

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.04.002

一种带约束管的爆炸箔点火器的结构设计*

毛舰森^① 王保国^① 谭兴^② 田鑫^① 赵文虎^③ 张延亮^③ 康建成^④

①中北大学环境与安全工程学院(山西太原, 030051)

②西安现代控制技术研究所(陕西西安, 710000)

③山西北方晋东化工有限公司(山西阳泉, 045000)

④空军装备部驻太原地区军事代表室(山西太原, 030006)

[摘要] 为降低 X 型爆炸箔点火器的发火电压,提高点火可靠性,设计了一种带约束管的爆炸箔点火器。它由壳体、约束管、点火药、盖片和堵盖等组成,外径为 18.00 mm,高度为 25.00 mm;输入点火药选用爆发点较低的热敏感型 B/KNO₃ 点火药,装药密度为(1.45 ± 0.05) g/cm³,装药量为(0.13 ± 0.05) g;输出点火药选择许用 B/KNO₃ 点火药,装药密度为(1.75 ± 0.05) g/cm³,装药量为(0.62 ± 0.05) g;输入装药约束管外径为 5.00 mm,高度为 4.50 mm,厚度为 0.50 mm;输出装药约束管外径为 8.00 mm,高度为 7.00 mm,厚度为 0.50 mm。并对爆炸箔点火器进行结构强度仿真和主要性能测试。结果表明:点火器在点火过程受到的最大应力约为 54.513 MPa,最大应变约为 3.699 3 × 10⁻⁴;输出压力为 17.90 MPa;50% 发火电压为 672 V。满足了使用要求。

[关键词] 爆炸箔点火器;约束管;热敏感型 B/KNO₃;强度仿真

[分类号] TJ450

Structural Design of an Exploding Foil Igniter with Restraint Tubes

MAO Jiansen^①, WANG Baoguo^①, TAN Xing^②, TIAN Xin^①, ZHAO Wenhui^③, ZHANG Yanliang^③, KANG Jiancheng^④

①School of Environmental and Safety Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

②Xi'an Institute of Modern Control Technology (Shaanxi Xi'an, 710000)

③Shanxi North Jindong Chemical Co., Ltd. (Shanxi Yangquan, 045000)

④Military Representative Office in Taiyuan Area, Air Force Equipment Department (Shanxi Taiyuan, 030006)

[ABSTRACT] In order to reduce ignition voltage of the X-type exploding foil igniter and improve its ignition reliability, an exploding foil igniter with restraint tubes was designed. It consists of a shell, a restraining tube, ignition powder, a cover, and a plug, with an outer diameter of 18.00 mm and a height of 25.00 mm. The input ignition powder is a thermal sensitive B/KNO₃ ignition powder with a lower explosion point, with a charge density of (1.45 ± 0.05) g/cm³ and a charge amount of (0.13 ± 0.05) g. Permissible B/KNO₃ ignition powder is selected as the output ignition powder, with a charge density of (1.75 ± 0.05) g/cm³ and a charge amount of (0.62 ± 0.05) g. The outer diameter of the input charging restraint tube is 5.00 mm, the height is 4.50 mm, and the thickness is 0.50 mm. The outer diameter of the output charging restraint tube is 8.00 mm, the height is 7.00 mm, and the thickness is 0.50 mm. Structural strength simulation and main performance test were conducted on the exploding foil igniter. The results show that the maximum stress and strain experienced by the igniter during the ignition process are approximately 54.513 MPa and 3.699 3 × 10⁻⁴, respectively. The output pressure is 17.90 MPa. The 50% firing voltage is 672 V. It meets the usage requirements.

