

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.03.012

延期药延期时间的 $p-t$ 曲线测试新方法^{*}

刘庆安 李 燕 朱顺官 袁 彬
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 利用测压组件、高压电弧点火器、压力变送器、示波器等建立了一种新型的、适用于延期药燃速测试的 $p-t$ 曲线测试系统。利用高压电弧点火器在金属针与延期体金属管壳间产生电弧,点燃延期体;用示波器记录燃烧过程中测压组件内部的 $p-t$ 曲线,通过适当的取点,得到延期药的燃烧时间。分别用 $p-t$ 曲线法和光电法测试了秒级及毫秒级延期体的延期时间,并对所得结果进行了对比。对于秒级延期体,光电法、 $p-t$ 曲线法测试后计算得到的延期精度分别为 3.35%、3.43%;对于毫秒级延期体,光电法、 $p-t$ 曲线法测试后计算得到的延期精度分别为 12.21%、18.96%。结果表明:该 $p-t$ 曲线测试系统应用于秒级、毫秒级延期药延期时间的测试是可行的,体现延期体的真实燃烧状态,满足高低温下延期体测试的保温需求。

[关键词] 延期药;延期时间; $p-t$ 曲线;延期精度

[分类号] TJ450.6

A New $p-t$ Curve Test Method for Delay Time of Delay Composition

LIU Qing'an, LI Yan, ZHU Shunguan, YUAN Bin
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] A new $p-t$ curve recording system for testing the burning rate testing of delay composition is established by using pressure measuring component, high voltage arc igniter, pressure transmitter, oscilloscope, et al. Arc generated between metal needle and extension body metal tube shell of high voltage arc igniter ignites extension body, and an-oscilloscope records $p-t$ curve of pressure measuring component during combustion process, and the burning time of delay composition was obtained by taking appropriate points. The delay time of second-level and millisecond-level extension body were measured by $p-t$ curve method and photoelectric method respectively, and the results were compared. The delay accuracy of second-level extension body calculated are 3.35% and 3.43% by photoelectric method and $p-t$ curve method. The delay accuracy of millisecond-level extension body are 12.21% and 18.96% calculated by photoelectric method and $p-t$ curve method respectively. The results show that the $p-t$ curve test system is feasible for the test of the delay time of the second-level and millisecond-level delay composition. It can reflect the real combustion state of the extension body, and meet the thermal insulation need of the extension body test at high and low temperatures.

[KEYWORDS] delay composition; delay time; $p-t$ curve; delay accuracy

引言

以延期药为能源的延期器件具有简单、经济、可靠、抗干扰和体积小等特点,广泛应用于时间引信、自毁装置、解脱机构、毫秒级或秒级延期雷管、点火具和其他火工器件中^[1]。

燃速是延期药最重要的特性参数,目前已有数十种燃速测试方法,如靶线法、摄影法、光电法、热电

偶法、光导纤维法、自变电阻法、离子导电法、电容法、 γ 射线法等^[2]。靶线法和光电法都用来测量延期药的平均燃速,其原理是在燃烧开始时计时,燃烧结束时断开记录,从而算出延期药的平均燃速。摄影法虽比靶线法好,但成本较高,实验周期长,且只能得到图像,实验结果的处理较为繁琐。热电偶法是在被测药柱中插入两支或两支以上热电偶,记录热电偶温度随时间的变化;这种方法操作复杂,且会干扰延期药燃烧温度场,不能满足实验要求。自变

^{*} 收稿日期:2019-01-24
第一作者:刘庆安(1993-),男,硕士研究生,主要从事火工技术应用研究。E-mail:1277653889@qq.com
通信作者:李燕(1975-),女,副教授,主要从事火工药剂技术和新型爆破器材研究。E-mail:yanli@njust.edu.cn

