

文章编号: 1006-9941(2013)04-0517-05

绕丝可燃药筒吸湿性及其对燃烧性能的影响

贾昊楠¹, 路桂娥^{1,2}, 陈明华^{1,2}, 安振涛¹, 江劲勇^{1,2}

(1. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003; 2. 军械技术研究所, 河北 石家庄 050000)

摘要: 为研究环境湿度对可燃药筒定容燃烧特性的影响, 用称重法研究了某绕丝型可燃药筒的吸湿特性, 对在不同环境湿度下吸湿饱和的药筒试样进行了密闭爆发器实验。结果表明, 绕丝可燃药筒具有较强吸湿能力, 且随相对湿度增加而增加。当相对湿度为 89.0% 时, 其平衡吸湿量为 2.89%。在装填密度为 $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 随相对湿度增加, 药筒燃速大幅降低, 燃烧结束时间由 2.40 ms 延长至 3.30 ms, 最大压力由 189.75 MPa 下降到 174.32 MPa; 火药力由 $756.62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降至 $649.33 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 余容由 $1.01 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升至 $1.30 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

关键词: 物理化学; 绕丝可燃药筒; 水分; 吸湿性; 燃烧性能; 密闭爆发器**中图分类号:** TJ55; O64**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.022

1 引言

绕丝可燃药筒是以一定厚度的绕丝药筒为基底, 在药筒外层用湿法纺丝工艺纺制的硝化棉丝进行编织包覆, 层间使用硝棉胶粘接制备而成的^[1]。该种药筒疏松多孔且富含亲水性纤维, 因此在运输和长贮过程中, 如果包装或保管不当, 就容易吸湿受潮, 影响武器系统的基本弹道性能, 并可能导致药筒在膛内燃尽性发生重大变化, 生成大量高温残渣, 这不仅会增大弹丸的运动阻力, 甚至会造成膛炸等事故^[2-4]。

随着大量可燃药筒的应用, 其燃烧性能也成为国内外重点研究的课题。国外研究主要从解决药筒力学性能和燃烧性能之间矛盾角度展开。Remaly^[5] 等将药筒制成夹层状, 并在层中添加粒状火药以提高药筒燃烧性能。Kestusis^[6] 等采用药筒外覆盖铝箔的方法提高药筒力学强度。Manning^[7] 研究了可燃药筒材料的孔隙率方面等结构数据, 并对孔隙率与药筒力学性能和燃烧完全性间的关系进行了探讨。国内研究主要集中于可燃药筒燃烧机理、药筒与主装药的匹配性等问题。徐文娟^[8-12] 等分析了药筒膛内燃气生成规律, 得到了可燃药筒基本能量示性参数和结构参数。李欣^[13] 研究了可燃药筒装药对弹丸初速或然误差的影响。李煜等^[14-16] 用含能增强纤维代替纸纤维, 以绕

丝药筒为基底, 制备了新型可燃药筒, 并测试了其定容燃烧性能。但是, 目前关于环境湿度影响可燃药筒燃烧性能的研究较少。

因此, 本工作以绕丝可燃药筒为研究对象, 人工模拟了常温条件下不同的环境湿度, 测试药筒吸湿特性; 结合传统的密闭爆发器实验, 研究了环境湿度对其燃烧性能参数的影响规律。

2 实验部分

2.1 原材料

绕丝可燃药筒, 845 厂; 2 号硝化棉, 255 厂。

2.2 样品制备

根据 GJB 5472.1 - 2005, 从筒体中部截取高约 50 mm 的圆环(厚度保持不变, 约为 2 mm), 再将其切成长为 (50 ± 1) mm, 宽为 (15 ± 1) mm 的长方薄片。

2.3 仪器

采用 DU-65 改进型油浴烘箱对试样进行烘干, 并采用电子式湿度传感器法, 利用 HDS405 高低温恒定湿热实验箱对试样进行加湿处理。燃烧性能实验选择了本体容积为 102 mL 的密闭爆发器。主要处理程序为 Signal View。

2.4 性能测试

2.4.1 吸湿性实验

首先将试样放在敞口的称量瓶内, 在 55 °C 烘箱内放置 24 h 后达到恒重, 之后置于湿热实验箱内^[17]。环境条件为常温 25 °C, 相对湿度分别为 $(37.0 \pm 3)\%$ 、

