

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.03.003

# 汽车安全气囊用电点火药电感度研究<sup>\*</sup>

程秀莲<sup>①</sup> 许赵伟<sup>①②</sup>

①沈阳理工大学装备工程学院(辽宁沈阳,110159)

②陕西庆华汽车安全系统有限公司(陕西西安,710025)

[摘 要] 用电点火管的 0.01% 发火电流  $I_{0.01\%}$  和 99.99% 发火电流  $I_{99.99\%}$  表征汽车安全气囊用电点火药的电感度。研究了共沉淀物中苦味酸钾(KP)与高氯酸钾( $\text{KClO}_4$ )质量比对电点火管 1.2 A、2 ms 和 0.4 A、10 s 发火性能的影响。实验结果表明,KP 与  $\text{KClO}_4$  质量比为 4.0 : 6.0 的共沉淀物,满足美国汽车行业 USCAR—28 标准规定的电点火管的功能指标。筛选了氟橡胶为电点火药的黏合剂,石墨为电点火药的惰性添加剂,并通过升降法测试了优化配方的电感度, $I_{0.01\%} = 0.458 \text{ A}$ 、 $I_{99.99\%} = 0.851 \text{ A}$ ,满足电点火管的安全性和可靠性指标。共沉淀物中 KP 与  $\text{KClO}_4$  质量比为 4.0 : 6.0,外加质量分数 3% 的氟橡胶和适量石墨,可制备一种能满足汽车安全气囊用电点火管安全性和可靠性要求的电点火药。

[关键词] 苦味酸钾;高氯酸钾;电点火管;升降法;电感度

[分类号] TD235.2+2

## Study on Inductance Degree of Electric Ignition Powder in Automobile Airbag

CHENG Xiulian<sup>①</sup>, XU Zhaowei<sup>①②</sup>

①College of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University (Liaoning Shenyang, 110159)

②Shaanxi Qinghua Vehicle Safety Systems Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710025)

[ABSTRACT] The inductance of electric ignition powder for automobile airbag was indicated by 0.01% ignition current  $I_{0.01\%}$  and 99.99% ignition current  $I_{99.99\%}$  of electric ignition tube. The effect of the mass ratio of potassium picrate (KP) to potassium perchlorate ( $\text{KClO}_4$ ) in coprecipitation on the ignition performance of electric ignition tube at 1.2 A, 2 ms and 0.4 A, 10 s was studied. The results show that mass ratio of KP to  $\text{KClO}_4$  in the coprecipitation is 4.0 : 6.0, which meets the functional index of electric ignition tube specified in USCAR—28 standard of automobile industry in American. Fluororubber was selected as the binder of electric ignition powder and graphite as the inert additive of electric ignition powder. Inductance degree of the optimized formula was tested by lifting method, indicating  $I_{0.01\%} = 0.458 \text{ A}$  and  $I_{99.99\%} = 0.851 \text{ A}$ , which meets the safety and reliability indexes of electric ignition tube. When the mass ratio of KP to  $\text{KClO}_4$  in the coprecipitation is 4.0 : 6.0, add 3% (mass fraction) fluororubber and an appropriate amount of graphite, and it is an electric ignition powder that meets the safety and reliable performance of the electric ignition tube in automobile airbag.

[KEYWORDS] potassium picrate; potassium perchlorate; electric ignition tube; lifting method; inductance degree

### 引言

汽车安全气囊是一种被动安全装置<sup>[1]</sup>。汽车发生碰撞时,气囊瞬间充满,形成巨大的向上冲击力,在司乘人员和车体之间形成保护层,达到保护司乘人员的目的<sup>[2]</sup>。交通事故频发,安全气囊已成为汽车标准配件之一。但在实际交通事故中,常常会

出现安全气囊无法打开或者低速碰撞时打开的情况,给司乘人员带来严重伤亡和巨大损失<sup>[3]</sup>。汽车低速碰撞时,国外安全气囊起爆率约 5%,国内的超过 30%,与国际水平差距较大<sup>[4]</sup>。

气体发生器是安全气囊的核心部件之一,电点火管<sup>[5]</sup>是其首发元件,要求电点火管作用迅速、安全可靠。电点火管的性能由电点火药和桥丝性能决定;因此,研究汽车安全气囊用电点火药的电感度具

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-11-03  
第一作者:程秀莲(1965-),女,硕士,教授,主要从事含能材料和涂料、黏合剂等精细化工的研究。E-mail:chengxiulian001@163.com

有重要意义。

黑火药<sup>[3]</sup>、硼-硝酸钾<sup>[2,6]</sup>、镁-过氧化钡<sup>[6]</sup>和5-氨基四唑体系的点火药<sup>[2]</sup>等都可以作为电点火管的电点火药,但都存在着各自的优点和缺点。

苦味酸钾(KP)的热分解温度为332.5℃<sup>[7]</sup>,热安定性好,机械感度低,不易吸湿,容易干燥,与桥丝的相容性好,长期储存不会对桥丝造成腐蚀<sup>[8]</sup>,被广泛用于引火药剂中<sup>[9-12]</sup>。高氯酸钾(KClO<sub>4</sub>)的热分解温度为610.0℃<sup>[8]</sup>,稳定性高,不易引起爆炸,微溶于水,不易吸湿<sup>[13]</sup>,是点火药中常用的氧化剂<sup>[14]</sup>。

