DOI: 10.11858/gywlxb.20230838

模拟高原环境下敏化方式对乳化炸药爆轰性能的影响研究

陈正严[1], 吴红波[1], 蔡心远[1], 马成帅[1], 谢守东[2]

（1. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232000;
2. 宏大爆破工程集团有限责任公司, 广东 广州 510000）

摘要: 为研究高原环境对不同敏化方式乳化炸药的影响程度, 选取 3 种典型的敏化材料制备乳化炸药样品, 模拟并对比分析了高原环境（−20 ℃、约 0.05 MPa）储存后乳化炸药的微观结构和爆轰性能变化。结果表明: 低温低压下的高原环境主要从加剧破坏乳化体系稳定性与热点分布两方面影响炸药的性能, 在该环境下化学敏化炸药相较于物理敏化炸药的析晶程度较低, 但热点变化较大, 导致爆轰性能下降; 物理敏化中, 膨胀珍珠岩炸药晶体的生长方式更加复杂, 因此更易破乳析晶, 储存稳定性与爆轰性能均有明显降低; 相对而言, 树脂微球炸药在低温低压下的析晶程度与爆轰性能均较稳定。综合上述结果, 树脂微球乳化炸药具有更好的高原适应性。

关键词: 高原爆破; 低温低压; 乳化炸药; 敏化方式; 树脂微球; 膨胀珍珠岩

中图分类号: O389; TJ55 **文献标志码:** A

乳化炸药以其爆炸性能优良、材料来源广泛、使用安全性好等优点被广泛应用于工程爆破中[1]。近年来, 随着西部能源开发的推进, 高原冻土爆破作业已成为民爆施工的重点课题。目前, 在工程应用中多使用药卷型化学敏化炸药作为起爆药包, 但由于高原地区低温低压环境的特殊性, 乳化炸药的稳定性往往无法保证[2], 甚至会发生半爆或拒爆[3−4]。

为提升乳化炸药的高原适应性, 研究人员开展了进一步的优化研究工作。叶志文等[5] 使用由聚异丁烯丁二酰亚胺类乳化剂和 Span-80 乳化剂有机合成的 NH 乳化剂, 制得的乳化炸药延长了高、低温储存时间。吴红波等[6] 在乳化炸药水相中添加了少量二甲基亚砜, 一定程度上降低了低温条件下炸药析晶程度, 并增强了炸药的爆轰性能。朱可可等[7] 将 3 种不同油相制备的乳化炸药进行低温储存, 发现分子直链结构越多, 油相黏度越大, 制备的乳化炸药猛度下降程度越小。Breakwell 等[8] 通过向油相材料中加入一定的聚合物, 提升了油水界面膜的强度, 增强了乳化炸药在低温条件下的爆轰性能。现有研究多以提升炸药的耐低温性能为切入点, 但高原环境的低压条件对于炸药内部热点的影响同样不可忽视。敏化剂为炸药体系提供了主要热点, 因此从敏化角度研究乳化炸药的高原适应性具有重要意义。

随着乳化炸药的精细化发展, 除了以亚硝酸钠为代表的化学敏化剂外, 研究人员已研制出众多可用于敏化的材料。程扬帆等[9−11] 和 Fang 等[12] 将含有不同种类含能材料的中空微囊作为乳化炸药的敏化材料, 在解决动压减敏问题的同时, 较大地提升了乳化炸药的爆轰性能。孙宝亮等[13] 研制出以硅藻土颗粒为敏化材料的低爆速乳化炸药, 在爆炸复合领域具有良好的应用前景。谢圣艳等[14−15] 评价了树脂微球乳化炸药在常温和高温环境下的表现, 认为其具有良好的爆轰性能和热安定性。Liu 等[16] 研究了施加压力和敏化剂加入量对珍珠岩乳化炸药性能的影响, 总结了适用于水下爆破的珍珠岩含量。

* **收稿日期:** 2023-12-26; **修回日期:** 2024-01-30
基金项目: 安徽高校自然科学研究重点项目（KJ2019A0121）
作者简介: 陈正严（1999— ）, 男, 硕士, 主要从事乳化炸药与爆炸效应研究. E-mail: 1710628330@qq.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

本研究选取亚硝酸钠、膨化树脂微球和膨胀珍珠岩 3 种典型的敏化材料分别制备乳化炸药样品，模拟高原环境储存，记录样品的析晶程度变化，观察样品的微观结构，并结合不同样品的爆轰性能参数分析其高原环境适应性，为工程实际应用提供一定的实验和理论依据。

1　实验方法

1.1　乳化炸药试样制备

硝酸铵（AN），工业级，河南永昌硝基肥有限公司生产；硝酸钠（SN），工业级，河北轩然化工有限公司生产；乳化炸药专用复合蜡，安徽向科化工有限公司生产；T154 高分子乳化剂，江苏剑峤化工有限公司生产；亚硝酸钠，工业级，济南七彩化工有限公司生产；柠檬酸，分析纯，蚌埠万辰化工有限公司生产；膨化树脂微球，密度 0.016 g/cm^3，雅化集团三台化工有限公司生产；膨胀珍珠岩，20～30 目，密度 0.05 g/cm^3，淮南舜泰化工有限公司生产；JFS550 变速分散机，杭州齐威仪器有限公司生产。

