

文章编号: 1006-9941(2016)12-1198-07

## RDX 级配对醇醛高聚物粘结炸药触变性的影响

刘慧慧, 郑申声, 蔡贾林, 蒋全萍, 罗 观, 李尚斌

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为了研究浇注型醇醛高聚物粘结炸药的触变性能, 采用触变环法探索了黑索今(RDX)级配及颗粒含量对料浆触变性的影响。触变环面积用于表征料浆的触变程度。结果表明, 该料浆体系是假塑性流体, 不同 RDX 级配的料浆具有不同程度的触变性。RDX 级配数越高、颗粒越大的料浆触变性越小。小颗粒含量越高, 大颗粒和中颗粒的级配对降低料浆触变性的影响越大。料浆的触变程度与小颗粒 RDX 含量呈正相关关系, 与大颗粒 RDX 含量呈负相关关系。

**关键词:** 高聚物粘结炸药(PBX); 颗粒大小; 粒度级配; 触变性; 滞回环

**中图分类号:** TJ55; O373

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.12.012

### 1 引言

触变性是指在剪切应力作用下体系结构发生变化而粘度降低, 当应力去除后, 体系结构逐渐恢复的效应<sup>[1-2]</sup>。对于浇注型高聚物粘结炸药, 其关键工序浇注的过程中料浆的触变性直接影响产品的质量。触变性强的料浆, 在浇注过程中的剪切作用下, 体系内部结构恢复慢, 料浆流平性能差, 易产生药条堆积而导致产品缺陷。当流动破坏结构而静止形成结构, 并且与时间有关, 体系表现出正触变性, 反之, 体系为负触变性<sup>[3-4]</sup>。已研究的许多体系均表现出了触变性<sup>[5-10]</sup>, 如 Dai 等<sup>[9]</sup>对镁铝双氢氧化物(LDHs)/高岭土分散体系触变性的研究, 随着 LDHs 与高岭土的比例以及 pH 的增加, 体系由正触变性向复合触变性转变。

目前触变性的研究方法很多, 如触变环法<sup>[9, 11-12]</sup>、恒剪切速率法<sup>[13-14]</sup>、三段式触变性测试法<sup>[15-16]</sup>、振荡剪切法<sup>[17-18]</sup>等, 其中触变环法是最常用的定量描述触变性大小的方法。如 Dai 等<sup>[9]</sup>采用触变环法研究了高岭土分散体系的触变性, 体系触变性是正、负电荷间的静电引力及颗粒间的长程静电斥力相互作用的结果。体系结构经剪切作用破坏后, 颗粒相互靠近形成

网络结构表现为正触变性, 而颗粒相互靠近形成离散密集的絮状物则表现为负触变性。

尽管在国内外对触变性已有较多的研究, 但在相关炸药领域该部分研究较少, 尤其是固相颗粒级配对料浆触变性的影响, 包括固相颗粒的级配数(固相组分颗粒的种类数)以及固相颗粒的配比。本文研究的高聚物粘结炸药体系是以 RDX 为固相填料, 季戊四醇丙烯醛树脂为粘结剂, 硫酸二乙酯为固化剂。通过固定配方中固相总含量, 调节 RDX 级配数以及大、中、小颗粒的含量, 采用触变环法表征料浆的触变程度, 探索 RDX 级配对触变环面积大小的影响规律, 以此认识料浆内部结构受到破坏后的恢复情况, 继而改善料浆的触变性能, 为减少高聚物粘结炸药产品缺陷提供借鉴。

### 2 实验部分

#### 2.1 试剂与仪器

试剂: 季戊四醇-丙烯醛树脂(醇醛树脂), 工业级, 黎明化工研究院; 硫酸二乙酯(DES), 分析纯, 成都联合化工试剂研究所; 黑索今(RDX): RDX-L(大颗粒, 280 ~ 425  $\mu\text{m}$ )、RDX-M(中颗粒, 125 ~ 280  $\mu\text{m}$ )、RDX-S(小颗粒, 平均粒径 20  $\mu\text{m}$ ); 苯乙烯, 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司。

仪器: 扫描电子显微镜, 飞纳 Phenom<sup>TM</sup> 台式扫描电子显微镜, 加速电压 5 kV; RVDV-III+型旋转粘度计, Brookfield 公司, 粘度测量范围为 1 ~ 100000 mPa·s。

#### 2.2 样品制备与测试

样品制备: 将料浆各组份按一定配比称量至烧杯

收稿日期: 2016-05-24; 修回日期: 2016-07-05

基金项目: 中国工程物理研究院化工材料研究所科技创新基金资助(KJCX-201408)

