

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.01.011

# 铅丹-硼系延期药的储存稳定性研究\*

张 涵 韩体飞 吴红波 朱 帅 颜事龙  
安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南,232001)

[摘 要] 基于硼和铅丹的物理化学特性,对铅丹-硼系延期药在真空常温条件下储存的稳定性进行研究,给出了该体系在储存中可能发生的化学反应的方程式,并计算分析了各反应的热力学参数  $\Delta_r H_m^\theta$ 、 $\Delta_r S_m^\theta$ 、 $\Delta_r G_m^\theta$ ,探讨了各反应的自发性。同时,利用激光粒度分析仪检测了成品延期药和原材料的颗粒度,依据固体化学知识分析了颗粒度大小对药剂储存稳定性的影响。研究结果表明,铅丹-硼系延期药在储存中会自发发生化学反应,生成  $B_2O_3$  和  $Pb$ 、 $PbO$ ;在工业生产中,延期药剂颗粒度大小要适中,既要保证药剂的燃烧精度,又要确保药剂的储存稳定性。  
[关键词] 物理化学;固体化学;颗粒度;铅丹-硼系延期药  
[分类号] TJ55;TQ560

## Storage Stability of $Pb_3O_4$ -B Type Delay Composition

ZHANG Han, HAN Tifei, WU Hongbo, ZHU Shuai, YAN Shilong

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

[ABSTRACT] The storage stability of red lead-B delay composition under vacuum and room temperature was studied based on the properties of red lead physical and chemical and B. The possible chemical reaction equations were enumerated in the course of storage of delay composition. Kinetic parameters of the reactions, such as  $\Delta_r H_m^\theta$ 、 $\Delta_r S_m^\theta$ 、 $\Delta_r G_m^\theta$ , were calculated. Spontaneity of each reaction was discussed by analyzing the thermodynamic parameters. In addition, the granularities of finished product, raw materials B and  $Pb_3O_4$  were tested with BT-2003 laser particle size analyzer. Based on the knowledge of solid chemistry, influence of particles size on delay composition storage stability was also discussed. Results indicate that spontaneous chemical changes may happen in the delay composition storage and generate  $B_2O_3$ ,  $Pb$  and  $PbO$ . The particle size of the delay composition industrial production should be well controlled to be suitable for both the combustion precision and the storage stability of the delay composition.  
[KEYWORDS] physical chemistry; solid chemistry; particle size;  $Pb_3O_4$ -B based delay composition

### 引言

硼系延期药是一种性能优良的微气体延期药,具有混药周期短、抗静电性能好、生产工艺简单等优点,但在药剂长期储存中存在不安定现象,导致药剂储存后延期精度降低,降低了雷管的实际应用效果。黄吉仙<sup>[1]</sup>对硼系延期药燃烧速度的影响因素进行了探讨;武双章等<sup>[2]</sup>探究了硼系延期药的燃烧特性;贾玉馨等<sup>[3]</sup>分析了高过载对硼系延期药性能的影响;成春莲等<sup>[4]</sup>研究了添加剂对硼系延期药延期精度的影响;胡秀丽等<sup>[5]</sup>探究了溶剂提纯对硼粉

表面性能的影响。但是,关于药剂储存中的化学反应机理研究较少。笔者对铅丹-硼系延期药储存中的化学反应机理进行了研究,并分析了药剂颗粒度对药剂储存稳定性的影响,提出在工业生产中药剂的颗粒度不可过小;同时,可通过药剂颗粒度级配达到最佳堆积密度来确保药剂的燃烧稳定性,以期对提高雷管储存后的延期精度提供理论指导。

### 1 物理化学分析

铅丹-硼系延期药以  $Pb_3O_4$  和 B 为主要成分。依据无机化学知识,表1列出了在无外界作用条件

\* 收稿日期:2016-09-14  
基金项目:国家自然科学基金(51604009);安徽理工大学校青年基金(QN201522)  
作者简介:张涵(1989-),女,硕士研究生,研究方向为延期药储存、燃烧的反应机理。E-mail:453591253@qq.com

表 1 延期药体系可能发生的化学反应和热力学参数

Tab. 1 Possible chemical reactions and thermodynamic parameters of the delay composition

