

文章编号: 1006-9941(2010)04-0414-05

乳化炸药局部引燃实验研究

徐志祥, 刘大斌, 胡毅亭, 叶志文, 卫延安

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究乳化炸药局部燃烧特性, 根据法国燃烧转爆轰试验方法和美国燃烧转爆轰试验方法, 在钢管中, 对膨胀珍珠岩敏化的乳化炸药进行局部引燃试验, 试验结果发现药温对于乳化炸药的燃烧有着重要的影响。无论是黑火药还是电热丝引燃, 乳化炸药都没有实现燃烧波的传播。结果表明, 在常压下乳化炸药局部燃烧不能实现燃烧波的传播, 乳化炸药的燃烧存在最小临界燃烧压力。

关键词: 爆炸力学; 乳化炸药; 事故; 局部燃烧; 燃烧

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.013

1 引言

乳化炸药因其爆炸性能优越而且相对不敏感在世界范围内得到了广泛的使用, 是目前世界上工业炸药的主要品种之一。从乳化炸药生产中发生的各种事故中, 可以发现最危险的环节是基质的乳化、泵送。乳胶基质的输送一般在一定的压力条件下进行, 而且药温一般也较高, 在密闭空间中, 一旦发生极端情况(如“干式泵送”和“死头”时), 乳胶基质发生局部燃烧, 造成爆炸的可能性很大, 所以很有必要对乳化炸药的局部燃烧进行研究。

目前人们对乳化炸药泵送过程中局部燃烧研究还相对较少, 而对乳化炸药和硝酸铵的热稳定性研究则相对比较多。Perlid^[1]较早地研究了乳化炸药在螺杆泵中的“干式泵送”和“死头”极端条件下的分解、燃烧情况, Braithwaite^[2]分析了封闭条件下的燃烧情况。Chan^[3]分析了封闭系统中在有压力的条件下乳化炸药电热丝引燃试验, 分析了乳化炸药的压力上升情况并对此建立了压力表达式。Yoshikazu Hiroasaki^[4-5]等研究发现电热丝引燃后乳化炸药没有实现爆轰, 而且认为压力对于乳化炸药的燃烧有着重要的影响, Rurcotte^[6-9]等则认为压力对乳化炸药的引燃和燃烧有着重要的影响。

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-01-09

基金项目: 国家部委基金项目(B262007001)

作者简介: 徐志祥(1982-), 博士, 主要从事工业炸药配方及安全性研究。

通讯联系人: 胡毅亭(1973-), 博士, 讲师, 主要从事民爆器材产品开发研究和安全评价方法的研究。e-mail: huyiting@hotmail.com

我国在乳化和泵送工序发生过很多起事故, 专家组的事调查结果都认为是由于乳化和泵送过程中局部摩擦引起温度过高, 造成爆炸事故。Perlid^[10]实验表明, 螺杆泵发生爆炸时的温度并不是很高, 还不到160℃。DSC和ARC等测试结果表明乳化炸药分解一般在200℃以上, 而这远远超过了Perlid实验测试温度, 所以温度可能还不是引起乳化炸药生产过程发生爆炸事故的真正原因, 为了证明是否是局部温度过高造成乳化炸药爆炸, 本工作参考燃烧转爆轰实验方法, 在密闭钢管内进行引燃, 研究在局部燃烧情况下, 乳化炸药的燃烧是否能传播, 并对局部燃烧特性进行研究。

2 实验

2.1 原料

硝酸铵、硝酸钠、尿素均为分析纯, SP-80和石蜡均为工业级。

2.2 仪器与测试条件

黑火药局部引燃实验(图1), 试验方法参考美国试验^[11], 管材为20号钢, 3号小粒黑。电热丝局部引燃实验(图2), 试验方法参考法国试验^[11], 铬镍电热丝220V, 200W, $\Phi 0.4$ mm, 最高温度为750℃。为了定量测试燃烧波的传播, 对美国实验和法国实验均进行了改动, 下文均有叙述。