[KEYWORDS] exploding foil igniter; restraint tube; thermal sensitive B/KNO₃; strength simulation

* 收稿日期:2023-02-20

第一作者:毛舰森(1996-),男,硕士研究生,主要从事火工品设计与性能研究。E-mail:2394929946@qq.com

通信作者:王保国(1970-),男,博士,副教授,主要从事新型传爆药、新型火工药剂和新型火工品技术研究。E-mail:2086139461@qq.com

0 引言

作为一种钝感火工品,爆炸箔点火器具有安全性高、尺寸小和质量轻等优点,需在 500 V 以上的高压下才能发火,不受静电和电磁效应的影响^[1],因此,广泛应用于航天及武器点火系统中。虽然爆炸箔点火器在结构上与爆炸箔起爆器相同,但输出能量从炸药的爆轰转变为点火药的燃烧。杨振英等^[2]为提高爆炸箔点火器的安全性能,采用冲击片点火器与点火药盒一体化的方式,设计了一种结构新颖的爆炸箔冲击片点火器,并进行了性能测试;结果表明:该点火器可耐 3 A 直流电流,5 min 不发火,能抗静电、射频及电磁干扰。张玉若等^[3]研究了不同粒度的 B/KNO₃ 点火药对点火器发火能量的影响;结果表明:B/KNO₃ 点火药粒度越小,发火能量越低。

点火药的输出能力与约束条件有关。荣光富等^[4]研究了约束条件对硼系高能点火药输出能力的影响;结果表明:只有在加强约束条件下,点火药才能使装药压力为 13.8 MPa 的太安(PETN)完全爆轰。余明祥等^[5]研究了 B/KNO₃ 点火药燃烧转爆轰的应用;结果表明:在未施加约束条件下,大密度的 B/KNO₃ 点火药不能完全实现燃烧转爆轰,而在一定装填量的强约束条件下,装填 B/KNO₃ 点火药的延时起爆装置能实现燃烧转爆轰。

本文中,为降低 X 型爆炸箔点火器的发火电压,提高点火可靠性,设计了一种带约束管的爆炸箔点火器,并进行了结构强度仿真和性能测试。

1 结构设计

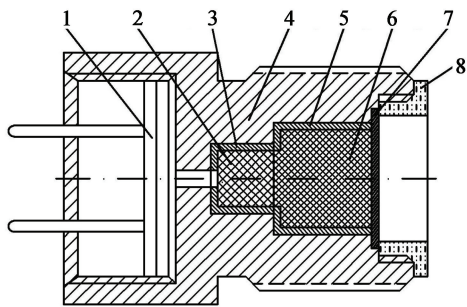
1.1 总体结构

新设计的爆炸箔点火器结构如图 1 所示。主要由爆炸箔发生器、输入点火药、输入装药约束管、壳体、输出装药约束管、输出点火药、盖片和堵盖组成。

工作原理为:当大电流经发火脚线通过爆炸箔发生器时,金属桥箔发生爆炸并产生等离子体,等离子体推动飞片以高速撞击输入点火药柱,药柱发生爆燃,点燃输出点火药柱,继而点燃后续装药^[2]。

1.2 输出点火药的选择

点火器的点火能力主要取决于输出点火药^[6]。B/KNO₃ 点火药是直列式点火系统的许用药剂,具有热值高、点火能力强和安全钝感等特点^[7]。因



1 - 爆炸箔发生器;2 - 输入点火药;3 - 输入装药约束管;
4 - 壳体;5 - 输出装药约束管;6 - 输出点火药;7 - 盖片;
8 - 堵盖。

图 1 爆炸箔点火器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the exploding foil igniter

此,输出点火药选择许用 B/KNO₃ 点火药。

根据经验,点火器输出点火药的装药密度一般为 1.60 g/cm³。由于爆炸箔点火器的小尺寸要求,输出点火药的装药体积较小。由参考文献[8]可知,适当增加点火药量可使固体微粒的数目增加,热交换系数变大,起到加强对流和辐射传热的作用,从而增加点火药的输出性能。为了保证点火器的输出能力,适当增加许用 B/KNO₃ 点火药的装药密度,以增加点火药的装药量。输出点火药的装药密度为 (1.75 ± 0.05) g/cm³,装药量为 (0.62 ± 0.05) g。

