高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

DOI：10.11858/gywlxb.20261103

ODEA 含量对混装乳胶基质微观形貌及流变特性的影响

何志伟[1]，李沅隆[1]，岳幸[1]，黄振祎[2]，岳嘉伟[3]，胡前浩[4]，戈路遥[1]

（1. 安徽理工大学化工与爆破学院，安徽 淮南 232001；
2. 江西萍乡国泰六六一科技有限公司，江西 萍乡 337000；
3. 河南华通化工有限公司，河南 信阳 465200；
4. 江西宜丰国泰化工有限责任有限公司，江西 宜春 336300）

摘 要：为探究 ODEA 对现场混装乳胶基质微观形貌与流变特性的影响，通过添加不同质量的 ODEA（油酸二乙醇酰胺）与 Span-80 进行复合，制备了 4 组样品，采用光学显微镜、激光粒度分析仪和旋转流变仪对样品的微观形貌和流变特性进行研究。结果表明：随着 ODEA 质量分数的增加，现场混装乳胶基质的平均粒径和内相粒子的分散程度先减小后增大，当 ODEA 的质量分数为 1%时，样品的平均粒径最小、分布最均匀，且爆速达到最高。ODEA 的加入可提高复合体系样品的黏度、储能模量和内聚力，且在实验温度范围内，4 组样品均满足泵送要求。与单一 Span-80 体系相比，当 ODEA 的质量分数为 1%时，样品在外力作用下的形变恢复能力最强，抗剪切稳定性最好。研究结果为现场混装乳化炸药配方中添加烷醇酰胺类小分子助乳化剂的研究提供了实验依据。

关键词：油酸二乙醇酰胺；微观结构；乳胶基质；流变特性

中图分类号：TQ564.4; O521.9　　**文献标识码：**A

现场混装乳化炸药是通过乳胶基质与敏化剂现场混制并填装的，避免了危险品运输与人工装药存在的风险，安全性得到大幅度提升，同时也是乳化炸药发展中值得关注的技术进展[1]。在露天矿山、水利基建、交通隧道及大型土石方爆破工程中乳化炸药被大量使用。乳化剂作为现场混装乳化炸药关键组分之一，其核心作用是在分散相和连续相的界面处定向吸附，通过降低体系内的界面张力，使过饱和无机盐水相在高剪切速率下均匀分散在油相中，进而形成油包水型乳胶基质。对于现阶段而言 Span-80 在现场混装乳化炸药工业化生产中被普遍使用，因其具备乳化速度快和与油相相容性好的优点。由于 Span-80 本身是混合物分子结构复杂，其中的不饱和双键容易被氧化，与水相和油相形成的界面膜较为蓬松，堆积程度松散，使乳化炸药整体稳定性减弱。因此，在现场混装乳化炸药制备的过程中，可通过复合乳化剂、改变油相组分和调节水相 pH 值等措施加强油水界面膜的强度以保障乳化炸药具有长期稳定的性能[2]，也可促进乳化炸药现场混装工艺的进步。

对于高内相乳状液而言，乳胶基质的微观形貌与宏观性能之间的关系可通过流变特性而建立[3]。通过分析黏度、黏弹以及触变性等流变参数，可对乳化剂复合、油相配比等配方进行优化；还能客观反映基质的流动性，以炸药的流动性能力为依据，优化混装车泵送的功率配置[4]。国内外学者通过改变油相介质与乳化剂类型等方法对乳化炸药的流变特性进行了研究。周建敏等[5]研究了不同剪切条件下对乳胶基质流变特性的影响，测试表明，乳胶基质的线性黏弹区随剪切速率的提高而拓宽，破坏触变网络结构所需要的能量明显增加，稳定性更好。岳幸等[6]用棉籽油替代传统的机油，研究了现场混装乳胶基质流变特性和抗振动性能的影响。结果表明，所含棉籽油的样品黏度升高，在一

收稿日期：2026-08-19；修回日期：2026-06-16
基金项目：国家自然科学基金（51404006，52274017）
通讯简介：何志伟（1979—），男，博士，教授，主要从事含能材料配方研究. E-mail：1901994950@qq.com

最终录用非最终出版稿

定范围内能满足泵送要求，当添加棉籽油的量为 2%时，抗振动效果最好。梁昊等[7]通过加入不同质量分数的 PIBSA(聚异丁烯丁二酸酐）与 Span-80 进行复合，并制备了 4 组乳胶基质样品，测试发现，当 PIBSA 的添加量为 0.5%时,样品的内向粒径较小且分布更加均匀，同时对乳胶基质的剪切应力得到增强。何志伟等[8]通过在水相中添加不同质量的甲酸铵对混装乳胶基质流变特性和热分解特性进行了研究，结果表明，添加甲酸铵样品的内聚力和弹性模量都有所增加，提高了乳胶基质的稳定性。Jianmin Zhou 等[9]使用聚合物与低分子量界面活性剂进行复配，研究复合乳化剂对乳胶基质的流变性和稳定性的改变，结果表明，乳胶基质的黏度、屈服应力和储能模量都随复配比例增加而增大。AI-Sabagh 等[10]利用瓦斯煤油制备乳化炸药，对其微观结构与流变特性进行了研究。丁士祥[11]等，通过流变仪对含蓖麻油的乳胶基质黏度变化进行研究，结果发现，样品黏度随蓖麻油含量的增加而上升，乳化炸药的线性黏弹区与屈服应变也随着蓖麻油含量的增加而增大。

