

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.02.005

电导率法检测乳化炸药储存稳定性的实验研究^{*}

郭紫卿^① 邓凌海^② 叶 兰^② 李晓伟^① 欧振议^②

①石家庄成功机电有限公司(河北石家庄,050000)

②郴州七三二零化工有限公司(湖南郴州,423000)

[摘 要] 采用破乳剂 Tween80,在温度 70 ℃、搅拌速度 400 r/min 的条件下将乳化基质、乳化炸药在 400 mL 的水溶液中进行破乳。检测破乳过程中水溶液的电导率变化,绘制电导率-时间曲线,以此判断乳化基质、乳化炸药储存期间的稳定性。论述了实验原理及影响实验的因素。实际检测了乳化基质和乳化炸药在自然储存及冷冻储存条件下电导率-时间曲线的变化规律。检测结果与显微镜观察破乳情况和实际爆破性能对比表明,电导率法检测得到的结论与显微镜观察的析晶破乳状态及实际爆破性能基本一致。最终,通过大量的生产线检测数据确定了一组电导率-时间曲线作为标准曲线,以此为依据可快速判断乳化炸药的储存期。

[关键词] 乳化基质;乳化炸药;破乳剂;电导率

[分类号] TJ55; TQ560

Experimental Study on Measurement of the Storage Stability of Emulsion Explosives by Conductivity Method

GUO Ziqing^①, DENG Linghai^②, YE Lan^②, LI Xiaowei^①, OU Zhenyi^②

①Shijiazhuang Chenggong Electromechanical Co., Ltd. (Hebei Shijiazhuang, 050000)

②Chenzhou 7320 Chemical Co., Ltd. (Hu'nan Chenzhou, 423000)

[ABSTRACT] Demulsifier Tween80 was used to demulsify emulsion matrix or emulsion explosive in 400 mL aqueous solution at 70 ℃ and 400 r/min. Conductivity changes of the aqueous solution during demulsification were detected, an conductivity-time curves were drawn. The stability of emulsion matrix or emulsion explosive during storage could be determined. By analyzing experimental principle and factors affecting the experiment, change rules of the conductivity of emulsion matrix or emulsion explosive with time under natural storage and freezing conditions were obtained. The detection results of conductivity method are basically consistent with the crystallization and demulsification state and bursting performance observed by microscope. Finally, according to a large number of production line test data, a conductivity-time curve was determined as the standard curve. Based on this, the storage period of emulsion explosives can be quickly determined.

[KEYWORDS] emulsion matrix; emulsion explosive; demulsifier; conductivity

0 引言

乳化炸药是一种油包水型的乳化体系。影响该乳化体系稳定性的因素很多,最主要的是乳化程度,而乳化程度则直接反映在乳化基质的优劣性上。目前,乳化基质储存稳定性的检测方法中,基本上都是在储存一段时间后进行外观检测,用时较长。此外,还有高低温循环法^[1]、电阻值法、超声波检测稳定性法^[2]等检测方法。

乳化基质在乳化时依靠油包水型乳化剂(如 Span80)等使油相材料包裹水相,形成油包水型乳化体系。在这个体系中,油相材料对水相的包覆程度即乳化程度,它决定了乳化基质的稳定性,比如储存期等。而想要验证这个体系的乳化程度,可以根据破乳的难易程度来进行考察^[3-4]。

使用逆向乳化剂可破坏乳化基质的乳化体系。逆向乳化剂即破乳剂,也属于表面活性剂,均含有亲水、亲油基,随着HLB(亲水亲油平衡值)的增大,破乳剂的亲水性增强,亲油性降低。文献[5]指出,破

^{*} 收稿日期:2022-07-29

第一作者:郭紫卿(1985-),男,工程师,主要从事工业炸药生产工艺研究。E-mail: guoziqing418@163.com

乳剂吸附在乳化物的油水界面上,亲水基伸向液滴内部,亲油基伸向原油内部。因此,当破乳剂的 HLB 很低时,由于水溶性较弱、油溶性较强,破乳剂不可能形成实际意义上的界面吸附;当破乳剂的 HLB 很高时,水溶性较强、油溶性较弱,破乳剂又会因过多地在水中溶解而失去在油水界面吸附的能力。这两个趋势综合作用的结果必然导致最佳 HLB 的出现,具有最佳 HLB 的破乳剂必然有最大的界面吸附,同时界面张力也会被最大限度地降低。