电阻法可用来测试瞬时燃速和燃烧的全过程,仅适用于含有金属粉末的药剂^[2]。杜志明^[3]将光电耦合器件 (CCD) 技术应用于药剂燃烧速度的测试,解决了以往无法测试延期药、点火药瞬时燃速的难题,得到了 Ti-BaCrO_4 延期药燃烧波面的位置-时间曲线、瞬时燃速曲线以及平均燃速随压力变化的曲线。冯西平^[4]对目前比较成熟的探针法、光电法、靶线法和声电法进行了实验研究,指出光电法是一种精确度较高的测时方法,其反应速度很快,适合精确的火工品作用时间的测量,但是在测试过程中要注意其他光信号的干扰。光电法适用于各类延期药的燃速测试,如硅系延期药^[5-6]、硼系延期药^[7-11]、钨系延期药^[12-16]。在评价一批延期元件延期精度的一致性时,采用光电法比较方便^[2]。光电法虽较为成熟,但难以做到在密闭燃烧条件下测试以模拟延期火工品内部真实的燃烧环境,高低温测试时延期体温度不易维持,难以在测试延期时间的同时监测内部压力的变化。颜事龙等^[17]设计了一套雷管延期体延时测试新方法,由示波器显示整个过程的压力-时间曲线,由波形读出从点火到每个药芯的喷火时间,但仍采用引火药头、导爆管两种点火方式。

在延期体燃速测试时,影响测试精度的因素有很多。其中,点火药的药量、压药密度等因素直接影响其对延期药柱的点火能量,从而影响延期药柱的稳定燃烧,造成延期精度低的问题。因此,点火药药量的选择应考虑其自身的性质和延期药的性质,从点火能量匹配的角度考虑^[18],使延期药尽快达到稳态燃烧。

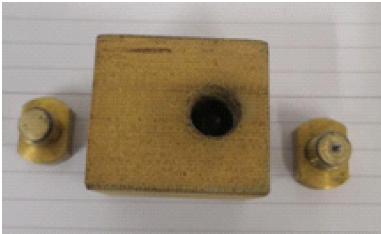
此外,延期体从烘箱或低温箱取出到点火测试有一定的的时间,若采用传统的光电法测试时需要设计一个保温块用来维持延期体的温度,这样就使得实验操作繁琐,不便于实际测试。

本文中,设计了一种 $p-t$ 曲线测压组件,用示波器记录燃烧过程中测压组件内部压力变化曲线,通过适当的取点,得到延期药的燃烧时间。传统测试方法采用导爆管、电引火药头点火,本文中,采用电弧点火,避免了电引火药头、导爆管等外加点火元件对燃速测试的影响。传统光电法采用两个光电二极管取两个信号的时间差,本文中,采用一个压力变送器,通过胶木测压组件得到输入端、输出端点火药燃烧压力峰的时间,体现了军用延期体的真实点火传火状态。另外,采用该法测试,延期体在密闭条件下燃烧,较为接近延期火工品的实际使用环境。这种方法方便易操作,有效地解决了高低温测试时的保温问题。

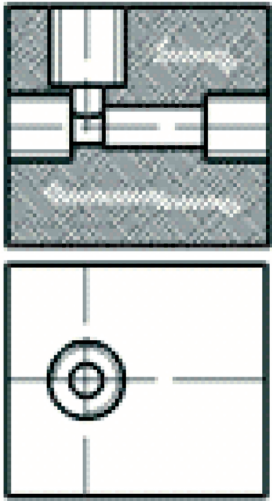
1 测试方法简介

1.1 延期体 $p-t$ 曲线测试系统

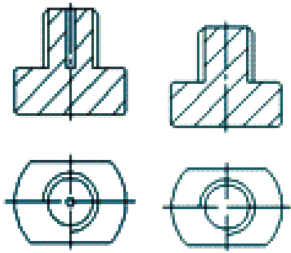
延期体 $p-t$ 曲线测试系统包括测压组件、高压电弧点火器、压力变送器、供电电源、示波器等。延期体 $p-t$ 曲线测压组件结构如图 1 所示。测压组件主体采用胶木材质,左、右两端为铜制螺栓。左端螺栓中间加工一凹槽,凹槽中插入一金属针 (直径 1 mm, 长度 13 mm), 测压模具装配后,金属针与延期体铝管壳间距为 2 mm, 两端螺栓接上高压电弧点火器后,即可在金属针与延期体铝管壳间产生电弧放电现象,利用电弧放电的高温特性点燃延期体。



(a) 实物图



(b) 主体



(c) 左、右螺栓

图 1 延期体测压组件

Fig. 1 Pressure measuring component for extension body

测压组件上部螺纹为压力变送器接口,采用 FST800-211 压力变送器,其量程为 1.6、2.0 MPa,信号输出为 0~10 V、0~5 V,精度为 $\pm 0.5\%$ FS。

