

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.06.003

# 水雾对黏塑性炸药 PBXN-5 燃烧的抑制作用研究<sup>\*</sup>

卫欣欣<sup>①②</sup>  胡双启<sup>①</sup>  董国强<sup>②</sup>  胡立双<sup>①</sup>  崔  超<sup>①</sup>  冯永安<sup>①</sup>  要雅靖<sup>①</sup>

①中北大学环境与安全工程学院(山西太原,030051)

②兵器工业卫生研究所(陕西西安,710065)

[摘  要]  为研究水雾对自由堆积状态黏塑性炸药 PBXN-5 粉末燃烧的抑制作用,搭建了开放式燃烧试验装置,选用了粒度范围  $D_{98}=425\text{ }\mu\text{m}$  的 PBXN-5 粉末,分别对无水雾、喷水压力为 0.5 MPa 和 2.0 MPa 3 种条件下堆积状态 PBXN-5 的燃烧过程进行了试验,获得了火焰传播过程及火焰温度随时间的分布曲线。结果表明:在水雾喷水压力为 0.5 MPa 和 2.0 MPa 时,堆积状态 PBXN-5 的燃烧持续时间分别是自由燃烧时的 32.6% 和 31.8%,说明水雾对于 PBXN-5 燃烧有很好的抑制作用;灭火时间分别为 377.011 ms 和 115.004 ms,而且 2.0 MPa 时火焰的最高下降速率较 0.5 MPa 时有所增加,表明对于堆积状态 PBXN-5 火焰抑制效果来说,雾动量的影响较雾滴粒径强。

[关键词]  堆积状态;PBXN-5;燃烧抑制;水雾;灭火

[分类号]  TQ560.7

## Research on Combustion Inhibition of Water Mist on PBXN-5

WEI Xinxin<sup>①②</sup>, HU Shuangqi<sup>①</sup>, DONG Guoqiang<sup>②</sup>, HU Lishuang<sup>①</sup>, CUI Chao<sup>①</sup>, FENG Yongan<sup>①</sup>, YAO Yajing<sup>①</sup>

①School of Environment and Safety Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

②Institute of Industrial Hygiene of Ordnance Industry (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT]  An open combustion test device was set up to study the combustion inhibition of water mist on the free accumulation state PBXN-5 powder. PBXN-5 powder with particle size of  $D_{98}=425\text{ }\mu\text{m}$  was selected to test the combustion processes of accumulated state PBXN-5 under three conditions of no water mist, water mist with spray pressure of 0.5 MPa and 2.0 MPa, respectively. Flame propagation process and distribution curve of flame temperature with time were obtained. Results show that, when the water spray pressures are 0.5 MPa and 2.0 MPa, combustion duration of PBXN-5 in stacked state is 32.6% and 31.8% of that in free combustion respectively, indicating that water mist has a good inhibitory effect on PBXN-5 combustion. When the spray pressure is 0.5 MPa and 2.0 MPa, the extinguishing time is 377.011 ms and 115.004 ms, respectively. And the maximum flame decline rate at 2.0 MPa increases compared with that at 0.5 MPa, which indicates that the fog momentum has a stronger effect on the flame suppression of PBXN-5 in stacked state than the particle size of fog drops.

[KEYWORDS]  accumulation state; PBXN-5; combustion inhibition; water mist; fire extinction

### 引言

火炸药是重要的军用物资和工业物资,但其危险性高,在生产、运输、储存、试验、使用过程中极易发生燃烧爆炸事故<sup>[1]</sup>。为了保证火炸药生产的正常运行,保障劳动者的生命和财产安全,学者们研究了多种防止事故发生及扩大的方法和手段。其中,

水雾灭火技术以无环境污染、灭火迅速、耗水量低、对防护对象破坏性小等特点展示出广阔的应用前景<sup>[2]</sup>,被认为是在火炸药燃烧初期可采取的有效抑制事故扩大的手段。

20世纪40年代,水雾灭火技术首先应用于轮船灭火;90年代,一些发达国家相继研究和开发了水雾灭火系统<sup>[3]</sup>。水雾主要有气相降温抑制燃烧的作用、对火焰的隔氧窒息作用、对热辐射的衰减作用

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-05-27  
第一作者:卫欣欣(1996-),女,硕士研究生,主要从事防火防爆的研究。E-mail:842082529@qq.com  
通信作者:胡立双(1985-),男,副教授,硕导,主要从事防火防爆的研究。E-mail:hlsly1314@163.com