乳化剂的亲水亲油性与分子结构是影响乳化行为的主要参数。因此,选用一种与 Span80 分子结构相近的逆向乳化剂尤为重要。逆向乳化剂将乳化基质破乳后,水相溶液中的铵根离子、钠离子、硝酸根离子等会溶于水中,随着乳化基质破乳程度的增加,水溶液中的诸离子浓度会逐渐增大。因此,使用电导率仪检测水溶液的电导率便可以监测出乳化基质的破乳时间。以完全破乳时间的长短来间接反映乳化基质的乳化程度。

本文中,根据乳化炸药成乳原理的逆向反应,加入破乳剂使乳化基质在短时间内破乳。力求在短时间内通过检测乳化基质在破乳过程中水溶液电导率的变化对储存稳定性进行判断。该方法用时较短、可靠性高、操作方便,为乳化炸药乳化程度的检测提供了一种新的思路。

1 破乳剂的选择

1.1 破乳剂的选择

乳化基质在热力学上是不稳定的体系,当静态储存期超过 180 d,最终水、油两相也会分离,破乳只是方法和时间的不同。在乳化基质体系中加入破乳剂,破乳剂与乳化剂作用形成络合物,使乳化剂失去乳化性能,原乳化体系被破坏,从而使乳化基质发生破乳^[6-9]。根据这一原理,选择合适的逆向乳化剂进行试验。

乳化基质是一种以 Span80 作为乳化剂的油包水型乳化体系,为了达到破乳的目的,需要选择水包油型乳化剂对乳化基质进行破坏。根据文献[10-11],以乳化剂的 HLB 和分子结构为主要参数进行选择:HLB 为 3~6 时,作 W/O 型乳化剂;8~18 时作 O/W 型乳化剂。以此为依据,选取了与 Span80 分子结构部分类似的易溶于水的 Tween80 作为破乳剂,其 HLB 为 15。

1.2 破乳剂用量的确定

根据所使用的电导率检测仪的检测上限,确定

乳化基质完全破乳后的溶液电导率,并且根据此数据计算出破乳剂的用量。所使用仪器的电导率检测范围为 0~5 000 $\mu\text{s}/\text{cm}$,实际测定 0.5% 硝酸铵溶液的电导率为 5 818 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。使用 500 mL 的四口瓶,按容积 80% 的利用率,所承载的乳化基质最大质量为

$$m_1 = V_1 \rho U W. \quad (1)$$

式中: m_1 为乳化基质质量; V_1 为实验容器的体积; ρ 为质量分数 0.5% 硝酸铵水溶液的密度,经检测,取 $\rho = 1.01 \text{ g}/\text{cm}^3$; U 为四口瓶容积利用率,取 $U = 80\%$; W 为硝酸铵溶液的质量分数,取 $W = 0.5\%$ 。

计算可知, m_1 为 2.00 g。由此计算得出,乳化基质中乳化剂(质量分数 2%) Span80 的实际质量 m_2 为 0.04 g。

根据物质的量浓度计算公式:

$$c = \frac{m_2}{M_2 V_2}; \quad (2)$$

$$V_2 = V_1 U. \quad (3)$$

式中: c 为 Span80 的物质的量浓度; m_2 为 Span80 的质量; M_2 为 Span80 的分子量; V_2 为实验时的溶液体积。

计算得到,Span80 的物质的量浓度为 0.000 25 mol/L。已知 M_2 为 428.60,按照 Tween80 与 Span80 的摩尔比 1.0 : 1.0 计算,则 Tween80(分子量 M_1 为 833.9~1 309.6)的物质的量浓度是 0.000 25 mol/L。为了保证乳化基质完全破乳,Tween80 需要过量,取物质的量浓度为 0.000 30 mol/L,则计算可知 Tween80 的质量为 0.16 g。Tween80 与乳化基质的质量比则为 1.0 : 12.5。

1.3 实验条件的确定

取四口瓶一个,倒入 400 g 去离子水,之后开始加热及搅拌,使去离子水温度达到设定温度,此时设定搅拌器搅拌速度。加入破乳剂并搅拌,使破乳剂完全溶解。之后,将电导率仪的电极没入水溶液液面之下,取定量的乳化基质,用塑形管挤成直径 5 mm 的圆柱体后置于 500 mL 四口瓶中。记录电导率随时间的变化,直到电导率不再增长为止,停止搅拌。完成后,根据不同的温度及不同的搅拌速度重复实验。