以KP与KClO<sub>4</sub>为主要成分的电点火药,有望成为性能优异的汽车安全气囊用电点火药。KP和KClO<sub>4</sub>共沉淀物的成功制备<sup>[15]</sup>,提高了KP和KClO<sub>4</sub>混合的均匀程度,保证了电点火药质量的一致性,并简化了制备工艺。KP和KClO<sub>4</sub>共沉淀电点火药具有安全、污染较小、机械感度低等特点<sup>[16]</sup>。

研究了以KP-KClO<sub>4</sub>共沉淀物为主体,用于汽车安全气囊中的电点火药配方,制备出了安全性和可靠性高的电点火管。

## 1 实验部分

### 1.1 主要仪器与药品

安全气囊点爆实验系统,HUDE型,上海威测环保科技有限公司。

KP-KClO<sub>4</sub>共沉淀物,陕西庆华汽车安全系统有限公司化工分厂。

### 1.2 电点火药的制备

将KP-KClO<sub>4</sub>共沉淀物和适量添加剂混匀,再加入一定量的黏合剂混匀,造粒,干燥,过筛。

### 1.3 电点火管的制备

- 1)调节实验室温度为16~22℃,湿度≥60%。
- 2)先将90 mg药缓慢倒入管壳中,压药,再将45 mg药缓慢倒入管壳中。
- 3)把电阻为1.86~2.12 Ω的桥丝电极塞放入管壳中,压合。
- 4)将电极塞与管壳进行焊接。
- 5)用注塑机注塑成型,即为电点火管。
- 6)检测,绝缘电阻不小于100 MΩ为合格。

### 1.4 电点火药的发火原理

电点火药的活化能、频率因子、反应热、密度、比热容、导热系数、桥丝的电阻、电流等因素都影响电点火药的发火过程。宏观上,其原理为利用电流通过桥丝时放出的热量加热装在其中的电点火药<sup>[17]</sup>,

当温度达到发火温度时,电点火药被点燃。忽略向环境散热和桥丝自身升温消耗的热量,有

$$I^2Rt = cm(T - T_0)。(1)$$

式中: $I$ 为电流,A; $R$ 为桥丝电阻,Ω; $t$ 为通电时间,s; $c$ 为电点火药比热容,J/(g·℃); $m$ 为电点火药质量,g; $T$ 为电点火药发火温度,K; $T_0$ 为电点火药初始温度,K。

通常对 $I$ 、 $t$ 、 $R$ 和 $m$ 都有一定的要求, $T_0$ 为环境温度,不可调整。可以设计的只有 $c$ 和 $T$ 两个参数。

宏观上,表示安全性的0.01%发火电流 $I_{0.01\%}$ 和表示可靠性的99.99%发火电流 $I_{99.99\%}$ 都主要决定于式(1)中 $T$ 的高低,二者影响因素相同。用户期待 $I_{0.01\%}$ 尽量大些,降低意外发火的概率;同时期待 $I_{99.99\%}$ 尽量小些,提高发火可靠性。通过筛选电点火药的组分,调整各组分间的配比,可获得发火温度适中的电点火药。

微观上,电点火药发火遵循热点发火机理,某些点首先达到发火温度或热分解温度,发生放热反应,迅速加热周围药剂使电点火药发火。提高电点火管中电点火药化学组分和密度的均一性,提高桥丝电阻的均一性,可使热点在更大的电流或更长的通电时间下才产生,可提高 $I_{0.01\%}$ ;提高电点火药和桥丝电阻质量的均一性,可同时产生更多热点,从而降低 $I_{99.99\%}$ 。

### 1.5 电点火药电感度的测定

美国汽车行业USCAR—28标准规定:电点火管的安全电流大于0.4 A(持续时间10 s);全发火电流小于1.2 A(持续时间2 ms),均采用勃罗西登法测定<sup>[18]</sup>。

#### 1.5.1 测定单个电点火管的电感度

将电点火管装配在10 cm<sup>3</sup>密闭爆发器中,用HUDE型安全气囊点爆实验系统,测定电点火管的发火性能。

##### 1.5.1.1 1.2 A、2 ms 电点火管发火性能的测定

对电点火管通以1.2 A的电流,持续时间为2 ms,读取并记录点火时间 $T_t$ 、上升时间 $T_r$ 、峰值压力 $p_m$ 等数据。

##### 1.5.1.2 0.4 A、10 s 电点火管发火性能的测定

对电点火管通以0.4 A的电流,持续时间为10 s,观察电点火管的发火状态。若电点火管在10 s内发火,则电点火管的安全电流不满足指标要求;若电点火管未发火,则HUDE型测试系统会自动持续增加电流,直到电点火管发火为止。

