

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.05.001

# 乳胶基质危险性分级技术发展\*

张宇<sup>①</sup> 马智勇<sup>②</sup> 程志鹏<sup>②</sup> 徐森<sup>②③</sup> 吴星亮<sup>②</sup>

①南京理工大学安全科学与工程学院(应急管理学院)(江苏南京,210094)

②南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

③国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘要] 为规范乳胶基质在全球范围内的安全管理,联合国危险货物运输专家委员会建立了统一的乳胶基质危险性分级管理方法——《试验和标准手册》试验系列8。目前,我国关于乳胶基质安全管理的研究较少,远落后于国际水平。因此,对比分析了乳胶基质危险性分级程序的研究和发展过程,探索了相应试验方法的研究过程。发现采取最新版的乳胶基质危险性分级程序可避免试验的偶然性,通风管试验的改进和最小自持燃烧压力试验的增加可在保证安全的前提下减少乳胶基质生产和管理的经济成本。讨论了对乳胶基质危险性的基本认识以及展望了分级技术发展前景,可为国内乳胶基质危险性分级管理提供理论支撑。

[关键词] 乳胶基质;安全性;判定标准;危险性分级

[分类号] TD235.2<sup>+</sup>1

## Development of Hazard Classification Technology for Ammonium Nitrate Emulsion

ZHANG Yu<sup>①</sup>, MA Zhiyong<sup>②</sup>, CHENG Zhipeng<sup>②</sup>, XU Sen<sup>②③</sup>, WU Xingliang<sup>②</sup>

① School of Safety Science and Engineering (School of Emergency Management), Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

③ China National Quality Inspection and Testing Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to standardize the safety management of ammonium nitrate emulsion on a global scale, the United Nations Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods established a unified hazard classification management method for ammonium nitrate emulsion: Test Series 8 of the *Manual of Tests and Criteria*. However, research on the safety management of ammonium nitrate emulsion in China is currently limited, significantly lagging behind the international standards. Therefore, through comparing and analyzing the research and development process of the ammonium nitrate emulsion hazard classification program, exploring the research process of the corresponding test methods, it was found that the latest version of the ammonium nitrate emulsion hazard classification program can avoid test chance as much as possible. Improvement of the vented pipe test and increase of the minimum burning pressure test can reduce the economic cost of the production and management of ammonium nitrate emulsion under the condition of guaranteeing the safety. The basic understanding of the hazards of ammonium nitrate emulsion and the prospects for the development of classification technology was discussed. It provides theoretical support for the domestic ammonium nitrate emulsion hazard classification management.

[KEYWORDS] ammonium nitrate emulsion; safety; criterion; hazard classification

\* 收稿日期:2024-04-15

第一作者:张宇(2001—),女,硕士研究生,主要从事爆炸品危险性分级的研究。E-mail:13184053708@163.com

通信作者:徐森(1981—),男,教授,主要从事爆炸力学和含能材料爆轰、危险性分级的研究。E-mail:xusen@njust.edu.cn

吴星亮(1994—),男,博士,主要从事含能材料反应机理的研究。E-mail:wuxingliang@njust.edu.cn

## 0 引言

工业炸药又称民用炸药,被视为能源工业的能源、基础工业的基础<sup>[1]</sup>。其中,乳化炸药因出色的爆炸性能、广泛的原料来源、低廉的生产成本、良好的抗水性能和较少的环境污染等一系列优点,受到各国工业炸药行业的关注<sup>[2-5]</sup>。目前,乳化炸药是我国产量最高的工业炸药,已超过工业炸药总产量的 60%<sup>[6]</sup>。乳胶基质是没有敏化的乳化炸药<sup>[7-9]</sup>,是炸药中间体,感度较低,安全性较好<sup>[10-12]</sup>。在欧美国家,大部分的大规模爆破任务直接使用乳胶基质;在国内,随着乳化炸药现场混装技术的发展,乳胶基质也已成为大规模爆破的重要原料<sup>[13-14]</sup>。然而,近年来,国内外在乳胶基质的生产、储存、运输和使用过程中发生了多起爆炸事故,给民爆行业敲响了警钟,故应多关注乳胶基质的管理<sup>[15-16]</sup>。