以及对火焰的冲击切割作用等<sup>[4]</sup>。Jones 等<sup>[5]</sup>通过试验研究,初步引入使用合适的水雾来抑制某种形式的燃烧,可以显著提高水抑制池火灾和火焰喷射等效果思路。Liu 等<sup>[6]</sup>总结了喷雾特性与火灾场景等水雾灭火性能的决定性因素,为以后研究水雾特性对不同种类火灾的影响奠定了基础。对可燃粉尘爆炸的研究表明,水雾对于粉尘云爆炸有一定的抑制作用。Xu 等<sup>[7]</sup>在试验中研究了水雾对于甲烷/煤尘爆炸时的影响,得出水雾会使其爆炸压力、爆温和压力上升速率降低的结论。在此基础上,Gan 等<sup>[8]</sup>在试验中加入 NaCl 和 NaHCO<sub>3</sub> 作为添加剂,结果表明,在物理和化学的共同作用下提高了纯水雾对于 PMMA 的抑制效果。然而,水雾抑制火炸药粉尘燃烧的研究鲜有报道。Willauer 等<sup>[9]</sup>通过试验研究,得出了水雾可以降低 TNT 和 Destex 在爆炸时的冲量、初始冲击波和准静态超压的结论,从而引入蒸发潜热吸收是在有限空间内抑制爆炸的主要机制的思路。不可否认,水雾对于抑制火炸药燃烧的研究还远远不够。

PBXN-5 是由 HMX 和 Viton(偏氟乙烯与全氟乙烯的共聚物)以质量比 95:5(±0.5%)制成的黏塑性炸药<sup>[10]</sup>,具有较好的冲击感度和较大的输出能量<sup>[11]</sup>,为美国三军统一规定的许用传爆药<sup>[12]</sup>。PBXN-5 在生产、储存、运输和使用过程中难免会遇到摩擦、撞击、静电火花等外界能量的作用,而且其主要组成成分 HMX 的撞击感度极高,在生产过程中易发生燃烧和爆炸等意外事故。

由于火炸药在日常储存、运输过程中常处于散药粉堆积状态,所以选取了堆积状态的 PBXN-5 来

研究水雾对于火炸药燃烧的抑制效果。通过小尺度的模拟试验,研究了不同压力的水雾对于堆积状态 PBXN-5 的燃烧抑制效果,观察了其火焰成长趋势,分析火焰传播规律,并比较了不同压力下的雾场特性对于 PBXN-5 火焰的灭火时间、火焰高度下降速率和火焰温度的变化情况的影响,初步探究了水雾扑灭 PBXN-5 火焰的可行性。

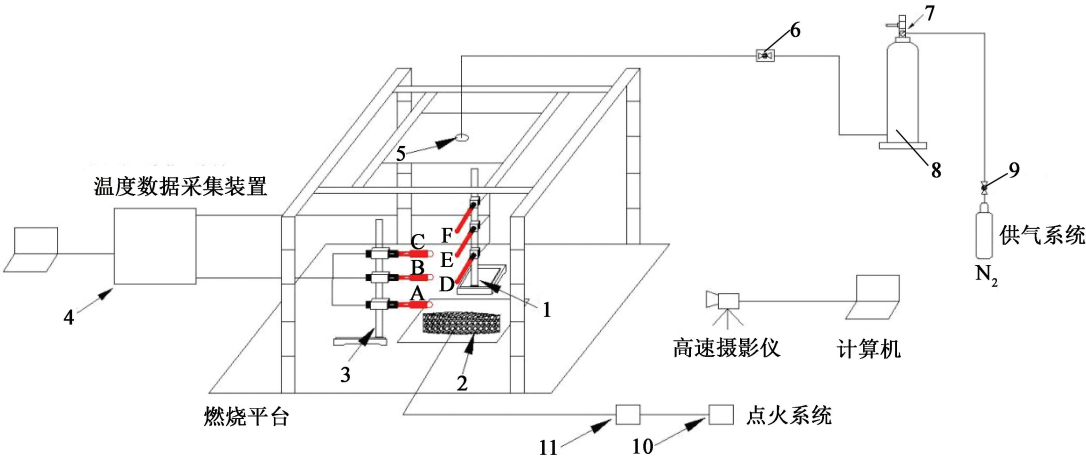
## 1 试验部分

### 1.1 试验装置

所有试验在直径为 7 m 的半球形爆炸洞内进行。试验时,环境温度为 24 ℃,湿度为 47%,压强为 1 个大气压。图 1 是开放式的水雾灭火试验装置结构图,主要包括 3 个部分:燃烧平台、水雾生成装置、试验记录装置以及相关的辅助设备。