##### 1.5.2 升降法测定电点火管的电感度

在电流大于0.4 A、通电持续1 s条件下实验,

并计算置信水平为 0.95 时电点火管 50.00% 和 0.01% 的发火电流。

在电流小于 1.2 A、通电持续 2 ms 条件下实验,并计算置信水平为 0.95 时电点火管 50.00% 和 99.99% 的发火电流。

2 结果与讨论

2.1 KP 与 KClO<sub>4</sub> 质量比的选择

KP 与 KClO<sub>4</sub> 的热分解温度相差 270 ℃ 以上;且 KP-KClO<sub>4</sub> 共沉淀物的热分解峰比 KP 的热分解峰滞后了 6 ℃,比 KClO<sub>4</sub> 的热分解峰提前了 241 ℃<sup>[15]</sup>。说明共沉淀物中,KP 与 KClO<sub>4</sub> 两者的热分解会相互作用,对 KClO<sub>4</sub> 有显著的促进作用。因此,调整共沉淀物中 KP 与 KClO<sub>4</sub> 的质量比,可以调整电点火药的发火温度,改变电点火管的电感度。

2.1.1 1.2 A、2 ms 条件下共沉淀物中 KP 与 KClO<sub>4</sub> 质量比对电点火管全发火性能的影响

用不同组分质量比的 KP-KClO<sub>4</sub> 共沉淀物各制备 10 个电点火管,测定 1.2 A、2 ms 时的全发火性能,见表 1。

点火时间  $T_T$  为从通电时刻起到发火点时刻的时间。上升时间  $T_r$  为从通电时刻起到出现闪光时刻或压力开始增加时刻的时间。 $T_T$  和  $T_r$  决定电点火管作用速度,峰值压力  $p_m$  决定电点火管的点火能力,决定汽车安全气囊的可靠性。

由表 1 中实验数据可见,当 KP 与 KClO<sub>4</sub> 质量比  $\geq 3.0 : 7.0$  时,1.2 A、2 ms 条件下电点火管全发火性能同时满足  $T_T < 2\text{ ms}$ 、 $T_r < 2\text{ ms}$ 、 $4.0\text{ MPa} < p_m < 6.5\text{ MPa}$  的功能指标要求。

$T_T$  和  $T_r$  都随着 KP-KClO<sub>4</sub> 共沉淀物中 KP 含量的减小而增大, $T_T$  所受影响更大。是由于 KP 比 KClO<sub>4</sub> 的热分解温度低 277.5 ℃;且 KP 与 KClO<sub>4</sub> 共沉淀后,KP 的热分解峰值温度升高。 $T_r$  实质上为从通电到有气体产生的时间,即达到 KP 的起始热分

解温度的时间。KP 起始热分解温度为 303.0 ℃,KP 与 KClO<sub>4</sub> 共沉淀起始热分解温度为 304.7 ℃<sup>[15]</sup>。共沉淀物中,KP 的起始分解温度受 KClO<sub>4</sub> 影响极小,因此, $T_r$  基本不变。

$p_m$  随着 KP 含量的减小而减小,这是由于  $p_m$  大小由温度和气体总物质的量决定。随着 KP 含量的减小,KP 与 KClO<sub>4</sub> 反应热随之减小,温度随之降低。每克 KP 分解产生 0.024 mol 气体,每克 KClO<sub>4</sub> 分解产生 0.014 mol 气体;且 KClO<sub>4</sub> 分解产生的部分 O<sub>2</sub> 与 KP 分解产生的 CO 和 N<sub>2</sub> 反应后,体系气体总物质的量减小;因此,随着 KP 含量的减小,KP 与 KClO<sub>4</sub> 体系生成气体物质的量随之减小。综合温度和气体物质的量两种因素, $p_m$  随着 KP 含量的减小而减小。

2.1.2 0.4 A、10 s 条件下共沉淀物中 KP 与 KClO<sub>4</sub> 质量比对电点火管发火率的影响

用不同组分质量比的 KP-KClO<sub>4</sub> 共沉淀物各制备 10 个电点火管,测定 0.4 A、10 s 条件下的发火率,见表 2。由表 2 中实验数据可见,当共沉淀物中  $m(\text{KP}) : m(\text{KClO}_4) \leq 4.0 : 6.0$  时,满足电流为 0.4 A、通电时间为 10 s、发火率为 0 的要求。与表 1 中  $T_T$  随着 KP 含量的减小而增大的原因相同。

综合表 1 和表 2 结论,共沉淀物中, KP 与 KClO<sub>4</sub> 质量比为 3.0 : 7.0 ~ 4.0 : 6.0 时,可同时满足 1.2 A、2 ms 和 0.4 A、10 s 条件下对电点火管的性能要求。由表 1 可见; $m(\text{KP}) : m(\text{KClO}_4) = 4.0 : 6.0$  时性能指标优于  $m(\text{KP}) : m(\text{KClO}_4) = 3.0 : 7.0$  的情况;因此,共沉淀物中 KP 与 KClO<sub>4</sub> 的较佳质量比定为 4.0 : 6.0,其氧差为 12.09 g,添加适量的黏合剂等可燃剂可使氧差趋于 0。

2.2 黏合剂的选择

气体发生器用点火药储存期为 10~15 a<sup>[19]</sup>。因此,要求黏合剂具有良好的储存稳定性。用于汽车安全气囊中的电点火管要求通 0.4 A 的电流、持续 10 s 不发火,以保证汽车安全气囊在低速碰撞时不