作者简介: 刘慧慧(1990-), 女, 研实员, 主要从事高聚物粘结炸药研究。e-mail: liuhuihui9088@caep.cn

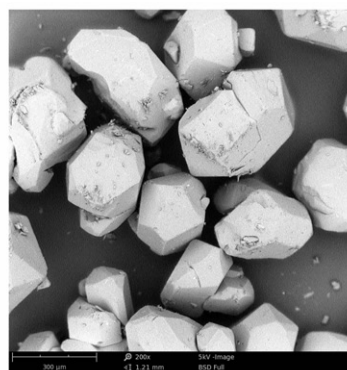
通信联系人: 李尚斌(1972-), 男, 职称, 研究员, 主要从事炸药配方和性能研究。e-mail: caeplisb@163.com

中,搅拌均匀后放入仪器中。其中,固定固相总含量为 60%, 粘结剂醇醛树脂为 39.29%, 固化剂 DES 为 0.71%, 稀释剂苯乙烯为外加量 3%。依据 RDX 大、中、小颗粒的配比对样品进行命名编号, 如表 1。

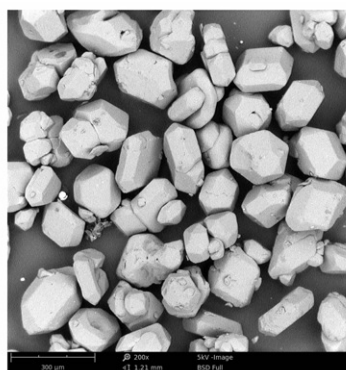
表 1 不同样品的固相组分配比

Table 1 The percentage of solid components in different samples

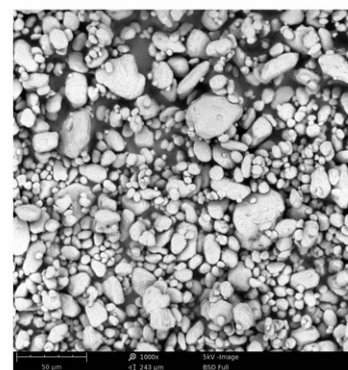
| sample | RDX-L/RDX-M/RDX-S | sample | RDX-L/RDX-M/RDX-S |
|--------|-------------------|--------|-------------------|
| S1     | 0/0/60            | S12    | 50/0/10           |
| S2     | 0/60/0            | S13    | 30/30/0           |
| S3     | 0/10/50           | S14    | 5/5/50            |
| S4     | 0/20/40           | S15    | 5/50/5            |
| S5     | 0/30/30           | S16    | 10/10/40          |
| S6     | 0/40/20           | S17    | 10/40/10          |
| S7     | 0/50/10           | S18    | 15/15/30          |
| S8     | 10/0/50           | S19    | 15/30/15          |
| S9     | 20/0/40           | S20    | 20/20/20          |
| S10    | 30/0/30           | S21    | 25/10/25          |
| S11    | 40/0/20           | S22    | 25/25/10          |



a. RDX-L (200×)



b. RDX-M (200×)



c. RDX-S (1000×)

图 1 3 种粒度 RDX 的 SEM 图

Fig.1 SEM images of RDX-L, RDX-M and RDX-S

### 3.2 流体特性

图 2 是 S1 ~ S22 样品的剪切速率-剪切应力曲线, 可见随着剪切速率的增加, 所有料浆的剪切应力均呈增加趋势, 且 RDX 级配的不同导致剪切应力的增加速率不同。

图 3 是样品 S1 ~ S22 的剪切速率-粘度曲线。由图 3 可知, 所有样品的粘度均与剪切速率有关, 并表现出非线性关系, 说明实验考察的高聚物粘结炸药体系为非牛顿流体<sup>[20]</sup>。另外, 随着剪切速率的增加, 料浆粘度首先是显著下降, 经过缓慢降低后趋近于稳定, 即料浆表现出剪切变稀现象。这是因为料浆各组分在充分混合后其液相分子间、分散相分子间及液相和分散相分子间均形成物理交联网络<sup>[21-22]</sup>, 因而在剪切速率

实验测试过程: 测试从低转速  $1 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  开始, 逐渐升高转速至  $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 然后再逐渐降低转速进行循环剪切, 记录在转速升高和降低过程中相应的扭矩和粘度数据, 实验测试温度  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

数据处理: 根据同轴圆筒测试基本公式及测试原理计算实验过程中的转速和扭矩对应的剪切速率和剪切应力<sup>[19]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同 RDX 颗粒的 SEM 表征

对 3 种不同粒度的 RDX 样品进行形貌表征, 其 SEM 测试结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 3 种 RDX 表面均比较光滑, 且整体呈椭球形。大颗粒和中颗粒 RDX 单个晶体颗粒棱角分明, 小颗粒 RDX 棱角不明显。另外, 从图中可直观看出, 3 种 RDX 粒度分布不均匀。

较小时料浆粘度较大。随剪切速率增大, 交联网络的节点遭到破坏, 料浆宏观表现为粘度逐渐降低。

使用 Ostwald-de Waele 幂律模型描述物料粘度与剪切速率的关系<sup>[20,23]</sup>, 模拟得到的剪切速率指数  $n$  值列于表 2。由表 2 可见, 所有样品的剪切速率指数均处于  $0 \sim 1$  之间, 因此在考察的剪切速率范围内 ( $0 \sim 53.85 \text{ s}^{-1}$ ) RDX 基醇醛高聚物粘结炸药为假塑性流体<sup>[23-24]</sup>。

