

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.06.006

# 含氨基添加剂的现场混装乳化炸药的性能研究\*

王光兵<sup>①②</sup> 吴红波<sup>①</sup> 汪鑫齐<sup>①</sup> 和铁柱<sup>②</sup> 邹宗山<sup>②</sup> 黄菓树<sup>①</sup> 李天浩<sup>①</sup>

①安徽理工大学化工与爆破学院(安徽淮南,232001)

②保利民爆哈密有限公司(新疆哈密,839000)

**[摘要]** 通过控制氨基添加剂的含量、利用振动台模拟运输车振动、光学显微镜观察、电导率仪测试、高低温循环箱试验、激光粒度仪试验和爆速测试试验,研究了不同含量的氨基添加剂对现场混装乳化炸药的稳定性和爆轰性能的影响。实验结果表明,氨基添加剂在炸药水相中形成的氢键能够使乳胶基质的结构更加稳定,降低了乳胶基质的电导率,减少了振动产生的析晶,增强了乳胶基质的抗颠簸性。乳胶基质经过高低温循环未发生奥氏熟化、聚合等现象,含氨基添加剂的乳胶基质的粒径相对较小。现场混装乳化炸药中,随着氨基添加剂的含量增高,炸药的爆速呈现先升高、后降低的趋势。氨基添加剂质量分数为0.2%时,爆速最高,达到4 208.5 m/s。

**[关键词]** 乳胶基质;氨基添加剂;稳定性;抗振动

**[分类号]** TQ56; TD561

## Performances of Field-Mixed Emulsion Explosives Containing Amino Additives

WANG Guangbing<sup>①②</sup>, WU Hongbo<sup>①</sup>, WANG Xinqi<sup>①</sup>, HE Tiezhu<sup>②</sup>, ZOU Zongshan<sup>②</sup>, HUANG Guoshu<sup>①</sup>, LI Tianhao<sup>①</sup>

① School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

② Poly Explosive Hami Co., Ltd. (Xinjiang Hami, 839000)

**[ABSTRACT]** The influence of different contents of amino additives on the stability and detonation performances of field-mixed emulsion explosives was studied by controlling the content of amino additives, simulating the vibration of transport vehicles on a vibration table, observing under an optical microscope, testing with a conductivity meter, conducting high and low temperature cycling box tests, conducting laser particle size analyzer tests, and conducting detonation velocity tests. The experimental results show that the hydrogen bonds formed by amino additives in the aqueous phase of explosives could make the structure of the emulsion matrix more stable, reduce the conductivity of the emulsion matrix, decrease the crystallization caused by vibration, and enhance the anti bumps properties of the emulsion matrix. After high and low temperature cycling, the emulsion matrix does not undergo any austenitic maturation or polymerization phenomena, and the particle size of the emulsion matrix containing amino additives is relatively small. As the content of amino additives increases, detonation velocity of field-mixed emulsion explosives shows a trend of first increasing and then decreasing. When the mass fraction of amino additive is 0.2%, the detonation velocity is the highest, reaching 4 208.5 m/s.

**[KEYWORDS]** emulsion matrix; amino additive; stability; anti-vibration

## 0 引言

现场混装技术是在爆破施工现场边混合、边填装的一种工业炸药生产和应用技术,具有降本增效、环保等方面的优点。随着现代混装技术的推广和应用,逐渐形成集中生产、远程配送的作业模式,特点

是将车载乳化炸药制备系统转移到乳胶基质地面制备站,由专用运输车将乳胶基质输送到施工现场,再经装药车装填到炮孔后进行敏化成药。因需要对乳胶基质进行远距离配送,现场混装乳化炸药基质的热力学不稳定结构在输送或装填的过程中可能发生破坏,两相分离、析晶等失稳现象促使炸药稳定性下降,导致半爆、拒爆等事故发生<sup>[1-3]</sup>。

\* 收稿日期:2024-12-13

基金项目:巴里坤县科学研究与技术开发计划(blkkj23-01);新疆维吾尔自治区“天池英才”领军人才计划[XJTCCY2023(2)-BLMB2];新疆维吾尔自治区“天池英才”青年博士计划[XJTCCY2022(1)-BLMB1]