表 1 1.2 A、2 ms 条件下,共沉淀物中 KP 与 KClO<sub>4</sub> 质量比对电点火管全发火性能的影响

Tab. 1 Effect of mass ratio of potassium picrate to potassium perchlorate in coprecipitation on full ignition performance of electric ignition tube under the conditions of 1.2 A and 2 ms

| $m(\text{KP}) : m(\text{KClO}_4)$ | $T_T/\text{ms}$    |                    |             |      | $T_r/\text{ms}$    |                    |             |      | $p_m/\text{MPa}$   |                    |             |      |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|-------------|------|--------------------|--------------------|-------------|------|--------------------|--------------------|-------------|------|
|                                   | $T_{T\text{ max}}$ | $T_{T\text{ min}}$ | $\bar{T}_T$ | 标准偏差 | $T_{r\text{ max}}$ | $T_{r\text{ min}}$ | $\bar{T}_r$ | 标准偏差 | $p_{m\text{ max}}$ | $p_{m\text{ min}}$ | $\bar{p}_m$ | 标准偏差 |
| 7.0 : 3.0                         | 0.67               | 0.59               | 0.63        | 0.03 | 0.41               | 0.38               | 0.39        | 0.01 | 6.53               | 6.28               | 6.39        | 0.07 |
| 4.0 : 6.0                         | 0.91               | 0.83               | 0.86        | 0.04 | 0.46               | 0.41               | 0.43        | 0.02 | 6.15               | 5.74               | 5.89        | 0.12 |
| 3.0 : 7.0                         | 1.10               | 1.02               | 1.06        | 0.03 | 0.52               | 0.47               | 0.49        | 0.01 | 5.75               | 4.76               | 5.28        | 0.30 |
| 2.5 : 7.5                         | 2.64               | 0.79               | 1.62        | 0.69 | 0.50               | 0.41               | 0.48        | 0.04 | 5.36               | 4.85               | 5.04        | 0.08 |

表2 0.4 A、10 s 条件下,共沉淀物中 KP 与 KClO<sub>4</sub> 质量比对电点火管发火率的影响

Tab.2 Effect of mass ratio of potassium picrate to potassium perchlorate in coprecipitation on ignition rate of electric ignition tube under the conditions of 0.4 A and 10 s

| $m(\text{KP}):m(\text{KClO}_4)$ | 发火个数 | 发火率/% |
|---------------------------------|------|-------|
| 7.0:3.0                         | 6    | 60    |
| 5.0:5.0                         | 2    | 20    |
| 4.0:6.0                         | 0    | 0     |
| 3.0:7.0                         | 0    | 0     |

打开。因此,要求黏合剂与 KP-KClO<sub>4</sub> 共沉淀物的热分解温度相近。若黏合剂热分解温度偏低,则可降低电点火药的发火电流,严重时导致电点火管安全性不合格。

常用的点火药黏合剂有氟橡胶、酚醛树脂、虫胶、硝化棉等<sup>[20]</sup>。由于每个虫胶分子中含有 1 个自由的羧基、3 个酯键、5 个羟基以及 1 个醛基,会使虫胶发生自发的老化或聚合<sup>[21]</sup>,储存稳定性较差。硝化棉热分解的起始温度为 454 K(约 181 ℃),远低于 KP-KClO<sub>4</sub> 共沉淀物的热分解温度;且硝化棉中的热敏感性基团容易引发自催化分解反应,给含有硝化棉的含能材料的运输和储存带来了很大的挑战<sup>[22]</sup>。酚醛树脂起始分解温度 135 ℃<sup>[23]</sup>,远低于 KP-KClO<sub>4</sub> 共沉淀物的热分解温度。因此,上述 3 种常用点火药黏合剂不适合作为汽车安全气囊中电点火管用点火药的黏合剂。聚偏氟乙烯中 C—F 键能大,热分解温度高达 316 ℃<sup>[24]</sup>,与 KP-KClO<sub>4</sub> 共沉淀物的热分解温度相近。聚偏氟乙烯分子无反应活性高的官能团,具有优异的储存稳定性。以聚偏氟乙烯为主成分的氟橡胶,可溶于低分子量的酮类、酯类等溶剂<sup>[6]</sup>;因此,选用此类氟橡胶溶液做为汽车安全气囊中电点火管用点火药的黏合剂。

当外加质量分数6%的氟橡胶黏合剂时,药剂烘干后,颗粒间有细小絮状丝;当外加质量分数2%~

4%的氟橡胶黏合剂时,比较容易造粒,颗粒的均匀性、流散性较好。因此,外加黏合剂质量分数范围为 2%~4%。

共沉淀物中,KP 与 KClO<sub>4</sub> 的质量比为 4.0:6.0,分别外加氟橡胶黏合剂质量分数为 2%、3%、4%,制备电点火药;并装配电点火管各 10 发,测定其性能,都能满足汽车安全气囊对电点火管的发火性能要求。

