

# 深水静压作用对铵胺炸药性能的影响\*

王俊豪, 黄文尧, 汪泉, 童凯, 袁文婕, 黄大光, 翁秋红

(安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为探究铵胺炸药在深水静压作用下的爆炸性能, 设计了深水静压作用下爆破装药的实验模拟装置, 使用光学显微镜观测炸药在常压和 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa 深水静压作用 1 h 卸压复原后的微观气泡变化, 采用 Fiji 图像分析技术, 对敏化气泡分布尺寸进行微观表征, 并对持续静压作用下的炸药密度进行测量, 测试了外径为 40 mm 的 PVC 装药管中炸药在常压下、卸压后以及持续静压作用下的爆速。结果表明, 深水静压作用对铵胺炸药性能具有显著影响, 对于卸压复原后的铵胺炸药, 在 0~0.2 MPa 区间爆速由 4313 m/s 提升至 4621 m/s, 超过 0.2 MPa 后持续下降, 0.4 MPa 时为 4072 m/s; 对于持续静压作用下的铵胺炸药, 炸药密度随压力变化满足拟合曲线  $\rho=0.47P^{0.43}+1.02$ , 爆速在 0.1 MPa 时达到峰值 4448 m/s, 0.3 MPa 降至 3722 m/s, 0.4 MPa 拒爆。在 0~0.3 MPa 下, 铵胺炸药具备一定的抗深水静压性能, 且卸压后复原性好。

**关键词:** 铵胺炸药; 深水静压作用; 模拟装置; 密度; 爆速

**中国图书分类号:** TQ560.1; O521.9 **文献标志码:** A

随着露天工程爆破规模不断扩大, 一些大型露天矿山开采含水炮孔数量增多, 为了保证炸药的抗水性能, 通常采用现场混装抗水炸药<sup>[6][7]</sup>进行装药, 铵胺炸药<sup>Error! Reference source not found.</sup>是一种以硝酸铵作为氧化剂, 六亚甲基四胺作为可燃剂, 辅以其他功能添加剂混合而成的无雷管感度的抗水型胶状炸药。现场混装铵胺炸药凭借其优越的抗水性和易泵送性在露天大孔径深孔爆破、地下矿山和隧道施工爆破、水下爆破等领域具有很大的应用潜力。

然而, 在多水地区的实际应用中, 静水压力及炸药自重会影响抗水炸药的性能, 化学敏化炸药在静压以及渗流作用下感度降低、爆轰性能下降, 而随压力值增加, 炸药甚至可能会出现半爆、拒爆等现象<sup>Error! Reference source not found.</sup>。为模拟炸药在实际工况中承受的压力环境, 其测试需要专门的实验装置, 刘磊<sup>Error! Reference source not found.</sup>等利用可重复使用的爆炸装置在模拟深水装药环境下测试了乳化炸药的猛度衰减规律, 对化学敏化的乳化炸药在深水静压作用下抗压性能进行了试验研究, 发现当压力值达到 0.2 MPa, 炸药爆速下降了 74.8%, 当压力值达到 0.4 MPa, 炸药呈半爆或拒爆。李启佳<sup>Error! Reference source not found.</sup>等采用更接近深水条件的深水测定法研究深水条件对水胶炸药性能影响, 当浸水深度一致时, 水胶炸药的猛度在浸水 4 h 降低速率最大, 当浸水时间一致时, 随着水深增大, 水胶炸药的猛度在逐渐变小, 且其降低速率随着水深的增加而增大。因此, 研究深水静压作用对现场混装铵胺炸药的炸药性能影响, 对日后铵胺炸药的市场应用与推广具有重要理论与实践价值。

为填补上述研究空白, 明确静水压力对现场混装铵胺炸药性能的影响机理, 本研究设计了研究铵胺炸药抗静压性能的试验装置, 通过改变静水表面气压模拟不同压力下铵胺炸

\*收稿日期: 2026-04-17; 修回日期: 2026-05-15

基金项目: 安徽高校自然科学研究重大项目 (2024AH040070)

作者简介: 王俊豪 (2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事工业炸药与爆炸力学研究. E-mail:

573375692@qq.com

通讯作者: 黄文尧 (1964-), 男, 教授, 主要从事工业炸药研究. E-mail: 2426712933@qq.com

药深孔及水下爆破装药条件，通过电子显微镜对卸压后取出的炸药进行气泡观测，使用可视化加压装置测定加压过程的炸药密度变化，测试炸药常压下、卸压后以及深水静压作用下的爆速，分析静水压力对炸药性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

试剂：多孔粒状硝酸铵 (pg-AN)，工业级，河南晋开化工集团有限公司；六亚甲基四胺 (HMTA)，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；pH 调节剂，日照金禾博源生化有限公司；田菁粉，工业级，广饶六合化工有限公司；发泡剂，质量分数为 20% 的亚硝酸钠水溶液，自制；交联剂，焦锑酸钾水溶液，安徽雷鸣科化有限责任公司。

仪器：JB90-S 电动搅拌器，上海梅颖浦仪器制造有限公司 (JFS-550 变速分散机，杭州齐威仪器有限公司)；破碎机；高倍光学显微镜 DM4M，日本 Hitachi 公司；BSW-3A 型爆速测试仪，湖南湘西州奇博矿山仪器厂；加压装置 (PVC 管、有机玻璃管、进气阀、压力表、软管、空压机)，自制；pH 测试计、滴管、烧杯、量筒等。

### 1.2 铵胺炸药的制备

本实验炸药配方如表 1 所示，使用 60 目筛网筛出破碎机粉碎的多孔粒硝酸铵，取出部分硝酸铵与水进行混合，待硝酸铵完全溶解加入六亚甲基四胺，调节 pH 值至 3.5，待完全溶解制得水相溶液；加入剩余硝酸铵，使用搅拌机进行搅拌，转速为  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，称取增稠剂加入搅拌机，调整转速为  $800 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，搅拌 10 min 后等待 5 min 使增稠剂充分吸水溶胀，制得铵胺炸药基质；将基质注入加压装置内的过程中，同时加入发泡剂与交联剂，注入水使炸药完全没入水中，水温  $18\sim 21^\circ\text{C}$ ，关闭球形阀，打开进气管阀进行加压，关闭进气管，使炸药在有水高压环境下发泡交联，加压 1 h 后取出，制备流程如图 1。

表 1 胶状炸药基质配方

Table 1 Formula of matrix of ammonium amine explosive

Sample	H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	HMTA	Thickener	Foaming agent	Cross-linking agent
Mass fraction/%	12	74.9	6.5	1.4	0.4	0.1

