**文章编号**：1000-5773(2013)01-0125-07

# 几种典型烟火药剂的动摩擦系数测算*

姜夕博，郭　耸，冯　淞，彭金华

（南京理工大学化工学院安全工程系，江苏南京　210094）

**摘要**：摩擦作用对烟火药剂的生产以及使用过程的安全性至关重要，而动摩擦系数是定量研究烟火药剂摩擦做功能力的关键参数。基于MGY-1型摆式摩擦仪的物理模型，结合数值计算方法，得到了测算动摩擦系数的方法。利用该方法测算了硝酸钾、镁铝合金粉及硫磺3种常用烟火药剂单质以及硝酸钾/镁铝合金粉及硝酸钾/硫磺两种混合物的动摩擦系数。结果表明：5种烟火药剂的动摩擦系数为一个范围值；在硝酸钾中加入镁铝合金粉和硫磺后，混合粉末的动摩擦系数较硝酸钾单质减小。从理论上对产生这两种现象的原因进行了分析。

**关键词**：烟火药剂；动摩擦系数；摆式摩擦仪；数值计算

**中图分类号**：TQ567　　**文献标识码**：A

## 1　引　言

我国是全球最大的烟花爆竹生产国和出口国，烟花出口量占世界烟花产品市场流通量的80%～90%。但是，长期以来我国烟花爆竹的安全生产技术基础十分薄弱，导致安全生产事故频发[1]。烟花爆竹药剂本身潜在的不安全性，尤其是对撞击、摩擦的敏感性是导致事故多发的主要原因[2]。这是因为在烟火药剂生产、运输以及使用过程中，经常会受到意外的撞击作用，在撞击过程中，烟火药剂内部颗粒以及药剂与容器之间不可避免地相互摩擦，摩擦产生的热量有可能瞬间积聚而引发爆炸[3-4]。可见，摩擦作用同时存在于撞击及摩擦过程中[5]，对烟火药剂的生产和使用过程的安全性至关重要。加强烟火药剂在摩擦作用下的定量研究和精确控制，是安全、高效利用烟火药剂的保障。

对烟火药剂摩擦作用的定量研究首先需要判断其摩擦做功能力，而动摩擦系数是衡量摩擦做功能力的关键参数。目前，常用的测定动摩擦系数的方法有霍普金森杆法、旋转管道法、压力剪切盘法等。其中，霍普金森杆法[6-7]利用脉冲信号计算试样的摩擦系数，要求试样为圆盘状，以保证试样与实验设备的紧密配合；旋转管道法[8]利用管道的高速旋转带动颗粒状试样运动，通过传感器记录粒子经过的时间，进而计算摩擦系数，该方法要求颗粒粒径在1～10 mm；在材料成型及材料加工方面，还可利用压力剪切盘法[9-10]测定金属试件的摩擦系数。现有的关于摩擦作用下的烟火药剂研究主要集中在一定实验条件下的摩擦感度，进而比较不同药剂在摩擦作用下的相对危险程度[11-13]。例如：谭爱喜等人[14]分析了温度、湿度和粒度对3种烟火药剂摩擦感度的影响；Sivapirakasam等人[15]详细讨论了闪光烟火药剂在加工及储存过程中应注意的撞击和摩擦现象。到目前为止，几乎没有关于烟火药剂摩擦过程的定量研究，也未见到烟火药剂动摩擦系数相关数据的报道。究其原因，主要是：其一，影响动摩擦系数的因素众多，致使设备测定的动摩擦系数的重复性很差[7]，而且实际使用的烟火药剂大部分为粉状形态，受粉末颗粒形状、粒径、堆积密度等因素影响，导致动摩擦系数的测定非常困难；其二，烟火药剂为具有爆炸

