

# 凡士林改性对蜂蜡基乳化炸药微观结构及爆轰性能的影响\*

李明<sup>1</sup>, 吴红波<sup>2</sup>, 辛有利<sup>1</sup>, 汪鑫齐<sup>2</sup>, 胡鹏飞<sup>2</sup>, 赵昌鑫<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 张晨

曦<sup>1</sup>

(1. 金堆城钼业股份有限公司矿山分公司, 陕西 渭南 714000;

2. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 针对传统蜂蜡基乳化炸药存在的油相黏度大、乳化分散难、低温环境下易硬化脆裂等工程难题, 通过引入凡士林作为调节剂, 系统研究了油相分子结构差异对乳化炸药流变性、微观形貌、热稳定性、储存稳定性及爆轰性能的影响。结果显示, 凡士林富含的支链烷烃降低了油相体系的黏度, 有效提升了乳化过程中的剪切效率。当凡士林的质量分数从 0% 增加至 2.4% 时, 乳胶基质的索特平均粒径  $D[3,2]$  从  $8.38\ \mu\text{m}$  降低至  $5.85\ \mu\text{m}$ ; 起始分解温度和最大失重速率温度略有下降, 但热稳定性仍满足工业安全要求。当凡士林的质量分数为 1.8% 时, 体系的多分散指数 (PDI) 降至 1.73, 微观结构的均一性最好; 其耐高低温循环次数由 10 次提升至 18 次; 爆速达到峰值  $5180.3\ \text{m/s}$ 。研究结果证实了通过油相微观结构调控来提升乳化炸药综合性能的可行性, 为解决工业炸药适应恶劣温变环境等难题提供了经济、有效的配方优化策略。

**关键词:** 乳化炸药; 油相分子结构; 微观形貌; 储存稳定性; 配方优化

中图分类号: TJ510; O521.9

文献标识码: A

乳化炸药 (Emulsion Explosive) 作为一种典型的油包水 (W/O) 型含能材料, 凭借其优异的抗水性、安全性和爆轰性能, 在工业爆破领域占据了重要地位<sup>[1-2]</sup>。其微观结构由分散的氧化剂水溶液液滴和连续的油相介质组成, 其中油相材料占配方质量的 5%-7%, 是维持乳化炸药性能的关键因素之一<sup>[3-4]</sup>。传统乳化炸药油相常采用复合蜡。蜂蜡 (Beeswax) 作为一种天然长链酯类材料, 因其分子链较长, 主要为  $\text{C}_{40}$ - $\text{C}_{46}$  酯类, 结晶度高, 使乳胶基质具有较高的硬度和界面膜强度, 有利于长效储存<sup>[5]</sup>。单一高结晶度硬质蜡在低温下容易使乳化炸药发生破乳析晶, 且会在乳化过程中因黏度过大导致剪切效率降低, 难以形成均一油包水型液滴, 从而限制了炸药性能的进一步提升。为了解决上述问题, 本研究向其中引入调节剂凡士林对油相进行改性。

针对乳化炸药现有问题, 国内外专家进行了大量研究工作<sup>[6-8]</sup>。关于乳胶基质的储存稳定性问题, 张阳<sup>[9-10]</sup>指出, 在大直径条件下, 乳胶基质更易发生破乳现象; 吴攀宇等<sup>[11]</sup>研究表明, 动态挤压过程会加速乳胶基质理化性质的恶化, 并进一步确定了在泵送输送过程中维持基质结构稳定的临界粒径阈值为  $5\ \mu\text{m}$ ; 朱正德等<sup>[12]</sup>探讨了氮化硅对现场混装乳化炸药爆轰性能的影响规律, 证实了该富氮材料在优化爆速和猛度方面的积极作用; Shi R 等<sup>[13]</sup>分析了 pH 值与田菁胶用量对铵胺炸药性能的影响, 当 pH 值为 4.4 时, 爆速指标达到最佳; 而当田菁胶质量分数为 0.9% 时, 炸药的抗水性最为优异。何祥等<sup>[14]</sup>研究了柴油、煤油和机油三种油相材料对现场混装乳化炸药抗挤压能力的影

\*收稿日期: 2026-03-05; 修回日期: 2026-05-08

基金项目: 安徽高校自然科学基金 (KJ2019A0121)

作者简介: 李明 (1982-), 男, 本科, 工程师, 主要从事乳化炸药性能与民爆安全管理研究. E-mail: 370431011@qq.com

通讯作者: 吴红波 (1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事爆破器材与安全研究. E-mail: hbwu@aust.edu.cn

响, 结果表明机油制备的基质在经受 10 次挤压后粒径、硝酸铵析出量和黏度变化最小, 抗挤压能力最佳。黄麟等<sup>[15]</sup>分析了油相材料对混装乳化炸药性能的影响, 结果表明随着机油标号及黏度增大, 乳化基质黏度升高、高温敏化固泡能力增强、爆轰性能更优, 而增大柴油复配比例会降低基质黏度, 70℃下黏度调控范围为 13900~35340cp。