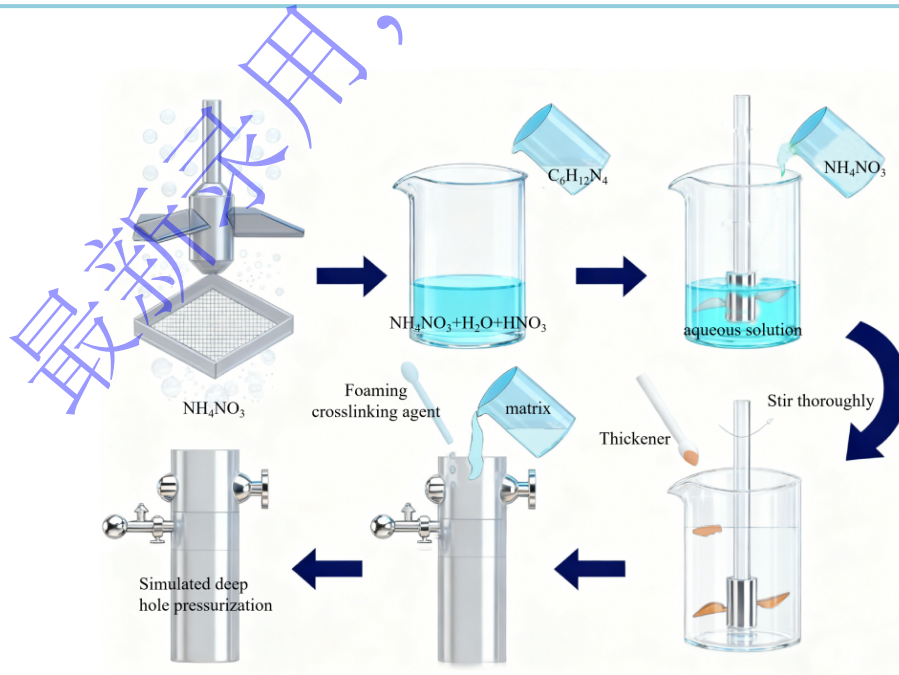


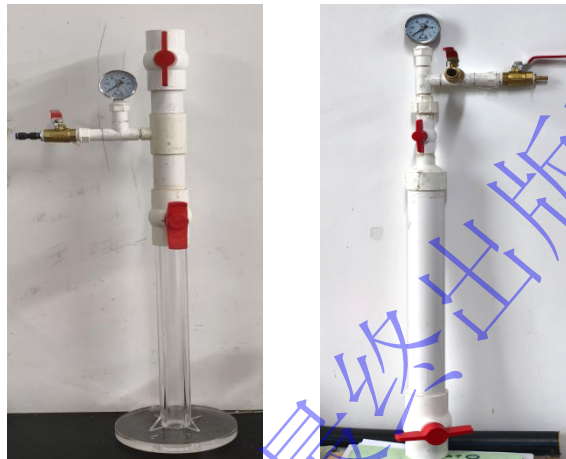
图 1 铵胺炸药制备流程

Fig.1 The preparation process of ammonium amine explosive

### 1.3 实验原理与实验装置

有水炮孔中注入现场混装铵胺炸药，炸药在水孔中敏化交联过程中所受总压力是静水表面大气压、静水压力以及炸药自身压力总和。通过改变静水表面压力从而模拟深孔爆破和 underwater 爆破的装药条件。设置加压值 4 组，0.1 MPa，0.2 MPa，0.3 MPa，0.4 MPa 并与常压下的炸药进行对比分析。

本实验自行设计了一整套的模拟静压环境的加压装置，如图 2 所示，包括有机玻璃管体可视化加压装置、一次性加压起爆装置，其主要由 PVC 管体、有机玻璃管体、球形阀、进气阀、压力表等组成。使用空压机向加压装置通入气体使压力值达到 0.7 MPa，关闭进气阀，静置 2 h 后，压力表指针不发生改变，检查装置气密性，确认气密性良好。



(a) 可视化加压装置 (b) 一次性加压起爆装置

图 2 试验装置实物图

Fig.2 Physical diagram of the experimental setup

### 1.4 性能测试

#### 1.4.1 铵胺炸药卸压后微观气泡观测

从加压装置中取出浸水加压 1 h 后的炸药，取样置于玻片上，使用玻璃棒刮除固体颗粒，制成样片，使用光学显微镜观察并拍照。使用 Cellpose 及 ImageJ 软件<sup>[14]</sup>对气泡形貌，粒径，数量及分布均匀性进行测量、记录与统计。

#### 1.4.2 铵胺炸药深水静压作用下密度变化测试

将新鲜制备，尚具流动性的铵胺炸药，倒入可视化加压装置，使用玻璃棒轻压排出内部的空隙，使炸药致密紧实，轻振使炸药表面平整，浸水加压模拟深水炮孔内炸药发泡交联过程，每 5min 记录管体炸药体积读数，根据装药质量与体积计算不同加压条件下炸药密度随时间变化规律。

#### 1.4.3 铵胺炸药卸压后爆速测试

使用外径为 40 mm，内径 37 mm，长度 400 mm 的 PVC 管装药，将 300 g 铵胺炸药倒入装药管，浸水加压 1 h 后取出。爆速测试采用测时仪法，仪器工作原理为记录固定距离内爆轰波传递到达后熔断探针的时间，然后根据爆轰波传递的距离和时间可得到炸药的爆速。两探针间距  $L$  为 50 mm，并用 50 g 乳化炸药作为起爆药包，测试 2 组取平均值<sup>[15-16]</sup>。试验示意图如图 3 所示。

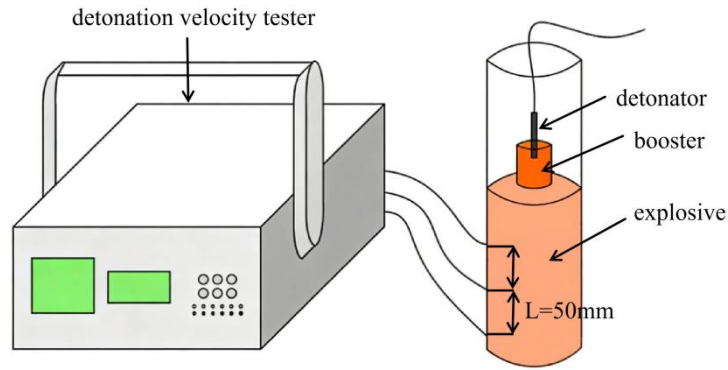


图3 爆速测试示意图

Fig.3 Schematic diagram of explosion speed test

#### 1.4.4 铵胺炸药深水静压作用下爆速测试

一次性起爆加压装置示意图如图4所示，该加压装置分为两部分，下部为装药管、球形阀，上部包括压力表、进气阀、球形阀，两部分中间采用螺纹连接，将刚制得的铵胺炸药倒入装置，使用直径28 mm金属空心钢球外壳装10 g黑索金再套上防水套放入药管底部作为起爆药，插入雷管，从管体穿孔引出，间距50 mm引出爆速线<sup>[17]</sup>，穿孔处采用AB胶封孔，加入水后连接装置的上部分，通气加压到加压值关闭下部的球形阀，取下上部分，起爆整个一次性加压装置测试炸药的爆速。

