

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.01.009

# 典型工业炸药耐热性实验研究<sup>\*</sup>

于 谦 郭子如 何志伟 刘 锋  
安徽理工大学化学工程学院 (安徽淮南, 232001)

[摘 要] 针对工业炸药实际应用于露天深孔煤矿火区高温爆破的现状,在实验室规模下模拟高温炮孔加热技术,用这种实验技术来分析两种典型添加物质对铵油炸药热分解特性的影响,以及对铵油炸药、乳化炸药和水胶炸药耐高温性能。研究结果表明:相对于其他两种工业炸药,铵油炸药的耐热性能更好,更适用于火区高温爆破;在铵油炸药中添加5%(质量分数)NH<sub>4</sub>Cl,分解反应峰温度降低了24.8℃,并且缩短了样品到达恒定的烘箱温度的时间,NH<sub>4</sub>Cl的加入显著降低了铵油炸药的耐热性;在铵油炸药中添加5%(质量分数)Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,延长了样品到达恒定的烘箱温度的时间,提高了铵油炸药的耐温性能。结果为耐热工业炸药配方设计提供了依据。

[关键词] 工业炸药;高温爆破;热分解;耐热

[分类号] TJ55

## Experimental Study on Heat Resistance of Typical Industrial Explosives

YU Qian, GUO Ziru, HE Zhiwei, LIU Feng  
School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

[ABSTRACT] Aiming at application of industrial explosives in the high temperature blasting in the fire zone of open-pit deep coal mine, simulated high temperature blast hole heating technology was studied. This experimental technique was used to analyze the effect of two typical additives on thermal decomposition characteristics of ammonium explosives, and performances of high temperature resistance of ammonium explosives, emulsion explosives and water gel explosives were compared. The results show that, compared with the other two kinds of industrial explosives, ammonium explosive exhibits better high temperature resistance, and thus is more suitable for high temperature blasting in the fire area. Adding 5% NH<sub>4</sub>Cl to ammonium explosive decreased the peak temperature in thermal decomposition reaction by 24.8℃, and it also shortens the time of samples to reach the constant temperature of the oven, indicating that the addition of NH<sub>4</sub>Cl significantly reduces the heat resistance of the ammonium explosive. Adding 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> to ammonium explosive, time of the ammonium explosive to arrive at the same constant temperature as the oven has been expanded, and it has improved the heat resistance of ammonium explosive. It provides a basis for the design of heat-resistant industrial explosives.

[KEYWORDS] industrial explosives; high temperature blasting; thermal decomposition; heat resistance

### 引言

工业炸药的主要成分为可燃剂和氧化剂,主要应用于能源资源开采、拆除爆破、工程建设等方面<sup>[1]</sup>。我国宁夏、陕西、内蒙古等矿区的部分煤炭资源存在着较为严重的自燃现象,这既对当地的生态环境造成了影响,浪费了不可再生的煤炭资源,也给煤炭开采带来了相当大的危险。自燃矿区(又称为火区)的煤炭开采必然会使用到爆破技术,但是

这种爆破环境与传统爆破有明显区别<sup>[2-5]</sup>。自燃矿区开采煤炭属于高温爆破工程,对工业炸药的耐高温性能有着严格要求。高温爆破工程项目曾经发生了多起严重的安全事故,造成了重大的人员伤亡<sup>[6]</sup>。《爆破安全规程》(GB6722—2014)明确规定,高温岩石爆破应选用耐高温爆破器材或采取隔热防护措施。每年自燃矿区开采的炸药需求量约数千万t,耐温工业炸药有一定的应用前景<sup>[7]</sup>。高温爆破工程的炮孔温度范围一般在80~300℃之间,最高可达500℃。矿区对80℃以上的高温炮孔爆

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-09-26  
第一作者:于谦(1994-),男,硕士研究生,主要从事含能材料热分解方面研究。E-mail:574735111@qq.com  
通信作者:郭子如(1962-),男,教授,主要从事爆炸(含能)材料、爆炸作业及效应、爆炸燃烧安全等方面研究。E-mail:34999704@qq.com

水来降低炮孔温度和通过缩短爆破作业时间等方式来改善现场作业条件<sup>[8-9]</sup>,但这并不能完全保证爆破开采的安全。因此,耐温工业炸药研究具有重要实际意义。