* **收稿日期**：2012-07-02；**修回日期**：2012-12-14

**基金项目**：国家自然科学基金(51104091)

**作者简介**：姜夕博(1985－)，女，博士研究生，主要从事爆炸力学及火药安全性研究. E-mail：jiangxibonj@163.com

**通讯作者**：郭　耸(1982－)，男，博士，讲师，主要从事工业热安全研究. E-mail：varshelf@gmail.com

性的含能材料，使用现有的动摩擦系数测定设备进行测量时，一旦发生燃烧或爆炸反应，不仅对仪器设备造成损坏，甚至可能导致人员伤亡。以上两点因素共同导致了烟火药剂的动摩擦系数数据非常有限。

为了合理准确、安全可靠地测算烟火药剂的动摩擦系数，本研究将理论分析与数值计算相结合，以获得计算烟火药剂与钢之间动摩擦系数的计算方法；利用该方法计算 3 种常用粉状烟火药剂单质以及两种烟火药剂混合物的动摩擦系数，为进一步预测烟火药剂在摩擦作用下的危险程度奠定基础。

## 2 动摩擦系数测定方法

### 2.1 测定原理

实验采用 MGY-1 型摆式摩擦仪，如图 1、图 2 所示。摆锤从一定摆角下落，击中击杆，击杆推动上滑柱在试样表面运动一定距离。在运动过程中，上滑柱与试样之间发生滑动摩擦，因此试样的摩擦做功能力可以用上滑柱的移动距离表示；同时，摩擦做功能力还可以根据含有试样摩擦系数的摩擦做功计算公式求得。由此可建立移动距离与摩擦系数之间的对应关系。



(a) The overall photograph　　(b) After the pendulum dropped down

图 1 实验设备实物图

Fig. 1 Photograph of experimental equipment

实验中利用专门测量间隙距离的塞尺，测量上滑柱移动距离。具体方法为：在加压、摆锤未下落前，测量击杆端面与仪器壁面的距离；摆锤下落后，再次测量击杆端面与仪器壁面的距离；两者差值即为上滑柱实际移动距离。

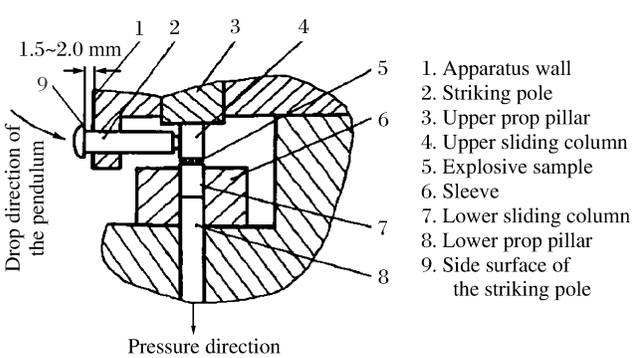



图 2 MGY-1 型摆式摩擦仪示意图

Fig. 2 Sketch of MGY-1 friction device

### 2.2 理论建模与计算

使用摆式摩擦仪测量时，将试样放在上、下滑柱之间，通过油压机加压，上、下滑柱顶在上、下顶柱之间，以使试样承受一定压力。将摆锤悬挂到所需摆角后释放，在未击中击杆前，摆锤受到重力以及转轴反作用力的共同作用。摆锤击中击杆后，连同击杆与上滑柱共同运动，上滑柱在试样表面发生滑动摩擦，直至上滑柱停止运动，则上滑柱的运动距离 $s$ 与压力、摆角以及试样的动摩擦系数有关。为了简化运算，做如下假设：(1) 忽略空气阻力及转轴摩擦力；(2) 炸药在下滑柱表面分布均匀，且外力在炸药表面平均分布；(3) 摆体撞击击杆后仍沿水平方向运动，且不会反弹；(4) 忽略摆体、击杆以及上滑柱内部的弹性压缩，三者无形变。由摆锤运动方程、动量守恒定律和能量定理，可求出任意时刻($t$)上滑柱的移动距离 $s$，即

$$\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=\left\{-\frac{2\mu(p+mg)}{\pi R^2(m_\mathrm{p}+m+m_\mathrm{b})}\left[\left(\frac{\pi}{2}+2\right)R^2s+\left(\frac{\pi}{2}-\frac{5}{3}\right)R^3-s^2R\right]+\frac{2m_\mathrm{b}^2gl_\mathrm{b}(1-\cos\theta)}{(m_\mathrm{p}+m+m_\mathrm{b})^2}-\frac{2\mu_\mathrm{s}p}{m_\mathrm{p}+m+m_\mathrm{b}}\right\}^{1/2} \tag{1}$$