序号	化 学 反 应	$\Delta_r H_m^\theta /$ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$\Delta_r S_m^\theta /$ ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$\Delta_r G_m^\theta /$ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	反应自发进行情况
1 <sup>#</sup>	$\text{Pb}_3\text{O}_4 \rightarrow 2\text{PbO} + \text{PbO}_2$	66.40	-9.40	69.20	正向非自发
2 <sup>#</sup>	$2\text{Pb}_3\text{O}_4 \rightarrow 6\text{PbO} + \text{O}_2$	248.80	182.13	194.49	正向非自发
3 <sup>#</sup>	$\text{Pb}_3\text{O}_4 \rightarrow 3\text{PbO} + [\text{O}]$	373.57	149.44	329.01	正向非自发
4 <sup>#</sup>	$3\text{Pb}_3\text{O}_4 + 2\text{B} \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3 + 9\text{PbO}$	-889.60	7.78	-891.92	正向自发
5 <sup>#</sup>	$3\text{Pb}_3\text{O}_4 + 8\text{B} \rightarrow 4\text{B}_2\text{O}_3 + 9\text{Pb}$	-2 747.00	120.22	-2 782.96	正向自发
6 <sup>#</sup>	$\text{Pb}_3\text{O}_4 + \text{Pb} \rightarrow 4\text{PbO}$	-94.60	-9.90	-91.64	正向自发

下该药剂体系中可能发生的化学反应。由于整个固态药剂体系的储存环境 ( $T, p$ ) 恒定,且无外界功作用,所以可依据热力学参数  $\Delta_r G_m^\theta$  对表 1 中各反应的自发性进行判断。

药剂体系中,各物质的标准摩尔生成焓  $\Delta_f H_m^\theta$  和物质的标准摩尔熵  $\Delta S_m^\theta$  均可由文献 [6] 查得,依据式(1)~式(3),计算出表 1 中各反应的标准摩尔反应的吉布斯自由能变  $\Delta_r G_m^\theta$ ,并判断出表 1 中各反应的自发性。

$$\Delta_r H_m^\theta = \sum_B \nu_B \Delta_f H_m^\theta;$$

(1)

$$\Delta_r S_m^\theta = \sum_B \nu_B \Delta S_m^\theta;$$

(2)

$$\Delta_r G_m^\theta = \Delta_r H_m^\theta - T \Delta_r S_m^\theta.$$

(3)

式中: $\nu_B$  为化学计量数。

由表 1 可知,式(1)~式(3)的  $\Delta_r G_m^\theta > 0$ ,说明  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  在常温单独储存过程中不可自发发生分解。此外,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  在常温 (299.15 K) 时的塔姆曼温度  $\alpha^{[7]}$  (0.38) 可由式(4)算出,小于 0.5。由  $\alpha$  值可知,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  在常温单独储存中,可发生表面离子迁移和轻微晶格振动,并不发生晶格扩散,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  不发生分解,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  晶体空间结构如图 1 所示。

$$\alpha = \frac{T_{\text{固体}}}{T_{\text{熔点}}}.$$

(4)

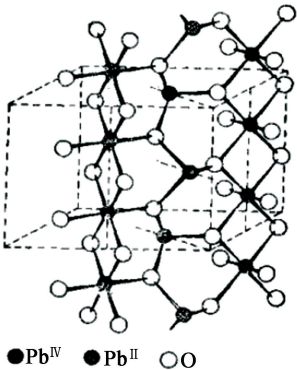


图 1  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  的空间结构

Fig. 1 Spatial structure of  $\text{Pb}_3\text{O}_4$

式中: $T_{\text{固体}}$  为固体的温度,299.15 K;  $T_{\text{熔点}}$  为固体的熔点,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  熔点为 774.15 K。

为进一步论证  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  在常温单独储存时的不可自发分解性,利用 X 射线衍射仪对在常温干燥条件下储存 30 d 的  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  进行衍射分析,结果见图 2。

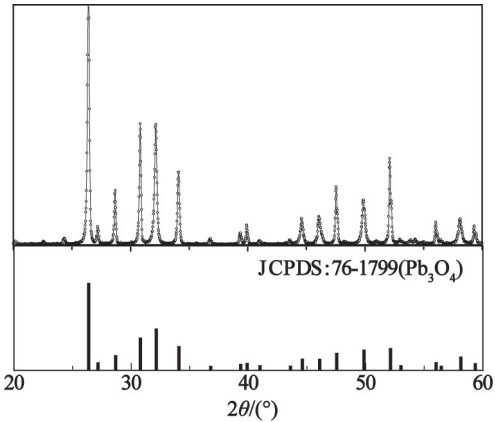


图 2  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  储存后的 X 射线衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of stored  $\text{Pb}_3\text{O}_4$