2.3 乳化炸药的制备

(1) 水相的制备

将68%的硝酸铵、15%的硝酸钠、2%的尿素、及8%的水混合加热溶解, 溶液温度控制在90~100℃。

(2) 油相的制备

将 5% 的石蜡加热混熔后,加入 2% 的 SP-80 混蜡搅拌均匀,温度控制在 90 ~ 100 °C。

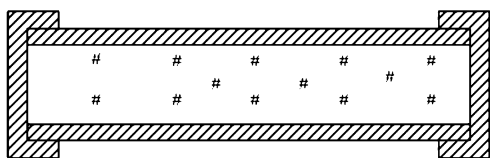


图 1 黑火药局部引燃实验装置

Fig. 1 Apparatus for local ignition test with black powder

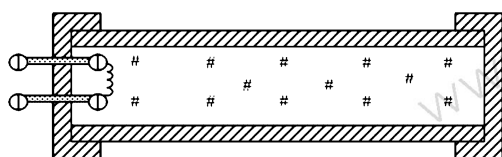


图 2 电热丝局部引燃实验装置

Fig. 2 Apparatus for local ignition test with hot-wire ignition

(3) 乳化炸药的制备

将已溶解好的水相溶液在 30 s 内加入盛有上述油相的容器中,并同时开启乳化机,在乳化机(转速为 1500 r · min⁻¹)搅拌、剪切作用下,3 min 后形成乳胶基质。再用 3% 膨胀珍珠岩敏化后得到乳化炸药样品。

3 结果与讨论

3.1 乳化炸药燃烧特性

将乳化炸药在敞开体系下用电热丝和黑火药包分别进行引燃试验。将黑火药包装进乳化炸药药卷(Φ30 mm 和 Φ70 mm)中间,火药包规格:3 号小粒黑,20 g。发现只有与黑火药包接触的乳化炸药有烧蚀的痕迹,整个药卷未被点着。将药卷放进钢管中,一端堵死,一端螺纹密封,仍然用黑火药引燃,乳化炸药仍未被引燃。

用规格分别为 220 V, 200 W 和 500 W 的电热丝引燃,进行乳化炸药燃烧试验,分别将电热丝伸进 Φ32 mm 和 Φ70 mm 药卷的径向和轴向方向进行引燃试验,试验结果见表 1。

表 1 敞开体系中乳化炸药引燃

Table 1 Emulsion explosives ignition in open wide system

item	32 mm cartridge		70 mm cartridge	
	radial direction	axial direction	radial direction	axial direction
ignition style				
result	combustion	quenching	combustion	quenching

试验结果发现无论是 200 W 电热丝还是 500 W 电热丝,除了在乳化炸药点燃时间上略有差别外,其他并无多大差别,在轴向方向上都能将乳化炸药完全燃尽,在径向上则与电热丝接触的乳化炸药燃烧后,其他部分乳化炸药停止燃烧。

3.2 黑火药引燃试验

为了测试乳化炸药在密闭空间中,局部引燃后燃烧波的传播,我们参照美国燃烧转爆轰试验^[11]方法,将火药包设在端部,测试乳化炸药燃烧波在管中的传播速度。

(1) 20 g 黑火药引燃

管子规格:长为 650 mm,内径 40 mm,壁厚 14 mm。距点火端 100 mm 处沿轴线依次打 7 个测速孔,孔间距 80 mm,使用探针测速。黑火药规格为 3 号小粒黑,药包质量为 20 g。装药密度为 1.32 g · cm⁻³,乳化炸药燃烧波传播速度见表 2。

(2) 雷管起爆

为了和黑火药引燃对比,分析密闭钢管中的乳化炸药爆轰波传播速度,进行雷管起爆对比测试。管子规格:长为 700 mm,内径 40 mm,壁厚 14 mm。距点火端 100 mm 处沿轴线依次打 7 个测速孔,孔间距 80 mm,使用探针测速。雷管起爆,装药密度 1.28 g · cm⁻³。乳化炸药爆轰波传播速度见表 3。

表 2 乳化炸药燃烧速度

Table 2 Burning rate of emulsion explosives m · s⁻¹

number	1	2	3	4	5	6
burning rate	91	136	141	787	311	203

表 3 乳化炸药爆速

Table 3 Detonation velocity of emulsion explosives m · s⁻¹

number	1	2	3	4	5	6
detonation velocity	3620	4132	5115	5171	5113	5131

(3) 40 g 黑火药引燃

为了分析点火药量对乳化炸药燃烧转爆轰的影响,将黑火药量加倍(40 g)。管子规格:长为 600 mm,内径为 40 mm,壁厚为 11.5 mm。距点火端 100 mm 处沿轴线依次打 7 个测速孔,孔间距为 80 mm,使用探针测速。黑火药规格为 3 号小粒黑,黑火药包质量为 40 g。装药密度 1.33 g · cm⁻³。乳化炸药燃烧波传播速度见表 4。

