

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.002

# 聚异丁烯系列乳化剂的制备与应用研究\*

徐敏潇<sup>①</sup> 卢文川<sup>②</sup> 唐竟然<sup>①</sup> 张凯铭<sup>③</sup>

①江苏警官学院警务指挥与战术系(江苏南京,210031)

②本钢矿业公司炸药厂(辽宁本溪,117000)

③南京工程学院材料科学与工程学院(江苏南京,211167)

[摘 要] 制备了聚异丁烯系列乳化剂,并系统研究了聚异丁烯系列乳化剂在不同类型乳化炸药中的应用效果。在现场混装乳化炸药中,聚异丁烯-醇胺乳化剂具有比聚异丁烯-酰胺乳化剂更好的应用效果。并且,其亲水基结构、疏水链长度和用量均对现场混装乳化炸药基质的流变性产生较大影响。当在聚异丁烯乳化剂中添加一部分小分子乳化剂后,所形成的乳化炸药基质黏度和储能模量有所提高,但是稳定性快速下降。然而,在包装乳化炸药中,聚异丁烯-酰胺乳化剂具有更好的应用效果。对于聚异丁烯-醇胺乳化剂而言,虽然所制备的乳化基质稳定性较好,但是用于化学敏化形成的包装乳化炸药时,其储存稳定性却下降显著。

[关键词] 聚异丁烯; 乳化剂; 乳化炸药; 稳定性

[分类号] TD235.2<sup>+</sup>1

## Synthesis and Application of Polyisobutene Series Emulsifiers

XU Minxiao<sup>①</sup>, LU Wenchuan<sup>②</sup>, TANG Jingran<sup>①</sup>, ZHANG Kaiming<sup>③</sup>

① Command and Tactic Department, Jiangsu Police Institute (Jiangsu Nanjing, 210031)

② Explosive Plant of Ben'gang Mining Company (Liaoning Benxi, 117000)

③ Department of Material Science and Engineering, Nanjing Institute of Technology (Jiangsu Nanjing, 211167)

[ABSTRACT] Polyisobutene series emulsifiers was synthesized, and their application in different types of emulsion explosives was studied systematically. In field mixed emulsion explosive, polyisobutene-alcohol amine emulsifiers have better application effect compared to polyisobutene-amide emulsifiers. Moreover, hydrophilic base structure, hydrophobic chain length and dosage have great influence on the rheological properties of field mixed emulsion explosive matrix. Upon addition of some small molecular emulsifiers to polyisobutene emulsifier, the viscosity and storage modulus of the emulsion explosive matrix improve, but the stability decreases rapidly. However, polyisobutene-amide emulsifier has better application effect in packing emulsion explosive. For polyisobutene-alcohol amine emulsifiers, although the stability of the prepared emulsion matrix is good, the storage stability of emulsion explosives decreases significantly.

[KEYWORDS] polyisobutene; emulsifier; emulsion explosive; stability

## 引言

乳化炸药由过饱和的硝酸铵或硝酸铵与硝酸钠、硝酸钾等盐类溶液分散于油相中,形成油包水型(W/O)高内相乳状液,并经敏化而得<sup>[1]</sup>。由于乳化炸药生产方便、性能优越而且安全性好,近10年来其年产量一直占据我国工业炸药总产量的一半以

上<sup>[2]</sup>,在工业炸药中的地位十分重要。

乳化剂在乳化炸药配方中所占比例很少(一般质量分数少于3%),但却起到形成并稳定炸药W/O型结构的关键作用,是乳化炸药必不可少的组分<sup>[3]</sup>。聚异丁烯系列乳化剂是目前常用于制备乳化炸药的乳化剂<sup>[4]</sup>。近年来,鉴于聚异丁烯系列乳化剂在乳化炸药中的重要作用,国内外科研工作者围绕聚异丁烯系列乳化剂的制备、基本性质和在乳

\* 收稿日期:2019-11-18  
基金项目:国家自然科学基金青年基金(51604155);江苏警官学院科学研究面上项目(2017SJYZQ02);南京工程学院人才启动基金(YKJ201707)  
第一作者:徐敏潇(1982-),男,讲师,主要从事火炸药及爆炸防控技术研究。E-mail:xuminxiao@163.com  
通信作者:张凯铭(1983-),男,讲师,主要从事工业炸药及含能材料技术研究。E-mail:cggzk@163.com

化炸药中的使用性能展开了科研工作。谢丽等<sup>[5]</sup>采用聚异丁烯丁二酸酐(PIBSA)和三乙醇胺(TEA)制备了聚异丁烯丁二酸酐-三乙醇胺酯乳化剂,发现这种乳化剂在乳化炸药中使用效果良好。王德军等<sup>[6]</sup>采用 PIBSA 和多种小分子醇胺反应,制备了聚异丁烯丁二酸酐混合醇胺乳化剂,该乳化剂比传统的聚异丁烯丁二酰亚胺(PIBSI)具有更好的乳化能力,制得的乳化炸药具有更好的爆炸性能和储存稳定性。Masalova 等<sup>[7-11]</sup>研究了 3 类聚异丁烯乳化剂(PIBSA-MEA、PIBSA-IMIDE 和 PIBSA-UREA)对现场混装乳化炸药基质流变性的影响,发现亲水基结构的改变对乳化基质流变性影响较大。Reynolds 等<sup>[12-13]</sup>研究了聚异丁烯系列乳化剂反胶束对乳化基质储存稳定性的影响,发现反胶束结构一般先于 W/O 结构发生破坏,这是影响乳化基质稳定性的重要因素。Wang 等<sup>[14]</sup>研究了一系列商业化 PIBSA 乳化剂对现场混装乳化炸药基质稳定性的影响,发现 L2727B 和 L2727D 制备的乳化基质稳定性较好。

