

持率为 97.77%^[4]。

3.3 MOF 复合正极材料

原始 MOF 由于其固有的低电导率，在实际应用中性能较差。通过将 MOFs 与碳材料和导电聚合物等高导电材料相结合，不仅可以有效提高了 MOFs 的导电性，而且还保留了 MOFs 丰富的活性位点和优良的离子传输通道。如采用交替堆叠的 MOF/MXene (Cu-HHTP/MX) 异质结构作为电极材料，其中 MXene 纳米片的存在提高了导电性并防止 MOF 聚集，而 MOF 层作为 Zn^{2+} 存储的主要活性层并缓解 MXene 的自堆叠。这种结构被证实了具有优异的 Zn^{2+} 迁移动力学和理想的赝电容行为。结果表明，Cu-HHTP/MX 具有优异的倍率性能（在 $0.1 A g^{-1}$ 时为 $260.1 mAh g^{-1}$ ，在 $4 A g^{-1}$ 时为 $173.1 mAh g^{-1}$ ）和长期循环稳定性，在 $4 A g^{-1}$ 下超过 1000 次循环可保持 92.5% 的容量^[5]。

4 结语

本文系统综述了金属有机框架材料在水系锌离子电池正极中的应用研究进展。MOFs 材料凭借其可调的多孔结构、丰富的活性位点和多样化的功能设计，为解决水系锌离子电池正极面临的挑战提供了解决方案。通过合理的设计策略，如金属/有机组分的调控、多孔结构构建、活性位点优化和复合材料设计，可以显著提高 MOF 正极材料的电化学性能。

尽管在导电性、结构稳定性和成本方面仍面临挑战，但随着新材料的开发、表征技术的进步和对机制理解的深入，MOF 基正极材料有望在水系锌离子电池领域发挥更重

要的作用。未来研究应聚焦于本征导电 MOF 的设计、多功能复合结构的构建、先进表征技术的应用以及低成本合成路线的开发，推动高性能、低成本水系锌离子电池的发展，为大规模储能应用提供可靠技术支撑。

参考文献

- [1] YIN C, PAN C, LIAO X, et al. Coordinately Unsaturated Manganese-Based Metal–Organic Frameworks as a High-Performance Cathode for Aqueous Zinc-Ion Batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(30): 35837-35847.
- [2] YANG S, LV H, WANG Y, et al. Regulating Exposed Facets of Metal–Organic Frameworks for High-rate Alkaline Aqueous Zinc Batteries[J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2022, 61(47): e202209794.
- [3] SANG Z, LIU J, ZHANG X, et al. One-Dimensional π -d Conjugated Conductive Metal–Organic Framework with Dual Redox-Active Sites for High-Capacity and Durable Cathodes for Aqueous Zinc Batteries [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(3): 3077-87.
- [4] Ran K, Chen Q, Song F, et al. Defective construction of vanadium-based cathode materials for high-rate long-cycle aqueous zinc ion batteries[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 653(PartA):14.
- [5] Wang Y, Song J, Wong W Y. Constructing 2D Sandwich-like MOF/MXene Heterostructures for Durable and Fast Aqueous Zinc-Ion Batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(8):e202218343.

The effect of composite oil phase on quality control of static process emulsion explosive

Xiaohua Guo Tang Tang

Gansu Jiulian Civil Explosives Equipment Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 731499, China

Abstract

Given the core characteristics of static emulsification and static sensitization processes that require no mechanical agitation, composite oil phases must simultaneously meet dual requirements: "self-regulating interfacial tension during static emulsification" and "low-temperature stability during static sensitization." This study leverages the process's unique feature of "achieving latex formation and stabilization through oil phase functionality without mechanical assistance," analyzing four dimensions: formulation compatibility, precise physicochemical performance control, synergistic optimization with static sensitization, and full-chain quality traceability. The research elucidates the mechanisms influencing the uniformity of composite oil relative to emulsion matrices, sensitization bubble stability, and final product quality. Key control indicators and operational standards are established to provide technical support for enterprises adopting this process to enhance product quality consistency.