然而, 目前鲜有引入调节剂以对油相进行改性的研究。凡士林 (Vaseline) 由支链烷烃和环烷烃组成的石油基半固态胶体, 具有独特的无定形结构<sup>[16]</sup>。凡士林中大量的支链和环状结构能够穿插进入蜂蜡高结晶度的长链酯分子之间, 利用其较大的空间位阻打断长链分子的规则排列, 有效降低油相的结晶度与体系黏度。改善乳化过程的流变行为, 使界面膜的柔韧性更好, 在抵抗低温等外界环境变化时不易发生脆裂。若过度引入凡士林, 其无定形分子会过度稀释长链酯分子, 导致蜂蜡分子间的范德华力大幅减弱, 进而破坏界面膜原有的刚性骨架。导致界面膜机械强度与膜弹性下降, 乳胶基质在剪切或温度波动下极易发生破乳。因此, 探究不同油相材料对乳胶基质的协同作用, 具有重要的科学意义。本研究旨在从分子结构调控的角度出发, 探究不同凡士林含量对蜂蜡基乳化炸药性能的影响规律。过流变测试、微观形貌表征、热稳定性分析、高低温循环实验及爆轰性能测试, 系统评估了改性乳胶基质的理化性质与工程适应性。为开发适应复杂环境的高性能乳化炸药提供理论依据。

## 1 实验

### 1.1 试剂与仪器

试剂: 硝酸铵 (AN), 工业级, 河南晋开化工集团有限公司; 硝酸钠 (SN), 工业级, 河北轩然化工有限公司; 凡士林, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 蜂蜡, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 高分子乳化剂; 去离子水, 自制; 敏化剂, 浓度为 33% 的亚硝酸钠溶液, 自制; 等。

仪器设备: 电动分散器, 杭州奇威仪器有限公司; MCR 系列旋转流变仪; 莱卡光学显微镜 DM4M; 激光粒度仪, 英国 Malvern 仪器公司; 高低温循环试验箱; BSW-3A 型爆速测试仪, 湖南湘西州奇博矿山仪器厂; 等。

### 1.2 乳胶基质的制备

依据表 1 配方保持水相及乳化剂含量不变, 控制凡士林和蜂蜡的配比, 制备 5 组不同的乳胶基质。其中凡士林在乳胶基质中质量分数分别为 0%, 0.6%, 1.2%, 1.8%, 2.4%。

表 1 乳胶基质配方/%

Number	An	Sn	H <sub>2</sub> O	Emulsifier	Vaseline	Beeswax
E1	73	11	10	2	0	4
E2	73	11	10	2	0.6	3.4
E3	73	11	10	2	1.2	2.8
E4	73	11	10	2	1.8	2.2
E5	73	11	10	2	2.4	1.6

乳胶基质制备方式如图 1, 按表 1 配方比例称取硝酸铵、硝酸钠和水, 混合均匀后加热至 100-105 °C, 制得水相; 同样按比例将凡士林、蜂蜡和乳化剂混合, 加热至 90-95 °C, 制得油相。设定电动分散器转速为 1000 r/min, 将水相在 40 s 内匀速注入油相中, 保持转速持续乳化 3 min, 制得乳胶基质。待乳胶基质冷却至 55-60 °C 后, 对其进行敏化, 敏化后密度控制在 1.05-1.15 g/cm<sup>3</sup>, 即得乳化炸药。



图 1 乳胶基质制备示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Emulsion Matrix Preparation

### 1.3 实验方案

(1) 流变特性测试：利用流变仪对各组配方乳胶基质的流变性进行表征。实验在 25°C 恒温条件下进行。为了模拟乳胶基质在生产管道输送及静置储存过程中的受力状态，测试模式设定为稳态剪切扫描。剪切速率扫描范围设定 0.01-100 /s。仪器自动记录样品的表观黏度随剪切速率的变化数据，以此评估油相组成对乳胶基质流变特性的影响<sup>[17]</sup>。

(2) 微观形貌观测及粒径分布测试：取少量基质样品于载玻片上，用适量柴油充分溶解，待样品溶解后用盖玻片覆盖，置于显微镜观测台，调整合适放大比例观测乳胶基质微观结构。分别取 4 g 乳胶基质样品，加入 80 mL 柴油进行溶解，搅拌均匀后静置 30 min，利用激光粒度分析仪测定样品的粒径分布，选取索特平均粒径  $D[3,2]$  作为特征粒径，并记录分布宽度  $W$  及分散性指数  $PDI$ <sup>[18]</sup>。PDI 计算式如式(1)。

$$PDI = \frac{\Delta L}{D} \quad (1)$$

其中  $\Delta L$  为粒径分布范围， $\mu\text{m}$ 。

(2) 热稳定性测试：采用热重分析仪对乳胶基质的热稳定性及分解过程进行表征。实验称 2 mg 左右量样品置于氧化铝坩埚中，在动态氮气气氛下进行测试，流速 30 mL/min，以 5 K/min 的速率从 30 °C 升温至 350 °C。实验同步记录样品质量随温度变化的曲线 (TG) 及其一阶导数曲线 (DTG)。通过分析曲线，确定样品的起始分解温度  $T_0$ 、最大失重速率温度  $T_p$ 。

