

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.01.011

高温炮孔中乳化炸药升温规律分析^{*}

林谋金^{①②} 郑炳旭^① 李战军^① 崔晓荣^① 周科平^② 束学来^①

①宏大矿业有限公司(广东广州,510623)

②中南大学资源与安全工程学院(湖南长沙,410083)

[摘要] 为了获得高温炮孔中防护前后的乳化炸药内部温度变化规律,采用热电偶测温技术对乳化炸药内部不同位置的温度变化曲线进行测量。结果表明:防护下乳化炸药最高温度不超过水浴温度,其内部不同位置的温度变化曲线可通过指数函数进行较好的描述,最外层的温度变化曲线与水的温度变化曲线变化规律基本一致,而内部温度相对较低,说明乳化炸药的外层受到环境温度影响较大,而油包水结构与硝酸铵溶液吸热作用导致内部升温速率相对较慢,因此有利于防护后的乳化炸药在高温火区中得到应用。

[关键词] 露天开采;高温爆破;乳化炸药;耐火隔热材料;升温速率

[分类号] TD235.2⁺1

引言

我国某些煤炭与含硫矿等矿山由于有长时间的自燃现象而造成部分矿岩存在高温现象^[1],因此,为了保证爆破开采安全,可对炸药进行隔热防护,需要进一步了解高温炮孔中防护前后的炸药内部温度变化规律。

在炸药热分解方面,姚二岗等^[2]用DSC曲线数据估算硝化棉由自催化分解转向热爆炸时的热爆炸临界升温速率值。胡荣祖等^[3]根据反应进度和反应体系能量变化的关系以及非等温反应的动力学方程,导出一级自催化分解反应体系热爆炸的临界升温速率估算式。另外,部分研究者对非炸药材料的内部温度进行研究,董福品^[4]对缓凝混凝土绝热升温进行研究,同时给出了其拟合方法。李娟等^[5]运用有限元分析软件研究了不同火灾升温速率对某防火筒支钢梁耐火时间的影响。在高温火区爆破开采研究应用中,在高温炮孔中采用耐火隔热材料防护下的乳化炸药内部温度变化规律在国内相关文献中未见公开报道。

因此,本文在宁夏火区现场采用热电偶测温技术^[6]对乳化炸药内部不同位置的温度变化曲线进行了测量,其结果可为防护下的乳化炸药在高温爆破中的应用提供一定的参考,也可对乳化炸药在生产过程中出现的大直径药卷冷却慢的现象提供一定解释。

1 现场试验

现场试验将分别对防护前后的乳化炸药内部温度进行测量,药卷防护采用以陶瓷纤维为主的多层结构耐火隔热套筒,套筒外径为125 mm,内径为120 mm,长度为82 cm;药卷直径为110 mm,长度为40 cm,即1个套筒中可以装入2个药卷,通过在套筒与药卷的间隙中注入水,使乳化炸药表面在后期也能保持在水浴温度环境中,有利于对炸药进行更好的防护。另外,为了避免水沸腾后产生的水蒸气积聚在套筒内,造成压力升高,导致套筒破坏,在套筒投入炮孔前需要在套筒的上端戳个孔用来释放水蒸气。

测温的热电偶与导线外层采用不锈钢进行铠装,使其适用于高温炮孔中的恶劣环境,其直径为3 mm,使用的最高环境温度为1 100 ℃。温度记录仪型号为YC-747U(4通道),测温精确度为0.1%,读数+0.7 ℃。

每次试验时,将不同热电偶接入固定的温度记录仪通道,采样间隔时间为1 s,试验前不同通道显示的环境温度相差不能超过5 ℃才能进行试验。如图1所示,试验时在炸药内部等间距布置4个热电偶,用于测量炸药内部不同位置的温度。乳化炸药中间位置的热电偶编号为1[#],离中心约18 mm位置的热电偶编号为2[#],离中心位置约36 mm位置的热电偶编号为3[#],乳化炸药最外层位置的热电偶编号

