

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.03.006

# 水喷雾对 NC-NG 双基火药燃烧的抑制作用\*

司振宽 李权威 杜宇轩

南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

**[摘要]** 为研究水喷雾对 NC-NG 双基火药药柱燃烧的抑制作用,搭建了由燃烧室、输水系统、数据采集系统等组成的灭火实验平台。首先,对 NC-NG 双基火药进行自由燃烧测试。其次,对水平放置及竖直放置条件下的 NC-NG 双基火药施加水压为 0.15、0.30、0.45 MPa 和 0.60 MPa 的水喷雾进行灭火实验,获取火焰的动态变化图像以及温度、热通量的变化曲线。最后,对灭火后的溶液进行红外光谱分析。结果表明:在一定压力范围内,水压越大,水喷雾对 NC-NG 双基火药的灭火效果越好。结合 NC-NG 双基火药的燃烧机理,对灭火后的溶液进行红外光谱分析认为,在灭火过程中,水喷雾通过消耗 NC-NG 双基火药的中间燃烧产物  $\text{NO}_2$ ,从而在一定程度上抑制燃烧,最终实现灭火。此发现可为针对火炸药火灾燃烧的灭火技术提供新的技术方向。

**[关键词]** 双基火药;水喷雾;燃烧抑制;火炸药燃烧机理

**[分类号]** TQ560.7;TJ55

## Inhibitory Effect of Water Spray on Combustion of NC-NG Double-Base Gunpowder

SI Zhenkuan, LI Quanwei, DU Yuxuan

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

**[ABSTRACT]** A fire-extinguishing experimental platform consisting of a combustion chamber, a water delivery system, and a data acquisition system was built to study the inhibitory effect of water spray on the combustion of NC-NG double-base gunpowder. The free combustion test of NC-NG double-base gunpowder was carried out. The NC-NG double-base gunpowder under the conditions of horizontal placement and vertical placement was applied with water spray with water pressure of 0.15, 0.30, 0.45 MPa and 0.60 MPa to carry out fire extinguishing experiments. The dynamic change image of the flame, as well as the change curves of temperature and heat flux were obtained. Infrared spectrum analysis was conducted on the solution after extinguishing the fire. The results show that, within a certain pressure range, the higher the water pressure, the better the fire extinguishing outcome of water spray on NC-NG double-base gunpowder. Combining the combustion mechanism of NC-NG double-base gunpowder and the infrared spectrum analysis of the solution after fire extinguishing, it is considered that the water spray inhibits combustion to a certain extent by consuming the intermediate combustion product  $\text{NO}_2$  of NC-NG double-base gunpowder during the fire-extinguishing process, and ultimately achieves fire extinguishing. It could provide a new technical direction for the fire extinguishing technology of explosive fire and combustion.

**[KEYWORDS]** double-base gunpowder; water spray; combustion suppression; combustion mechanism of explosive

## 0 引言

作为武器发射、推进、毁伤等的动力与能源,火炸药是各类武器共同需求的技术和产品,更是国防安全的重要保障<sup>[1]</sup>。然而作为一种亚稳态的物质体系,在一定的能量刺激下,火炸药能够独立地进行化学反应并输出能量。这使得火炸药在制造、运输、

储存和使用等过程中燃爆事故频发。为遏制火炸药燃烧、爆炸事故的发生,减少事故带来的生命财产损失,保障火炸药领域发展的安全性,亟需展开火炸药火灾的灭火抑爆技术研究。

在燃烧理论的基础之上,灭火技术各式各样,其中灭火剂技术适用较为广泛。根据《小量火药、炸药及其制品危险性建筑设计安全规范》<sup>[2]</sup>等要求,水系统灭火仍然是火炸药行业灭火抑爆的主要技术