2.3 惰性添加剂的选择

添加惰性物质可提高电点火管 0.01% 发火电流,增强电点火管的安全性。电点火药常用的惰性添加物质主要有石墨、钨粉、硅藻土、铝粉。向 KP 与 KClO<sub>4</sub> 质量比为 4.0:6.0 的共沉淀物中外加质量分数 3% 的氟橡胶黏合剂为基础配方,其氧差为 9.84 g。在基础配方中分别加入适量不同种类的惰性添加剂,每种添加剂各制备 10 个样品,测定 0.4 A、10 s 条件下电点火管的发火电流,见表 3。由表 3 中可见,0.4 A、10 s 条件下,硅藻土使发火电流分布范围的上、下限都有所降低。这是由于硅藻土中除含 SiO<sub>2</sub> 外,还含有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 等;铁氧化物对 KP 的热分解反应有催化作用<sup>[25]</sup>。而 MgO 的存在使 KClO<sub>4</sub> 分解反应加速。石墨和铝粉使发火电流分布范围的上、下限上升较大;这是由于石墨和铝粉的比热容和导热系数都较大,不利于热点的形成。在含铝药剂中,铝粉会提高药剂机械感度,使药剂制造过程中风险系数增加。因此,初步选定石墨为较佳的惰性添加剂。石墨还具有

良好的导电性能,可防止因静电导致的意外发火。制作 10 个石墨为惰性添加剂的样品,测定 1.2 A、2 ms 条件下电点火管的性能。实验结果表明,能满足安全气囊对电点火管性能的要求。因此,用升降法进一步准确测定以石墨为惰性添加剂制备的电点火管的 0.01% 和 99.99% 发火电流。

2.4 升降法测定电点火管发火性能

升降(UD)法实验的两个必备条件为实验条件

表3 0.4 A、10 s 条件下惰性添加剂及其对电点火管发火电流的影响

Tab.3 Effect of additives on ignition current of electric ignition tube the conditions of 0.4A and10s

| 惰性<br>添加剂 | 熔点/<br>℃    | 反应温度/<br>℃ | 比热容/<br>(kJ·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> ) | 导热系数/<br>(W·m <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> ) | I/A              |                  |
|-----------|-------------|------------|---|--|------------------|------------------|
|           |             |            |   |  | I <sub>max</sub> | I <sub>min</sub> |
| 无         |             |            |   |  | 0.522            | 0.502            |
| 石墨        | >3 600      | 600(氧化)    | 0.712(25 ℃)                                     | 160.00(0 ℃)                                    | 0.558            | 0.552            |
| 钨         | 3 380       | 400(氧化)    | 0.037(20 ℃)                                     | 151.10(20 ℃)                                   | 0.529            | 0.513            |
| 硅藻土       | 1 650~1 750 | (熔化,不反应)   | 0.920   | 0.15   | 0.514            | 0.497            |
| 铝粉        | 660         | 25(氧化)     | 0.879(20 ℃)                                     | 205.70(20 ℃)                                   | 0.560            | 0.539            |



可以等步长和实验结果呈正态分布<sup>[19]</sup>。具体步长、实验起始水平及分别在电流大于 0.4 A、通电 1 s 和电流小于 1.2 A、通电 2 ms 条件下电点火管是否发火等数据见表 4、表 5。表 4~ 表 5 中;0 表示未发火;1 表示发火。

经检验,实验结果符合正态分布,为有效实验。按文献[19]和文献[26]分别对表 4 和表 5 进行实验数据处理,结果见表 6。

由表6可知,所制备的电点火管 $I_{0.01\%}$  =0.458 A,比安全电流0.4 A高14%,安全性高; $I_{99.99\%}$  =0.891 A,比全发火电流 1.2 A 低 25%,可靠性高。

表 4 在电流大于 0.4 A、通电 1 s 条件下电点火管的发火情况

Tab. 4 Ignition of electric ignition tube when the current is greater than 0.4 A and it is energized for 1 s

| <i>I</i> /mA | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> | 7 <sup>#</sup> | 8 <sup>#</sup> | 9 <sup>#</sup> | 10 <sup>#</sup> | 11 <sup>#</sup> | 12 <sup>#</sup> | 13 <sup>#</sup> | 14 <sup>#</sup> | 15 <sup>#</sup> | 16 <sup>#</sup> | 17 <sup>#</sup> | 18 <sup>#</sup> | 19 <sup>#</sup> | 20 <sup>#</sup> | 21 <sup>#</sup> | 22 <sup>#</sup> | 23 <sup>#</sup> | 24 <sup>#</sup> | 25 <sup>#</sup> |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 540          |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 1               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 525          |                |                |                |                |                |                |                |                | 1              |                 |                 |                 |                 |                 | 0               |                 | 1               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 1               |
| 510          |                | 1              |                | 1              |                | 1              |                | 0              |                | 1               |                 | 1               |                 | 0               |                 |                 |                 | 1               |                 |                 |                 | 1               |                 | 0               |                 |
| 495          | 0              |                | 0              |                | 0              |                | 0              |                |                |                 | 0               |                 | 0               |                 |                 |                 |                 |                 | 1               |                 | 0               |                 | 0               |                 |                 |
| 480          |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 0               |                 |                 |                 |                 |                 |