1.3 输入点火药的设计

爆炸箔点火器的输入点火药由高速飞片撞击引燃。当飞片撞击点火药的表面后,热量通过热传导、热对流和热辐射的方式传给点火药,并点燃点火药^[9]。因此,通过提高点火药的热感度,可以增加高速飞片点燃点火药的成功率。作为点火器常用的点火药,许用 B/KNO₃ 点火药热感度较低,降低了爆炸箔点火器在低电压下的点火可靠性。相较于许用 B/KNO₃ 点火药,热敏感型 B/KNO₃ 点火药的氧化剂粒度更细,硼粉的纯度更高、密度更小,由于加入了虫胶作为黏结剂,热感度有了明显的提高。根据 GJB 770B—2005《火药试验方法》,对热敏感型 B/KNO₃ 点火药和许用 B/KNO₃ 点火药的火焰感度、5 s 延滞期爆发点、摩擦感度和撞击感度进行了测试;根据 GJB 5384.4—2005《烟火药性能试验方法》,对热敏感型 B/KNO₃ 点火药和许用 B/KNO₃ 点火药的燃烧热进行了测试。测试结果如表 1 所示。

由表 1 发现,热敏感型 B/KNO₃ 点火药的 5 s 延滞期爆发点温度更低,火焰感度和燃烧热更高,更容易被点燃,适合作为输入点火药。由参考文献[10]可知,当点火药分层压制时,上、下两层的密度差可达 0.30 g/cm³ 以上。因此,输入点火药的装药密度为

表 1 热敏感型 B/KNO₃ 点火药和许用 B/KNO₃ 点火药的性能对比

Tab. 1 Performance comparison between thermal sensitive B/KNO₃ ignition powder and permissible B/KNO₃ ignition powder

| 测试项目 | 热敏感型 B/KNO ₃ 点火药 | 许用 B/KNO ₃ 点火药 |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 火焰感度/cm | 5.9 | 6.7 |
| 5 s 延滞期爆发点/℃ | 409 | 510 |
| 摩擦感度/% | 0 | 0 |
| 撞击感度 H ₅₀ /cm | 56.3 | 47.9 |
| 单位燃烧热/(kJ·g ⁻¹) | 6.845 | 6.270 |

(1.45 ± 0.05) g/cm³, 装药量为 (0.13 ± 0.05) g。

1.4 装药方式与约束管设计

为了降低爆炸箔点火器的发火能量, 保证点火能力, 从点火药感度和输出能量两个方面考虑, 采用两级带壳的装药方式。带壳装药可以增加点火药的径向约束, 降低发火电压, 保证点火器的输出能力。为避免约束管在点火过程中发生变形或破裂, 进而影响点火器的发火感度和输出能力, 约束管材料选用耐高温、抗拉和屈服强度都较好的 304 不锈钢 (06Cr19Ni10)。

约束管分为输入装药约束管和输出装药约束管。在输入端增加约束管可以降低点火药的临界点火能量^[11], 使点火药更易点燃。输入装药约束管的结构如图 2(a) 所示, 直径为 5.00 mm, 厚度为 0.50 mm。在输出端增加约束管可以提高点火药的径向约束能力, 增大点火器的输出能量^[5-6]。输出装药约束管的结构如图 2(b) 所示, 直径为 8.00 mm, 厚度为 0.50 mm。

