

无烟/有烟烟火药剂发射药动摩擦系数对比研究

郭 耸¹, 姜夕博¹, 姬 龙², 冯 淞¹, 彭金华¹

(1. 南京理工大学 化工学院, 南京 210094; 2. 中国兵器工业第二〇三研究所, 西安 710065)

摘 要: 针对烟火药剂发射药受摩擦作用点火时会导致意外爆炸, 而动摩擦系数是衡量摩擦作用获得能量的关键参数问题, 基于摩擦敏感度测试仪物理模型, 结合理论建模与计算, 获得测定动摩擦系数方法, 并结合实验研究获得有烟发射药黑火药与无烟发射药退役单基药两种常用烟火药剂发射药的动摩擦系数; 研究不同实验条件对两动摩擦系数影响。结果表明, 两种烟火药剂发射药的动摩擦系数均为同一范围值, 且随压力及滑动速度的增大, 两动摩擦系数范围均有一定变化, 而每种实验条件的黑火药动摩擦系数均大于退役单基药动摩擦系数。

关键词: 黑火药; 退役单基药; 动摩擦系数; 发射药

中图分类号: TJ55; O69 **文献标识码:** A

Comparison of dynamic friction coefficients between smokeless and smoke pyrotechnic propellants

GUO Song¹, JIANG Xi-bo¹, JI Long², FENG Song¹, PENG Jin-hua¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

Abstract: Ignition under friction is one of the important reasons that lead to accidental explosion of pyrotechnic propellant. Dynamic friction coefficient is a key parameter for determining the energy obtained through friction. A new method for calculating the dynamic friction coefficient was presented. Based on the physical model of friction sensitivity tester the theoretical modeling and numerical calculations were performed. The dynamic friction coefficients of black powder and expired single-base propellant were measured based on this method and related experimental study was carried out. Meanwhile the effects of different experiment conditions on the dynamic friction coefficient of both propellants were discussed. The results show that the values of dynamic friction coefficients of both propellants are within the same range. With the increase of pressure and sliding velocity, the dynamic friction coefficients of both propellants will vary in a certain degree. The dynamic friction coefficient of black powder is greater than that of expired single-base propellant.

Key words: black powder; expired single-base propellant; dynamic friction coefficients; pyrotechnic propellant

烟火药剂发射药指能将花炮星体或礼花弹体推送至空中的火药, 是烟花类产品基本装药^[1-2], 某些烟花类产品中发射药用量甚至超过烟花药剂总量的 50%。主要有两种, 一种为传统的发射药, 以硝酸钾、木炭、硫磺配置的黑火药, 但由于此发射药燃烧时产生大量烟雾, 故无烟发射药成为黑火药类发射药的理想替代品, 该无烟发射药主要采用军用退役单基药为主原料, 燃烧时产生的烟雾量少, 能保持传统发射药的发射力及点火性, 为退役单基药资源化利用开辟了新途径^[3-4]。

烟火药剂发射药作为易燃易爆危险品, 不安定因素客观存在^[5-6], 一旦发生反应, 后果非常严重。如

2012 年福银高速爆炸事故因车辆在行驶中侧翻, 导致黑火药受到摩擦、撞击作用发生爆炸, 致 3 人死亡多人受伤; 2007 年内蒙古敖汉旗生产黑火药工厂发生爆炸, 原因为摩擦产生静电引爆黑火药所致。Sivapirakasam^[7] 详细分析烟火药剂在生产、运输及储存过程各环节可能由摩擦引起的爆炸事故, 若药剂在摩擦作用下产生的能量处理不当, 即会导致热量积累而发生爆炸性。因此烟火药剂发射药在摩擦作用下点火是导致发生意外爆炸的重要原因之一。定量研究烟火药剂的摩擦作用对安全利用烟火药剂具有重要意义。而动摩擦系数是衡量在摩擦作用下获得能量的关键参数, 对预测在摩擦作用下的危险性程度具有重要意义^[8-9]。然而目前尚未见对烟火药剂的摩擦过程进行定量的研究, 亦无烟火药剂动摩擦系数相关数据, 其原因为与烟火药剂发射药自身的爆炸特性及动摩擦系数影响因素众多^[10-11] 等因素有关。为安全合理预测烟