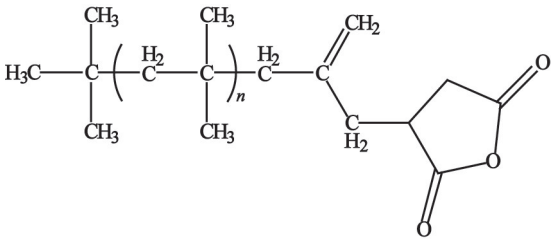
这些研究结果为了解聚异丁烯系列乳化剂的性质及其在乳化炸药中的作用提供了指导。然而,目前仍然缺乏聚异丁烯系列乳化剂在不同类型乳化炸药中的应用效果的研究报道,也缺乏从聚异丁烯系列乳化剂结构角度出发的研究。而随着现场混装乳化炸药的快速发展,国家对工业炸药生产过程安全性的要求也越来越高。乳化器线速度越来越低,定子和转子的间隙越来越大,静态乳化器应用越来越普及。如何根据具体情况选择合适的聚异丁烯系列乳化剂变得十分重要。

本文中,系统研究了聚异丁烯系列乳化剂在不同类型乳化炸药中的应用效果,分析其原因,为聚异丁烯系列乳化剂的合理使用提供参考。

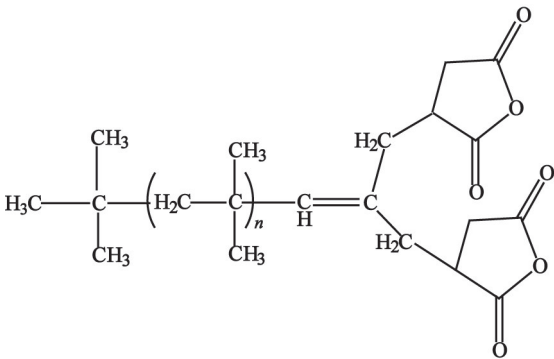
## 1 聚异丁烯系列乳化剂的制备

聚异丁烯系列乳化剂的制备过程包括两个步骤:首先,聚异丁烯(PIB,数均分子量为 1 000)和顺丁烯二酸酐(MAH)反应得到 PIBSA,结构如图 1(a);然后,将 PIBSA 和醇胺或多烯多胺反应得到所需乳化剂<sup>[15]</sup>。近年来,随着化工生产中环保要求越来越高,制备 PIBSA 的方法中,热加合法应用比较广泛<sup>[16]</sup>。相比于氯化法,热加合法不需氯气催化,反应过程无废气、废液产生;但对 PIB 的要求较高,需要采用高活性 PIB( $\alpha$  端烯基的质量分数超过 85%)作为反应原料。而且,反应温度较高(200 ℃ 以上),反应中较易出现焦化现象。理论上,PIBSA

中 PIB 上存在的碳碳双键可以进一步和 MAH 反应生成 PIBBSA<sup>[17]</sup>,如图 1(b)。然而,在实际制备过程中,仅通过热加合法很难实现。经长时间反应后,PIBSA 酸值依然较小,和 PIB 的理论酸值(102 mgKOH/g)接近,远未达到 PIBBSA 的理论酸值(187 mgKOH/g)。



(a) PIBSA



(b) PIBBSA

图 1 PIBSA 和 PIBBSA 的分子结构

Fig. 1 Molecular structures of PIBSA and PIBBSA

在第二步 PIBSA 和醇胺或多烯多胺的反应中,反应温度相对较低。由于 PIBSA 黏度较大,一般反应过程中会加入一定量的稀释剂(如 32#机械油)降低体系的黏度。值得注意的是,无论 PIBSA 和醇胺反应,还是和多烯多胺反应,在不同的反应条件下可得到多种不同结构的乳化剂。以 PIBSA 和乙醇胺(MEA)反应为例<sup>[18]</sup>,MEA 中存在的一NH<sub>2</sub> 和—OH 都可以和 PIBSA 中的酸酐发生反应,产物可能是酯化或酰化反应所得不同结构的乳化剂,也可能是多种不同结构乳化剂的混合物,如图 2(a)。PIBSA 和 TEA 的反应也是如此,如图 2(b)。采用内酯化的方法先对 PIBSA 进行改性<sup>[19]</sup>,将酸酐开环,形成两种内酯结构,可能是五元环内酯或六元环内酯,如图 3。然后,再与 TEA 反应,所得乳化剂结构相对比较单一,如图 4。