第一作者:王光兵(1988—),男,高级工程师,从事现场混装炸药性能及矿山工程应用研究。E-mail: 18299366929@163.com

通信作者: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

现场混装乳化炸药的研究已经取得了显著的进展。众多学者从不同角度进行了深入的研究,涵盖了从基质稳定性、性能优化到应用优势等多个方面。在基质稳定性方面。匡照<sup>[4]</sup>进一步研究了氯化铝含量对现场混装乳化炸药性能的影响,为优化炸药配方提供了有力支持;潘长鑫等<sup>[5]</sup>则关注了密闭环境中压力对炸药微观结构和热稳定性的影响,为炸药在特殊环境下的应用提供了理论依据;陈皓楠<sup>[6]</sup>研究了酰化磷脂复合乳化剂对炸药基质稳定性性能的影响,为乳化剂的选择和优化提供了新的思路;吴攀宇<sup>[7]</sup>通过实验研究了内相粒径对炸药稳定性的影响,揭示了粒径分布与炸药稳定性之间的关联。在应用方面,张阳等<sup>[8]</sup>分析了乳化炸药现场混装技术在掘进爆破作业中的优势,指出了该技术在提高爆破效率、降低成本和保障安全等方面的潜力;黄胜松等<sup>[9]</sup>研究了水相溶液 pH 值的大小对现场混装乳化炸药基质的储存稳定性的影响,发现当 pH 值介于 3.71~4.12 时,乳胶基质的稳定性最佳;卢文川等<sup>[10]</sup>通过实验研究了不同乳化剂和油相材料对炸药稳定性的影响,为优化炸药配方和提高炸药性能提供了有益的参考;武海英<sup>[11]</sup>研究了高分子乳化剂对炸药稳定性的影响,进一步丰富了乳化剂在炸药中的应用研究。

随着科技的不断进步和矿山开采等领域的持续发展,对乳化炸药的性能和应用要求也在不断提高。有关氨基添加剂对现场混装乳化炸药稳定性的研究却鲜有报道。现场混装乳化炸药作为工业炸药在东北、新疆等环境恶劣的地点被广泛使用,要求现场混装乳化炸药在高温、低温等环境下仍能保持良好的稳定性;集中生产、远程配送的作业模式也需要现场混装乳化炸药具有良好的抗颠簸性能。通过高低温循环储存、汽车模拟振动台、炸药爆速测试,对乳胶基质进行了稳定性及爆炸性能测试。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

试剂:硝酸铵(AN)、醋酸、氨基添加剂、乳化剂、油相等。

仪器:电动分散器、分析天平、电加热炉、光学显微镜、激光粒度仪、模拟汽车振动台、电导率仪、高低温循环箱、爆速仪等。

### 1.2 乳胶基质和现场混装乳化炸药的制备

依据表1乳胶基质配方,将硝酸铵、水、氨基添加剂混合形成水相溶液;将水相溶液加热至100~

表 1 现场混装乳化炸药配方的质量分数

Tab.1 Mass fractions of components in field-mixed emulsion explosives

序号	$w$ (硝酸铵)	$w$ (水)	$w$ (氨基添加剂)	$w$ (油相)	%
1 <sup>#</sup>	76.0	17.5	0	6.5	
2 <sup>#</sup>	75.8	17.5	0.2	6.5	
3 <sup>#</sup>	75.6	17.5	0.4	6.5	
4 <sup>#</sup>	75.4	17.5	0.6	6.5	

105 ℃后,保温;将油相加热至 90~95 ℃。电动分散器转速设置为 1 300 r/min,将加热后的水相溶液在 40 s 内加入油相中,保持分散器转速并持续 3 min,制得乳胶基质。将乳胶基质冷却至 50~55 ℃,加入适量敏化剂,搅拌至稳定发泡,制得现场混装乳化炸药。

### 1.3 模拟汽车振动台实验

在室温下,取 200 g 乳胶基质放入同规格的 250 mL 烧杯中,进行模拟汽车振动台实验,振动台振动方式为回转式,固定振幅为 25.4 mm,频率分别设置为 1.6、3.3、5.0 Hz,周期设置为 5 h。对不同配方的乳胶基质分别进行 1、2、3 个周期的测试,用来模拟不同车速和不同长时的运输。对乳胶基质进行电导率测试,拍照并结合光学显微镜进行对比,测试乳胶基质抗颠簸的性能。