按表 1 配比称取相应质量的硝酸铵、硝酸钠和水，混合加热至 110 ℃ 左右作为水相材料，称取复合蜡和乳化剂混合加热至 90 ℃ 左右作为油相材料，将油相先倒入高速分散装置中，转速设置为 800 r/min，随后缓慢将水相加入其中，完全加入后再将转速提高至 1 200 r/min，充分分散 3 min 后得到乳化基质。

表 1　乳化基质配方

Table 1　Emulsified matrix formulation

Ingredients	Proportion/%
AN	74
SN	9
H_2O	11
Compound wax	4
Emulsifier	2

密度作为炸药的重要指标之一，在实际生产应用中的要求非常严格[17−18]。为控制乳化炸药的初始密度相同，本研究严格控制不同敏化物质的加入量，将制备的乳化基质分为 3 份，分别加入基质质量分数为 0.4% 的亚硝酸钠、0.5% 的膨化树脂微球和 2.0% 的膨胀珍珠岩，在分散机中以 100 r/min 的转速充分混合均匀，最终得到药卷密度均为 1.15 g/cm^3 的 3 种乳化炸药样品，分别标记为样品 1、样品 2 和样品 3。

1.2　模拟高原环境储存条件

针对海拔 5 km 左右的高原环境对样品进行模拟储存。在该海拔环境下，气压约为 0.05 MPa，气温可达−20 ℃。将 3 种乳化炸药样品放置在密闭容器中，抽取气压至 0.05 MPa，将密闭容器放入−20 ℃ 的恒温冰箱中冷冻储存。

1.3　微观结构观测

采用 XSP-86 无限远生物显微镜对储存 1、15、30 d 后的各组乳化炸药样品进行微观结构观测。用玻璃棒取适量乳化炸药样品于载玻片上，放大 100 倍观察乳化炸药的微观形貌 。

1.4　析晶水平检测

采用溶失率实验测试各样品的析晶情况[19]。首先，将模拟高原环境储存若干天的乳化炸药样品取出，称取 20.00 g 涂抹于培养皿中；然后，将其浸入盛有 180 mL 蒸馏水的烧杯中，将烧杯放入 50 ℃ 恒温水浴箱中水浴 30 min；接着，移取 25 mL 试液于另一烧杯，加入 10 mL 甲醛溶液和 3～5 滴酚酞指示剂；最后，摇匀静置 3～5 min，用 0.1 mol/L 的 NaOH 标准溶液滴定至粉红色，30 s 内不褪色即为滴定终点，每组试样重复滴定 3 次，取 NaOH 消耗量的平均值。此过程的反应式为

$$4NH_4NO_3+6HCHO\rightarrow C_6H_{12}N_4+4HNO_3+6H_2O \tag{1}$$

$$HNO_3+NaOH\rightarrow NaNO_3+H_2O \tag{2}$$

样品的溶失率 ε 为

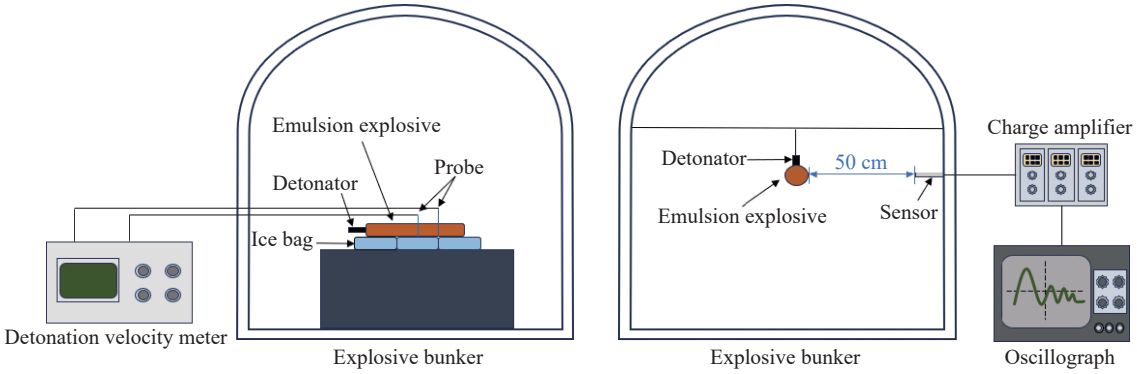
$$\varepsilon=\frac{(0.080\,04VN\times30)/5}{C_{\mathrm{kio}}m_{\mathrm{kio}}}\times100\%=\frac{0.480\,24VN}{C_{\mathrm{kio}}m_{\mathrm{kio}}}\times100\% \tag{3}$$