### 3.3 流体触变性

图 4 是醇醛高聚物粘结炸药触变性测试的滞回曲线。图中实心线(上行线)为剪切速率从低到高时剪切应力的变化趋势, 空心线(下行线)为剪切速率从高到低时剪切应力的变化趋势。由图 4 可见, 上行曲线

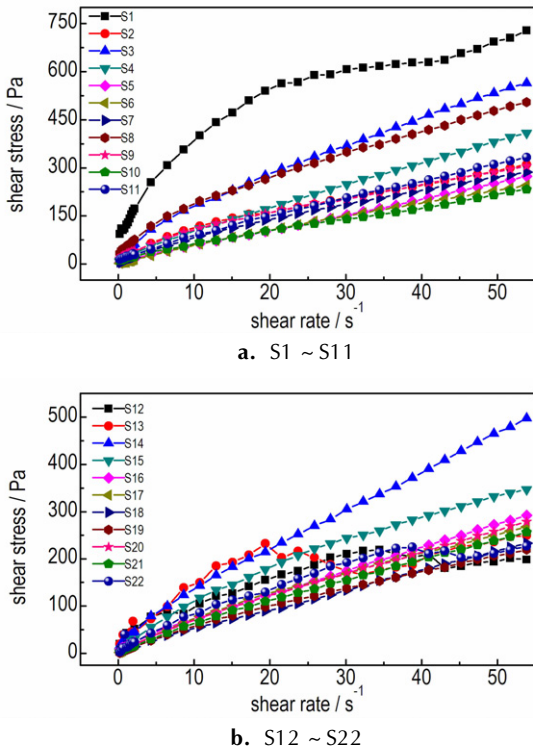


图2 不同RDX级配样品S1~S22的剪切应力随剪切速率的变化

Fig. 2 Change in shear stress with shear rate for samples S1-S22 with different RDX gradation

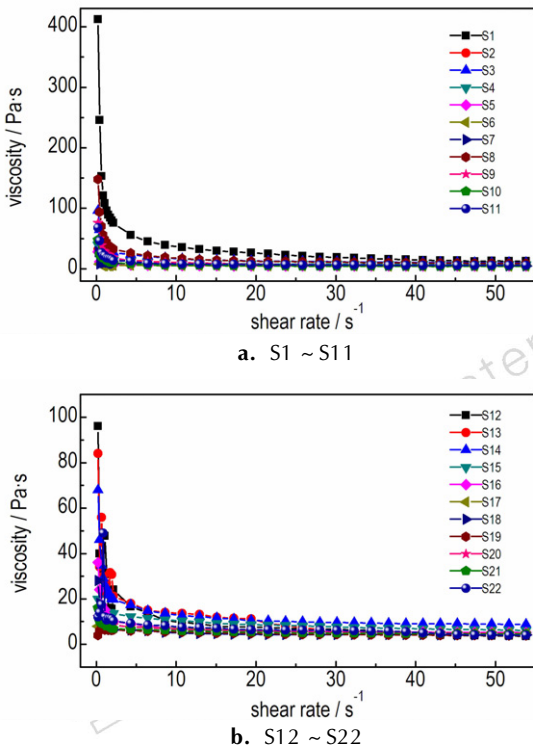


图3 不同RDX级配样品S1~S22的粘度随剪切速率的变化

Fig. 3 Change in viscosity with shear rate for samples S1-S22 with different RDX gradation

表2 幂律模型模拟的不同样品的剪切速率指数n值

Table 2 The n value of shear rate index of different samples simulated by Power law model

| sample | n    | sample | n    |
|--------|------|--------|------|
| S1     | 0.40 | S12    | 0.44 |
| S2     | 0.63 | S13    | 0.39 |
| S3     | 0.68 | S14    | 0.77 |
| S4     | 0.83 | S15    | 0.70 |
| S5     | 0.93 | S16    | 0.83 |
| S6     | 0.86 | S17    | 0.78 |
| S7     | 0.75 | S18    | 0.91 |
| S8     | 0.59 | S19    | 0.81 |
| S9     | 0.62 | S20    | 0.83 |
| S10    | 0.76 | S21    | 0.84 |
| S11    | 0.78 | S22    | 0.60 |

中随着剪切速率的增加,料浆的剪切应力逐渐上升至最高点,下行曲线中料浆的剪切应力随剪切速率的降低而下降,并且所有样品的上行和下行曲线均不重合,形成形状不一的滞后环,表明料浆具有触变性<sup>[23,25-26]</sup>。形状不一的滞后环,包括顺时针、逆时针和交叉状,表明料浆具有不同的触变类型。顺时针的滞后环为正触变性体系,逆时针的为负触变性体系,交叉状的为复合触变性体系<sup>[9]</sup>。