国内外对耐高温工业炸药的研究主要针对高温硫铁矿和火区煤炭的开采。美国和加拿大对火区煤炭高温爆破采用的炸药、爆破方式等进行了研究<sup>[10-12]</sup>;日本研制了一种耐高温炸药,可以在 240 ℃下维持 24 h 的稳定状态,炸药的爆轰速度大于 2 500 m/s<sup>[13-15]</sup>;国内,王国利开展了硫铁矿抗自燃安全炸药研究<sup>[16]</sup>。

目前,课题组对耐温工业炸药的研究已经取得了一定成果,但  $\text{NH}_4\text{Cl}$  与  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  对 ANFO(铵油炸药)的耐热机理以及常用工业炸药中多孔粒状 ANFO、乳化炸药和水胶炸药的耐温性能没有明确的实验结果。本研究中,针对工业炸药实际应用于露天深孔煤矿火区高温爆破的现状,在实验室规模下模拟高温炮孔加热技术,用这种实验技术来分析两种典型添加物对 ANFO 热分解特性的影响以及对比常用工业炸药的耐温性能。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置和试剂

采用恒温烘箱加热埋于沙子中的钢筒,以模拟高温炮孔。加热用烘箱为 PG881-0 型烘箱;实验温度范围为室温至 300 ℃,控制精度 0.1 ℃,能将沙子、钢管和样品加热到设定温度并保持恒温。

实验分两种模式:一是大药量模拟炮孔加热实验,上述钢筒尺寸为内径 50 mm、壁厚 3.5 mm、高 200 mm;另一实验模式是小钢筒加热测温实验,小钢筒尺寸为内径 15 mm、壁厚 2 mm、高 80 mm。

大药量模拟炮孔加热实验时,烘箱和沙子恒温至某一温度,迅速投入质量约 150 g 样品,并用相同温度的热沙子填满,摄像观察样品受热分解情况。小钢筒加热测温实验时,加入约 10 g 测试样品,装有样品处的外侧壁贴有 K 型耐高温热电偶并与 Hioki8741 存储记录仪连接,能够实时测试样品温度变化。

实验采用多孔粒状 ANFO 作为主要研究对象,分别向其中加入质量分数为 5 % 的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  或  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,工业乳化炸药和水胶炸药为对比测试样品,样品编号如下:

1#样品:无添加剂的 ANFO;

2#样品:ANFO + 5 %  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ;

3#样品:ANFO + 5 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ;

4#样品:典型乳化炸药;

5#样品:某岩石型水胶炸药。

实验测试用多孔粒状 ANFO 是实验室自制的样品,为 95 % (质量分数)多孔粒状硝酸铵(AN)混合 5 % (质量分数)柴油。工业乳化炸药和水胶炸药则来自于某定点生产企业。

### 1.2 实验过程

#### 1.2.1 大药量模拟炮孔加热实验

大药量测试实验中,将烘箱设置在 3 个温度:250、280、300 ℃,对模拟炮孔装置加热到实验温度后,称取 2 组样品,每次约 150 g,迅速分别放入模拟高温炮孔装置的 2 个模拟炮孔中,用相同温度的热沙子将钢筒内空余部分覆满,通过玻璃温度计测量样品和钢筒周围温度变化,摄像观察模拟炮孔的状态和现象并分析。

#### 1.2.2 小钢筒加热测温实验

实验中,烘箱设置在 4 个温度:210、230、250、270 ℃,烘箱中有盛放有沙子的容器(沙浴)。称取 4 组样品,每次约 10 g,分别放入 4 个小钢筒内,在测试样品上部放入一定厚度相同温度的热沙子,然后在顶部用部分泥土封堵。实验时,将烘箱和沙浴加热至设定温度后,再将上述盛放有样品的小钢筒依次迅速插入加热至设定温度的沙子中继续加热,并记录温度变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大药量模拟炮孔加热实验

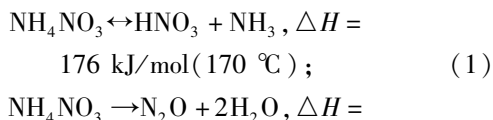
实验现象:

1)添加  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的 2#样品相对于其他测试样品反应现象十分剧烈,加热约 3 min 后,钢筒内沙子不断涌出,放出大量黄色浓烟;