燃烧平台是一个开放式的火焰燃烧台,主要由标尺架、装药沙兜和点火系统 3 部分组成。标尺架的尺寸为 1 000 mm×1 000 mm×1 050 mm,主要起到标定火焰燃烧高度和固定喷嘴的作用。装药沙兜的直径为 120 mm,用于固定 PBXN-5 粉末,防止其由于分布不均造成火焰温度不均。点火系统主要由电点火头、点火器、时间控制器和两个电源构成。电点火头用来引燃堆积状态的 PBXN-5;时间控制器用来控制喷水延迟时间和喷水持续时间;两个电源分别为电磁阀和点火器供电,在进行自由燃烧试验时,需切断电磁阀的电源,确保水不会干扰试验。

采用离心式喷头雾化方式来产生水雾。采用高压氮气作为供气气源,高压氮气通过管路进入储水



1 - 铠装热电偶;2 - 装药沙兜;3 - 裸装热电偶;4 - TST6300 温度数据采集装置;5 - 雾化喷嘴;  
6 - 电磁阀;7 - 压力表;8 - 高压储水罐;9 - 球阀;10 - 点火器;11 - 时间控制器。

图 1 试验装置

Fig. 1 Test device

罐中,观察压力表示数,使罐体中的压力达到所需数值,经过电磁阀后,水雾从雾化喷嘴喷出。由于一次试验所需的水量小,较长时间内压力可保持稳定,所以水雾雾场较稳定。离心式半寸喷嘴的进口直径为 14.0 mm,出口直径为 5.5 mm,有两个相互成 60°角的直叶片,且出口带有一定锥角,如图 2。



(a)进口 (b)出口

图 2 离心式半寸喷嘴

Fig. 2 Centrifugal half-inch nozzle

表 1 给出了该喷嘴在两种不同的压力下的雾场特性参数。其中,流量是通过电磁流量计的读数直接得到;雾滴速率及粒径的测试采用美国 TSI 公司的 PDPA/(LDA) 系统;PDPA 为相位多普勒粒子测量仪,LDA 为激光多普勒测速仪。

表 1 离心式半寸喷嘴试验参数

Tab. 1 Test parameters of centrifugal half-inch nozzle

压力/ MPa	雾通量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	雾化 角/(°)	最大平 均速率/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	雾滴 $D_{32}/$ $\mu\text{m}$
0.5	1.796	72.3	15.40	138.36
2.0	3.331	54.6	39.21	92.15

试验记录装置主要由高速摄影仪和 TST6300 温度数据采集装置组成。高速摄影仪用来监测并记录火焰的动态传播情况,采集频率设为 1 000 帧/s;TST6300 温度数据采集装置用于采集不同高度的火焰温度,将 3 根 K 型裸装热电偶(A、B、C)和 3 根 K 型铠装热电偶(D、E、F)分别安装在距离燃烧平台 25、50 cm 和 70 cm 的垂直距离上(图 1)。并且铠装热电偶和裸装热电偶与试验药粉中心的水平距离分别为 0 cm 和 3 cm。

1.2 试验设计

试验主要分为 3 个部分:1)PBXN-5 自由燃烧,即无水雾;2)增加压力为 0.5 MPa 的水雾;3)增加压力为 2.0 MPa 的水雾。

称取质量为 50 g 的 PBXN-5 粉末( $D_{98} = 425 \mu\text{m}$ ),置于不锈钢托盘上的沙兜里,均匀铺开,无需

按压,药粉堆积高度为 0.3 cm。调试高速摄影仪和温度采集装置系统后,将电点火头插入药粉中央,等待点火。药粉持续自由燃烧 10 s 后开始喷水雾,直至火焰熄灭。通过进行自由燃烧和增加不同压力下的水雾,对比火焰的传播情况和火焰温度的变化情况,初步探究水雾扑灭 PBXN-5 火焰的可行性。

2 结果与讨论

2.1 PBXN-5 自由燃烧试验

2.1.1 自由燃烧时火焰传播过程

图 3 是 PBXN-5 自由燃烧时火焰的主要传播过程。将点火头启动时刻设为起始点,即 0 s。从图 3 中可以看出,围绕着点火头的药粉先被引燃,形成一团火焰,这一阶段主要是 PBXN-5 被分解成一些小分子物质;然后,火焰开始向外部蔓延,高度迅速上升,上升到一定程度后,由于加热后空气的持续流动,火焰开始出现持续的跳跃;10 s 后,火焰开始稳定的燃烧;随着 PBXN-5 的进一步燃烧,燃料逐渐耗尽,火焰高度开始缓慢下降,直至火焰熄灭。燃烧时间为 31 869.973 ms。

