

文章编号: 1006-9941(2010)01-0083-05

高聚物粘结炸药及其涂层的摩擦性能

温茂萍, 蓝林钢, 庞海燕

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 分别采用材料试验机和纳米压痕仪测试了两种高聚物粘结炸药(PBX)材料(P1、P2)和两种高分子涂层(C1、C2)在宏观和微纳尺度上的摩擦性能,并对这四种材料的摩擦性能进行了比较,同时还对这四种材料在60℃、80%RH、2个月条件下老化后摩擦性能的变化进行了试验研究。试验结果表明:(1)两种尺度上的摩擦性能具有一定的相关性;(2)四种材料中,C1涂层摩擦系数明显偏大,与P1、P2差异明显,C2涂层摩擦系数与P1、P2比较接近;(3)老化后,只有C1涂层摩擦系数增大,其它材料摩擦性能没有显著变化。

关键词: 固体力学; 高聚物粘结炸药(PBX); 涂层; 力学性能; 摩擦性能

中图分类号: TJ55; O34

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.021

1 引言

随着对高聚物粘结炸药工程应用要求提高,炸药部件表面力学性能越来越受到关注,在表面力学性能中,除了PBX表层的力学性能,如弹性模量、硬度等,还包括与其它材料接触时的力学性能,如摩擦性能等。摩擦性能反映了材料与材料之间发生相对运动时在接触面上产生的阻力,对于维持结构稳定性具有重要作用。高分子涂层主要作用是保护PBX炸药部件,涂上涂层后PBX表面的摩擦性能将会发生改变。另外,高分子涂层包括PBX自身还存在老化的问题,老化后材料力学性能会发生改变,摩擦性能也有可能发生变化。

在摩擦性能测试方法方面,其他金属或非金属材料摩擦性能已有多项测试标准^[1-2]。对于含能材料,只有在美国利弗莫尔国家实验室炸药手册《LLNL Explosives Handbook Properties of Chemical Explosive Simulants》中对PBX炸药的摩擦系数的测试方法有简单介绍^[3]。随着表面科学和材料科学与工程的发展,近20年来表面工程摩擦学获得了迅速发展,取得了大量的研究成果^[4-7],研究领域已从宏观尺度的动静摩擦性能延伸到微纳尺度上的摩擦性能研究,如董云开等^[8]针对微机电系统存在的问题研究了

微摩擦测试方法以及表面形貌对微机械中摩擦性能的影响,试验研究了表面形貌对介于宏观和微观之间摩擦行为的影响等。

有关PBX摩擦性能研究的文献报道很少,而对于PBX及相关物经过老化试验后摩擦性能变化的研究更少。本研究以两种PBX材料(P1、P2)和两种高分子涂层(C1、C2)为对象,比较了它们在宏观、微纳尺度下细观摩擦性能的差异以及经过老化试验后摩擦性能的变化。

2 测试方法简介

2.1 宏观摩擦系数测试方法

宏观摩擦系数包括静摩擦系数和动摩擦系数,测试工装如图1所示,将该装置放置于平台上,可以完成静摩擦系数的测试。将该装置装配到材料试验机上,可以完成动摩擦系数的测试,如图2所示。