| <i>I</i> /mA | 26 <sup>#</sup> | 27 <sup>#</sup> | 28 <sup>#</sup> | 29 <sup>#</sup> | 30 <sup>#</sup> | 31 <sup>#</sup> | 32 <sup>#</sup> | 33 <sup>#</sup> | 34 <sup>#</sup> | 35 <sup>#</sup> | 36 <sup>#</sup> | 37 <sup>#</sup> | 38 <sup>#</sup> | 39 <sup>#</sup> | 40 <sup>#</sup> | 41 <sup>#</sup> | 42 <sup>#</sup> | 43 <sup>#</sup> | 44 <sup>#</sup> | 45 <sup>#</sup> | 46 <sup>#</sup> | 47 <sup>#</sup> | 48 <sup>#</sup> | 49 <sup>#</sup> | 50 <sup>#</sup> |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 540          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 525          |                 | 1               |                 |                 |                 | 1               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 1               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 510          | 0               |                 | 1               |                 | 0               |                 | 1               |                 | 1               |                 |                 |                 | 1               |                 | 0               |                 | 1               |                 | 1               |                 | 1               |                 |                 |                 | 0               |
| 495          |                 |                 |                 | 0               |                 |                 |                 | 0               |                 | 1               |                 | 0               |                 | 0               |                 |                 |                 | 0               |                 | 0               |                 | 1               |                 | 0               |                 |
| 480          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 0               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 0               |                 |                 |

表 5 在电流小于 1.2 A、通电 2 ms 条件下电点火管的发火情况

Tab. 5 Ignition of electric ignition tube when the current is smaller than 1.2 A and it is energized for 2 ms

| <i>I</i> /mA | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> | 7 <sup>#</sup> | 8 <sup>#</sup> | 9 <sup>#</sup> | 10 <sup>#</sup> | 11 <sup>#</sup> | 12 <sup>#</sup> | 13 <sup>#</sup> | 14 <sup>#</sup> | 15 <sup>#</sup> | 16 <sup>#</sup> | 17 <sup>#</sup> | 18 <sup>#</sup> | 19 <sup>#</sup> | 20 <sup>#</sup> | 21 <sup>#</sup> | 22 <sup>#</sup> | 23 <sup>#</sup> | 24 <sup>#</sup> | 25 <sup>#</sup> |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 825          |                | 1              |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 810          | 0              |                | 1              |                |                |                | 1              |                | 1              |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 795          |                |                |                | 1              |                | 0              |                | 0              |                | 1               |                 | 1               |                 | 1               |                 | 1               |                 |                 |                 | 1               |                 | 1               |                 | 1               |                 |
| 780          |                |                |                |                | 0              |                |                |                |                |                 | 0               |                 | 0               |                 | 0               |                 | 1               |                 | 0               |                 | 0               |                 | 0               |                 | 0               |
| 765          |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 0               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |

| <i>I</i> /mA | 26 <sup>#</sup> | 27 <sup>#</sup> | 28 <sup>#</sup> | 29 <sup>#</sup> | 30 <sup>#</sup> | 31 <sup>#</sup> | 32 <sup>#</sup> | 33 <sup>#</sup> | 34 <sup>#</sup> | 35 <sup>#</sup> | 36 <sup>#</sup> | 37 <sup>#</sup> | 38 <sup>#</sup> | 39 <sup>#</sup> | 40 <sup>#</sup> | 41 <sup>#</sup> | 42 <sup>#</sup> | 43 <sup>#</sup> | 44 <sup>#</sup> | 45 <sup>#</sup> | 46 <sup>#</sup> | 47 <sup>#</sup> | 48 <sup>#</sup> | 49 <sup>#</sup> | 50 <sup>#</sup> |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 825          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | 1               |                 | 1               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 810          |                 | 1               |                 |                 |                 |                 |                 | 1               |                 |                 |                 |                 |                 | 0               |                 | 0               |                 | 1               |                 | 1               |                 | 1               |                 | 1               |                 |
| 795          | 0               |                 | 1               |                 | 1               |                 | 0               |                 | 1               |                 | 1               |                 | 0               |                 |                 |                 |                 |                 | 0               |                 | 0               |                 | 0               |                 | 1               |
| 780          |                 |                 |                 | 0               |                 | 0               |                 |                 |                 | 0               |                 | 0               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 765          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |

表 6 不同条件不同发火率下电点火管的发火电流

Tab. 6 Ignition current of electric ignition tube under different conditions and different ignition probabilities

| 电流大于 0.4 A、通电 1 s          |       |                           | 电流小于 1.2 A、通电 2 ms         |       |                            |
|----------------------------|-------|---------------------------|----------------------------|-------|----------------------------|
| <i>I</i> <sub>50.00%</sub> | 标准偏差  | <i>I</i> <sub>0.01%</sub> | <i>I</i> <sub>50.00%</sub> | 标准偏差  | <i>I</i> <sub>99.99%</sub> |
| 0.506                      | 0.013 | 0.458                     | 0.796                      | 0.015 | 0.851                      |