2.1.2 自由燃烧时的温度变化情况

如图 4 所示,3 根裸装热电偶所测得的温度随时间变化均出现了两个峰值,且第二个峰值高于第一个峰值。产生这种现象的原因主要有两个方面。首先,裸装热电偶对于温度变化敏感。其次,由高速摄影拍到的视频可以看出:火焰上升初期,从 A、B 两根裸装热电偶先捕捉到 1 个峰值;火焰继续上升,达到最大高度,火焰的中心和下方的温度会低于外焰的温度,测得的温度会有所下降;等到火焰高度下降的时候,火焰的外焰会再次经过热电偶,从而使其测得的温度再次上升,即火焰在燃烧过程中湍流现象较为明显,未能完全包裹热电偶。

3 根铠装热电偶测量的温度随时间的变化则呈现出先升后降的趋势,只出现了 1 个峰值。这是因为铠装热电偶和火焰中心点的水平距离为 0 cm,而且火焰有一定的宽度,热电偶测的是火焰中心的温度,外部的扰动对热电偶的影响较小,再加上铠装热电偶对温度不敏感,所以只存在 1 个峰值,而且温度下降的速度比裸装热电偶慢。

两种类型的热电偶所测得的温度达到最大值的时间不同。裸装热电偶在 17 s 时所测得的温度均达到了峰值;而铠装热电偶所测得的温度在 20 s 时才达到峰值;这主要是由于铠装热电偶对温度的灵敏度低于裸装热电偶,且热电动势的产生和热电流



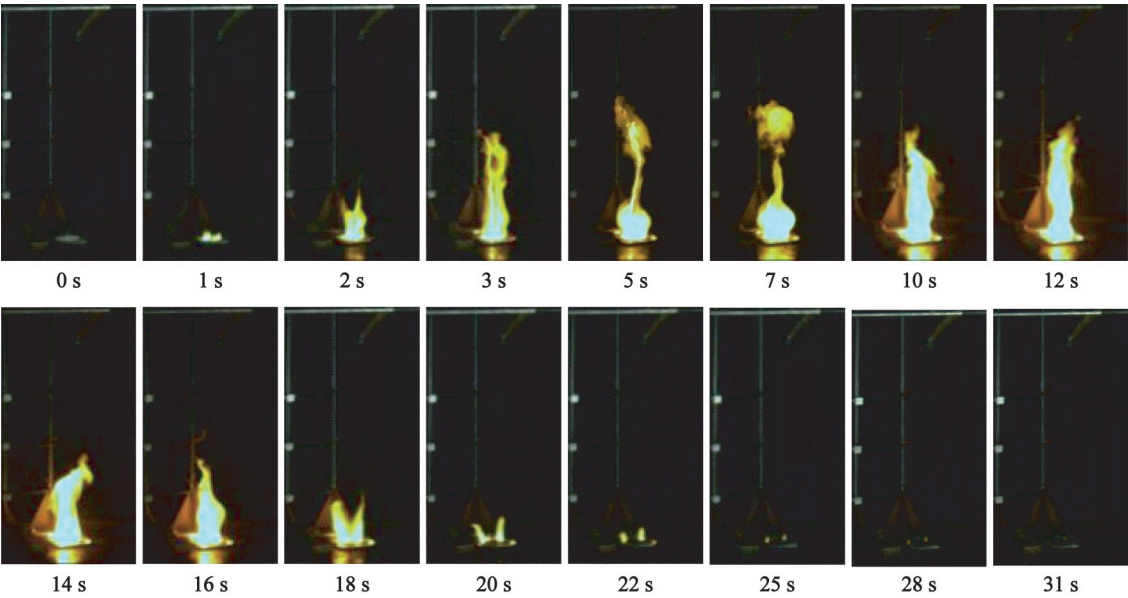


图3 无水雾条件下 PBXN-5 燃烧火焰的传播过程

Fig. 3 Propagation process of combustion flame of PBXN-5 when there is no water mist

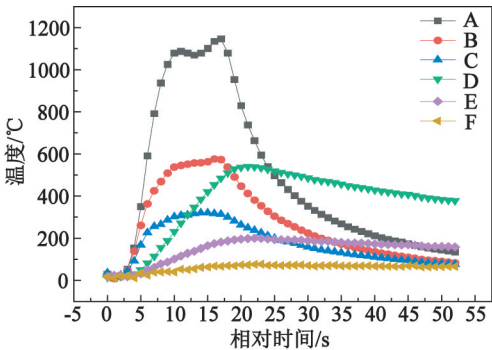


图4 无水雾条件下 PBXN-5 燃烧的温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curve of combustion of PBXN-5 when there is no water mist