式中：溶失率 ε 为乳化炸药内 NH_4NO_3 可溶于甲醛溶液的比例，%；V 为滴定消耗的 NaOH 标准溶液体积，mL；N 为 NaOH 标准溶液的摩尔浓度，mol/L；C_{kio} 为内相 NH_4NO_3 的质量分数，%；m_{kio} 为称取试样的质量，g；0.080 04 为每毫克当量 NH_4NO_3 的克数，g/mg。

1.5　爆轰性能实验

当模拟高原环境储存时间达到 1、15、30 d 时将各组乳化炸药样品取出，根据标准 GB/T13228—2015 工业炸药爆速测定方法，使用 BSW-3A 型智能 5 段爆速仪测量各乳化炸药的爆速。实验在密闭的球型爆炸碉堡中进行。实验时，抽取碉堡内的空气，使气压降至 0.05 MPa，并在药卷下放置冰袋保温样品，炸药由 8 号工业雷管起爆，每组样品测 3 次取平均值。

空中冲击波超压测试：取各组乳化炸药试样 80 g，用聚乙烯塑料薄膜包裹成球形药包，在模拟高原环境中储存 1、15、30 d；取出药包，将雷管插至药包中心，悬置于密闭爆炸碉堡中，药包与压力传感器的水平距离为 50 cm；抽取碉堡内的空气，使气压达到 0.05 MPa；用雷管起爆炸药，传感器接收冲击波产生的电荷信号，经电荷放大器放大后由示波器采集，得到空中爆炸冲击波压力-时间曲线。爆速测试系统和冲击波超压测试系统如图 1 所示。



(a) Detonation velocity test system　　(b) Shock wave overpressure test system

图 1　爆轰性能测试装置示意图

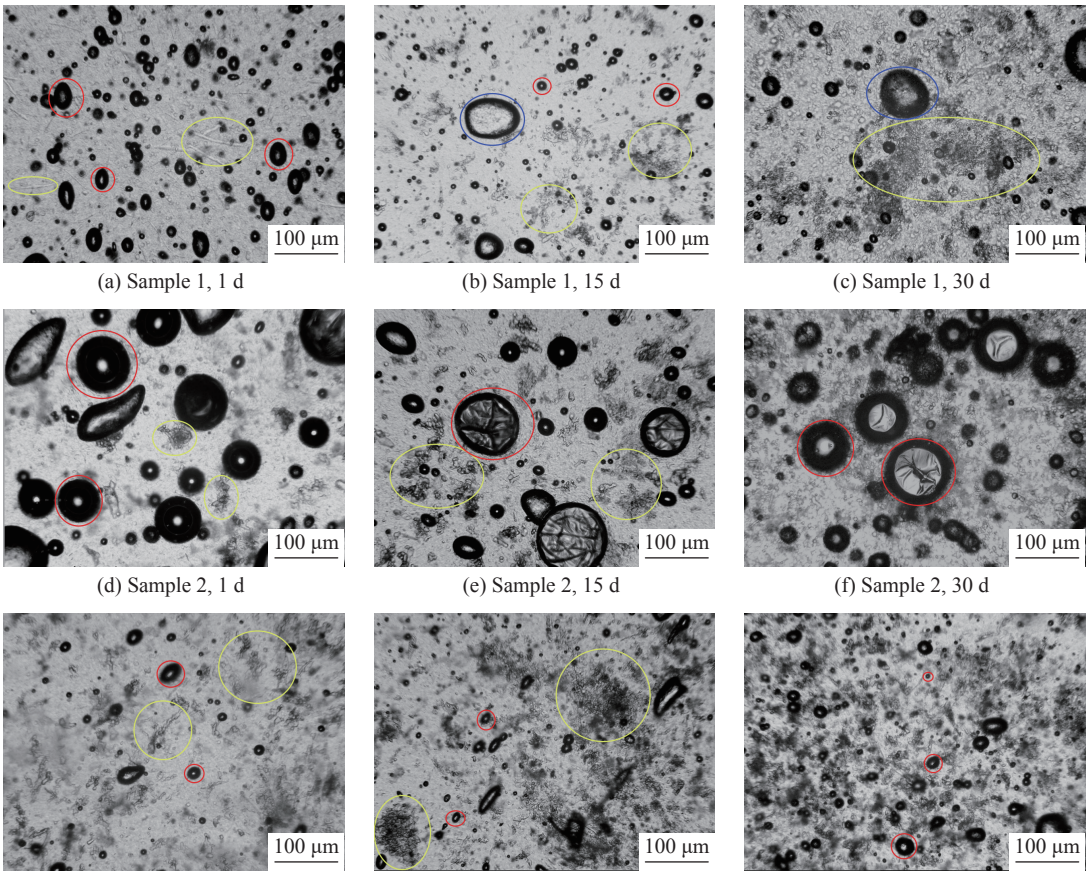
Fig. 1　Schematic diagram of the detonation performance test device