## 2 应用部分

2.1 聚异丁烯乳化剂在现场混装乳化炸药的应用  
在一系列聚异丁烯乳化剂中,PIBSI(商品名为

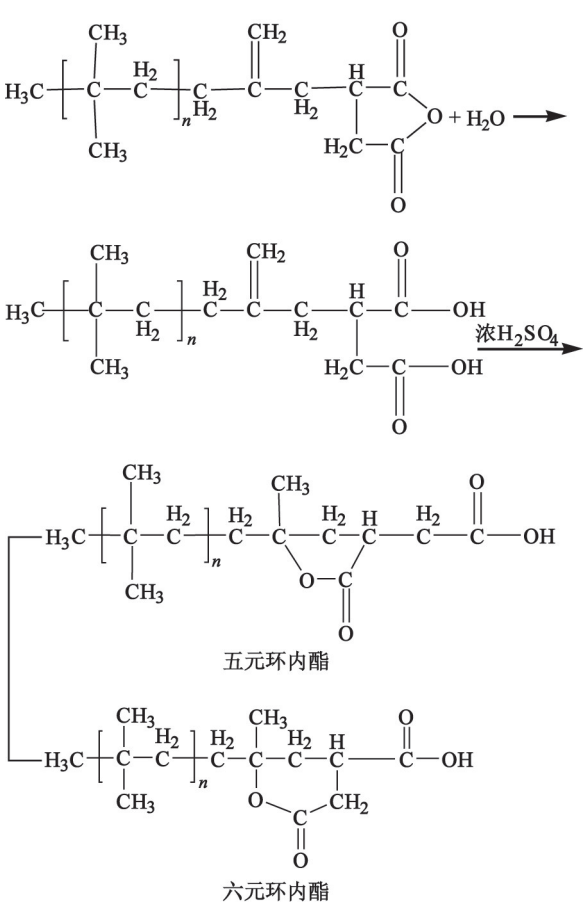
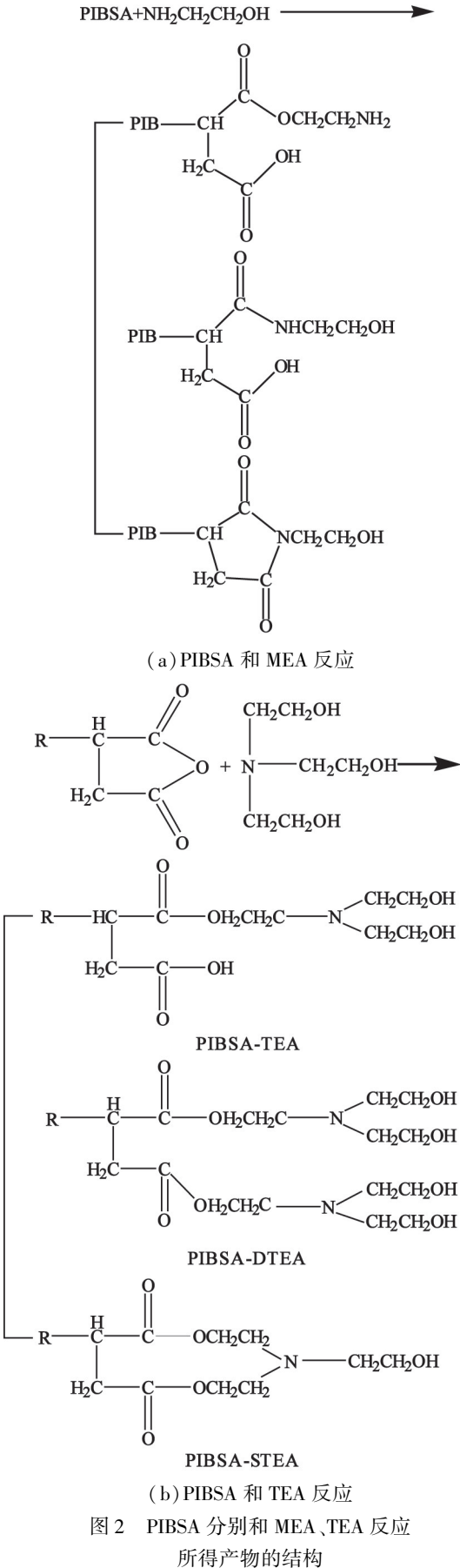


图 3 PIBSA 的内酯化反应

Fig. 3 Lactonization reaction of PIBSA

T152)的使用最为广泛。然而,该乳化剂一般为双头或多头的疏水键结构,如图 5(a),黏度较高,亲水性较低。将 PIBSI 单独用于制备现场混装乳化炸药,炸药配方(质量分数)为 77.5% 硝酸铵、16.0% 水、1.5% 乳化剂和 5.0% 0#柴油时,乳化剂的乳化效率下降,较难在低温下制备得到稳定的乳化基质,如表 1。通过控制原材料配比和反应条件,可制备得到单头的 PIBSI 乳化剂<sup>[8]</sup>,结构如图 5(b),虽然相比双头 PIBSI,乳化效果有一定改进,但是制得的乳化基质稳定性仍较差。

PIBSA 和醇胺形成的乳化剂单独用于制备现场混装乳化炸药时,效果较好。该类乳化剂一般为单疏水链乳化剂,亲水性较强,乳化效率较高,乳化能力较强。表 1 中 PIBSA 和 TEA 反应得到的 4 种不同结构的乳化剂中,PIBSA-TEA、PIBSA-DTEA 和 PIBSA-STEa 的结构如图 2,PIBSA-L-TEA 的结构如图 4,均能在较低温度下成功制备得到现场混装乳化炸药基质。