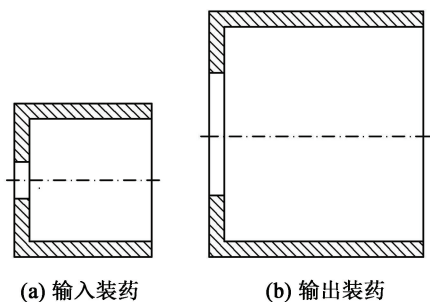


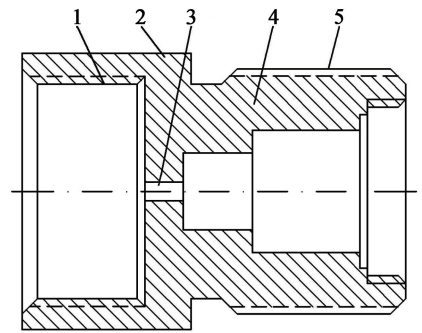
图 2 约束管结构示意图

Fig. 2 Structural diagrams of restraint tubes

1.5 壳体设计

作为爆炸箔点火器的主体结构, 壳体能进一步提高径向约束, 保证输出能力。通过优化壳体结构, 减小点火器的高度; 并采用台阶槽和装配槽的设计,

提高装配和装药过程中的效率。设计的爆炸箔点火器的壳体结构如图 3 所示。



1 - 装配槽; 2 - 限位板; 3 - 加速腔; 4 - 壳体; 5 - 台阶槽。

图 3 壳体结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of the shell

壳体主要由装配槽、限位板和台阶槽组成。装配槽用于装配爆炸箔发生器, 内径为 16.00 mm, 外径为 18.00 mm, 高度为 8.00 mm; 限位板在装配过程中起到定位的作用, 直径为 18.00 mm, 高度为 3.00 mm; 加速腔中心孔的直径为 1.20 mm, 较大的孔径可以减少飞片在通过时的能量损失; 台阶槽用于点火器在装药时的定位, 外径为 16.00 mm, 内径为 14.00 mm, 高度为 14.00 mm。

常用不锈钢的性能参数如表 2 所示。

表 2 常用不锈钢的性能参数

Tab. 2 Performance parameters of commonly used stainless steel

| 不锈钢名称 | $\sigma_b / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$ | | $a_k / (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$ | |
|----------------|--|-------|---|-------|
| | 室温 | 500 ℃ | 室温 | 500 ℃ |
| 13Cr11Ni2W2MoV | 1 225 | 882 | 106 | 113 |
| Cr17Ni2 | 1 084 | 798 | 52 | 127 |
| 2Cr13 | 706 | 431 | 118 | 245 |
| 1Cr18Ni9Ti | 608 | 441 | 245 | 358 |

壳体在爆炸箔点火器的点火过程中会处于高温、高压环境, 需承受较高的温度和压力。由表 2 可以看出: 13Cr11Ni2W2MoV 在常温和 500 ℃ 下的抗拉强度 σ_b 较好, 但抗冲击性能 a_k 一般; 1Cr18Ni9Ti 在常温和 500 ℃ 下的抗冲击性能 a_k 较好, 但抗拉强度 σ_b 较弱。综合考虑, 选用 13Cr11Ni2W2MoV 作为点火器的壳体材料。

1.6 密封设计

B/KNO₃ 点火药中的 KNO₃ 对潮湿比较敏感, 受潮后会影响到点火药的发火感度和点火能力。因此, 需要对点火器进行密封设计。密封装置主要由盖片、堵盖和密封胶组成。点火器加装盖片可以阻绝外界空气的进入, 加强输出点火药的约束状态, 保

证点火器的输出能力^[12]。根据点火器对输出性能的要求,盖片应具有一定的机械强度和化学稳定性,常用材料有钢片和铝片。相较于钢片,铝片具有质地轻和耐腐蚀性强的特点;且铝片的强度低于钢片,可以增加点火器的输出能量裕度,是盖片材料的合适选择。盖片直径为10.0 mm,厚度为0.5 mm。

在加装盖片后,在盖片和堵盖之间涂上一层环氧树脂胶。用堵盖将盖片堵住,在堵盖和壳体间加装螺纹密封胶,增加点火器的密封性和约束状态。

2 强度仿真与性能试验

2.1 结构强度仿真

采用ANSYS中的Static Structural结构静力学模块对爆炸箔点火器点火过程中的压力进行仿真。设置约束管经受垂直于端面的15 MPa压力,侧面和底面为固定面。在Design Modeler模块中对爆炸箔点火器的壳体和约束管进行建模。二者都采用六面体网格进行划分。节点数为18 566 384,单元数为6 289 279,网格大小为0.1 mm×0.1 mm×0.1 mm,平均网格质量为0.81。爆炸箔点火器受力如图4所示。经仿真得到的爆炸箔点火器应力与应变分布云图如图5所示。

由图5的仿真结果可知,在15 MPa压力下,应力集中在输入和输出装药处的顶部,最大应力约为54.513 MPa,最大应变约为 $3.699 3 \times 10^{-4}$ 。最大应力未达到约束管材料的屈服强度,且点火器的变形量很小,点火器的结构强度满足使用要求。