(3) 高低温循环实验：为评价乳胶基质在温度剧烈变化条件下的储存稳定性，采用高低温试验箱进行加速老化实验。称取 100 g 乳胶基质样品装入相同规格烧杯中，密封以防止挥发。设定循环程序如下：在低温 -20 °C 下恒温 2 h，随后升温至 50 °C 恒温 2 h，此为一个完整的循环周期。实验连续进行直至样品出现破乳、析晶现象。每完成一个循环后，取出样品观察其宏观状态，记录其是否破乳析晶。

(4) 爆速测试：爆速测试采用 GB/T 13228-2015。如图 2 所示，将敏化后的乳化炸药压入袋中，制成药卷形状。在药卷一端插入雷管作为起爆源。沿药卷方向插入两根探针，探针间靶距设置为 50 mm。起爆后，爆速仪自动记录爆轰波经过两根探针的时间差  $\Delta t$  并得到爆速。实验重复 2 次，取平均值作为最终爆速结果。

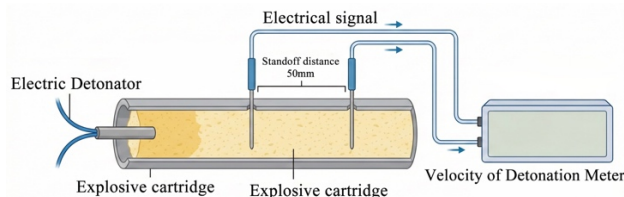


图 2 爆速测试示意图

Fig.2 Schematic Diagram of the Detonation Velocity Measurement Setup

## 2 实验结果分析

### 2.1 乳胶基质的流变性

乳胶基质作为一种典型的高内相乳液，其流变特性直接决定了乳化过程中的分散效率以及成品的物理稳定性<sup>[19]</sup>。图 3 为不同凡士林含量的乳胶基质样品的黏度随剪切速率的变化曲线。

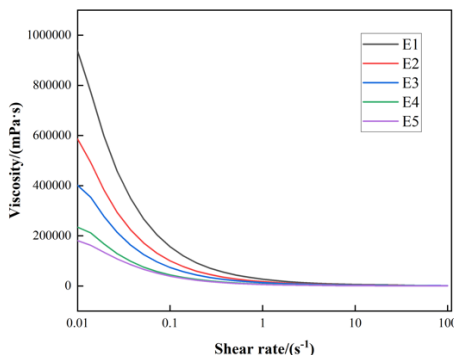


图 3 乳胶基质黏度随剪切速率变化曲线

Fig.3 Variation of Emulsion Matrix Viscosity with Shear Rate

由图可知，在剪切速率为 0.01-100 /s 内，各个配方的乳胶基质黏度随着剪切速率的增加而急剧下降。对于不同样品，随着凡士林含量的增加，乳胶基质的黏度在相同剪切速率下呈下降趋势。为了定量评估凡士林对乳胶基质流变特性的改变程度，采用幂律方程对稳态剪切数据进行了非线性拟合，如表 2 所示。所有样品的拟合优度  $R^2$  均大于 0.96，表明幂律模型能极好地描述该体系的流动行为。

表 2 不同凡士林添加量下基质的流变学参数

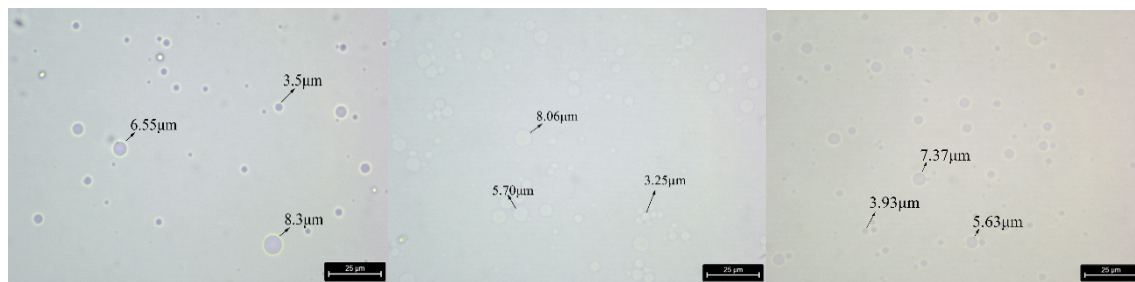
Table 2 Rheological parameters of matrices with different vaseline contents