火药剂发射药的动摩擦系数,本文采用理论计算与实验测量相结合方法,测算黑火药及退役单基药两种烟火药剂发射药的动摩擦系数,研究正压力与滑动速度对两动摩擦系数范围影响,为进一步预测烟火药剂发射药在摩擦作用下的危险性程度奠定基础。

1 动摩擦系数测算方法

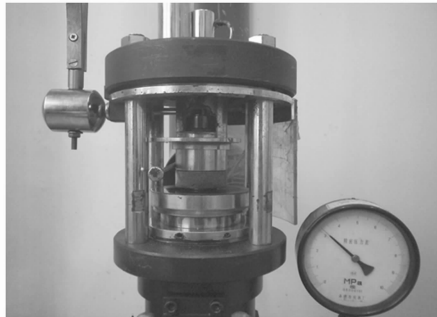
1.1 测定原理

实验采用 MGY - 1 型摆式摩擦仪,实现测定动摩

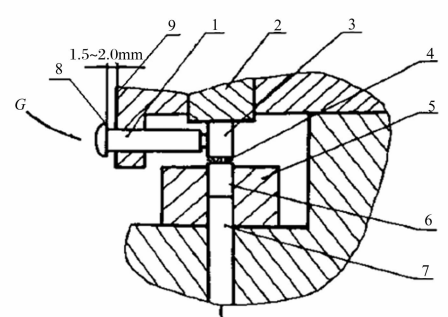
擦系数原理为:摆锤由一定摆角下落,击中击杆,击杆推动上滑柱在试样表面运动一定距离。在运动过程中,上滑柱与试样间发生滑动摩擦,试样摩擦做功能力用上滑柱移动距离表示。摩擦做功能力亦可据含有试样摩擦系数的摩擦做功计算式求得。基于此,建立移动距离与摩擦系数间对应关系式,进而据上滑柱移动距离推算试样与钢间动摩擦系数。实验设备及简图见图 1。



(a) 实验设备整体图



(b) 实验设备局部图



(c) 实验设备简图

1. 击杆 2. 上顶柱 3. 上滑柱 4. 试样 5. 套筒 6. 下滑柱 7. 下顶柱 8. 击杆端面 9. 仪器壁面 G. 摆锤下落方向

图 1 实验设备图

Fig. 1 The photograph of experimental equipment

实验中用专测间隙距离塞尺测量上滑柱移动距离:在加压、摆锤未下落前测量击杆端面与仪器壁面距离,摆锤下落后再测量击杆端面与仪器壁面距离,两者差值即为上滑柱实际移动距离。

1.2 理论建模

摆式摩擦仪测定时将试样置于上下滑柱之间,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,摆锤受重力及转轴反作用力共同作用。击中击杆后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。上滑柱运动距离与压力、摆角及试样动摩擦系数有关。为简化运算,理论建模中假设:① 忽略空气阻力及转轴摩擦力;

② 试样在下滑柱表面均匀分布,外力在试样表面平均分布;③ 摆体撞击击杆后仍沿水平方向运动,不反弹;④ 忽略摆体、击杆及上滑柱内的弹性压缩,三者无形变。据运动过程及假设、摆锤运动方程、动量守恒定律及能量定理,得任意时刻 t 、上滑柱移动距离 s 表达式为:

$$\left. \begin{aligned} f &= \mu(N + mg) \\ df &= \frac{\mu(N + mg)}{\pi R^2} ds \\ E_k &= \frac{1}{2} M_b v^2 \\ M_b v &= (m_p + m + M_b) v' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = \sqrt{\frac{2M_b^2 g l_b (1 - \cos\theta)}{(m_p + m + M_b)^2} - \frac{2\mu(N + mg)}{\pi R^2 (m_p + m + M_b)} \left[\left(\frac{\pi}{2} + 2 \right) R^2 s + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) R^3 - s^2 R \right] - \frac{2\mu_s N}{m_p + m + M_p}} \quad (2)$$