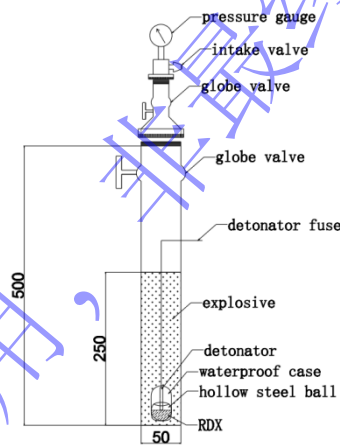


图4 一次性起爆装置示意图

Fig.4 Diagram of a one-time detonating device

## 2 结果与讨论

铵胺炸药发泡交联时间受基质 pH 影响<sup>[17]</sup>，发泡交联 pH 值在 3.9 到 5.2 之间，其中 pH 越低，发泡交联时间越短。在 pH=5.2 时，凝胶基质的交联时间约为 240 min，发泡时间大约是 220 min；在 pH=3.9 时，凝胶基质的交联时间约为 30 min，发泡时间大约是 25 min。本研究中使用稀硝酸调节基质 pH，为尽可能使炸药在未交联阶段减少水环境下胶体的溶失，使基质 pH 大约在 4.0±0.2，发泡交联时间大约是 30 min，因此加压过程中的前 30 min 炸药处于发泡交联阶段，之后炸药完成发泡交联，胶体受静水压力作用。

### 2.1 深水静压作用下微观气泡及密度理论计算

铵胺炸药在深水静压作用下的化学发泡，其核心是气相与连续相（铵胺基质）的力学平衡与密度随两相体积占比的动态变化。结合热力学平衡方程、流体静力学原理及气体状

态方程，建立压力与气泡参数（体积、半径）、炸药整体密度的定量关系。

### 2.1.1 理论模型与假设

1) 基质不可压缩性：炸药基质内体积变化可忽略，其密度  $\rho_0$  为常数 ( $\rho_0$  约 1.40-1.50g·cm<sup>-3</sup>)，同时不考虑水环境下基质的溶失。

2) 气泡热力学平衡：静压变化缓慢，远小于气泡热传导时间，气泡内气体始终处于等温状态（符合玻意耳定律），且气泡间无相互作用，即忽略气泡合并或破裂，仅考虑单气泡力学平衡，气泡为标准球形。

3) 力学平衡条件：气泡稳定时，气泡内气体压力与外静压、基质表面张力的合力平衡。

### 2.1.2 参数理论计算

铵胺炸药在加压装置内发泡交联，单个气泡稳定时需满足“内压=外压+表面张力附加压力”，公式如下：

$$P_g = P_e + \Delta P_S \quad (1)$$

其中： $P_g$  为气泡内气体压力 (Pa)； $P_e$  为外界静压 (Pa，即静水压力)； $\Delta P_S$  为表面张力产生的附加压力，由拉普拉斯公式计算：

$$\Delta P_S = \frac{2Y}{r} \quad (2)$$

$Y$  为炸药基质与气体的界面张力，N·m<sup>-1</sup>； $r$  为气泡半径， $\mu\text{m}$ 。

通过前期实验可知，铵胺基质与气体的界面张力在 40-70 mN·m<sup>-1</sup> 左右，而有效“热点”半径在 10  $\mu\text{m}$  到 100  $\mu\text{m}$  之间，此时界面附加压力  $\Delta P_S \ll P_e$ （例如当  $Y = 0.07\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ， $r = 10\mu\text{m}$ ， $\Delta P_S = 14000\text{ Pa}$ ，远小于常压 0.1 MPa），因此在计算气泡力学平衡时可忽略附加压力对气泡体积的影响，公式可简化为：

$$P_g \approx P_e \quad (3)$$

化学发泡本质为在发泡阶段生成固定质量气体，静压作用仅改变气体体积，因此气泡体积与压力满足等温过程的玻意耳定律：

$$PV = nRT \quad (4)$$

其中： $n$  为气体物质的量，mol； $R$  为气体常数； $T$  为温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

气泡由亚硝酸钠和硝酸铵在酸性条件下发生化学反应产生，为便于计算以此提出以下两个假设，(1)亚硝酸钠在酸性基质中完全分解，其分解反应遵循化学计量关系；(2)反应生成的氮气微气泡均匀分散在胶体基质中且全部被保留<sup>[18]</sup>。设常压（静压  $P_{e1} \approx 0.1\text{ MPa}$ ）下发泡，气泡体积为  $V_{g1}$ ，半径为  $r_1$ ；当改变静压为  $P_{e2}$ ，体积为  $V_{g2}$ ，半径为  $r_2$ 。由于  $P_g \approx P_e$ ，则：

$$P_{e1} \cdot V_{g1} = P_{e2} \cdot V_{g2} \quad (5)$$

结合球体体积公式  $V_g = 4/3\pi r^3$ ，可推导气泡半径与压力的关系：

$$\frac{r_1}{r_2} = \left(\frac{P_{e2}}{P_{e1}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

炸药整体密度由基质质量与气泡体积共同决定，设炸药总质量  $m_t$ ，而基质质量  $m_0$  远大于气泡质量  $m_g$ （可忽略），因此  $m_t \approx m_0$ ，炸药体积为  $V_t = V_0 + V_g$ （ $V_0$  为基质体积， $V_g$  为气泡总体积），基质密度  $\rho_0$ ，炸药密度  $\rho_1$  代入密度定义式：

$$\rho_1 = \frac{m_t}{V_t} = \frac{m_t}{\frac{m_0}{\rho_0} + V_g} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{V_g}{m_t}} \quad (7)$$