根据联合国《规章范本》,危险化学品按危险性被划分为 9 大类、20 项<sup>[17]</sup>。第 1 类为爆炸物,第 5 类为氧化性物质和有机过氧化物。同时,第 1 类又被划分为 6 个项别,即 1.1 项~1.6 项;第 5 类被划分为 5.1 项和 5.2 项。在联合国乳胶基质危险性分级程序中,只考虑乳胶基质对应于 1.1 项(有整体爆炸危险的爆炸品)、1.5 项(有整体爆炸危险的非常不敏感爆炸品)和 5.1 项(氧化性物质)的危险性。因此,到目前为止,乳胶基质的分类有如下几种:1) 非危险货物;2) 1.1 项;3) 1.5 项;4) 5.1 项<sup>[18-21]</sup>。不同乳胶基质具体的项别应根据危险性分级程序进行判定,而不同国家之间乳胶基质的危险性分级程序不同。在国际上不同的管理区域内,乳胶基质需按不同的等级进行运输和管理,造成了诸多危险和麻烦,严重影响了生命财产安全以及乳胶基质在国际范围内的流通与使用。因此,需要统一乳胶基质的分类和运输问题。

近年来,联合国关于乳胶基质的分级程序及试验方法发生了诸多变化,最新版为联合国《试验和标准手册》(橘黄书)第 8 修订版。

但国内关于乳胶基质的管理仍停留在 2010 年的指导意见。虽提出应按照 GB 14371 或橘黄书试验系列 8 的危险性分级判定标准,但对应的 GB 14371 为 2013 版。其中,关于乳胶基质的分级程序与橘黄书第 5 修订版相对应,这已远落后于国际标准。因此,为紧跟国际步伐,开展乳胶基质危险性分级技术的相关研究刻不容缓。

本文中,主要介绍国际乳胶基质危险性分级的

发展概况,在分级程序和试验方法方面进行分析研究,并根据我国国情对国内乳胶基质分级管理的发展提出建议。

## 1 乳胶基质危险性分级技术发展

### 1.1 乳胶基质危险性分级发展概况

为了准确评估乳胶基质的危险性,规范乳胶基质的管理,1996 年 9 月,联合国不稳定物质-爆炸品(IGUS-EPP)工作组在 IGUS-EPP 会议上开始讨论这个问题;1998 年 12 月,在日内瓦的联合国会议上,法国代表提出建立硝酸铵乳胶基质的概念以及相关规定;1999 年 6 月,在联合国会议上,正式通过了这个提案,硝酸铵乳胶基质被正式命名;1999 年 10 月,在挪威成立了乳胶基质危险性研究工作小组,确定了新的名称为硝酸铵乳胶基质(爆破炸药的中间体)。定义了乳胶基质的主要成分为:60.0%~85.0%(质量分数)硝酸铵,5.0%~30.0%(质量分数)水,2.0%~8.0%(质量分数)油,0.5%~4.0%(质量分数)乳化剂,0~10.0%(质量分数)可溶的燃烧抑制剂和示踪剂;并形成了评估乳胶基质危险性的试验方法草案。

2000 年 7 月,在联合国会议上,通过了关于乳胶基质主要成分的提案,但试验方法草案未能通过。2001 年 4 月,在马德里的 IGUS-EPP 会议上,确定了乳胶基质危险性评估试验方法,包括:热稳定性试验、极端机械刺激的冲击试验和在封闭环境下加热的试验;同时,还包括一个较大当量的试验来评估乳胶基质的罐装运输危险性。2003 年,乳胶基质的危险性评估试验方法被正式引入联合国橘黄书第 4 修订版。在橘黄书的不断修订过程中,关于乳胶基质的危险性分级程序和试验方法也在不断完善。

### 1.2 乳胶基质危险性分级程序

#### 1.2.1 乳胶基质危险性分级程序第 1 版

2003 年,橘黄书第 4 修订版中,首次提出了试验系列 8 和从热稳定性、冲击波感度以及强加热反应效应 3 个维度开展乳胶基质的危险性分级程序。试验系列 8 包括用于危险性分级的乳胶基质的热稳定性试验、乳胶基质的隔板试验和克南试验,以及用于评估乳胶基质是否能采用罐装车运输的通风管试验。试验系列 8 用于确定乳胶基质、悬浮体、凝胶(皆为炸药中间体)的敏感度,若敏感度足够低,可划入 5.1 项。第 1 版乳胶基质危险性分级程序如图 1 所示。图 1 中,ANE 为硝酸铵乳胶基质。