图 2 的衍射图谱表明,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  储存后的 X 射线衍射峰与标准峰完全拟合,证明了  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  在储存中没自发发生分解,该试验结果与上述理论分析结果一致。由此推断,药剂在储存中发生的化学作用是 B 和  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  之间的相互作用,而非 B 与  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  分解产物之间的作用。

固-固反应过程是反应物在化学势梯度和空位差等推动力作用下不断穿过反应界面发生化学反应的过程<sup>[8-9]</sup>。  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  中  $\text{Pb}^{4+}$  和  $\text{O}^{2-}$  的电负性分别为 2.33 和 3.44,均大于 B 的电负性 2.03,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  的电子云分布如图 3 所示。且 B 的电势比  $\text{B}^{3+}$  的电势高 0.73 V,所以  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  和 B 两者混合后会在化学电势梯度作用下发生化学作用。

同时结合表 1 可知,4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>化学反应式的  $\Delta_r G_m^\theta < 0$ ,这两个化学反应均可自发进行,进一步表明,延期药剂体系在储存中  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  和 B 可发生自发氧化还

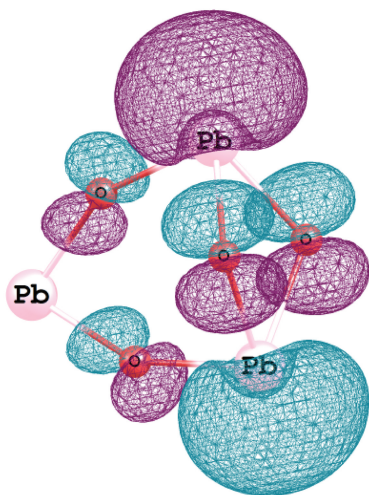
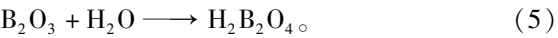


图3 Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 结构中的电子云密度分布  
Fig .3 Distribution of electron clouds  
density in Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> structure

原反应。其中,  $|\Delta_r G_{m,4\#}^0| < |\Delta_r G_{m,5\#}^0|$ ,  $|\Delta_r S_{m,4\#}^0| < |\Delta_r S_{m,5\#}^0|$ ,  $|\Delta_r H_{m,4\#}^0| < |\Delta_r H_{m,5\#}^0|$ , 这表明 5<sup>#</sup> 化学反应式的化学驱动力更大, 反应倾向更强。6<sup>#</sup> 化学反应式的  $\Delta_r G_m^0 < 0$ , 因此, 5<sup>#</sup> 反应中生成的 Pb 会和局域中过量的 Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 发生二次化学反应(表 1 中 6<sup>#</sup> 反应式)。据此推断, 铅丹-硼系延期药在储存过程中可能发生 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup> 3 种自发化学反应, 而不是 B 与 Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的分解产物发生化学反应。该推断拓宽了通常对延期药剂储存化学反应的理解。

为进一步探讨铅丹-硼系延期药储存中反应的自发性, 笔者对在常温干燥真空条件下储存 60 d 的延期药剂进行试验分析。根据 Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、B、PbO、B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的物理化学特性可知, Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、B、PbO 均不溶于水, 也不可与水发生化学反应, 但 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 易溶于热水中, 发生化学反应, 生成弱酸<sup>[10]</sup>。



将一定量储存后的延期药剂加入到适量热蒸馏水(pH=7.00)中, 搅拌均匀后过滤, 利用高精度 pH 计(图 4)测量滤液的 pH 值。



图4 PHS-3C 数显 pH 计  
Fig. 4 PHS-3C digital pH meter

测试结果表明, 液体的 pH 由 7.00 变为 5.83, 液体由最初的蒸馏水(中性)变为弱酸性液体, 说明延期药剂的 Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 B 在储存过程中, 自发发生了氧化还原反应, 生成了 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 该试验结果与理论推断相吻合。

## 2 药剂颗粒度对药剂储存中自发反应的影响

依据固体化学可知, 药剂的颗粒度对药剂的化学活性有重要影响。利用 BT-2003 型激光粒度分布仪(如图 5)对原材料 B、Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、成品药粉末的颗粒度进行检测, 颗粒度分布的主要参数见表 2 和图 6。