图 2 为某延期体的 $p-t$ 曲线测试结果。延期药为钨系延期药(质量分数:W,38%;BaCrO₄,52%;KClO₄,10%;总药量 400 mg),延期体的输入端和输出端均为 60 mg 的 601 点火药。

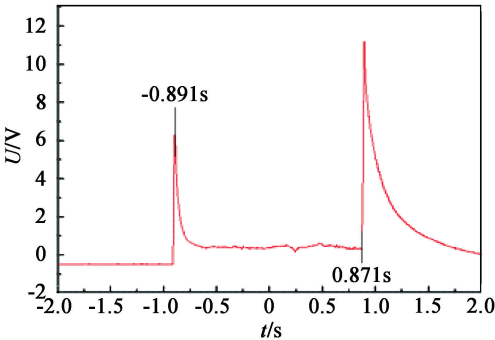


图 2 钨系延期药 $p-t$ 曲线测试图谱
Fig. 2 $p-t$ curve test chart of tungsten type delay composition

图 2 中第一个压力峰为输入端 601 点火药的燃烧压力峰,第二个压力峰为输出端 601 点火药的燃烧压力峰。取第一个压力峰最高点的时间 -0.891 s 及第二个压力峰起点的时间 0.871 s ,可得延期药的延期时间 1.762 s 。

该延期时间测试方法,第一个压力峰最高点的时间及第二个压力峰起点时间的读取可以精确到 1 ms ,较好地满足了实验精度要求。

1.2 样品制备

钨系延期体 I、硅系延期体 I 均为自压延期体,压药压力为 200 MPa,管壳材质为 2A12 铝合金,内径为 3.50 mm,外径为 6.16 mm,长度分别为 16.40、10.40 mm;钨系延期体 II、硅系延期体 II 均为铅芯延期体,由南京理工大学科技化工有限责任公司生产。

1) 钨系延期体 I。延期药为 W/BaCrO₄/KClO₄(质量分数为:W,38%;BaCrO₄,52%;KClO₄,10%),采用筛网干混法制备,药量为 440 mg,分 4 次压装,每次压药 110 mg,输入端、输出端均为 60 mg 的 601 点火药,手动杠杆压药机压药。

2) 钨系延期体 II。结构为大内管压装点火索和延期索。为得到压力信号,在输出端压入 40 mg 601 点火药,压药压力约 20 MPa。

3) 硅系延期体 I。延期药为 Si/Pb₃O₄(质量分数为:Si,37.2%;Pb₃O₄,62.8%),采用筛网干混法制备,药量为 140 mg,分两次压装,每次压药 70 mg,输入端、输出端均为 601 点火药,药量分别为 100 mg 和 60 mg,手动杠杆压药机压药。

4) 硅系延期体 II。切长 5.3 mm,油压机压药。在延期体输入端、输出端各压入 601 点火药(手动点压,药量均为 10 mg 左右)。

2 测试结果及讨论

2.1 秒级延期测试

钨系延期体 I、钨系延期体 II 两种延期元件结构不同,装药直径不同,同时考察了两类钨系延期体的测试精度。两类钨系延期体的 $p-t$ 曲线测试图谱与图 2 类似,取点方式相同,故不再赘述。为了初步验证 $p-t$ 曲线法测试秒级延期体的可行性,在室温条件下用该法进行了钨系延期体 I 的延期时间测试工作,测试结果见表 1。该样品为自压延期体,非工厂生产的标准样品,故没有与传统光电法进行对比。

表 1 中,钨系延期体 I 的延期精度为 3.30%,精度较高,测试误差主要是由药剂本身、装药条件的差别造成的,测试系统本身对延期时间测试的误差比较小。

为了进一步验证该法测试的精度,取一批钨系延期体 II(工厂生产的标准样品),分别采用 $p-t$ 曲线法和光电法。在室温条件下进行延期时间的测试,并对测试结果进行了对比,如表 2 所示。光电法采用 100 MHz 10 段智能爆速测量仪,南京理工大学民用爆破器材研究所研制,分辨率 0.1 ms,测试装置由两个光靶获取信号,一个获取导爆管的光信号,一个获取延期体末端的喷火信号。