\* 收稿日期:2022-10-21

第一作者:司振宽(1996-),男,硕士,主要从事含能材料火灾消防技术。E-mail:sizhenkuan123@163.com

通信作者:李权威(1983-),男,讲师,主要从事含能材料火灾防治原理及技术等方面的研究。E-mail:liqw83@163.com

手段。水的灭火机制主要有冷却作用、窒息作用、乳化作用、冲击作用等<sup>[3]</sup>。为满足不同火灾类型的需求,人们通过改变水的物理化学性质来提高灭火效率,逐渐演化出强化水、润湿水、乳化水、超细水雾等灭火技术<sup>[4]</sup>。然而关于水系灭火剂对火炸药的灭火抑爆技术研究较为罕见。学者们设计出针对火炸药及其他爆炸物的雨淋灭火系统。程山等<sup>[5]</sup>从理论层面分析认为,水及水系灭火剂是固体推进剂火灾较为理想的灭火剂。Thomas<sup>[6]</sup>研究证实,水喷雾可以增加固体炸药太安(PETN)在同一混合物中直接引爆所需的最低能量。Adiga 等<sup>[7]</sup>发现,超细液滴的表面积与体积之比及汽化时间尺度可以很好地用于冲击能量的吸收。学者们认为,水雾蒸发潜热吸收是抑制有限空间内爆炸的主要机制<sup>[8-9]</sup>。Ananth 等<sup>[10]</sup>通过模拟细水雾对密闭空间内黑索今(RDX)爆炸的影响,证明蒸发潜热是水滴在激波前沿附近吸收能量的主要机制。Jiba 等<sup>[11]</sup>发现,细水雾可以延迟半封闭爆破室中 PE4 炸药(基于 RDX 的高爆炸药)爆炸后冲击波的到达时间并减弱峰值超压。Kong 等<sup>[12]</sup>发现,细水雾对密闭空间的梯恩梯(TNT)爆炸起到缓解作用。Schunck 等<sup>[13]</sup>发现,炸药在水雾中爆炸时,水雾可以大大降低初始超压和最大冲量。然而,对于水喷雾针对火炸药燃烧抑制技术的应用研究还远远不足。

NC-NG 双基火药以无烟药而闻名于世,适用于枪炮与火箭。它的主要成分为硝化棉(NC)和硝化甘油(NG)。本文中,以小尺寸 NC-NG 双基火药药柱为研究对象,通过改变水喷雾的压力大小及药柱燃烧的传播方向,对双基火药进行燃烧灭火实验。通过实验获取不同压力下水喷雾的速度、流量和雾化角,对比不同条件下 NC-NG 双基火药的燃烧时间、燃烧面温度、火焰温度。对灭火后的液体收集,进行红外光谱分析,初步探究水喷雾对 NC-NG 双基火药燃烧的抑制规律及灭火机理,为今后针对含能材料火灾燃烧的灭火技术提供思路与方向。

## 1 实验部分

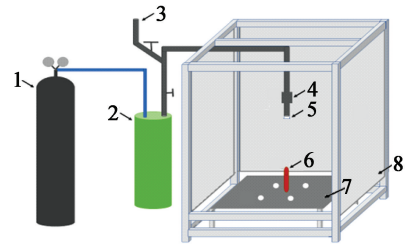
### 1.1 实验药品

NC-NG 双基火药药柱:长 4 cm,底面直径 5 mm,质量 1.33 g。

### 1.2 实验系统及装置

实验系统主要由燃烧室、输水系统及测试系统组成,如图 1、图 2 所示。

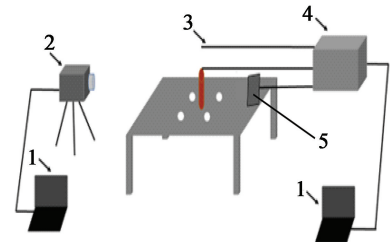
输水系统主要由高压氮气气瓶、储水罐、输水管



1 - 高压气瓶;2 - 储水罐;3 - 进水管;4 - 电磁阀;  
5 - 喷头;6 - 药柱;7 - 燃烧平台;8 - 防火板。

图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system



1 - 计算机;2 - 高速摄影仪;3 - K 型铠装热电偶;  
4 - 数据采集系统;5 - 热通量计。

图 2 测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test system

路、喷头组成。采用高压氮气调节水压。输水管道内径为 10 mm,实心锥形水雾喷头的孔径为 2 mm。喷头位于燃烧平台上方 50 cm。

测试系统主要由温度采集系统及图像采集系统组成。在燃烧室正前方搭设高速摄影仪,用于 NC-NG 双基火药燃烧过程及水喷雾灭火过程的图像采集;利用 K 型铠装热电偶测量燃烧面及火焰温度,HS-30B 型热通量计测量火焰的热通量。然后,通过数据采集箱将温度及热通量数据传输至计算机。