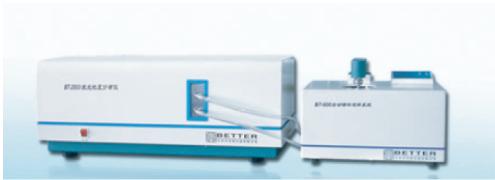


图5 BT-2003 型激光粒度分布仪  
Fig. 5 BT-2003 laser particle size analyzer

表 2 颗粒度的主要参数

Tab. 2 The main parameters of the particle size			
项目	B 粉末	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 粉末	成品药 粉末
比表面积/(m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> )	3.841	0.870	14.865
中位径/μm	0.725	2.529	0.601
体平均径/μm	2.250	3.664	2.820
面积平均径/μm	0.503	2.224	0.336

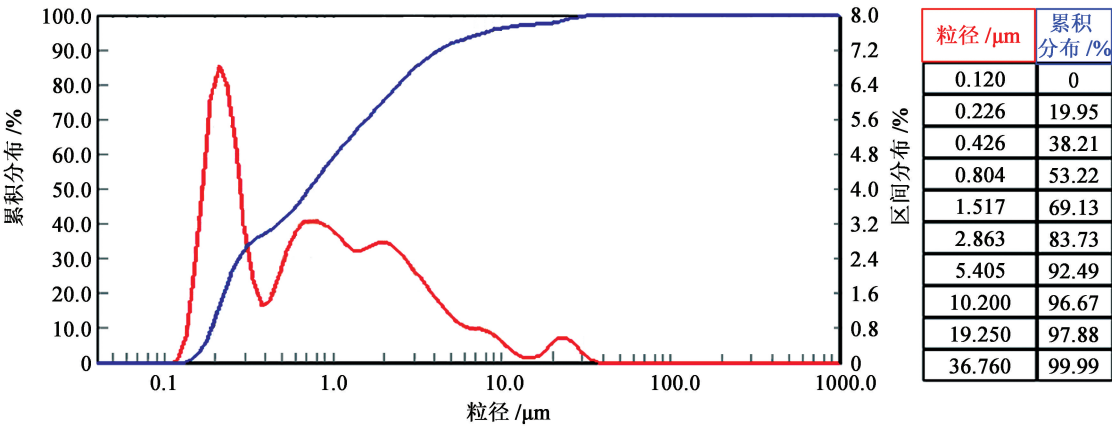
由表 2 和图 6 可知, 经球磨混药后, 药剂体系颗粒度大幅度减小, 其中, 原材料 B、Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、成品药的比表面积分别为 3.841、0.870、14.865 m<sup>2</sup>/g, 成品药中有 50% 的颗粒度在 0.601 μm 以下, 接近超微粒范畴<sup>[11]</sup>, 该部分粒子表面具有较多的悬空键, 反应活化能小, 化学活性强, 稳定性较差。根据式(6)可知, 药剂颗粒度越小, 单位体积内位于表面上的原子数越多, 固体体系的总能量 E 越大, 体系的稳定性越差。

$$E = NE_0 + AE_{s_0}。$$

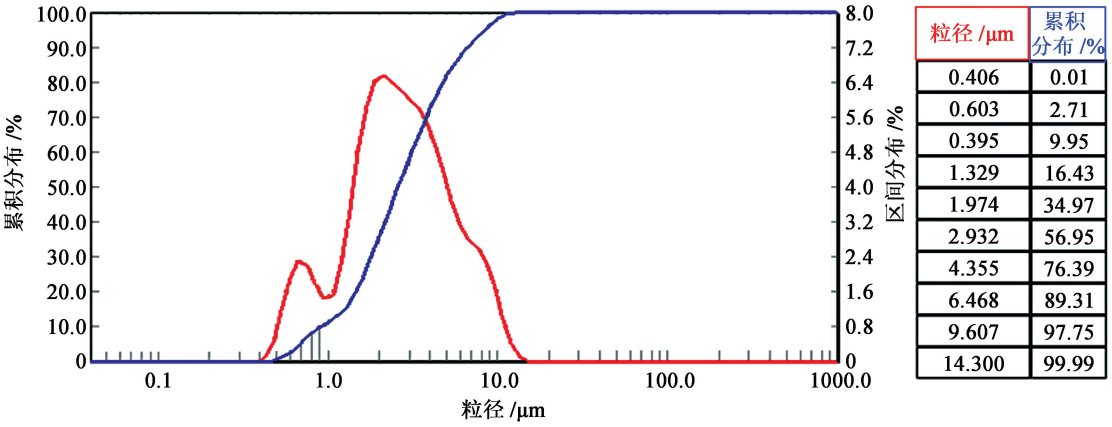
(6)