式中:$m_\mathrm{b}$ 为摆锤质量(kg),$m_\mathrm{p}$ 为击杆质量(kg),$m$ 为滑柱质量(kg),$R$ 为滑柱半径(m),$\theta$ 为摆角,$g$ 为重力加速度,$p$ 为表压(MPa),$l_\mathrm{b}$ 为质心与转轴中心之间的距离(m),$\mu$ 为试样与钢之间的动摩擦系数,$\mu_\mathrm{s}$ 为上顶柱与上滑柱之间的动摩擦系数。

(1)式中摆锤质量等设备参数都是已知量,如果能够测定上滑柱的运动距离 $s$,就只剩下试样与钢之间的动摩擦系数 $\mu$ 一个未知量,问题迎刃而解。将(1)式用改进的 Euler 算法求解,并采用软件编程,得到用于计算摩擦系数的计算程序。在计算程序中输入摩擦系数的预估值,由程序计算出相应的上滑柱运动距离,将该运动距离与实测运动距离进行比较,如果不相同,则改变动摩擦系数,直至计算得到的运动距离与实测值相符,则该动摩擦系数值即为试样的动摩擦系数。

### 2.3 方法验证

在测试过程中,除上滑柱与试样之间发生滑动摩擦外,上滑柱与上顶柱之间也发生滑动摩擦。如果上、下滑柱间未放置试样,那么上、下滑柱将直接接触发生摩擦,由于上、下滑柱和上顶柱均为同种材料的钢,因此此时 $\mu=\mu_\mathrm{s}$。考虑到钢与钢之间的动摩擦系数已有测定值,所以可以据此验证理论模型的可靠性。

为此,在摆角和表压分别为 50°、3.92 MPa 和 50°、4.90 MPa 两种条件下,进行未放试样的空白实验,每种条件进行 10 次实验,实验结果如表 1 所示。表 1 中:$s_\mathrm{exp}$ 和 $s_\mathrm{cal}$ 分别为上滑柱移动距离的实测值和计算值。从表 1 中的数据可以看出,两种实验条件下钢与钢之间的动摩擦系数分别为 0.16 和 0.17,与已报道的钢与钢之间在无润滑情况下的动摩擦系数(0.15)[16]吻合很好,证明本研究的测算结果准确可靠,可进一步用于测算烟火药剂的动摩擦系数。此外,表 1 中的结果还为进一步测算试样的动摩擦系数做好准备,即在以上两种实验条件下测算试样的动摩擦系数时,上滑柱与上顶柱之间的动摩擦系数应分别取为 0.16 和 0.17。

**表 1 两种实验条件下钢与钢之间的动摩擦系数**

**Table 1 Dynamic friction coefficients between steel and steel under two experimental conditions**

| $\theta$/(°) | $p$/(MPa) | $s_\mathrm{exp}$/(mm) | $s_\mathrm{cal}$/(mm) | Friction coefficient between steel and steel |
|---|---|---|---|---|
| 50 | 3.92 | 0.6 | 0.58 | 0.16 |
| 50 | 4.90 | 0.4 | 0.41 | 0.17 |