ODEA（油酸二乙醇酰胺）是由油酸和二乙醇胺经过酰胺化缩合合成，其分子结构中存在可以与 Span-80 疏水基团相结合的油酰基，“填补”使用单一 Span-80 形成的界面膜间隙中，使膜结构更紧密；其亲水基团（酰胺基和羟基）又能和 Span-80 的亲水基团形成氢键，增强了界面膜结合力。为探究复合乳化剂对现场混装乳化炸药稳定性能的影响，本实验采用 ODEA 与 Span-80 制备复合乳化剂，并制备了 4 组样品，通过光学显微镜和激光粒度分析仪对待测样品的微观形貌进行了测试，利用旋转流变仪对不同 ODEA 含量乳胶基质的流动特性、黏弹性和黏温特性进行研究。为现场混装乳化炸药配方中加入烷醇酰胺类小分子助乳化剂的研究提供相关的实验依据。

1 实验

1.1 试剂与仪器

试剂：硝酸铵（AN），硝酸钠（SN），工业级；去离子水；0#柴油，SN10W-50 机油，工业级；Span-80，ODEA（油酸二乙醇酰胺）工业级。

仪器：旋转流变仪（德国安东帕公司，MCR 102e），激光粒度分析仪，光学显微镜。

1.2 样品制备

先将油相与水相组分根据表 1 中的配方配置完成后，依次放于水浴锅和加热板上加热至 90℃与 100~105℃之间，开启乳化器，调节转子的转速为 500 r/min，对油相先搅拌后，缓慢均匀的将水相倒入到油相中，再次调节转速到 1200 r/min 并搅拌 3 分钟，制得 4 组不同 ODEA 含量的现场混装乳胶基质。

表 1 现场混装乳胶基质原料配方

Table1 Raw material formula of site-mixed latex matrix

Samples	AN%	SN%	Water%	Span-80%	ODEA%	Engine oil%	Diesel%
1#	72	5	16	3	0	2	2
2#	72	5	16	2.5	0.5	2	2
3#	72	5	16	2	1	2	2
4#	72	5	16	1.5	1.5	2	2

1.3 微观形貌观测

光学显微镜测试：取少量样品置于洁净的小烧杯中，用柴油充分溶解分散后，用滴管取上层清液滴到载玻片上，盖上盖玻片，在光学显微镜载物台上放于样品，先使用低倍镜对样品进行初步定位后，换用高倍镜细致观测。调节焦距与光源的亮度，当清晰地观察到内相液滴形态、分布及均匀性，记录显微图像。

最新录用，非最终出版稿

激光粒度分析湿法测试：取少量待测的乳胶基质样品，加入其质量 20 倍的柴油进行充分稀释分散，静置 5 min 后，缓慢分次吸取上层分散液，倒入样品池中，待仪器信号稳定后，测量并记录试样的粒径分布。

1.4 爆速测试

爆速测试按照国家标准（GB/T13228）规定的测试方法进行，如图 1 为爆速测试装置。装药条件为长 25 cm 的 PVC 塑料管，外径为 40 mm、内径 34 mm，使用 3 根漆包线作为探针插入到 PVC 塑料管中，通过爆速仪对样品的爆速进行测定。

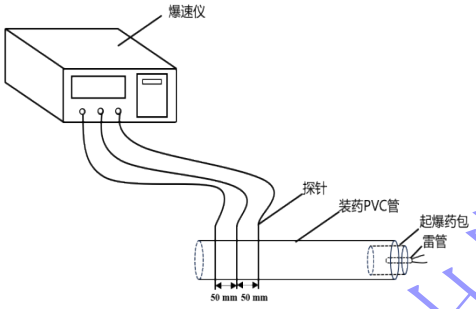


图 1 爆速测试装置

Figure1 Detonation velocity test setup

1.5 流变特性

1.5.1 流动性实验

实验选用 MCR 102e 混合型旋转流变仪，采用直径为 25 mm 的平行板夹具，设定板间距为 1 mm，测试温度控制在 25℃，取适量的乳胶基质样品置于下平行板中部，待转子降至测试间隙后，使用专用刮刀修整边缘多余试样，恒温静置 10 min，在 0.1~1000 s^{-1} 剪切速率范围内进行测试，并采集流变数据。

1.5.2 黏弹性实验

实验选用 MCR 102e 混合型旋转流变仪，采用直径为 25 mm 的平行板夹具，将振荡频率固定为 1 Hz。测试温度控制在 25℃，取适量的乳胶基质样品置于下平行板中部，待转子降至测试间隙后，用专用刮刀修整边缘多余试样，恒温静置 10 min，在 10^{-3}~2 剪切应变范围内进行测试，并采集流变数据。