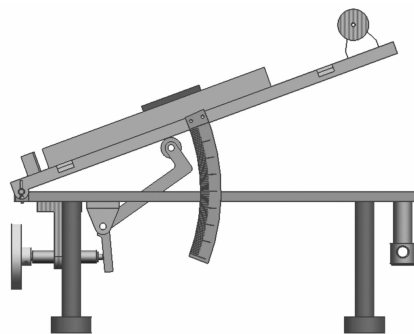


图1 静摩擦系数测试装置示意图

Fig.1 Test device of static friction

收稿日期: 2009-03-12; 修回日期: 2009-06-15

作者简介: 温茂萍(1967-),女,硕士,研究员,主要从事材料物理、力学行为及先进检测技术研究。e-mail: maopingw@qq.com

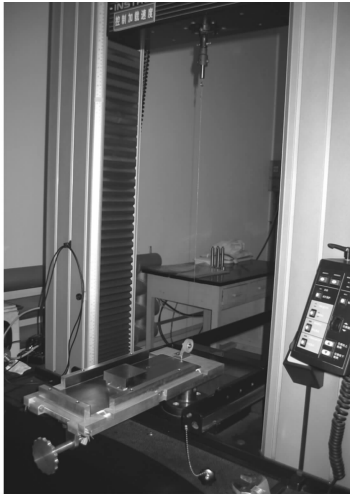


图2 动摩擦系数测试装置示意图
Fig.2 Test device of dynamic friction

2.2 微纳尺度下的摩擦性能测试方法

采用纳米压痕仪的划痕功能,测试系统如图3所示。测试时保持探针的法向载荷 F_x 恒定或按一定规律变化,使探针在试样表面滑动产生划痕,测试滑动过程中探针所受到的横向阻力 F_y ,从而得到横向载荷与法向载荷之比,即探针在表面滑动时的摩擦系数,如图4所示。由于纳米压痕仪的压入深度和划痕长度在几百纳米~几微米之间,因此,划痕试验得到结果也可以用于表征材料在微纳尺度上的摩擦性能。纳米压痕仪还可以对划痕进行原位成像,并得到所成像微区(小于 $50\ \mu\text{m}$)的表面粗糙度。

3 测试条件

3.1 试样制备

3.1.1 静、动摩擦系数试样

P1、P2 制备成 $25\ \text{mm} \times 25\ \text{mm} \times 85\ \text{mm}$,测试表面粗糙度为 6.3; C1、C2 试样是 $25\ \text{mm} \times 25\ \text{mm}$ 薄片,测试表面制备涂层时自然形成的表面;接触基材包括铝、钢和橡胶。铝、钢基材的粗糙度为 3.2,橡胶为制备过程中自然形成的表面。

3.1.2 微纳尺度摩擦性能试样

将 P1、P2 加工成 $\Phi 20\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$ 药柱,再将测试端面进行手工打磨和抛光处理,然后用 502 胶将 PBX 试样粘结固定在样品台上。

将 C1、C2 涂覆在玻璃板上,待涂层固化后从玻璃板上取下,再裁剪成所需的试样,试样尺寸为 $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$,用 502 胶将试样粘贴到样品台上,

粘贴试样时均要求粘接剂涂抹均匀、试样与样品台面不能有气泡并且黏结剂不能污染试样的测试表面。

3.2 宏观摩擦系数测试条件

静摩擦系数利用图1所示装置测试。动摩擦系数利用图2所示装置测试,滑动速度: $50\ \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

3.3 微纳尺度摩擦系数测试条件

法向载荷为 $400\ \mu\text{N}$ 的恒幅加载。

3.4 老化条件及性能测试

在 $60\ ^\circ\text{C}$ 、80% RH、2 个月的条件下进行老化试验,测试四种材料老化前后的静摩擦系数。

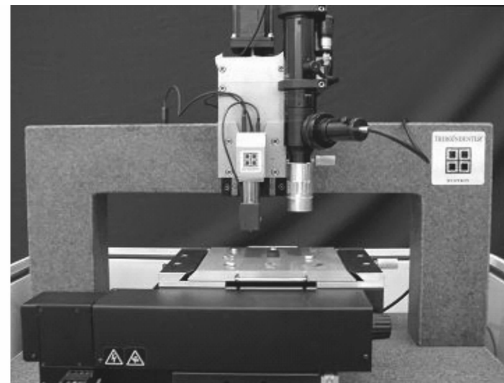


图3 纳米压痕仪示意图
Fig.3 Diagram of nano-indenter

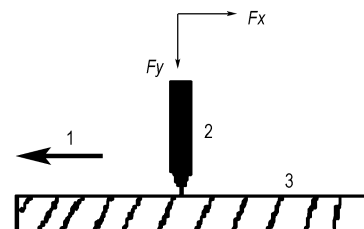


图4 纳米压痕仪划痕试验示意图

1—划痕方向,2—探针,3—试样

Fig.4 Diagram of nano-indenter's scratch test

1—scratching direction, 2—tip, 3—sample

4 测试结果及分析

4.1 宏观摩擦性能测试结果

P1、P2、C1、C2 四种材料静、动摩擦系数测试结果见表1。从表1可以看出:(1)与相同基体材料接触时,这四种材料中C1摩擦系数最大;(2)在与不同种基体材料接触时,PBX及其涂层在真空橡胶上的摩擦系数最大;(3)比较而言,C2摩擦系数与P1、P2比较接近,但是C1与P1、P2差异明显。

4.2 微纳尺度摩擦性能测试结果

这四种材料的划痕测试曲线如图 5 所示,曲线两端的较大波动是由于探针进针和退针时造成的,中间平台段才反映了探针在试样表面平稳划过时的数据。比较 P1、P2、C1 及 C2 测试曲线平台段的高低可以看出,C1 平台最高。平台段的高低可以定性地反映探针在材料表面划过时受到的阻力,平台段的平均值即微区的摩擦系数。因此,可以认为在相同加载条件下,探针在 C1 表面划过时受到的阻力最大,即在微纳尺度上,C1 的摩擦系数最大。

