

文章编号: 1006-9941(2010)01-0068-04

硼/氧化铜延期药的燃速与数值模拟

成一, 惠云龙, 李艳春, 闫石

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 研究了硼/氧化铜延期药在环境温度为 $-50 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$, 硼含量为 $8.3\% \sim 20\%$ 范围内燃速的变化规律。结果表明: 当硼含量为 8.3% 时, 硼/氧化铜延期药不能完全燃烧, 出现暗火; 在硼含量为 $11\% \sim 20\%$ 范围内, 随着硼含量的增加, 随硼含量增加, 硼/氧化铜延期药的燃速增加。但是在硼含量为 $14\% \sim 18\%$ 的区间, 硼/氧化铜延期药的燃速呈现出平台形式; 环境温度升高, 硼/氧化铜延期药的燃速也小幅增加。将硼/氧化铜延期药燃速的实验数据采用最小二乘法进行数值模拟, 提出了硼/氧化铜延期药的燃速公式。

关键词: 军事化学与烟火技术; 延期药; 燃速; 硼/氧化铜延期药; 数值拟合

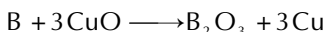
中图分类号: TJ5; TJ410.3⁴

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.017

1 引言

延期药的主要功能是在指定的时间完成各种武器弹药系统中的传火或传爆^[1-3]。随着现代武器弹药技术的发展, 对延期药的燃烧可靠性和延期精度提出了更加严格的要求^[4-8]。硼/氧化铜延期药由于其优良的燃烧性能而引起国内外学者的关注。硼/氧化铜延期药是硼系延期药的一种, 其燃速稍慢, 适用于 $100 \sim 500 \text{ ms}$ 的延期范围。硼/氧化铜延期药的燃速随 B 含量的增加而增加^[9]。硼/氧化铜延期药可能有如下反应:



日本学者 Okitsu Toshihiro 和 Kobayashi Takeshi^[10] 使用硼/氧化铜作为非爆炸性延期药。赵文虎^[11] 等研究了毫秒级 Si-CuO-Cu₂O 延期药, 研究了其配方设计, 原材料粒度, 粘合剂含量等对其燃速的影响。赵文虎^[12] 研究了毫秒级 Si-CuO-PbO₂ 延期药的燃烧特性。李艳春^[13] 等使用 TG/DSC 研究了硼/氧化铜延期药的热分解过程, 并计算了动力学参数。

由于配比是影响延期药燃速的主要因素之一, 而延期药的温度系数是延期药应用中的重要参数。本实验研究了配比和环境温度对硼/氧化铜延期药燃速的影响, 并通过数值拟合提出了经验燃速公式。

收稿日期: 2009-08-13; 修回日期: 2009-10-27

作者简介: 成一(1952-), 男, 研究员, 从事点火与起爆研究。

e-mail: chengyi20@yahoo.com.cn

2 实验

2.1 原料及混药

硼粉(CP, 辽宁省营口市精细化工厂), 纯度 95% , 粒度小于 $11 \mu\text{m}$; 氧化铜(AR, 上海振欣试剂厂), 纯度 95% , 粒度小于 $5 \mu\text{m}$ 。混药方法采用球磨湿混法。将硼粉和氧化铜按一定比例装入一个塑料瓶里, 加入一定量的蒸馏水和小钢球进行混药。混药约 30 min 后倒入一个培养皿慢慢晾干, 然后用 30 目的筛网造粒, 烘干。选用了 5 种配比的硼/氧化铜延期药(见表 1)。

表 1 硼/氧化铜延期药的配比

Table 1 The proportion of B/CuO delay compositions

No.	boron content/%	B/CuO/(g/g)
1#	8.3	1.7/18.3
2#	11	2.2/17.8
3#	14	2.8/17.2
4#	17	3.4/16.6
5#	20	4/16

2.2 压药

在延期管(内径 3.5 mm , 外径 6.5 mm , 高 17 mm) 中先装 60 mg 点火药(Si/Pb₃O₄), 再装 150 mg 硼/氧化铜延期药, 一次压药; 再装 150 mg 硼/氧化铜延期药, 接着加入 60 mg 点火药(Si/Pb₃O₄), 然后进行第二次压药。压药的壓力为 312.5 MPa 。

2.3 延期药燃速测试

实验装置图如图 1 所示。将延期管放入保温装置

中,利用烘箱或低温箱分别对放入延期体的保温装置进行升温或者降温,保温装置在设定温度下保温2 h。用点火头点燃延期药,利用光-光靶法来测定延期时间。光-光靶法的原理是分别记录开始点火时间和燃烧结束的时间。点火时光信号会被光电传感器所感知,利用计算机记录下点火时间,燃烧结束时记下另一个时间,两段时间之差就是延期药的燃烧时间。用延期药的药柱长度除以燃烧时间就得到了该延期药的燃烧速度。点火头的燃烧时间可以被忽略不计,因为其燃烧时间很短而且其一致性比较好。在延期药燃速计算过程中,点火药的平均燃烧时间和药柱长度已被减去。