从黑火药引燃的测试结果看来,虽然管子发生破裂(图 3a、图 3c),但是测试的数据(表 2 和表 4)都不能说明钢管中的乳化炸药燃烧波发生传播,测试的燃烧速度(表 2 和表 4)说明此时乳化炸药处于爆燃状态。在敞开体系中乳化炸药不能自持燃烧,所以一旦钢管发生破裂,乳化炸药的反应随即减弱,测试的数据(表 2 和表 4)也说明这个问题,即乳化炸药燃烧速度并没有随着反应的进行而增长,而是在形成最大燃烧速度后随即下降,说明测试的钢管已经发生破裂,乳化炸药处在敞开体系中,燃烧速度降低直至熄灭。

表 4 乳化炸药燃烧速度

number	1	2	3	4	5	6
burning rate	89	796	369	299	191	0



a. 20 g black powder



b. detonator



c. 40 g black powder

图 3 黑火药和雷管对乳化炸药引燃燃烧现象

Fig. 3 Ignition of emulsion explosive by black powder and detonator

黑火药的点火药量对乳化炸药的引燃也有影响,当黑火药质量增加到 40 g 时,在第二个探针后即出现最大传播速度,随后燃烧波的传播速度下降(表 4),最后一个探针没有捕捉到信号,说明增加点火药量后,乳化炸药在开始阶段的反应剧烈,管子破裂后,反应速度也减缓,直至反应停止。虽然黑火药药量增大一倍,其最大燃烧速度仅比 20 g 时燃烧传播速度增加 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并没有从本质上改变乳化炸药燃烧特性。

为了对比,用雷管进行起爆,测试的数据(表 3)可以很清楚地说明爆轰波的成长及其在钢管中的传播。雷管起爆乳化炸药燃烧传播速度和黑火药引燃的燃烧传播速度差距相当明显,从表 2 ~ 表 4 结果可以看出用黑火药引燃乳化炸药在目前局部引燃条件下燃烧是不能传播的。

从实验可以看出,乳化炸药并没有反应完全(图 3c),在钢管末端及实验现场都有残药,说明钢管一旦压力泄掉,乳化炸药燃烧将停止。

3.3 电热丝引燃试验

参照法国试验^[11]进行钢管电热丝引燃试验。为了测试乳化炸药局部燃烧特性,钢管依照法国实验标准,仅将长度适当缩短,将其电热丝设在端部,测试乳化炸药在管中经加热后,乳化炸药燃烧的传播速度。管子规格:长 400 mm,内径 40 mm,壁厚 4mm。距点火端 100 mm 处沿轴线开始依次打 7 个测速孔,孔间距 80 mm,探针测速。电热丝:220 V,200 W。

由于乳化炸药在生产中,乳胶基质在乳化和泵送过程中温度都比较高,一般在 100 °C 以上,而制造粉状乳化炸药时其基质温度在 130 °C 左右,所以温度对于乳化炸药的引燃和燃烧特性有着重要影响。为了分析乳化炸药药温对引燃的影响,以电热丝开始加热计时到乳化炸药发生爆炸的时间来表征乳化炸药热引燃的敏感度。实验结果见表 5。管子的破裂情况见图 4。

第一组样品药温为 25 °C,乳化炸药燃烧传播速度见表 6。

从测试的结果来看(表 5),乳化炸药的药温对乳化炸药的引燃有着重要的影响,敏化后的乳化炸药在药温为 25 °C 时,反应时间比在 90 °C 时的乳化炸药反应时间长了近 1 min,这也与文献[1]的反应时间相符。文献[1]在“干式泵送”时发现一旦乳化炸药发生“反应”,只有 20 s 左右即发生爆炸,由于初温较高,到达热爆炸条件时,加热层较薄,反应速度较快。药温为 40 °C 和药温为 25 °C 时的乳化炸药相比药温为 90 °C 的乳化炸药反应相对缓和得多。说明药温对乳化炸药