2　结果和讨论

2.1　高原环境对样品显微结构的影响

图 2 为各组乳化炸药样品分别在高原环境下储存 1、15、30 d 后的显微图像。乳化炸药热点学说认为，非均相炸药的起爆首先从局部热点处开始，进而向周围扩展，最终形成稳定爆轰[20]。炸药中能够起到热点作用的气泡（或气泡载体）直径一般在 5～200 μm 范围内，称作有效气泡，其中以直径为 50 μm 左右最佳。若同种炸药内部的有效气泡分布均匀、数量适宜，则炸药激发后的爆炸性能越佳，因此，观测样品中的气泡情况是必要的。

在模拟高原环境下存储 1 d 时，样品 1 内部的类圆形气泡直径分布在 10～40 μm 区间，整体较为均匀；随着储存时间的延长，气泡分布逐渐变得细小稀疏，直径为 1～20 μm，如图 2(a)～图 2(c) 中红圈所示。存储较长时间后，样品 1 的内部出现个别明显较大的气泡，直径可达140 μm，如图 2(b) 和图 2(c) 中蓝圈所示。在样品 2 中，不同时期观察到的微球均形态规则、分布均匀，如图 2(d)～图 2(f) 中红圈所示，有部分微球破裂，但形态仍保持圆形，应是制片时挤压所致；与高原储存 1 d 时相比，可明显观察到储存 15 和 30 d 时样品内部的大气泡数目较少，出现了部分直径小于 10 μm 的微小气泡。与之相似，长期高原储存的样品 3 中微小气泡数量相比短期储存时有所增加，如图 2(g)～图 2(i) 中红圈所示。



(a) Sample 1, 1 d　(b) Sample 1, 15 d　(c) Sample 1, 30 d

(d) Sample 2, 1 d　(e) Sample 2, 15 d　(f) Sample 2, 30 d

(g) Sample 3, 1 d　(h) Sample 3, 15 d　(i) Sample 3, 30 d

图 2　各组乳化炸药样品的显微图像

Fig. 2　Microscopic images of emulsion explosive samples in each group

分析认为，由于高原环境中外界压力有所下降，原本乳化炸药间的微小气泡将发生一定程度的膨胀，同时因为外界温度降低，乳化基质中相邻分散相液滴间的界面膜将在一定程度上融合，内相粒径增大，也为气泡的增长提供了空间。由于气泡在增长过程中较易发生聚集、合并、逃逸的现象，原本 10～40 μm 的气泡大多经聚合后形成大气泡，随后在负压的作用下逃逸脱离基质，最终留下的气泡大多为直径小于 20 μm 的微小气泡，导致高原环境下化学敏化乳化炸药中有效气泡的平均直径明显变小，数目显著减少。物理敏化乳化炸药则由于自身原本的热点载体性质更加稳定，虽然也存在气泡变化现象，但气泡数量变化较小，因此，其受高原环境的影响较小。

从图 2 中还可观察到各组样品的析晶情况，总体来看，相同储存时间下，样品 1 中的硝酸铵晶体数最少，样品 3 中的晶体数最多，样品 2 居于二者之间。储存 1 d 时，样品 1 中的晶体大多呈针状，样品 2 中的晶体大多为折叠的颗粒状，样品 3 中则为更繁多细碎的颗粒和片状晶体，且有交叠联结的趋势；随着储存天数的增长，样品 1 中的针状晶体也被颗粒状晶体取代，各组样品中析出的硝酸铵晶体数均有明显增加，并最终联结聚集成大面积的晶体，如图 2 中黄圈所示。

2.2　高原环境对样品析晶的影响

各组乳化炸药样品在模拟高原环境下储存后，其溶失率随时间的变化如图 3 所示。在高原环境下，3 种样品的溶失率均随着时间增长而明显上升，且敏化方式对乳化炸药溶失率产生显著影响。当高原环境储存期从 0 d 延长到 30 d 后，3 组乳化炸药样品的溶失率分别从 0.16%、0.27% 和 0.43% 增长至 7.23%、9.50% 和 12.88%。总体来看，当高原环境下的储存天数相同时，样品 1 的溶失率最低，样品 3 的溶失率最高。储存 30 d 时，样品 3 的溶失率比样品 1 和样品 2 分别高 73.60% 和 32.22% 。通过非线性

拟合进一步分析 3 组乳化炸药的溶失率变化情况，样品 1、样品 2 和样品 3 的溶失率分别为

$$\varepsilon(t_1) = 2.40852\,\mathrm{e}^{0.04562t_1} - 2.35702 \tag{4}$$

$$\varepsilon(t_2) = 3.30726\,\mathrm{e}^{0.04551t_2} - 3.29956 \tag{5}$$

$$\varepsilon(t_3) = 4.39411\,\mathrm{e}^{0.04726t_3} - 4.62051 \tag{6}$$

式中：t_1～t_3为乳化炸药样品 1～样品 3 的高原储存天数。

通过拟合方程推算 3 种乳化炸药在高原环境中溶失率达到 15% 时的时间，分别为 43.3、37.6、31.7 d。所需时间越长，说明该乳化炸药在高原环境下的储存稳定性越好。由此可知：采用亚硝酸钠化学敏化的乳化炸药在高原环境下更不易析晶，具有更长的储存期，膨化树脂微球敏化次之，膨胀珍珠岩敏化的乳化炸药析晶失稳现象最严重。