2.2 输出压力试验

点火药的输出压力是评价点火性能的重要指标^[9]。密闭爆发器可以测试点火器的输出性能,装在密闭爆发器上的点火器发火后,产生高压气体作用在压力传感器上,传感器将信号传到示波器上,得

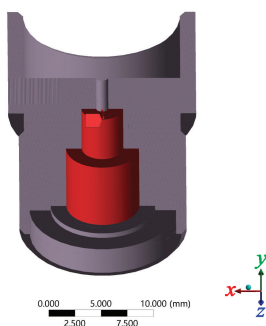
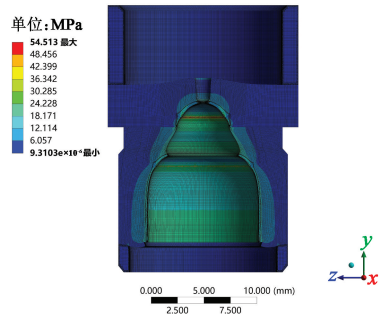
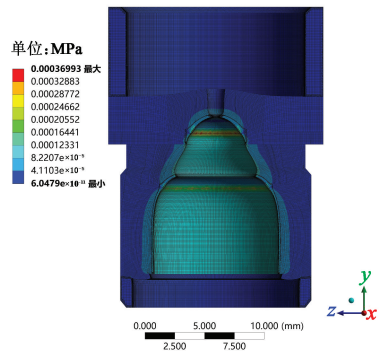


图4 爆炸箔点火器受力图

Fig. 4 Stress diagram of the exploding foil igniter



(a) 应力



(b) 应变

图5 爆炸箔点火器的应力和应变分布云图

Fig. 5 Distribution nephogram of stress and strain of the exploding foil igniter

到 $p-t$ 曲线^[13]。测得的爆炸箔点火器输出压力试验 $p-t$ 曲线如图6所示。

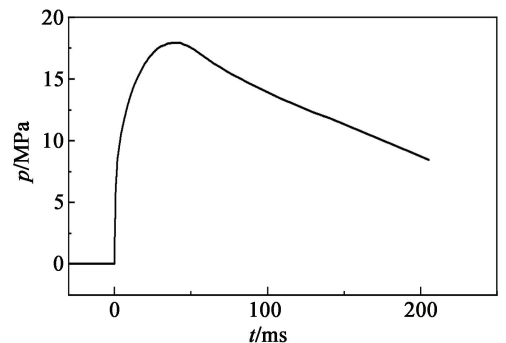


图6 爆炸箔点火器输出压力试验 $p-t$ 曲线

Fig. 6 The $p-t$ curve of the exploding foil igniter in output pressure test

由图6可以看出:爆炸箔点火器的输出压力在短时间内上升得很快,三十几毫秒内迅速上升到峰值压力,峰值压力在17.90 MPa左右。达到峰值压力后,压力逐渐下降,在200 ms时下降到8.90 MPa左右。点火器的最大输出压力为17.90 MPa,满足了使用要求。

2.3 50%发火电压试验

表3为爆炸箔点火器50%发火电压升降法试验

表3 50%发火电压试验测试结果
Tab.3 Results of 50% firing voltage test

| 放电 电压/ V | 试验序号 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|---|---|
| | 1 [#] | 2 [#] | 3 [#] | 4 [#] | 5 [#] | 6 [#] | 7 [#] | 8 [#] | 9 [#] | 10 [#] | 11 [#] | 12 [#] | 13 [#] | 14 [#] | 15 [#] | 16 [#] | 17 [#] | 18 [#] | 19 [#] | 20 [#] | 21 [#] | 22 [#] | 23 [#] | 24 [#] | 25 [#] | 26 [#] | 27 [#] | 28 [#] | 29 [#] | 30 [#] | 31 [#] | 32 [#] | | | |
| 800 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | |
| 750 | 1 | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | | 1 | |
| 700 | | 1 | | | | 1 | | | | 0 | | 1 | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | | 0 | | | | | 1 |
| 650 | | | 1 | | 0 | | 1 | | 0 | | | | 0 | | 1 | | 0 | | 1 | | 0 | | 1 | | 0 | | 0 | | | | | | | | |
| 600 | | | | 0 | | | 0 | | | | | | | | | 0 | | | | | 0 | | | 0 | | | 0 | | | | | | | | |