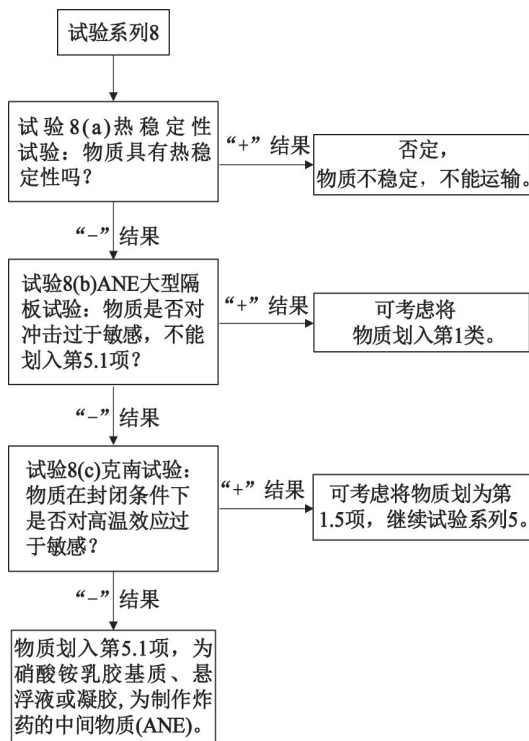


图1 第1版乳胶基质危险性分级程序

Fig. 1 The first edition of ammonium nitrate emulsion hazard classification program

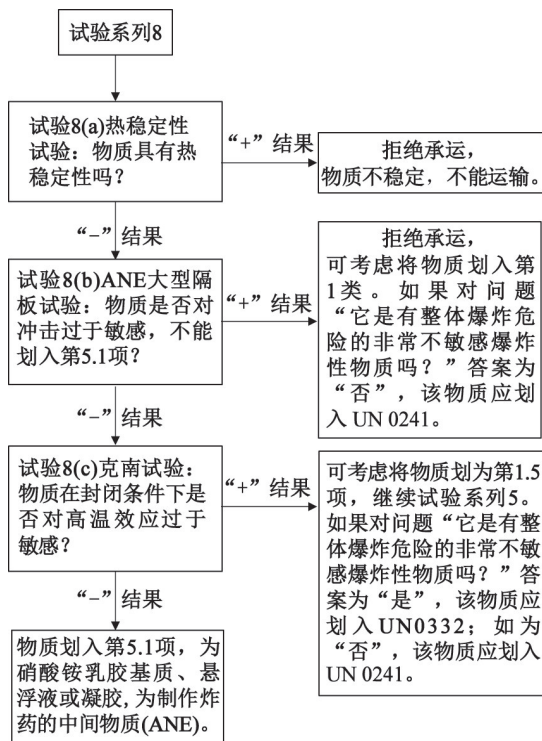


图2 第2版乳胶基质危险性分级程序

Fig. 2 The second edition of ammonium nitrate emulsion hazard classification program

在乳胶基质的危险性分级程序中,首先采用热稳定性试验考察乳胶基质的热稳定性,如果物质在热稳定性试验中的结果为“+”,则认为物质不稳定,不能进行运输。

对于通过热稳定性试验的乳胶基质,则采用隔板试验考察乳胶基质的冲击波敏感度。如果乳胶基质对冲击波刺激作用过于敏感,即试验结果为“+”,则考虑将物质划入第1类爆炸物。在第1版的乳胶基质危险性分级程序中,对考虑划为第1类的乳胶基质并未再做详细的分类,而之后的修订版对此进行了完善。

对于在乳胶基质隔板试验中结果为“-”的样品,继续通过克南试验确定在封闭条件下样品对高温效应的敏感度。如果样品在克南试验中的结果为“+”,表明样品对高温效应过于敏感,则需要继续开展试验系列5,确定物质是否为第1.5项;否则,物质应划入第5.1项。对于划入第5.1项的乳胶基质,在考虑采用槽罐车运输时,则需要开展通风管(VPT)试验来确定该运输方式的安全性。

