

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.06.006

管体材质及尺寸对低燃速硼系延期药的影响^{*}

昌盛禄 陈世雄 彭文林 聂祥进 杜伟兰

贵州久联民爆器材发展股份有限公司(贵州贵阳,550000)

[摘 要] 为了探究用硼系延期药制作高秒量雷管的可行性,采用了不同管体材料和不同壁厚的同种材料制作低燃速硼系延期体。研究表明:由于预热效应的存在,延期药的燃烧速度随着管体材料导热系数的增加而变快,从热绝缘材料到导热材料,延期药的燃烧速度跳跃式增加;当延期体管体为同种导热材料时,在热散失和热传导的双重作用下,延期药燃速随着管体壁厚的增加而降低,但是相对精度却不是随壁厚的增加发生一致性变化,延期体精度随着壁厚的增加先升高然后降低,在壁厚为 4 mm 时的延期精度最高。

[关键词] 硼系延期药;燃速;延期管体;精度

[分类号] TJ45

引言

延期药是延期体的核心部分,它的好坏直接决定了雷管质量的高低^[1]。由于采矿的需要,部分爆破工程需要延时较长且精度较高的雷管来控制整个爆破系统,国内一般使用钨系延期药来实现长延时,然而钨系延期药的精度并不理想。徐大伟等研究了硼系延期药的特性及实际应用情况^[2];成春莲等利用数值曲线拟合的方法研究了硼系延期药的燃速与硼含量的关系^[3];李尚杰研究了硼系延期药的生产工艺^[4];张建富等研究了药剂粒度匹配对精度的影响^[5]。为了探究精度较高的硼系延期药制作高秒量雷管的可行性,笔者探究了管体材料和壁厚对低燃速硼系延期药的影响。

1 试验准备

1.1 硼系延期药原材料准备

硼粉:营口辽滨精细化工有限公司,质量分数 92%,平均粒度为 1.70 μm , D_{97} 为 8.38 μm ;铬酸钼:分析纯,贝赛勒化学技术(上海)有限公司,过 200 目筛;黏合剂:硝化棉。

1.2 试验设备

电子分析天平,八角鼓混药机,烘箱,压药设备,压药模具,游标卡尺,延期体测时装置,外径为 7.5 mm 且内径为 3.5 mm 的铝管、黄铜管和有机玻璃管,内径为 3.5 mm 且外径分别为 11.5、15.5、19.5 mm 的铝管。

1.3 低燃速硼系延期药的制备

在硼系延期药中,硼粉的含量越低,其秒量越

高,当硼粉的含量低到一个下限的时候,延期药就会瞎火。

根据生产经验,本次试验制备的低燃速硼系延期药,其基础配方为: $w(\text{硼}):w(\text{铬酸钼})=3.5:96.5$ 。根据上述配方准确称量总质量为 1 000 g 的原材料,放入八角鼓药罐中,按球料比 3:1 的原则加入直径为 7.9、11 mm 的氧化铅球各 1 000 g,混合 48 h 后出药,搅拌吹干,然后外加 20 g 硝化棉造粒过筛,取 60 目以下 200 目以上延期药颗粒,最后把延期药颗粒送入 48 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内烘 36 h,出药后静置在 20~25 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温室内,晾 3 天,即可得到浅绿色的低燃速硼系延期药。

1.4 延期体的制作

将制得的延期药分 5 次等量定压压入不同材料和不同外径的管壳中,管壳长度为 25 mm,内径为 3.5 mm。

1.5 延期体测时装置

试验所用延期体测时装置的测试原理:将两个光电传感器获取信号的时间差近似为延期体的燃烧时间,具体测时装置见参考文献[6]。

1.6 延期精度的表征

试验所测得的延期时间为导爆管点燃延期体到延期体喷火结束的时间,用所测延期时间的标准差 S 、极差 R 和相对精度 γ 来表征雷管的延期精度。其中相对精度 γ 的计算公式参考文献[6]。

^{*} 收稿日期:2015-12-03

作者简介:昌盛禄(1980-),男,工程师,主要从事民爆器材与爆炸技术研究。E-mail:cfhangfeiyang8855@163.com

通信作者:陈世雄(1989-),男,工程师,主要从事民爆器材与爆炸技术研究。E-mail:csxiong_89@sina.com

2 试验结果与讨论

2.1 管体材料的影响

试验使用了外径为 7.5 mm 且内径为3.5 mm 的铝管、黄铜管和有机玻璃管 3 种管体材料来研究管体材料对延期体燃速和精度的影响。热力学定义:一般温度下导热系数小于 0.172 W/(m·K) 的材料叫做热绝缘材料。由此可见,铝和黄铜属于导热材料,有机玻璃则属于热绝缘材料。此次试验固定压药压力,5 装 5 压,延期管长度均为 25 mm,每种管体压 50 发延期体,用延期体测时装置测得的试验结果如表 1。