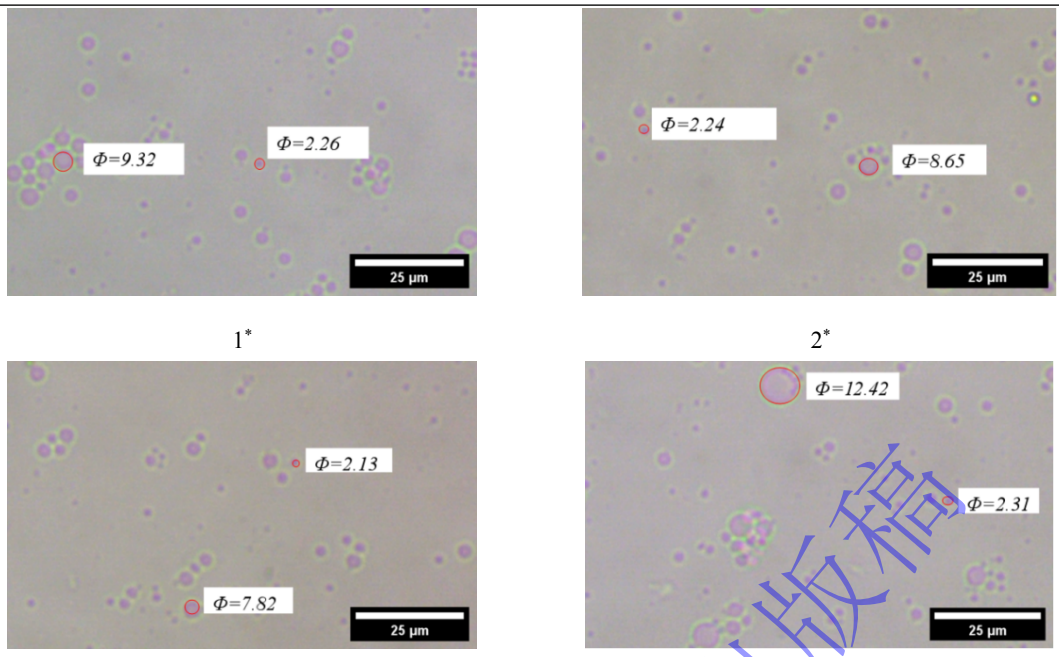
1.5.3 黏度-温度实验

实验选用 MCR 102e 混合型旋转流变仪，采用直径为 25 mm 的平行板夹具，将剪切速率固定为 0.3 s^{-1}，取适量的乳胶基质样品置于下平行板中部，待转子降至测试间隙后，用专用刮刀修整边缘多余试样，设定下平板升温区间在 25~75℃的温度范围内进行测试，并采集流变数据。

2 结果与讨论

2.1 ODEA 含量对待测样品微观形貌与内向粒径的影响

最新录用，非最终出版稿



1* 2*

3* 4*

图 2 样品内部显微形貌特征

Figure2 Internal microscopic morphological characteristics of samples

图 2 为 4 组样品的微观形貌图，由图 2 可知，1#-3#样品的最小粒径与大直径颗粒（8-9μm）的占比逐渐降低，内部粒径的分布更加均匀，4#样品大直径颗粒的占比明显增多，粒径分布范围变宽，与其他样品相比均一性较差。

4 组样品的粒径分布图，如图 3 所示，随着 ODEA 含量的增加且不高于 1%时，粒径分布曲线波峰逐渐变高、峰形逐渐变窄且向小粒径方向左移，表明 ODEA 的加入可以使样品内相液滴主体粒径变小，分布更加集中，均匀性更好；但 ODEA 含量增加到 1.5%时，粒径分布曲线波峰往右偏移，主体液滴粒径增大，分布较为分散，与光学显微镜观察的结果基本吻合。

表 2 现场混装乳胶基质内向特征测试参数

Table 2 Test Parameters for Internal Characteristics of On-site Mixed Emulsion Matrix

Samples	*D*[3,2]/μm	*W*/μm	*PDI*
1#	4.13	13.476	3.26
2#	3.86	11.523	2.98
3#	3.53	8.340	2.36
4#	4.68	15.718	3.36

最新录用，非最终出版稿

注：用 *W* 与 *D*[3,2]比值表示 *PDI*，其值越小内向粒径分布越均匀，稳定性越好，其中 *W* 为内向粒径分布范围，*D*[3,2]为 Sauter 平均直径，*PDI* 为多分散系数。

由 **Error! Reference source not found.**可知，1#-4#样品的内相平均直径、粒径分布范围和 PDI 指数均呈先减后增的趋势。与 1*号样品相比，2#和 3#样品的平均直径的降幅为 6.54%、14.53%，粒径分布范围的降幅为 14.49%、38.11%，PDI 指数的降幅为 8.59%、27.61%这与图 3 中粒径分布曲线波峰左移、波形变窄和波峰变高相互吻合。而 4#样品粒径指数均有所上升，该结果与光学显微镜呈现结果相吻合。