的燃烧特性有显著影响。

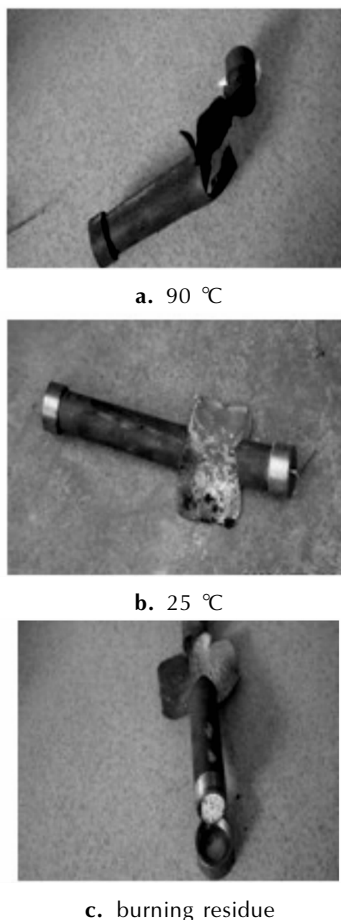


图4 电热丝引燃试验

Fig.4 ignition experiment by hot-wire

表5 乳化炸药加热到爆炸时间

Table 5 The time to explosion of emulsion explosives

sample	temperature /°C	density /g · cm ⁻³	time /s
emulsion explosives	25	1.28	104
emulsion explosives	40	1.26	75
emulsion explosives	90	1.31	38

表6 乳化炸药燃烧传播速度

Table 6 Burning rate of emulsion explosives m · s⁻¹

number	1	2	3	4	5	6
burning rate	7	11	53	19	12	0

电热丝加热引燃乳化炸药燃烧波的传播速度相比于黑火药引燃要小得多(见表2、表4和表6),但是从表6结果来看,乳化炸药燃烧波的传播特性基本一致,即当钢管内压力一旦泄掉,乳化炸药的燃烧速度随即下降,直至停止。虽然在40 °C和90 °C时,反应相对

比较剧烈,但是根据多次试验情况来看,并不能改变乳化炸药稳定燃烧需要一定外压存在的特性,所以本文未对此进行燃烧速度的测试。

从实验可以看出,乳化炸药并没有反应完全,管壁上和钢管末端有明显的残药,从图4c可以很清楚地看出,说明乳化炸药燃烧一旦压力低于某临界值时,燃烧将停止。

3.4 讨论与分析

中国乳化炸药生产中自1988年起就发生了很多起乳化器和螺杆泵的生产事故,造成了严重的人员伤亡和财产损失,给乳化炸药生产带来了恶劣的影响。在世界范围内,关于乳化炸药的泵送过程爆炸事故也非常多。但是到目前为止,关于乳化炸药燃烧和爆炸方面的认识仍然不深入。

在我国,很多人都认为温度过高是造成乳化炸药事故的主要原因^[12],所以在生产中采取了很多措施防止温度过高,但是本研究表明乳化炸药在非完全密闭条件下,即使温度再高,一旦管内的压力低于某临界值,乳化炸药的燃烧随即停止,不能传播,所以温度并不是造成乳化器和螺杆泵事故的唯一因素。即使温度非常高,如果没有一定外压的存在,乳化炸药发生事故也不会有很大的人员伤亡,因为常压下乳化炸药燃烧不能传播,也就不会殉爆,造成大量的人员伤亡,比如1988年的乳化器事故^[13]。即使发生爆炸,也仅仅是局部温度过高导致的热爆炸,不可能产生殉爆。2004年的乳化器事故^[14]和2006年的螺杆泵事故表明^[12],乳化炸药燃烧波已经开始传播,因为乳化器和螺杆泵的爆炸已经引爆了周边的乳化炸药,说明乳化器和螺杆泵体内的压力一定很高,其值肯定超过该型号乳化炸药生产配方的燃烧临界压力值,才有可能造成爆炸。

在国内,乳炸药泵送过程中一般二级泵的设置报警压力为1 MPa,但是一旦发生“干式泵送”和“堵头”情况时,泵体内的乳胶基质会发生分解,在局部形成高压,并造成乳胶基质的热点火,而又由于此时“干式泵送”和“堵头”情况,压力无法泄出,最终导致乳化炸药燃烧的传播,造成爆炸事故。

所以,温度即使再高,在没有压力存在的情况下,乳化炸药的燃烧不能传播,是不会发生事故的。只有当压力超过临界值时,燃烧才能传播,进而转成爆轰,引起爆炸事故的发生。在乳化炸药生产过程中,除了要严格控制温度外,认为还应严格控制体系压力,只有保证体系压力值小于临界值时才能实现乳化炸药生产的本质安全性,这与Turcotte^[6]实验结果一致。