分析图4可知,多数样品表现出负触变性,如S5、S10、S11、S17~S21,下行曲线位于上行曲线之上,即剪切应力下降速度比上升速度慢。另外一些样品表现出正触变性,如图4a中S3、S4、S8、S9、S15和S16,剪切应力下降速度比上升速度快。还有一些样品表现出复合触变性,如图4c中S1、S2、S14,在高剪切速率时为负触变性,低剪切速率时为正触变性。而S7、S12、S22表现出相反的触变性,高剪切速率时为正触变性,低剪切速率时为负触变性。说明低剪切速率有利于结构的形成<sup>[12,27]</sup>。另外样品S6和S13的正、负触变交替多次,表现出更复杂触变现象。

对于触变现象的机理已有较多研究,触变性描述的是体系结构在剪切破坏后的恢复情况。(1)对于正触变现象,常使用剪切变稀现象解释<sup>[9]</sup>。料浆体系中的颗粒及聚合物链形成连续的空间交联网络结构,在外力剪切作用下,网络结构被破坏,体系粘度降低。当剪切作用停止后,网络结构可恢复,但需要一定弛豫时间,体系粘度逐渐增加。(2)对于负触变现象,多用聚集理论解释<sup>[3,9-10]</sup>,即体系中粒子直接形成的“独立”密实聚集集体破坏了连续的空间网络结构。本研究的高聚物粘结炸药体系的负触变性现象也可用该理论

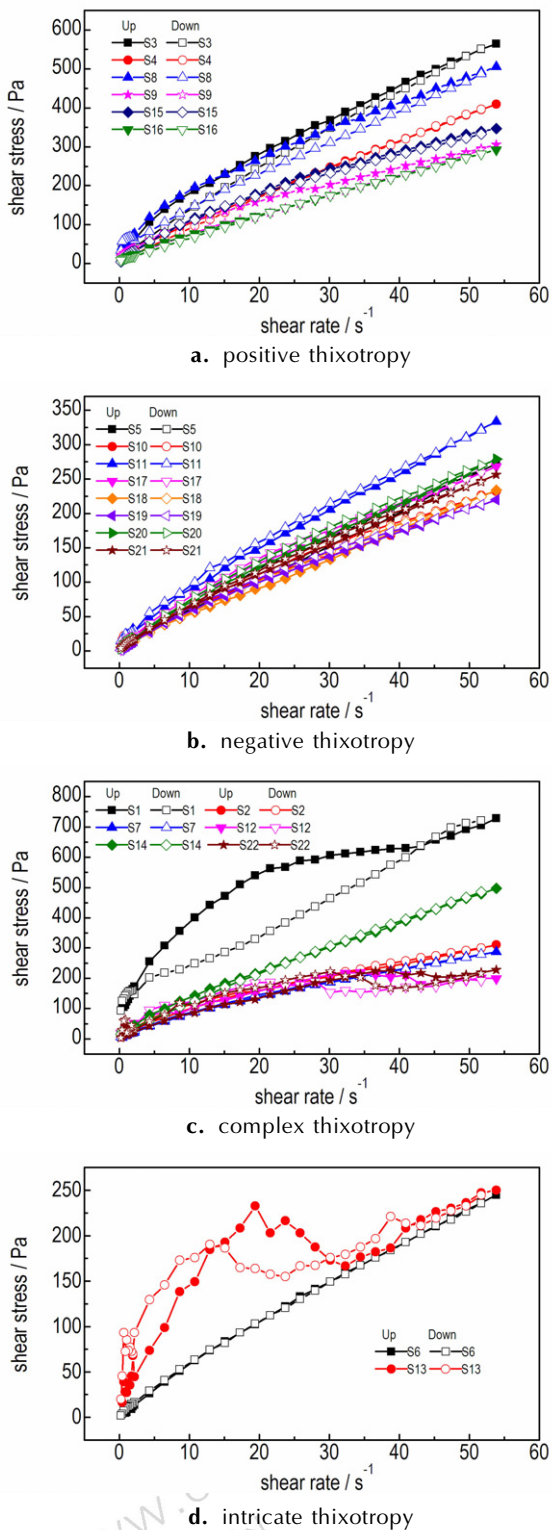


图4 不同RDX级配的料浆触变环

Fig. 4 Hysteresis loop of slurry with different RDX gradation

解释,RDX颗粒间相互作用,絮凝聚集,体系粘度增大,宏观表现为增稠现象。另外,该体系中含粘结剂和固化剂,剪切作用过程中随时间增加,粘结剂会发生固

化反应。虽然与体系的完全固化时间相比,可忽略触变测试过程中发生的交联固化反应。但是对于触变程度较弱的体系,固化反应使体系形成更紧实的交联网络结构,表现出剪切增稠现象,即负触变性增强。(3)复合触变性是高低剪切作用时体系结构破坏和恢复过程的综合表现。因此对于触变性较弱的样品,已不能忽略粘结剂的固化反应,再加上对料浆的剪切作用,从而表现出复杂的触变性。