### 1.3 实验设计

实验主要分为 3 个部分:

- 1) NC-NG 双基火药的自由燃烧实验;
- 2) 双基火药水平放置时水压为 0.15、0.30、0.45 MPa 和 0.60 MPa 条件下的水喷雾灭火实验;
- 3) 双基火药竖直放置时水压为 0.15、0.30、0.45 MPa 和 0.60 MPa 条件下的水喷雾灭火实验。

在喷头的正下方将药柱固定于燃烧平台之上,调试高速摄影仪与温度采集系统至最佳工作状态;然后,将水喷雾压力依次调节至预定值;药品摆放完成后,等待点火。引燃火药后,迅速将电磁阀通电,释放喷雾,直至火焰熄灭,保存实验数据。调整药柱的摆放方式,然后依次施加不同压力的水喷雾进行灭火实验。灭火实验结束后,收集灭火后的溶液并

做红外光谱分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水喷雾雾化特性测试

分别在 0.15、0.30、0.45 MPa 和 0.60 MPa 的水压条件下对水喷雾进行无灭火喷水测试,获取水雾的雾化角、流速和最大作用范围。

表 1 给出了不同水压条件下的水雾雾化特性。随着水压的增大,水雾的雾化角、流速及单位时间内的流量呈现逐渐增大的趋势。所以,水雾的作用面积随着水压的增大而呈现增大趋势。

表 1 不同水压下的雾化特性

Tab. 1 Atomization characteristics under different water pressures

水压/ MPa	雾化角/ (°)	流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	流量/ ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )
0.15	53.3	5.26	2.7
0.30	63.5	6.07	3.7
0.45	66.8	6.66	4.5
0.60	71.6	7.52	5.1

### 2.2 自由燃烧实验

图 3 给出了 NC-NG 双基火药自由燃烧的全过程。火药被引燃,发生剧烈的氧化还原反应,放出大量的热量,产生强烈的光辐射,形成火焰,并在 2.00 s 内迅速膨胀变大,呈现 V 或 W 型<sup>[14]</sup>。火焰明亮且外围呈现棕红色,随后维持稳定;随着双基火药的逐渐燃烧耗尽,火焰变小、亮度降低,最终在 13.15 s 熄灭。火药的平均质量燃速约为 0.101 g/s。

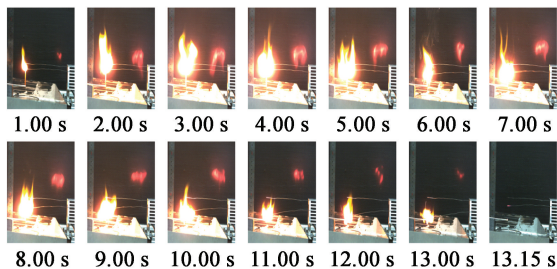


图 3 NC-NG 双基药自由燃烧过程

Fig. 3 Free combustion process of NC-NG double-base gunpowder

### 2.3 灭火实验

表 2 给出了不同灭火条件下的实验结果。由表 2 可以看出:灭火实验组 NC-NG 双基火药的平均质量燃速均低于自由燃烧条件的平均质量燃速。这是因为,水喷雾与高温火焰接触,吸收大量热量用于自

表 2 不同灭火条件下的实验结果

Tab. 2 Experimental results under different fire extinguishing conditions

水压/ MPa	药柱 摆放	灭火时间/ s	药品消 耗量/g	平均 燃速/ ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ )
0.15	水平	13.89(失败)	1.33	0.096
0.30	水平	10.50	0.90	0.085
0.45	水平	10.44	0.81	0.077
0.60	水平	9.10	0.69	0.075
0.15	竖直	14.07(失败)	1.33	0.095
0.30	竖直	14.15(失败)	1.33	0.094
0.45	竖直	13.01	1.20	0.092
0.60	竖直	12.56	1.09	0.086