的传递需要一定的时间。

结合火焰传播过程和温度变化曲线,PBXN-5 从 10 s 后开始进入稳定燃烧时期,故选择 10 s 开始喷洒水雾。

2.2 水雾与 PBXN-5 火焰作用

选取了两个喷水压力,不同的压力表现出不同的雾场特性,雾场特性参数包括雾化角、雾通量、雾滴粒径及雾动量。雾化角决定了雾滴的空间分布范

围,也决定了雾动量和初始速度,即水雾穿越火焰到达燃料表面的能力<sup>[13]</sup>。雾通量是固体火灾熄灭效率的主要影响因素,随着水雾雾通量的增加,平均灭火时间会逐渐下降<sup>[14]</sup>。升高工作压力,细水雾颗粒沿轴线方向的雾动量也会增大,有利于细水雾颗粒穿透火焰到达燃料表面,降低燃料表面温度<sup>[15]</sup>。随着工作压力的升高,雾滴粒径呈现一个下降的趋势,有利于提升降温速率,但是对于固体燃料来说,粒径小的雾滴很难穿透碳化层润湿燃料表面,灭火效率会降低<sup>[16]</sup>。通过测量温度和记录火焰传播过程,研究不同雾场特性对于 PBXN-5 火焰的影响。表 2 给出了两个喷水压力下所测得的时间参数,将点火头启动时刻设为 0 时刻。其中, $t_1$  为从喷嘴出水到火焰熄灭所需时间; $t_2$  为从水雾接触火焰到火焰熄灭所需时间。

试验药剂的自由燃烧时间为31 869.973 ms,与表2数据对比可知,水雾对于PBXN-5火焰有较好的抑制作用。0.5 MPa水雾下,试验药剂的燃烧时间为10 392.317 ms,仅为自由燃烧时间的32.6%;2.0 MPa下,试验药剂的燃烧时间为10 155.309 ms,

表 2 不同喷水压力下的时间参数

Tab. 2 Time parameters under different spray pressures

喷水压力/ MPa	点火头启动时刻/ ms	喷嘴出水时刻/ ms	水雾与火焰接触 时刻/ms	火焰熄灭时刻/ ms	$t_1$ / ms	$t_2$ / ms
0.5	0	10 015.306	10 068.308	10 392.317	377.011	324.009
2.0	0	10 040.305	10 064.306	10 155.309	115.004	91.003

仅为自由燃烧时间的 31.8%。提高工作压力会增加沿轴线方向的雾动量,从而使雾滴速率增加。当压力为 2.0 MPa 时,从喷嘴出水到火焰熄灭仅需 115.004 ms,从水雾与火焰接触到火焰熄灭仅需 91.003 ms;压力为 0.5 MPa 时,时间分别为 377.011 ms 和 324.009 ms,大于压力为 2.0 MPa 时灭火所需时间。由此可以看出,雾动量增加可使水雾对于 PBXN-5 火焰的抑制作用更好,灭火效率更高。

2.2.1 水雾作用下火焰传播过程

图 5 给出了同一喷水时刻、不同喷水压力对 PBXN-5 燃烧过程中火焰传播的影响。假设喷嘴出水时刻为 0 ms,每组照片的间隔时间为 20 ms。由图 5 可以看出,原始火焰阵面是连续且光滑的,当水雾接触到火焰阵面时,火焰表面以凹陷、凹坑或折痕的形式出现清晰可见的扰动,扰动的强弱随着雾滴粒径和雾动量变大而变强。扰动越大,火焰的表面积越大,火焰与水雾的接触面积越大,在持续喷水的情况下,火焰更易熄灭。离心式半寸喷嘴在 0.5 MPa 和 2.0 MPa 的压力下,所产生的雾滴粒径分别为 138.36  $\mu\text{m}$  和 92.15  $\mu\text{m}$ ,所以,0.5 MPa 时雾滴对于火焰的扰动更强烈;但 2.0 MPa 时灭火时间短,证明雾动量对于 PBXN-5 火焰的影响强于雾滴粒径的影响;同时,压力为 2.0 MPa 时的雾化角明显小于压力为 0.5 MPa 的雾化角;随着灭火时间的增加,火焰内部的雾通量会更大,致使火焰熄灭。