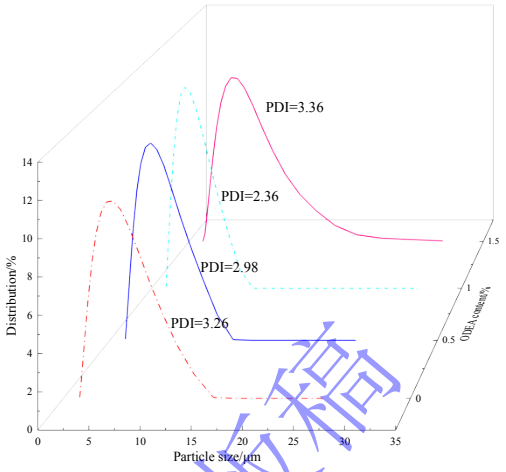


图 2 样品内部粒径分布特征

Fig.3 Internal particle size distribution characteristics of samples

分析认为，油水界面膜的强度与结构是使样品内向粒径与分散程度减小的原因，ODEA 和 Span-80 同为非离子表面活性剂，在被使用制备乳胶基质时会强化界面膜的三维网络结构[12]。一方面，ODEA 中的酰胺基团具有很强的界面活性，与 Span-80 复合时可降低油水界面张力，液滴在相同的剪切情况下更容易被剪切细化。另一方面，在乳化过程中，ODEA 可吸附于新生液滴表面，形成一种保护屏障，降低液滴间的聚集，使剪切后的小液滴能够稳定存在，使含有 ODEA 的乳胶基质粒子分散均匀粒径减小。当 ODEA 含量过多时，在油水界面处发生多层吸附，导致界面膜过厚结构松散，膜的强度降低，液滴聚结趋势增强，最终使乳胶基质内相粒径增大、分布均匀性降低。

2.2 ODEA 含量对现场混装乳化炸药爆速的影响

如表 3 所示，随着 ODEA 含量的增加 4 组现场混装乳化炸药的爆速先增加后减小，当 ODEA 的添加量为 1%时，爆速达到最大值为 4018 m·s^{-1}。相比使用单一 Span-80，ODEA 的加入可以使现场混装乳化炸药的爆速有所增加。

表 3 现场混装乳化炸药爆速随参数变化的趋势

Table3 Trend of detonation velocity variation of site-mixed emulsified explosives with parameters

Samples	Content of ODEA/%	Detonation Velocity/m·s^{-1}
1#	0	3646
2#	0.5	3867
3#	1	4018
4#	1.5	3587

分析可知，ODEA 与 Span-80 两种乳化剂的互补作用，形成的复合界面膜更加稳定，使现场混装乳化炸药内相液滴粒径有所减小且分布更均匀。更小的液滴粒径增加了体系内的比表面积，有助于氧化相与可燃相的接触，对爆轰波的稳定传播更加有利[13]-[14]，从而表现出现场混装乳化炸药的爆速有所提高。由于 ODEA 的亲水性偏强，增加量过多时，界面膜的结构发生改变，内相液滴间容易发生团聚粗化，爆速也随之降低。因此，需更加精细调控两种乳化剂的复配比例使炸药的爆速达到最优水平。

2.3 ODEA 含量对待测样品流变特性的影响

2.3.1 流动特性

如图 4 所示，为 4 组不同 ODEA 含量的待测样品流动性曲线。由图 4 可知，由于剪切速率的

最新录用，非最终出版稿

提高，4 组样品的表观黏度都逐步下降，表明待测样品是典型的非牛顿流体。在静止或低剪切速率下，乳胶基质分散相液滴间相互缠结且阻滞作用强，导致黏度较高，随剪切速率提高液滴沿流动方向排列规整黏度随之下降。

当剪切速率增加到 10 s^{-1}，1#、2#、3#和 4#样品的黏度分别为 25912、27976、30775 和 27127 mPa·s，相对于 1#样品，2#、3#和 4#样品的黏度增长幅度为 8%、18.8%和 4.7%，这表明在剪切速率保持一致的条件下，乳胶基质的表观黏度在 ODEA 的加入后有所提高；而 2#和 3#样品的黏度明显高于 4#样品的黏度。因此，4 组样品在 ODEA 含量增加的情况下，黏度呈现出先增后减的趋势。