结果。试验根据 GJB/Z 377A—1994《感度试验用数理统计方法》进行。试验步长为 50 V。

由表3数据可以计算出爆炸箔点火器的50%发火电压为672 V,远低于常规的1 000 V以上。点火器的输入电压有了明显的降低。

2.4 500 V 电压不发火试验

根据 GJB 344A—2005《钝感电起爆器通用规范》的要求,爆炸箔点火器应在500 V电压下60 s不发火。因此,用0.2 μF电容充电,并对冲击片点火管桥箔两端施加500 V电压,进行放电发火试验。试验样本为10发。试验结果如表4所示。

表4 500 V 电压不发火试验测试结果

Tab.4 Results of non-ignition test with 500 V voltage

| 试验序号 | 发火电压/V | 是否发火 |
|-----------------|--------|------|
| 1 [#] | 500 | × |
| 2 [#] | 500 | × |
| 3 [#] | 500 | × |
| 4 [#] | 500 | × |
| 5 [#] | 500 | × |
| 6 [#] | 500 | × |
| 7 [#] | 500 | × |
| 8 [#] | 500 | × |
| 9 [#] | 500 | × |
| 10 [#] | 500 | × |

注:“√”为发火;“×”为不发火。

由表4数据可得,10发点火器均不发火,满足钝感火工品设计的要求。

3 结论

1)通过优化爆炸箔点火器的壳体结构、增加约束管,对点火药种类、装药方式和密封条件进行优化设计,降低了点火器的发火电压,保证了输出能力。

2)对爆炸箔点火器的结构强度进行仿真。仿

真结果表明,点火器在点火过程中几乎不发生变形,结构强度满足要求。

3)进行了爆炸箔点火器的输出压力、50%发火电压和500 V电压不发火试验。结果表明,新设计的爆炸箔点火器结构满足了使用要求。

参考文献

- [1] VARESH R. Electric detonators: EBW and EFI [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1996, 21(3): 150-154.
- [2] 杨振英, 褚恩义, 吕巧莉, 等. 爆炸箔点火器研究 [J]. 含能材料, 2004, 12(1): 56-58.
YANG Z Y, CHU E Y, LÜ Q L, et al. Study on exploding foil igniter [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(1): 56-58.
- [3] 张玉若, 高艳, 负妮, 等. 双因素爆炸箔低能点火试验研究 [J]. 火工品, 2011(3): 6-9.
ZHANG Y R, GAO Y, YUN N, et al. Dual-factor experimental study on low-energy ignition of exploding foil [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2011(3): 6-9.
- [4] 荣光富, 沈建根, 袁冬琴, 等. 硼系高能点火药对太安燃烧转爆轰的影响 [J]. 爆破器材, 2007, 36(2): 13-15.
RONG G F, SHEN J G, YUAN D Q, et al. A study on the combustion of B-based high-energy ignition composition transformed to the detonation of PETN [J]. Explosive Materials, 2007, 36(2): 13-15.
- [5] 余明祥, 徐乃成, 王本河, 等. 硼/硝酸钾点火药燃烧转爆轰的应用 [J]. 火工品, 2008(6): 15-17.
YU M X, XU N C, WANG B H, et al. The application of DDT of B/KNO₃ ignition powder [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(6): 15-17.
- [6] 张全可, 刘传新, 赵洪海, 等. 有色发烟器材用新型点火装置的设计 [J]. 火工品, 2010(2): 18-20.
ZHANG Q K, LIU C X, ZHAO H H, et al. Design on a new ignition device used in color smoke generator [J].