收稿日期: 2012-06-11; 修回日期: 2012-08-09

作者简介: 贾昊楠 (1987 -), 男, 博士, 主要从事军事化学安全技术方向研究。e-mail: tyx124934@sina.com

(64.5 ± 3)%、(71.0 ± 3)%、(80.2 ± 4)% 和 (89.0 ± 4)%, 并分别用 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#] 表示。每个湿度条件下实验作为一组, 每组五发。

每两个小时称量一次受潮的可燃药筒试样质量, 监测其质量变化, 至达到恒重为止, 然后密封待用。一般认为前后两次质量变化率在 0.01% 范围内时, 试样达到恒重。此时, 水分均匀分布在药筒试样中, 进而排除了因吸湿不均匀而影响药筒燃烧性能的可能。根据试样的质量变化, 可以按(1)式计算可燃药筒的吸湿量。

$$Q_x = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, Q_x 为某时刻可燃药筒吸湿量, %; W_1 为试样烘干恒重后质量, g; W_2 为试样加湿后质量, g。

2.4.2 密闭爆发器实验

实验测试室温 20 °C, 点火压力 10 MPa。测定火药力和余容时, 装填密度分别为 $\Delta_1 = 0.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $\Delta_2 = 0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。测定药筒其他燃烧性能参数时, 装填密度选取 $\Delta_2 = 0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。每组以 5 发数据平均值计算。

3 实验结果与分析

3.1 可燃药筒吸湿性

将经干燥达到失水平衡的药筒试样置于不同湿度环境中, 其瞬态吸湿量 Q_x 与时间 t 的关系如图 1 所示。通过图 1 可以得到吸湿初始 0.5 h 内的平均吸湿速率以及平衡吸湿量, 其结果见表 1。从表 1 可以看出, 经干燥的绕丝可燃药筒在潮湿环境中会快速吸收水分, 并且可以迅速达到吸湿平衡状态, 且环境相对湿度越高, 绕丝药筒平衡吸湿量就越大。常温 25 °C 时, 药筒试样在低湿度条件下平衡吸湿量仅为 0.64%, 而在较高湿度条件下平衡吸湿量为 2.89%。随着环境湿度的增大, 初始平均吸湿速率也随之增大, 由 0.88% 上升到 4.29%。从图 1 可以看出, 在较低环境湿度下, 绕丝药筒试样大约需要 15 h 达到恒重, 而在较高环境湿度下只需要 8 h。说明增大环境湿度不仅能增加药筒的平衡吸湿量, 同时还能增加绕丝药筒的吸湿速率。

3.2 湿度对可燃药筒的燃烧性能影响

3.2.1 $p-t$ 曲线及燃烧结束时间

由于装填密度越高, 可燃药筒燃烧越接近真实情况, 所以根据实验压力-时间数据, 取 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#] 进行比较, 作了装填密度为 $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 $p-t$ 曲线, 如图 2 所示。

假设实验压力达到 10 MPa 时, 点火药燃烧完全, 可燃药筒被点燃并开始燃烧, 且压力达到最大值 p_m 时药筒已完全燃烧, 则药筒的燃烧结束时间 t_k 为从 10 MPa 到最大压力 p_m 的时间。两种装填密度下燃烧最大压力值以及燃烧结束时间列于表 2。 p_{m1} 与 p_{m2} 分别为在装填密度为 $0.12, 0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 下测得的最大压力扣除点火压力并经过热损失修正后的数值。

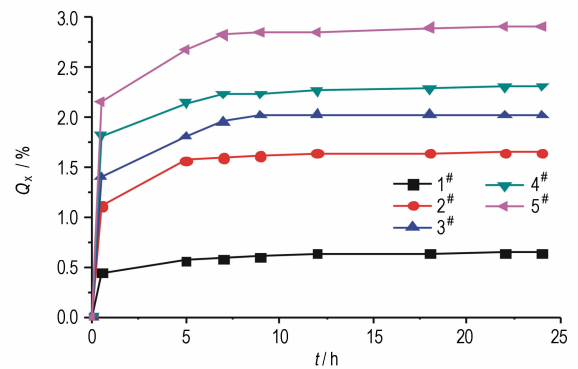


图 1 绕丝可燃药筒在 25 °C、不同相对湿度下的吸湿曲线
Fig. 1 Hygroscopicity curves of winding CCC samples at 25 °C and different RH