式中: E 为体系总能量; N 为体系中的原子数; E<sub>0</sub> 为固体中每个原子的能量; A 为体系中固体表面的原子数; E<sub>s</sub> 为表面原子多于固体内部原子的能量。

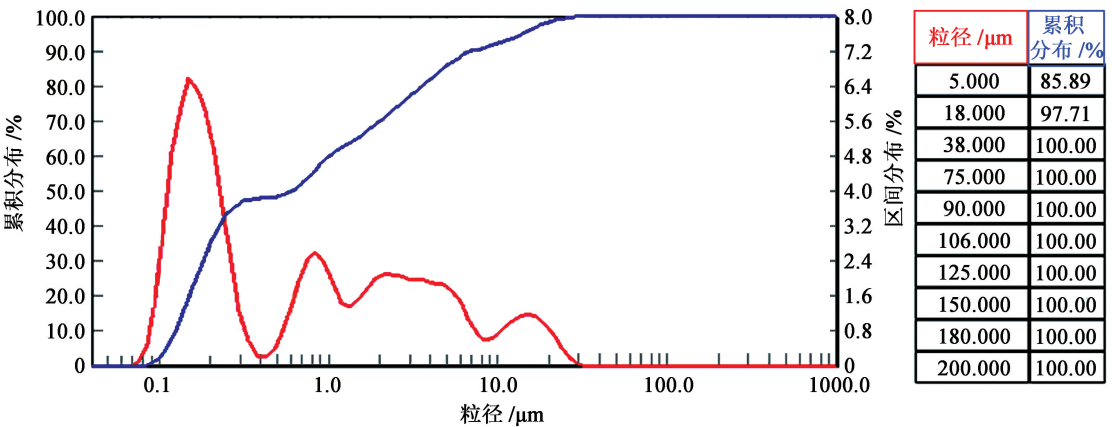
此外, 结合反应速率常数 K<sub>k</sub>[式(7)] 和金斯特林格积分方程[式(8)] 可知, 药剂的颗粒度越小, 药



(a) B 颗粒度分布



(b)  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  颗粒度分布



(c) 成品药颗粒度分布

图 6 颗粒度分布图

Fig. 6 Distribution of granularity

剂最终的转化程度越大,不利于储存后的延期精度。

$$K_k \propto \frac{1}{R_0^2}; \tag{7}$$

$$F_k(G) = 1 - \frac{2}{3}G - (1 - G)^{\frac{2}{3}} = K_k t. \tag{8}$$

式中: $G$  为转化率;  $K_k$  为速率常数;  $t$  为反应时间。

针对工业生产中新药剂而言,药剂的颗粒度越小,药剂接触越紧密,药剂燃烧越均匀,延期精度越高,但忽略了药剂颗粒度大小对药剂储存后延期精

度的影响。

笔者为了探究药剂颗粒度对药剂储存后延期精度的影响,对两种颗粒度的药剂储存前、后的延期时间进行了测定。两种药剂的颗粒度和纯度见表 3。

将 1# 和 2# 中的原材料按照质量比  $m(\text{Pb}_3\text{O}_4) : m(\text{B}) = 97 : 3$  混制延期药,利用球磨机进行混药,混药转速为 150 r/min,混药时间均为 1 h。将混合好的延期药剂在 200 MPa 压力下压入到外径 7.0 mm、内径 3.5 mm 的金属管中,制作成被测延期元



件(1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>均为30发,延期元件长度为10 mm),并将延期元件装入导爆管雷管中,按照导爆管雷管延期时间测定方法,对延期元件的延期时间进行测定。试验共分2组,每组30发。第一组对新制的1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>延期元件各15发进行延期时间的测定,第二组对在常温干燥条件下储存5个月的1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>延期元件各15发进行延期时间的测定。