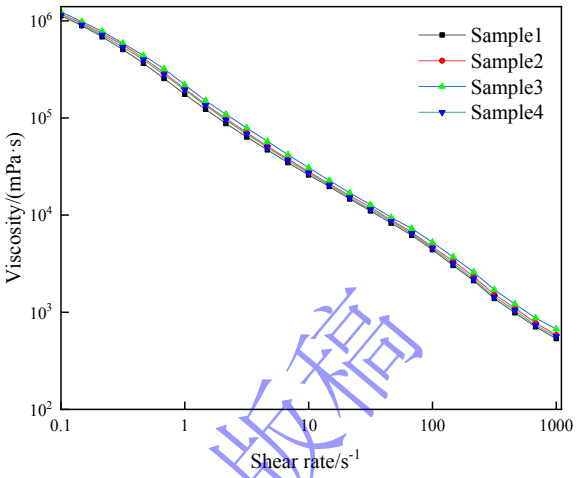


图 3 不同 ODEA 含量样品的流动特性变化曲线

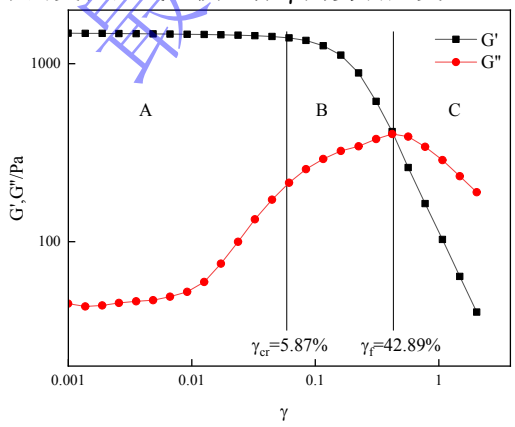
Figure 4 Variation curves of flow properties of samples with different ODEA contents

分析认为，ODEA 分子结构中存在疏水基团（油酰基）和亲水基团（酰胺键和羟基）；当 Span-80 和 ODEA 两种乳化剂复配时，Span-80 的疏水链与 ODEA 的长链烷基通过疏水缔合，在体系内可形成一种空间网络结构[15]，其亲水基团与 Span-80 的亲水基团会形成分子间氢键；使界面膜更牢固，液滴间的相互作用力增强，对乳胶基质黏度有所提升。随着 ODEA 含量的增加，形成的缔合作用增强和氢键数量上升，使界面膜内部内摩擦力增强[16]，同时界面膜与油相、水相的相互作用也会增强，使乳胶基质微粒间排列更紧密，宏观表现为黏度的升高。一方面，随着剪切速率的提高，剪切应力也随之增大，对内部分散相液滴的结构发生破坏、液滴发生了变形，导致体系内摩擦阻力下降，从而表现出表观黏度下降与流动性增强的剪切变稀行为。另一方面，当 ODEA 的含量从 1%增加到 1.5%时；乳胶基质的内相液滴粒径增大趋势明显，油水界面膜的强度也随之减弱，宏观上体现出乳胶基质黏度降低。

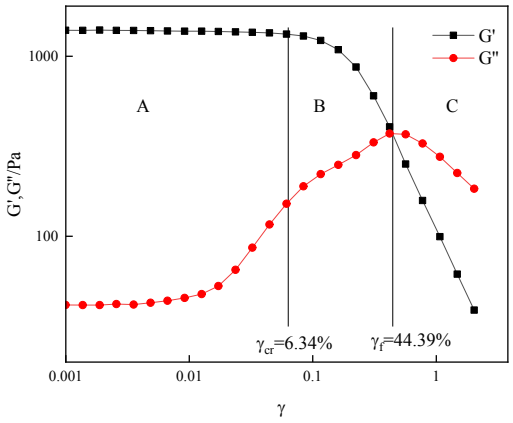
2.3.2 黏弹特性

乳化炸药是一种具有高内相比的油包水乳状液[17]，其流变性能具有较宽的可调控范围，呈现出膏状外观与可泵送性，这为实现现场混制与机械泵送奠定基础；在机械泵送过程中若乳胶基质因受到螺旋杆剪切与管壁挤压的作用而导致变形或破乳时，则会降低乳化炸药本身的性能。因此，研究乳胶基质因受外力作用时的可逆性形变具有重要意义，而黏弹性测试曲线可反映乳胶基质的形变程度与外力作用对结构恢复能力间的关系[18]。

如 **Error! Reference source not found.**所示，为储能模量（G'）和损耗模量（G"）在不同剪切应变下的变化曲线，横坐标 γ 为剪切应变。



1*



2*

录用稿件，非最终出版稿

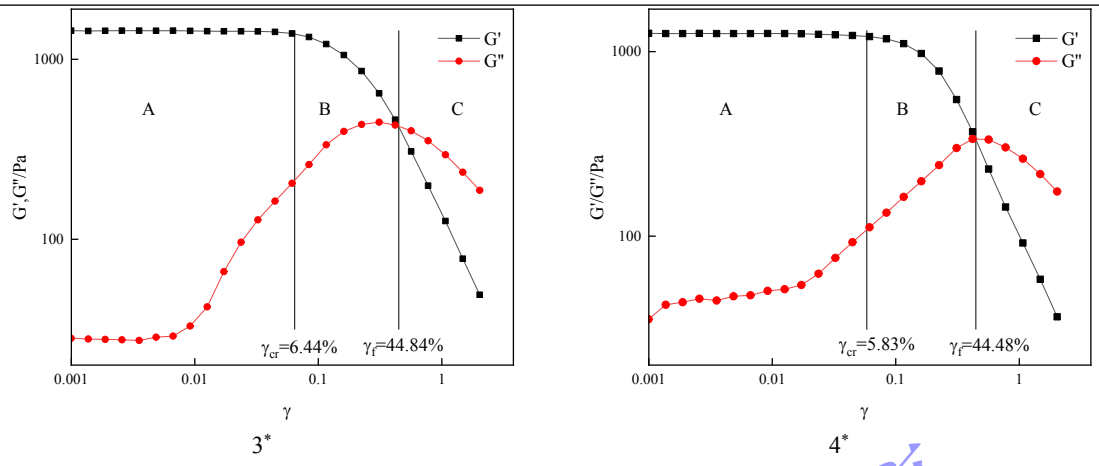


图 4 不同 ODEA 含量样品的黏弹特性变化曲线

Figure 5 Viscoelastic characteristic curves of samples with different ODEA contents