表 1 绕丝可燃药筒的吸湿结果

Table 1 Hygroscopicity of winding CCC

No.	initial moisture absorption rate/(%/h)	equilibrium moisture absorption content/%
1 [#]	0.88	0.64
2 [#]	2.24	1.84
3 [#]	2.80	2.01
4 [#]	3.64	2.32
5 [#]	4.29	2.89

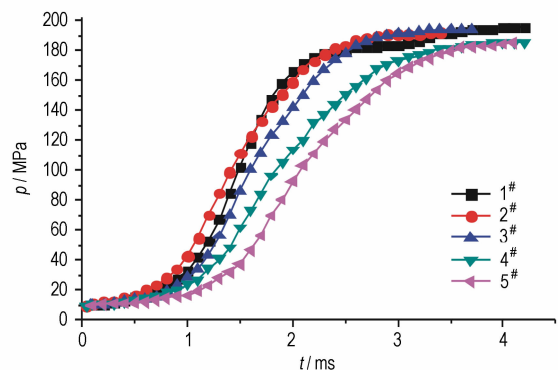


图 2 装填密度为 $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 下不同吸湿量绕丝可燃药筒 $p-t$ 曲线

Fig. 2 $p-t$ curves of winding CCC with different moisture contents under the loading density of $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

表2 不同相对湿度下绕丝可燃药筒的燃烧参数

Table 2 Combustion parameters of winding CCC under different relative humidities

No.	0.12 g · cm ⁻³		0.20 g · cm ⁻³	
	p_{m1} /MPa	t_{k1} /ms	p_{m2} /MPa	t_{k2} /ms
1 [#]	103.35	3.88	189.75	2.40
2 [#]	102.81	5.16	188.08	2.74
3 [#]	96.81	5.20	180.13	2.80
4 [#]	94.59	5.24	175.37	3.02
5 [#]	92.27	5.84	174.32	3.30

从图2和表2可以看出,绕丝药筒的燃烧最大压力 p_m 随湿度的增加呈减小的趋势,而燃烧结束时间 t_k 则略有延长。装填密度为0.12 g · cm⁻³时, p_m 由103.35 MPa下降至92.27 MPa, t_k 由3.88 ms延长至5.84 ms;装填密度为0.20 g · cm⁻³时, p_m 由189.75 MPa下降至174.32 MPa, t_k 由2.40 ms延长至3.30 ms。这是由于水分作为一种不含能成分,通过蒸发吸热降低了药筒的总能量,虽然能够产生一定量水蒸气,但其增加的量远小于水蒸发消耗能量所带来的热损失,所以最大压力下降了,同时延缓了药筒燃烧过程,增长了燃烧结束时间。

3.2.2 火药力及余容

不同吸湿量可燃药筒密闭爆发器实验测试计算的火药力 f 、余容 α 见表3。表3所示火药力随着湿度增加而降低,余容则随之增加。这是由于大量水蒸气增加了总气体摩尔数,增加了体系余容;而火药力的大小与爆温和比容的乘积有关,虽然吸湿量大的药筒试样比容升高,但由于总能量下降的比较明显,爆温降低,所以火药力也随之降低。由表3可以看出,2[#]、3[#]、4[#]绕丝可燃药筒的各项参数变化并不明显,结合绕丝药筒吸湿规律来看,这可能是由于在高湿度条件下试样吸湿量变化不大,因而药筒燃烧性能参数变化不显著。

3.2.3 燃速系数及燃速压力指数

通过Signal View软件,得到不同湿度条件下绕丝可燃药筒试样在装填密度为0.20 g · cm⁻³下的 u 、 p 试验数据,其 u - p 曲线,如图3所示。燃速系数 u_1 、燃速压力指数 n 及相关系数 R 等参数列于表4中。