### 1.4 高低温循环实验

对 4 种不同配方的乳胶基质 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>进行高低温循环实验,通过加速模拟实际作业环境中高、低温交替变化的极端条件,探究氨基添加剂对现场混装乳化炸药稳定性所产生的影响。

实验参数:高温阶段设定温度为 50 ℃,时间 8 h;低温阶段设定温度为 -30 ℃,时间 16 h。整个高低温循环时间共计 24 h,确保能够充分模拟自然界中高低温交替的周期性变化。每个循环结束后,对乳胶基质粒度进行分析和平均粒径计算。

### 1.5 乳胶基质稳定性的表征

结合光学显微镜判断析晶情况,对乳胶基质进行拍照对比,且对乳胶基质进行电导率测试,进一步判断乳胶基质的析晶情况。乳胶基质析晶越多、电导率越高,稳定性越差。并利用激光粒度仪对乳胶基质的粒径进行分析。

### 1.6 现场混装乳化炸药性能测试

对乳胶基质进行敏化制得的现场混装乳化炸药进行爆速测试。爆速测试遵循国家现行标准 GB/T 13228—2015《工业炸药爆速测定方法》中的有关规

定。采用外径 110 mm、内径 100 mm 的 PVC 管装满混装炸药,用双层塑料薄膜封口,以缠绕漆包线作为靶线探针,2 个探针靶线间距  $L$  为 40 mm。每次测试可以得到 1 个爆速数据,测试 2 次,取平均值。

## 2 结果和讨论

### 2.1 抗振动稳定性

作为一种油包水结构的乳状液,乳胶基质的水相中存在着过饱和的硝酸铵溶液。在振动实验中,当内相液滴因振动引发结晶析出时,会导致溶质的饱和蒸气压下降。这种持续的振动效应会促使原本界面稳定状态下的平行膜结构向较大的液滴一侧发生形变,以重新调整两侧的表面张力至平衡状态。在此过程中,析出的硝酸铵晶体容易穿透薄膜,在相邻液滴区域诱发大规模结晶现象,这种结晶过程会导致乳胶基质的局部结构发生变化,最终引发系统的不稳定性<sup>[12-14]</sup>。这些硝酸铵晶体颗粒在宏观层面上导致乳胶基质表面呈现出显著的泛白特征。

采用拍照结合光学显微镜观测作为观测手段,直观记录乳胶基质在不同振动条件下的微观结构变化。图 1 为未开始振动测试时乳胶基质的初始状态,乳胶基质呈现为油包水结构,无明显的晶体析出迹象。在此阶段,乳胶基质处于相对稳定的状态。

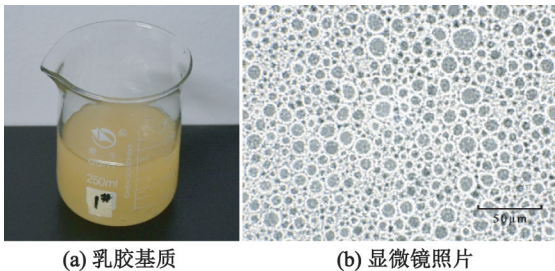


图 1 稳定状态的乳胶基质及显微镜图

Fig. 1 Emulsion matrix in stable state and its microscopic images

对乳胶基质进行了振动实验后,乳胶基质上部呈现出泛白现象。图 2 为振动后乳胶基质中出现少量析晶的状态,利用光学显微镜对析晶区域进行拍摄,观测到晶核的初步形成、分布和少量晶体的聚集,这标志着乳胶基质开始进入失稳阶段。

持续振动后,乳胶基质的晶体继续生长,晶核成长为晶体。图 3 为乳胶基质在析晶状态下的图像,可以观察到大量晶体颗粒的密集析出与聚集。

对不同含量氨基添加剂的乳胶基质同时进行模拟运输车振动实验。为了直观地观测到乳胶基质的

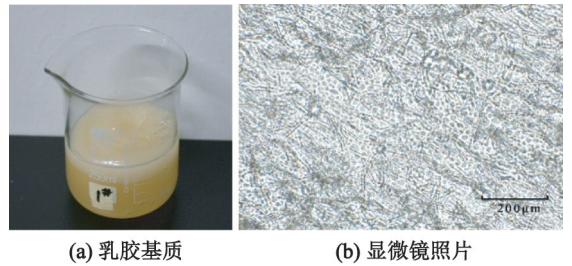


图 2 初步析晶的乳胶基质及显微镜图

Fig. 2 Emulsion matrix in preliminary crystalline state and its microscopic images