观察表 1 可以发现,延期药的燃烧速度随着管体材料导热系数的增加而变快;从热绝缘材料到导热材料,延期药的燃烧速度跳跃式增加;延期药在金属管壳中燃烧时的延期精度明显高于在有机材料中燃烧时的延期精度。

对于正在燃烧的药柱,在其燃烧波阵面附近可以分成 3 个区域,即预热区、反应区和燃烧产物区。硼系延期药属于微气体延期药,它在燃烧的过程中会产生气体,同时放出大量的热,使整个反应体系保持较高的温度;因此,如果使用导热良好的金属材料做管体的话,靠近反应区的管体层会在瞬间获得大量热量,使温度骤然升高,同时把获得的热量顺着管体向径向散失和向前端传播,预热未燃延期药。延期药燃烧时反应区的能量进入未燃药剂的途径主要有 3 种,即热辐射、热传导和燃烧气体产物的扩散作用。由于药剂的导热系数远低于金属材料,所以在燃烧时间较长的情况下,导热系数高的金属管体材料会比导热系数较低的药剂更快地将热量传递到未燃药剂,从而通过管体对未燃的材料进行预热,进而缩短了前方药剂的升温时间,同时使未反应药剂保持在高温状态,降低了反应所需的能量,由此加快了整个反应体系的行进速度。因此,用导热系数高的材料做延期体管体会大幅提高延期药的燃速。

从延期药燃烧后管体的瞬间温度来看,导热系数较高的铝管和黄铜管外部的瞬间温度高达 300 ℃,然而有机玻璃管外部的瞬间温度才 40 ℃左右。

由此看来,在低燃速硼系延期药燃烧的过程中,导热系数较大的材料对延期药剂的预热作用比较明显,而热绝缘材料对延期药剂的预热效果微乎其微。所以使用导热系数较低的材料做管体的延期体,燃速较慢,若是热绝缘材料,燃速更是大幅降低。

分析表 1 可以发现,有机玻璃的燃速较低,延时精度也最低,这表明其燃烧过程并不稳定。燃烧结束后,通过透明的有机玻璃可以发现,有机玻璃内壁前段呈现出一圈一圈的痕迹,这是延期药的燃烧一层一层向前推进留下的痕迹;有机玻璃内壁后段在轴向上有明显向内凸起的点,这是因为反应区温度太高将玻璃软化而形成的。这些凸点将会改变延期药燃烧产生的气体流速,从而造成有机玻璃后段的气体压力忽大忽小,导致延期药的燃烧不稳定,进而使延期时间标准差和极差变大,引起精度降低。综上,在低燃速硼系延期产品的制造过程中,应该选择一种熔点较高且性能适中的热绝缘材料做延期体管体,才能既有效地降低延期药的燃速,又保证燃烧的稳定性,从而制得高精度的低燃速硼系延期体。

2.2 管体厚度的影响

由于热绝缘材料的预热效果不明显,所以选用热效应比较明显的铝管。内径为 3.5 mm,外径分别为 7.5、11.5、15.5 mm 和 19.5 mm 的 4 种铝管,壁厚分别为 2、4、6、8 mm,管壳长度统一为 25 mm,固定压药压力,5 装 5 压,每种规格的管体压 50 发延期体,用延期体测时装置测得的试验结果如表 2。

从表 2 可以得知,管体壁厚对延期药的燃速和延期体精度影响十分明显,在材料、药芯直径等条件相同的情况下,随着铝管管壁厚度的增加,燃速逐渐降低;延时精度却不是随壁厚增加而一致性变化,延期体精度随着壁厚的增加先升高,然后降低,在壁厚为 4 mm 时的延期精度最高。

为了研究管体壁厚对燃速的具体影响,对表2中燃速和管体壁厚作曲线拟合,如图1。图1中 R^2 为回归平方和与总离差平方和的比值,这一比值越大,表示模型越精确,回归效果越显著。从数值上看, R^2 介于0~1之间,越接近1,拟合效果越好,一

表 1 管体材料对延期药的影响

Tab. 1 Effects of package materials on delay compositions

材料	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	平均延时/ s	燃速/ (mm·s ⁻¹)	延时标准差/ s	延时极差/ s	相对精度/ %
有机玻璃	<0.1	8.834	2.83	0.501	1.032	5.84
黄铜	109	6.657	3.76	0.134	0.385	2.89
铸铝	163	6.410	3.90	0.092	0.337	2.63