如表 1 所示,随着乳化温度的升高,完全破乳时间减小,乳化基质的破乳速率加快。同样,随着搅拌器搅拌速度的增加,破乳速率也会加快。破乳速率在较低的温度下随着搅拌速度的增加变化不大;但是,在温度达到 70 $^{\circ}\text{C}$ 时,破乳速率增加明显;达到 80 $^{\circ}\text{C}$ 后,破乳速率增加得更加明显。综合考虑,选

取温度 70 ℃、搅拌速度 400 r/min、搅拌线速度 1.5 m/s 较为合适。

表 1 温度与搅拌速度对破乳速率的影响
Tab. 1 Effect of temperature and stirring speed on demulsification rate

温度/ ℃	搅拌速度/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	线速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	完全破乳时间/ min
50	200	0.8	50
50	400	1.5	46
50	600	2.3	43
60	200	0.8	47
60	400	1.5	46
60	600	2.3	41
70	200	0.8	35
70	400	1.5	25
70	600	2.3	18
80	200	0.8	15
80	400	1.5	10
80	600	2.3	7

2 实验

文献[12-16]表明,在所用原材料一定的情况下,乳化剪切速率是影响乳化基质乳化质量的决定性因素,乳化程度随着剪切速率的增加而加深,破乳难度随着乳化程度的加深而加难。因此,为了快速地检测出电导率,选取了不同乳化质量的乳化基质和乳化炸药样品进行破乳检测,并根据检测数据绘制电导率-时间曲线。在实验过程中,同步观察样品的显微图像,作为对照。

2.1 实验仪器及药品

硝酸铵、硝酸钠、自来水、Span80(分析纯)、70#微晶蜡、Tween80(分析纯)、去离子水、雷磁电导率仪(DDSJ-308F)、乳化器、电磁炉、四口瓶(500 mL)、温度计(100 ℃)、塑形管、冰箱、数显搅拌器。

2.2 实验步骤

乳化基质组分(质量分数)为硝酸铵 76%、硝酸钠 8%、水 10%、Span80 和 70#微晶蜡共 6%。分别以 2.0、4.0、8.0、10.0 m/s 的线速度,制备出 4 种乳化基质样品。将上述 4 种样品进行电导率的检测及显微镜观察。

将乳化基质样品进行自然储存,对不同储存时间的乳化基质进行电导率检测,并用显微镜观察样品析晶情况。乳胶基质的电导率按如下步骤进行检测:在 500 mL 四口瓶中加入 400 g 去离子水;之后

加热,使水温达到 70 ℃并保温;同时,开启搅拌器,并设定搅拌速度为 400 r/min。完成后,加入 1.2 g 质量分数为 10% 的 Tween80 溶液并搅拌,使混合均匀。之后,将电导率仪的电极没入水溶液液面之下,取 1.5 g 的乳化基质用塑形管挤成直径 5 mm 的圆柱体后置于四口瓶中。记录电导率随时间的变化,直到电导率不再增长为止,停止搅拌和保温。完成后,根据不同的温度及不同的搅拌速度重复实验。

3 结果与讨论

3.1 不同线速度制备的乳化基质

随着乳化基质破乳程度的增加,乳化基质释放的硝酸铵等氧化剂量增大,水溶液的电导率也随之增大。将 2.0、4.0、8.0、10.0 m/s 的线速度制备的乳化基质进行破乳检测。如图 1 所示,可以看出,线速度最低(2 m/s)时制备的乳化基质乳化程度最低,最先破乳,曲线急剧上升,在 4 min 时已经完全破乳。而随着线速度的提升,乳化基质的电导率随时间的上升的趋势逐渐减缓。线速度为 10 m/s 时制备的乳化基质直到 9 min 左右才完全破乳。