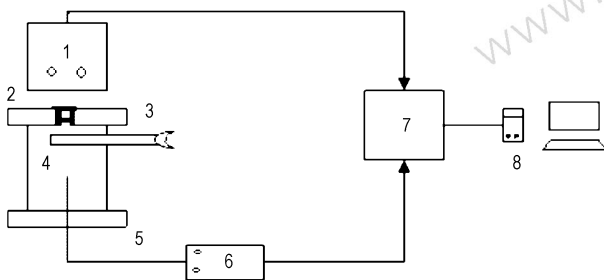


图1 延期时间的测试装置

1—1[#]光电管, 2—延期管, 3—防护装置, 4—保温装置, 5—光纤, 6—2[#]光电管, 7—采集卡, 8—计算机

Fig.1 The experimental set-up for testing delay time

1—1[#] photoelectric tube, 2—delay tube, 3—defend device, 4—thermal insulation device, 5—optical fiber, 6—2[#] photoelectric tube, 7—grabber, 8—computer

表2 硼/氧化铜延期药的燃速与极差

Table 2 The burning rates and extreme differences of B/CuO delay compositions

T/°C	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
-50	misfire	0.65(0.061)	1.04(0.081)	1.11(0.180)	1.26(0.058)
-10	misfire	0.69(0.079)	1.08(0.120)	1.10(0.067)	1.34(0.091)
25	misfire	0.75(0.040)	1.16(0.070)	1.21(0.070)	1.46(0.090)
50	misfire	0.81(0.073)	1.25(0.037)	1.29(0.091)	1.57(0.130)
70	misfire	0.83(0.075)	1.29(0.063)	1.30(0.012)	1.58(0.046)

Note: The values in the brackets are the extreme differences of burning rates, the unit of burning rate is $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.3 硼/氧化铜延期药的燃速与数值模拟

仅仅改变温度,保持其它实验条件不变,从而导致系数 A, B, C, D 的变化,因此可以认为系数 A, B, C, D 仅仅是一个关于环境温度 T 的函数。研究表明,温度 T 和系数之间的关系也可以用一个三次项函数来描述。因此,提出如下经验燃速公式:

3 结果与讨论

3.1 硼/氧化铜延期药的实验结果

分别测试 1[#]~5[#]硼/氧化铜延期药的药柱长度及其在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的延期时间,计算它们的燃速。每个实验点的数据为 4~6 发。将 1[#]~5[#]硼/氧化铜延期药在不同温度时的燃速数据列于表 2。根据表 2 的数据可以绘制不同温度时硼/氧化铜延期药的燃速与硼含量关系的曲线(图 2)。

从表 2 的实验数据中可以发现当硼/氧化铜延期药中硼含量小于 8.3% (1[#]) 时,硼/氧化铜延期药不能完全燃烧。从图 2 可以发现硼/氧化铜延期药中随着硼含量增加,燃速变快。

3.2 硼/氧化铜延期药在同一温度不同硼含量时的燃速拟合

为了描述硼/氧化铜延期药的燃速与硼含量之间的关系,对表 2 中的数据进行直线、指数、对数、二次项和三次项函数的拟合。例如,对 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的燃速数据分别进行直线和三次项函数拟合,拟合结果见图 3。

从拟合结果可以发现直线拟合的相关系数为 0.9015 而三次项函数拟合的相关系数为 1,因此,硼/氧化铜延期药的燃速与硼含量之间的关系可以用一个三次项函数来表达:

$$u = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad (1)$$

式中, u 为延期药的燃速, x 为硼含量, A, B, C, D 为燃速的相关系数。

$$u = (A_1 y^3 - A_2 y^2 - A_3 y + A_4) x^3 - (B_1 y^3 - B_2 y^2 - B_3 y + B_4) x^2 + (C_1 y^3 - C_2 y^2 - C_3 y + C_4) x - (D_1 y^3 - D_2 y^2 - D_3 y + D_4) \quad (2)$$

式中, u 为燃速, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; x 为硼含量,质量分数%; y 为温度除以 100,温度单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

采用最小二乘法对表 2 中实验数据点进行数值拟合得到的参数值为: $A_1 = 5830.6, A_2 = 1791.8, A_3 = 91.695, A_4 = 3608.9$; $B_1 = 2697.1, B_2 = 768.81, B_3 = 57.708, B_4 = 1719.2$; $C_1 = 402.29, C_2 = 104.77, C_3 = 9.0963, C_4 = 272.91$; $D_1 = 19.676, D_2 = 4.6842, D_3 = 0.6396, D_4 = 12.316$ 。最小二乘法的拟合度为 0.9997。将实验数据和拟合计算的结果列成表 3, 并绘制成图 4。