进一步分析聚异丁烯-醇胺乳化剂在现场混装乳化炸药中的应用效果发现,乳化剂亲水基结构、疏水链长度和用量都对现场混装乳化炸药的性质有一

Fig. 2 Structures of the products obtained by the reaction of PIBSA and MEA or TEA respectively

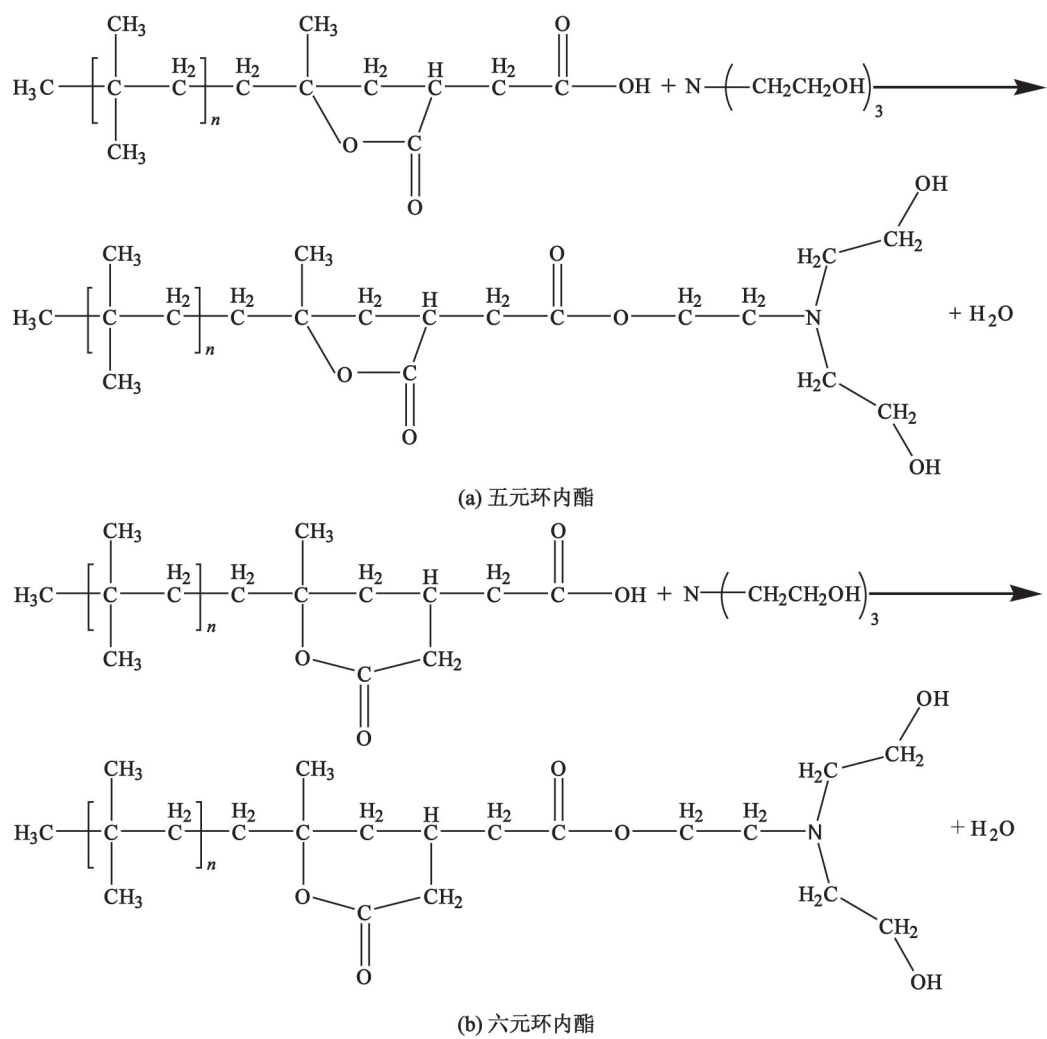


图 4 内酯化后的 PIBSA 和 TEA 的反应(PIBSA-L-TEA)  
Fig.4 Reaction equation of lactonized PIBSA and TEA

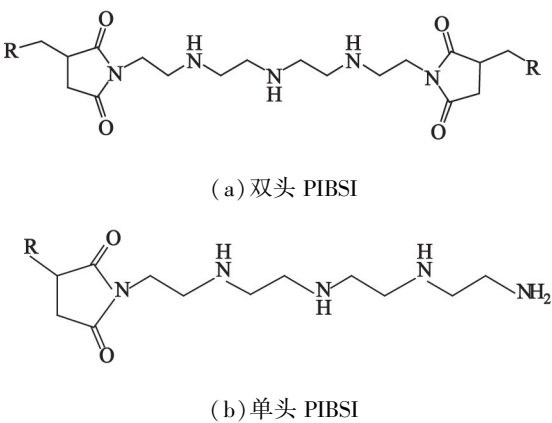


图 5 PIBSI 乳化剂的结构(R 为 PIB 链)  
Fig.5 Structure of PIBSI emulsifier(R is PIB chain)

定影响,而乳化基质线性黏弹区储能模量 $G'$ 的变化可较为灵敏地反映这种影响<sup>[20]</sup>。乳化基质线性黏弹区的 $G'$ 和分散相液滴尺寸关系密切。一般分散相液滴尺寸越小,乳化基质的 $G'$ 越高。因此, $G'$ 一