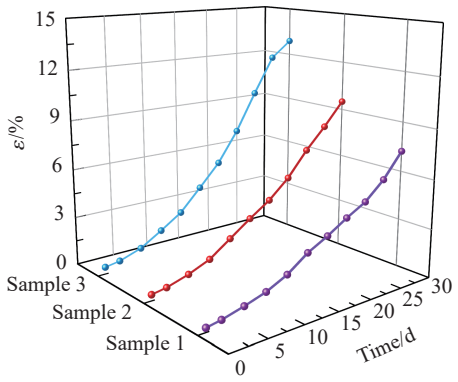


图 3　各组乳化炸药溶失率随高原储存天数的变化

Fig. 3　Plot of dissolution rate of emulsified explosives in each group as a function of storage days in plateau

乳化炸药的析晶失稳经历 2 个过程：一是乳化液滴的互相排液聚结，二是乳化基质间发生的晶体式聚结。导致后者发生的因素包括分散相过冷盐溶液中析出的硝酸铵晶体以及存在的各种固态微粒等[21−22]。结合显微观测与溶失率实验结果，分析认为，采用不同敏化方式制备的乳化炸药在高原环境储存时，其内部晶体生长过程有所不同。化学敏化乳化炸药的硝酸铵晶体生长较慢，是因为在低温低压环境下，分散相过冷盐溶液中首先会生成针状的硝酸铵晶核，随着储存时间的增加，针状晶体不断生长并刺破界面膜，这是晶体的一维生长阶段；当针状晶体生长到一定程度后将发生断裂折叠，形成单独的颗粒状或片状晶体，此时析晶过程将转向二维生长阶段；随着颗粒状与片状晶体数增多，它们将互相交叠、聚集，逐渐形成大型的晶体团，从而进入析晶的三维生长阶段，最终将在乳化体系内形成大面积析晶。在这 3 个阶段中，硝酸铵的析出速度是逐步加快的。在膨化树脂微球和膨胀珍珠岩敏化的乳化炸药内部，晶体生长会更快地进入二维和三维生长阶段。分析认为，向乳化基质中引入物理敏化剂不但会增加外相对界面膜的影响，同时也会为硝酸铵的析出提供细小的晶核，一定程度上增加了晶体初始生长的空间维度和速度，加快了析晶的发展。由于膨胀珍珠岩为易碎的多孔隙结构，与膨化树脂微球相比，其粒径分布与形态更不均匀，导致在炸药内部更易形成复杂的晶体团，因此，析晶现象更严重。

综上所述，由于 3 组样品的敏化方式不同，其内部晶核生成及晶体生长形式也不同。物理敏化的乳化炸药内部存在的固体微粒在破坏界面膜的同时也可作为初始晶核，不但降低了硝酸铵的析出难度，也增加了晶体的生长维度，加速了炸药的析晶失稳；同时，与膨胀珍珠岩相比，膨化树脂微球的粒径更均匀，表面更光滑，因此，其对析晶过程的影响相对较小。高原的低温环境大大降低了内相溶液的溶解度，增加了硝酸铵的析出量，而原本晶核越多、生长机制越复杂的乳化炸药析晶速率增长得也将越多，因此，在高原环境储存下 3 种乳化炸药的析晶程度差异较大，其中：化学敏化乳化炸药的储存稳定性最好，膨胀珍珠岩乳化炸药的储存稳定性较差，膨化树脂微球乳化炸药的储存稳定性介于二者之间。

2.3　高原环境对样品爆速的影响

爆速即爆轰波在炸药中的传播速度，当其他条件不变时，爆速主要受炸药能量及炸药结构影响[23−24]。各组乳化炸药样品的爆速随着高原环境储存时间的变化如图 4 所示。储存 30 d 时，样品 2 出现了 1 组拒爆现象。总体来看，在高原环境中储存 30 d 时，样品 2 的爆速最高，样品 3 的爆速最低，样品 1 的爆速居于两者之间。爆速均随着储存时间的延长而下降，与储存 1 d 时相比，储存 30 d 时样品 1、样品 2

和样品 3 的爆速分别下降 13.73%、7.28% 和 11.39%。样品 2 和样品 3 的爆速下降速率随着时间的增长而逐渐增加，而样品 1 的爆速则在 1～7 d 间出现最大幅度的下降。