表 1 P1、P2、C1、C2 与不同基体材料间的宏观摩擦系数

Table 1 Friction coefficients of different pairs

materials	static friction			dynamic friction		
	aluminium	steel	rubber	aluminium	steel	rubber
P1	0.24	0.25	0.70	0.19	0.25	0.58
P2	0.22	0.21	0.63	0.18	0.21	0.46
C1	0.53	0.45	0.74	0.39	0.33	0.65
C2	0.21	0.25	0.45	0.19	0.20	0.42

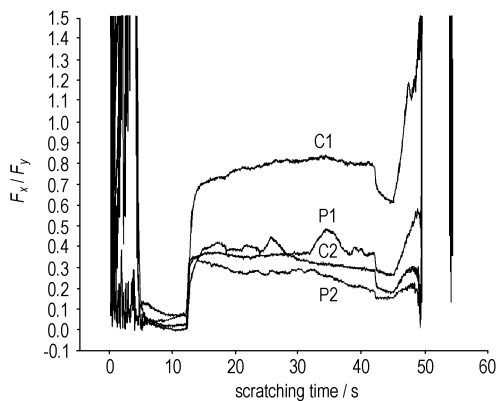


图 5 四种材料划痕测试曲线

Fig. 5 Scratch testing curves of the four materials

图 6 是这四种材料经过划痕试验后的划痕残余形貌。从划痕残余形貌可以看出,这四种材料中,相同加载条件下,在 C2 涂层表面产生的划痕最明显,而在 C1 表面产生的划痕最不明显,这表明 C2 虽然摩擦性能与 P1、P2 比较接近,但是抗划痕能力不如 C1,这与 C1、C2 材料弹塑性能相关。

4.3 两种方法测试结果比较

将纳米划痕测试结果与宏观静摩擦系数进行比较,结果见表 2。从表 2 可以看出,在这四种材料中,C1 在纳米划痕试验中测试得到的横向载荷与法向载荷之比最大,在材料试验上测试得到的宏观静摩擦系

数也最大。分析认为,在纳米划痕测试中,微小探针在材料表面划过时,横向载荷与法向载荷之比反映了材料本身的粘滞能力的大小,即横向载荷与法向载荷之比代表了材料的本征摩擦能力,因此,纳米划痕测试结果与宏观摩擦系数具有一定的相关性合理,纳米划痕测试结果可以用来预测该材料与其它材料接触时的宏观摩擦特性。

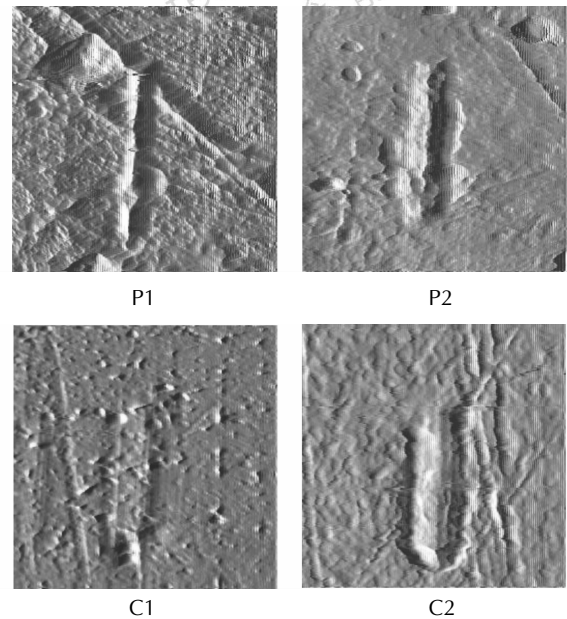


图 6 四种材料的划痕残余形貌

Fig. 6 Images of the four materials after scratched

表 2 四种材料的划痕测试结果与静摩擦系数比较

Table 2 Static friction coefficients and results of nanoindenter scratching tests

materials	nanoindenter scratching F_x/F_y	static friction contacting with different materials		
		aluminium	steel	rubber
P1	0.35	0.24	0.25	0.70
P2	0.25	0.22	0.21	0.63
C1	0.80	0.53	0.45	0.74
C2	0.30	0.21	0.25	0.45

4.4 老化试验前后的摩擦性能测试

本部分涂层试样与 3.1、3.2 的试样有一定区别,3.1 与 3.2 是从制备后室温下存放 30 天后片材上裁取的,而本部分试样是从室温下存放 1 年片材上裁取。经过第 2.4 中条件的加速老化后,测试性能了这四种材料的静摩擦系数,测试结果见表 3。从测试数据看,在老化前后,P1、P2、C2 涂层的静摩擦系数没有显著变化,但是 C1 的摩擦系数明显增大。