身蒸发、汽化,降低火焰温度,并且高速水滴穿透火焰到达药柱燃烧面的固相反应区,浸湿药柱未燃部位,再次通过蒸发、汽化对药柱持续冷却降温,从而减少药柱固相反应区向预热区的热量传递,降低药柱预热区及固相反应区的物理及化学反应速率,最终达到抑制双基火药燃烧分解的目的。通过对比平均质量燃烧速率发现:水喷雾压力越大,NC-NG 双基火药的平均质量燃速越小。

经分析,有以下 3 点原因:

- 1) 增大压力可以提高水雾沿火焰轴线方向的雾动量<sup>[15]</sup>,从而提高切割及穿透火焰的能力;
- 2) 增大压力可以增大雾化角,提高水喷雾的覆盖范围,加快燃烧区域的冷却降温,提高灭火效率;
- 3) 增大压力还会使高速水喷雾带动周围的空气快速流动,对火焰的吹熄作用更加明显。

对比药柱竖直燃烧与水平燃烧的灭火效果发现:药柱沿水平方向燃烧时,水喷雾灭火效果更好;药柱竖直燃烧时,水喷雾的灭火效果不佳,甚至灭火失败。可能是因为药柱竖直燃烧时,水雾呈发散状态,液滴之间存在空隙,并且药柱自身截面积较小,灭火剂与火焰作用效率降低。所以,在利用水喷雾对 NC-NG 双基火药进行灭火时,可以调整喷射角度,使尽可能多的水喷雾与火焰作用,从而提高灭火效率。

### 2.4 灭火剂与火焰作用过程

图 4 记录了水压为 0.60 MPa、药品水平放置的灭火过程。喷嘴出水时刻为 1.00 s,每组照片的间隔时间为 1.00 s。图 4 中显示:水喷雾到达火焰之前,经标定,火焰高度约为 7.2 cm,火焰亮度较强,且在竖直方向上波动稳定;释放喷雾之后,火焰在水喷雾的压力及切割作用下,火焰形状受到压制而发

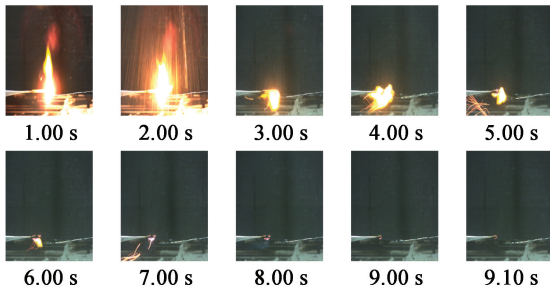


图 4 水压 0.60 MPa、药品水平放置条件下的  
灭火实验过程

Fig. 4 Fire extinguishing experiment process under water pressure of 0.60 MPa and drug horizontal placement conditions

生扰动,并迅速变小,火焰高度缩短至 2.5 cm 左右;同时水喷雾不断地进入火焰内部,对火焰及燃烧面进行冷却降温,火焰亮度迅速降低。随着灭火时间的增加,火焰形状逐渐变小、亮度变暗,直至熄灭。

2.5 温度及热通量变化分析

在药柱自由燃烧及水压 0.15、0.30、0.45 MPa 和 0.60 MPa 条件下,对水平放置药品的实验组进行分析,如图 5~ 图 7 所示。自由燃烧条件下,火焰温度在 9 s 内迅速升高至最大值 1 040.9 °C,燃烧面温度达到最大值 943.1 °C,火焰的热通量也达到 221.5 W/m<sup>2</sup> 的最大值。此过程中,火焰温度的最大上升速率为 252.7 °C/s,燃面温度的最大上升速率为 283.3