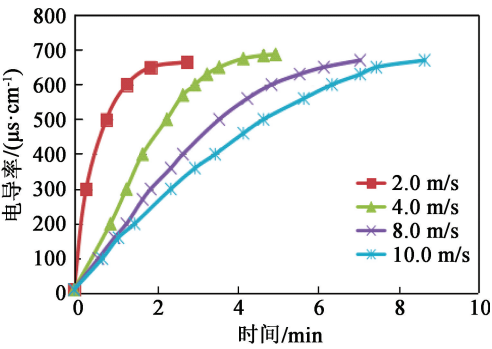


图 1 不同线速度制备的乳化基质的电导率-时间曲线
Fig. 1 Conductivity-time curves of emulsion matrix prepared at different linear speeds

显微镜观察结果也验证了这个观点,如图 2 所示。将检测样品置于 100 倍显微镜下观察破乳、析晶情况。可以看出,乳化体系内部的硝酸铵晶体随着线速度的增加在减少。这个趋势与电导率-时间曲线所得结果一致。

3.2 冷冻储存条件下的乳化基质

选取线速度 10 m/s 制备的乳化基质,在冷冻条件下对储存第 1、60、100 d 的乳化基质进行破乳检测,冷冻温度为 -25 ℃。电导率-时间曲线如图 3 所示。可以看出,随着储存时间的延长,乳化基质的储存性能逐渐下降:储存 1 d 时完全破乳需 12 min

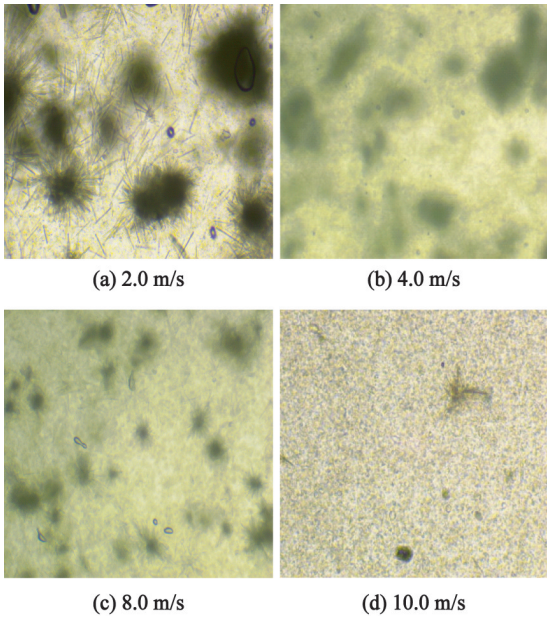


图 2 不同线速度制备的乳化基质的显微图像
Fig. 2 Micrographs of emulsion matrix prepared at different linear speeds

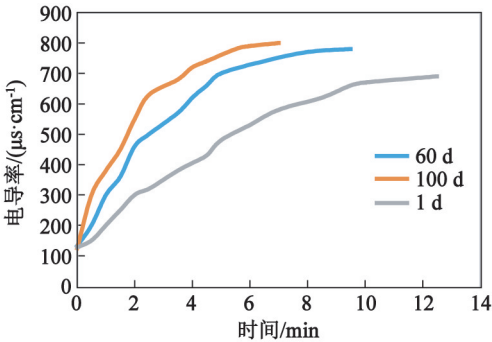


图 3 冷冻储存后乳化基质的电导率-时间曲线
Fig. 3 Conductivity-time curve of emulsion matrix after freezing storage

以上,到 100 d 时则不足 7 min。

同样,显微镜观察也印证了这个结果,如图 4 所示。从显微图像可见,乳化基质在经过冷冻破坏后,内部会有硝酸铵晶体析出;随着冷冻时间的增长,硝酸铵晶体析出量增加,且在储存第 100 d 时能看到大量的晶簇。显微观察结果与电导率-时间曲线所显示结果一致。

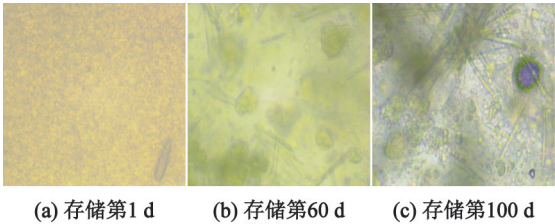


图 4 乳化基质冷冻储存后显微图像

Fig. 4 Micrographs of emulsion matrix after frozen storage

3.3 自然储存条件下的乳化基质

检测自然条件下乳化基质不同储存时间后的电导率,并绘制电导率-时间曲线,如图 5 所示。可以明显地看出,储存时间越长,乳化基质的析晶量越多,乳化基质的破乳程度变得越严重。乳化基质在破乳检测的第 15 ~ 20 min,电导率按照储存时间 1 ~ 180 d 的先后顺序呈现出明显的区别,随着储存时间的延长,电导率大幅度增加。截取 10 min 时电导率的变化,从 1 d 时的 1695 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 到 180 d 时的 3205 $\mu\text{s}/\text{ms}$,电导率增加了 89.1%。