由图3可以看出,压力在10~60 MPa范围内, u - p 曲线基本上遵循 $u = u_1 p^n$ 的规律。根据 u - p 数据,求各点的对数值,得 $\ln u$ - $\ln p$ 曲线,对该曲线进行线性拟合,得到绕丝药筒的燃速系数 u_1 和压力指数 n ,列于表4中。

如图3所示,吸湿量较大的试样燃烧过程较慢,在相同压力下燃速均较小,说明环境湿度对绕丝药筒燃速有着较大的影响,湿度增加,药筒燃速则明显降低。

如表4所示,在可燃药筒燃烧初期,燃速系数 u_1 随着环境湿度的增加而减小,压力指数 n 随环境湿度的增加而增加,两者变化不相同,说明前期药筒燃烧速度受湿度的影响是复杂的。

表3 绕丝可燃药筒实测火药力和余容

Table 3 Impetus and covolume of winding CCC

No.	f /kJ · kg ⁻¹	α /L · kg ⁻¹
1 [#]	756.62	1.01
2 [#]	701.77	1.11
3 [#]	698.23	1.12
4 [#]	682.65	1.12
5 [#]	649.33	1.30

Note: f is impetus, α is covolume.

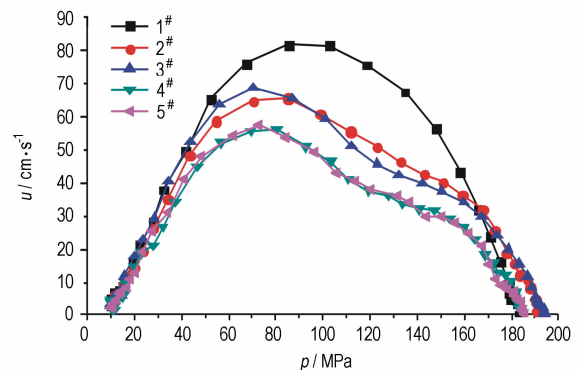
图3 不同吸湿量绕丝药筒的 u - p 曲线Fig. 3 u - p curves of winding CCC with different moisture contents

表4 绕丝可燃药筒燃速系数、燃速压力指数及相关系数

Table 4 Burning rates, burning rate pressure exponents and correlation coefficients of winding CCC

No.	u_1 /cm · s ⁻¹	n	R
1 [#]	0.1314	1.5671	0.9937
2 [#]	0.1063	1.6359	0.9900
3 [#]	0.0909	1.7026	0.9871
4 [#]	0.0558	1.7792	0.9877
5 [#]	0.0536	1.8209	0.9892

一方面由于药筒孔隙里的水分不断蒸发吸热,减缓了药筒燃烧过程,降低了燃速;另一方面,水分的导热率比气体大很多,含湿可燃药筒的有效导热率总是大于同类干燥可燃药筒的导热率。反应产生的高温气

体沿自由水分迅速向未燃区域传播,孔隙率增大,对流传热作用越显著。在这一过程中,水的存在加速了热量的传递,在一定程度上提高了药筒的燃烧速度。但水分蒸发吸热是影响绕丝药筒燃速的主要因素,所以燃速整体呈下降的趋势。

3.2.4 动态活度曲线

绕丝药筒在不同湿度条件下的 $L-B$ 曲线如图 4 所示,其中相对压力 B 为压力与最大压力的比值,动态活性 L 可以综合反映药筒的燃气生成规律及燃速性能。表 5 列出了不同湿度条件下药筒试样活性最大值及对应的 B 值。

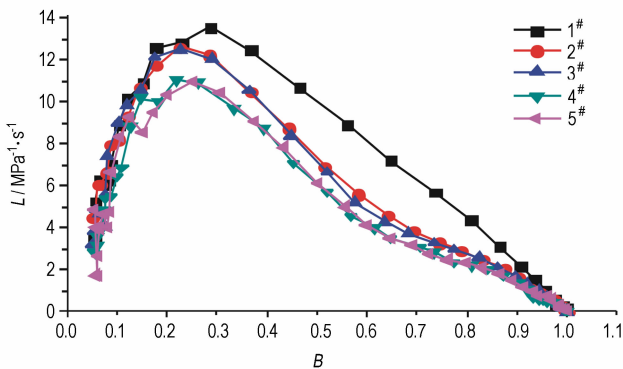


图 4 不同吸湿量绕丝药筒的 $L-B$ 曲线

Fig. 4 $L-B$ curves of winding CCC with different moisture contents

表 5 不同吸湿量绕丝药筒的 L_m, B_m 值

Table 5 L_m and B_m of winding CCC with different moisture contents

No.	$L_m / \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	B_m
1#	13.5611	0.2880
2#	12.6173	0.2266
3#	12.5060	0.2261
4#	11.0166	0.2202
5#	10.9466	0.2514