- Initiators & Pyrotechnics, 2010(2): 18-20.
- [7] 杨振英, 梁国英, 陈静, 等. 低能爆炸箔点火器研究[J]. 含能材料, 2010, 18(4): 419-422.
- YANG Z Y, LIANG G Y, CHEN J, et al. Study on low energy exploding foil igniter [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(4): 419-422.
- [8] 章文义. 新型硼基点火药的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- [9] 劳允亮, 盛涤伦. 火工药剂学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
- LAO Y L, SHENG D L. The science of initiating explosive and relative composition [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011.
- [10] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- WANG K M. Engineering of initiators and pyrotechnics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [11] 项仕标. 激光点火原理与实践[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004.
- [12] 王凯民, 温玉全. 军用工工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- WANG K M, WEN Y Q. Design of initiators and pyrotechnics for weapon systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [13] 毕文辉, 刘爽, 严楠. 密闭爆发器在做功火工品输出性能测试中的应用[J]. 计量与测试技术, 2008, 35(7): 1-3.
- BI W H, LIU S, YAN N. Application of closed bomb in testing output performance for explosive actuated devices [J]. Metrology & Measurement Technique, 2008, 35(7): 1-3.
- energetic 3D metal-organic framework as a promising primary explosive [J]. Angewandte Chemie, 2016, 128(18): 5655-5657.
- [47] 高耸松, 谢兴兵, 王元和. 多种绿色起爆药的合成方法研究进展[J]. 爆破器材, 2022, 51(2): 1-10.
- GAO S S, XIE X B, WANG Y H. Research progress on the synthesis of various green primary explosives [J]. Explosive Materials, 2022, 51(2): 1-10.
- [48] QU Y Y, ZENG Q, WANG J, et al. Furazans with azo linkages; stable CHNO energetic materials with high densities, highly energetic performance, and low impact and friction sensitivities [J]. Chemistry: A European Journal, 2016, 22(35): 12527-12532.
- [49] LIM C H, KIM T K, KIM K H, et al. Synthesis and characterization of bisnitrofurazanofuroxan [J]. Bulletin of the Korean Chemical Society, 2010, 31(5): 1400-1402.
- [50] PAGORIA P, ZHANG M X, RACOVEANU A, et al. 3-(4-Amino-1, 2, 5-oxadiazol-3-yl)-4-(4-nitro-1, 2, 5-oxadiazol-3-yl)-1, 2, 5-oxadiazole [J]. Molbank, 2014, 2014(2): M824.
- [51] CHAVEZ D E, PARRISH D A, LEONARD P. The synthesis and characterization of a new furazan heterocyclic system [J]. Synlett, 2012, 23(14): 2126-2128.
- [52] 王伯周, 李辉, 李亚南, 等. 呋唑醚含能化合物研究进展[J]. 含能材料, 2012, 20(4): 385-390.
- WANG B Z, LI H, LI Y N, et al. Review on energetic compounds based on furoxanyl ether [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(4): 385-390.
- [53] YOUSSEF S. Recent trends in the chemistry of pyridine N-oxides [J]. Arkivoc, 2001(1): 242-268.
- [54] 范艳洁, 王伯周, 来蔚鹏, 等. 3,3'-二氰基二呋唑基醚(FOF-2)的合成、表征及量子化学研究[J]. 有机化学, 2009, 29(4): 614-620.
- FAN Y J, WANG B Z, LAI W P, et al. Synthesis, characterization and quantum chemistry study on 3, 3'-dicyanodifurazanyl ether (FOF-2) [J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2009, 29(4): 614-620.
- [55] WANG B Z, ZHAI L J, LIAN P, et al. A novel synthesis of 3, 3'-bis (fluorodinitromethyl) difurazanyl ether (FOF-13) [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(6): 884-886.
- 王伯周, 翟连杰, 廉鹏, 等. 3, 3'-二(氟偕二硝基)二呋唑基醚(FOF-13)新法合成[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 884-886.
- [56] 周彦水, 王伯周, 王锡杰, 等. 双呋唑并[3, 4-b: 3', 4'-f]氧化呋唑并[3'', 4''-d]氧杂环庚三烯的合成[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 137-138.
- [57] 王锡杰, 陈松, 廉鹏, 等. 三呋唑并氧杂环庚三烯便捷新法合成及量子化学研究[J]. 高校化学工程学报, 2020, 34(3): 848-854.
- WANG X J, CHEN S, LIAN P, et al. New facile synthesis and quantum chemistry studies of trifurazanooxacycloheptatriene [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2020, 34(3): 848-854.

(上接第 13 页)