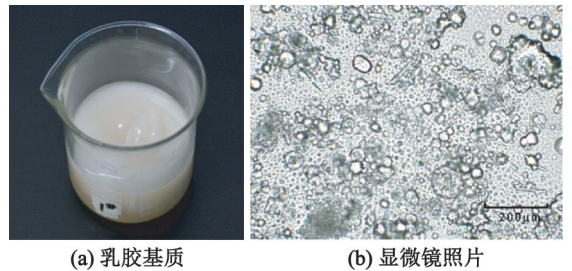


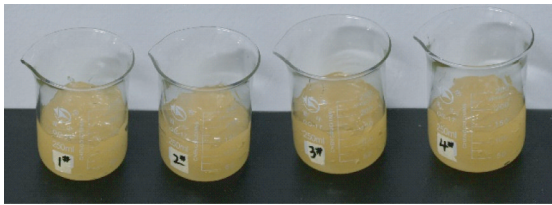
图 3 大量析晶的乳胶基质及显微镜图

Fig. 3 Emulsion matrix in a large amount of crystalline state and its microscopic images

析晶情况,对不同频率并产生析晶的乳胶基质进行拍摄。图 4 为乳胶基质初始状态和不同振动频率、不同振动时间下观测到析晶状况的照片。

乳胶基质在振动条件下发生了失稳现象,导致游离硝酸铵离子的析出,此时电导率大于未析晶之前。因此,用电导率来表征乳胶基质的稳定性,即电导率越高,乳胶基质的稳定性越差。表 2 为不同阶段测得的乳胶基质的电导率。

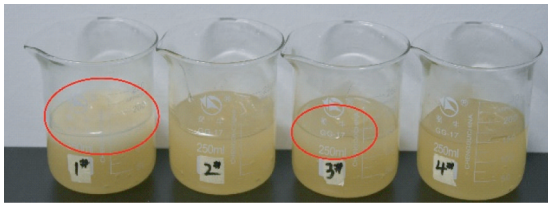
通过实验图片与电导率数据的综合分析,可以得到:在汽车模拟振动台,振幅恒定为 25.4 mm,振动频率设定为 1.6 Hz 时,不同含量的氨基添加剂制备的乳胶基质配方均表现出良好的抗颠簸稳定性。向乳胶基质中添加氨基添加剂对稳定性的改善效果无法很好地显现出来,乳胶基质外观及电导率未见明显差异。当振动频率提升至 3.3 Hz 时,乳胶基质的稳定性开始呈现出变化。在持续振动 15 h 后,乳胶基质 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 的表面观察到了轻微的析晶现象,此时电导率的变化相对较小,但仍可作为稳定性开始下降的初步迹象。将振动频率增加至 5.0 Hz 时,乳胶基质的外观与电导率均变化明显。配方 1<sup>#</sup> 析晶现象最为严重,而配方 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 虽然也出现了不同程度的析晶,但相较于配方 1<sup>#</sup>,稳定性表现更为优异。乳胶基质 4<sup>#</sup> 的电导率最低,析晶最少。结果表明,配方 1<sup>#</sup> 在长距离、长时间的运输条件下表



(a) 振动开始前



(b) 3.3 Hz、15 h 振动后



(c) 5.0 Hz、10 h 振动后



(d) 5.0 Hz、15 h 振动后

图 4 振动后各个阶段的乳胶基质状态出现的变化

Fig. 4 State changes of emulsion matrix at various stages after vibration

表 2 电导率

Tab. 2 Conductivity

频率/ Hz	周期	电导率/( $\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )			
		1#	2#	3#	4#
1.6	0	0.020	0.021	0.020	0.020
1.6	1	0.021	0.021	0.020	0.020
1.6	2	0.022	0.021	0.021	0.021
1.6	3	0.022	0.022	0.021	0.021
3.3	0	0.020	0.021	0.020	0.020
3.3	1	0.021	0.021	0.021	0.021
3.3	2	0.021	0.022	0.022	0.021
3.3	3	0.026	0.022	0.023	0.022
5.0	0	0.022	0.021	0.020	0.020
5.0	1	0.023	0.023	0.021	0.021
5.0	2	0.031	0.023	0.022	0.021
5.0	3	0.039	0.025	0.025	0.022