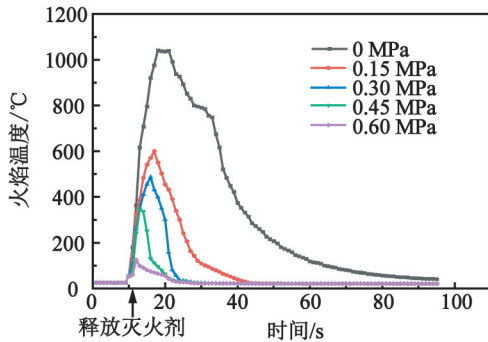


图 5 火焰温度的变化

Fig. 5 Changes in flame temperature

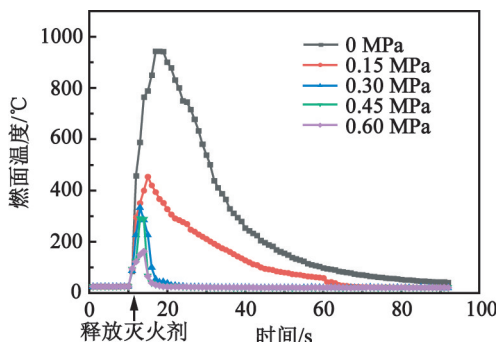


图 6 燃面温度的变化

Fig. 6 Temperature changes on burning surface

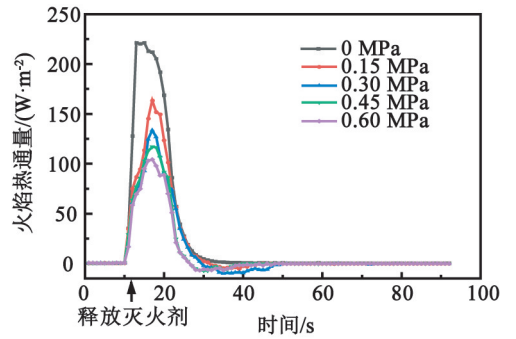


图 7 火焰热通量的变化

Fig. 7 Changes in flame heat flux

°C/s,火焰及燃面温度稳定一段时间后逐渐下降,直至最终燃烧殆尽、火焰熄灭。而当双基火药水平放置被引燃后,释放水喷雾进行灭火,火焰、燃面温度及火焰热通量上升速率瞬间降低,然后短暂的缓慢升温之后,温度开始迅速降低,最终除水压为 0.15 MPa 的实验组外,火焰均被熄灭。由图 8 和图 9 可以看出,随着水压的增大,火焰及燃烧面的升温速率明显降低,且火焰及燃面的最高温度同样低于自由燃烧的最高温度。

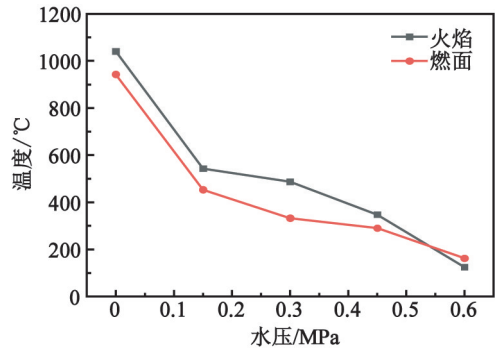


图 8 火焰及燃面最高温度随水压的变化

Fig. 8 Variation of the maximum temperature of flame and burning surface with water pressure

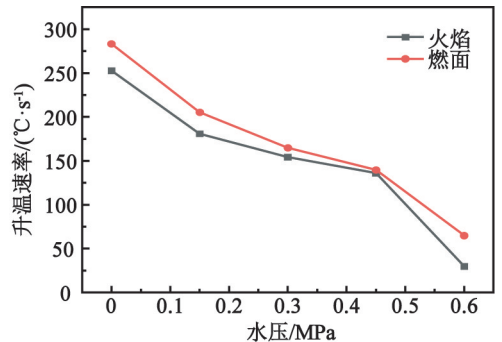


图 9 火焰及燃面最大升温速率随水压的变化

Fig. 9 Variation of the maximum temperature rise rate of flame and burning surface with water pressure

因为水喷雾灭火剂作用于 NC-NG 双基火药燃烧火焰时,燃烧产生的大量热量被水雾吸收,用于水雾的蒸发与汽化,火焰温度迅速降低,火焰的大量热量不能持续地传递至燃烧面,燃烧面处的热分解反应受到抑制,进而阻碍分解反应过程中大量热量的产生,最终导致燃烧反应的终止。如表 1 所示,增大水压时,水喷雾的流速、流量增大,雾化角也增大,相同时间内有更多的灭火剂与火源作用,火焰及燃面的最高温度均随着水压的增大而减小,在灭火剂的作用之下,火焰及燃面的最大升温速率同样随着水压的增大而减小。所以,在一定压力范围之内,水压越大,水喷雾对 NC-NG 双基火药的灭火效果越好。