Keywords

Composite oil phase; Emulsified explosive; Static emulsification; Static sensitization; Quality control

复合油相在静态工艺乳化炸药质控中的作用

郭小华 唐棠

甘肃久联民爆器材有限公司, 中国·甘肃 兰州 731499

摘要

针对静态乳化、静态敏化工艺无机机械搅拌扰动的核心特点,复合油相需同时满足“静态乳化时的界面张力自调节”与“静态敏化时的低温稳定性”双重需求。本文结合该工艺“无机机械辅助、全靠油相自身功能实现乳胶体形成与稳定”的特性,从组分配比工艺适配性、理化性能精准管控、与静态敏化协同优化、全链条质量溯源四个维度,剖析复合油相对乳化基质均匀性、敏化气泡稳定性及最终产品质量的影响机制,明确关键控制指标与实操标准,为采用该工艺的企业提升产品质量稳定性提供技术支持。

关键词

复合油相; 乳化炸药; 静态乳化; 静态敏化; 质量控制

1 引言

静态乳化-静态敏化工艺是近年来乳化炸药生产技术领域的重要创新,其核心特征在于完全取消了传统机械搅拌装置,转而依靠静态混合元件(如波纹板、螺旋结构、多孔介质等)实现油水两相的自发混合与分散。在敏化工序中,同样无需机械辅助,仅通过化学敏化剂与复合油相的协同作用完成气泡的生成与稳定化过程。该工艺由于彻底避免了机械摩擦和局部过热现象,显著提高了生产过程的安全性,从根本上降低了燃爆风险。然而,这种技术变革也对复合油相提出了更为苛刻的要求—油相必须完全依靠自身的理化特性,在缺乏外力辅助的条件下实现乳胶体的形成与长期稳定。

目前,部分企业在应用该工艺过程中,由于复合油相

在配方设计和性能调控上未能充分适配静态工艺特点,出现了多方面质量问题:静态乳化不均匀(存在明显的水相团聚现象)、敏化后气泡逃逸(导致爆速下降和保质期缩短)、乳胶体分层及药卷硬化等。这些问题的根源在于对静态工艺特殊要求的认识不足,以及相应的复合油相质量控制体系不完善。因此,针对静态工艺的特殊要求,系统优化复合油相的质量控制要素,建立科学的质量评价体系,成为保障乳化炸药最终性能的关键技术环节。

2 复合油相组分配比设计与静态工艺适配性

静态工艺完全缺乏机械外力的修正作用,这使得复合油相必须通过精心设计的组分配比来实现“自乳化”、“低温高包裹性”和“敏化协同”三大功能。其核心组成包括基础油、乳化剂和稳定剂,各组分的配比与性质直接决定了工艺可行性与其产品质量。

2.1 基础油: 实现静态自流动与低温包裹性的平衡

基础油作为复合油相的主体成分(占总量 65%-

【作者简介】郭小华 (1981-), 男, 苗族, 中国贵州贵阳人, 本科, 工程师, 从事民爆行业工作及研究。

80%)，其流变行为直接决定了油水两相在静态混合元件中的分散效率以及在敏化温度下对气泡的包裹能力。需要重点调控其黏温特性与低温流动性：

2.2 黏度梯度精准控制

静态乳化过程依赖于油水相在管道和混合元件中的自然流动和扩散，因此基础油的黏温特性需要精确设计：

在静态乳化温度(90-95℃)下，黏度应严格控制在2-3 mm²/s 范围内。黏度过高会导致流动阻力显著增大，油水相难以充分混合，容易形成粒径超过100 μm的水相颗粒，这些大颗粒将成为后续敏化过程中的薄弱环节；黏度过低则可能导致初步形成的乳胶体稳定性不足，在输送过程中发生相分离。

在中低温静态敏化温度下，黏度需稳定维持在4-6 mm²/s。当黏度低于4 mm²/s时，油膜强度不足，敏化产生的气泡容易聚合逃逸，造成爆速从≥4200 m/s下降至<3800 m/s；高于6 mm²/s则会阻碍敏化剂扩散，导致气泡分布不均匀，殉爆距离波动超过±2 cm。

2.3 组分优化建议

推荐采用低凝点矿物基础油与半精炼石蜡及微晶蜡按质量比6:4进行复配。这种组合设计基于以下考虑：低凝点基础油保证了在90-95℃高温下的良好流动性，而半精炼石蜡及微晶蜡的加入提高了在敏化温度下的油相稠度，避免了在中低温时石蜡析出，破坏油相连续性，从而确保界面膜的完整性与稳定性。同时，石蜡的结晶特性有助于形成更加坚固的界面膜结构。