### 3.4 RDX级配对料浆触变性的影响

由图4可知,不同RDX级配严重影响料浆的滞回曲线,呈现不同程度的触变效应。滞后环面积的大小可描述料浆触变程度的大小<sup>[23,28]</sup>。从引起触变性的本质分析,触变性越大,料浆内部结构受到剪切破坏后恢复的越慢。表3列出了样品S1~S22料浆的触变环面积。

表3 不同料浆的触变环面积

Table 3 The area of hysteresis loop of different slurry

| sample | area of hysteresis loop /Pa · s <sup>-1</sup> | sample | area of hysteresis loop /Pa · s <sup>-1</sup> |
|--------|---|--------|---|
| S1     | 5106.03                                       | S12    | 308.39  |
| S2     | 31.99   | S13    | 3.90  |
| S3     | 1216.97                                       | S14    | 141.51  |
| S4     | 231.92  | S15    | 280.69  |
| S5     | 442.39  | S16    | 128.93  |
| S6     | 3.02  | S17    | 253.58  |
| S7     | 138.00  | S18    | 308.97  |
| S8     | 1556.95                                       | S19    | 242.46  |
| S9     | 1270.12                                       | S20    | 328.38  |
| S10    | 442.49  | S21    | 219.05  |
| S11    | 302.93  | S22    | 389.53  |

由于固相仅为大颗粒RDX-L时出现严重的沉降现象,因此考察固相颗粒单组份因素时只考虑中颗粒和小颗粒。由表3可见,固相RDX为小颗粒时(S1),料浆触变环面积最大(5106.03 Pa · s<sup>-1</sup>),而RDX为中颗粒时(S2),料浆触变环面积显著降低,为31.99 Pa · s<sup>-1</sup>。说明固相RDX的颗粒越小,料浆表现出的触变性越明显。样品S3~S13的固相RDX颗粒均是双级配,虽然料浆稍有沉降现象出现,但可用于研究固相颗粒含量双组份因素对料浆触变性的影响规律。将料浆触变环面积与颗粒含量关联,如图5。

图5a和图5b描述的料浆固相为中颗粒(RDX-M)和小颗粒(RDX-S),图5c和图5d描述的料浆固相为大颗粒(RDX-L)和小颗粒(RDX-S)。由图5可明显看出,料浆的触变环面积与小颗粒含量呈正相关关系,与