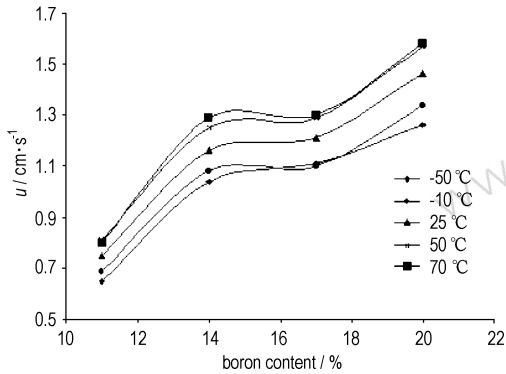
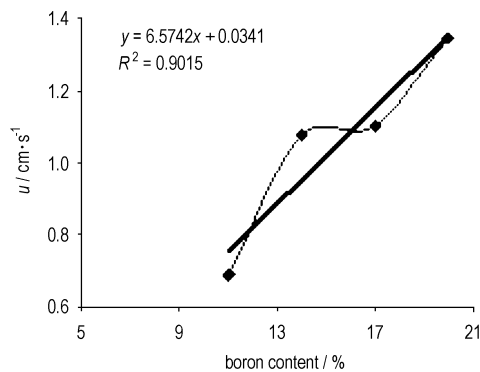
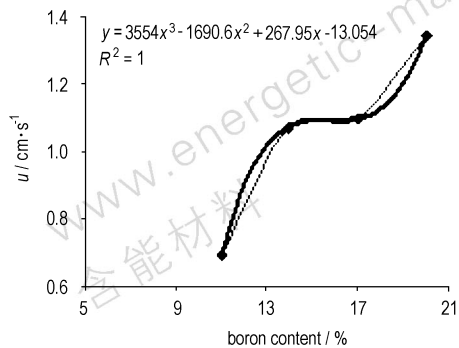


图 2 硼/氧化铜延期药的燃速与硼含量的关系
Fig. 2 Curves of boron content vs burning rate of B/CuO delay compositions



a. linear fitting curves



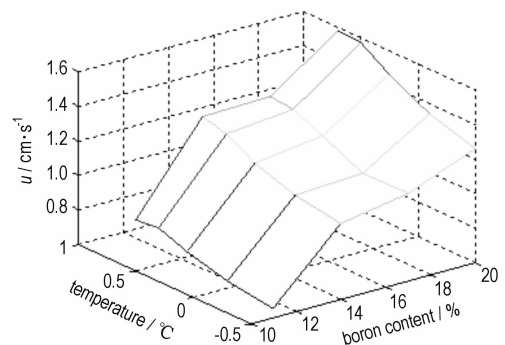
b. cubic function fitting curves

图 3 -10 °C 下硼/氧化铜延期药的燃速与硼含量关系的拟合
Fig. 3 The fitting curves of boron content vs burning rate of B/CuO at -10 °C

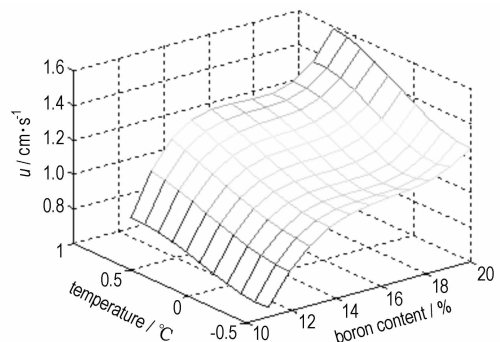
表 3 经验燃速公式的拟合值

Table 3 The simulation data of burning rate calculated by empirical equation

temperature / °C	boron content / %	burning rate / cm · s ⁻¹	
		test data	simulation data
-50	11	0.65	0.65
-10	11	0.69	0.69
25	11	0.75	0.76
50	11	0.81	0.80
70	11	0.80	0.80
-50	14	1.04	1.04
-10	14	1.08	1.08
25	14	1.16	1.17
50	14	1.25	1.24
70	14	1.29	1.29
-50	17	1.11	1.11
-10	17	1.10	1.10
25	17	1.21	1.21
50	17	1.29	1.29
70	17	1.30	1.30
-50	2	1.26	1.26
-10	2	1.34	1.33
25	2	1.46	1.47
50	2	1.57	1.56
70	2	1.58	1.58



a. the test surface



b. simulated surface

图 4 实验图和经验燃速公式曲面
Fig. 4 The test surface and simulated surface of burning rate calculated by empirical equation