结合析晶与显微观测结果分析，高原低温低压环境一方面会加速乳化炸药的析晶，影响乳化体系，另一方面将导致乳化炸药中热点数发生变化，二者均会影响炸药爆速。对于化学敏化乳化炸药，在高原环境储存时内部的气泡最易受到影响，炸药内可用热点数的迅速减少会严重影响爆轰波在炸药内的传播，导致爆速在储存前期大幅下降，随着储存时间的延长，炸药内部有效气泡不断减少的同时，析晶程度也逐渐提高，因而拒爆现象发生的概率将逐渐增加。在物理敏化炸药中，其自身热点较为稳定，爆速的变化主要受析晶程度单方面影响，故在前期爆速的下降程度较低；但是，与化学敏化乳化炸药相比，物理敏化的析晶劣势随着时间增长而凸显，尤其是采用膨胀珍珠岩的敏化炸药，经较长时间储存后，炸药爆速仍有较大程度的降低。总体来看，膨化树脂微球敏化乳化炸药的爆速下降程度最低。

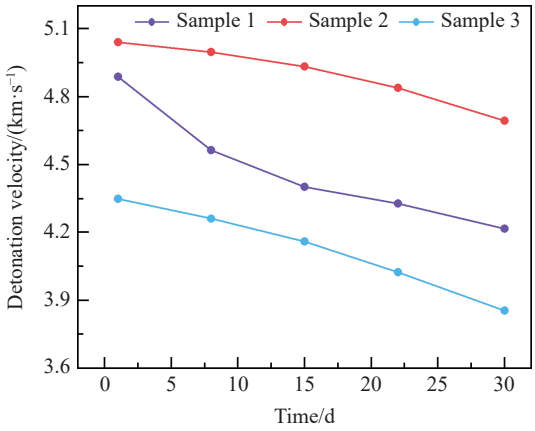


图 4　各组乳化炸药样品的爆速

Fig. 4　Detonation velocity of emulsion explosive samples in each group

2.4　高原环境对样品冲击波超压的影响

爆炸冲击波在容器内传播至刚性壁面后将发生反射叠加，因此，只选取测试系统记录到的第 1 个正压区（基线为 p=0，令第 1 个 p>0 时刻为 t_0，第 1 个 p<0 时刻为 t_1，第 1 个正压区为 t_0～t_1 时间段对应的波形）进行分析[25–26]。各组乳化炸药样品的空中超压时程曲线如图 5 所示。

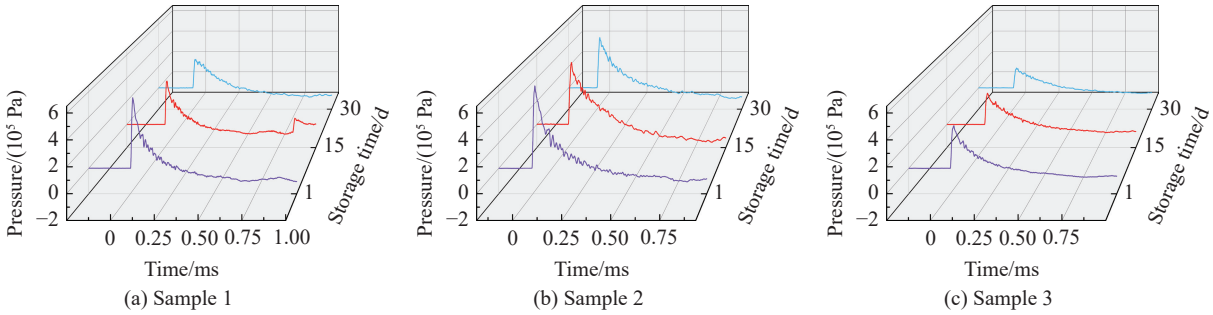


图 5　各组乳化炸药的冲击波超压时程曲线

Fig. 5　Shock wave overpressure-time history curves of emulsion explosives in each group

图 5 中各波形曲线最高点即为各组样品的空中冲击波在同一位置处产生的超压峰值。冲击波超压产生的冲量 I 与压力 p 的关系为

$$I = \int_{t_0}^{t_1} p(t)\,\mathrm{d}t \tag{7}$$

将图 3 中各个波形的第 1 个正压区对 t 进行定积分，得到各组样品的空中冲击波在该时间段内对该位置产生的冲量，超压峰值和冲量在一定程度上体现了炸药冲击波的做功能力，记录各组样品的超压峰值和冲量，结果见表 2。

对比上述数据可知，随着高原环境中的储存时间从 1 d 延长至 30 d，化学敏化炸药的峰值超压下降幅度（51.54%）最大，膨胀珍珠岩敏化炸药次之（44.02%），膨化树脂微球敏化炸药的峰值超压下降幅度最小（26.66%）；而正压作用时间内冲量的降幅则是膨胀珍珠岩敏化炸药最大（24.14%），化学敏化炸药次之（15.68%），膨化树脂微球敏化炸药最小（17.76%）。

表 2　各组乳化炸药的冲击波超压和冲量

Table 2　Shock wave overpressure and impluse of emulsion explosives in each group

Sample	Peak overpressure/kPa			Impulse/(Pa·s)		
	1 d	15 d	30 d	1 d	15 d	30 d
1	552.075	371.297	267.523	44.225	40.542	37.290
2	645.803	533.071	473.644	68.210	63.333	56.095
3	332.724	268.145	186.258	37.161	32.265	28.189