### 1.2.2 乳胶基质危险性分级程序第2版

2009年,橘黄书第5修订版中,对乳胶基质危险性分级程序进行了修订。第2版乳胶基质危险性分级程序如图2所示。

主要修订内容为:

给出了1.1项和1.5项的具体联合国危险货物编号(UN号)。对进行试验系列5、判断物质是否具有整体爆炸危险的非常不敏感爆炸物,如果答案为“否”,物质应划入UN 0241;如果答案为“是”,该物质应划入UN 0332。不同的UN号对应不同的管理需求,因此,给出具体的UN号有利于乳胶基质的规范管理。

增加了改进的通风管(MVPT)试验,评估物质是否适合罐体运输。徐森等<sup>[22]</sup>选取了3种乳胶基质样品,分别进行VPT和MVPT试验。发现3种样品在VPT试验中均发生了爆炸,而在MVPT试验中均未发生爆炸。因此,VPT试验的条件更严格,乳胶基质在VPT试验中更容易发生爆炸;而MVPT试验的试验药量减少,通风口直径变大且试验加热速率明显降低。总体而言,与VPT试验相比,MVPT试验更容易通过。

### 1.2.3 乳胶基质危险性分级程序第3版

2015年,橘黄书第6修订版中,在乳胶基质危险性分级程序上并未进行更改。但2019年,橘黄书第7修订版在第5修订版的基础上对乳胶基质危险性分级程序进行了修订。主要修订内容为:

如果物质在热稳定性试验中结果为“+”,物质

应划为不稳定爆炸物。

增加了最小自持燃烧压力 (MBP) 试验。物质在克南试验中得到的结果为“+”;同时,该物质在克南试验中反应时间超过 60 s,且该物质的含水质量分数超过 14%时,则可继续进行 MBP 试验,判断物质在高度封闭条件下对局部强热点火效应的敏感度。如果 MBP 试验的结果为“+”,继续开展试验系列 5,确认该物质是否应划入 1.5 项。第 3 版乳胶基质危险性分级程序如图 3 所示。

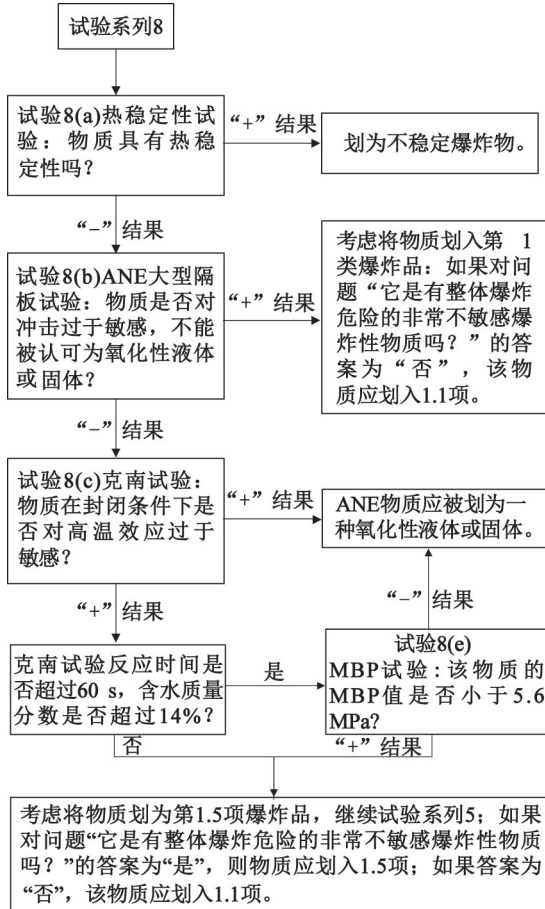


图 3 第 3 版乳胶基质危险性分级程序

Fig. 3 The third edition of ammonium nitrate emulsion hazard classification program