2)无添加剂的 ANFO(1#样品)加热约 14 min,有白烟放出;

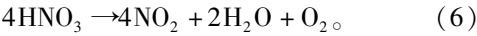
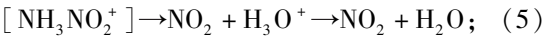
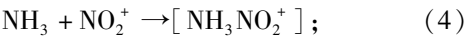
3)添加了  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  的 3#样品在模拟高温炮孔装置中加热 18 min 后,有明显的白烟产生。

实验所测试的 ANFO 的分解现象主要是 AN 的热分解<sup>[17]</sup>,柴油的热裂解只占很少的一部分。AN 在不同的温度环境下的分解路径也是不一样的,根据文献<sup>[18]</sup>,AN 分解反应如下:

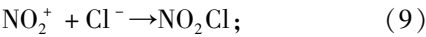
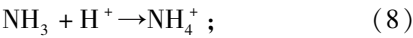
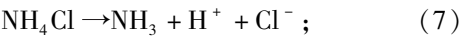


-59 kJ/mol(170 ℃ 以上)。(2)

一般公认的 AN 热分解反应机制是 HNO<sub>3</sub> 的解离导致随后的 NH<sub>3</sub> 的氧化<sup>[19]</sup>, AN 在高温状态下的热分解是二级反应和自催化反应。Rosser 等提出反应(3)是 HNO<sub>3</sub> 的解离产生 NO<sub>2</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>+</sup> 起氧化作用来氧化 NH<sub>3</sub>, 如反应(4), 反应(4)是控制 AN 分解反应的重要步骤, 反应(5)~反应(6)则为 HNO<sub>3</sub> 现实的分解反应路径。

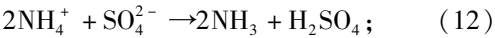
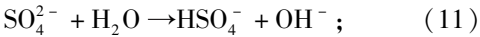


从简易的大药量模拟高温炮孔防爆罐测试实验现象分析得出:添加 NH<sub>4</sub>Cl 的 2<sup>#</sup>样品, ANFO 相对于其他测试样品反应现象更加剧烈, 反应约 3 min 后罐内沙子不断涌出, 放出大量黄色浓烟。反应机理上表明, 添加 NH<sub>4</sub>Cl 促进了 ANFO 的受热分解, Cl<sup>-</sup> 与 HNO<sub>3</sub> 的解离产生 NO<sub>2</sub><sup>+</sup>, 发生聚合反应, 生成 NO<sub>2</sub>Cl, NO<sub>2</sub>Cl 再与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 发生反应, 整个过程如式(7)~式(10)。



从上述反应式中可以看出, [NH<sub>3</sub>NO<sub>2</sub><sup>+</sup> ] 的生成反应为放热反应, 由吉布斯自由能公式 ΔG = ΔH - TΔS 得知:在低温环境下, [NH<sub>3</sub>NO<sub>2</sub><sup>+</sup> ] 的生成速率增加, AN 的热分解活化能明显降低, 所以添加 NH<sub>4</sub>Cl 在 ANFO 中, 会使其热稳定性能降低。

添加了 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的 3<sup>#</sup>样品在模拟高温炮孔装置中反应 18 min 后, 才有明显的白烟产生, 与无添加剂的 ANFO 在 14 min 就有白烟放出形成鲜明对比。添加 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 延迟了 ANFO 中 AN 的热分解反应的时间节点, 使炸药的耐热性更加稳定。从反应机理上来阐述其原因, 当 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 作为添加剂加到 ANFO 中, 硫酸盐溶解于部分 AN 分解反应产生的水中, 给出 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 水解产生弱酸, 如反应(11), 会对反应(3)中弱酸起共轭作用, 然后与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 发生反应, 一个 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 消耗两个 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 后产生 NH<sub>3</sub>, 如反应(12)。反应(4)表明, NO<sub>2</sub><sup>+</sup> 和 NH<sub>3</sub> 的合成速率控制着 AN 热分解的反应速率, 当反应(12)产生过量的 NH<sub>3</sub>, 使 NO<sub>2</sub><sup>+</sup> 的量不足以与其结合生成目标产物, 这将会使 AN 的热分解反应速率变慢, 因而分解反应现象不明显。