表 1 不同乳化剂在现场混装乳化炸药  
中的使用效果

Tab.1 Application effect of different emulsifiers  
in field mixed emulsion explosive

| 乳化剂                         | 水相温<br>度/℃ | 油相温<br>度/℃ | 转速/<br>( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 是否<br>成乳      |
|-----------------------------|------------|------------|--------------------------------|---------------|
| PIBSA-TEA                   | 80 ~ 90    | 20 ~ 30    | 400                            | 是             |
| PIBSA-DTEA                  | 80 ~ 90    | 20 ~ 30    | 400                            | 是             |
| PIBSA-STEA                  | 80 ~ 90    | 20 ~ 30    | 400                            | 是             |
| PIBSA-L-TEA <sup>[19]</sup> | 80 ~ 90    | 20 ~ 30    | 400                            | 是             |
| PIBSI-双头                    | 80 ~ 90    | 20 ~ 30    | 400                            | 否             |
| PIBSI-双头                    | 80 ~ 90    | 30 ~ 40    | 400                            | 否             |
| PIBSI-单头                    | 80 ~ 90    | 20 ~ 30    | 400                            | 否             |
| PIBSI-单头                    | 80 ~ 90    | 30 ~ 40    | 400                            | 是,4 h 后<br>破乳 |

定程度上也反映了乳化效果的优劣,其数值越高,乳  
化效果越好。此外,储存过程中 $G'$ 上升幅度和乳化



基质储存稳定性也有一定关联, $G'$ 上升幅度越大,乳化基质储存稳定性越差<sup>[20]</sup>。

### 2.1.1 亲水基结构对乳化基质流变性的影响

采用流变仪(MCR 101)动态振荡模式测试乳化基质的黏弹性变化。不同乳化剂所制备乳化基质的 $G'$ 和损耗模量 $G''$ 因形变 $\varepsilon$ 增加发生的变化如图6所示。分析乳化剂亲水基结构对乳化基质 $G'$ 的影响。显然,在4种乳化剂中,PIBSA-TEA制备的乳化基质线性黏弹区的 $G'$ 最高;PIBSA-DTEA的次之;PIBSA-STEAs的最小。这说明乳化基质的 $G'$ 和乳化剂亲水基结构关系密切。在PIBSA-STEAs、PIBSA-L-TEA以及PIBSA-DTEA 3种乳化剂中,亲水基中羟基含量依次上升。这和3种乳化剂形成的乳化基质的 $G'$ 从小到大的顺序一致。羟基含量提高,提升了乳化剂的亲水性,增强了和硝酸铵的氢键作用,提高了乳化效果,促使 $G'$ 升高。然而,对PIBSA-TEA而言,虽然羟基含量少于PIBSA-DTEA,但其中存在未反应的羧基,存在氢键和静电作用两种方式,促进了乳化剂和硝酸铵之间的相互作用。此外,亲水基的不对称结构赋予PIBSA-TEA更强的极性,也进一步加强了乳化剂和硝酸铵之间的相互作用,提高了乳化效果。

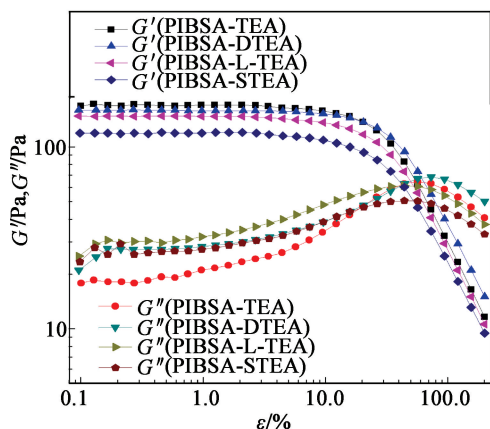


图6 乳化剂亲水基结构对乳化基质黏弹性的影响

Fig. 6 Effect of hydrophilic structure of emulsifier on visco-elasticity of emulsion matrix

### 2.1.2 乳化剂分子量对乳化基质流变性的影响

采用分子量 $M_n$ 分别为1 000、1 300和1 650的高活性聚异丁烯(HRPIB)和MAH通过热加合法制备PIBSA。然后,将PIBSA和TEA反应,制备PIBSA-DTEA乳化剂。乳化剂分子量对乳化基质流变性的影响如图7。从图7可知,乳化剂分子量提高, $G'$ 有一定提高。

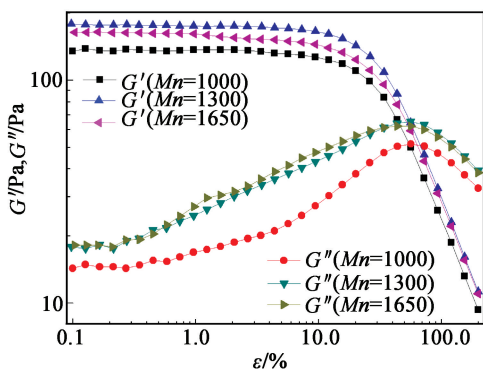


图7 乳化剂分子量对乳化基质黏弹性的影响

Fig. 7 Effect of molecular mass of emulsifier on visco-elasticity of emulsion matrix