试验结果见表4。

表3 原材料的主要物理参数

Tab.3 The main physical parameters of raw materials

项目	药剂	
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>
原材料B的纯度	0.97	0.97
原材料B的颗粒度/μm	1.0~1.3	4.0~4.5
原材料Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 的纯度	0.95	0.95
原材料Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 的颗粒度/目	200	400

表4 1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>延期药平均延期时间的测定

Tab.4 Delay time of 1<sup>#</sup> and 2<sup>#</sup> delay composition

编号	ms	
	储存前	储存后
1 <sup>#</sup>	463.82	605.17
2 <sup>#</sup>	586.87	650.85

结合表3和表4可知,储存前,1<sup>#</sup>药剂的延期时间比2<sup>#</sup>药剂延期时间短,说明延期药药剂颗粒度越小,药剂接触越均匀,同时发生化学反应的质量越多,反应时间少,燃速快;1<sup>#</sup>药剂储存后延期时间平均漂移量为141.35 ms,2<sup>#</sup>药剂储存后延期时间平均漂移量为63.98 ms,表明两个药剂在储存过程中均发生了化学反应,但1<sup>#</sup>药剂的延期时间漂移量大于2<sup>#</sup>药剂的延期时间漂移量,说明药剂颗粒度越小,化学活性越强,药剂在储存过程中化学反应程度越大。所以,在延期药工业生产中,药剂颗粒大小要适中,既要保证燃速,也要确保其储存稳定性。

在上述条件下,为解决药剂燃烧均匀性、燃速以及延期精度等问题,可通过小颗粒填充到大颗粒的空隙中(即药剂颗粒度级配)的方法达到最佳堆积密度,继而保证药剂燃速的均匀性,提高药剂的延期精度。

合理的颗粒度级配是获得高堆积密度颗粒体系、低空隙率和组分分布均匀的重要途径<sup>[12]</sup>。从理论上说,在延期药中的氧化剂和可燃剂最佳级配的状态下,药剂体系中空隙大小适当且空隙率低时,药剂密度高,接触紧密,一致性好,药剂燃速均匀,平行燃烧性质显著,药剂的延期精度高。可依据 Dinger-

fuck 方程<sup>[13]</sup>确定延期药中颗粒分布的范围。

$$U(D_p)=100\frac{D_p^n-D_{min}^n}{D_{max}^n-D_{min}^n}。$$

(9)

式中: $D_p$ 为颗粒粒径; $U(D_p)$ 为粒径为 $D_p$ 的累计筛下的分数,%; $D_{max}$ 为体系中最大颗粒的粒径; $D_{min}$ 为体系中最小颗粒的粒径; $n$ 为分布指数。

分布指数 $n$ 的大小直接影响体系中细颗粒的比例, $n$ 大时体系中细颗粒含量低, $n$ 小时体系中细颗粒含量高<sup>[14]</sup>。由于延期药中各个组分颗粒度较小,多为粉体状,可依据在细颗粒含量较高的固体混合物中 $n=0.25\sim0.30$ 时,体系可获得最佳堆积密度<sup>[15]</sup>,来确定延期药体系中 $n$ 的值,将 $n$ 代入 Dinger-fuck 方程,即可得到体系在最佳堆积密度下所需药剂中固体颗粒的分布曲线。

3 结语

1)根据 Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 B 的物理化学特性,分析了延期药体系在储存中可能发生的几种化学反应。其中,Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 在单独储存过程中不可自发发生分解,但在药剂储存过程中可与可燃剂 B 之间发生自发氧化还原反应,最终生成 PbO 和 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

2)基于固体化学和物理化学的理论基础,提出延期药在工业生产中颗粒度大小要适中,在确保药剂燃烧均匀性的同时要保证其储存稳定性。

3)提出依据 Dinger-fuck 方程堆积模型,来确定生产中药剂颗粒度的最佳分布范围,继而获得最佳药剂堆积状态,确保药剂获得均匀的燃速。

参 考 文 献

[1] 黄吉仙. 硼系延期药燃烧速度的影响因素研究[J]. 火工品,2006(4):31-33.  
HUANG J X. Research on the factors influencing on burning rate of boron type delay compositions[J]. Initiators & Pyrotechnics,2006(4):31-33.