从另一方面来说, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 减少了热分解反应关键控制步骤中 NO<sub>2</sub><sup>+</sup> 的量, 对 ANFO 的热分解起抑制剂的作用, 加强了 ANFO 的热稳定性能。

在乳化炸药、水胶炸药和纯 ANFO 的大药量模拟炮孔加热实验中, 装有乳化炸药的炮孔 4 min 时有明显的沙子涌出现象, 伴随着白色浓烟放出; 而装有 ANFO 的炮孔在 10 min 后才有白烟放出, 又经过约 4 min 才有少量沙子涌出, 反应结束后, 乳化炸药的炮孔温度比纯 ANFO 大约高 20 ℃; 水胶炸药则在 3 min 后就有剧烈反应现象产生, 实验数据列于表 1。表 1 中, 受热时间为样品投入模拟炮孔后有明显分解反应的时间; 样品温度为样品投入模拟炮孔后有明显分解反应时的温度; 沙子温度为投入样品后模拟炮孔周围沙子的温度; 底部温度为投入样品后无分解现象时模拟炮孔底部的温度。

表 1 大药量模拟炮孔加热实验特征参数

Tab.1 Characteristic parameters in simulation of blast hole heating experimental with large-dose

炸药	受热时间 t/min	样品温度 θ <sub>0</sub> /℃	沙子温度 θ <sub>环境</sub> /℃	底部温度 θ <sub>炮孔底部</sub> /℃
ANFO	10	266	290	242
乳化炸药	4	268	290	280
水胶炸药	3	282	290	300

由表 1 可见, 在相近温度的模拟高温炮孔中, 乳化炸药和水胶炸药相较于纯 ANFO 更容易达到热分解所需的能垒<sup>[20-21]</sup>。就热分解而言, 物质发生反应活化能从大到小的顺序为: ANFO、乳化炸药、水胶炸药。3 种工业炸药反应结束后, 装有水胶炸药的炮孔温度达 300 ℃, 表明它发生热分解放出的能量远远大于其他两种炸药。综上所述, ANFO 的耐热性能最好, 乳化炸药次之, 水胶炸药最差。

2.2 小钢筒加热测温实验

小钢筒加热测温实验时, 烘箱和沙浴设置 4 个温度, 恒温加热条件下测试 5 种样品得到的温度-时间曲线如图 1。

从图1中可以看出, 所有温度下, 5<sup>#</sup>样品都没有出现放热峰, 4<sup>#</sup>样品乳化炸药均有显著放热峰, 在 230 ℃ 以上; 4<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>样品达到烘箱设定温度的时间明显比其他样品要短, 说明该样品在受热时放热显著, 并加热钢管, 使其迅速升温。2<sup>#</sup>样品在所有温度下出现放热峰的时间都比 1<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>样品迅速。230 ℃