Sample	E1	E2	E3	E4	E5
n	0.2435	0.2660	0.3414	0.3078	0.2317
$K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	28709.98	19040.05	16215.13	8874.17	6266.04
$R^2$	0.9901	0.9967	0.9983	0.9983	0.9992

随着凡士林含量的增加，体系的稠度系数  $K$  由 28709.98  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$  降低至 6266.04  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ，且流变指数  $n$  均远小于 1。结果表明，引入凡士林降低了蜂蜡基乳胶基质的稠度，起到了乳化和增塑的作用。各个样品均展现出假塑性特征。蜂蜡中长链脂肪酸酯形成的致密结晶网络产生了内摩擦阻力，使 E1 样品在全剪切速率范围内黏度最高。凡士林富含短链及支链烷烃，在体系中发挥了稀释与增塑的作用，有效削弱了蜂蜡分子间的强相互作用，致使 E5 样品的黏度显著降低。流变测试结果证实，在蜂蜡基乳胶基质中引入凡士林可有效降低体系黏度。

### 2.2 微观形貌与粒径分布

如图 4 所示，对柴油分散后的各个乳胶基质样品进行显微镜观测。结果显示，所有样品的氧化剂液滴均呈规则球形，并均匀分散于连续的油相介质中，呈现出典型的油包水 (W/O) 结构。



(a)sample E1

(b)sample E2

(c)sample E3

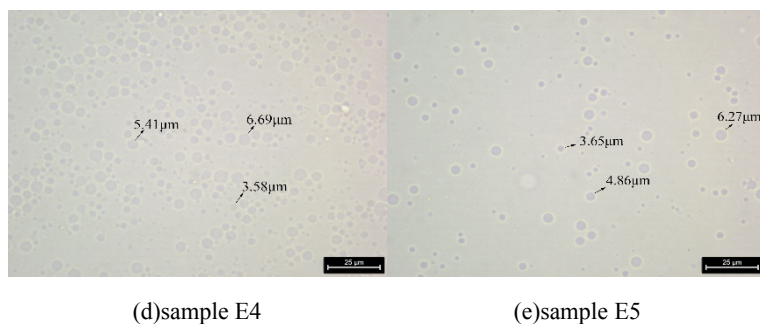


图 4 乳胶基质显微镜观测图片

Fig.4 Micrograph of the Emulsion Matrix

蜂蜡油相黏度较高，剪切阻力较大，E1 样品液滴整体尺寸较大且大小不一。存在直径超过 8.3 μm 的粗大液滴，且小液滴数量相对较少。样品 E2、E3 中随着凡士林含量的增加，大颗粒液滴明显减少，乳胶基质大小均匀度更好。E4 样品液滴尺寸进一步减小且分布更为均匀，大部分液滴直径集中在 3-6 μm 之间，未见明显的粗大颗粒或聚结现象。E5 样品液滴细小，相比 E4，其分布均匀性略有下降。

粒径测试结果进一步量化验证了显微形貌的观测结论，凡士林含量显著影响乳胶基质的微观尺寸。图 5 为各个样品的粒径分布曲线，均呈正态分布。表 3 统计了样品的索特平均粒径  $D[3,2]$ 、分布宽度  $W$  及多分散指数  $PDI$ 。

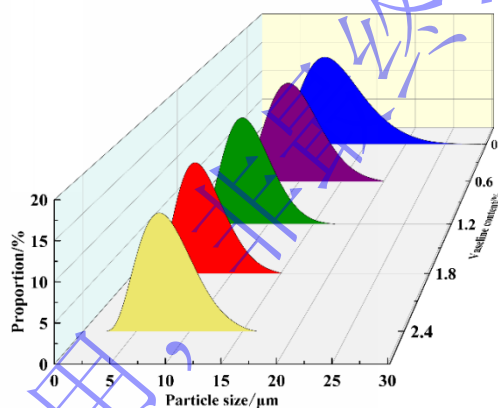


图 5 激光粒度仪测试结果

Fig.5 Particle Size Distribution Measured by a Laser Particle Size Analyzer

表3 粒径测试参数

Table 3 Particle Size Measurement Parameters

sample	$D[3,2]/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$	$PDI$
E1	8.38	22.99	2.74
E2	7.75	17.41	2.24
E3	6.66	14.23	2.13
E4	6.14	10.68	1.73
E5	5.85	12.25	2.09

$D[3,2]$ 随着凡士林质量分数从 0%增加至 2.4%， $D[3,2]$ 呈现持续下降的趋势。从 E1 的 8.38 μm 降低至 E5 的 5.85 μm，降幅达 30%。蜂蜡属于硬质蜡，熔融态黏度大；而凡士林富含短链及支链烷烃，起到稀释和增塑作用，显著降低了混合油相的黏度。根据乳化动力学理论，在相同的剪切功率下，连续相黏度的降低有利于韦伯数  $We$  的增加，使得剪切能量更有效地传递至油水界面，从而更容易克服界面张力将液滴破碎成更小的单元。