将水雾与火焰接触的时刻设为 0 ms,图 6 给出了不同喷水压力下火焰高度的变化情况。由于喷水压力的不同,导致水雾喷射速度不同,进而产生一定的时间差,从喷嘴出水到水雾与火焰接触,0.5 MPa 的水雾比 2.0 MPa 的水雾时间延长 29 ms,所以 0.5 MPa 的水雾与火焰接触时火焰高度较 2.0 MPa 的高。随着喷水的进行,火焰高度呈持续下降趋势,但这种下降趋势并不均匀。在 0 ~ 5 ms 内,在两种压力的水雾作用下火焰高度下降得并不明显。喷水压力为 0.5 MPa 时,在 5 ~ 35 ms 内火焰高度下降最明显,速率为 0.95 cm/ms,随后则变化不大;喷水压力为 2.0 MPa 时,在 15 ~ 25 ms 内火焰高度下降最明显,速率为 2.17 cm/ms。通过以上数据对比可以看出,压力为 2.0 MPa 的水雾无论是在速率上还是

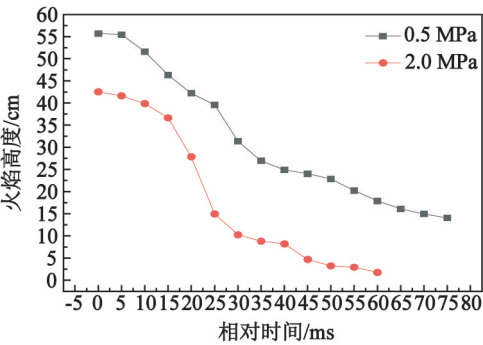


图 6 不同喷水压力下火焰的高度变化  
Fig. 6 Flame height variation under different spray pressures

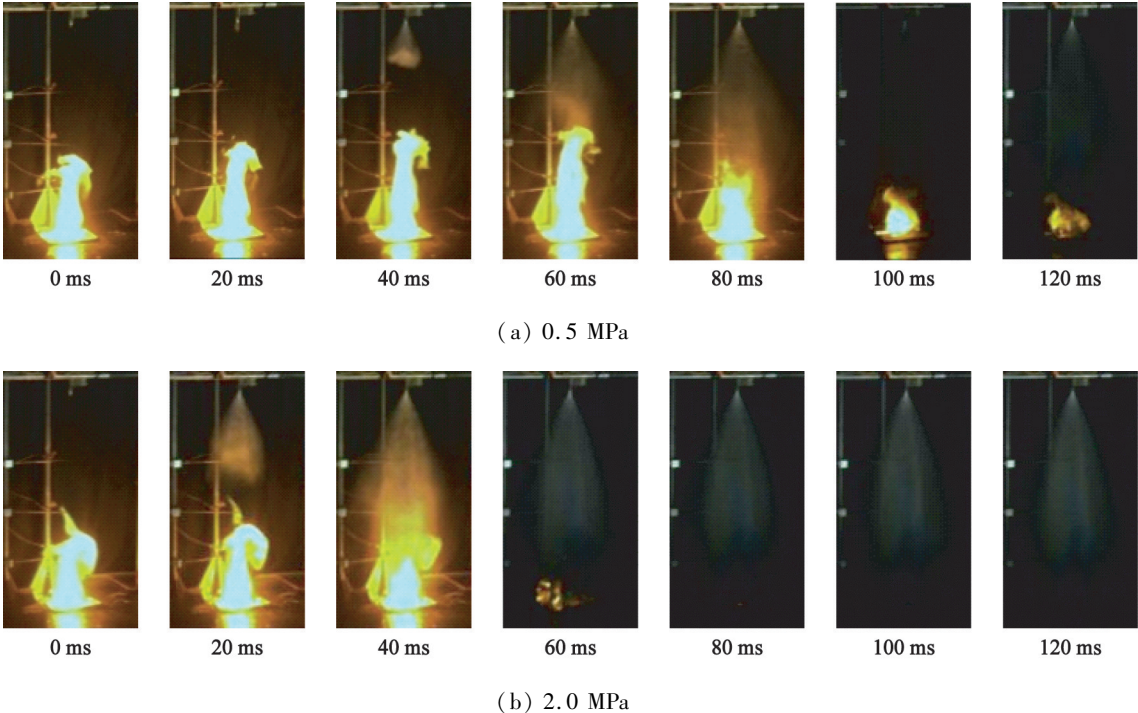


图 5 不同喷水压力下水雾与火焰的作用情况  
Fig. 5 Interaction of water mist and flame under different spray pressures