式中:各符号含义见表 1。

表 1 数学符号及含义

Tab. 1 The mathematical notations and its meaning

符号	N/MPa	θ	μ	m/kg	R/m	E_k	M_b/kg	l_b/m	m_p/kg	μ_s	f/N
含义	表压	摆角	试样与钢之间动摩擦系数	滑柱质量	滑柱半径	摆锤与击杆接触前动能	摆体质量	质心距转轴中心距离	击杆质量	上顶柱与上滑柱动摩擦系数	摩擦力

式(2)中摆锤质量等设备参数为已知量,若能测定上滑柱移动距离,只剩试样与钢之间动摩擦系数 μ 一个未知量。因此对式(2)用数值计算方法求解,用软件编程,即获得用于计算动摩擦系数程序。在程序中输入动摩擦系数预估值,可计算出相应的上滑柱移动距离并与实测移动距离比较,若不同,则改变动摩擦系数值,直至计算获得与实测值相符,则该动摩擦系数值即为试样的动摩擦系数。

1.3 方法验证

测试中上滑柱与上顶柱之间同时发生滑动摩擦,而上下滑柱及上顶柱均为同种钢材料。若上下滑柱间未置试样,则三者间的相互摩擦均为钢与钢的摩擦,即 $\mu = \mu_s$ 。由于钢与钢之间的动摩擦系数有测定值,故可据此验证理论模型的可靠性。

本文实验为摆角、表压分别为 30° 、2.5 MPa及 50° 、4.9 MPa两种条件未置试样的空白实验,每种条件进行10次,实验结果见表2。

表2 两种实验条件下钢与钢之间动摩擦系数

Tab.2 Dynamic friction coefficient between steel and steel under two experimental conditions

摆角/ $(^\circ)$	表压/MPa	上滑柱实测移动距离/mm	钢与钢之间动摩擦系数
30	2.5	0.4	0.18
50	4.9	0.4	0.17

由表2看出,两种实验条件下钢与钢之间动摩擦系数分别为0.18,0.17。而文献[12]调研钢与钢之间在无润滑情况下动摩擦系数为0.15,与本文结果吻合较好,证明本文的测算结果准确、可靠,可用于测算烟火药剂发射药的动摩擦系数。

2 实验结果及分析

2.1 实验样品及结果

实验用黑火药及退役单基药原料由烟花爆竹生产企业提供,粒度在 $120 \sim 150 \mu\text{m}$ 之间。实验中每次称取20 mg试样平铺在下滑柱表面,旋转套筒使试样在下滑柱表面分布均匀。实验测定两种试样在摆角、表压分别为 50° 、4.9 MPa时上滑柱移动距离,每种试样进行十次,试样均未发生反应,所得结果见表3。

表3 上滑柱移动距离实测值

Tab.3 Experiment values of displacement of upper sliding column

试样	上滑柱移动距离/mm									
黑火药	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
退役单基药	0.5	0.4	0.4	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5

由表3看出,两种试样上滑柱移动距离并非确定值,存在一定范围。但变化范围不大,其中黑火药移动距离在 $0.3 \sim 0.4 \text{ mm}$ 之间;退役单基药移动距离在 $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$ 之间,大于黑火药的移动距离。实际上,上滑柱移动距离为范围值的原因与试样自身性质、动摩擦系数等诸多影响因素有关。