结合气泡体积与压力的关系，常压下气泡总体积  $V_{g1}$ ， $V_{g2} = V_{g1} \cdot \frac{P_{e1}}{P_{e2}}$ ，代入 (7) 式可得炸药密度随静压的变化公式：

$$\rho_2 = \frac{1}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{V_{g1} \cdot P_{e1}}{\rho_0 \cdot V_0 \cdot P_{e2}}} \quad (8)$$

根据表 1 中配方计算可知常压下制备 100 g 炸药生成气体量为  $V_{g1}=25.97$  ml, 通过基质实测密度  $\rho_0=1.40$  g·cm<sup>-3</sup>, 则可计算出不同压力下的理论铵胺炸药密度。

## 2.2 气泡微观结构表征

图 5 为不同静压条件下卸压后, 放大 200 倍的铵胺炸药微观形貌。图中环形阴影为铵胺炸药在有水静压环境下发泡交联后形成的敏化气泡, 透明晶体是硝酸铵结晶, 区别于乳化石炸药降温后针状析晶, 铵胺炸药在常温下制备, 将粉碎后多孔粒硝酸铵以固相形式加入水相形成过饱和溶液, 晶型结构未改变, 微观结构呈柱状结晶以及白色小颗粒(图中因颗粒不透光呈黑色)。此外, 图中气泡大小不均一, 是由于炸药发泡与交联同时进行, 而随着时间变化炸药逐渐交联, 炸药黏度增大, 此时生成的气泡受界面附加力增大, 气泡尺寸变小, 而先前生成的气泡逐渐增大为大气泡。

图(a)(b)分别为常压下和 0.1 MPa 下加压, 二者气泡整体大小近似, 直径几乎没有差别, 但 0.1 MPa 下的敏化气泡明显多于常压。气泡完整性较好, 气泡形状呈近圆形, 每个气泡独立性好, 无合并集聚等现象。

图(c)当在 0.2 MPa 下加压, 观察到气泡直径进一步减小, 数量有所下降, 分析认为, 一方面由于化学溶失作用, 炸药在水环境下发泡交联, 在未完全交联前胶体基质直接与外部水接触, 炸药中部分硝酸铵与敏化剂被水溶失带走。另一方面从物理溶解规律分析<sup>[24]</sup>, 压力升高会显著增大气体在基质中的溶解度, 生成的气体在高压下会重新溶解至基质与孔隙水中, 难以析出形成独立气泡。

图(d)(e)分别为 0.3 MPa、0.4 MPa 下加压, 此时炸药气泡出现合并、集聚现象, 粒径分布不均, 部分气泡形状畸变为椭圆形, 基质受压力作用开始压缩, 气泡所受界面附加力迅速增大, 由于基质是多组分非均匀混合体系, 微观应力分布不均, 气泡相互靠近挤压。相邻气泡间胶体液膜<sup>[24]</sup>不断受压变薄, 当应力超过气泡液膜临界强度时液膜破裂, 气泡发生合并集聚。从胶体流变学角度<sup>[24]</sup>, 受压基质产生黏弹性压缩形变; 泄压后基质快速回弹, 内部产生强烈拉伸作用, 进一步加剧气泡形貌畸变, 还易引发气泡结构失稳破裂, 从而导致炸药高压下的“压死”及减敏现象。

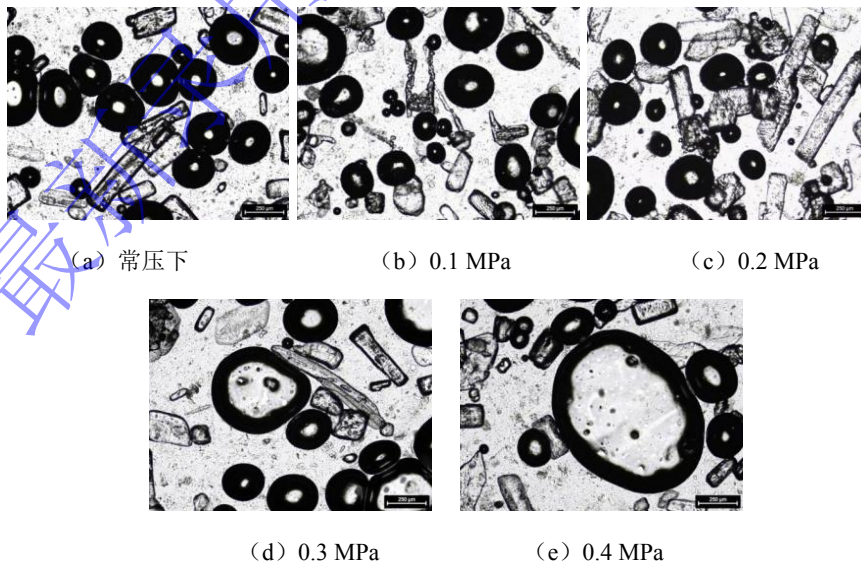


图 5 炸药试样微观结构

Fig.5 Microstructure of explosive samples

### 2.3 炸药的气泡尺寸分布

为更准确地统计分析,采用放大 100 倍的微观图像,对不同深水静压作用下卸压取出的炸药试样进行气泡数量与直径统计,得到不同深水静压作用下发泡交联的炸药气泡尺寸分布图,如图 6 所示,可以看出随着压力增大,气泡的数量逐渐往小尺寸集中,而当压力达到 0.3 MPa,大气泡数量增加,分布尺寸开始向两端移动,即小气泡和大气泡数量多。整体上看,除去常压,随气压增大,气泡总体数量减少,而常压下的气泡数量没有 0.2 MPa 的多是因为压力作用在一定程度上减少了气泡的逸散。