如图 5 所示，4 组样品的储能模量（G'）和损耗模量（G"）变化趋势具有一致性，在剪切应变从 10^{-3} 到 2 的范围内，均依次经历了线性黏弹区（A 区域内）、非线性黏弹区（B 区域内）和黏性形变（C 区域内）三个阶段。在 A 区域内，随 ODEA 含量增加 4 组样品的临界应变 γ_{cr} 先增大后减小，临界应变 γ_{cr} 是乳胶基质发生黏弹性形变的临界点，数值越大，表明乳胶基质的线性黏弹区越宽，内部结构抗形变能力和动态稳定性越强。在 B 区域内，当 ODEA 的含量不高于 1%时，4 组样品的非线性黏弹区宽度逐渐变宽，表明样品在过载应变下的抗损伤能力逐渐增强，但部分样品体系内发生了不可逆转的形变。当储能模量（G'）和损耗模量（G"）变化达到相同时对应的应变为流动点应变 γ_f，在 C 区域内，施加的应变大于流动点应变 γ_f，损耗模量（G"）开始高于储能模量（G'），这表明乳胶基质的黏性形变增强，抵抗外力作用的能力较弱，样品发生变形后无法恢复到初始状态。

通过计算内聚力数值来判断乳胶基质的稳定性，内聚力越大说明制得的乳胶基质稳定性越好[18]，根据（1）中的公式计算不同 ODEA 含量下的现场混装乳胶基质内聚力大小。在线性黏弹区的范围内，4 组现场混装乳胶基质储能模量平均值、临界应变和内聚力的结果如表 4 所示。

$$C = G'_{avg} \cdot \gamma_{cr} \tag{1}$$

式中：C 表示内聚力，G'_{avg} 表示储能模量平均值。

表 3 现场混装乳胶基质的 G'_{avg}，γ_{cr} 和 C

Table 4 G'_{avg}, γ_{cr} and C of On-site Mixed Emulsion Matrix

Samples	G'_{avg}/Pa	γ_{cr}%	C/Pa
1#	1368.1	5.87	80.30
2#	1372.5	6.34	87.0.2
3#	1424.1	6.44	91.71
4#	1249.1	5.83	72.77

由表 4 可知，1#、2#、3#样品的平均储能模量和内聚力逐渐增加，而 4#样品与其他 3 组样品相比，其平均储能模量与内聚力都有所减小，因此，在一定范围内 ODEA 的加入可以提高乳胶基质的稳定性。而 3#样品的平均储能模量和内聚力值最大为 1458.1 Pa 和 91.71 Pa，因此，ODEA 的添加量为 1%时样品的稳定性效果最好。

分析认为，乳胶基质受外力发生形变的恢复能力与分散相的粒径大小有关，复配乳化剂可增强乳胶基质的乳化效果，使样品的粒径有所减小，液滴之间排列更紧密，分子之间的作用力得到提升，抵抗外力的作用能力也随之增强。当 ODEA 的含量不高于 1%时，ODEA 的加入使现场混装乳胶基质的粒径有所减小，内聚力与线性黏弹区逐渐增大，受外界作用力时所具有的恢复能力得到增强。当 ODEA 的含量增加到 1.5%时，样品粒径增大，抵抗外力能力有所减弱，在相同的外力作用下，恢复到原始状态所需要的时间就会增加。

2.3.3 黏温特性

如图 6 为 4 组样品的黏温曲线，由图 6 可知，温度升高伴随着样品的表观黏度明显减小。升高温度微粒的热运动加强，油相流动阻力减弱，油相和水相与界面膜的摩檫力降低，乳胶基质的流动性随之增加，导致表观黏度显著下降；这一趋势与 ARNEUS 热活化流动机制相吻合。

在 25℃时，3#样品的黏度最高，为 333510 mPa·s；75℃时，1#样品的黏度最低，为 199907 mPa·s，说明 ODEA 与 Span-80 复配制备的乳胶基质在低温条件下具有增稠作用，在高温条件下具有保黏作用。温度从 25℃加热到 75℃时，1#、2#、3#和 4#样品的黏度分别为 199907、213540、226930 和 203810 mPa·s，黏度变化量为，77683、98320、106580 和 90130 mPa·s；所以，在相同的温度变化范围内 3#样品黏度变化范围最大。