3 乳化剂：提升静态条件下的自乳化活性

在完全无机械搅拌条件下，乳化剂成为促使油水界面张力降低、推动水相分散的核心成分。其种类选择与配比直接影响乳化效率和水相粒径分布，进而决定最终产品的爆炸性能。

3.1 HLB 值精准匹配

静态"油包水"体系对乳化剂的亲水亲油平衡值(HLB)要求极为严格，需要控制在4.2-4.5之间的狭窄范围内。这一要求是基于大量实验研究得出的结论：

若HLB>4.5，乳化剂亲水性过强，容易引起体系转相，形成"水包油"型结构，导致乳胶体在静置1小时内即出现明显分层；

若HLB<4.2，则界面张力下降不足，水相分散效果差，静态乳化后仍可见直径大于5 mm的水相团聚物，这些团聚物在后续敏化过程中将成为气泡聚集的中心点，严重影响敏化均匀性和爆炸性能。

3.2 低温活性维持

选用Span-80与失水山梨醇单油酸酯按6:4比例复配，这种组合可以确保在敏化温度下乳化剂分子仍保持较高的界面活性。Span-80提供良好的乳化基础，而失水山梨醇单油酸酯的加入改善了低温下的分散性能，避免因温度降低导致乳化剂分子聚集，破坏乳胶体界面膜结构。

3.3 乳化效果验证

必须通过小规模静态乳化试验进行验证：将油水两相

按1:9比例注入静态混合器，在工艺温度下运行后取样检测。要求乳胶体无肉眼可见颗粒，在显微镜下(400倍)观察水相液滴粒径均匀且均≤5 μm，方可判定乳化剂配比合格。这一严格的验证标准确保了工业化生产的可靠性。

4 稳定剂：增强中低温环境下的体系稳定性

稳定剂(添加量3%-8%)在复合油相中扮演着多重角色：抑制油相氧化、增强界面膜强度、防止储存过程中水相析出或气泡，同时还需要避免对敏化反应产生干扰。

4.1 添加量平衡

稳定剂的添加量需要精确控制，过多或过少都会产生负面影响：

添加量低于3%：在中低温敏化环境下，油相容易发生氧化反应，酸值上升超过0.6 mgKOH/g，界面膜脆化加剧，气泡稳定性显著下降，储存一个月后爆速衰减超过10%；

添加量高于8%：过量的稳定剂可能会吸附敏化剂(如亚硝酸钠)，延缓敏化反应速度，使敏化时间从30分钟延长至60分钟，气泡生成量减少30%，殉爆距离<4 cm。

4.2 优选种类与功能

稳定剂其优势在于：与常见化学敏化剂反应活性低，不易引入杂质影响气泡稳定性；同时在中低温敏化下能均匀分散于油相，形成"辅助界面膜"，增强对水相的包裹力；此外，该稳定剂还具有一定的抗氧化性能，有助于延长产品储存期。

5 复合油相关理化指标的控制标准

静态工艺对复合油相的一致性要求极高，任何性能偏差都可能在缺乏机械矫正的条件下被放大，导致产品质量波动。因此，必须对水分、酸值和密度等关键指标实施比传统工艺更为严格的控制。

5.1 水分含量：≤0.1%

水分含量控制是静态工艺中的关键环节，因为静态乳化完全依赖油水界面张力差实现自混合，水分超标会直接破坏这种精细的界面平衡：

水分>0.1%时，会在油相中形成"微小水核"，这些水核在静态混合过程中会与水相团聚物结合，导致乳化不均匀；同时水分会加速敏化剂分解，在中低温环境下敏化剂半衰期从2小时缩短至1小时，造成气泡生成量不足。

检测标准：必须采用卡尔·费休法进行每批次检测，检测误差控制在≤0.02%，不合格批次严禁投入生产。建议配备在线水分检测装置，实现实时监控。

5.2 酸值：≤0.8 mgKOH/g

静态工艺采用较传统工艺更严格的酸值控制标准(传统工艺一般为1.0 mgKOH/g)，这是因为中低温敏化环境会加速酸性物质对界面膜的破坏：

酸值>0.8 mgKOH/g时，酸性物质会催化乳化剂分子水解，降低静态乳化活性；同时会引起静态混合元件的腐蚀，产生的金属离子(如Fe³⁺)会进一步催化硝酸铵分解，增加安全风险。