现出了较差的稳定性,析晶现象与电导率的变化均较为显著。相比之下,配方 2#、3#和 4#则保持了相对较好的稳定性,这表明在配方中添加的氨基添加剂能提高乳胶基质的稳定性。

氨基添加剂的化学式为  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ , 结构中的硫原子与 2 个氨基 ( $-\text{NH}_2$ ) 相连, 形成 1 个五元环状结构。氨基添加剂分子中含有氨基, 氨基中氮原子的电负性较大, 氢原子可以与水中的氧原子形成氢键  $\text{N}-\text{H}\cdots\text{O}$ ; 同时, 水中的氢原子也可以和氨基添加剂分子中的氮原子形成氢键  $\text{O}-\text{H}\cdots\text{N}$ 。乳胶基质水相为过饱和的硝酸铵溶液, 在振动环境下, 油包水的结构容易被破坏, 硝酸铵从溶液中析出, 形成晶体。氢键的形成增强了乳胶基质中分子间的相互作用力, 使  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{NO}_3^-$  结合更加困难, 形成硝酸铵晶体的难度增加, 从而提高了乳胶基质抗颠簸的稳定性。

## 2.2 高低温循环

将各个配方的乳胶基质放入相同容器, 同时放入高低温循环箱内, 进行高低温循环实验。在每个完整的循环周期结束后, 立即对乳胶基质样品进行粒径分布的检测分析。乳胶基质样品的粒径均符合正态分布规律。为了更准确地量化乳胶基质的粒径特征, 选用表面平均粒径  $D[3, 2]$  作为表征参数。

在循环 15 个周期之后, 样品 1#、2#、3#、4# 均出现不同程度的析晶, 停止高低温循环实验。图 5 为不同含量氨基添加剂的乳胶基质在未严重析晶前的表面平均粒径。

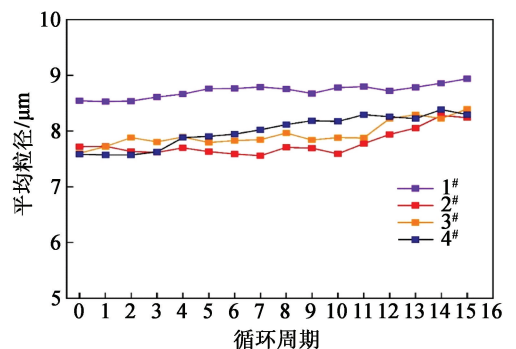


图 5 不同配方的乳胶基质高低温循环不同周期后的平均粒径

Fig. 5 Average particle size of emulsion matrix with different formulations during different cycles under high and low temperature cycling

由图 5 可知, 随着老化时间的延长, 在乳胶基质发生显著析晶之前, 内相液滴的平均直径并未发生显著变化。随着循环周期的增加, 乳胶基质的粒径略微增长, 乳胶基质 1# 维持在  $8.7 \mu\text{m}$  左右, 乳胶基

质2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>的粒径维持在7.8 μm左右。该阶段,乳胶基质的粒径分布相对稳定。乳胶基质在老化实验期间并未发生奥氏熟化或明显的聚合现象<sup>[14]</sup>。

相较于乳胶基质2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>,乳胶基质1<sup>#</sup>的粒径较大。乳胶基质2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>的粒径较小,且差异较小。在乳胶基质中加入氨基添加剂,能够一定程度上降低乳胶基质内相液滴的平均直径。氨基添加剂中的氨基同水相中的氮、氢、氧可形成氢键,氢键提高了水相中分子间的作用力,水相分子间的排布更加紧密,从而导致粒径降低。

### 2.3 炸药性能测试

对样品1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>的现场混装乳化炸药进行爆速测试,并求平均值。结果如表3所示。