## 3 几种典型烟火药剂的动摩擦系数测算

### 3.1 样品与实验结果

硝酸钾($KNO_3$)、镁铝合金粉(Mg-Al)和硫磺(S)分别是常用烟火药剂的氧化剂、金属还原剂和非金属还原剂,广泛应用于烟火药剂黑火药类发射药、摩擦类药剂以及焰色类药剂中。在实际的烟火药剂生产中,一般选用粒径在 125~150 μm 之间的药剂,因此本研究选用此粒径范围的 $KNO_3$、Mg-Al、S 这 3 种单质以及 $KNO_3$/Mg-Al 和 $KNO_3$/S 两种混合物,分别测算在摆角为 50°、表压为 4.9 MPa 条件下的动摩擦系数。

实验中,每次称取 20 mg 试样,将其平铺在下滑柱表面,通过旋转套筒的方法使试样在下滑柱表面分布均匀。测量 50°、4.9 MPa 条件下 3 种单质以及两种混合物的上滑柱移动距离,实验结果列于表 2。每种试样进行 10 次实验,均未发生爆炸。由表 2 可以看出,在每种试样进行的 10 次实验中,测量的移动距离并不是确定值,而是存在一定范围。产生这种现象的原因与试样自身的性质以及外界条件等诸多因素有关。

表 2 上滑柱移动距离实测值

Table 2 Experimental values of displacement of upper sliding column

| Sample | $s_{exp}$/(mm) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | No. 5 | No. 6 | No. 7 | No. 8 | No. 9 | No. 10 |
| $KNO_3$ | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Mg-Al | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |
| S | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |
| $KNO_3$/S | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| $KNO_3$/Mg-Al | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |

## 3.2 3 种单质的动摩擦系数计算

由于 3 种单质的上滑柱移动距离是一个范围值，按照本研究的计算方法，每种试样的动摩擦系数也应是一个范围值。表 3 列出了由本计算方法得到的 3 种单质的动摩擦系数。

表 3 3 种烟火药剂单质与钢之间的动摩擦系数

Table 3 Dynamic friction coefficients between three pyrotechnic simple substances and steel

| Sample | Dynamic friction coefficient | Confidence interval of $s$/(mm) |
|---|---|---|
| $KNO_3$ | 0.88～0.55 | 0.195 4～0.264 6 |
| Mg-Al | 0.78～0.34 | 0.221 7～0.318 3 |
| S | 0.63～0.23 | 0.247 4～0.372 6 |

实际上，如果测试次数足够多，上滑柱的移动距离近似呈正态分布，因此表 3 中采用均值置信水平为 0.95 的置信区间表示上滑柱移动距离[17]，此区间能够较好地反映移动距离。移动距离总体均值的置信区间为 $\bar{s}\pm Sn^{-1/2}t_{\alpha/2}(n-1)$（其中 $n$ 为测试次数，$\bar{s}$ 和 $S$ 分别为上滑柱移动距离的算术平均值和标准偏差，$\alpha$ 为显著性水平），取 $\alpha=0.05$，查询 $t$ 分布表，可知 $t_{0.025}(9)=2.262$，得到表 3 中试样的 95%置信区间，进而计算得到相应的动摩擦系数。从表 3 可以看出，3 种单质的动摩擦系数都存在一定的变化范围，只是变化幅度不相同，其中 Mg-Al 的变化幅度最大，为 0.44，$KNO_3$ 的变化幅度最小，为 0.33。导致试样动摩擦系数存在一定变化范围的原因可以从以下两方面解释。

(1) 试样的粒径对动摩擦系数产生了一定的影响。由于烟火药剂试样的粒径为 125～150 μm，人为散状平铺在下滑柱上，因此实验过程中试样颗粒之间并不是完全致密地排列在一起，而是存在大量的空气隙或气泡[18]。每次实验中试样颗粒在下滑柱表面的分布情况并不完全相同，使得空气隙或气泡在滑柱表面的分布情况各不相同，导致试样与钢之间的摩擦力发生差异，从而使动摩擦系数在一定范围内变化。