粒径分布宽度  $W$  和多分散指数  $PDI$  呈现先降低后升高的趋势，在 E4 样品处达到极小值。E1

样品 PDI 为 2.74, W 为 22.99  $\mu\text{m}$ , 粒径分布较宽, 体系较不均匀。E4 样品 PDI 为 1.73, W 为 10.68  $\mu\text{m}$ , 乳胶体系均一性较好。E5 样品的 D[3,2]降低至 5.85  $\mu\text{m}$ , PDI 增至 2.09, W 增至 12.25  $\mu\text{m}$ , 体系中支链烷烃过量时, 其较大的空间位阻会穿插并破坏乳化剂分子在油水界面的紧密有序排布, 增加乳化剂分子的界面截面积, 从而削弱了疏水尾链间的范德华相互作用。导致界面膜的机械强度下降。使得体系在乳化后期或静置过程中发生了轻微的聚结与奥氏熟化, 最终导致粒径分布重新变宽, 均一性变差。

### 2.3 热稳定性测试

采用热重实验对各个乳胶基质样品进行热分解行为与挥发产物的表征, 图 6(a)为各个乳胶基质样品的 TG 曲线, 图 6(b)为 DTG 曲线。表 4 为各样品的起始分解温度  $T_0$  和最大失重速率温度  $T_p$ 。

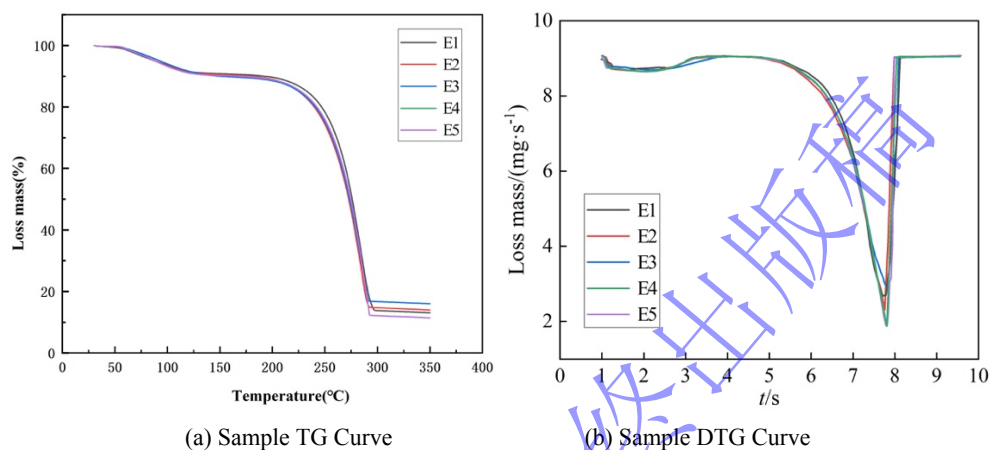


图 6 乳胶基质的 TG 和 DTG 曲线

Fig.6 TG and DTG Curves of Emulsion Matrix

各个配方的乳胶基质热分解过程相似, 25-150  $^{\circ}\text{C}$ 时, 曲线呈现轻微的质量损失, 失重率约 6%-8%, 主要对应于基质中水分的挥发。在此阶段, 各组样品差异不明显, 说明凡士林对水分的束缚能力与蜂蜡相近。在 180-300  $^{\circ}\text{C}$ , 为乳胶基质的主分解阶段, 对应 DTG 曲线上的尖锐分解峰, 硝酸铵氧化剂与油相发生剧烈的氧化还原反应, 产生大量气体, 质量急剧下降, 失重率超过 80%。300  $^{\circ}\text{C}$ 后分解反应基本结束, 曲线趋于平缓, 残留少量炭化产物。各乳胶基质样品的分解模式一致, 随着凡士林含量的增加, TG 和 DTG 曲线均呈现出明显地向低温方向移动的趋势, 表明体系的热稳定性逐渐下降。具体热分析数据如表 4 所示。

表4 乳胶基质的热分解特征参数

Table 4 Thermal Decomposition Characteristic Parameters of Emulsion Matrix

Sample	E1	E2	E3	E4	E5
$T_0/^{\circ}\text{C}$	201.3	195.8	192.1	188.2	185.3
$T_p/^{\circ}\text{C}$	287.6	286.3	282.4	277.7	275.6