### 2.1.3 乳化剂质量分数对乳化基质流变性的影响

从图8可知,当乳化剂质量分数减少,处于油水界面的乳化剂量降低,乳化效果下降,从而引起 $G'$ 下降。此外,Masalova和Reynolds等<sup>[10,12-13]</sup>研究发现,乳化剂质量分数减少,乳化剂反胶束质量分数会降低,乳化基质的 $G'$ 也随之下下降。乳化剂质量分数的下降对乳化基质的稳定性影响显著,乳化基质储存6周后的微观结构如图9。当质量分数下降为0.75%时,乳化基质中较早出现了硝酸铵析晶现象,如图9(a)中红色方框标识处所示。

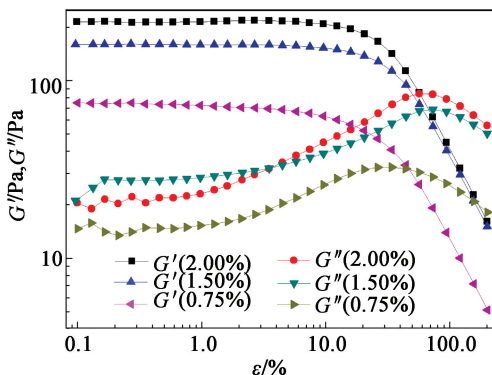


图8 乳化剂质量分数对乳化基质黏弹性的影响

Fig. 8 Effect of content of emulsifier on visco-elasticity of emulsion matrix

## 2.2 复合乳化剂在现场混装乳化炸药中的应用

由小分子乳化剂(最具代表性的为失水山梨醇单油酸酯)和聚异丁烯系列乳化剂等形成的复合乳化剂也常用于制备现场混装乳化炸药。小分子乳化剂的加入,一方面可以提高复合乳化剂的乳化能力,尤其在较低温度和较低乳化转速下,小分子的乳化能力优于聚异丁烯系列乳化剂。当小分子乳化剂加入后,由于其较强的乳化能力,提高了乳化效果,促使分散相液滴尺寸进一步下降,从而提高了乳化基

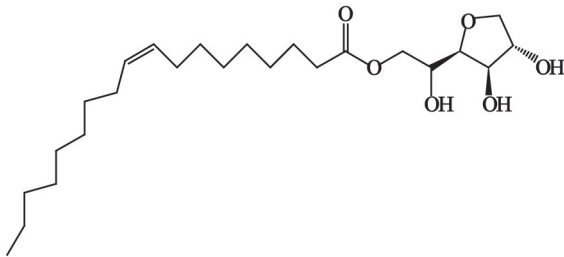
(a) 乳化剂 0.75% (质量分数)      (b) 乳化剂 1.50% (质量分数)      (c) 乳化剂 2.00% (质量分数)

图9 乳化基质储存6周后的微观结构

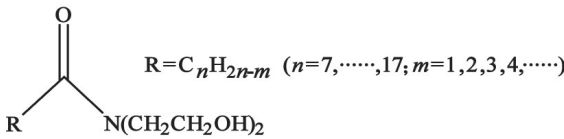
Fig. 9 Microstructure of emulsion matrix after storage for 6 weeks

质的黏度和  $G'$ 。其次,小分子乳化剂价格较低,降低了乳化炸药的制备成本。

在不同的小分子乳化剂中,亲水基团的改变对其乳化效率也有一定的影响,这主要取决于亲水基不同的极性导致乳化剂在油-水界面层上的吸附情况不同,极性大的亲水基团能在一定程度上提高乳化剂在界面层上的吸附<sup>[21]</sup>。在失水山梨醇单油酸酯(SMO)、椰子油酸二乙醇酰胺(CDEA)和油酸二乙醇酰胺(ODEA)3种小分子乳化剂(结构如图10)中,C—O键的电负性更高、极性更强,因此SMO形成的乳化基质黏度和 $G'$ 最高(表2)。黏度测试温度为25℃。



(a) SMO



(b) ODEA 或 CDEA

图 10 小分子乳化剂的结构

Fig. 10 Structure of small molecular emulsifier

小分子乳化剂的加入能提高乳化效果,并可降低乳化剂成本。但是,不可忽略的一个问题是,采用小分子乳化剂制备的乳化炸药一般结构稳定性比较差。从图 11 可知,采用 SMO 和 PIBSA-TEA 复合乳化剂制备的乳化基质,在挤压过程(挤压设备如参考文献[22])中,乳化基质  $G'$  上升较多,上升幅度远

表2 不同乳化剂所制备的乳化基质的黏度和  $G'$  (25 °C)

Tab.2 Viscosity and  $G'$  of emulsion matrix  
prepared by different emulsifiers at 25 °C

| 乳化剂            | 黏度/<br>(mPa · s) | $G'/\text{Pa}$ |
|----------------|------------------|----------------|
| SMO/PIBSA-TEA  | 11 300           | 201            |
| ODEA/PIBSA-TEA | 10 500           | 185            |
| CDEA/PIBSA-TEA | 10 200           | 182            |
| PIBSA-TEA      | 9 800            | 170            |