* 收稿日期:2015-09-25

基金项目:广东省产学研合作院士工作站,2013B090400026

作者简介:林谋金(1985~),男,博士,工程师,主要从事爆炸力学及高温火区爆破相关领域研究。E-mail:lmj2012pt@163.com



图 1 热电偶相对位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of relative position of the thermocouple

为 4[#]。另外,有防护套筒时在套筒与药卷间隙中的水中布置一个热电偶,用于测量水的温度变化;在套筒的外部布置一个热电偶用于测量炮孔温度,套筒与药卷间隙(水)中的热电偶编号为 5[#],耐火隔热套筒外围的热电偶编号为 6[#]。用于试验的炮孔温度为 350 ~ 400 °C。

2 试验结果与分析

2.1 无防护乳化炸药温度变化

通过读取温度记录仪得到无防护时的乳化炸药内部不同位置的温度变化曲线,如图 2 所示。

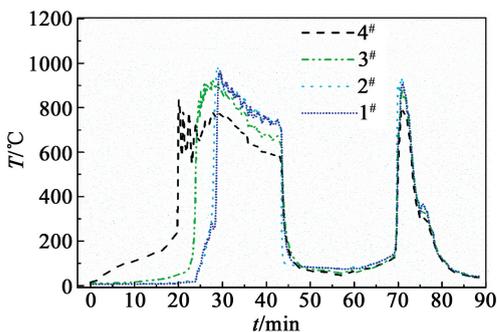


图 2 无防护乳化炸药内部不同位置的温度历史曲线

Fig. 2 Temperature history curves at internal different position of emulsion explosive without protection

由图 2 可得,乳化炸药最外层部分的温度上升速度相对较快,而内部温度上升相对较为缓慢。该现象主要与乳化炸药是油包水结构而导致其导热系数较低有关;另外,乳化炸药中的硝酸铵溶液具有较大的比热容,也将导致其内部温度较低。因此,爆破器材的防护目标主要是确保爆破器材的外表面的温度不能超过限定值。

试验过程中,乳化炸药在 350 °C 炮孔中放置 15 min 后开始出现冒烟现象,此时最外层部分的温度为 150 °C;将乳化炸药继续放置在高温炮孔中 5 min

后拉出,此时最外层部分的温度为 200 °C,超过乳化炸药发生激烈热分解的临界温度(189.9 °C)^[7];然后快速上升到 800 °C 以上,说明乳化炸药的最外层部分开始加速分解并燃烧;经过 4 min 后,离表层 13 mm 位置的温度出现快速上升,说明燃烧位置往乳化炸药内部推进 13 mm 左右,此时乳化炸药的中心部分温度也开始加速上升,并在 29 min 时刻快速升到 980 °C,说明此时炸药药卷整体都在燃烧;药卷在 45 min 燃烧暂时熄灭,但在 70 min 后又重新燃烧,最后整个药卷烧完。

2.2 防护下乳化炸药温度变化

将防护后的乳化炸药内部不同位置的温度进行测量,炸药中心位置与最外层的温度各测 2 次,得到的高温炮孔、套筒与药卷间隙中的水以及防护下乳化炸药内部不同位置的温度变化曲线见图 3。

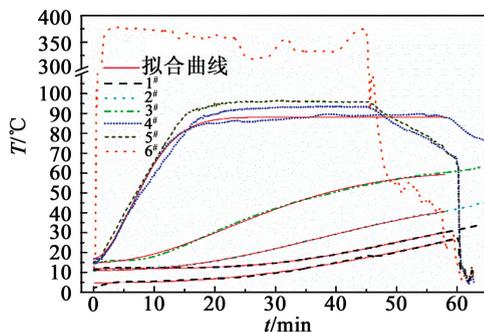


图 3 防护下乳化炸药内部不同位置的温度历史曲线

Fig. 3 Temperature-history curves at internal different position of emulsion explosive under protection