3 结论

1)能满足电流 1.2 A、通电 2 ms 时电点火管的 $T_T < 2\text{ ms}$ 、 $T_r < 2\text{ ms}$ 、 $4.0\text{ MPa} < p_m < 6.5\text{ MPa}$ , 电流 0.4 A、通电 10 s 时不发火的性能要求的汽车安全气囊用电点火药配方为 KP 与  $\text{KClO}_4$  质量比 3.0 : 7.0 ~ 4.0 : 6.0 的共沉淀物、质量分数 2% ~ 4% 的氟橡胶黏合剂、适量石墨。

2)电点火药的较佳配方为 KP 与  $\text{KClO}_4$  质量比 4.0 : 6.0 的共沉淀物、质量分数 3% 的氟橡胶黏合

剂、适量石墨。用其制备的电点火药装填的电点火管,通电 1 s,  $I_{0.01\%} = 0.458\text{ A}$ ; 通电 2 ms,  $I_{99.99\%} = 0.891\text{ A}$ 。

3) 用较佳配方电点火药制备的电点火管不发火电流比标准值高 14%, 发火电流比标准值低 25%。因此,用较佳配方电点火药制备的电点火管安全性和可靠性都较高。

参 考 文 献

[1] 周东明,蔡纯洁,江凯,等. 汽车安全气囊点火系统设计与实现[J]. 自动化与仪表,2008,23(8):54-57.  
ZHOU D M, CAI C J, JIANG K, et al. Design and realization of the firing system of the airbag system[J]. Automation & Instrumentation, 2008, 23(8):54-57.

[2] 刘亮,罗运强,张文龙,等. 安全气囊点火药点火性能的研究[J]. 当代化工,2013,42(10):1398-1400.  
LIU L, LUO Y Q, ZHANG W L, et al. Study on ignition property of ignition compositions for airbag[J]. Contemporary Chemical Industry, 2013, 42(10):1398-1400.

[3] 谷阳阳,牛增良,潘小龙. 国内汽车市场气囊起爆条件检测技术分析[J]. 汽车实用技术,2020(7):145-148.  
GU Y Y, NIU Z L, PAN X L. Analysis on detection technology of airbag ignition in domestic automobile market[J]. Automobile Applied Technology, 2020(7):145-148.

[4] 陈秀娟. 国内安全气囊起爆率超 30% [J]. 汽车观察, 2019(6):82-83.

[5] 孙建仪. 汽车安全气囊气体发生器电点火管的设计研究[J]. 爆破器材,2008,37(2):28-30.  
SUN J Y. Design of electric igniter for gas generator of airbag[J]. Explosive Materials, 2008, 37(2):28-30.

[6] 李玉平. 安全气囊用新型气体发生剂的研制[D]. 太原:中北大学,2010:35-36.  
LI Y P. The Study of a new gas generating composition for automobile safety airbag[D]. Taiyuan:North University of China, 2010:35-36.

[7] 陈春生. 采用苦味酸钾制造电引火元件的优越性探讨[J]. 企业技术开发(下半月):2014(10):67-68.

[8] 胡先云. 提高电引火药头发火精度的研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2015:11-12.  
HU X Y. Study on improving electrical fuse-head firing accuracy[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015:11-12.

[9] 孟丽娟,颜事龙,刘永敏,等. 一种苦味酸钾/高氯酸钾/硫化锑电引火药头的研制[J]. 爆破器材,2014,43(3):37-40.  
MENG L J, YAN S L, LIU Y M, et al. Development on the

electric fusehead containing potassium picrate/potassium perchlorate/antimony sulfide [J]. Explosive Materials, 2014, 43(3):37-40.

[10] 韦爱勇,王成瑞,肖正学,等. 苦味酸钾在电引火元件生产中的应用研究[J]. 安全与环境学报,2006,6(4):130-132.  
WEI A Y, WANG C R, XIAO Z X, et al. Trial use of potassium picrate for producing fuse head[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(4):130-132.

[11] 杨中毅. 苦味酸钾在弹性药头上的研究和探讨[J]. 当代化工,2015,44(1):53-54,59.  
YANG Z Y. Research and discussion on potassium picrate on elastic fuse-head [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(1):53-54,59.

[12] 周光辉. 苦味酸钾/铅丹硅系电引火药头的研究[J]. 煤矿爆破,2012(4):13-16.  
ZHOU G H. Study on the electric ignition head of potassium picrate/red lead-silicon type [J]. Coal Mine Blasting, 2012(4):13-16.

[13] 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 Huinan Vocational & Technical College, 2014, 14(4):9-12.

[14] 李玲霞,丁茂元,白伟利,等.  $\text{Al/KClO}_4$  点火药爆热测定的影响因素[J]. 火工品,2012(6):40-43.  
LI L X, DING M Y, BAI W L, et al. Study on factors influencing on explosion heat test of  $\text{Al/KClO}_4$  ignition powder[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(6):40-43.

[15] 陈振奎. 苦味酸钾与高氯酸钾共沉淀超细制备和性能研究[D]. 北京:北京理工大学,2015:12,66-69.  
CHEN Z K. The studies of super fining preparations and properties of potassium picrate and potassium perchlorate coprecipitation composite ignition[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015:12,66-69.