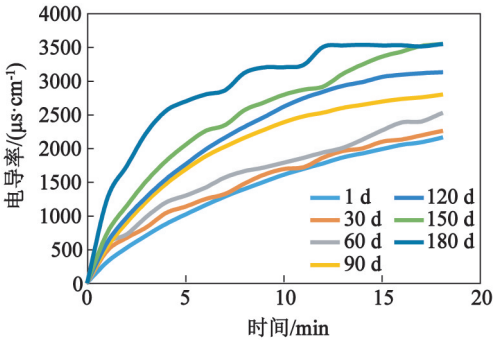


图 5 乳化基质自然储存 180 d 内的电导率-时间曲线
Fig. 5 Conductivity-time curves of emulsion matrix stored at room temperature within 180 days

通过对自然储存 180 d 的乳化基质进行显微镜观察,可以观测到破乳析晶情况。储存 30 d 时,开始出现了少量析晶情况,之后破乳析晶程度继续增加,到储存第 150 d 时,破乳程度大幅度增加。自然储存期间,乳化基质的破乳程度与电导率-时间曲线所反映出的规律基本相符。不同储存期乳化基质的显微图像如图 6(a) 所示。

3.4 自然储存条件下的乳化炸药

检测乳化炸药自然储存条件下不同时间的电导率,并绘制电导率-时间曲线,如图 7 所示。可以明显地看出,随着自然储存时间的延长,乳化炸药电导率曲线的斜率逐渐增大,即电导率加速增加,说明破乳程度加剧。截取 10 min 时电导率的变化,从 1 d 时的 1717 $\mu\text{s}/\text{ms}$ 到 180 d 时的 3058 $\mu\text{s}/\text{ms}$,电导率增加了 78.1%。

对自然储存 180 d 内的乳化炸药进行显微镜观察,可以观测到破乳和析晶情况。储存 30 d 时,开始出现少量析晶;随着时间的推移,在第 150 ~ 180 d 之间硝酸铵晶体大幅度增加,与电导率-时间曲线所反映出的情况基本相符,见图 6(b) 和图 7。

实际检测乳化炸药自然储存不同时间后的爆炸性能参数与电导率-时间曲线所表现出来的规律基本一致。自然储存时间延长,乳化炸药出现了晶体

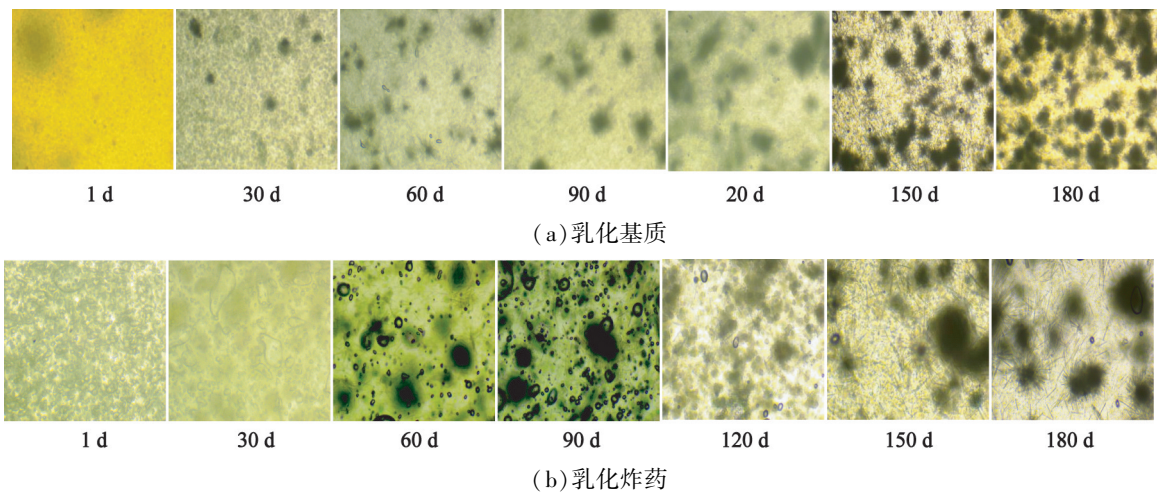


图 6 自然储存条件下不同时间乳化基质和乳化炸药的显微图像

Fig. 6 Micrographs of emulsion matrix and emulsion explosive after different storage times at room temperature