如图 4 所示,初始阶段各曲线基本能够重合,且 L 值随 B 从 0.1 到 0.3 变化时迅速增大, B 值在 0.22 ~ 0.28 时动态活性达到峰值,此时药筒燃烧最为剧烈,随后迅速下降,表现出不同湿度条件下药筒燃烧后期强燃烧渐减性,而吸湿量较大的试样燃气生成速率降低尤为显著。但吸湿量较低样品的 L 值在燃烧后期都比较大。这是由于水分蒸发吸热延缓了药筒燃烧进程,另外,大量水蒸气的存在,增大了密闭容器内的压力,抑制了气体产物的生成,降低了燃气生成速率。

从表 5 中可以看出,吸湿量较高时 L_m 约为 11,吸

湿量低时 L_m 可达到 13.5611,前者要小很多。可见绕丝可燃药筒的燃气生成速率最大值也随相对湿度升高而下降。

4 结论

研究了绕丝可燃药筒吸湿性及其对燃烧性能的影响。通过吸湿性实验,结果表明绕丝可燃药筒具有吸湿能力较强的特点,在潮湿环境中裸露 8 h 左右即可达到吸湿平衡状态,当相对湿度为 89.0% 时,其含水量可达到 2.89%。通过密闭爆发器定容燃烧实验,结果表明绕丝可燃药筒定容燃烧性能参数受含水量的影响变化较大。随含水量增加,在装填密度为 $0.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,药筒燃烧结束时间由 3.88 ms 延长至 5.84 ms,最大压力由 103.35 MPa 下降到 92.27 MPa; 在装填密度为 $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,药筒燃速降低,燃烧结束时间由 2.40 ms 延长至 3.30 ms,最大压力由 189.75 MPa 下降到 174.32 MPa; 同时火药力由 $756.62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降至 $649.33 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,余容由 $1.01 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升至 $1.30 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

绕丝可燃药筒吸湿性较强,在潮湿环境中易吸收水分;当受潮药筒燃烧时,水分则通过蒸发吸收大量的热使得药筒能量释放不完全,进而严重影响药筒各项燃烧性能参数,因此严格控制绕丝可燃药筒储存环境湿度,确保药筒一定的含水量,是提高绕丝可燃药筒内弹道稳定性的重要保证。

参考文献:

- [1] 黄涛. 可燃药筒燃烧完全性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
HUANG Tao. The researching of combustible cartridge burning perfectibility[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [2] Kurulkar G R, Syal R K, Singh H. Combustible cartridge case formulation and evaluation[J]. *Journal of Energetic Materials*, 1996, 14(2): 127.
- [3] Ho C H, Moneyhun J H, Agouridis D C, et al. Detection of nitroesters and moisture in combustible cartridge case wall by indicator strips and instruments, ORNL/TM-12286[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1992.
- [4] Syal R K, Talegaonkar S B, Peshave J R. Drying characteristics of combustible cartridge case [J]. *Chemical Engineering World*, 1995, 30(6): 119.
- [5] Remaly R F, Nusbaum M S, Johnson K G, et al. Duplex combustible cartridge case[R]. AD1648666, 1974.
- [6] Kestusis G C, Pauline M S, William S L. Investigation of residue and coating stoichiometry on 120-mm combustible cartridge case [R]. ARL-TR-2337, 2000.
- [7] Manning C Y. Porosity measurement of combustible cartridge