固相中相对小颗粒而言的大颗粒含量呈负相关关系。因此,料浆触变程度与小颗粒含量呈正比,与大颗粒含量呈反比。

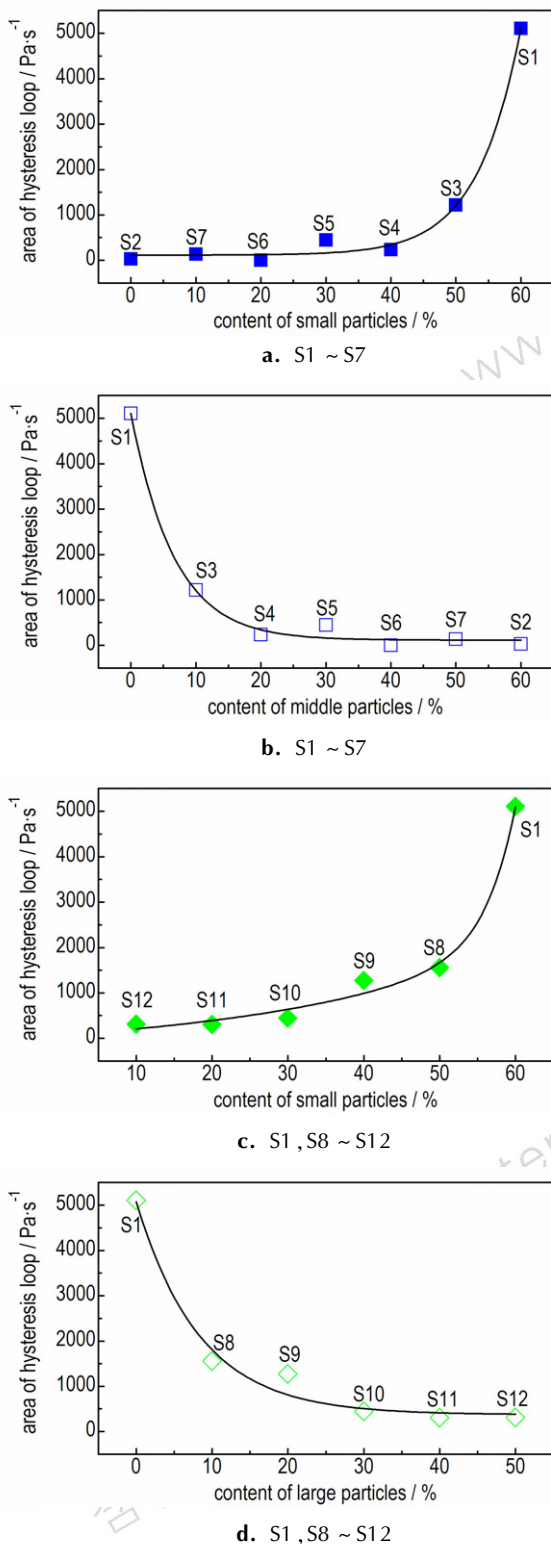


图5 RDX含量与触变环面积大小的关系

Fig. 5 The correlation of the area of hysteresis loop and the content of RDX

样品 S14 ~ S22 的固相 RDX 颗粒均是三级配,这也是在实际配方设计中常用到的颗粒级配模型。首先是有效的防止了固相颗粒的沉降,另外也使粘结剂中颗粒填充的更紧密,最大限度的减小体系空隙率,从而降低体系粘度<sup>[29]</sup>。由表 3 可见,RDX 颗粒三级配料浆的触变环面积都比较小,在 128.93 ~ 389.53 Pa·s<sup>-1</sup>之间,料浆触变特性弱。另外,对比样品 S3 (1216.97 Pa·s<sup>-1</sup>)、S8 (1556.95 Pa·s<sup>-1</sup>)和 S14 (141.51 Pa·s<sup>-1</sup>)料浆的触变环面积,小颗粒含量为 50%时,大颗粒与中颗粒级配明显降低料浆的触变性。分析样品 S4、S9 和 S16 同样可以获得上述结论。然而,对比样品 S5 (442.39 Pa·s<sup>-1</sup>)、S10 (442.49 Pa·s<sup>-1</sup>)和 S18 (308.97 Pa·s<sup>-1</sup>),小颗粒含量为 30%时,大颗粒与中颗粒的级配对降低料浆触变性的贡献较小。因此,小颗粒含量越高,大颗粒和中颗粒的级配对降低料浆触变性的影响才越大。分析样品 S3、S16 和 S21,其触变环面积分别为 1216.97 Pa·s<sup>-1</sup>、128.93 Pa·s<sup>-1</sup>、219.05 Pa·s<sup>-1</sup>,即中颗粒含量为 10%时,大颗粒与小颗粒级配极大地降低了料浆触变性。对比样品 S8 (1556.95 Pa·s<sup>-1</sup>)、S16 (128.93 Pa·s<sup>-1</sup>)、S17 (253.58 Pa·s<sup>-1</sup>)的触变环面积,大颗粒含量为 10%时,中颗粒与小颗粒级配同样显著降低了料浆的触变性。因此,RDX 的大、中、小三种颗粒的配比极大地影响了料浆的触变环面积。在配方设计中,尽量考虑 RDX 三级配模型,使料浆的触变环面积控制在较小范围内,从而获得触变程度低的料浆,以确保最终产品的质量。

## 4 结论

通过调节固相 RDX 的大、中、小颗粒的配比,采用触变环法研究了醇醛高聚物粘结炸药的触变性能。结果表明,料浆为假塑性流体,且具有触变性。料浆的触变性类型和触变性大小受 RDX 级配的影响。RDX 级配数越高,料浆的触变环面积越小。RDX 颗粒越小,料浆表现出的触变性越明显。料浆触变性越小,粘结剂的固化反应对触变性类型的影响越大。分析颗粒含量对料浆触变性的影响发现,小颗粒含量越高,大颗粒和中颗粒的级配对料浆触变性的降低程度影响越大。料浆触变程度与小颗粒含量呈正相关,与大颗粒含量呈负相关。本研究为高聚物粘结炸药配方设计提供理论指导,在配方设计时使用三级配模型,调整固相颗粒配比使料浆触变环面积尽量小。