2.2 动摩擦系数测算结果

若测试次数足够多,上滑柱移动距离近似满足正态分布。为合理描述上滑柱移动距离范围,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^[13]:

$$\bar{d} \pm \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \quad (3)$$

式中: \bar{d} 为移动距离平均值; s 为标准偏差; n 为实验次数。取显著性水平 $\alpha = 0.05$,计算所得两种试样移动距离范围见表4。由本文计算方法可知,每个移动距离均能相应计算出一个动摩擦系数值,且该值随上滑柱移动距离的增大而减小,也即两种试样的动摩擦系数亦为范围值。计算所得黑火药及退役单基药动摩擦系数见表4。

表4 两种试样与钢之间动摩擦系数计算值

Tab.4 Dynamic friction coefficient of both the pyrotechnic

试样	移动距离置信区间/mm	动摩擦系数
黑火药	0.3354 ~ 0.4046	0.20 ~ 0.32
退役单基药	0.4217 ~ 0.5183	0.10 ~ 0.17

由表4看出:①两种试样的动摩擦系数均为范围值,但两者变化幅度不同,黑火药变化幅度为0.12,而退役单基药变化幅度为0.07;②黑火药动摩擦系数大于退役单基药动摩擦系数。

实际上界面之间的动摩擦力本身较复杂,且影响因素众多。由于本文所选试样具有一定粒径范围的粉状,除受测量过程本身复杂性影响外,亦受试样粒径、颗粒形状等因素影响,不同粒径、颗粒形状试样与上滑柱之间的接触面积及动摩擦力存在差异^[14],致两种试样与钢之间的动摩擦系数存在一定变化范围。而黑火药动摩擦系数大于退役单基药动摩擦系数,是由两种试样自身性质如颗粒表面光滑程度等因素决定的。

3 实验条件对两种试样动摩擦系数范围影响

影响动摩擦系数因素较多,包括试样自身性质、压力、滑动速度、温度、湿度等。其中压力、滑动速度为影响动摩擦系数研究最重要的两因素^[15]。改变压力、滑动速度可能引起试样颗粒形状改变、颗粒在下滑柱表面分布情况变化、甚至试样表面温度变化,进而影响试样的动摩擦系数。故重点研究正压力及滑动速度对两种烟火药剂发射药动摩擦系数范围影响。

3.1 正压力对动摩擦系数范围影响

实验中改变设备表压,即改变作用在试样的正压力,将摆角固定在 50° ,实验分别测定表压为2.5 MPa,4.9 MPa时两种发射药的上滑柱移动距离,所得结果见表5。由表5看出,压力不同时上滑柱移动距离亦为一范围值。用

均值置信水平为0.95的置信区间 $\bar{d} \pm \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)$ 表示上滑柱移动距离。结合动摩擦系数计算方法,获得两种压力下试样动摩擦系数范围及上滑柱移动距离置信区间见表6。

表5 不同压力下上滑柱移动距离

Tab.5 The displacement values under different pressure

试样	实验条件	上滑柱移动距离/mm									
黑火药	50° , 2.5 MPa	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.4	0.6
退役单基药		0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7
黑火药	50° , 4.9 MPa	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
退役单基药		0.5	0.4	0.4	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5

表6 不同压力下试样动摩擦系数

Tab.6 The dynamic friction coefficient under different pressure

试样	实验条件	移动距离 置信区间/mm	动摩擦 系数
黑火药	50°	0.5100 ~ 0.6100	0.26 ~ 0.37
退役单基药	2.5 MPa	0.7111 ~ 0.8289	0.13 ~ 0.19
黑火药	50°	0.3354 ~ 0.4046	0.20 ~ 0.32
退役单基药	4.9 MPa	0.4217 ~ 0.5183	0.10 ~ 0.17

由表6看出:①两种实验条件下,黑火药动摩擦系数均大于退役单基药动摩擦系数;②当表压由2.5 MPa升到4.9 MPa时,黑火药动摩擦系数范围由0.26 ~ 0.37变为0.20 ~ 0.32,即动摩擦系数变化幅度基本