$p-t$ 曲线法测试去掉了点火端点火索的燃烧时间,整个燃烧过程在密闭条件下进行,因此该法测试得到的延期时间比工厂采用传统光电法所得的延期时间稍短。两种测试方法精度差别不明显,说明 $p-t$

表 1 钨系延期体 I 测试结果
Tab. 1 Test results of tungsten type extension body I

延期时间/s	极差 /s	平均值/s	精度/%
2.147; 2.253; 2.187; 2.174; 2.117; 2.140; 2.248; 2.130; 2.110	0.143	2.167	3.30

表 2 钨系延期体Ⅱ的 p - t 曲线法与传统光电法测试结果对比

Tab.2 Comparison of the results of p - t curve method and traditional photoelectric method for tungsten type extension body Ⅱ

测试方法	延期时间/s	极差/s	平均值/s	精度/%
光电法	2.000; 2.102; 2.073; 2.071; 2.053; 2.087 2.104; 2.026; 2.118; 2.027; 2.139	0.139	2.073	3.35%
p - t 曲线法	1.872; 1.849; 1.904; 1.804; 1.896; 1.854 1.913; 1.811; 1.866; 1.932; 1.838	0.128	1.867	3.43%

表 3 硅系延期体Ⅰ测试结果

Tab.3 Test results of silicon type extension body Ⅰ

延期时间/s	极差/s	平均值/s	精度/%
26.0; 28.3; 26.2; 26.0; 30.0; 27.0; 25.0; 27.8; 24.0	6.0	26.7	11.24

表 4 硅系延期体Ⅱ的 p - t 曲线法与传统光电法测试结果对比

Tab.4 Comparison of the results of p - t curve method and traditional photoelectric method for silicon type extension body Ⅱ

测试方法	延期时间/s	极差/s	平均值/s	精度/%
光电法	21.3; 19.1; 20.9; 18.8; 18.6; 18.3; 23.3 21.2; 22.7; 22.4; 18.7	5.0	20.5	12.21
p - t 曲线法	29.0; 27.1; 28.0; 22.0; 31.0; 23.0; 30.0 29.0; 21.0; 28.0; 22.0	10.0	26.4	18.96

曲线法测试延期时间可以满足秒级延期测试要求。

2.2 毫秒级延期测试

硅系延期体Ⅰ、硅系延期体Ⅱ两种延期元件结构不同,装药直径不同,同时考察了两类硅系延期体的测试精度。同样,两类硅系延期体的 p - t 曲线测试图谱与图 2 类似,取点方式相同,故不再赘述。为了初步验证 p - t 曲线法测试毫秒级延期体的可行性,在室温条件下用该法进行了硅系延期体Ⅰ的延期时间测试工作,测试结果见表 3。该样品为自压延期体,非工厂生产的标准样品,故没有与传统光电法进行对比。

表 3 中硅系延期体Ⅰ的延期精度为11.24%,精度较高,测试误差主要是由药剂本身、装药条件的差别造成的,测试系统本身对延期时间测试的误差比较小。

为了进一步验证该法测试的精度,取一批硅系延期体Ⅱ(工厂生产的标准样品),分别采用 p - t 曲线法和光电法在室温条件下进行延期时间的测试,并对测试结果进行了对比,如表 4 所示。

表 4 中,所有测试数据均在 2 段延期时间(25 ± 10 ms)范围内,与光电法相比, p - t 曲线法测试的延期时间较长,是因为延期体输入端手动点压的 601 点火药的药量过少(约 10 mg)。硅系延期体Ⅱ采用

p - t 曲线法测试得到的延期时间精度较低,而硅系延期体Ⅰ采用 p - t 曲线法测试得到的精度较高(硅系延期体Ⅰ装药一致性较好)。硅系延期体Ⅱ生产时未压入点火药,测试时手动点压了约 10 mg 点火药(延期体点火端为弧形且套有金属壳体,故无法用冲子压点火药,仅能点压约 10 mg 点火药,且无法控制点火药药量,装药一致性差),点火药药量过少,且与延期药接触不紧密,则点火能量过小、两个压力信号的峰值也不够明显,故 p - t 曲线法测试得到的精度不够理想。