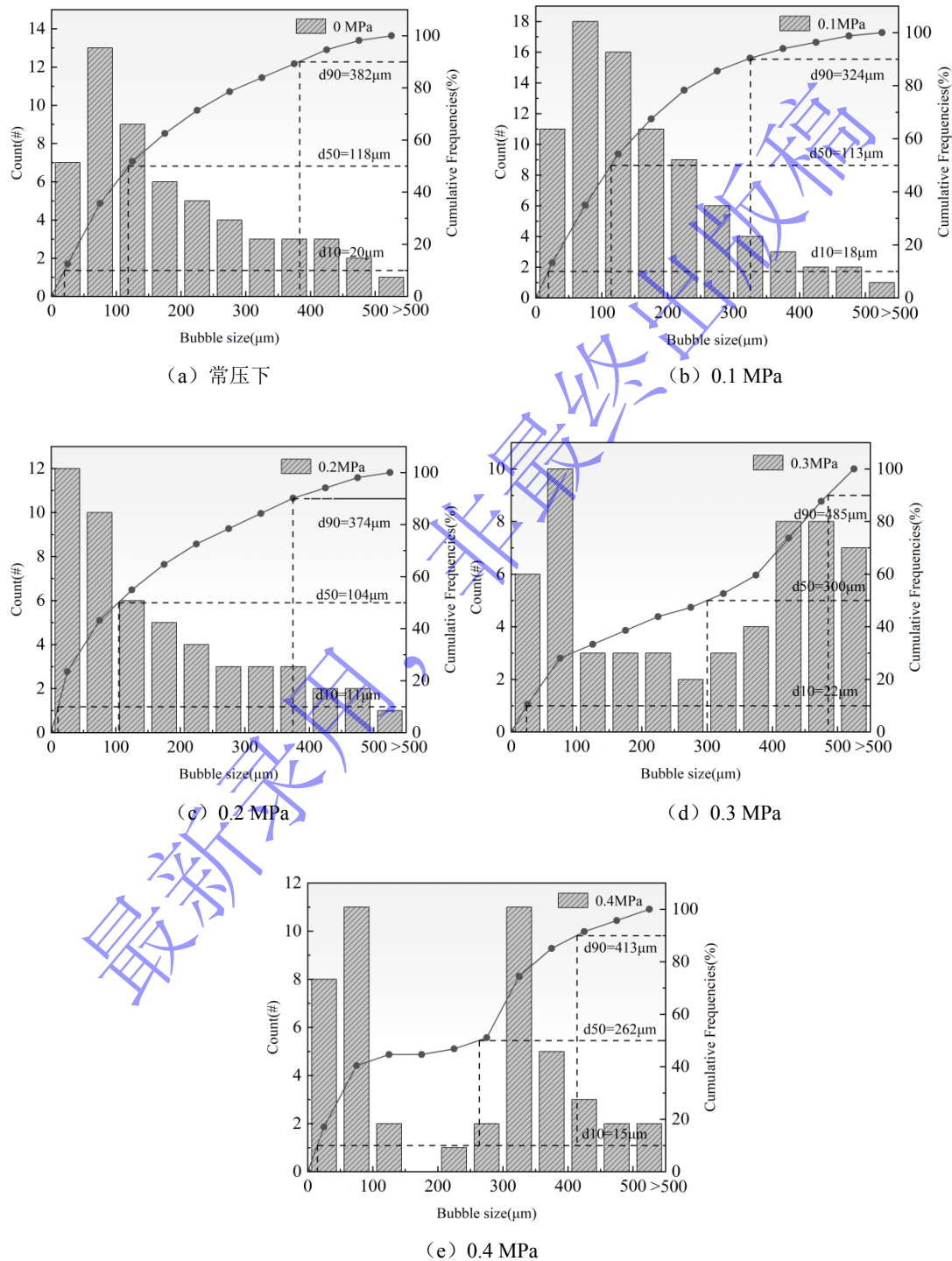


图 6 敏化气泡尺寸分布

Fig 6 Sensitized bubble size distribution

常压下与 0.1 MPa 的炸药气泡分布尺寸集中在 50~150 μm，而这一范围内 0.1 MPa 的气泡数量显著高于常压，气泡分布也更为集中，0.2 MPa 下炸药气泡分布尺寸向敏化气泡移动，气泡集中在 0~100 μm，炸药整体分布较为均匀。当达到 0.3 MPa，气泡开始合并，大气泡数量增加，气泡分布呈两级趋势，0.4 MPa 下出现超大气泡，气泡两极分化进一步加剧，气泡分布更为不均。

## 2.4 深水静压作用对炸药密度影响

不同深水静压作用下铵胺炸药实际密度随时间变化的关系图如图 7 所示，炸药在 30min 之后密度基本不再发生变化，炸药的最终密度随着加压值增大而增大，将实际最终密度与理论计算所得的炸药密度进行对比，所得密度-压力值如图 8 所示。结果表明，实验曲线与理论计算曲线基本吻合，实际密度随压力变化拟合方程式为  $\rho=0.47P^{0.43}+1.02$ ，当加压值由 0 增大到 0.4 MPa 时，理论炸药密度由 1.02 g·cm<sup>-3</sup> 增大到 1.32 g·cm<sup>-3</sup>，而实际炸药最终密度由 1.02 g·cm<sup>-3</sup> 增大到 1.34g·cm<sup>-3</sup>，整体来看，炸药实际密度略高于理论计算密度，原因在于，实际加压中炸药胶体的压缩与胶体在未完全交联前部分炸药基质因水溶失会导致炸药体积减小，导致炸药密度偏大。工程应用中，单炮孔药量远大于水溶失药量，同时炸药在泵送管内即时敏化，混合均匀，交联反应迅速，交联固化后胶体结构强度高，抗水性优异，因此实际施工中炸药水溶失部分可忽略不计。

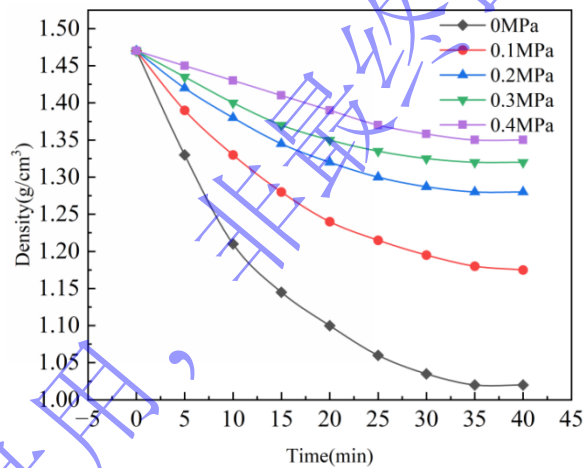


图7 不同深水静压作用下铵胺炸药密度-时间关系图

Fig.7 Density time relationship diagram of ammonium amine explosives under different deep-water hydrostatic pressures