起始分解温度  $T_0$  从 E1 的 201.3  $^{\circ}\text{C}$  逐渐降低至 E5 的 185.3  $^{\circ}\text{C}$ , 累计降幅达 16.0  $^{\circ}\text{C}$ , 凡士林的引入使得基质对热的敏感度增加, 更容易反应。峰值温度  $T_p$  从 E1 的 287.6  $^{\circ}\text{C}$  降至 E5 的 275.6  $^{\circ}\text{C}$ , 剧烈的反应阶段提前发生。样品 E1 采用纯蜂蜡作为油相, 蜂蜡分子主要由长链酯构成, 能形成致密且高熔点的晶体网络。这种刚性的界面膜有效阻隔了氧化剂与还原剂在高温下的接触与扩散, 因此具有最高的  $T_0$  和  $T_p$ 。凡士林主要由支链烷烃和环烷烃组成, 属于无定形微晶结构, 熔点较低且分子链柔顺性好。随着凡士林含量增加, 界面膜在高温下更容易软化、变薄甚至穿孔。凡士林较小的空间位阻使得其分子在高温下的热运动更加剧烈, 增加了与硝酸铵分子的有效碰撞频率, 使分解反应在温度降低。凡士林的引入使热分解特征温度提前, 但远高于乳化炸药生产 (约 100  $^{\circ}\text{C}$ ) 及储存温度, 仍具备良好的热安全余量。

### 2.4 高低温循环实验

乳化炸药在实际储存和运输过程中, 常面临昼夜温差或季节性温度变化。高低温循环实验通过

模拟恶劣自然环境，加速基质的老化过程，是评价界面膜强度及储存寿命的重要指标之一。表 5 为不同配方样品在 -20°C 至 50°C 循环条件下的破乳周期情况。

表5 乳胶基质在低高温循环下的稳定性测试结果

Table 5 Stability Test Results of Emulsion Matrix under Thermal Cycling

Sample	E1	E2	E3	E4	E5
Cycles to Failure	10	13	15	18	12

由表 5 可知，随着凡士林含量的增加，乳胶基质的循环稳定性呈现出显著的先上升后下降的趋势，在凡士林质量分数为 1.8% 时达到峰值。

E1 样品的稳定性最差，10 个周期后发生破乳。蜂蜡具有高度有序的晶体结构和较高的熔点，在低温环境下，油相膜发生剧烈的体积收缩并完全硬化，失去弹性。当基质内部产生热胀冷缩的应力时，刚性的蜂蜡膜无法通过形变来缓冲应力，导致界面膜发生断裂，诱发硝酸铵晶核的形成与生长。随着凡士林含量的增加，E2 至 E4 的稳定性逐渐提高。在低温下，凡士林保持了油膜的一定柔韧性，使其能够随液滴的收缩而变形，避免了膜的破裂。凡士林质量分数为 1.8% 时，稳定性最好，在 18 个周期后发生破乳。当凡士林质量分数增长至 2.4% 时，稳定性下降至 12 个周期后破乳。凡士林熔点较低且为无定形结构，过量的凡士林导致复合油膜在高温下的机械强度大幅降低，膜层变薄。在布朗运动加剧的情况下，液滴间的碰撞容易引发膜的破裂与液滴聚结，导致油水分离。

## 2.5 爆速测试

爆速 (Velocity of Detonation) 是衡量工业炸药做功能力与猛度的重要指标，它取决于炸药的配方组成、密度以及微观结构的均匀性。在其他相同条件下，不同凡士林含量的乳化炸药爆速测试结果如表 6 所示。

表6 爆速测试结果 /m/s

Table 6 Results of Detonation Velocity Measurement/m/s

sample	E1	E2	E3	E4	E5
Velocity 1/m/s	4598.3	4779.5	4936.2	5125.1	4987.3
Velocity 2/m/s	4633.9	4853.7	4997.1	5235.6	5033.4
Average velocity/m/s	4616.1	4816.6	4966.6	5180.3	5010.3
Percentage increase		+4.3%	+7.6%	+12.2%	+8.5%

随着油相中凡士林质量分数增加，乳化炸药爆速呈现出先上升后下降的趋势，凡士林质量分数为 1.8% 时达到最大值，为 5180.3 m/s。相较于 E1，E4 的爆速提升了 12.2%。根据热点理论，乳化炸药的爆轰反应源于敏化气泡受冲击波绝热压缩形成的高温“热点”，整体反应速率高度依赖氧化剂液滴的尺寸。在 E1 至 E4 阶段，随着凡士林含量的增加，油相黏度降低，乳化剪切效率提高，导致分散相平均粒径  $D[3,2]$  从 8.38  $\mu\text{m}$  减小至 6.14  $\mu\text{m}$ ，氧化剂与可燃剂接触的比表面积增加，热点周围相间的传质与传热距离缩短，爆轰波反应区厚度减小。爆轰波通过反应区时，化学反应更加迅速。在有限装药直径下，更薄的反应区意味着化学能在波阵面后方得以更集中、更快速地释放，为冲击波提供了更强劲的能量支撑，在宏观上表现为爆速的提升。E4 样品具有最小的多分散系数，PDI 为 1.73，微观上表现出较高的均匀性，有利于爆轰波的稳定传播，减少了波阵面的能量耗散。当凡士林含量进一步增加至 2.4% 时，其平均粒径略小于 E4，爆速降低至 5010.3 m/s。E5 的 PDI 值增长至 2.09，尽管液滴更小，但尺寸分布变宽。不均匀的微观结构会导致反应区厚度不一致，阻碍了爆轰波的稳态传播。且过量的凡士林导致界面膜过软，在敏化混合及装药过程中，部分微小气泡可能因基质支撑力不足而发生逃逸或合并，导致实际敏化效果下降。过软的基质对冲击波的阻抗匹配产生影响，产生了一定的消波作用，导致爆速下降。