## 参考文献:

- [1] Mewis J. Thixotropy-a general review[J]. *Journal of Non-New-*

- tonian Fluid Mechanics, 1979, 6(1): 1-20.
- [2] Barnes H A. Thixotropy-a review[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1997, 70(1-2): 1-33.
- [3] 孙德军, 侯万国, 刘尚营, 等. 铝/镁混合金属氢氧化物正电胶体粒子体系的触变性[J]. *化学学报*, 2001, 59(2): 163-167.  
SUN De-jun, HOU Wan-guo, LIU Shang-ying, et al. Thixotropic properties of aqueous dispersions of positively charged Al/Mg mixed metal hydroxide particles[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2001, 59(2): 163-167.
- [4] 陈宗洪, 辛寅昌, 李孝增, 等. 钠型蒙脱土悬浮体和水解聚丙烯酰胺体系的负触变现象[J]. *化学学报*, 1989, 47(2): 152-157.  
CHEN Zong-qi, XIN Yin-chang, LI Xiao-zeng, et al. The negative thixotropic behaviour of montmorillonite and hydrolyzed polyacrylamide system[J]. *Acta Chimica Sinica*, 1989, 47(2): 152-157.
- [5] Razavi S M A, Karazhiyan H. Flow properties and thixotropy of selected hydrocolloids: Experimental and modeling studies[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(3): 908-912.
- [6] Buienhuis J, Pönitsch M. Negative thixotropy of polymer solutions. 1. A model explaining time-dependent viscosity [J]. *Colloid & Polymer Science*, 2003, 281(3): 253-259.
- [7] Buienhuis J, Springer J. Negative thixotropy of polymer solutions. 2. A systematic study of the time-dependent viscosity of partially hydrolyzed polyacrylamide[J]. *Colloid & Polymer Science*, 2003, 281(3): 260-266.
- [8] Hou W G, Sun D J, Han S H, et al. Study on the thixotropy of aluminum magnesium hydroxide- Na-montmorillonite suspension [J]. *Colloid & Polymer Science*, 1998, 276(3): 274-277.
- [9] Dai X N, Hou W G, Duan H D, et al. Thixotropy of Mg-Al-layered double hydroxides/kaolinite dispersion [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, 295(1-3): 139-145.
- [10] 李淑萍, 侯万国, 戴肖南, 等. pH 值对 Fe-Al-Mg-MMH/钠质蒙脱土悬浮体触变性的影响[J]. *高等学校化学学报*, 2002, 23(9): 1763-1766.  
LI Shu-ping, HOU Wan-guo, DAI Xiao-nan, et al. The influence of pH on the thixotropy of ferric aluminum magnesium hydroxide/montmorillonite suspension [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2002, 23(9): 1763-1766.
- [11] 杨仁树, 李清, 田运生, 等. 乳化炸药异常流变性与其微观稳定性的关系[J]. *煤炭学报*, 1997, 22(2): 160-164.  
YANG Ren-shu, LI Qing, TIAN Yun-sheng, et al. The bizarre rheologic properties and microscopic stability of emulsion explosives[J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(2): 160-164.
- [12] Derakhshandeh B, Vlassopoulos D, Hatzikiriakos S G. Thixotropy, yielding and ultrasonic Doppler velocimetry in pulp fibre suspensions[J]. *Rheologica Acta*, 2012, 51(3): 201-214.
- [13] Ohsedo Y, Oono M, Tanaka A, et al. Mixing induced thixotropy of a two-component system of alkylurea organogelators having different alkyl chains[J]. *New Journal of Chemistry*, 2013, 37(8): 2250-2253.
- [14] 戴肖南, 侯万国, 李丽芳, 等. Mg-Fe-HTlc/高岭土悬浮体流变性能研究[J]. *化学学报*, 2005, 63(8): 693-696.  
DAI Xiao-nan, HOU Wan-guo, LI Li-fang, et al. Study on the rheology of Mg-Fe-hydroxalcalite-like compound/kaolinite suspensions[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2005, 63(8): 693-696.
- [15] Du X, Zhao L, Xiao H L, et al. Stability and shear thixotropy of multilayered film foam [J]. *Colloid & Polymer Science*, 2014, 292(10): 2745-2751.
- [16] Völtz C, Nitschke M, Heymann L, et al. Thixotropy in macroscopic suspensions of spheres[J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2002, 65(5): 051402-1-5.
- [17] Li Y, Bi H Y, Shen S L. Chin J Chem, 2011, 29(6): 1101-1106.
- [18] Bhattacharjee S, Bhattacharya S. Pyridylenevinylene based Cu<sup>2+</sup>-specific, injectable metallo (hydro) gel: thixotropy and nanoscale metal-organic particles[J]. *Chemical Communications*, 2014, 50(79): 11690-11693.
- [19] Mitschka P. Simple conversion of Brookfield R. V. T. readings into viscosity functions[J]. *Rheologica Acta*, 1982, 21(2): 207-209.
- [20] Ulrich Teipel. 含能材料[M]. 欧育湘, 译. 北京: 国防工业出版社, 2009: 372-439.  
Teipel Ulrich. *Energetic Materials*[M]. OU Yu-xiang, Translate. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 372-439.
- [21] Li H X, Wang J Y, An C W. Study on the rheological properties of CL-20/HTPB casting explosives[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2014, 11(2): 237-255.
- [22] Chang J C, Lange F F, Pearson D S. Viscosity and yield stress of alumina slurries containing large concentrations of electrolyte[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1994, 77(1): 19-26.
- [23] 唐汉祥. 推进剂料浆流变特性研究[J]. *固体火箭技术*, 1994, (3): 28-34.  
TANG Han-xiang. A Study on rheological properties of composite propellant slurry [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1994, (3): 28-34.
- [24] 卫彦菊, 王晶禹, 安崇伟, 等. GAP/CL-20 基混合炸药药浆的流变性[J]. *含能材料*, 2015, 23(11): 1124-1129.  
WEI Yan-jü, WANG Jing-yu, AN Chong-wei, et al. Rheological behavior of GAP/CL-20 based composite explosives slurry [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(11): 1124-1129.
- [25] 王海花, 沈一丁, 费贵强, 等. 阳离子型自乳化端羟基硅油/聚氨酯微乳液的形态及流变性能[J]. *高分子学报*, 2007(4): 321-326.  
WANG hai-hua, SHEN Yi-ding, FEI Gui-qiang, et al. Morphology and rheological behavior of cationic polyurethane/polydimethylsiloxane self-emulsifying micro emulsion[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2007(4): 321-326.
- [26] 杜宇, 杨凯, 俞炜, 等. 触变/非触变水凝胶的傅里叶变换流变学研究[J]. *高分子学报*, 2012(12): 1376-1382.  
DU Yu, YANG Kai, YU Wei, et al. Fourier-transform rheology of thixotropic/non-thixotropic hydrogels [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2012(12): 1376-1382.
- [27] Kanai H, Amari T. Negative thixotropy in ferric-oxide suspensions[J]. *Rheologica Acta*, 1995, 34(3): 303-310.
- [28] 连英惠, 李丽芳, 赵凡, 等. 羧甲基纤维素钠/蒙脱土悬浮体系的流变性能及其影响因素[J]. *应用化学*, 2013, 30(10): 1208-1214.  
LIAN Ying-hui, LI Li-fang, ZHAO Fan, et al. Rheologic property and influencing factors of sodium carboxymethyl cellulose/montmorillonite suspension [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2013, 30(10): 1208-1214.
- [29] 黄辉. 颗粒级配技术及其在含能材料中的应用[J]. *含能材料*, 2001, 9(4): 161-164.  
HUANG Hui. Particle grade technique and application on energetic materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(4): 161-164.