表 2 管体壁厚对延期药的影响

Tab. 2 Effects of wall thickness on delay compositions

管体壁厚/mm	平均延时/s	燃速/(mm·s ⁻¹)	延时标准差/s	延时极差/s	相对精度/%
2	6.410	3.90	0.092	0.337	2.63
4	6.649	3.76	0.105	0.345	2.59
6	9.921	2.52	0.287	0.852	4.30
8	18.382	1.36	0.556	1.964	5.34

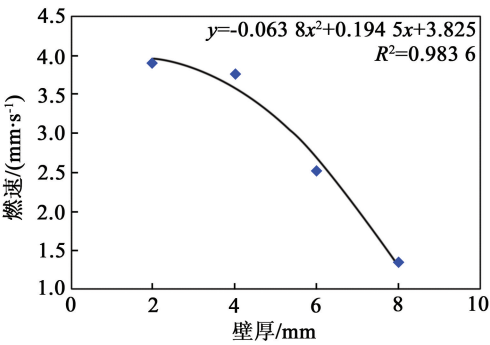


图 1 延期药燃速随管体壁厚的变化趋势

Fig. 1 Burning rate change of delay compositions against the wall thickness

般认为超过 0.8 的模型拟合优度比较高。本次曲线的 R^2 值为 0.983 6,说明拟合曲线与真实情况非常接近。从曲线中可以看出:1)当管体壁厚大于 2 mm 时,延期药燃速随着壁厚的增加而降低;2)对曲线方程求导可得: $y' = -0.1276x + 0.1945$,当 $x > 2$ 时, y' 随着 x 的增大而负值越来越大,这意味着当管体壁厚大于 2 mm 时,随着壁厚的增加,延期药燃速下降越来越快;3)随着 x 的增大,曲线与 x 轴必然有交点,这个交点对应的管体厚度就是延期体瞎火时的管体厚度,这与实际燃烧情况也是相符的。这些现象可以从以下几个方面加以解释。

管体壁厚对延期药燃速的影响主要体现在热传导和热散失等。试验采用的是导热良好的管体材料,所以在延期药燃烧的过程中,热传导和热散失会比较明显。显然,当延期体内药芯密度一致时,单位长度内的延期药质量相当,延期药燃烧放出的热量就一定,当铝管壁厚增加时,管体吸收的热量就增多,热散失增大,导致反应区附近的温度降低;且单位长度的管体温度升高程度减小,进而热传导变慢。于是在热散失增大和热传导变慢的情况下,管体对未燃药剂的预热效果降低,因此,延期药燃速随着管体壁厚增加而降低。同理,管体壁厚越大,当管体增加相同厚度时,管体所增加的体积越大,管体增加的质量也越大,这会导致管体吸收热量的速度加快,且吸收的热量增多,热散失速度加快,热传导速度更慢;因此,预热作用快速降低,导致燃速下降越来越

快。当管体厚度增加到一定程度时,燃烧所产生的能量在经过热散失和热传导后,不足以达到下一级延期药反应所需的活化能,于是燃烧反应停止,导致延期体瞎火。

综上,当延期体管体为良好导热材料时,管体越厚,热散失越大,热传导越慢,对未燃药剂的预热效果就越弱,从而使延期药燃速降低。考虑到管体壁厚增加到一定程度时,延期体会瞎火,因此,在制造低燃速的硼系延期药时管体不是越厚越好,而应选择适当的管体壁厚。

3 结论

- 1) 由于预热效应的存在,延期药的燃烧速度随着管体材料导热系数的增加而变快,从热绝缘材料到导热材料,延期药的燃烧速度跳跃式增加。
- 2) 在热散失和热传导的双重作用下,延期药燃速随着管体壁厚的增加而降低,但是相对精度却不是随壁厚的增加发生一致性变化,延期体精度随着壁厚的增加先升高然后降低,在壁厚为 4 mm 时延期精度最高。
- 3) 若要制得低燃速的硼系延期体,可以选用性能稳定的热绝缘材料做延期体管体,或者壁厚较大且导热良好的材料做管体。

参 考 文 献

[1] 陈世雄. 雷管用超细毫秒延时药实验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学,2014.
CHEN S X. Experimental study on detonator with superfine millisecond delay composition[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2014.

[2] 徐大伟,王大海,陈志刚. 硼系延期药特性及应用[J]. 火工品,2005(3):10-13.
XU D W, WANG D H, CHEN Z G. Characteristic and application of boron type delay charge[J]. Initiators & Pyrotechnics,2005(3):10-13.