(2) 试样的颗粒形状也会影响动摩擦系数。实际上，试样与上滑柱的接触面积小于上滑柱的实际面积，即只有部分试样单元与上滑柱发生接触[19]。当上滑柱运动时，这些单元首先在上滑柱的带动下发生运动。而每次实验中组成这些试样单元的颗粒形状并不完全相同，不同形状的颗粒与上滑柱之间的接触面积和动摩擦力不同，同样会导致试样与钢之间的动摩擦系数存在一定的变化范围。

## 3.3 两种混合试样的动摩擦系数计算

由于实验中 $KNO_3$/S 及 $KNO_3$/Mg-Al 两种混合物的上滑柱移动距离也为一个范围值，利用本计算方法，结合区间估计，得到两种混合物的上滑柱移动距离以及动摩擦系数，如表 4 所示。从表 4 可以看出，两种混合物的动摩擦系数也是一个范围值，其原因与 3.2 节中单质情况相同。对比表 3 及表 4 中的数据可以看出，在 $KNO_3$ 中加入 Mg-Al 金属粉或非金属 S 后，上滑柱移动距离的范围发生了变化，可以初步判断出 Mg-Al 和 S 的加入影响了上滑柱的移动距离，进而影响动摩擦系数，但是 $KNO_3$ 与 $KNO_3$/S 之间以及 $KNO_3$ 与 $KNO_3$/Mg-Al 之间的移动距离是否存在差异还需要进一步检验。

**表 4　两种烟火药剂混合物与钢之间的动摩擦系数**

**Table 4　Dynamic friction coefficients between two pyrotechnic compounds and steel**

| Sample | Dynamic friction coefficient | Confidence interval of $s$/(mm) |
|---|---|---|
| $KNO_3$/S | 0.38～0.22 | 0.303 1～0.376 9 |
| $KNO_3$/Mg-Al | 0.62～0.36 | 0.249 8～0.310 2 |

下面采用 $t$ 检验法检验 $KNO_3$ 与 $KNO_3$/S 之间以及 $KNO_3$ 与 $KNO_3$/Mg-Al 之间的移动距离是否存在显著差异。以 $KNO_3$ 和 $KNO_3$/S 为例,设第 $i$ 次实验得到的两试样移动距离的配对差为 $d_i$,即 $d_i=d_{i,KNO_3/S}-d_{i,KNO_3}$。假设两试样移动距离的差异并不明显,即假设 $d_i=0$,则由实验结果可以计算得到两种试样移动距离差值的平均值 $\overline{d}$ 和标准偏差 $S_d$,即

$$\overline{d}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}d_i=0.11 \tag{2}$$

$$S_d=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(d_i-\overline{d})^2}=0.056\,8 \tag{3}$$

$$t_0=\frac{\overline{d}\sqrt{n}}{S_d}=6.124\,1 \tag{4}$$

仍取显著性水平 $\alpha=0.05$,得到观察值 $t_0>t_{0.025}(9)$,即 $d_i=0$ 的假设不成立,证明了 $KNO_3$ 和 $KNO_3$/S 的移动距离确实存在显著性差异,而且 $KNO_3$/S 的移动距离更大些,比 $KNO_3$ 的移动距离大 0.11 mm 左右。

同理,可以求出 $KNO_3$ 和 $KNO_3$/Mg-Al 之间的 $|t_0|=2.689\,7>t_{0.025}(9)$,说明两者的移动距离也存在显著性差异,而且 $KNO_3$/Mg-Al 的移动距离更大些,比 $KNO_3$ 的移动距离大 0.07 mm 左右。

从显著性检验结果可以看出,在 $KNO_3$ 中加入 Mg-Al 或 S 后,移动距离增大,而且加入 S 后移动距离增大得更多。由本研究的动摩擦系数计算方法可知,移动距离越大,动摩擦系数越小。因此在 $KNO_3$ 中加入 Mg-Al 或 S 后,动摩擦系数变小,其中在 $KNO_3$ 中加入 S 后,动摩擦系数由 0.55～0.88 下降至 0.22～0.38,加入 Mg-Al 后,动摩擦系数下降至 0.36～0.62。