由图 3 可得,试验炮孔的环境温度为 350 °C 左右,套筒与药卷的间隙中水的稳定温度为 93 °C 左右,与试验现场海拔(1 960 m)下的沸点温度吻合,该温度远低于乳化炸药发生激烈热分解的临界温度(189.9 °C)^[7],有利于提高防护下乳化炸药在高温

火区应用的安全性;另外,炸药表面温度达到稳定的时间约为 18 min,而后长期保持在不超过水沸点的温度。乳化炸药最外层的温度变化曲线与水的温度变化曲线变化规律基本一致,但它们的稳定温度都略低于水的沸点温度,说明乳化炸药的外层受到环境温度影响较大;另外,2次试验的曲线有一定的差别,可能与热电偶所在位置的精确度有关。

离中心位置约 36 mm 位置的热电偶在 60 min 后的温度约为 61.9 °C,离中心位置约 18 mm 位置的热电偶在 60 min 后的温度约为 43.1 °C,中间位置的热电偶在 60 min 后的温度约为 31.3 °C,说明乳化炸药内部温度相对较低,与乳化炸药是油包水结构有关,即油包水结构导致乳化炸药的导热系数较低。另外,乳化炸药中的硝酸铵溶液具有较大的比热容,也将导致其内部温度较低,上述原因有利于防护下的乳化炸药在高温火区中应用。

中间位置的热电偶在 2 次试验中得到的温度变化曲线未能重合,但其变化规律基本一致,说明乳化炸药内部同一位置的温度变化规律较稳定,温度变化曲线未能重合主要是由该位置的初始温度不同而引起的。

试验结束后将隔热套筒从炮孔中取出,然后将隔热套筒沿外层母线从上往下剥开,以便观察套筒中的水位情况。结果表明,加热 60 min 后套筒中的水位降至离套筒顶端 30 cm 的位置,主要是由水沸腾后溢出套筒以及水蒸发造成的。从安全方面考虑,如果套筒与药卷间隙的水位低于离套筒顶端 30 cm 的位置,套筒上端口的温度将超过 100 °C,沸腾后的水即使能上升一定高度,也无法充分保护套筒上部的炸药,另外水沸腾后产生的水蒸气无法充分保护套筒上部的炸药,因此,可认为套筒中的水位降至离套筒顶端 30 cm 的位置是隔热套筒保护炸药的安全节点。

2.3 数据拟合

目前,常用的升温数学表达式主要有双曲线型、指数 I 型、指数 II 型(复合指数型)等^[4]。为了对高温炮孔中耐火隔热材料防护下的乳化炸药内部不同位置的温度变化曲线进行描述,本文根据试验数据的特点,在指数 II 型表达式中添加一项常数项,其表达式如下:

$$T(t) = T_0 + T_c(1 - e^{-at^b}) \quad (1)$$

式中: T 为任意时刻的温度,°C; T_0 为初始温度,°C; T_c 为最终温度与初始温度的差值,°C; t 为试验时间,min; a 、 b 为由试验数据拟合确定的常数。

通过最小二乘法原理,对乳化炸药内部不同位

置的温度历史曲线进行拟合,拟合效果如图 3 所示,拟合系数见表 1。

由表 1 可得,乳化炸药内部不同位置(等间距)的温度历史曲线根据式(1)拟合后的相关系数都趋于 1,说明采用改进的指数 II 型表达式对防护下乳化炸药内部温度变化曲线的拟合效果较理想,而同一位置由于不同初始温度引起温度历史曲线的拟合参数则相差较大。