[16] 高婕. 分光光度法用于共沉淀点火药中苦味酸钾含量的测定[J]. 云南化工,2019,46(3):77-78.  
GAO J. Determination of potassium picrate ignition powder by spectrophotometry analysis[J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(3):77-78.

[17] 王鹏,杜志明. 含能材料电流点火感度的概率分布研究[J]. 含能材料,2008,16(3):272-276.  
WANG P, DU Z M. Probability distribution of current Sensitivity of Energetic materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(3):272-276.

[18] 陈保伟. 汽车乘员辅助约束系统用电点火器的研究[D]. 南京:南京理工大学,2008:9.

- [19] 王卫国. 汽车安全带预紧器用气体发生器的研究[D]. 南京:南京理工大学,2004:2-13.
- [20] 王文涛,黄寅生,李锦涛. 一种防水点火药的制备及其性能研究[J]. 爆破器材,2011,40(2):23-24,27.  
WANG W T, HUANG Y S, LI J T. Study on the preparation and performance of a waterproof ignition powder[J]. Explosive Materials, 2011, 40(2):23-24,27.
- [21] 赵世民,祝艳,唐辉. 虫胶的基本特性及应用[J]. 云南化工,2005,32(3):50-53,56.  
ZUAO S M, ZHU Y, TANG H. The basic character of shell-lac and its application[J]. Yunnan Chemical Technology, 2005, 32(3):50-53,56.
- [22] 赵杨,郑天,丁玲,等. 四种典型安定剂对硝化棉热安定性能的影响[J]. 含能材料,2021,29(11):1106-1114.  
ZHAO Y, ZHENG T, DING L, et al. Effects of four typical stabilizers on the thermal decomposition behavior of nitrocellulose[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(11):1106-1114.
- [23] 王菲,高丽娟,苏英杰,等. 酚醛树脂保温板热分解过程的  $\ln t$  法研究[J]. 化学研究与应用,2021,33(9):1811-1855.  
WANG F, CAO L J, SU Y J, et al. Study of  $\ln t$  for thermal decomposition process of phenolic resin insulation board[J]. Chemical Research and Application, 2021, 33(9):1811-1855.
- [24] 李红霞. 高介电 PVDF 基复合薄膜的制备与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016:2.  
LI H X. Study on fabrication and properties of PVDF matrix composite films with high dielectric properties[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016:2.
- [25] 谭惠平,薛金根. DSC 法研究高氯酸钾的催化热分解反应[J]. 中南林业科技大学学报,2007,27(3):114-116.  
TAN H P, XUE J G. Catalyzed thermal decomposition of potassium perchlorate[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2007, 27(3):114-116.
- [26] 刘自翎,劳允亮. 起爆药实验[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995:142-143.

(上接第 13 页)

- HE Z D, LIU Y P, HE L M, et al. Effects of ammonium nitrate on energy performance of gun propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(2):202-205.
- [12] 李大剑. 安全与环保是烟花爆竹转型发展的根本出路[J]. 湖南安全与防灾,2014(5):39-42.
- [13] WEI G B, MA P X. Structure and properties of nano-hydroxyapatite/polymer composite scaffolds for bone tissue engineering [J]. Biomaterials, 2004, 25(19):4749-4757.
- [14] PFATTEICHER A, KUGELSTATTER W, MEßMER A, et al. Foamed propellants with energetic binders [C]// Proceedings of 31st International Annual Conference of ICT. Pfintal, DE, 2000:111.
- [15] BÖHNLEINMAUß J, KRÖBER H, SCHEIDT B. Processing and manufacturing of foamed propellants [C]// Proceedings of 38th International Annual Conference of ICT. Pfintal, DE, 2007:104.
- [16] 应三九,徐复铭. 发射药超临界发泡微孔制备技术研究[J]. 兵工学报,2013,34(8):1028-1036.  
YING S J, XU F M. Research on supercritical fluid foaming technology for preparation of microcellular foamed propellants [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(8):1028-1036.
- [17] 吴文龙,丁亚军,应三九. 超临界二氧化碳在球扁药中的溶解性能研究[J]. 兵工学报,2018,39(10):1965-1970.  
WU W L, DING Y J, YING S J. Solubility of supercritical carbon dioxide in oblate spherical propellants [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(10):1965-1970.
- [18] 郭长平,李文祥,蔺向阳,等. 微气孔球扁药通孔结构的制备[J]. 火炸药学报,2012,35(1):69-72.  
GUO C P, LI W X, LIN X Y, et al. Preparation of through hole structure in micro-pores oblate spherical powder [J]. Chinese Journal of Propellants & Explosives, 2012, 35(1):69-72.
- [19] 蔺向阳,邵闪,李翰,等. 硝化棉基微孔球形药的结构控制研究[J]. 含能材料,2017,25(5):403-408.  
LIN X Y, SHAO S, LI H, et al. Structure controlling of nitrocellulose base ball propellant with micro-pores [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(5):403-408.
- [20] CAMERON N R. High internal phase emulsion templating as a route to well-defined porous polymers [J]. Polymer, 2005, 46:1439-1449.