一致,但变化范围朝向降低的方向移动。退役单基药动摩擦系数范围由0.13 ~ 0.19变到0.10 ~ 0.17,表现出与黑火药相同的规律。可初步推测,在一定压力范围内,两种烟火药剂发射药的动摩擦系数范围随压力的升高有下降趋势。

3.2 滑动速度对动摩擦系数范围影响

滑动速度指上滑柱在试样的滑动速度,该速度与摆角大小直接相关。摆角增大表明摆锤下落势能增大,传递给击杆的动能相应增大,而击杆与上滑柱直接接触,导致上滑柱滑动速度增大。在表压2.5 MPa时,实验分别测定摆角为 30° 、 50° 两种发射药的上滑柱移动距离见表7。

表7 不同摆角时上滑柱移动距离

Tab.7 The displacement values under different swinging angle

试样	实验条件	上滑柱移动距离/mm									
黑火药	30° , 2.5 MPa	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2
退役单基药		0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
黑火药	50° , 2.5 MPa	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.4	0.6
退役单基药		0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7

由表7看出,摆角不同,黑火药及退役单基药的上滑柱移动距离亦为一范围值。利用本文计算方法结合区间估计所得上滑柱移动距离置信区间及动摩擦系数同样为范围值,见表8。

表8 不同摆角时试样动摩擦系数

Tab.8 The dynamic friction coefficient under different swinging angle

试样	实验条件	移动距离 置信区间/mm	动摩擦 系数
黑火药	30°	0.2231 ~ 0.2969	0.22 ~ 0.52
退役单基药	2.5 MPa	0.2874 ~ 0.3326	0.15 ~ 0.22
黑火药	50°	0.5100 ~ 0.6100	0.26 ~ 0.37
退役单基药	2.5 MPa	0.7111 ~ 0.8289	0.13 ~ 0.19

由表8看出,两种实验条件的黑火药动摩擦系数均大于退役单基药动摩擦系数。摆角由 30° 增加到 50° 时

随滑动速度增大,两者动摩擦系数变化范围、变化幅度不同,即黑火药动摩擦系数范围由0.22 ~ 0.52变到0.26 ~ 0.37,变化范围未发生变化,但变化幅度减小;退役单基药动摩擦系数范围由0.15 ~ 0.22变到0.13 ~ 0.19,变化幅度基本相同,但变化范围朝降低方向移动。

4 结论

本文通过实验测定及理论研究,定量给出黑火药、退役单基药两种常用烟火药剂发射药的动摩擦系数,结论如下:

- (1) 两种试样动摩擦系数均为范围值,其原因与测量过程本身的复杂性及试样粒径、颗粒形状等因素有关;
- (2) 随压力的升高,两种试样动摩擦系数变化范围均有下降趋势;
- (3) 摆角升高即上滑柱滑动速度增大,两种试样

动摩擦系数变化幅度及变化范围不同。黑火药动摩擦系数变化范围未发生变化,变化幅度减小;退役单基药动摩擦系数变化范围有减小趋势,变化幅度基本相同;

(4) 黑火药动摩擦系数均大于退役单基药动摩擦系数,与试样自身性质如颗粒形状差异、颗粒表面光滑程度差异等因素有关。

参考文献

- [1] 刘玉海,刘士林. 用退役推进剂制备火箭烟花用发射药[J]. 火工品, 2003(3): 54-56.
LIU Yu-hai, LIU Shi-lin. Technical analysis on the making of rocket-firework powder from expired propellants [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2003 (3): 54-56.
- [2] 杨利,许又文,曹晓宏. 黑火药的烟火效应和配方选择[J]. 北京理工大学学报, 1999,19(S1): 96-99.
YANG Li, XU You-wen, CAO Xiao-hong. Pyrotechnic effects and composition selection of black powder [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999,19(S1): 96-99.
- [3] 杨慧群,王泽山,魏晓安. 废旧单基发射药的利用[J]. 含能材料, 2004,12(S1): 175-177.
YANG Hui-qun, WANG Ze-shan, WEI Xiao-an. The utilization of wasted one-base propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(S1): 175-177.
- [4] 任慧,崔庆忠,焦清介. 黑火药的热分解过程与反应动力学参数研究[J]. 含能材料, 2007, 15(1): 29-32.
REN Hui, CUI Qing-zhong, JIAO Qing-jie. Thermal decomposition and kinetic parameters of black powder reaction [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(1): 29-32.
- [5] 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.
QIAN Xin-ming, WANG Peng-fei. Safety of pyrotechnics with modified potassium chlorate [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(3): 298-300.