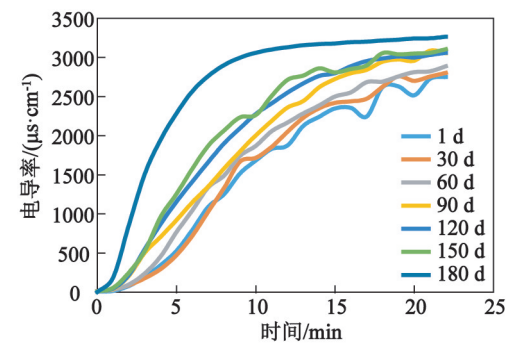


图 7 自然储存不同时间乳化炸药的电导率-时间曲线

Fig. 7 Conductivity-time curves of emulsion explosives after different natural storage times

析出现象,即破乳。随着晶体析出量的增加,乳化炸药的爆破性能下降,乳化体系的稳定性下降,见表 2。电导率-时间曲线和显微图像均可真实反映乳化炸药的破乳进程。

表 2 自然储存后乳化炸药的爆炸性能参数

Tab.2 Explosive performance parameters of emulsion explosive after natural storage

储存时间/d	密度/(g·cm ⁻³)	殉爆距离/cm	爆速/(m·s ⁻¹)	猛度/mm
1	1.09	7	5 436	18.14
30	1.08	7	5 208	17.76
60	1.12	6	5 301	17.04
90	1.14	6	5 174	16.76
120	1.14	5	5 174	16.00
150	1.14	5	5 070	15.78
180	1.19	3	4 550	12.95

在自然储存条件下,乳化基质和乳化炸药的电导率-时间曲线随着时间的推移斜率升高,在曲线上

同一时间点的斜率明显变大。电导率法用于检测乳化基质和乳化炸药的储存稳定性均是可行的。

为了进一步验证电导率法的准确性,选取拒爆的乳化炸药样品进行电导率检测。该样品经过性能检测已经不具备雷管感度。选取 3 组拒爆样品进行平行检测,见表 3。

表 3 拒爆乳化炸药的电导率

Tab. 3 Conductivity of misfire emulsion explosive $\mu\text{s}/\text{cm}$

时间/min	电导率			平均电导率
	样品 1 [#]	样品 2 [#]	样品 3 [#]	
0	200	208	203	203.7
1	2 015	2 030	2 007	2 007.3
2	2 682	2 682	2 682	2 682.0
3	2 933	2 947	2 945	2 941.7
4	3 140	3 149	3 141	3 143.3
5	3 517	3 517	3 517	3 517.0
6	3 500	3 528	3 535	3 521.0
7	3 510	3 520	3 533	3 521.0
8	3 529	3 531	3 535	3 531.7

从表 3 中可知,拒爆样品的电导率在 5 min 时达到 3 517 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。以此为标准,电导率检测达到此数值时,表明乳化炸药拒爆。

3.5 乳化基质与乳化炸药的对比检测

在生产过程中,在乳化器出口处取乳化基质,在敞口式动态搅拌敏化器出口(敏化温度 50 $^{\circ}\text{C}$)处取乳化炸药,分别检测电导率。如图 8 所示,乳化基质敏化后,曲线的斜率增加,反映出乳化基质经过动态敏化器的搅拌作用,在敏化的同时出现了析出晶体增多的情况;而敏化后的乳化炸药稳定性较乳化基质有所下降,说明在 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,动态敏化过程对乳化