表3 不同含量氨基添加剂制备乳化炸药的爆速

Tab.3 Explosive velocity of emulsion explosives prepared with different proportions of amino additives

	m/s			
样品	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>
爆速	3 800.3	4 208.5	4 045.3	3 782.1

样品1<sup>#</sup>与样品4<sup>#</sup>制备的乳化炸药的爆速相对较低,从样品1<sup>#</sup>至样品2<sup>#</sup>,爆速呈现升高趋势;从样品2<sup>#</sup>至样品4<sup>#</sup>时,爆速呈现出降低趋势。其中,样品2<sup>#</sup>制备的乳化炸药的爆速达到了最高,为4 208.5 m/s。

氨基添加剂并非作为炸药的主要爆炸成分或敏化剂而被加入,氨基添加剂会同水相形成氢键。氨基添加剂含量较低时,在现场混装乳化炸药爆轰过程中,氧化剂与可燃剂因为氢键的存在而更加紧密;爆轰反应开始时,反应能够更有效地传递,有助于提高爆轰反应的速度和完全程度。当氨基添加剂含量增高时,氢键数量也随之增多,在现场混装乳化炸药受热时,氢键首先需要吸热而发生断裂<sup>[15]</sup>;爆速为爆轰波在炸药中稳定传播的速度,爆轰波由化学反应区和前沿冲击波组成,反应区产生的能量向未反应区传递,并提供使前沿冲击波稳定传播的能量,氢键断裂需要吸收一定热量,降低了化学反应速率,从而使爆速降低。

## 3 结论

通过在现场混装乳化炸药中添加不同含量的氨基添加剂,采用激光粒度仪、显微镜观测、模拟汽车振动台、高低温循环箱、爆速仪等对不同氨基添加剂含量的乳胶基质进行了稳定性分析,并对经过敏化

后的乳化炸药的爆炸性能进行了测试,得出了以下结论:

1)外界振动较大、持续时间较长时,在乳胶基质配方中添加氨基添加剂,氨基添加剂同水相中的物质产生氢键,可以提高乳胶基质的抗颠簸稳定性。氨基添加剂在配方中的质量分数占0.6%时,外观和电导率均表明,乳胶基质具有较高的稳定性。

2)不同氨基添加剂含量的乳胶基质经过高低温循环,粒径随着循环周期的增加变化较小。其中,相较于添加了氨基添加剂的乳胶基质,未添加氨基添加剂的乳胶基质粒径更大,为8.7 μm左右;添加质量分数为0.2%、0.4%、0.6%氨基添加剂的乳胶基质的粒径相差较小,粒径在7.8 μm左右。在乳胶基质中添加氨基添加剂能够降低平均粒径,从而提高现场混装乳化炸药的稳定性。

3)氨基添加剂质量分数含量为0.2%时,制备的乳化炸药的爆速最高,达到4 208.5 m/s。随着氨基添加剂的含量继续增加,爆速降低。爆速随着氨基添加剂含量的增加呈现出先增高、后降低的趋势。

## 参考文献

- [1] ZHAO H R, ZHANG K M. The structure recovery capacity of highly concentrated emulsions under shear flow via studying their rheology [J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2018, 39(7): 970-976.
- [2] MASALOVA I, MALKIN A Y. Peculiarities of rheological properties and flow of highly concentrated emulsions: the role of concentration and droplet size [J]. *Colloid Journal*, 2007, 69(2): 185-197.
- [3] TSHILUMBU N N, MASALOVA I. Stabilization of highly concentrated emulsions with oversaturated dispersed phase: effect of surfactant/particle ratio [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 120: 216-233.
- [4] 匡照. 氮化铝含量对现场混装乳化炸药性能的影响 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.  
KUANG Z. Effect of aluminum nitride content on the performance of field-mixed emulsion explosives [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2024.
- [5] 潘长鑫, 刘锋, 毕如洁, 等. 密闭环境中压力对现场混装乳化炸药微观结构和热稳定性的影响 [J]. *含能材料*, 2024, 32(10): 1080-1090.  
PAN C X, LIU F, BI R J, et al. Effect of confined environment pressure on the microstructure and thermal stability of on-site mixed emulsion explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2024, 32(10): 1080-1090.