MBP 试验的增加,放宽了对乳胶基质划为氧化性物质的要求,使原来未通过克南试验而被划分为第 1 类的物质,可进一步进行分类试验。我国对爆炸品的运输与管理的要求明显高于对氧化性物品的要求;因此,这一试验的增加在保证安全的基础上,降低了部分乳胶基质运输和管理的经济成本。同时,MBP 值是硝酸铵类炸药的重要安全参数,可指导硝酸铵类炸药的生产与管理。王旭等<sup>[23]</sup>采用 MBP 试验对不同温度下、不同含油量的混油硝酸铵的安全性进行了评估,发现 MBP 值随含油量的升高而降低,且温度升高时 MBP 值有明显的下降趋势。

因此,我国乳胶基质危险性分级程序与管理方法应考虑加入该试验。

## 2 乳胶基质危险性分级试验

### 2.1 试验 8(a) 热稳定性试验

这项试验用于测定硝酸铵乳胶、悬浮剂或凝胶(皆为炸药中间体)等试验对象在运输的温度条件下是否具有热稳定性。

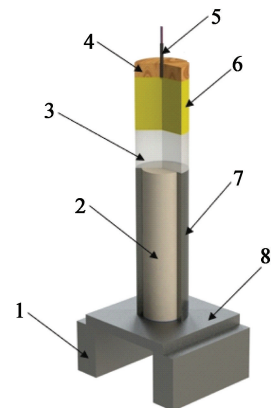
试验装置与步骤:将约 400 mL 的试样装在 500 mL 的隔热容器中进行试验。试验箱温度应设定为比运输或装载过程中可能出现的最高温度高 20 °C。连续监测试样和试验箱的温度。记录试样温度达到低于试验箱温度 2 °C 的时间;此后,再继续进行试验 7 d,或直到试样温度上升到高于试验箱温度 6 °C。

试验结果判定标准:如果试样温度超过试验箱温度 6 °C,则试验结果为“+”,即试样热稳定性较差;否则,结果为“-”,即试样热稳定性较好。

### 2.2 试验 8(b) 隔板试验

这项试验用于测定试验对象对规定冲击强度的敏感度。

试验装置与步骤:采用的起爆药柱的尺寸为  $\varphi 95 \text{ mm} \times 95 \text{ mm}$ ,药柱密度为  $(1\ 600 \pm 50) \text{ kg/m}^3$ ;有机玻璃隔板尺寸为  $\varphi 95 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ;试验钢管为外径 95 mm、壁厚 11 mm、长 280 mm 的冷拔钢管;验证板为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的钢板。雷管、供体装药、有机玻璃隔板和受体装药同轴排列在验证板的中央上方,并固定好。用雷管起爆,爆炸冲击波经有机玻璃板衰减后,作用于装在钢管内的乳胶基质。试验进行 3 次,每次试验后观察钢管底部验证板的破坏情况。试验装置如图 4 所示。



1 - 垫块; 2 - 试样; 3 - 有机玻璃隔板; 4 - 雷管木托; 5 - 雷管; 6 - 传爆药柱; 7 - 钢管; 8 - 验证板。

图 4 隔板试验装置

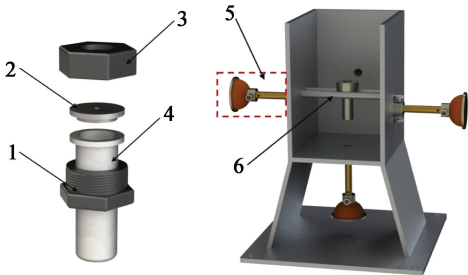
Fig. 4 Gap test device

试验结果判定标准:如果在间距 70 mm 处的验证板被击穿出一个光洁的洞,表示在试样中引发了爆炸,且爆炸已传播,试验结果为“+”,即试样对冲击波敏感度较高;否则,结果为“-”,即试样对冲击波敏感度较低。

### 2.3 试验 8(c) 克南试验

这项试验用于测定试验对象在高度封闭条件下对强加热效应的敏感度。

试验装置与步骤:将试样装至钢管的 60 mm 高处,插入孔径为 2 mm 的孔板,用螺帽密封好,并点燃燃烧器,对试验钢管进行加热。在每次试验后,观察试验钢管的变形情况。橘黄书第 5 修订版在第 4 修订版的基础上,对试验钢管性能的控制更加严格;对燃烧器的加热校准程序进行更改,使燃烧器的加热更加准确。试验装置如图 5 所示。