## 3 结论

本研究通过添加凡士林作为复合油相调节剂，改善界面膜的流变与力学特性，显著优化了蜂蜡

基乳胶基质及乳化炸药的综合性能。实验结果表明：

(1) 在蜂蜡基乳胶基质中引入凡士林可有效降低体系的黏度。且索特平均粒径  $D[3,2]$  降低，分布宽度  $W$  及多分散指数  $PDI$  先增后减，在凡士林质量分数为 1.8% 时，均一性最好， $W$  为 10.68  $\mu\text{m}$ 、 $PDI$  为 1.73。

(2) 蜂蜡基乳胶基质引入凡士林后，热分解规律基本保持，热稳定性略微降低，但在实际工程应用中可忽略不计。其储存稳定性先增后减，凡士林质量分数为 1.8% 时，储存稳定性最好，破乳周期由 10 提升至 18。

(3) 爆轰性能方面，随着凡士林含量增加，爆速先增后减，凡士林质量分数为 1.8% 时，爆速达到峰值 5180.3 m/s，较纯蜂蜡样品爆速提升 12.2%。

最新录用，非最终出版稿

## 参考文献

- [1] 汪旭光.乳化炸药 [M].第二版.北京:冶金工业出版社,2008.  
WANG X G.Emulsion Explosives [M].2nd ed. Beijing:Metallurgical Industry Press,2008.
- [2] Mahadevan E G. Ammonium nitrate explosives for civil applications: slurries, emulsions and ammonium nitrate fuel oils[M].John Wiley & Sons,2013.
- [3] 卢军.乳化炸药生产过程的质量控制 [J].当代化工研究,2021,(08):165-166.  
Lu J.Quality Control of Emulsion Explosive Production Process [J].Modern Chemical Research,2021,(08):165-166.
- [4] 谢瑶.矿山现场混装乳化炸药中一体化油相应用研究 [J].世界有色金属,2022,(23):229-231.  
XIE Y.Study on Application of integrated oil in field mixed emulsion explosives [J].World Nonferrous Metals,2022,(23):229-231.
- [5] 王桢,马颖,陈坤龙,等.蜂蜡类残留物的科学分析研究 [J].文物保护与考古科学,2023,35(01):147-155.  
WANG Z,MA Y,CHEN K L,et al.Scientific analysis and study of beeswax residues [J].Sciences of Conservation and Archaeology,2023,35(01):147-155.
- [6] 胡洁,黄文尧,孙彦臣,等.六亚甲基四胺含量对铵胺炸药性能的影响 [J].高压物理学报,2023,37(05):151-159.  
HU J,HUANG W Y,SUN Y C,et al.Effect of Hexamethylenetetramine Content on the Performance of Ammonium-Amine Explosives [J].Chinese Journal of High Pressure Physics,2023,37(05):151-159.
- [7] 李天浩,吴红波,汪泉,等.水含量对多孔粒现场混装铵胺炸药性能的影响 [J].高压物理学报,2025,39(03):43-51.  
LI T H,WU H B,WANG Q,et al.Effect of Water Content on the Performance of Porous Granular Ammonium Nitrate On-Site Mixed Ammonium Amine Explosive [J].Chinese Journal of High Pressure Physics,2025,39(03):43-51.
- [8] CHEN J,MA H,WANG Y,et al.Effect of hydrogen-storage pressure on the detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by glass microballoons [J].Defence Technology,2022,18(5):747-754.
- [9] 张阳.乳胶基质失稳过程的规律研究[D].北京科技大学,2020.  
ZHANG Y.Study on the Evolution Characteristics of Emulsion Explosive Matrix During the Aging Process [D].University of Science and Technology Beijing,2020.
- [10] 张阳,汪旭光,王尹军,等.乳胶基质老化过程的结晶动力学研究[J],化工学报,2018,69(10):4464-4470.  
ZHANG Y,WANG X G,WANG Y J,et al.Crystallization kinetics of emulsion explosive matrix during aging process [J].CIESC Journal,2018,69(10):4464-4470.
- [11] 吴攀宇,刘锋,魏国,等.动态挤压对现场混装乳化炸药稳定性的影响[J].含能材料,2021,29(12):1160-1167.  
WU P Y,LIU F,WEI G,et al.Influence of Dynamic Extrusion on Stability of Field Mixed Emulsion Explosive [J].Energetic Materials Frontiers,2021,29(12):1160-1167.
- [12] 朱正德,刘锋,匡照,等.氮化硅含量对现场混装乳化炸药爆炸性能的影响[J].高压物理学报,2025,39(10):88-101.  
ZHU Z D,LIU F,KUANG Z,et al.Influence of Silicon Nitride Content on Explosive Performance of Bulk Emulsion Explosive [J].Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025,39(10):88-101.
- [13] SHI R, FANG G J, QIAO C X,et al.Investigation into the gel substrate fabrication of a novel ammonium amine explosive and its generic properties exploration [J].Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2024,682:132918.