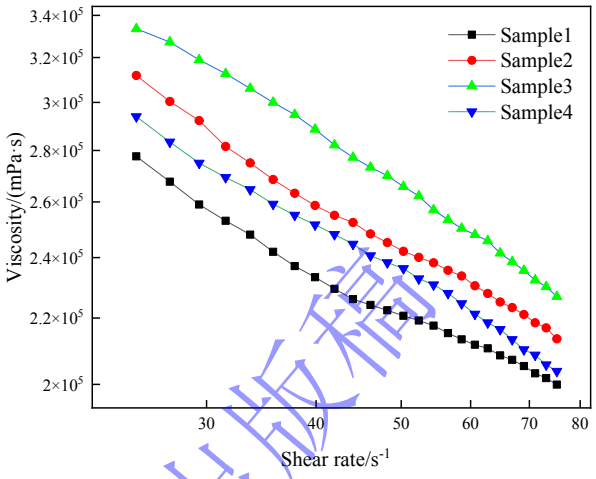


图 6 不同 ODEA 含量样品的黏温特性变化曲线

Figure6 Viscosity-temperature characteristic curves of samples with different ODEA contents

制备完成的现场混装乳胶基质温度应控制在 40~50℃的范围内，45℃时，4 组样品的黏度分别为 226070、252430、277190 和 244690 mPa·s，在相同温度下，ODEA 的加入对 4 组样品的黏度变化先增加后减少，现场混装乳胶基质在泵送到炮口前需要满足的黏度范围在 1.5×10^5~3.0×10^5 mPa·s，在此范围内泵送效果最佳[19]。低黏度的乳胶基质抗震动能力差，装药时候成型难度较高，而黏度过高会导致螺旋泵输送乳胶基质时所需工作压力变大[20]，增加物料堵塞的风险，而在此范围内，泵送的安全性能得到保障。因此，当 ODEA 的含量不高于 1.5%时，用 Span-80 与 ODEA 复配制备的 4 组现场混装乳胶基质样品的黏度都满足泵送要求。

3 结 论

（1）随着 ODEA 的加入现场混装乳胶基质的平均粒径与内相粒子的分散程度呈现先减小后增加的趋势，当 ODEA 的含量为 1%时，与纯 Span-80 相比，平均粒径、粒径分布范围和 PDI 指数分别降低了 14.53%、38.11%和 27.61%，最小粒径达到最小，分布最均匀。

（2）ODEA 的加入可对复合体系样品的黏度、储能模量与内聚力得到提高，且在实验温度范围内，4 组样均可满足泵送要求，相比单一 Span-80 体系，ODEA 的添加量为 1%时，样品受外力作用下的形变恢复能力最强，抗剪切稳定性最好。

（3）与未添加 ODEA 的现场混装乳化炸药相比，其爆速先增加后减小，当 ODEA 的含量为 1%时，爆炸性能最好，爆速达到最大。

参考文献

[1] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 第 2 版. 京: 冶金工业出版, 2008.
Wang X G. Emulsion explosives[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.

[2] 任智, 陈志荣. 表面活性剂结构与乳液稳定性之间关系研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, (01): 80-83.
Ren Z, Chen Z R. Study on the relationship between surfactant structure and emulsion stability[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2003, (01):80-83.

[3] 杨有万, 赵海荣, 张凯铭, 等. 现场混装乳化炸药基质的流变性研究[J]. 爆破器材, 2018, 47(03): 14-18.

录用稿，非最终出版稿

Yang Y W, Zhao H R, Zhang K M, et al. Study on rheological properties of on-site mixed emulsion explosive matrix[J]. Explosive Materials, 2018, 47(03):14-18.

[4] 吕春绪. 工业炸药理论[M]. 北京兵器出版社, 2003.
Lü C X. Theory of industrial explosives[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2003.

[5] 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 latex matrix[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(09):125-129.

[6] 岳幸, 何志伟, 黄振祎, 等. 棉籽油含量对现场混装乳胶基质流变特性和抗振动性能的影响[J/OL]. 高压物理学报, 1-12[2026-04-30].
Yue X, He Z W, Huang Z Y, et al. Effect of cottonseed oil content on rheological properties and vibration resistance of on-site mixed latex matrix[J/OL]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1-12[2026-04-30].

[7] 梁昊, 孙建辉, 李洪伟, 等. PIBSA 质量分数对现场混装乳化基质热分解特性和流变特性的影响[J]. 工程爆破, 2024, 30(06): 102-113.
Liang H, Sun J H, Li H W, et al. Effect of PIBSA mass fraction on thermal decomposition and rheological properties of on-site mixed emulsified matrix[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(06): 102-113.

[8] 何志伟, 岳嘉伟, 黄振祎, 等. 甲酸铵含量对现场混装乳胶基质流变及热分解性能的影响[J]. 高压物理学报, 2025, 39(01): 55-65.
He Z W, Yue J W, Huang Z Y, et al. Effect of ammonium formate content on rheological and thermal decomposition properties of on-site mixed latex matrix[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(01):55-65.

[9] Jianmin Z, Xuguang W, Min G, et al. The effect of surfactant on the rheology and stability properties of emulsion explosive matrices[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2022, 43(14): 2156-2164.

[10] Al-Sabagh A, Hussien A M, Mishrif R M, et al. Preparation and investigation of emulsion explosive matrix based on gas oil for mining process[J]. Journal of Molecular Liquids, 2017, 238 198-207.