1 - 螺纹套筒;2 - 孔板;3 - 螺帽;4 - 钢管;  
5 - 燃烧器;6 - 支撑杆。

图 5 克南试验装置

Fig. 5 Koenen test device

试验结果判定标准:在橘黄书第 4 修订版和第 5 修订版中,在孔板孔径为 2 mm 的条件下进行 3 次试验,若 3 次试验均未发生爆炸,那么试验结果为“-”,即试样对强加热效应的敏感度较低;否则,结果为“+”,即试样对强加热效应的敏感度较高。

在橘黄书第 6 修订版和第 7 修订版中,考虑了试验过程中乳胶基质可能堵塞板孔而导致爆炸的情况,因此,增加了 2 次试验,即在孔板孔径为 2 mm 的条件下,最多 5 次试验中钢管 3 次及以上发生爆炸,则试验结果为“+”;否则,结果为“-”。

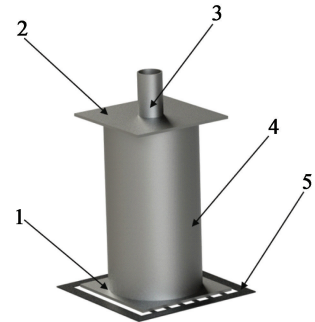
### 2.4 试验 8(d) 通风管试验

该项试验用于评定试验对象在受限制但通风的条件下对大火的影响。

#### 2.4.1 VPT 试验

试验装置与步骤:试验钢管的直径为  $(310 \pm 10)$  mm,长度为  $(610 \pm 10)$  mm,钢管顶部和底部分别焊接一块边长为 380 mm、厚  $(10.0 \pm 0.5)$  mm 的钢板。顶部焊接钢板的中央预留一个直径为 78 mm

的通风口,在通风口处焊接一个内径 78 mm、长 152 mm 的钢管接头。将试样装入钢管内,钢管垂直放在金属栅上,点燃在金属栅下的燃料,火焰温度不低于  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,试验火焰持续 30 min 以上,观察钢管的变形情况。试验装置如图 6 所示。



1 - 底部钢板;2 - 顶部钢板;3 - 钢管接管;  
4 - 钢管;5 - 金属栅。

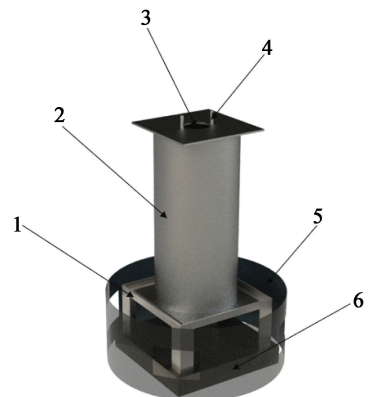
图 6 VPT 试验装置

Fig. 6 VPT test device

试验结果判定标准:如果试验钢管爆炸或爆裂,则试验结果为“+”,即物质不能用罐体运输;否则,结果为“-”。

#### 2.4.2 MVPT 试验

试验装置与步骤:样品钢管的内径为  $(265 \pm 10)$  mm,长度为  $(580 \pm 10)$  mm,壁厚为  $(5.0 \pm 0.5)$  mm。样品钢管的顶部和底部均焊接边长 300 mm、厚  $(6.0 + 0.5)$  mm 的钢板。在顶部钢板上开直径为  $(85.0 \pm 1.0)$  mm 的通风口,并预留 2 个安装热电偶的孔。将燃气灶放在基底的中央,金属支架放在燃气灶上方,容器垂直放置在金属支架上,试样注入容器至其容量的 75%,用校准过的加热系统对试样进行加热,直至试样完全反应,观察钢管变形情况。试验装置如图 7 所示。