## 2.6 熄火面样貌特征

图 10 为 NC-NG 双基火药熄火面的形貌特征。熄火面表层黏附一层蜂窝状的黑色固体,主要成分为碳,为 NC-NG 双基火药燃烧过程的中间产物<sup>[16]</sup>。由于灭火剂的冷却降温作用,导致碳无法继续反应生成 CO 或 CO<sub>2</sub> 气体而滞留于熄火面,然后分解过程产生大量的气体从覆盖在燃烧面的碳层溢出,最终导致熄火面呈现多孔形状。另外,还有部分原因可能是分解产生的大量 NO<sub>2</sub> 气体被灭火剂吸收消耗,之后分解反应受到抑制,使得放热量大大减少,最终导致大量的碳残留于熄火面。



图 10 熄火面样貌

Fig. 10 Flameout surface

## 2.7 灭火后的溶液红外光谱分析

收集部分灭火后的溶液发现,溶液颜色明显不同于清水,反而呈现为淡黄色。图 11 是水喷雾灭火后溶液的红外光谱图。在波数为 1 390 cm<sup>-1</sup> 和 858 cm<sup>-1</sup> 出现特征峰,该特征峰正是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的红外吸收特征峰<sup>[17-19]</sup>。分析原因可能是:灭火过程中,NC-NG 双基火药的固相反应区分解产生的中间产物是 NO<sub>2</sub>,除参与燃烧反应之外,一部分溶于水中,使残液呈现淡黄色,还有一部分与 H<sub>2</sub>O 发生化学反应,生成硝酸和 NO 气体。由于 NO<sub>2</sub> 是 NC-NG 双基火药燃烧的关键中间产物,并在 NC-NG 双基火药燃烧

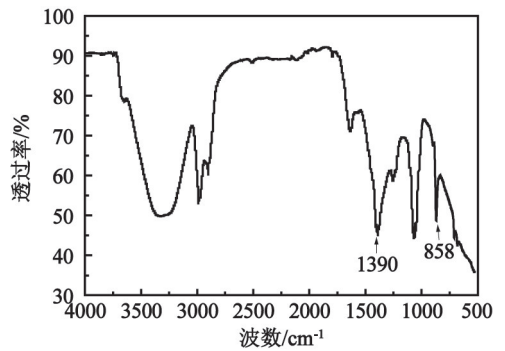


图 11 灭火后的溶液红外光谱图

Fig. 11 Infrared spectrum of the solution after extinguishing

波的嘶嘶区参与反应,放出大量热量。当 NO<sub>2</sub> 被灭火剂消耗掉后,后续燃烧反应受阻,最终导致燃烧反应中断,达到灭火效果。

## 3 结论

以 NC-NG 固体双基火药为研究对象,将火药平铺于燃烧平台,模拟火灾由点到面的发展过程。通过分析热电偶温度、热通量数据及高速摄影图像之间的联系,结合双基火药的燃烧模型、燃烧机理,得出以下结论:

1) 水喷雾可以通过冷却降温、火焰切割、润湿 3 个方面对 NC-NG 双基火药的燃烧起到较好的抑制作用。并且,水喷雾压力越大,对 NC-NG 双基火药药柱的灭火效果越好。

2) 调整水喷雾喷头的方向,可以使水喷雾最大限度地与 NC-NG 双基火药火焰作用,从而提高灭火效率。

3) 结合 NC-NG 双基火药的燃烧机理模型,从灭火后溶液的红外光谱分析推测得到:在 NC-NG 双基火药的灭火过程中,水喷雾可以通过化学反应消耗 NC-NG 双基火药燃烧过程的中间产物 NO<sub>2</sub>,进而在一定程度上抑制 NC-NG 双基火药的燃烧,最终实现灭火。

## 参考文献

- [1] 李国平,王晓青,罗运军. 火炸药物理化学性能[M]. 北京:国防工业出版社,2020.
- [2] 小量火药、炸药及其制品危险性建筑设计安全规范:WJ 2470—1997[S]. 1997.
- [3] 梁清泉. 水系灭火剂的应用及发展方向[C]//化学发展与公共安全——第三届全国“公共安全领域中的化学问题”学术研讨会. 蓬莱,2011:307-310.