## Effects of RDX Gradation on the Thixotropy of Aldol Based Polymer Bonded Explosive

LIU Hui-hui, ZHENG Shen-sheng, CAI Jia-lin, JIANG Quan-ping, LUO Guan, LI Shang-bin

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** In order to study the thixotropic properties of casting aldol based polymer bonded explosive, the effect of RDX gradation and content of RDX particles on the thixotropic properties of the slurry was explored by a thixotropic loop method. The area of hysteresis loop was used to characterize the thixotropic extent. Results show that the slurry system is a pseudoplastic fluid. The slurry with different RDX gradation has different degree of thixotropy. The higher the number of RDX gradation or the larger the RDX particles, the smaller the thixotropy of slurry. The higher the content of small particles, the greater the influence of gradation of large and middle particles on the decreasing extent of thixotropy of slurry. Thixotropic extent of the slurry reveals a positive correlation with the content of small RDX particles, and a negative correlation with the content of large RDX particles.

**Key words:** polymer bonded explosive (PBX); particle size; particle gradation; thixotropy; hysteresis loop

**CLC number:** TJ55; O373

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.12.012



## 火工品新技术·新工艺·新材料研讨会在珠海成功举办

10月26日至27日,火工品新技术·新工艺·新材料研讨会在珠海成功举办。本次会议由中国兵工学会火工烟火专业委员会和火工品安全性可靠性技术国防科技重点实验室联合主办。经专家评审,录取并收录论文集102篇论文。来自高校、科研院所、军工企业共22个单位77名代表参加本次会议。

本次会议包括会议开幕式、特邀专题报告会、论文交流会三个部分。

会议开幕式由火工烟火专委会刘举鹏副主任委员主持,孙守会主任委员做《加强平台建设 创新工作模式 推动专业发展 开创火工烟火专委会工作的新局面》的报告,兵工学会安玉德副秘书长、专委会依托单位张广生副总经理、中国科学技术协会冯长根副主席分别致辞。

特邀专题报告会上午由火工烟火专委会沈瑞琪副主任委员主持,下午由火工品安全性可靠性技术国防科技重点实验室主任褚恩义研究员主持。专题报告分别由中国科学技术协会冯长根副主席,中国工程物理研究院龙新平总工程师委托代表蒋小华副主任,兵器首席专家、兵器212所汪仪林研究员,兵器首席专家兵器213所褚恩义研究员,南京理工大学沈瑞琪教授,中北大学胡双启教授委托代表胡立双博士分别做了《用学术影响力评价学术论文——兼论关于学术传承和长期引用的两个新指标》、《MEMS火工系统概述及研究进展》、《引信与火工品技术》、《火工品系统集成技术的若干问题》、《火工品技术面临的挑战及发展建议》、《火炸药安全技术发展趋势》。

论文交流会由火工品安全性可靠性技术国防科技重点实验室主任褚恩义研究员主持。12名科技人员分别围绕新技术、新工艺、新材料进行了交流。

本次会议在特邀专题报告方面做了积极的探索工作,既邀请了专委会成员单位的专家,又邀请了行业以外的专家到会作报告。在大会学术论文交流作者的选择上,在开会前也做了大量的工作,通过对入选论文的筛选,围绕会议主题,邀请行业专家和论文作者共12篇论文在大会上进行了交流,确保了会议论文交流的质量,同时又紧扣会议的主题,这也是今年研讨会的探索工作之一。本次火工品新技术·新工艺·新材料研讨会是火工烟火专委会“十三五”期间第一次专题研讨会,圆满的完成了各项计划议程,取得圆满成功。



(中国兵工学会火工烟火专业委员会 王建华 供稿)