从表3和图4可以看出,在温度为 $-50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,硼含量为11%~20%的范围内,实验的燃速数据与根据经验燃速公式的计算值一致。因此,使用该经验公式预估在此范围内的硼/氧化铜延期药的燃速,可以为硼/氧化铜延期药的研究和应用提供理论指导。

4 结 论

(1) 利用数值拟合对实验数据处理得到的经验公式,较好地反映了硼/氧化铜延期药的燃烧规律。

(2) 提出的环境温度-硼含量燃速公式可以比较精确地计算在环境温度为 $-50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,硼含量为11%~20%范围内硼/氧化铜延期药的燃速,从而可以根据不同的环境温度和燃速要求来设计硼/氧化铜延期的配方。这个方法也可以在其它延期药配方设计中应用。

参考文献:

- [1] 吴幼成,宋敬埔. 延期药技术综述[J]. 爆破器材,2000,29(2): 23-27.
WU You-cheng, SONG Jing-pu. Technology of delay compositions: A review[J]. *Explosive Materials*,2000,29(2): 23-27.
- [2] 黄吉仙. 硼系延期药燃烧速度的影响因素的研究[J]. 火工品,2006(4): 31-33.
HUANG Ji-xian. Research on the factors influencing on burning rate of boron type delay compositions[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2006(4): 31-33.
- [3] 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): 11-14.
XU Da-wei, WANG Da-hai, CHEN Zhi-gang. Characteristic and application of boron type delay charge[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2005(3): 11-14.
- [4] 张志魁. 硼系延期药燃速与配比的关系的探讨[J]. 火工品,2004(4): 38-41.
ZHANG Zhi-kui. Discuss on the relation between the burning time and the formulation of boron type delay composition[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2004(4): 38-41.
- [5] Jakubko J, Eva Cerno-kovd. Differential thermal analysis of the mixtures of silicon and red lead[J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1997,50: 511-515.
- [6] Whelan D J, Maksacheff M, De Yong L. The kinetics and thermochemistry of the pyrotechnic composition BLC-190-boron: Red lead oxide (10 : 90) at its ignition temperature [R]. ADA178561,1986.
- [7] 许俊峰,彭加斌,王秀芝,等. 粘合剂对钨系延期药燃速的影响[J]. 含能材料,2007,15(2): 144-147.
XU Jun-feng, PENG Jia-bin, WANG Xiu-zhi, et al. Effects of the binding agents on the burning rate of the tungsten delay composition [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007,15(2): 144-147.
- [8] 李慧琴,成一,姜显光,等. 湿法压药对B/BaCrO₄延期药延期精度的影响[J]. 含能材料,2006,14(1): 42-44.
LI Hui-qin, CHENG Yi, JIANG Xian-guang, et al. Delay-time precision of B/BaCrO₄ delay composition by press charge in wet state [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2006,14(1): 42-44.
- [9] 刘建斌. 硼系延期药的研究[D]. 南京: 南京理工大学,2003.
- [10] Okitsu Toshihiro, Kobayashi Takeshi. Nonexplosive delay blasting igniter: JP19960230509 19960830[P]. 1997-05-13.
- [11] 赵文虎,王端,张丽萍,等. 毫秒级Si-CuO-Cu₂O延期药研究[J]. 火工品,2003(3): 27-31.
ZHAO Wen-hu, WANG Duan, ZHANG Li-ping, et al. Study on millisecond Si-CuO-Cu₂O type delay composition[J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2003(3): 27-31.
- [12] 赵文虎. 毫秒级Si-CuO-PbO₂延期药的燃烧特性[J]. 火工品,2001(1): 25-29.
ZHAO Wen-hu. Millisecond Si-CuO-PbO₂ type delay composition [J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2001(1): 25-29.
- [13] 李艳春,惠云龙,成一. 硼/氧化铜延期药的热分析动力学研究[J]. 火工品,2009(1): 22-24.
LI Yan-chun, HUI Yun-long, CHENG Yi. Study on thermokinetics analysis of B/CuO delay composition[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009(1): 22-24.

Numerical Simulation and Burning Rate of B/CuO Delay Compositions

CHENG Yi, HUI Yun-long, LI Yan-chun, YAN Shi

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

Abstract: The law of the burning rates of B/CuO delay compositions at ambient temperature from $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, and with the boron contents increasing from 8.3% to 20% were studied. Results show that when the boron content is 8.3%, the B/CuO delay compositions are misfired, and the burning rates increase with increasing of boron contents from 11% to 20%. When the boron contents are from 14% to 18%, the burning rates almost keep the same value. With the increasing of ambient temperature, the burning rate also has a little increase. Least square method was used to simulate the burning rates, and a burning rate formulation of B/CuO delay compositions was put forward.

Key words: military chemistry and technique of pyrotechnics; delay composition; burning rate; B/CuO delay composition; numerical simulation

CLC number: TJ5; TJ410.3+4

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.017