- case materials[R]. ARLCD-TR-81003, 1981.
- [8] 张兆均, 徐文娟, 张会生. 三种可燃药筒燃烧特性分析[J]. 兵工学报, 1996, 17(1): 26-31.
ZHANG Zhao-jun, XU Wen-juan, ZHANG Hui-sheng. Analyses on the burning properties of three kinds of combustible cartridges [J]. *Journal of China Ordnance*, 1996, 17(1): 26-31.
- [9] 徐文娟. 可燃药筒与主装药匹配的研究[J]. 弹道学报, 1994, 6(4): 29-33.
XU Wen-juan. Study on match between combustible case and propellants[J]. *Journal of Ballistics*, 1994, 6(4): 29-33.
- [10] 张会生, 徐文娟. 可燃药筒实际燃烧速度的研究[J]. 弹道学报, 1996, 8(4): 24-27.
ZHANG Hui-sheng, XU Wen-juan. Study on the burning rate of combustible case[J]. *Journal of Ballistics*, 1996, 8(4): 24-27.
- [11] 徐文娟, 于军. 抽滤型可燃药筒性能及燃烧规律的研究[J]. 华东工学院学报, 1988, 12(1): 130-139.
XU Wen-juan, YU Jun. A study of quality and burning rule of the ignitable cartridge case [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 1988, 12(1): 130-139.
- [12] 徐文娟, 庄国镇. 抽滤型可燃药筒加主装药的静态试验研究[J]. 弹道学报, 1993, 5(2): 52-59, 69.
XU Wen-juan, ZHUANG Guo-zhen. Static experimental study on cartridge with extracted combustible case[J]. *Journal of Ballistics*, 1993, 5(2): 52-59, 69.
- [13] 李欣. 可燃药筒装药对弹丸初速或然误差影响的分析[J]. 弹道学报, 1994, 20(2): 24-29.
LI Xin. Analysis of effect of combustible cartridge case charge on muzzle velocity probable error of projectile[J]. *Journal of Ballistics*, 1994, 20(2): 24-29.
- [14] 李煜, 郭德惠, 田书春, 等. 纤维增强组份对可燃药筒性能的影响[J]. 弹道学报, 2009, 21(4): 95-98.
LI Yu, GUO De-hui, TIAN Shu-chun, et al. Influence of reinforced fibers on the properties of CCC[J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(4): 95-98.
- [15] 李煜, 郭德惠, 赵成文, 等. 新型含能纤维可燃药筒性能研究[J]. 含能材料, 2009, 17(3): 334-338.
LI Yu, GUO De-hui, ZHAO Cheng-wen, et al. Characterization of combustible cartridge cases enhanced by novel energetic fibers [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hangneng Cailiao)*, 2009, 17(3): 334-338.
- [16] 李煜, 赵成文, 郭德惠, 等. 可燃药筒的定容燃烧特性[J]. 火炸药学报, 2009, 32(4): 75-79.
LI Yu, ZHAO Cheng-wen, GUO De-hui, et al. Constant-volume combustion properties of combustible cartridge case [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(4): 75-79.
- [17] 王泽山, 韩盘铭, 张续柱. 火药实验[M]. 北京: 中国科技出版社, 1992.
WANG Ze-shan, HAN Pan-ming, ZHANG Xu-zhu. Powder experiment [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992.

Hygroscopicity and its Effect on Combustion Performance of Winding Combustible Cartridge Case

JIA Hao-nan¹, LU Gui-e^{1,2}, CHEN Ming-hua^{1,2}, AN Zhen-tao¹, JIANG Jin-yong^{1,2}

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Ordnance Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In order to study the effects of surrounding humidity on the constant-volume combustion characteristics of winding combustible cartridge case (CCC), the hygroscopic properties of winding CCC were studied by weighing method and the samples saturated in different humidity were tested by a closed-bomb test. The results show that the winding CCC has a better hygroscopic ability. The higher the relative humidity, the stronger the hygroscopic ability. When the relative humidity is 89.0%, the amount of absorption is about 2.89%. Under the condition of loading density of $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, with increasing the relative humidity, the burning rate of cartridge significantly reduces, and the combustion ending time extends from 2.40 ms to 3.30 ms, the maximum pressure decreases from 189.75 MPa to 174.32 MPa, the impetus decreases from $756.62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $649.33 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the covolume increases from $1.01 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $1.30 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Key words: physic chemistry; winding combustible cartridge case; moisture; hydroscopic; combustion performance; closed-bomb test

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.022