与爆速情况相似，3 种乳化炸药在高原环境储存后体系的能量密度和内部热点将受到不同程度的影响。化学敏化炸药因热点明显减少，因而爆轰反应时间延长，导致冲击波能量分散，因此超压峰值下降得最多。膨胀珍珠岩炸药受自身析晶影响，在高原环境储存条件下体系能量密度降低得更明显，整体做功能力大幅下滑，故冲击波第 1 个波的冲量下降最多。相较而言，在低温低压环境中，树脂微球炸药内部热点更加稳定，乳化体系变化有限，超压参数变化较小。此外，分析认为，由于树脂微球参与了爆轰的化学反应过程，为冲击波提供了一定能量，使得树脂微球炸药的冲量明显高于另 2 种乳化炸药。

3　结　论

将 3 种不同敏化方式的乳化炸药在高原环境下储存后，通过析晶程度测试、显微结构观测、爆速以及冲击波超压测试，分析不同炸药的稳定性与爆轰性能，得到如下结论：

(1) 在高原环境下，炸药自身晶核构成与晶体生长方式越复杂，则析晶程度的增加越显著，因此，在高原环境储存相同时间后，膨胀珍珠岩炸药的乳化体系更容易失稳，析晶破乳程度最高，化学敏化炸药的析晶程度最低；

(2) 高原环境中的低压将促进炸药内部气泡长大、聚合或逃逸，最终导致化学敏化炸药中的有效气泡数明显减少，热点分布均匀性显著下降，而物理敏化炸药内部热点受高原环境的影响相对较小；

(3) 随着炸药析晶程度和内部热点分布情况的变化，高原环境中乳化炸药的爆轰性能将受到相应的影响，其中，化学敏化炸药的爆速和冲击波超压峰值降幅最大，膨胀珍珠岩炸药的冲击波正压区冲量降幅最大，膨化树脂微球炸药的爆轰性能相对最稳定。

综合来看，膨化珍珠岩敏化的乳化炸药经低温、低压储存后析晶情况稳定，爆轰性能良好，相较于化学敏化乳化炸药和膨胀珍珠岩敏化乳化炸药，整体变化更小，更适宜在高原环境下使用。

参考文献：

[1] 汪旭光. 乳化炸药 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 3–5.

[2] 赵晓莉, 夏斌, 刘尊义, 等. 模拟高原环境对炸药爆速影响的试验研究 [J]. 爆破器材, 2015, 44(2): 36–39.
ZHAO X L, XIA B, LIU Z Y, et al. Experimental research on detonation velocity of explosive in simulated plateau environment [J]. Explosive Materials, 2015, 44(2): 36–39.

[3] 高嵩. 多年冻土爆破施工技术应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006: 24.

[4] 常弘毅, 汪泉, 李孝臣, 等. 高原地区爆破器材与技术研究综述 [J]. 煤矿爆破, 2022, 40(4): 1–6, 20.
CHANG H Y, WANG Q, LI X C, et al. Research on explosive materials and technology in plateau area [J]. Coal Mine Blasting, 2022, 40(4): 1–6, 20.

[5] 叶志文, 吕春绪, 刘大斌. 新型高能乳化炸药的制备及性能 [J]. 火炸药学报, 2011, 34(6): 41–44.
YE Z W, LÜ C X, LIU D B. Preparation and properties of new high strength emulsion explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(6): 41–44.

[6] 吴红波, 杨柳, 沈占军, 等. 二甲基亚砜对乳胶基质耐低温性能及热分解特性的影响 [J]. 含能材料, 2022, 30(3): 242–249.
WU H B, YANG L, SHEN Z J, et al. Effect of dimethyl sulfoxide on low temperature resistance and thermal decomposition of emulsion explosive matrix [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(3): 242–249.

[7] 朱可可, 邓长城, 张小宇. 油相材料粘度对乳化炸药耐低温性能的影响 [J]. 火工品, 2021(3): 36–38.
ZHU K K, DENG C C, ZHANG X Y. Influence of oil phase material viscosity on low temperature resistance of emulsion explosive [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(3): 36–38.

[8] SMITH J G B. An emulsion explosive and a method of making and stabilising such explosive: EP0067520B1 [P]. 1987-09-09.

[9] 程扬帆, 刘蓉, 马宏昊, 等. 储氢材料在乳化炸药中的应用 [J]. 含能材料, 2013, 21(2): 268–272.
CHENG Y F, LIU R, MA H H, et al. Hydrogen storage materials applied in emulsion explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(2): 268–272.

[10] 程扬帆, 马宏昊, 沈兆武. 氢化镁储氢型乳化炸药的爆炸特性研究 [J]. 高压物理学报, 2013, 27(1): 45–50.
CHENG Y F, MA H H, SHEN Z W. Detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by MgH_2 [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(1): 45–50.

[11] 程扬帆, 马宏昊, 沈兆武. MgH_2 对乳化炸药的压力减敏影响实验 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(4): 427–432.
CHENG Y F, MA H H, SHEN Z W. Experimental research on pressure desensitization of emulsion explosive sensitized by MgH_2 [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(4): 427–432.