分析认为, 由于乳化炸药是以硝酸铵为主的氧化剂和以蜡等可燃剂, 经乳化作用形成的混合炸药。所以乳化炸药配方中含有大量的水, 而水的汽化热相对也比较大, 水也不参与反应, 导致反应区内反应物质的量降低, 使反应速度减缓, 最终停止反应。虽然敏化后的乳化炸药用雷管能直接起爆, 但是由于水的存在导致燃烧速度相对比较缓慢, 导致放热反应的热量小于吸收的热量, 最终导致乳化炸药燃烧停止。所以水的存在可能是影响乳化炸药在常压下不能燃烧不能传播的关键原因。

4 结 论

(1) 乳化炸药在敞开体系中不能自持燃烧, 只有在外界不断提高能量的情况下才能进行燃烧, 一旦外界停止提供能量, 燃烧将停止。

(2) 用电热丝引燃发现药温对于乳化炸药的燃烧敏感度有着非常重要的影响。

(3) 乳化炸药局部点火时, 乳化炸药的燃烧存在临界点火压力。

参考文献:

- [1] Perlid H. Pump safety tests regarding emulsion explosive[C]// Proceedings of the 22nd Annual Conference in Explosives and Blasting Technique. Cleveland, USA, 1996, 22(2): 101-111.
- [2] Braithwaite M. Thermal hazard testing of aqueous emulsion explosives[C]// International Exchange of Experience on industry-connected Accidents of the Explosives Industries. Nice-France, 1993: 150-166.
- [3] Chan S K. Rupture disc pressure release for confined ignition of condensed explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1988, 13(1): 1-7.
- [4] Hiroaki Y, Suzuki S, Takahashi Y, et al. Burning characteristics of emulsion explosives (I) pressurized vessel test[J]. *Journal of the Japan Explosives Society*, 2000, 61(1): 35-42.
- [5] Hiroaki Y, Suzuki S, Takahashi Y, et al. Burning characteristics of emulsion explosives (II) DDT test[J]. *Journal of the Japan Explosives Society*, 2000, 61(1): 124-128.
- [6] Turcotte R, Goldthorp S, Badeen C M. Hot-wire ignition of AN-based emulsions [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2008, 33(6): 472-481.
- [7] Chan S K, Turcotte R. Onset Temperatures in hot wire ignition of AN-based emulsions [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2009, 34(1): 41-49.
- [8] Goldthorp S, Turcotte R, Badeen C M, et al. Minimum pressure for sustained combustion in AN-based emulsion[C]// 35th International Pyrotechnics Seminar. Colorado. USA, 2008: 157-164.
- [9] Turcotte R, Lightfoot P D, Badeen C M, et al. A pressurized vessel test to measure the minimum burning pressure of water-based explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2005, 30(2): 118-126.
- [10] Perlid H. Pump safety tests regarding emulsion explosive[C]// Proceedings of the 13th Annual Conference in SAFEX. Dublin. Ireland, 1999: 50-68.
- [11] Recommendation for the transportation of dangerous[M]. Manual of Tests and Criteria, 2003: 132-135.
- [12] 将荣光, 胡毅亭. 民爆物品安全管理基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2009: 275-290.
- [13] 徐东平, 裴海兴, 吴龙祥. 6.24 爆炸事故之启示[J]. 金属矿山, 2003, 12(3): 50-51.
- [14] 戴佑林. 乳化炸药生产安全性浅析[J]. 爆破器材, 2006, 35(6): 18-20.
- [14] DAI You-lin. Study on safety production of emulsion explosives [J]. *Explosive Materials*, 2006, 35(6): 18-20.

Experimental Investigation of Local Ignition for Emulsion Explosives

XU Zhi-xiang, LIU Da-bin, HU Yi-ting, YE Zhi-wen, WEI Yan-an

(Department of Chemistry, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Local ignition was investigated for emulsion explosives containing expanded perlite as the density control material with small sized equipment that has been referred to the French method and American method. To evaluate the safety of its manufacturing process, emulsion explosives were ignited by hot-wire at different initial temperatures. The emulsion explosives caused partial reaction that led to the rupture of steel pipe closed to the screw cap, followed by the reaction interruption without explosion. For black powder and hot-wire ignition, emulsion explosion has not sustained combustion, and all quenched. Pressure may be a key factor to previous accident and process of production for emulsion explosives.

Key words: explosion mechanics; emulsion explosive; accident; local ignition; combustion

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.013