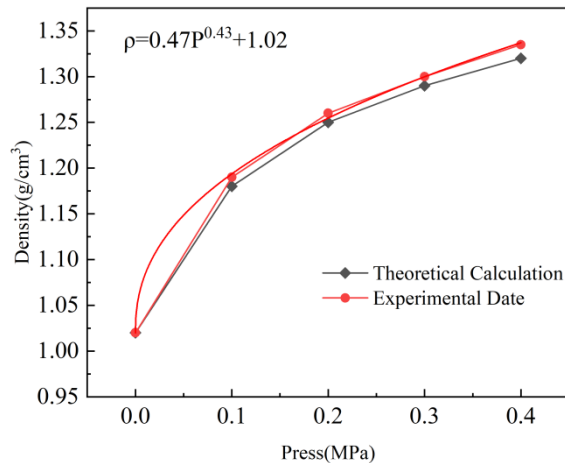
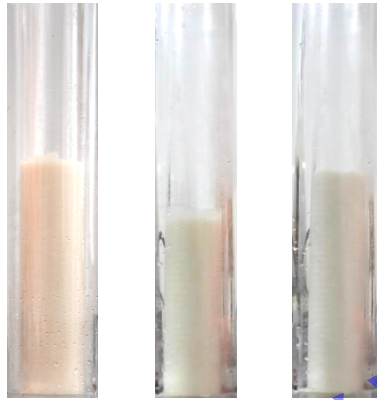


图 8 不同深水静压作用下铵胺炸药实际密度与理论计算密度对比图

Fig.8 Comparison chart of actual density and theoretical density of ammonium amine explosives under different deep-water hydrostatic pressures

装置卸压瞬间恢复常压，炸药迅速膨胀，图 9 为常压下与 0.4 MPa 下装置卸压前后炸药复原实物对比图，在压力不超过 0.4 MPa 情况下，卸压后炸药会迅速恢复到常压下发泡的最终密度，由此可以看出铵胺炸药具备复原性，因此在研究铵胺炸药抗深水压力的性能时不能脱离静压环境，须在静水压力下测试其爆炸性能。



(a) 常压下 (b) 卸压前 (c) 卸压后

图 9 炸药复原前后实物对比图

Fig.9 Comparison images of explosives before and after restoration

### 2.5 卸压后炸药爆速分析

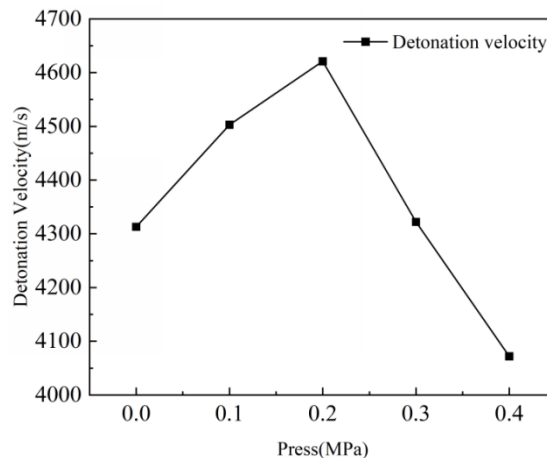
不同深水静压作用卸压后取出和常压下的铵胺炸药爆速参数见表 2，其与加压值关系曲线如图 10 所示；

表 2 不同深水静压作用下卸压后取出的铵胺炸药爆速值

Table2 Explosive velocity values of ammonium amine explosives extracted after pressurization under different deep-water hydrostatic pressures

P(MPa)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
D(m·s <sup>-1</sup> )	4313	4503	4621	4322	4072

可以看出，随着压力值由 0 逐渐增大到 0.4 MPa，炸药的爆速先增大后减少，当加压值达到 0.2 MPa 时，炸药爆速达到最大，爆速为 4621 m·s<sup>-1</sup>，与常压下的炸药相比，爆速增幅为 7.1%，当加压值小于 0.2 MPa，炸药的爆速提高，而当加压值超过 0.2 MPa，爆速下



降。

图 10 卸压后不同深水静压作用铵胺炸药爆速

Fig 10 Explosive velocity of ammonium amine explosives under different deep-water hydrostatic pressures after depressurization

分析认为，一定的深水静压作用能提升复原后的铵胺炸药爆轰性能，由于铵胺炸药敏化剂直接与药体内部硝酸铵颗粒接触，亚硝酸钠溶液与硝酸铵反应充分，铵胺炸药的产气发泡量大，且基质 PH 值低，发泡反应迅速，在未完全交联前炸药黏度低，产生气泡大易逃散，因此，常压下的铵胺炸药的敏化气泡多，气泡大，而随着加压值提高，炸药气泡尺寸变小，而在常压到 0.2 MPa 加压下，符合有效“热点”的气泡数量多，且当复原后气泡间隙扩大，“热点”更容易传导，所以随着加压值增大，铵胺炸药的爆轰性能反倒有所提升<sup>[24]</sup>。当加压值达到 0.3 MPa 时，炸药气泡开始出现集合并现象，此时气泡数量减少，大小不均一，当加压值达到 0.4 MPa 时，出现许多大气泡，此时有效“热点”显著减少，炸药爆轰性能下降。

### 2.6 深水静压作用下炸药爆速分析

通过起爆整个一次性加压起爆装置测试得到不同静压下铵胺炸药的爆速参数，如表 3~4 所示，其爆速与加压值的关系图如图 11 所示。

表 3 不同深水静压作用下铵胺炸药爆速值

Table3 Explosive velocity values of ammonium amine explosives under different deep-water hydrostatic pressures

P(MPa)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
D(m·s <sup>-1</sup> )	4313	4448	4065	3722	Refuse to explode

表 4 不同深水静压作用下铵胺炸药爆速下降率

Table4 The rate of decrease in detonation velocity of ammonium amine explosives under different deep-water hydrostatic pressures

P(MPa)	0	0.1	0.2	0.3	0.4
$\eta^{(1)}$	0	-0.03	0.05	0.13	\

Note:(1) $\eta$  is the stress relaxation rate, indicating the degree of stress relaxation.