摩擦性能的变化,除与材料性能有关外,还与材料的表面状况的改变有关,本试验对这四种的表面状况进行了测试。图7是四种材料的外观变化,从每幅图中左边为初始样品外观,右边为老化样品外观。从外观上看,这四种材料只有C1外观发现明显变化,由透明变为不透明,并且表面也由光面变为毛面。

表3 四种材料老化前后静摩擦系数比较

Table 3 Static frictions of the four materials before and after being aged

materials	fresh samples			aged samples		
	aluminium	steel	rubber	aluminium	steel	rubber
P1	0.23	0.25	0.47	0.23	0.27	0.46
P2	0.19	0.25	0.40	0.19	0.23	0.38
C1	0.29	0.32	0.51	0.32	0.47	0.65
C2	0.21	0.25	0.44	0.21	0.25	0.42

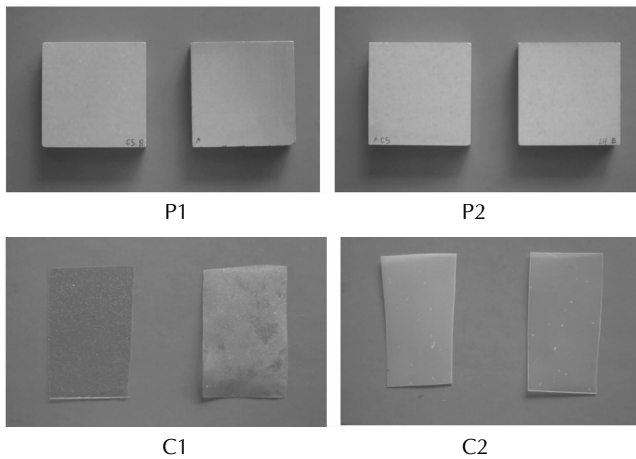


图7 四种材料经过加速老化前后的外观

Fig. 7 Appearances of the four materials before and after being aged

为了进一步观测其微观形貌变化,采用纳米压痕仪的原位成像对其表面进行了成像,成像尺度为 $15\ \mu\text{m}$,图8为四种材料纳米压痕成像图,从图8a到图8d每幅图中,左边为初始样品形貌,右边为老化样品形貌。表4是所成像微区的表面粗糙度,表中 R_a 和 R_q 为所成像微区表面粗糙度的一维形貌参数,分别名为轮廓算术平均偏差和轮廓均方根偏差。从微观测试结果可以看出,这四种材料中只有C1微观形貌发生变化,变得更加粗糙,其微区表面粗糙度 R_a 和 R_q 均显著增大,这也是其经过老化后摩擦系数增大的主要原因。