- [14] 何祥,刘锋,陈皓楠,等.不同油相材料对现场混装乳化炸药抗挤压能力的影响[J].火炸药学报,2022,45(03):425-431.  
HE X,LIU F,CHEN H N,et al. Effect of Different Oil Phase Materials on the Anti-extrusion Ability of On-site Mixed Emulsion Explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022,45(03):425-431.
- [15] 黄麟,赵旭东,张英杰,等.油相材料对混装乳化炸药性能的影响[J].工程爆破,2022,28(05):112-116+148.  
HUANG L,ZHAO X D,ZHANG Y J,et al.Influence of oil phase materials on properties of mixed emulsion explosive[J]. Engineering Blasting,2022,28(05):112-116+148.
- [16] 罗海静,陈锋,卢锦华.扩大凡士林原料范围带来的问题及对策 [J].润滑油,2008,23(06):14-18.  
LUO H J,CHEN F,LU J H.The Problems Brought by Expanded Vaseline Raw Material Scope and Countermeasures [J].Lubricating Oil,2008,23(06):14-18.
- [17] 周建敏.乳化炸药基质剪切稳定性研究及应用[D].北京科技大学,2022.  
ZHOU J M.Analysis of the Shear Stability of Emulsion Explosive Matrix and Its Application[D].University of Science and Technology Beijing,2022.
- [18] Van den Pol E,Thies-Weesie D M E,Petukhov A V,et al.Influence of polydispersity on the phase behavior of colloidal goethite [J].The Journal of chemical physics,2008,129(16).
- [19] 周建敏,汪旭光,龚敏,等.剪切强度对乳胶基质流变特性影响研究[J].矿业研究与开发,2021,41(09):125-129.  
ZHOU J M,WANG X G,GONG M,et al.Effect of Shear Strength on Rheological Properties of Emulsion Matrix [J].Mining R&D,2021,41(09):125-129.

## Effect of Vaseline Modification on the Microstructure and Detonation

### Performance of Beeswax-Based Emulsion Explosives

LI Ming<sup>1</sup>, WU Hongbo<sup>2</sup>, XIN Youli<sup>1</sup>, WANG Xinqi<sup>2</sup>, HU Pengfei<sup>2</sup>, ZHAO Changxin<sup>1</sup>,  
ZHANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Chenxi<sup>1</sup>

(1. Mining Branch of Jinduicheng Molybdenum Co, Weinan 714000, Shaanxi, China;

2. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan  
232001, Anhui, China)

**Abstract:** To address engineering challenges associated with traditional beeswax-based emulsion explosives—such as high viscosity of the oil phase, difficulty in emulsification dispersion, and susceptibility to hardening and embrittlement at low temperatures—this study introduces Vaseline as a modifier. The effects of variations in the molecular structure of the oil phase on the rheology, microstructure, thermal stability, storage stability, and detonation performance of the emulsion explosives were systematically investigated. The results indicate that the abundant branched alkanes in Vaseline reduce the viscosity of the oil phase system and effectively improve shearing efficiency during the emulsification process. As the mass fraction of Vaseline increases from 0% to 2.4%, the Sauter mean diameter  $D[3,2]$  of the emulsion matrix decreases from 8.38  $\mu\text{m}$  to 5.85  $\mu\text{m}$ . Although the onset decomposition temperature  $T_0$  and the temperature of maximum weight loss rate  $T_p$  decrease slightly, the thermal stability remains within industrial safety requirements. At a Vaseline mass fraction of 1.8%, the system achieves optimal microstructural uniformity with the Polydispersity Index (PDI) dropping to 1.73. Under this condition, the resistance to high-low temperature cycles increases from 10 to 18 cycles, and the detonation velocity reaches a peak of 5180.3 m/s. This study confirms the feasibility of enhancing the comprehensive performance of emulsion explosives by tuning the oil phase microstructure, providing an economical and effective formulation optimization strategy for improving the adaptability of industrial explosives to harsh, temperature-variable environments.

**Keywords:** emulsion explosive; oil phase molecular structure; microstructure; storage stability; formulation optimization