导致两种混合物的动摩擦系数小于 $KNO_3$ 单质的原因可以理解为:如果试样为 $KNO_3$ 单质,其颗粒形状近乎相同,颗粒之间的空气隙或气泡分布比较均匀;加入 Mg-Al 或 S 后,混合物的一致性变低,而且 Mg-Al 和 S 的颗粒形状与 $KNO_3$ 不同,这种均匀性较差、不同颗粒形状的物质堆积在一起,导致空气隙或气泡增多,这些空气隙或气泡分布在上滑柱与混合试样的接触面上以及试样颗粒内部,当混合试样与钢之间发生快速摩擦时,就可能出现部分试样颗粒像气体一样与上滑柱之间发生短暂运动[20-21],而上滑柱与空气隙或气泡发生摩擦时,所受阻力小于上滑柱与颗粒之间的摩擦阻力,使得混合物的动摩擦系数变小。

## 4　结　论

基于 MGY-1 型摆式摩擦仪的物理模型,结合理论分析和数值计算,得到了用于测算烟火药剂动摩擦系数的方法。利用该方法,对 3 种常用烟火药剂的单质以及两种混合物与钢之间的动摩擦系数进行了测算。结果表明,5 种试样的动摩擦系数为一个范围值,不同试样的变化幅度不同,例如 Mg-Al 合金粉的变化幅度为 0.44,而 $KNO_3$/S 的变化幅度为 0.16。导致动摩擦系数为范围值的原因与试样颗粒粒径、颗粒形状以及分布在颗粒中的空气隙或气泡等因素有关。利用显著性检验方法,证明了在 $KNO_3$ 中加入 Mg-Al 合金粉末或非金属 S 后,混合物的动摩擦系数较 $KNO_3$ 单质的动摩擦系数减小,这与混合物的均匀性较差、颗粒形状差别较大等因素有关。

## References:


[1] Su J Z, Lin S S. Security Technology of Fireworks Workers [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 8-9. (in Chinese)
苏建中,林述书. 烟花爆竹生产工人安全技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2007:8-9.

[2] He T N, Cheng W, Kang Z L. The research of cutting force simulation in the course of explosive cutting [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2005(3): 21-29. (in Chinese)
何铁宁,成 伟,康宗礼. 炸药切削过程中切削力的数值模拟方法研究 [J]. 火工品,2005(3):21-29.

[3] Liu Q W. Comments on reduce the mechanical sensitivity of fireworks [J]. Fireworks Science and Market, 2001(3): 20-24. (in Chinese)
刘琼吾. 降低花炮药剂机械感度方法浅论 [J]. 花炮科技与市场,2001(3):20-24.

[4] Wang C L, Zhao S X. Mechanical sensitivity of AP with different particle size [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(6): 27-29. (in Chinese)
王彩玲,赵省向. 不同粒度 AP 的机械感度 [J]. 火炸药学报,2006,29(6):27-29.

[5] Gruau C, Picart D, Belmas R, et al. Ignition of a confined high explosive under low velocity impact [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(4): 537-550.

[6] Espinosa H D, Patanella A J, Fischer M. Dynamic friction measurements at sliding velocities representative of high-speed machining processes [J]. J Tribology, 2000, 122(4): 834-848.

[7] Rajagopalan S, Irfan M A, Prakash V. Novel experimental techniques for investigating time resolved high speed friction [J]. Wear, 1999, 225(2): 1222-1237.

[8] Kweon G, Grift T, Miclet D. A spinning-tube device for dynamic friction coefficient measurement of granular fertiliser particles [J]. Biosyst Eng, 2007, 97(2): 145-152.

[9] Irfan M A, Prakash V. Time resolved friction during dry sliding of metal on metal [J]. Int J Solids Struct, 2000, 37(20): 2859-2882.