通过爆速的下降率表示炸药受静压作用影响程度，不同加压值下炸药爆速下降率  $\eta$  可表示为<sup>[19]</sup>：

$$\eta_i = (D - D_i) / D \quad (9)$$

其中：D 为未受压铵胺炸药的爆速，m·s<sup>-1</sup>，D<sub>i</sub> 为不同加压值下铵胺炸药的爆速，m·s<sup>-1</sup>。

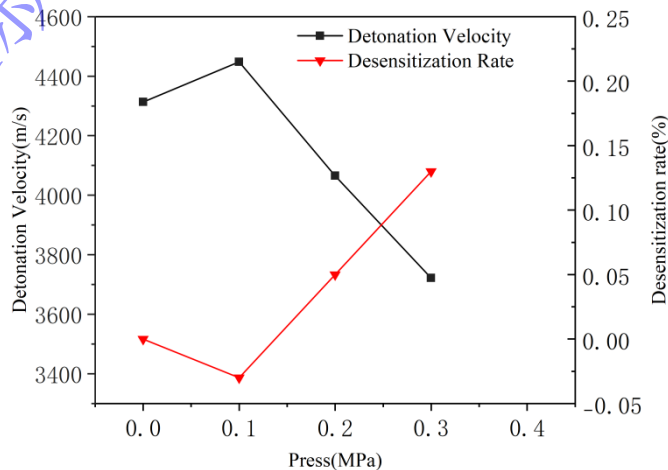


图 11 不同深水静压作用下铵胺炸药爆速

Fig 11 Explosive velocity of ammonium amine explosives under different deep-water hydrostatic pressures

不难看出在深水静压作用下加压值对铵胺炸药爆炸性能具有显著影响,当加压值在 0~0.1 MPa,炸药的爆速有一个增大的过程,而随着加压值不断增大,炸药的爆速呈线性迅速下降。分析认为,当铵胺炸药受深水静压作用时,敏化气泡压缩变小,气泡聚集,当压力不超过 0.1 MPa 时,炸药有效“热点”数量多,炸药爆轰性能有所提升。当加压值达到 0.1 MPa,炸药爆速达到最大值,通常工业炸药存在最佳密度,在最佳密度炸药爆速能达到最大值,而此时的铵胺炸药达到最佳密度。随着压力值进一步增大,在 0.1~0.3 MPa,在静水压力作用下,大量的有效气泡缩小甚至集聚破裂,两相界面的接触面积变小<sup>[24]</sup>,颗粒间隙被压闭,“热点”生成困难,密度增大,内部微观结构破坏导致炸药爆炸性能下降,未反应的炸药受爆轰波前端激波压缩作用而导致温度增加值减少,化学反应区内反应速率减缓,反应无法维持,炸药爆速迅速下降。当压力值达到 0.4 MPa,炸药密度过大出现压死现象,炸药拒爆。

### 3 结 论

(1)本研究设计的有机玻璃管体可视化加压模拟装置、一次性加压起爆装置,可有效模拟 0~0.4 MPa 深水静压作用;基于热力学平衡与流体静力学原理建立的压力—气泡参数—炸药密度定量关系模型,模型理论密度与实验实测密度基本吻合。

(2)深水静压作用下铵胺炸药的密度与静压呈正相关,压力从 0 增至 0.4 MPa 时,炸药密度由  $1.02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  增大至  $1.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,其爆速呈先升后降规律,0.1 MPa 时达到峰值  $4448 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,0.3 MPa 时降至  $3413 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,较常压降幅 41.7%,0.4 MPa 时炸药拒爆;炸药爆速下降率随静压增大呈线性增大,压力对炸药的减敏作用随压力提升持续增强。

(3)卸压复原后的铵胺炸药在静压由 0 增大到 0.2 MPa 时,敏化气泡数量随压力升高而增加,有效“热点”占比提高,爆速由  $4313 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  升至  $4621 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;压力超过 0.2 MPa,气泡出现集合并,有效“热点”减少,爆速随压力增大持续降低,0.4 MPa 时爆速降至  $4072 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。整体表明,在 0~0.3 MPa 范围内,铵胺炸药具备良好的抗深水静压性能与静压复原性。

### 参考文献

- [1] 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 Zhengde, Liu Feng, Kuang Zhao, 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.
- [2] 王光兵,吴红波,汪鑫齐,等.含氨基添加剂的现场混装乳化炸药的性能研究[J].爆破器材,2025,54(06):39-44.  
Wang Guangbing, Wu Hongbo, Wang Xinqi, et al. Performances of Field-Mixed Emulsion Explosives Containing Amino Additives [J]. Explosive Materials, 2025, 54(06):39-44.
- [3] 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 Zhiwei, Yue Jiawei, Huang Zhenyi, et al. Influence of Ammonium Formate Content on Rheological and Thermal Decomposition Properties of On-Site Mixed Emulsion Matrix [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(01):55-65.

- [4] Weibo S ,Xuefeng G ,Yan W , et al.Thermal Safety Analysis of On-Site Emulsion Explosives Mixed with Waste Engine Oil.[J].Energies,2022,15(3):895-895.
- [5] 唐秋明,张爱军,任卫东,等.乳化炸药乳化的爆炸危险性研究[J].爆破器材,2018,47(01):1-9.  
Tang Qiuming, Zhang Aijun, Ren Weidong, et al. Study on Explosion Hazard of Emulsification of Emulsion Explosive [J]. Explosive Materials, 2018, 47(01):1-9.
- [6] 安徽理工大学.一种多孔粒状硝酸铵抗水炸药及其制备方法:202410555136.2[P].2024-08-23.  
Anhui University of Science and Technology. A porous granular ammonium nitrate water-resistant explosive and its preparation method: 202410555136.2[P]. 2024-08-23.
- [7] 孙彦臣,黄文尧,梁昊,等.硝酸铵细度对铵胺炸药性能的影响[J].火炸药学报,2024,47(04):316-323.  
Sun Yan-chen, Huang Wen-yao, Liang Hao, et al. Wu Hong-bo, Wang Quan, et al. Effect of Fineness of Ammonium Nitrate on Properties of Ammonium Amine Explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2024, 47(04): 316-323.
- [8] Ran S ,Gaojie F ,Chengxin Q , 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(000): 1-9.
- [9] Liu L ,Liu Q ,Li X W , et al.Influence of Emulsifier on Compression Resistance of Deep Water of Emulsion Explosives[J].Applied Mechanics and Materials,2013,2301(295-298):2971-2975.
- [10] 王尹军,汪旭光,宋锦泉.敏化方式对乳化炸药压力减敏作用的影响[J].火炸药学报,2005,(03):41-44.  
Wang Yinjun, Wang Xuguang, Song Jinquan. Influence of Sensitizing Methods upon Pressure Desensitization of Emulsion Explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005,(03):41-44.
- [11] 刘磊,汪旭光,杨溢,等.水下爆破中乳化炸药抗水性能的实验研究[J].工程爆破,2010,16(01):66-69.  
Liu Lei, Wang Xuguang, Yang Yi, et al. Experimental Study On Water Resistance Of Emulsion Explosives In Underwater Blasting [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(01): 66-69.
- [12] 刘磊,汪旭光,杨溢,等.乳化炸药抗静压性能的实验方法研究[J].爆破,2010,27(01):23-25+43.  
Liu Lei, Wang Xuguang, Yang Yi, et al. Experimental Research on Compression Resistance of Emulsion Explosives [J].Blasting, 2010, 27(01):23-25+43.
- [13] 李启佳,曹福,邹永胜,等.深水条件下水深对炸药性能影响研究[J].爆破,2024,41(03):162-170.  
Li Qijia, Cao Fu, Zou Yongsheng, et al. Research on Influence of Water Depth on Explosive Performance under Deep Water [J]. Blasting, 2024, 41(03):162-170.
- [14] 张海涛,刘磊,彭云昆,等.静压作用下两种敏化方式的乳化炸药微观结构变化[J].爆破器材,2022,51(02):42-46.  
Zhang Haitao, Liu Lei, Peng Yunkun, et al. Microstructure Changes of Emulsion Explosives with Two Sensitization Methods under Static Pressure [J]. Explosive Materials, 2022, 51(02):42-46.
- [15] 贺爱平,费鸿禄,张禹,等.生物柴油对ANFO热性能和爆炸性能的影响研究[J].火工品,2026,