输入端点火药燃烧压力约为 0.2 MPa,而采用同样的测试条件测得的导爆管输出压力约为 0.8 MPa(p - t 曲线如图 3 所示)。根据点火能量匹配理论,输入端 601 点火药点火能量过小,导致延期药非稳态燃烧段加长,延期精度较低。因此,只要改变延期体生产的工艺,压入点火药, p - t 曲线法适用于 2 段或其他段别毫秒级延期体的测试。

2.3 p - t 曲线测时装置的保温效果

将延期体、压力变送器装配到测压组件中,点火端螺栓处插入水银温度计并用硅橡胶密封。放入烘箱中升温到 58.6 ℃,保温 4 h 后拿出,温度-时间测量结果如图 4 所示。

由图4可知,延期体在1 min内温度降低不超

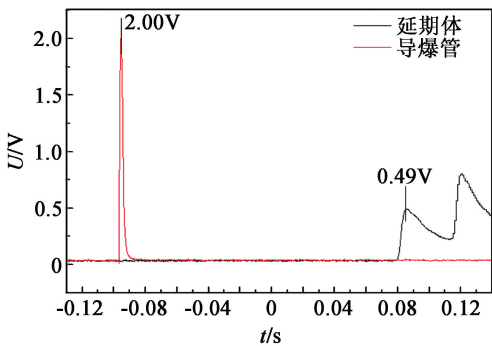


图3 输入端601点火药燃烧压力和导爆管输出压力对比

Fig.3 Comparison of the 601 ignition charge combustion pressure at input end and output pressure of detonating tube

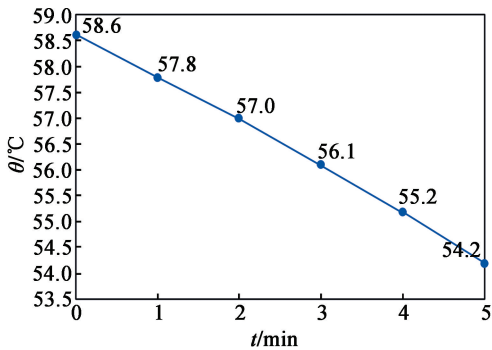


图4 延期体的温度-时间曲线

Fig.4 Temperature-time curve of extension body

过1℃。 $p-t$ 曲线法测试时,测压组件从烘箱或低温箱取出到测试约0.5 min。因此, $p-t$ 曲线测试系统保温效果较好,适合于高低温下的燃速测试。

2.4 高低温下的延期时间测试

将18发钨系延期体I分别与18个测压组件装配后放入烘箱和低温箱中保温4 h后测试, $p-t$ 曲线法延期时间测试结果如表5所示。

表5 高低温下钨系延期体I延期时间测试结果

Tab.5 Test results of tungsten type extension body I at high and low temperatures

温度	延期时间/s	极差/s	平均值/s	精度/%
-50℃	2.665; 2.685;	0.165	2.731	3.02
	2.680; 2.765;			
	2.825; 2.800;			
	2.680; 2.660;			
65℃	2.815	0.143	1.903	3.76
	1.826; 1.969;			
	1.917; 1.854;			
	1.926; 1.964;			
	1.912; 1.904;			
	1.853			

由表5可知,在高低温下采用 $p-t$ 曲线法测试延期时间,延期精度均较高。该法测试误差较小,适合于高低温下的燃速测试。

3 结论

采用电弧点火方式,设计了一种新型延期时间测试方法,避免了电引火药头、导爆管等外加点火元件对燃速测试的影响,体现了军用延期体的真实点火传火状态,通过记录测压组件内部 $p-t$ 曲线得到延期药的燃烧时间,分别用 $p-t$ 曲线法和光电法测试了秒级及毫秒级延期体的延期时间,并对测压组件的保温效果进行了测试,得到如下结论:

1)建立的 $p-t$ 曲线测试系统应用于秒级、毫秒级延期药延期时间的测试是可行的。采用该法测试,方便易操作,可有效地解决高低温测试时的保温问题。采用电弧点火避免了药头药剂质量对燃速测试的影响。另外,延期体在密闭条件下燃烧,较为接近延期火工品的实际使用环境。

2)秒级延期体光电法测试后计算得到的延期精度为3.35%, $p-t$ 曲线法测试后计算得到的延期精度为3.43%。表明 $p-t$ 曲线法测试延期时间可以满足秒级延期测试要求。

3)毫秒级延期体光电法测试后计算得到的延期精度为12.21%, $p-t$ 曲线法测试后计算得到的延期精度为18.96%。根据点火能量匹配理论,通过调整输入端点火药药量, $p-t$ 曲线法测试延期时间可以满足毫秒级延期测试要求。

参 考 文 献

[1] 劳允亮,盛涤伦. 火工药剂学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2011:260-261.
LAO Y L, SHENG D L. The science of initiating explosives and relative composition[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2011: 260-261.