[2] 武双章,沈瑞琪,叶迎华,等. 硼系延期药燃烧特性分析[J]. 含能材料,2008, 16(5):502-506.  
WU S Z, SHEN R Q, YE Y H, et al. Analysis on combustion characteristics of B/BaCrO<sub>4</sub> delay composition [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16 (5):502-506.

[3] 贾玉馨,王培勇,张周梅,等. 高过载对硼系延期药形貌特征及性能的影响[J]. 火工品,2014(3):50-52.  
JIA Y X, WANG P Y, ZHANG Z M, et al. Effect of high-overload impact on the morphology and properties of

- boron delay composition[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2014(3):50-52.
- [4] 成春莲,刘玉存,袁俊明,等. 添加 BaSO<sub>4</sub> 的硼系延期药[J]. *化工中间体*, 2012(10):58-60.  
CHENG C L, LIU Y C, YUAN J M, et al. The study of adding BaSO<sub>4</sub> in a type of delay powder containing B[J]. *Chemical Intermediates*, 2012(10):58-60.
- [5] 胡秀丽,周伟良,肖乐勤,等. 溶剂提纯对硼粉表面性能影响的研究[J]. *爆破器材*, 2014, 43(2):48-52.  
HU X L, ZHOU W L, XIAO L Q, et al. Research on the surface properties of solvent purified boron[J]. *Explosive Materials*, 2014, 43(2):48-52.
- [6] 曹锡章,宋天佑,王杏乔. 无机化学[M]. 北京:高等教育出版社, 1994.
- [7] MCLAIN J H. *Pyrotechnics from the viewpoint of solid chemistry* [M]. Philadelphia: The Franklin Institute Press, 1980.
- [8] 洪广言. 无机固体化学[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [9] 崔秀山. 固体化学基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1991.
- [10] 迪安 J A. 兰氏化学手册[M]. 尚久方,操时杰,辛无名,等,译. 北京:科学出版社, 1991.
- DEAN J A. *Lange's chemistry handbook* [M]. SHANG J F, CAO S J, XIN W M, et al, translated. Beijing: Science Press, 1991.
- [11] 张克立,张友祥,马晓玲. 固体无机化学[M]. 2 版. 武汉:武汉大学出版社, 2012.  
ZHANG K L, ZHANG Y X, MA X L. *Solid state inorganic chemistry* [M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2012.
- [12] 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 H. Particle grade technique and application on energetic materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2001, 9(4):161-164.
- [13] DINGER D R, FUNK J K. Particle-size analysis routines available on cerabull[J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1989, 68(8):1406-1408.
- [14] 盖国胜,陶珍东,丁明. 粉体工程[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.  
GAI G S, TAO Z D, DING M. *Powder engineering* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [15] RESCHKE T. *Schriftenreihe der zementindustrie* [M]. Dussel-dorf: Verlag Technik GmbH, 2000.

(上接第 48 页)

- [3] 段红珍,钱华,万方,等. 示踪剂的添加对导爆管传爆性能的影响[J]. *爆破器材*, 2012, 41(2):5-7.  
DUAN H Z, QIAN H, WAN F, et al. Influence of the indicator on detonation transmission performance of the shock-conducting tube[J]. *Explosive Materials*, 2012, 41(2):5-7.
- [4] 赵祥. 塑料导爆管抗击穿性能相关问题研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.  
ZHAO X. Research on the related problems about wear performance of plastic detonating tube[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [5] 徐东. 高强度导爆管研制[D]. 南京:南京理工大学, 2004.  
XU D. Development of high strength nonel tube [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [6] 钱华,刘大斌,甘德淮,等. 高药粉粘附性导爆管的设计及性能测试[J]. *爆破器材*, 2013, 42(2):37-40.  
QIAN H, LIU D B, GAN D H, et al. Design of the adhesive shock tube and its performance [J]. *Explosive Materials*, 2013, 42(2):37-40.
- [7] 张朝阳. 导爆药粉下药装置的改进及分析[J]. *爆破器材*, 2015, 44(4):37-40.  
ZHANG C Y. Improvement and analysis of a charging machine for nonel explosive powder[J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(4):37-40.
- [8] 钱华,刘大斌. 塑料导爆管药粉粘附性评价方法研究[J]. *爆破器材*, 2013, 42(1):26-28.  
QIAN H, LIU D B. The assessment methodology study on the adhesivity of explosive powder to detonating tube[J]. *Explosive Materials*, 2013, 42(1):26-28.