在灭火效率上均优于压力为 0.5 MPa 的水雾。

2.2.2 温度变化

图 7 为在喷水压力为 0.5 MPa 和 2.0 MPa 的情况下裸装热电偶测得的 PBXN-5 在燃烧时的温度变化。如图 7 所示,所有曲线都呈现出先升后降的趋势。热电偶 A 所测的温度在 11 ~ 14 s 段内呈下降趋势,喷水压力为 0.5 MPa 和 2.0 MPa 时,温度分别下降 1 063.94 °C 和 1 146.66 °C,最大下降速率分别为 406.39、487.60 °C/s;热电偶 B 所测的温度在 11 ~ 13 s 段内呈下降趋势,喷水压力为 0.5 MPa 和 2.0 MPa 时,温度分别下降为 594.76 °C 和 639.02 °C,最大下降速率分别为 353.91 °C/s 和 358.79 °C/s;热电偶 C 所测的温度仅在 11 ~ 12 s 段内呈下降趋势,喷水压力为 0.5 MPa 和 2.0 MPa 时,温度分别下降为 349.99 °C 和 386.38 °C。由以上数据可以看出,喷水压力为 0.5 MPa 时火焰的最大下降速率为 2.0 MPa 时的 83.34 %,而且不同压力下热电偶 B 和 C 在 12 ~ 13 s 内所测的温度差均小于同一过程中热电偶 A 所测得的温度差,且差值由大到小依次为 A、B、C。产生这种现象的原因是,随着 A、B、C 3 根热电偶距燃烧平台的垂直距离的增大,燃烧的火焰逐渐变小;因此,水雾对火焰温度的影响越来越小,导致不同压力下测得的温度差越来越小。

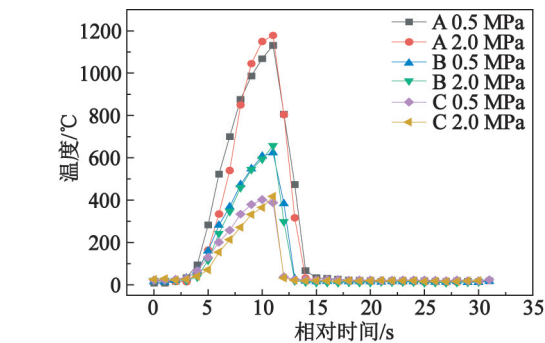


图 7 不同喷水压力下裸装热电偶测得的温度变化  
Fig.7 Temperature variation measured by bare thermocouples under different spray pressures

图 8 给出了喷水压力为 0.5 MPa 和 2.0 MPa 的情况下,铠装热电偶测得的 PBXN-5 在燃烧时的温度变化。图 8 中的曲线均呈现先升后降的趋势,热电偶 D 和 E 所测温度均在 12 s 时达到峰值。但是,与裸装热电偶所测温度相比,铠装热电偶所测的同一位置不同喷水压力的火焰温度存在一定的差值。造成这种现象的原因有两个方面:其一,考虑到火焰燃烧方面的因素,这两组数据是在两个不同的试验中得出的,在两次试验中,火焰燃烧情况会由于粉末堆积的密度、电点火头的深度、空气湿度等因素产生

些许误差;其二,在不同的工况下,热电偶的性能会有一定的变化,所测出的数据也存在一定的误差。热电偶 F 所测的两组数据并未出现这一现象,原因是它的高度最高,与火焰接触较少,而且其敏感度较低,所测得的温度本身也较低,因此温差较小。由图 8 可知,12 s 之后温度曲线开始下降,并且喷水压力为 2.0 MPa 较 0.5 MPa 的温度曲线的斜率大,也就是说,喷水压力为 2.0 MPa 时,火焰温度下降较快且幅度较大。

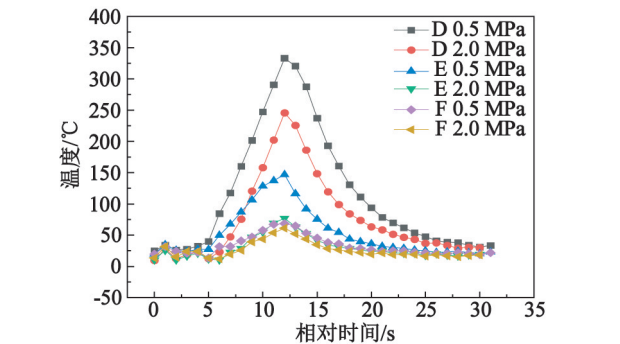


图 8 不同喷水压力下铠装热电偶测得的温度变化  
Fig.8 Temperature variation measured by armoured thermocouples under different spray pressures

3 结论

采用高速摄影仪和温度采集装置,通过 PBXN-5 自由燃烧,以及在 0.5 MPa 和 2.0 MPa 水雾压力下 PBXN-5 的燃烧测试,研究了自由堆积状态下 PBXN-5 粉末燃烧与灭火时的火焰传播过程及火焰温度变化,得出如下结论:

- 1)堆积状态的 PBXN-5 在自由燃烧时,火焰先竖直向上传播,到达一定高度后开始反复跳动并发出强烈的黄光,10 s 后火焰开始稳定且高度逐渐降低。
  - 2)在水雾喷水压力为 0.5 MPa 和 2.0 MPa 时,堆积状态的 PBXN-5 燃烧持续时间分别是自由燃烧时的 32.6% 和 31.8%,表明水雾对于 PBXN-5 燃烧有很好的抑制作用。
  - 3)在水雾喷水压力为 0.5 MPa 和 2.0 MPa 时,灭火时间分别为 377.011 ms 和 115.004 ms,而且 2.0 MPa 时火焰高度的最大下降速率也增加了,说明从堆积状态 PBXN-5 火焰抑制效果来说,雾动量的影响较雾滴粒径强。
- 纯水雾对于 PBXN-5 火焰有一定的抑制作用,而且作用情况与喷水压力有关。但仍需要继续研究纯水雾对于不同火炸药火灾的灭火机理及在纯水雾

中加入不同的添加剂对于火炸药火灾灭火性能的影响,以便深入研究火炸药火灾的高效灭火方式,以减少事故损失和人员伤亡。

### 参 考 文 献

- [1] 廖亚立,傅孝忠,吴雪艳. 火炸药事故应急管理现状研究[J]. 价值工程,2012,31(16):304.  
LIAO Y L, FU X Z, WU X Y. Status quo of explosive accident emergency management[J]. Value Engineering, 2012, 31(16):304.
- [2] 刘志超. 直通式旋流细水雾喷嘴雾化理论分析及灭火实验研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.  
LIU Z C. Theoretical analysis of atomization and fire extinguishing experimental research on swirling water mist nozzles with straight[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [3] 刘秀云,吴超,陈玉琼. 细水雾灭火影响因素研究进展[J]. 消防科学与技术,2010,29(4):269-272.  
LIU X Y, WU C, CHEN Y Q. Progress in the research of factors affecting the extinguishing property of water mist[J]. Fire Science and Technology, 2010, 29(4):269-272.
- [4] 刘全义,伊笑莹,吕志豪,等. 细水雾灭火有效性研究进展[J]. 科学技术与工程,2019,19(22):11-19.  
LIU Q Y, YI X Y, LÜ Z H, et al. Progress on water mist fire suppression effectiveness[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(22):11-19.
- [5] JONES A, THOMAS G O. The action of water sprays on fires and explosions: A review of experimental work[J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1993, 71(B1):41-49.
- [6] LIU Z G, KIM A K. A review of water mist fire suppression systems: fundamental studies[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 1999, 10(3):32-50.
- [7] XU H L, WANG X S, LI Y, et al. Experimental investigation of methane/coal dust explosion under influence of obstacles and ultrafine water mist[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49(B):929-937.
- [8] GAN B, LI B, JIANG H P, et al. Suppression of polymethyl methacrylate dust explosion by ultrafine water mist/additives[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 351:346-355.
- [9] 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):1068-1073.
- [10] 袁凤英,刘小平. 氟橡胶含量的分析:关于 PBXN-5 传爆药制造工艺的成份分析[J]. 太原机械学院学报,1990,11(3):82-85.  
YUAN F Y, LIU X P. The analysis of the viton content during the manufacturing process of the booster explosive PBXN-5[J]. Journal of Taiyuan Institute of Machinery, 1990, 11(3):82-85.
- [11] 徐振相,秦志春,王成,等. 国内外传爆药的发展概况[J]. 火工品,1995(3):29-32.  
XU Z X, QIN Z C, WANG C, et al. Development Situation of booster[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1995(3):29-32.
- [12] 王金英,张景林. PBXN-5 传爆药安全可靠性试验方法研究[J]. 中国安全科学学报,2010,20(1):72-76.  
WANG J Y, ZHANG J L. Experimental study on the reliability and safety of PBXN-5 booster[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(1):72-76.
- [13] 吴龙标,张洪江,李力. 细水雾灭火技术与应用[M]. 南昌:江西科学技术出版社,2014.
- [14] 丛北华,翁韬,王喜世,等. 细水雾抑制熄灭固体火的机理[J]. 燃烧科学与技术,2007,13(1):40-44.  
CONG B H, WENG T, WANG X S, et al. Fire suppression mechanisms of solid fires with water mist[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(1):40-44.
- [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] LIAO G X, HUANG X, CONG B H, et al. Progress in water mist fire suppression technology[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(1):9-19.  
廖光焯,黄鑫,丛北华,等. 细水雾灭火技术研究进展[J]. 中国科学技术大学学报,2006,36(1):9-19.