[11] 丁士祥. 含蓖麻油混装乳化炸药的稳定性研究[D]. 安徽理工大学, 2025.
Ding S X. Study on stability of mixed emulsion explosive containing castor oil[D]. Anhui University of Science and Technology, 2025.

[12] 刘雪婧. 油基钻井液用乳化剂油/水界面吸附及对乳液结构的影响[J]. 油田化学, 2020, 37(04): 587-592.
Liu X J. Adsorption of emulsifier for oil-based drilling fluid at oil/water interface and its effect on emulsion structure[J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(04): 587-592.

[13] 刘锋, 代伟, 魏国, 等. 机油柴油配比对现场混装乳化炸药爆炸性能的影响[J]. 火炸药学报, 2025, 48(04): 352-361.
Liu F, Dai W, Wei G, et al. Influence of engine oil-diesel ratio on explosion performance of on-site mixed emulsion explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2025, 48(04): 352-361.

[14] 闫国斌, 汪旭光, 王尹军. 乳化炸药微观结构对其宏观性能的影响分析[J].工程爆破, 2016, 22(05): 40-44.
Yan G B, Wang X G, Wang Y J. Analysis of influence of microstructure of emulsion explosive on its macroscopic properties[J]. Engineering Blasting, 2016, 22(05): 40-44.

[15] 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.

录用稿件，非最终出版稿

He X, Liu F, Chen H N, et al. Effects of different oil phase materials on extrusion resistance of on-site mixed emulsion explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(03): 425-431.

[16] 杨怡霜, 熊厚盛, 解新安, 等. 分子动力学模拟研究不同乳化剂稳定的纳米乳液油/水界面行为[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 2335-2345.
Yang Y S, Xiong H S, Xie X A, et al. Molecular dynamics simulation on oil/water interface behavior of nanoemulsions stabilized by different emulsifiers[J]. Food Science, 2024, 45(23):2335-2345.

[17] 龚悦, 何杰, 汪旭光, 等. 钛粉对乳化炸药爆轰性能和热分解特性的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(04): 304-308.
Gong Y, He J, Wang X G, et al. Effect of titanium powder on detonation performance and thermal decomposition characteristics of emulsion explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(04): 304-308.

[18] 武海英. 高分子乳化剂对现场混装乳化炸药稳定性的影响[D]. 北京理工大学, 2016.
Wu H Y. Effect of polymeric emulsifier on stability of on-site mixed emulsion explosive[D]. Beijing Institute of Technology, 2016.

[19] 魏国, 刘锋, 吴攀宇, 等. 振动作用对现场混装乳化炸药稳定性的影响[J]. 火炸药学报, 2022, 45(01): 90-96.
Wei G, Liu F, Wu P Y, et al. Influence of vibration on stability of on-site mixed emulsion explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 01): 90-96.

[20] 牛草原, 黄文尧, 刘小辉, 等. 多孔粒状硝酸铵含量对现场混装乳化炸药的性能影响[J]. 火炸药学报, 2023, 46(11): 999-1006.
Niu C Y, Huang W Y, Liu X H, et al. Effect of porous granular ammonium nitrate content on properties of on-site mixed emulsion explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(11): 999-1006.

最新录用，非最终出版稿

Effect of ODEA Content on Microstructure and Rheological Properties of Mixed Emulsion Matrix

HE Zhiwei[1], LI Yuanlong[1], YUE Xing[1], HUANG Zhenyi[2], YUE Jiawei[3], HU Qianhao[4], GE Luyao[1]

(*1. School of Chemical Engineering and Blasting, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*
2. Jiangxi Pingxiang Guotai 661 Technology Co., Ltd., Pingxiang 337000, Jiangxi, China;
3. Henan Huatong Chemical Co., Ltd., Xinyang 465200, Henan, China;
4. Jiangxi Yifeng Guotai Chemical Industry Co., Ltd., Yichun 336300, Jiangxi, China)

Abstract: To investigate the effect of ODEA on the microscopic morphology and rheological properties of on-site mixed emulsion matrix, four groups of samples were prepared by compounding Span-80 with different mass fractions of ODEA (oleic acid diethanolamide). The microscopic morphology and rheological properties of the samples were characterized using an optical microscope, a laser particle size analyzer and a rotational rheometer. The results show that with the increase of ODEA mass fraction, the average particle size and the dispersion degree of internal phase droplets of the on-site mixed emulsion matrix decrease first and then increase. When the ODEA content is

1 wt%, the sample has the smallest average particle size, the most uniform particle size distribution and the highest detonation velocity. The addition of ODEA improves the viscosity, storage modulus and cohesion of the composite system samples. Within the experimental temperature range, all four groups of samples can meet the pumping requirements. Compared with the single Span-80 system, the sample with 1 wt% ODEA has the strongest deformation recovery ability under external force and the best shear stability. This study provides relevant experimental basis for the research on adding small-molecule alkanolamide co-emulsifiers into the formulation of on-site mixed emulsion explosives.
Keywords: oleic acid diethanolamide; microstructure; latex matrix; rheological properties

最新录用，非最终出版稿