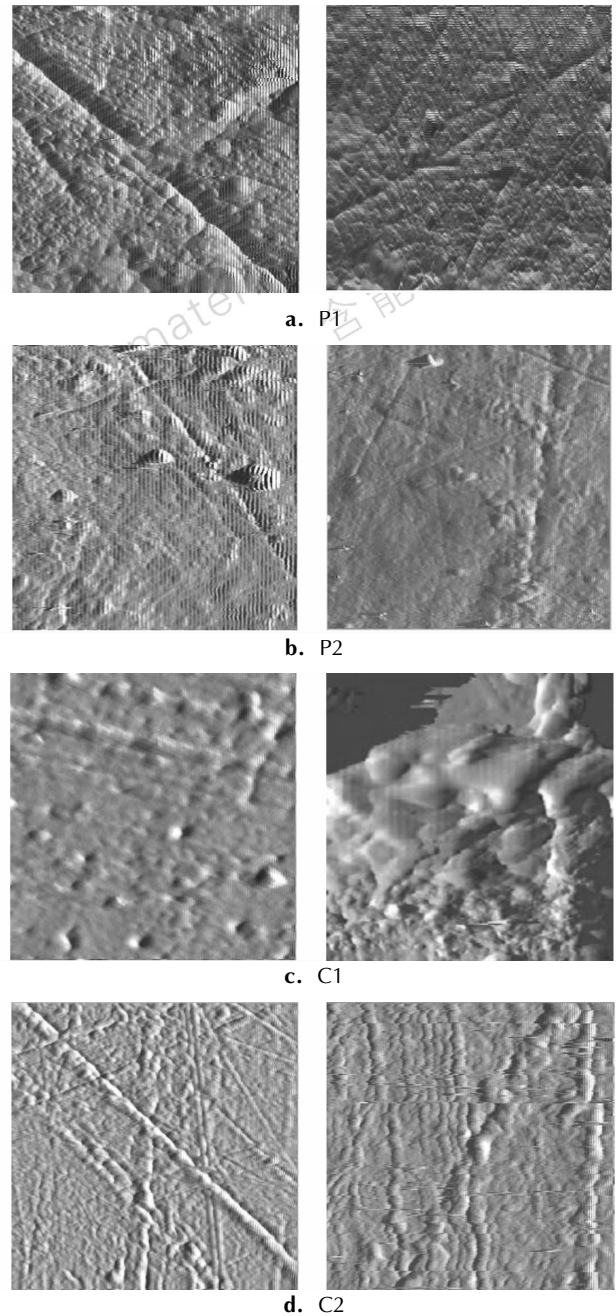


图8 四种材料经过加速老化前后的微区的原位成像

Fig. 8 Images of the four materials before (left) and after (right) being aged

表4 四种材料老化前后微区粗糙度

Table 4 Roughness of the four materials before and after being aged

materials	fresh samples		aged samples	
	R_q/nm	R_a/nm	R_q/nm	R_a/nm
P1	156	127	168	119
P2	69	55	45	32
C1	13.7	11.3	236	179
C2	10.7	8.4	9.1	6.9

5 结 论

四种材料中 C1 摩擦系数明显偏大,与 P1、P2 差异明显,而 C2 摩擦性能与 P1、P2 相对接近。对两种方法测试结果进行了比较,结果表明两种尺度上摩擦性能具有一定的相关性。另外,还对四种材料进行了温度 60 °C、湿度 80%RH、时间 2 个月的老化试验,测试了四种材料老化前后的静摩擦系数,发现 C1 涂层经过老化后表面外观由透明变为不透明,由光面变为毛面,表面粗糙度增大,静摩擦系数也变大,而其它材料经过该条件的加速老化后外观、表面粗糙度、摩擦系数均没有明显变化。

参考文献:

- [1] GB/T3960 – 1983. 塑料滑动摩擦磨损试验方法[S].
GB/T3960 – 1983. Test method for friction and wear of plastics by sliding[S].
- [2] GB/T10006 – 1988. 塑料薄膜和薄片摩擦系数的测定方法[S].

GB/T10006 – 1988. Plastic-film and sheeting-determination of the coefficients of friction[S].

- [3] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL Explosive Handbook Properties of Chemical Explosive Simulants[M]. UCRL-52997-Chg. 2.
- [4] Larsen-Base J. Surface engineering and the new millennium[J]. *SurfEng*, 1998, 14(2): 81 – 83.
- [5] 张宁, 庄大明, 王燕华, 等. 低温离子渗硫层的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 1999, 19(4): 348 – 353.
ZHANG Ning, ZHUANG Da-ming, WANG Yan-hua, et al. A study on the tribological properties of sulfide layer produced by ion sulphurization[J]. *Tribology*, 1999, 19(4): 348 – 353.
- [6] 张绪寿, 余来贵, 陈建敏. 表面工程摩擦学研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2000, 20(2): 156 – 160.
ZHANG Xu-shou, YU Lai-gui, CHAN Jian-min. Development in tribology of surface engineering[J]. *Tribology*, 2000, 20(2): 156 – 160.
- [7] Ehrhardt H. New development in the field of super hard coatings[J]. *Surf Coat Technl*, 1995, 74: 29 – 35.
- [8] 董云开, 刘莹, 温诗铸. 微观摩擦与表面形貌相关性的试验研究[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(6): 542 – 545.
DONG Yun-kai, LIU Ying, WEN Shi-zhu. Experimental study on relation between micro friction and surface topography[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(6): 542 – 545.

Friction Properties of Polymer Bonded Explosives and Coatings

WEN Mao-ping, LAN Lin-gang, PANG Hai-yan

(Institute of Chemical Material, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The friction properties of two types of polymer bonded explosive(PBX) coded P1, P2 and two coatings named C1, C2 were tested by the universal testing machine based friction system and the nano-indenter respectively. The results of friction properties obtained by the two methods are correlative. The friction coefficient of C1 coating is the highest among the four materials and the C2 coating is more close to P1 and P2. The friction test for four materials which were in the aging environment of 60 °C 80% RH have been conducted. Results show that only the C1 coating's friction becomes much higher among the four materials.

Key words: solid mechanics; polymer bonded explosive(PBX); coating; mechanical property; friction property

CLC number: TJ55; O34

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.021