- LIANG Q Q. The application and development of waterborne fire-extinguishing agent [C]//Advances in Research on Chemistry in Public Safety. Penglai, 2011: 307-310.
- [4] 徐晓楠. 水系灭火剂及在我国的研究现状[J]. 消防技术与产品信息, 2003(9): 10-13.
- [5] 程山, 丁涛, 刘佳. 固体推进剂安全灭火问题的研究现状[J]. 化工中间体, 2013(4): 15-18.
- CHENG S, DING T, LIU J. The current research status of the problems of solid propellant fire-fighting safety [J]. Chemical Intermediate, 2013(4): 15-18.
- [6] THOMAS G O. On the conditions required for explosion mitigation by water sprays[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2000, 78(5): 339-354.
- [7] ADIGA K C, WILLAUER H D, ANANTH R, et al. Implications of droplet breakup and formation of ultra fine mist in blast mitigation[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(3): 363-369.
- [8] WILLAUER H D, ANANTH R, FARLEY J P, et al. Mitigation of TNT and dextex explosion effects using water mist [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1/2/3): 366-371.
- [9] THOMAS G, JONES A, EDWARDS M J. Influence of water sprays on explosion development in fuel-air mixtures[J]. Combustion Science and Technology, 1991, 80(1/2/3): 47-61.
- [10] ANANTH R, WILLAUER H D, FARLEY J P, et al. Effects of fine water mist on a confined blast [J]. Fire Technology, 2012, 48(3): 641-675.
- [11] JIBA Z, SONO T J, MOSTERT F J. Implications of fine water mist environment on the post-detonation processes of a PE4 explosive charge in a semi-confined blast chamber [J]. Defence Technology, 2018, 14(5): 366-372.
- [12] KONG X S, ZHOU H, ZHENG C, et al. An experimental study on the mitigation effects of fine water mist on confined-blast loading and dynamic response of steel plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 134: 103370.
- [13] SCHUNCK T, BASTIDE M, ECKENFELS D, et al. Blast mitigation by water mist: the effect of the detonation configuration [J]. Shock Waves, 2020, 30(6): 629-644.
- [14] 蔡宇武, 李权威, 潘仁明. 氧浓度对硝化纤维素燃烧特性的影响[J]. 广东化工, 2021, 48(15): 85-87, 33.
- CAI Y W, LI Q W, PAN R M. The influence of oxygen concentration on the combustion of nitrocellulose [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(15): 85-87, 33.
- [15] 陈庆, 魏旭, 陈光, 等. 不同压力下细水雾雾场特征参量模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(6): 803-806.
- CHEN Q, WEI X, CHEN G, et al. Research on the atomization characteristics of fine water under different pressure [J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(6): 803-806.
- [16] 代淑兰. 火炸药燃烧与爆轰物理学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [17] 邵艳秋, 杜昌文, 申亚珍, 等. 应用拉曼和中红外衰减全反射光谱测定溶液和土壤中的硝酸盐[J]. 土壤, 2015, 47(3): 596-601.
- SHAO Y Q, DU C W, SHEN Y Z, et al. Rapid determination of nitrate in solution and soil using raman spectroscopy and mid-infrared attenuated total reflectance spectroscopy [J]. Soils, 2015, 47(3): 596-601.
- [18] 邵艳秋, 杜昌文, 申亚珍, 等. 基于中红外衰减全反射光谱的氮同位素标记硝态氮的快速测定[J]. 分析化学, 2014, 42(5): 747-752.
- SHAO Y Q, DU C W, SHEN Y Z, et al. Rapid determination of nitrogen isotope labeled nitrate using mid-infrared attenuated total reflectance spectroscopy [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2014, 42(5): 747-752.
- [19] 杨家宝, 杜昌文, 申亚珍, 等. 基于傅里叶变换中红外光谱的小白菜硝酸盐含量的快速测定[J]. 分析化学, 2013, 41(8): 1264-1268.
- YANG J B, DU C W, SHEN Y Z, et al. Rapid determination of nitrate in chinese cabbage using Fourier transforms mid-infrared spectroscopy [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2013, 41(8): 1264-1268.