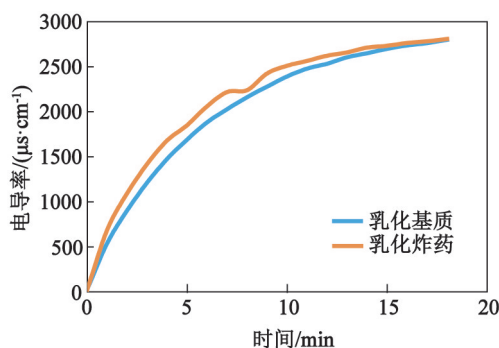


图 8 乳化基质与乳化炸药电导率-时间曲线

Fig.8 Conductivity-time curves of emulsion matrix and emulsion explosive

炸药油包水体系造成了一定程度的破坏。

分析原因:在热能、机械能的作用下,破乳剂分子与界面膜接触加剧,渗入并黏附在乳状液滴的界面^[5-9];随着油、水分离比例的增加,体系内的电解质(如硝酸根、铵根、钠离子)浓度也在增加,电导率随之增加。电导率法的实质是破乳剂逐渐替代油水界面上的乳化剂分子,从而破坏了膜的强度。所以,随着时间的推移,乳化体系的稳定性逐渐降低,大量的硝酸铵析晶,继而溶于水,使得水溶液中的硝酸铵浓度不断增加。

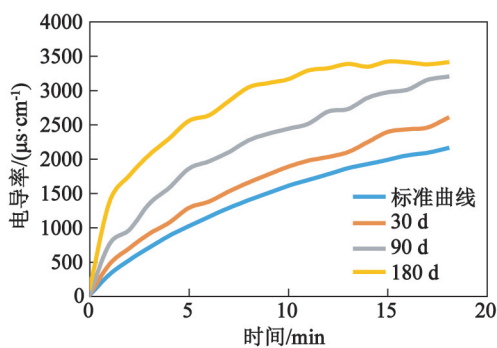
电导率-时间曲线的斜率随着析晶量的增加而升高,在完全破乳后,曲线趋于平缓。同一时间点时曲线的斜率越大,析晶越严重,乳化基质的储存稳定性越差。

通过大量实验可以得出,电导率法和显微镜观察法均能体现出乳化基质或乳化炸药的破乳情况。从实验结果来看,破乳检测乳化体系电导率,并通过绘制电导率-时间曲线判断乳化基质储存期的方法是可行的。

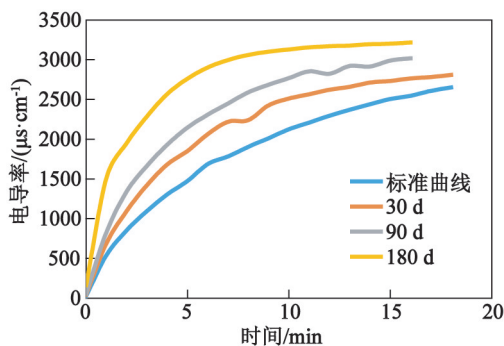
3.6 电导率法对乳化炸药生产的指导

进一步实验发现,绘制不同储存时间的乳化基质和乳化炸药的电导率-时间对照曲线并进行对比,可以得出乳化基质或者乳化炸药的自然储存期。该对照曲线是以自然储存有效期为 180 d 的乳化基质和乳化炸药为检测对象绘制的,将该曲线作为检测储存期的标准曲线。

在乳化炸药生产过程中,通过检测样品的电导率绘制出电导率-时间曲线,对照图 9,根据检测样品所绘制曲线在标准曲线的位置,可以判断出样品的储存期。样品曲线在标准曲线以下,则储存期超过 180 d;在 180 d 曲线以上,则已经破乳;在标准曲线与 180 d 曲线之间时,则储存期为 $(180-n)d$ (n 为样品曲线位置对应的天数)。



(a) 乳化基质



(b) 乳化炸药

图 9 乳胶基质和乳化炸药的电导率-时间对照曲线

Fig.9 Conductivity-time comparison curve of emulsion matrix and emulsion explosive

4 结论

通过电导率法与显微镜观察法及大量乳化基质、乳化炸药的自然储存时间实验对比,可以得出以下结论:

1) 在 Tween80 与被测样品质量比 1.0 : 12.5、保温温度 70 ℃、搅拌速度 400 r/min、搅拌线速度 1.5 m/s 下对乳化基质或乳化炸药进行破乳实验,并绘制出乳化基质或乳化炸药的电导率-时间曲线。通过曲线的斜率,可反映出被检测样品破乳程度的差别,并可以大致判断出乳化基质和乳化炸药的自然储存期。