[3] 成春莲,刘玉存,李尚杰,等. 硼/铬酸钡延期药的燃速与数值分析[J]. 爆破,2013,30(2):167-170.
CHENG C L, LIU Y C, LI S J, et al. Numerical simulation and burning rate of boron/barium chromate (B/BaCrO₄) deley powder[J]. Blasting,2013,30(2):167-170.

- [7] 何中其, 彭金华, 刘大斌, 等. 导爆管传爆性能设计与参数分析[J]. 爆破器材, 2010, 39(3): 1-3.
HE Z Q, PENG J H, LIU D B, et al. Analysis and design of detonation parameters in nonel tube [J]. Explosive Materials, 2010, 39(3): 1-3.
- [8] 杨祖一. 毫秒延期雷管(三)[J]. 爆破器材, 2000, 29(1): 21-25.
YANG Z Y. Millisecond delay detonator (three) [J]. Explosive Materials, 2000, 29(1): 21-25.
- [9] 周富强, 韩体飞, 侯寒冬, 等. 工业电雷管延期时间分段测试时系统的研究[J]. 火工品, 2012(3): 17-20.

ZHOU F Q, HAN T F, HOU H D, et al. Research on sectionalized time test system for the delay time of commercial electric detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(3): 17-20.

- [10] 胡先云, 马志钢, 林怀荣, 等. 高氯酸钾粒度对电引火药头发火时间影响[J]. 淮南职业技术学院学报, 2014, 14(4): 9-12.
HU X Y, MA Z G, LIN H R, et al. The influence of fuse head ignition time by potassium perchlorate granularity [J]. Journal of Huainan Vocational & Technical College, 2014, 14(4): 9-12.

Influence of Electric Fusehead Ignition and Nonel Ignition on Delay Time

ZHANG Yan, LIU Feng, HAN Tifei, ZHU Shuai, ZHANG Han, CHEN Lei

School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

[ABSTRACT] The ignition method is an important factor to determine the delay time and the precision of the millisecond delay detonator. In this paper, two kinds of delay powder were used on the base of red lead-silicon millisecond delay detonator in the parallel experiments. The deference of the gauge lengths was controlled as a constant for all the delay elements used in experimental delay detonators. These detonators were then subjected to electric fusehead ignition or nonel ignition to measure the corresponding ignition delay times. The standard deviations were calculated accordingly. The results show that parallel experiments agree well with each other. The delay time difference under two ignition methods was observed for the same delay powder. A longer delay time can be observed for detonator subjected electric fusehead ignition than that subjected to nonel ignition when the gauge length of delay element is short. However, this observation will be reversed when the gauge length of delay element increased beyond to a certain value. Within the experimental gauge length range, the delay precision of detonator subjected to nonel ignition is normally higher and much more stable than that subjected to electric ignition.

[KEYWORDS] blasting equipment; ignition; delay time; precision; ignition time; combustion chamber pressure

(上接第 34 页)

- [4] 李尚杰. 高精度硼/铬酸钡延期药配方及制备工艺研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [5] 张建富, 胡延臣. 延期药粒度级配对延期精度的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(1): 84-88.
ZHANG J F, HU Y C. Effect of particle gradation of delay composition on delay precision[J]. Chinese Journal

of Energetic Materials, 2014, 22(1): 84-88.

- [6] 聂祥进, 陈世雄, 彭文林, 等. 卡腰对导爆管雷管延期精度的影响[J]. 爆破器材, 2016, 45(4): 45-48.
NIE X J, CHEN S X, PENG W L, et al. Influence of middle chucking on the delay accuracy of nonel detonator [J]. Explosive Materials, 2016, 45(4): 45-48.

Effects of Package on Boron Type Delay Charge with Low Burning Rate

CHANG Shenglu, CHEN Shixiong, PENG Wenlin, NIE Xiangjin, DU Weilan

Guizhou Jiulian Industrial Explosive Materials Development Co., Ltd. (Guizhou Guiyang, 550000)

[ABSTRACT] Several pipe materials having various wall thickness were used in the fabrication of boron type delay charges with low burning rate to explore the feasibility of producing high second delay detonator. Experiment results show that, due to the existence of pre-heating, the burning rate of the delay compositions increased with the increased thermal conductivity of the package, especially an abrupt increase when materials nature was changed from heat insulator to heat conductor. For the same type of heat conducting pipe material, the burning rate of the delay compositions will decrease with increased wall thickness due to the effect of heat dissipation and heat conduction. The accuracy of delay composition was observed as increasing with the increased wall thickness to the apex, which corresponds to a wall thickness of 4 mm, and then followed by decreasing.

[KEYWORDS] boron type delay charge; burning rate; delay collar; accuracy