[10] Prakash V. A pressure-shear plate impact experiment for investigating transient friction [J]. Exp Mech, 1995, 35(4): 329-336.

[11] Liu Y H, Pan R M. Analysis of the safety property of smokeless firework powders [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(3): 73-78. (in Chinese)
刘玉海,潘仁明. 无烟烟花药剂使用安全性能分析 [J]. 火炸药学报,2002,25(3):73-78.

[12] Ma S H, Jiao Q J, Chang F, et al. A study on sensitivity of pyrotechnic flash composition [J]. Journal of Safety and Environment, 2003, 3(6): 11-13. (in Chinese)
马少华,焦清介,常 非,等. 闪光烟火剂感度变化因素的实验研究 [J]. 安全与环境学报,2003,3(6):11-13.

[13] Qian X M, Wang P F. Safety of pyrotechnics with modified potassium chlorate [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(3): 298-300. (in Chinese)
钱新明,王鹏飞. 含改性氯酸钾烟火药剂的安全性研究 [J]. 含能材料,2008,16(3):298-300.

[14] Tan A X, Zhang G H, Liu J B. Analysis of the influence factors on mechanical sensitivity of pyrotechnic compound [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2004(4): 49-51. (in Chinese)
谭爱喜,张光辉,刘劲彪. 烟花爆竹用烟火药机械感度影响因素分析 [J]. 火工品,2004(4):49-51.

[15] Sivapirakasam S P, Surianarayanan M, Swaminathan G. Hazard assessment for the safe storage, manufacturing and handling of flash compositions [J]. J Loss Prev Process Ind, 2009, 22(2): 254-256.

[16] Cheng D X. Handbook of Mechanical Design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 1-8. (in Chinese)
成大先. 机械设计手册 [M]. 北京:化学工业出版社,2007:1-8.

[17] Sheng Z, Xie S Q, Pan C Y. Probability Theory and Mathematical Statistic [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 191-194. (in Chinese)
盛 骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京:高等教育出版社,1999:191-194.

[18] Armstrong R W, Ammon H L, Elban W L, et al. Investigation of hot spot characteristics in energetic crystals [J]. Thermochim Acta, 2002, 384(1): 303-313.

[19] Andersen W H. Role of the friction coefficient in the frictional heating ignition of explosives [J]. Propell Explos Pyrot,1981,6(1):17-23.

[20] Peterson P D,Avilucea G R,Bishop R L,et al. Individual contributions of friction and impact on non-shock initiation of high explosives [C]//Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter,Los Alamos,USA,2007:983-986.

[21] Fathollahi M,Pourmortazavi S M,Hosseini S G. The effect of the particle size of potassium chlorate in pyrotechnic compositions [J]. Combust Flame,2004,138(3):304-306.

# Measurement of Dynamic Friction Coefficient of Several Typical Pyrotechnics

JIANG Xi-Bo,GUO Song,FENG Song,PENG Jin-Hua

(*School of Chemical Engineering,Nanjing University of Science and Technology,Nanjing* 210094,*China*)

**Abstract**:Friction is important in the production and application of pyrotechnics,and the dynamic friction coefficient is a key parameter for quantitative analyzing the friction work. A new method for determining the dynamic friction coefficient is presented,which combines the physical model of MGY-1 friction device with theoretical analysis and numerical calculations. The dynamic friction coefficients of three pyrotechnic simple substances including potassium nitrate,magnesium and aluminum alloy and sulfur,and two pyrotechnic compounds are measured using this method. The results show that the dynamic friction coefficients of the pyrotechnics are range values,and the dynamic friction coefficient of potassium nitrate decreases with the addition of magnesium and aluminum alloy and sulfur. Moreover the reasons for producing above two phenomena are analyzed theoretically.

**Key words**:pyrotechnics;dynamic friction coefficient;pendulum friction device;numerical calculation