2) 电导率法与显微镜观察法均可以检测出乳化基质或乳化炸药在自然储存期间的破乳情况。两种方法相比,电导率-时间曲线可以间接反映出乳化基质或乳化炸药储存稳定性优劣。

3) 在乳化炸药的生产过程中,通过检测乳化基质或乳化炸药的电导率,对比电导率-时间对照曲线,可以判断出该送检乳化基质或乳化炸药的自然储存时间。

4) 电导率法具有很强的可操作性和检测结果

的可靠性,乳化体系储存稳定性可通过直观的数据和图形表示,且检测周期短。

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.
WANG X G. Emulsion explosive [M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.

[2] 钱华, 潘峰, 张国虎, 等. 一种乳化炸药储存期的测定方法: CN103901178A [P]. 2014-07-02.

[3] 李德记, 王晓红, 戴明虎. 乳化基质稳定性检测装置: CN103776900A [P]. 2014-05-07.

[4] 周永华, 叶红齐, 钟宏. 电导率法研究 W/O 微乳液中 Pd 纳米微粒的化学破乳负载[J]. 过程工程学报, 2008, 8(6): 1163-1166.
ZHOU Y H, YE H Q, ZHONG H. Chemical demulsification and immobilization of Pd nanoparticles in W/O microemulsion by conductivity method [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(6): 1163-1166.

[5] 李外郎, 代乐蓉. AE、AP 型破乳剂分子在油-水界面上的状态模型[J]. 油田化学, 1985(2): 103-110.
LI W L, DAI L R. Molecule model of AE and AP type demulsifiers at oil-water interfaces [J]. Oilfield Chemistry, 1985(2): 103-110.

[6] 付华勇. 胶状乳化炸药油溶性破乳研究[J]. 工程爆破, 2016, 22(4): 87-90.
FU H Y. Oil-soluble demulsification of gelatin emulsion explosive[J]. Engineering Blasting, 2016, 22(4): 87-90.

[7] TSHILUMBU N N, FERG E E, MASALOVA I. Instability of highly concentrated emulsions with oversaturated dispersed phase. Role of a surfactant [J]. Colloid Journal, 2010, 72(4): 569-573.

[8] MASALOVA I, FOUDAZI R, MALKIN A Y. The rheology of highly concentrated emulsions stabilized with different surfactants [J]. Colloids and Surfaces A: Phy-

sicochemical and Engineering Aspects, 2011, 375(1/2/3): 76-86.

[9] MUDEME S, MASALOVA I, HALDENWANG R. Kinetics of emulsification and rheological properties of highly concentrated explosive emulsions[J]. Chemical Engineering & Processing, 2010, 49(5): 468-475.

[10] MASALOVA I, MALKIN A Y. A new mechanism of aging of highly concentrated emulsions: correlation between crystallization and plasticity [J]. Colloid Journal, 2007, 69(2): 198-202.

[11] MAHESHWARI R, DHATHATHREYAN A. Investigation of surface properties of amino acids: polarity scale for amino acids as a means to predict surface exposed residues in films of proteins [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 277(1): 79-83.

[12] 施正盼, 关江, 刘颖, 等. 基于胶体化学和乳状液理论分析乳状液脱稳破乳机理及方法[J]. 内蒙古环境科学, 2009, 21(3): 66-69.
SHI Z P, GUAN J, LIU Y, et al. Mechanism and method of emulsion off-stability and breaking analysis with theory of colloid chemistry and emulsion [J]. Inner Mongolia Environmental Science, 2009, 21(3): 66-69.

[13] 肖中华. 原油乳状液破乳机理及影响因素研究[J]. 石油天然气报, 2008, 38(4): 165-168.

[14] 韩力, 王伟新, 丁涌, 等. 压裂井采出液破乳的影响因素及对策[J]. 油气田地面工程, 2009, 28(5): 30-31.

[15] FORGIARINI A, ESQUENA J, GONZALEZ C, et al. Formation of nano-emulsions by low-energy emulsification methods at constant temperature [J]. Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2001, 17(7): 2076-2083.

[16] WANG Y D, CHEN M, XU L L, et al. Removal of phenol from dilute solutions by predispersed solvent extraction [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2000, 8(2): 103-107.