- (02):12-19.  
He Aiping, Fei Honglu, Zhang Yu, et al. Study on the Effects of Biodiesel on the Thermal and Explosive Properties of ANFO [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2026, (02):12-19.
- [16] 刘锋,代伟,魏国,等.机油柴油对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(4):352-361.  
Liu Feng, Dai Wei, Wei Guo, et al. Effect of Engine Oil and Diesel Oil Ratio on Explosive Performance of On-site Mixed Emulsion Explosive in Field [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2025, 48(4): 352-361.
- [17] Ali F ,Kumar A ,Dhar K S , et al. Investigation on Bulk Emulsion Explosive Performance Under Critical Conditions: Its Detonation Behaviour and Air Over Pressure Analysis[J].*Propellants,Explosives,Pyrotechnics*,2025,50(10):46-53.
- [18] Chen Y ,Huang W ,Fang G , et al. The Impact of pH Value on the Performance of a Novel Ammonium Nitrate-Based Explosive[J].*Combustion,Explosion,and Shock Waves*,2026,61(6):907-922.
- [19] 汪泉,管仲北,王焕,等.低密度铵胺炸药的制备与性能研究[J].*火炸药学报*,2026,49(2):191-199.  
Wang Quan, Guan Zhongbei,Wang Huan, et al. Study on the Preparation and Properties of Low-density Ammonium Amine Explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2026, 49(2):191-199.
- [20] 周秦,田辉,陈桂华,等.页岩孔隙水中溶解气的主控因素与地质模型[J].*煤炭学报*,2013,38(05):800-804.  
Zhou Qin, Tian Hui, Chen Guihua, et al. Geological model of dissolved gas in pore water of gas shale and its controlling factors [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(05):800-804.
- [21] 赵赫,费滢洁,朱春英,等.高黏体系中纳米颗粒稳定气泡的形变及破裂行为[J].*化工学报*,2024,75(06):2180-2189.  
Zhao He, Fei Yingjie, Zhu Chunying, et al. Deformation and breakup behavior of nanoparticle-stabilized bubbles in high-viscosity systems [J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(06): 2180-2189.
- [22] 王亚娜,王毅,宋小兰,等.基于动态流变学研究Al/AP/GAP悬浮液粘弹特性[J].*兵器装备工程学报*,2022,43(12):215-220.  
Wang Yana, Wang Yi, Song Xiaolan, et al. Research on viscoelasticity of Al/AP/GAP suspensions based on dynamic rheology [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(12): 215-220.
- [23] 郁卫飞,张同来,左军,等.炸药研究中的微波效应及其机制[J].*含能材料*,2010,18(05):558-562.  
Yu Weifei, Zhang Tonglai, Zuo Jun, et al. Microwave Effects and Mechanism in Explosives Materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010, 18(05):558-562.
- [24] 程扬帆,朱守军,李子涵,等.钻孔爆破条件下乳化炸药的压力减敏现象研究进展[J].*金属矿山*,2023,(05):77-85.  
Cheng Yangfan, Zhu Shoujun, Li Zihan, et al. Study Progresses on the Pressure Desensitization of Emulsion Explosives in the Drilling and Blasting Operation [J]. *Metal Mines*, 2023, (05):77-85.

[25] 汪齐,胡坤伦,王猛,等.深水静压作用下含水炸药爆炸性能的研究[J].火工品,2017,(03):41-44.

Wang Qi, Hu Kunlun, Wang Meng, et al. Experimental Study on the Explosive Performance of Water-bearing Explosives under the Static Pressure [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2017, (03):41-44.

## Effect of Deep-Water Hydrostatic Pressure on the Performance of Ammonium-amine Explosive

WANG Junhao, HUANG Wenyao, WANG Quan, TONG Kai, YUAN Wenjie,  
HUANG Daguang, WENG Qiuhong

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

**Abstract:** To investigate the explosion performance of ammonium-amine explosive under deep-water hydrostatic pressure, an experimental simulation device for blasting charges under deep-water hydrostatic pressure was designed. An optical microscope was used to observe the microbubble changes of the explosive after being subjected to deep-water hydrostatic pressures of atmospheric pressure (0.1 MPa, 0.2 MPa, 0.3 MPa, 0.4 MPa) for 1 hour followed by pressure relief and recovery. Fiji image analysis technology was adopted to microscopically characterize the distribution and size of sensitized bubbles, and the density of the explosive under continuous hydrostatic pressure was measured. The detonation velocity of the explosive loaded in a 40 mm outer-diameter PVC charge tube was tested under atmospheric pressure, after pressure relief, and under continuous hydrostatic pressure. The results show that deep-water hydrostatic pressure exerts a significant effect on the performance of ammonium-amine explosive. For the ammonium-amine explosive initiated after pressure relief and recovery, detonation velocity increases from  $4313 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  to  $4621 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  within the pressure range of 0~0.2 MPa, then decreases continuously when the pressure exceeds 0.2 MPa, reaching  $4072 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  at 0.4 MPa. For the ammonium-amine explosive initiated under continuous hydrostatic pressure, the variation of explosive density with pressure conforms to the fitting curve  $\rho=0.47P^{0.43}+1.02$ . Its detonation velocity reaches a peak of  $4448 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  at 0.1 MPa, drops to  $3722 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  at 0.3 MPa, and fails to detonate at 0.4 MPa. Within the pressure range of 0~0.3 MPa, the ammonium-amine explosive possesses resistance to deep-water hydrostatic pressure and exhibits good recoverability after pressure relief.

**Key words:** ammonium nitrate explosives; deep-water hydrostatic pressure effect; simulation device; density; detonation velocity