1 - 金属支架;2 - 通风容器;3 - 通风口;4 - 热电偶;  
5 - 金属防风板;6 - 基底。

图 7 MVPT 试验装置

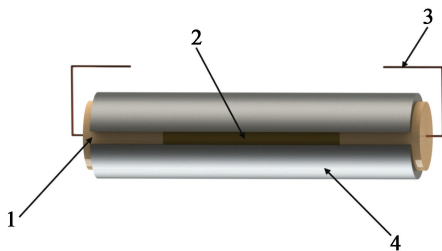
Fig. 7 MVPT test device

试验结果判定标准:如果试验钢管爆炸或爆裂,则试验结果为“+”,即物质不能用罐体运输;否则,结果为“-”。

## 2.5 试验 8(e) 加拿大爆炸物研究实验室最小自持燃烧压力 (MBP) 试验

这项试验用于测定试验对象在高度封闭条件下对局部强热点火效应的敏感度。

试验装置与步骤:将装有试样的小圆柱形试验钢管放入压力容器中,并将容器加压至试验所需的初始压强;然后,开始采集数据,直到试样点燃并熔化点火线,或持续 100 s。如果试样完全燃烧,则认为“通过”,进行下一次试验时应降低压强;否则,认为“未通过”,进行下一次试验时应增加压强。重复上述步骤,并逐渐减小压力增加(或减小)的幅度,从而确定出物质的最小自持燃烧压力。试验装置如图 8 所示。



1 - 橡胶塞;2 - 试样;3 - 铜导体;4 - 钢管。

图 8 MBP 试验装置

Fig. 8 MBP test device

试验结果判定标准:如果最小自持燃烧压力小于 5.6 MPa,则试验结果为“+”,即试样对局部强点火效应的敏感度较高;否则,结果为“-”,即试样对局部强点火效应的敏感度较低。

## 3 结论

乳胶基质本质上是一种工业炸药,感度足够低且随配方变化较大,安全事故频发。因此,制定乳胶基质安全管理的方法刻不容缓。本文中,综述了乳胶基质危险性分级技术的发展过程,总结了发展过程中产生的变化。展望未来,具体可以关注以下 3 个方向:

1) 修订关于乳胶基质安全管理的标准。联合国危险货物运输专家委员会不断完善了乳胶基质的危险性分级程序与试验方法,最新版为橘黄书第 8 修订版。而我国乳胶基质的危险性分级技术与橘黄书第 5 修订版相对应,已落后于国际标准。十分有必要根据我国国情开展该领域的相关研究,为乳胶

基质的安全监管提供理论支撑。

2) 在国内乳胶基质危险性分级程序中考虑增加 MBP 试验。MBP 值是乳胶基质的重要安全参数,可预测乳胶基质在高度封闭条件下对局部强热点火效应的敏感度,用于指导乳胶基质的生产与管理,减少危害事故的发生。

3) 设计更经济、安全的乳胶基质配方和现场混装方法。借鉴联合国关于乳胶基质安全管理的规定,结合乳胶基质的自身特点,以及乳胶基质在制造、运输、储存和使用中所存在的状态,建立科学的、系统的、适合我国国情并与国际接轨的乳胶基质现场混装方法。

综上所述,未来乳胶基质的安全管理应更注重高效、经济与创新。新危险性分级技术的引入将为乳胶基质的安全管理提供新的战略方向,为减少乳胶基质安全事故、降低经济成本提供解决方案。

## 参 考 文 献

- [1] 吕春绪. 工业炸药理论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [2] 李子涵, 程扬帆, 王浩, 等. 负压环境对乳化炸药爆炸温度场和有害效应的影响[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(8): 082301.  
LI Z H, CHENG Y F, WANG H, et al. Influences of negative pressure conditions on the explosion temperature field and harmful effects of emulsion explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(8): 082301.
- [3] 程扬帆, 汪泉, 龚悦, 等. MgH<sub>2</sub> 型复合敏化储氢乳化炸药的制备及其爆轰性能[J]. 化工学报, 2017, 68(4): 1734-1739.  
CHENG Y F, WANG Q, GONG Y, et al. Preparation and detonation properties of MgH<sub>2</sub> type of composite sensitized emulsion explosives [J]. CIESC Journal, 2017, 68(4): 1734-1739.
- [4] CHENG Y F, MA H H, LIU R, et al. Explosion power and pressure desensitization resisting property of emulsion explosives sensitized by MgH<sub>2</sub> [J]. Journal of Energetic Materials, 2014, 32(3): 207-218.
- [5] 赵宇. 乳化炸药的化学敏化影响分析[J]. 山西化工, 2023, 43(9): 29-30, 43.  
ZHAO Y. Analysis of chemical sensitization effects on emulsion explosives [J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(9): 29-30, 43.
- [6] 王倩倩. A 民爆公司成本管理改进研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.  
WANG Q Q. Research on lean cost management of A