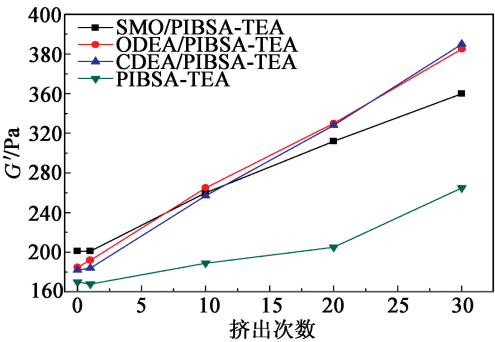


图 11 乳化基质经挤压后  $G'$  的变化

Fig. 11 The change of  $G'$  of emulsion matrix  
after extrusion

高于单独使用PIBSA-TEA制备的乳化基质。同样的情况在乳化基质静止储存过程中也可以观察到,如表3。说明添加一定量的小分子乳化剂后,乳化基质的稳定性发生了较严重的下降。因此,采用复合乳化剂制备的现场混装乳化炸药基质不利于长距离泵送和长时间储存。

### 2.3 聚异丁烯乳化剂在包装乳化炸药中的应用

和在现场混装乳化炸药中的应用情况不同,在包装乳化炸药时,炸药配方(质量分数)为76.3%硝酸铵、8.0%硝酸钠、9.0%水、2.5%乳化剂和4.0%复合蜡;制备条件在油相温度110℃、水相温度125℃、乳化转速1200 r/min下,PIBSI乳化剂的使用效

表 3 静置储存过程中乳化基质  $G'$  的变化

| Tab. 3 The change of $G'$ of emulsion matrix during static storage |      |      |        |        | Pa |
|--------------------------------------------------------------------|------|------|--------|--------|----|
| 乳化剂质量比                                                             | $G'$ |      |        |        |    |
|                                                                    | 储存前  | 21 d | 42 d   | 70 d   |    |
| $m(\text{SMO}) :$<br>$m(\text{PIBSA-TEA}) =$<br>30 : 70            | 201  | 330  | 490    | 无线性黏弹区 |    |
| $m(\text{ODEA}) :$<br>$m(\text{PIBSA-TEA}) =$<br>30 : 70           | 185  | 365  | 无线性黏弹区 | 无线性黏弹区 |    |
| $m(\text{CDEA}) :$<br>$m(\text{PIBSA-TEA}) =$<br>30 : 70           | 182  | 350  | 无线性黏弹区 | 无线性黏弹区 |    |
| PIBSA-TEA                                                          | 170  | 185  | 271    | 304    |    |

果要好于聚异丁烯-醇胺类乳化剂。分别采用 PIBSA-TEA、PIBSA-DTEA 和 PIBSI 制备包装乳化炸药, 储存稳定性如表 4。从表 4 中可知, 随着储存时间的延长, PIBSA-TEA 和 PIBSA-DTEA 制备的乳化炸药较早出现了拒爆现象。然而, 当测试乳化基质的稳定性时发现, 在储存过程中, 采用 PIBSA-TEA 和 PIBSA-DTEA 制备的乳化基质, 黏度和硝酸铵析出率随时间的延长变化较小, 如图 12。可发现, 采用两种醇胺类乳化剂制备的乳化基质应具有较好的稳定性。然而, 经化学敏化后乳化炸药的稳定性却与之相反。其原因可能在于, 两种醇胺类乳化剂制备的乳化基质黏度较小, 形成的气泡在其中存留时间较短, 因此也降低了炸药的储存稳定性。

表 4 静置储存过程中包装乳化炸药爆速的变化

| Tab. 4 The change of detonation velocity of package emulsion explosive during static storage |       |       |       |       |       | m/s |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 乳化剂                                                                                          | 爆速    |       |       |       |       |     |
|                                                                                              | 储存前   | 30 d  | 90 d  | 180 d | 270 d |     |
| PIBSI                                                                                        | 5 000 | 5 000 | 4 900 | 4 807 | 4 672 |     |
| PIBSA-TEA                                                                                    | 5 102 | 5 150 | 4 716 | 4 347 | 0(拒爆) |     |
| PIBSA-DTEA                                                                                   | 5 050 | 5 000 | 4 672 | 4 424 | 0(拒爆) |     |

3 结论

制备了聚异丁烯系列乳化剂, 并系统研究了聚异丁烯系列乳化剂在不同类型乳化炸药中的应用效果。相比于 PIBSA 和多烯多胺反应得到的聚异丁烯-酰胺乳化剂, 由 PIBSA 和醇胺反应得到的聚异丁烯-醇胺乳化剂在现场混装乳化炸药中具有更好的

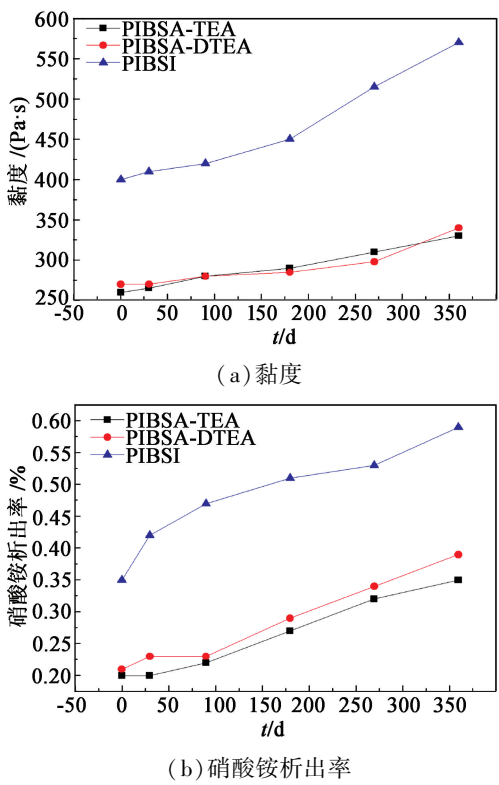


图 12 乳化基质储存过程中黏度和硝酸铵析出率的变化

Fig. 12 The change of viscosity and AN precipitation of the emulsion matrix in storage