- [6] 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(3): 73-78.
LIU Yu-hai, PAN Ren-ming. Analysis of the safety property of smokeless firework powders [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002(3): 73-78.
- [7] Sivapirakasama S P, Surianarayanan M, Swaminathan G. Hazard assessment for the safe storage, manufacturing and handling of flash compositions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(2): 254-256.
- [8] Andersen W H. Role of the friction coefficient in the frictional heating ignition of explosives [J]. Propellants and Explosives, 1981, 6(1): 17-23.
- [9] Oruganti R K, Subramanian P R, Marteb J S, et al. Effect of friction, backpressure and strain rate sensitivity on material flow during equal channel angular extrusion [J]. Materials Science and Engineering, 2005, 406(1): 102-109.
- [10] Espinosa H D, Patanella A J, Fischer M. Dynamic friction measurements at sliding velocities representative of high-speed machining processes [J]. Journal of Tribology, 2000, 122(4): 834-848.
- [11] Rajagopalan S, Irfan M A, Prakash V. Novel experimental techniques for investigating time resolved high speed friction [J]. Wear, 1999, 225(2): 1222-1237.
- [12] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [13] 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, 2008.
- [14] Fathollahi M, Pourmortazavi S M, Hosseini S G. The effect of the particle size of potassium chlorate in pyrotechnic compositions [J]. Combustion and Flame, 2004, 138(3): 304-306.
- [15] Bragov A M, Konstantinov A Y, Lomunov A K. Determining dynamic friction using a modified kolsky method [J]. Technical Physics Letters, 2008, 34(5): 439-440.

(上接第80页)

(2) 充满液体的圆柱壳抗爆炸冲击能力较内空圆柱壳提高明显。因壳内充满液体且液体压缩性小,冲击过程中形成高液体压力抵抗变形快,致壳体结构抗冲击能力提高。

(3) Lagrangian-Eulerian 耦合计算方法可模拟、预测圆柱壳在爆炸冲击下非线性动态响应,与实验结果对比计算误差小于8%,计算精度满足实际工程需要。该结果可补充实验方法的不足,且为圆柱壳抗爆承载计算及安全性评估提供重要参考依据。

参考文献

- [1] Ma X Q, Stronge W J. Spherical missile impact and perforation of filled tubes [J]. International Journal of Impact Engineering, 1988, 3(1): 1-16.
- [2] Neilson A J, Howa W D, Garton G P. Impact resistance of mild steel pipes: an experimental study [R]. UK Atomic Energy Authority Report AEE AEEW-R2125. Winfrith, 1987.
- [3] Zhu L I, Zhang S Y, Yang G T. The global deformation and local damage analysis of filled metallic cylindrical shells

impacted by missiles [J]. Acta Mechanical Solid Sinica, 1999, 12(3): 255-262.

- [4] 路国运. 充水压力管道受弹体侧向冲击动力响应及穿透失效破坏研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- [5] Masahiro N, Koichi T. Experimental study of perforation and cracking of water-filled aluminum tubes impacted by steel spheres [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(12): 2000-2016.
- [6] Norman J, Birch R S. Low-velocity impact of pressurised pipelines [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(2): 207-219.
- [7] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [8] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature [C]// Proceedings of 7th Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands: International Ballistics Committee, 1983: 541-547.
- [9] 肖新科. 双层金属靶的抗侵彻性能和 Taylor 杆的变形与断裂[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.