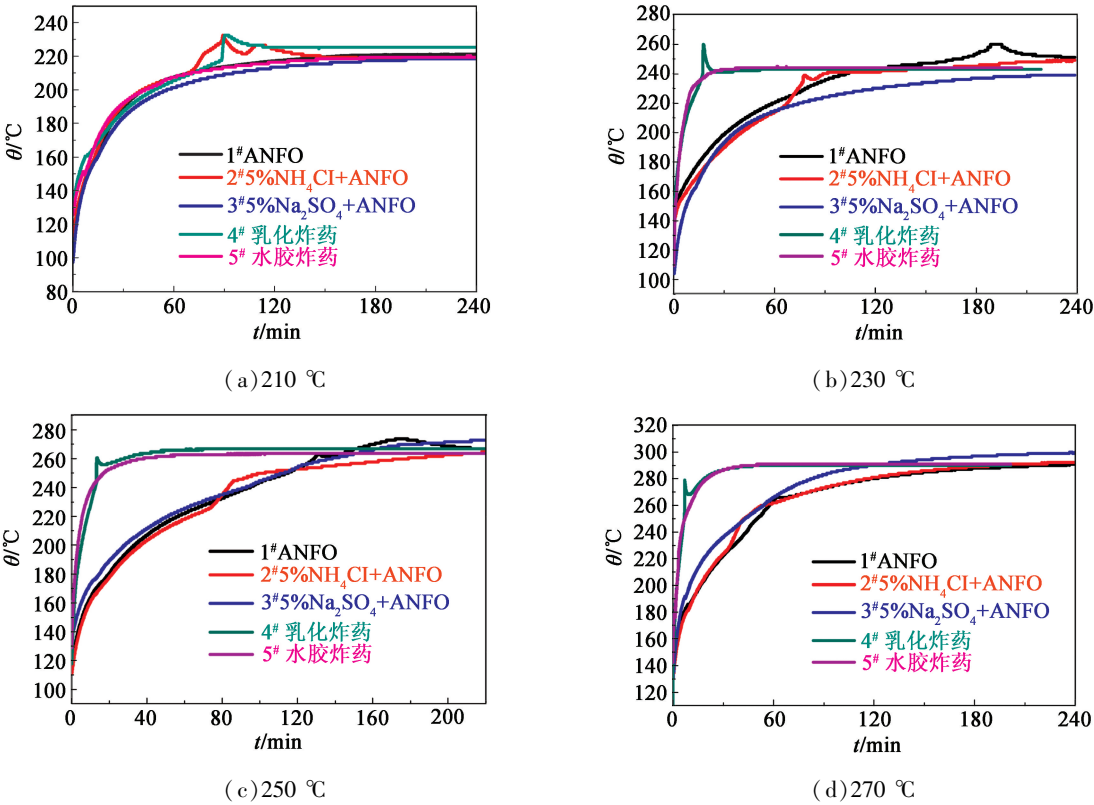


图 1 测试样品的温度-时间曲线

Fig. 1 Temperature-time curve of test samples

下,很长时间范围内 1# 样品比 3# 样品温度高,且 1# 样品有显著放热峰出现;在其他温度下,两样品差别不显著。图 1(b) 中加热分解时温度-时间曲线上的特征参数列于表 2 中。其中,  $\theta_1$  是样品放入烘箱内热电偶开始记录的溫度;  $t_1$  是热电偶达到烘箱设定溫度的时间;  $\theta_2$  是样品开始产生反应放热峰的溫度;  $t_2$  是样品开始产生反应放热峰的时间;  $\theta_{\max}$  是样品反应放热峰值的溫度;  $t_{\max}$  是样品到达放热峰值溫度的时间;  $\theta_3$  是样品反应放热结束时的溫度;  $t_3$  是样品反应放热结束的时间。

从表 2 得知,乳化炸药产生热分解反应放热峰的时间远小于 ANFO 及含有添加物的 ANFO,从乳化炸药放入到烘箱内开始升温至平衡溫度(烘箱设定

溫度),升温速率却大于 ANFO 及含有添加物的 ANFO;从图 2 中曲线斜率可以看出,乳化炸药耐热性能比 ANFO 差。水胶炸药从放入到烘箱开始加热,到它结束热分解反应溫度达到平衡溫度,升温速率一直处于较高值,在极短的时间内,样品溫度达到最大值,所以水胶炸药也不适用于高温爆破工程。ANFO 添加了质量分数为 5 % 的  $\text{NH}_4\text{Cl}$  后,不仅使开始产生热分解反应峰的溫度  $\theta_2$  降低了 24.8 °C,而且样品到达恒定的烘箱溫度的时间提前,这说明  $\text{NH}_4\text{Cl}$  的加入不利于 ANFO 的热分解反应,原因是  $\text{Cl}^-$  具有催化的功能,降低了 ANFO 发生热分解反应的能垒(活化能)。  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  加入到 ANFO 后,显著延长了样品到达恒定烘箱溫度的时间,这是由

表 2 样品在 230 °C 加热分解时温度-时间曲线上的特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of sample decomposition on temperature-time curve at 230 °C

测试样品	$\theta_1/^\circ\text{C}$	$t_1/\text{min}$	$\theta_2/^\circ\text{C}$	$t_2/\text{min}$	$\theta_{\max}/^\circ\text{C}$	$t_{\max}/\text{min}$	$\theta_3/^\circ\text{C}$	$t_3/\text{min}$
1# 样品	144.0	77.8	240.1	101.6	260.0	189.1	251.5	227.6
2# 样品	139.0	73.6	215.3	60.8	248.3	203.4	248.1	205.6
3# 样品	104.0	118.1			238.2	189.6	238.2	189.6
4# 样品	132.0	13.8	238.1	16.6	260.1	17.3	243.0	48.1
5# 样品	109.0	10.7			244.3	37.3	244.6	36.1



于SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>控制了ANFO热分解反应的关键步骤,在ANFO热分解反应中起到抑制剂的作用。

3 结论

两种模拟炮孔加热实验得到的结果可以相互印证,得到如下结论:

- 1)相对于其他两种工业炸药,ANFO的耐热性能更好,更适用于200℃以下的火区高温爆破;
- 2)在ANFO中添加NH<sub>4</sub>Cl,促进了炸药的热分解反应,显著降低了ANFO的耐热性;
- 3)在ANFO中添加质量分数5%的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>可以适当提高ANFO的耐高温性能;
- 4)本文中提出的实验方法可以比较工业炸药的耐热行为。

参 考 文 献

[1] 徐庆兰. 特种炸药在军事及民用爆破中的应用[J]. 火炸药,1989(1):30-32.

[2] 郑炳旭. 中国高温介质爆破研究现状与展望[J]. 爆破, 2010, 27(3): 13-17.  
ZHENG B X. Current status and prospect of high-temperature blasting research in China[J]. Blasting, 2010, 27 (3): 13-17.

[3] 蔡建德. 露天煤矿高温区爆破安全作业技术研究[J]. 工程爆破, 2013, 19(1/2): 92-95.  
CAI J D. Security technology of high temperature blasting in open pit coal mine[J]. Engineering Blasting, 2013, 19(1/2): 92-95.

[4] 许晨, 李克民, 李晋旭,等. 露天煤矿高温火区爆破的安全技术探究[J]. 露天采矿技术, 2010 (4): 73-75, 89.  
XU C, LI K M, LI J X, et al. Security technology research on high-temperature fire area blasting in surface mine[J]. Opencast Mining Technology, 2010(4): 73-75,89.

[5] 束学来. 露天煤矿火区爆破若干问题研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.  
SHU X L. Study on several issues of blasting in opencost coal mine fire area[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015.

[6] 张杰, 郝新民, 马伟,等. 高温炮孔爆破的安全处理探讨[J]. 工程爆破, 2013, 19(1/2): 102-104,111.  
ZHANG J, HAO X M, MA W, et al. Discussion on the safe disposal of the high temperature hole blasting[J]. Engineering Blasting, 2013, 19(1/2): 102-104,111.

[7] 黄亚峰, 王晓峰, 冯晓军,等. 高温耐热炸药的研究现状与发展[J]. 爆破器材, 2012, 41(6): 1-4.  
HUANG Y F, WANG X F, FENG X J, et al. Preset research and perspective of the high-temperature heat-resistance explosive[J]. Explosive Materials, 2012, 41 (6): 1-4.

[8] 刘玉福. 黑岱沟露天煤矿高温抛掷爆破孔降温处理[J]. 煤矿安全, 2010(10): 65-67.

[9] 叶晓辉, 吴超, 李孜军,等. 硫化矿床开采中炸药自爆危险性的实验研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(3): 13-17.  
YE X H, WU C, LI Z J, et al. Experimental study on risk of spontaneous explosion of explosive in mining sulfide deposit[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(3): 13-17.

[10] HOLLIDAY J R, MARCUM W. A blasting plan for loading hot holes[C]//International Society of Explosives Engineers. Proceedings of the 22nd Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Orlando, US,1996,2:78-88.

[11] PROULX R P, SCOVIRA D S. Drilling and blasting in hot and reactive ground conditions at Barrick Goldstrike's Meikle mine[J]. CIM Bulletin, 2001, 94 (1052): 71-75.

[12] RICKMAN D D. Improved thermocouple armoring technique for blast/shock environments[C]//Proceedings of the 44th International Instrumentation Symposium. ISA, 1998:695-702.

[13] TANAKA K J, TANAKA S, SAWADA T. Development of heat resistant industrial explosives[J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2002, 63(4):144-150.

[14] SAWADA T, KUROKAWA K, SUMIYA F, et al. Development of heat resistant emulsion explosives[C]//International Society of Explosives Engineers. Proceedings of the Annual Symposium on Explosives and Blasting Research. 1992: 73-82.

[15] TANAKA K J, TANAKA S, SAWADA T, et al. Study of heat resistant commercial explosives[C]//International Society of Explosives Engineers. Proceedings of the 29th Conference on Explosives and Blasting Technique. 2003:175-183.