[2] 王丽琼,杜志明,冯长根. 延期药及固体推进剂的燃速测定方法[J]. 火工品,1995(1): 34-38.
WANG L Q, DU Z M, FENG C G. Determining methods on burning velocities of delay composition and solid propellant[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1995(1): 34-38.

[3] 杜志明. 延期药和点火药燃速测试新方法[J]. 北京理工大学学报, 1997,17(5): 650-654.
DU Z M. New technique for measuring burning rates of delay compositions and ignition compositions[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1997, 17(5): 650-

- 654.
- [4] 冯西平. 火工品作用时间与 SCB 发火能量测试方法的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2004.
- [5] 张彦. 混药工艺对延期药延期时间精度影响的研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2017.
- ZHANG Y. Effect of mixing process on delay time precision of delay composition[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [6] 汪磊. 纳米金属氧化物对硅系延期药延期性能的影响[D]. 淮南:安徽理工大学, 2016.
- WANG L. Effect of nanometer metal oxide on the delay time and precision of silicon delay composition [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [7] 张颖颖. 硼/铬酸钡延期药温度系数与耐冲击性能的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- [8] 刘建斌. 硼系延期药的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2003.
- [9] 聂祥进, 陈世雄, 彭文林, 等. 卡腰对导爆管雷管延时精度的影响[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.
- [10] 昌盛禄, 陈世雄, 彭文林, 等. 管体材质及尺寸对低燃速硼系延期药的影响[J]. 爆破器材, 2016, 45(6): 32-34, 38.
- CHANG S L, CHEN S X, PENG W L, et al. Effect of package on boron type delay charge with low burning rate[J]. Explosive Materials, 2016, 45(6): 32-34, 38.
- [11] 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) delay powder [J]. Blasting, 2013, 30(2): 167-170.
- [12] 张天. 微尺度装药燃烧特性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007.
- ZHANG T. Study on combustion characteristics of microscale charge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [13] 陈利魁, 盛涤伦, 王克恭, 等. 纳米钨系延期药的研究[J]. 火工品, 2005(4): 6-9.
- CHEN L K, SHENG D L, WANG K G, et al. Study on nanometer tungsten type delay charge[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2005(4): 6-9.
- [14] 黄寅生, 崔晨晨, 李锦涛, 等. 纳米 CuO 对钨系延期药热性能及燃烧性能的影响[J]. 爆破器材, 2009, 38(3): 25-27.
- HUANG Y S, CUI C C, LI J T, et al. Effect of nano-CuO on the thermal characteristics and burning characteristics of tungsten type delay composition[J]. Explosive Materials, 2009, 38(3): 25-27.
- [15] 黄寅生, 李锦涛, 崔晨晨, 等. 纳米 Fe₂O₃ 对钨系延期药燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 507-510.
- HUANG Y S, LI J T, CUI C C, et al. Effect of nano-Fe₂O₃ on the burning characteristics of tungsten type delay composition[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 507-510.
- [16] 张方, 王燕兰, 孙霖, 等. 碳纳米管对钨系延期药延期时间的影响[J]. 火工品, 2010(4): 32-34.
- ZHANG F, WANG Y L, SUN L, et al. Influence of CNTs on the delay time of tungstenic delay composition [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(4): 32-34.
- [17] 颜事龙, 韩体飞, 陈磊, 等. 雷管延期体延时测试新方法: CN104457457A[P]. 2015-03-25.
- [18] 李俊安, 劳允亮. 点火-延期药界面能量匹配与延期精度[J]. 火工品, 1995(1): 15-18.
- LI J A, LAO Y L. The energy match and delay precision of ignition-delay composition interface [J]. Initiators & Pyrotechnics, 1995(1): 15-18.