表 1 不同位置升温曲线的拟合系数

Tab. 1 Fitting coefficients of temperature rising curves for different position

| 热电偶位置 | 初始温度 $T_0/^\circ\text{C}$ | 温度差 $T_c/^\circ\text{C}$ | a | b | 相关系数 |
|-------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|-------|-------|
| 1.1* | 12.17 | 24.08 | 3.25×10^{-7} | 3.756 | 0.999 |
| 1.2* | 4.82 | 47.80 | 3.15×10^{-5} | 2.413 | 0.995 |
| 2 | 11.37 | 35.52 | 9.69×10^{-5} | 2.410 | 0.999 |
| 3 | 14.41 | 47.29 | 1.31×10^{-3} | 1.908 | 0.998 |
| 4 | 15.42 | 72.78 | 0.02 | 1.742 | 0.997 |

* 1.1 和 1.2 分别为药卷中心在 2 次试验时分别获得数据的拟合结果。

2.4 升温速率

为了对不同乳化炸药内部不同位置的升温速率进行比较,将温度历史曲线进行求导,得到不同位置的升温速率曲线,如图 4 所示。

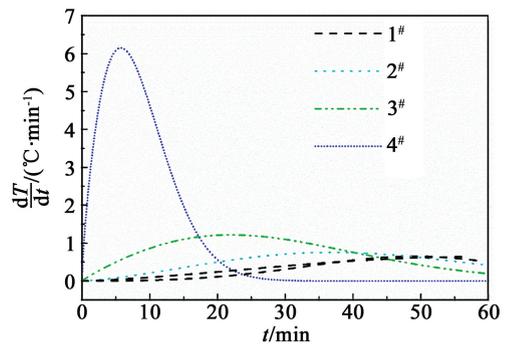


图 4 防护下乳化炸药内部不同位置的升温速率
Fig. 4 Temperature increasing speed at internal different position of emulsion explosive under protection

由图 4 可得,乳化炸药最外层的升温速率在 5.7 min 左右达到最大值(6.15 °C/min),在 20 min 后升温速率趋于 0,即其温度已达到稳定值。离药卷中心位置约 36 mm 位置的乳化炸药,在 21.2 min 左右的升温速率达到最大值(1.21 °C/min);离药卷中心位置约 18 mm 位置的乳化炸药在 40 min 左右的升温速率达到最大值(0.78 °C/min);乳化炸药中间位置的升温速率,在 52 min 左右达到最大值(0.62 °C/min),说明乳化炸药内部的升温速率最大值随着与药卷表面距离减小而增大。2 次试验得到药卷

中间位置的温度历史曲线,因初始温度不同引起两者未能重合,但升温速率变化曲线基本一致,进一步说明乳化炸药内部同一位置的温度变化规律较稳定。乳化炸药中间位置的升温速率在开始阶段处于停滞状态阶段,在 25 min 后才开始增长,说明乳化炸药靠近内部的升温速率相对较为缓慢。

2.5 相邻位置温度求差

将乳化炸药内部相邻不同位置的温度历史曲线进行求差,得到相应的差值曲线即温度梯度曲线,如图 5 所示。

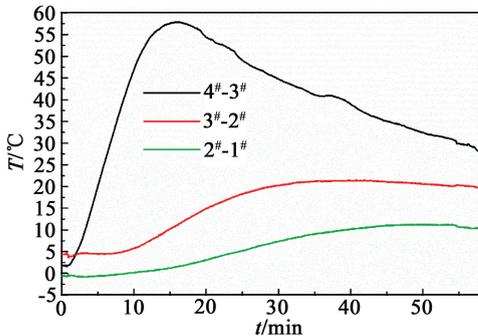


图 5 不同位置的温度梯度

Fig. 5 Temperature gradients at different position

由图 5 可得,乳化炸药内部等间距的温度梯度最大值随着离药卷表面距离减小而增大,温度梯度 4#-3# 最大值出现在 15 min 左右,与炸药最外层温度达到最大值的时间一致。炸药最外层温度达到最大值后保持不变而内部温度开始上升,因此,温度梯度出现最大值后开始下降。

3 结论

本文采用热电偶测温技术对高温炮孔中的乳化炸药内部不同位置的温度进行测量。结论如下:

1) 在 350 °C 炮孔中放置无防护乳化炸药,其最高温度在 20 min 超过 200 °C,防护下乳化炸药最高温度长时间不超过水浴温度,但套筒中的水位降至离套筒顶端 30 cm 的位置,可认为隔热套筒保护的安全节点。

2) 防护下乳化炸药内部不同位置的温度变化曲线,可通过指数 II 型表达式进行拟合,其拟合效果较理想,而不同初始温度将导致同一位置的温度历史曲线拟合参数相差较大。

3) 防护下乳化炸药最外层的温度变化曲线与水的温度变化曲线变化规律基本一致,而内部温度相对较低,说明乳化炸药的外层受到环境温度影响较大。

4) 防护下乳化炸药内部的升温速率与温度梯度最大值随着与药卷表面距离增大而减小,内部同

一位置的温度变化规律较稳定,其温度历史曲线主要由该位置初始温度决定。

5) 乳化炸药的油包水结构与硝酸铵吸热作用导致乳化炸药内部升温速率相对较慢,因此乳化炸药的内部温度相对较低,有利于防护下的乳化炸药在高温火区中应用。

参考文献

- [1] 齐俊德,禹学成. 浅谈宁夏煤田火灾现状及综合治理[J]. 陕西煤炭,2007(1):36-38.
QI J D, YU X C. Present situation and comprehensive treatment of fire accident in Ningxia coal-field [J]. Shaanxi Coal,2007(1):36-38.
- [2] 姚二岗,胡荣祖,赵风起,等. 用 DSC 曲线数据估算硝化棉的 C_nB 和表观经验级数自催化分解反应热爆炸临界升温速率[J]. 火炸药学报,2013,36(5):72-76,81.
YAO E G, HU R Z, ZHAO F Q, et al. Estimation of the critical rate of temperature rise for thermal explosion of C_nB and apparent empiric-order autocatalytic decomposing reaction of nitrocellulose from DSC curves [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(5): 72-76, 81.
- [3] 胡荣祖,张海,夏志明,等. 含能材料放热分解反应体系热爆炸的临界升温速率估算式[J]. 含能材料,2003,11(3):130-133,137.
HU R Z, ZHANG H, XIA Z M, et al. Estimation formulae of the critical rate of temperature rise for thermal explosion of exothermic decomposition reaction system of energetic materials [J]. Energetic Materials, 2003, 11(3):130-133,137.
- [4] 董福品. 缓凝混凝土绝热温升的公式拟合方法[J]. 水力发电,2007,33(3):47-48,86.
DONG F P. A Method to fit test data of adiabatic rise of temperature of set retarding concrete [J]. Water Power, 2007, 33(3):47-48,86.
- [5] 李娟,姚斌,胡军. 升温速率对某防火保护筒支钢梁耐火时间的影响[J]. 火灾科学,2010,19(1):38-44.
LI J, YAO B, HU J. Effect of temperature rise rate on fire resistance period of a simple supported beam with fire coating [J]. Fire Safety Science, 2010, 19(1):38-44.
- [6] 张明春,肖燕红. 热电偶测温原理及应用[J]. 攀枝花科技与信息,2009,34(3):58-62.
ZHANG M C, XIAO Y H. Principle and application of thermocouple temperature [J]. Panzhihua Sci-Tech & Information, 2009, 34(3):58-62.
- [7] 马志钢,王瑾. 乳化炸药的热分解特性[J]. 含能材料,2004,12(5):294-296.
MA Z G, WANG J. Thermal decomposition of emulsion explosives [J]. Energetic Materials, 2004, 12(5):294-296.