[12] FANG H, CHENG Y F, TAO C, et al. Effects of content and particle size of cenospheres on the detonation characteristics of emulsion explosive [J]. Journal of Energetic Materials, 2021, 39(2): 197–214.

[13] 孙宝亮, 黄文尧, 汪泉, 等. 硅藻土为载体的低爆速乳化炸药制备与性能 [J]. 含能材料, 2023, 31(1): 26–34.
SUN B L, HUANG W Y, WANG Q, et al. Preparation and performance of diatomite emulsion explosive with low detonation velocity [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(1): 26–34.

[14] 谢圣艳, 何俊蓉, 肖景龙, 等. 树脂微球敏化乳化炸药技术研究 [J]. 爆破器材, 2018, 47(1): 26–31.
XIE S Y, HE J R, XIAO J L, et al. Study on sensitizing technology of emulsion explosive sensitized by resin microspheres [J]. Explosive Materials, 2018, 47(1): 26–31.

[15] 谢圣艳, 何俊蓉, 李斌, 等. 树脂微球敏化乳化炸药的安全性研究 [J]. 爆破器材, 2018, 47(3): 46–50.
XIE S Y, HE J R, LI B, et al. Safety of emulsion explosives sensitized by resin microspheres [J]. Explosive Materials, 2018, 47(3): 46–50.

[16] LIU L, QI H Y, ZHANG H T, et al. Effect of perlite content on performance of emulsion explosive in under-water environment [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2381(1): 012102.

[17] 杨长青, 王有会. 浅谈影响乳胶基质物理敏化密度的因素 [J]. 爆破器材, 2011, 40(2): 20–22.
YANG C Q, WANG Y H. Brief discussion on the factors affecting physical sensitization density of emulsion matrix [J]. Explosive Materials, 2011, 40(2): 20–22.

[18] 王琦. 膨胀树脂微球敏化乳化炸药爆炸特性及安定性研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020: 14–35.

[19] ZHANG K M, CUI Z Z, CHEN X Y, et al. Peculiarity for the stability of three different emulsion explosives [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2022, 43(11): 1725–1734.

[20] YUNOSHEV A S, BORDZILOVSKII S A, VORONIN M S, et al. Detonation pressure of an emulsion explosive sensitized by polymer microballoons [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2019, 55(4): 426–433.

[21] 张阳. 乳胶基质失稳过程的规律研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2019: 67–70.

[22] ZHANG K M, NI O Q, HUANG J D, et al. A facile and efficient method to investigate the effect of the nature of surfactant and continuous phase on the performance of emulsion explosive [J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 249: 203–210.

[23] KRAMARCZYK B, PYTLIK M, MERTUSZKA P, et al. Novel sensitizing agent formulation for bulk emulsion explosives with improved energetic parameters [J]. Materials, 2022, 15(3): 900.

[24] CHEN J P, MA H H, WANG Y X, 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.

[25] 李子涵, 程扬帆, 王浩, 等. 负压环境对乳化炸药爆炸温度场和有害效应的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(8): 082301.
LI Z H, CHENG Y F, WANG H, et al. Influences of negative pressure conditions on the explosion temperature field and harmful effects of emulsion explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(8): 082301.

[26] AFANASEV P I, MAKHMUDOV K F. Assessment of the parameters of a shock wave on the wall of an explosion cavity with the refraction of a detonation wave of emulsion explosives [J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 3976.

Effect of Aensitization Methods on Detonation Performance of Emulsion Explosive in Simulated Plateau Environment

CHEN Zhengyan[1], WU Hongbo[1], CAI Xinyuan[1], MA Chengshuai[1], XIE Shoudong[2]

（1. *School of Chemical and Blasting Engineering*, *Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232000, *Anhui*, *China*;

2. *Hongda Blasting Engineering Group Co.*, *Ltd.*, *Guangzhou* 510000, *Guangdong*, *China*）

Abstract: In order to study the influence of plateau environment on emulsion explosive sensitized by different methods, three typical sensitization materials were selected to prepare emulsion explosive samples. The changes in microstructure and detonation performance of samples stored in simulated plateau environment (−20 ℃, about 0.05 MPa) were analyzed. The results showed that the low temperature and low pressure of plateau environment mainly affects the performance of explosives from the aspects of aggravating the stability of emulsion system and the distribution of hot spots. In the plateau environment, the crystallization degree of chemically sensitized explosives is lower than that of physically sensitized explosives but the hot spots change greatly, leading to a decrease in detonation performance. In the physical sensitization, the growth mode of expanded perlite explosive crystal is more complex, so it is easier to demulsify and crystallize, and the storage stability and detonation performance are significantly reduced. The degree of crystallization and detonation performance of resin microsphere explosive are relatively stable under low temperature and low pressure. In general, resin microspheres emulsion explosive has better adaptability to plateau.

Keywords: blasting at plateau; low temperature and low pressure; emulsion explosive; sensitization method; resin microspheres; expanded perlite