使用效果。该类型乳化剂的亲水基结构、疏水链长度和用量均对现场混装乳化炸药基质流变性具有较大的影响。此外, 添加一部分小分子乳化剂于醇胺类乳化剂中, 形成的乳化炸药基质黏度和储能模量有所提高, 但是其稳定性下降较快。而在包装乳化炸药的应用中, 聚异丁烯-酰胺乳化剂具有更好的应用效果; 对于聚异丁烯-醇胺乳化剂而言, 虽然所制备的乳化基质稳定性较好, 但是所得乳化炸药储存过程中的稳定性下降显著。

参 考 文 献

[1] 高海松. 散装乳化炸药现场混装工艺与装置实验研究 [D]. 长沙:长沙矿山研究院,2012.  
GAO H S. Experimental research on technology and device of emulsion explosive site mixed [D]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research, 2012.

[2] 朱帅. 改性复合蜡制乳化炸药热分解特性的研究 [D]. 淮南:安徽理工大学,2018.  
ZHU S. Non-isothermal thermal decomposition characteristics of emulsion explosives prepared by modified composite wax [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.



- [3] 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.
- [4] TSHILUMBU N N. The effect of type and concentration of surfactant on stability and rheological properties of explosive emulsions [D]. Capa Town: Cape Peninsula University of Technology, 2009.
- [5] 谢丽, 郭晓晶, 李斌栋, 等. 聚异丁烯丁二酸三乙醇胺酯的合成及应用研究[J]. 爆破器材, 2012, 41 (2): 1-4.
- XIE L, GUO X J, LI B D, et al. Synthesis and application of polyisobutylene succinic esters based on triethanolamine [J]. Explosive Materials, 2012, 41 (2): 1-4.
- [6] 王德军, 张志银, 孟淑香, 等. 一种粉状乳化炸药用乳化剂及其制备方法: CN1259290 [P]. 2006-06-14.
- [7] MASALOVA I, FOUDAZI R, MALKIN A Y. The rheology of highly concentrated emulsions stabilized with different surfactants [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 2011, 375(1): 76-86.
- [8] 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: 185-197.
- [9] 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.
- [10] MASALOVA I, MALKIN A Y. Master curves for elastic and plastic properties of highly concentrated emulsions [J]. Colloid Journal, 2008, 70(3): 327-336.
- [11] MASALOVA I, MALKIN A YA, SLATTER P, et al. The rheological characterization and pipeline flow of high concentration water-in-oil emulsions [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2003, 112 (2): 101-114.
- [12] REYNOLDS P A, GIBERT P E, WHITE W J. High internal phase water-in-oil emulsions studied by small-angle neutron scattering [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2000, 104(30): 7012-7022.
- [13] REYNOLDS P A, GIBERT P E, WHITE W J. High internal phase water-in-oil emulsions and related microemulsions studied by small angle neutron scattering-2. The distribution of surfactant [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2001, 105(29): 6925-6932.
- [14] WANG L Q, FANG J. Rheological properties and water-in-oil structural stability of emulsion matrixes [J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2013, 10: 87-102.
- [15] RIVERA-TIRADO E, AASERUD D J, WESDEMIVTIS C. Characterization of polyisobutylene succinic anhydride chemistries using mass spectrometry [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124: 2682-2690.
- [16] 周月华, 陈志明. 热合法聚异丁烯丁二酰亚胺合成工艺研究[J]. 江苏化工, 2007, 35 (5): 23-26.
- ZHOU Y H, CHEN Z M. Synthesis of polyisobutenyl succinimides through hot reaction [J]. Jiangsu Chemical Industry, 2007, 35 (5): 23-26.
- [17] 吕兆坤. 高分子醇胺乳化剂的合成及其对乳化炸药贮存稳定性的影响 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- LÜ Z K. The synthesis of polymeric alcohol-amine emulsifier and its effect on the storage stability of emulsion explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [18] 尹国靖. 新型乳化剂的合成及其在乳化炸药中的应用 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- YIN G J. Research on the synthesis of a new type emulsifier and its application on industry explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [19] ZHANG K M, NI O Q. Effect of PIBSA-based surfactants on the interfacial interaction, rheology, and stability of highly concentrated water-in-oil emulsion [J]. Journal of Dispersion Science Technology, 2015, 36 (4): 556-562.
- [20] ZHANG K M, ZHAO H R, NI O Q, et al. Storage modulus' variation in aging and its application in assessing the stability of emulsion explosive matrix [J]. Journal of Dispersion Science Technology, 2017, 38(11): 1517-1522.
- [21] PAPKE B L, ROBINSON L M. Factors affecting poly-(isobutenyl)succinimide dispersant adsorption onto surfactant-coated colloidal particles in nonaqueous media [J]. Langmuir, 1994, 10(6): 1741-1748.
- [22] 全慧锋, 倪欧琪, 张凯铭, 等. 一种乳化炸药用乳化剂的乳化效果评价方法及装置: 104101688 [P]. 2016-01-20.