- 37(6):468-472.
- LIU F G, ZHONG D W, ZHU K. Controlled blasting demolition of three frame brick structure building in complex environment. [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2014, 37(6):468-472.
- [2] 邵鹏, 东兆星, 韩立军, 等. 控制爆破技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006:47-55.
- [3] 范磊, 沈蔚, 李欲春, 等. 复杂环境下两幢框架大楼定向爆破拆除[J]. 工程爆破, 2008, 14(1):60-62.
- FAN L, SHEN W, LI Y C, et al. Directional demolition of two frame structure building in complicated environment[J]. Engineering Blasting, 2008, 14(1):60-62.
- [4] 梁锐, 刘国军. 复杂环境下9层框架楼房切割定向爆破拆除[J]. 爆破, 2012, 29(2):80-83.
- LIANG R, LIU G J. Cutting directional demolition blasting of a 9-layer concrete building under complicated situation[J]. Blasting, 2012, 29(2):80-83.
- [5] 齐世福, 刘好全, 李宾利, 等. 框剪结构高楼纵向倾倒拆除爆破研究[J]. 爆破器材, 2014, 43(3):41-47.
- QI S F, LIU H Q, LI B L, et al. Blasting study on the lengthwise collapse of a tall building with a frame shear wall structure[J]. Explosive Materials, 2014, 43(3):41-47.
- [6] 汪旭光. 中国典型爆破工程与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [7] 冯加瑜. 城市控制爆破[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000:247-248.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆破安全规程:GB 6722—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Safty regulations for blasting: GB 6722—2003 [S]. Beijing: China Standard Press, 2003.
- [9] 周家汉. 爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J]. 工程爆破, 2009, 15(1):1-4, 40.
- ZHOU J H. Discussion on calculation formula of collapsing vibration velocity caused by blasting demolition[J]. Engineering Blasting, 2009, 15(1):1-4, 40.

Controlled Balsting Demolition of Three Landscape Rooms with Turriform Frame Construction in Complicated Environment

YANG Shijiao^①, ZHANG Wenlong^{①②}, ZHENG Jianli^②

^①School of Nuclear Resources Engineering, University of South China (Hu'nan Hengyang, 421000)

^②Guangdong Xiyuan Blasting Engineering Co., Ltd. (Guangdong Huizhou, 516000)

[ABSTRACT] A controlled blasting demolition of three landscape rooms with turriform frame construction in complicated environment was introduced. For the turriform (hexagonal) frame construction with high stability, the ratio of height to width is too small to collapse. It focused on the burst attitude of the frame on symmetric axis in collapse direction. Through blasting plan and the pre-treatment measures, the proper blasting parameters and cut heights were determined. By adopting safe protection measures, the three constructors collapsed in different directions and times, vibration was reduced, and the flying rocks were controlled. The blasting demolition achieves good and the desired results.

[KEY WORDS] turriform frame construct; blasting demolition; blasting parameters; safe protection

(上接第50页)

Temperature Raising Analysis of Emulsion Explosive in Blast Holes at High Temperature

LIN Moujin^{①②}, ZHENG Bingxu^①, LI Zhanjun^①, CUI Xiaorong^①, ZHOU Keping^②, SHU Xuelai^①

^①Hongda Mining Co., Ltd. (Guangdong Guangzhou, 510623)

^②School of Resources and Safety Engineering, Central South University (Hu'nan Changsha, 410083)

[ABSTRACT] In order to obtain the internal temperature distribution of the emulsion explosive in blast hole at high temperatures, the thermocouple temperature measurement technology was applied to measure the inner temperatures (different positions) of the emulsion explosive. The results show that the temperature of the emulsion explosive was lower than that of water and the internal temperature-history curve of the emulsion explosive can be better described by an exponential function. The change of temperature-history curve of outer emulsion explosive is in accordance with the change of temperature-history curve of water, and the inner temperature is relatively lower, which shows the outer of the emulsion explosives are affected by the environmental temperature. The inner temperature rise rate of emulsion explosive is relatively slow because of the water-in-oil structure and specific endothermic action of ammonium nitrate. It is advantageous for emulsion explosive under protection to be used in the fire area at high temperatures.

[KEY WORDS] open-pit mining; high-temperature blasting; emulsion explosive; refractory insulation material; temperature rising rate