[16] 王国利. 硫化矿爆破安全技术的发展[J]. 工程爆破, 1997, 3(2): 65-68.  
WANG G L. Development of blasting safety technology for sulfide mines[J]. Engineering Blasting, 1997, 3 (2): 65-68.

参 考 文 献

[1] 方向,高振儒,周守强,等.反爆炸恐怖袭击防排爆技术综述[J].中国工程科学,2013,15(5):80-83.  
FANG X,GAO Z R,ZHOU S Q,et al. Summarization of prevention and removing technology against terrorist attacks explosion[J]. Engineering Science, 2013,15(5): 80-83.

[2] 毛益明,方秦,张亚栋,等.水体防爆墙与混凝土防爆墙削波减爆作用研究[C]//第九届全国冲击动力学学术会议论文集.2009:395-401.

[3] 彭佳.复合柔性防护结构防爆炸作用技术研究[D].太原:中北大学,2015.  
PENG J. Research of the anti action of composite flexible protection structure[D]. Taiyuan:North University of China,2015.

[4] 王海福,冯顺山.爆炸载荷下聚氨酯泡沫中冲击压力特性[J].爆炸与冲击,1999,19(1):78-83.  
WANG H F, FENG S S. Properties of shock pressure caused by explosion loads in polyurethane foam[J]. Explosion and Shock Waves,1999,19(1):78-83.

[5] 董永香,黄晨光,段祝平.多层介质对应力波传播特性影响分析[J].高压物理学报,2005,19(1):59-65.  
DONG Y X, HUANG C G,DUAN Z P. Analysis on the influence of multi-layered media on stress wave propagation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005,19(1):59-65.

[6] 高性能材料凯夫拉[J].广东塑料,2005(Z1):20.

[7] 邵先锋,赵捍东,朱福林,等.一种新型柔性复合防护结构的数值模拟[J].兵器装备工程学报,2017,38(6):142-145.  
SHAO X F ,ZHAO H D, ZHU F L ,et al. Numerical simulation of a new flexible compound protective structure [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(6):142-145.

[8] 李刚,陈正汉,谢云.波在分层材料中的传播及防冲击波分层材料结构的设计[J].振动与冲击,2005,24(2):89-105.  
LI G, CHEN Z H, XIE Y. Wave propagation in sandwich materials and design of anti-shockwave sandwith structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005,24(2):89-105.

[9] 张国伟.爆炸作用原理[M].北京:国防工业出版社,2006.

[10] 艾尔防务-柔卫甲柔性防护[EB/OL][2018-10-10].  
<http://www.rouweijia.cn/>.

[11] 苗朝阳,李秀地,杨森,等.温压弹爆炸效应与防护技术研究现状[J].兵器装备工程学报,2016,37(4):155-159.  
MIAO C Y, LI X D, YANG S,et al. Research status of explosion effect and protection technology of thermobaric bomb[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering , 2016,37(4):155-159.

[12] 张姝红,陈高杰,高浩鹏,等.高速摄像防护结构抗水中爆炸冲击仿真研究[J].兵器装备工程学报,2016,37(5):53-56.  
ZHANG S H, CHEN G J, GAO H P,et al. Simulation on behavior of protecting structure for high-speed camera to underwater explosions shock[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016,37(5):53-56.



(上接第 51 页)

[17] 谢作军.添加物对 ANFO 热稳定性影响的实验研究 [D]. 淮南:安徽理工大学,2017.  
XIE Z J. Experimental study on the effect of additives on the thermal stability of ANFO [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology,2017.

[18] HAN Z, SACHDEVA S, PAPADAKI M I, et al. Effects of inhibitor and promoter mixtures on ammonium nitrate fertilizer explosion hazards [J]. Thermochimica Acta, 2016,624:69-75.

[19] TURCOTTE R, LIGHTFOOT P D, FOCHARD R, et al. Thermal hazard assessment of AN and AN-based explosives [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 101 (1):1-27.

[20] XU S, TAN L, LIU J P, et al. Cause analysis of spontaneous combustion in an ammonium nitrate emulsion explosive [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016,43:181-188.

[21] WANG K, XU S, LIU D B, et al. Research on the critical temperature of thermal decomposition for large cartridge emulsion explosives [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,38:199-203.