- civil explosive company [D]. Changsha: Hu'nan University, 2019.
- [7] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2008.  
WANG X G. Emulsion explosives [M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [8] 何劲松, 何欣扬. 对乳化基质快速敏化的几点认识[J]. 爆破器材, 2008, 37(1): 12-14.  
HE J S, HE X Y. Some cognition fast sensitization of emulsified bases [J]. Explosive Materials, 2008, 37(1): 12-14.
- [9] 王尹军, 汪旭光. 乳胶基质抗冲击波性能研究[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 697-701.  
WANG Y J, WANG X G. A study on the anti-shockwave performance of emulsion matrix [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 697-701.
- [10] SUN J H, LI Y F, HASEGAWA K. A study of self-accelerating decomposition temperature (SADT) using reaction calorimetry [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001, 14(5): 331-336.
- [11] ZALDIVAR J M, CANO J, ALOS M A, et al. A general criterion to define runaway limits in chemical reactions [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2003, 16(3): 187-200.
- [12] TSENG J M, SU C M, GUPTA J P, et al. Evaluation and modeling runaway reaction of methyl ethyl ketone peroxide mixed with nitric acid [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007, 46(25): 8738-8745.
- [13] 李萍丰, 李大财, 申卫峰. 智能现场混装乳化炸药车研制及工程应用[J]. 金属矿山, 2024(1): 116-123.  
LI P F, LI D C, SHEN W F. Development and engineering application of intelligent on-site mixed emulsion explosive truck [J]. Metal Mine, 2024(1): 116-123.
- [14] 夏光. 工业炸药现场混装技术应用与影响因素研究[J]. 煤矿爆破, 2023, 41(1): 23-26.  
XIA G. Study on application and influence factors of industrial explosive field mixing technology [J]. Coal Mine Blasting, 2023, 41(1): 23-26.
- [15] 侯成举, 韩尧, 张春燕, 等. 乳化炸药生产工艺过程危险因素及对策措施探讨[J]. 煤矿爆破, 2022, 40(4): 35-38.  
HOU C J, HAN Y, ZHANG C Y, et al. Discussion on hazard factors and its countermeasures in emulsion explosive production process [J]. Coal Mine Blasting, 2022, 40(4): 35-38.
- [16] 吴秋洁. 乳胶基质的安全性及影响机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
WU Q J. Research on the safety of ammonium nitrate emulsion and influence mechanism analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [17] UN. recommendations on the transport of dangerous goods: model regulations [M]. 8th Rev. ed. 2023.
- [18] UN. recommendations on the transport of dangerous goods: manual of tests and criteria [M]. 4th Rev. ed. 2003.
- [19] UN. recommendations on the transport of dangerous goods: manual of tests and criteria [M]. 15th Rev. ed. 2009.
- [20] UN. recommendations on the transport of dangerous goods: manual of tests and criteria [M]. 6th Rev. ed. 2015.
- [21] UN. recommendations on the transport of dangerous goods: manual of tests and criteria [M]. 7th Rev. ed. 2019.
- [22] 徐森, 张建新, 曹卫国, 等. 乳胶基质运输危险性试验方法的比较 [C]//第十六届中国科协年会论文集. 昆明, 2014: 1-6.  
XU S, ZHANG J X, CAO W G, et al. Comparison of test method for hazard classification of ammonium nitrate emulsion [C]//Proceedings of the Sixteenth Annual Conference of the Chinese Association for Science and Technology. Kunming, 2014: 1-6.
- [23] 王旭, 徐森, 田曜恺, 等. 硝酸铵的最小点火压力影响因素[J]. 化工学报, 2018, 69(8): 3754-3762.  
WANG X, XU S, TIAN Y K, et al. Factors affecting the minimum burning pressure of ammonium nitrate [J]. CIESC Journal, 2018, 69(8): 3754-3762.