structure[J]. Ind Eng Chem Res, 2020, 59: 16957-16969.
- [13] Guo T, Liu T, He J, et al. One-pot transformation of lignin and lignin model compounds into benzimidazoles[J]. Eur J Org Chem, 2022, 2: e202101152.
- [14] 郑林, 李生慧, 魏学涛. 硝化棉含氮量对叠氮硝铵发射药力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 47-50.
- [15] 田书春, 胡义文, 袁小丽, 等. 叠氮类热塑性弹性体对模压可燃药筒燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2018, 41(2): 147-152.
- [16] 李忠山, 田书春, 周逸, 等. 纤维素甘油醚硝酸酯基模压可燃药筒的制备与性能[J]. 火炸药学报, 2019, 42(5): 521-530.
- [17] 邹伟伟, 郝晓琴, 张志勇, 等. 小口径可燃药筒及装药的燃烧性能研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(8): 1423-1429.
- [18] 田书春, 周伟良, 李忠山, 等. 新型黏结剂和水性交联剂在模压可燃药筒中的应用[J]. 爆破器材, 2018, 47(3): 27-36.
- [19] 李忠山, 胡义文, 孟勇, 等. 阴离子羧甲基淀粉钠对模压可燃药筒性能的改进[J]. 爆破器材, 2017, 46(6): 26-30.
- [20] Wu M, Xiao Z. Polyimide-modified epoxy coatings reinforced with functional fillers for enhanced thermal stability and corrosion resistance[J]. Adv Compos Hybrid MA, 2025, 8: 172.
- [21] Wu M, Xiao Z. Optimum preparation of organopolysilazane composite coatings and their role in protecting combustible cartridge cases[J]. Surf Interfaces, 2025, 58: 105804.
- [22] Wu M, Xiao Z. Enhancement of heat resistance and waterproof performance of combustible cartridge cases with phenolic epoxy resin-modified polydimethylsiloxane composite coating[J]. Colloid Surface A, 2025, 708: 136002.
- [23] Wu M, Du J, Xiao Z. Preparation and properties of an organosilicon-modified coating to protect combustible cartridge cases[J]. Colloid Surface A, 2024, 696: 134380.
- [24] Wu M D, Xiao Z G. Fabrication of vinyl ester-modified phenolic resin composite coatings for the protection of combustible cartridge cases[J]. ACS Omega, 2025, 10(14): 13807-13815.