

Study on Properties and Application of UHMWPE Wear-Resisting Composite Material

Ru-sheng Deng, An-min Huang, Zhi-yong Zhu, Wen-ding Jiang, Yin Liu

Zhuzhou Times New Material Technology Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China

Address: No.18, Haitian road, Tianyuan District, Zhuzhou City, Hunan province

E-mail: dengkaihuan@teg.cn

Abstract: This paper introduced the preparation and properties of two kinds of key materials of bridge bearing made from Ultra High Molecular Weight Polyethylene(UHMWPE) composite material and pure Polytetrafluorethylene powder(PTFE).The results showed that: the mechanical properties, prominent, creep resistance, wearing resistance of UHMWPE composite material are better than PTFE, so it is an ideal wear composite material for high-speed railways and highway bridge bearing. This paper analyzed the wear mechanism and pointed out the key factor of influencing wear-resistant composite material through the morphology characterization of UHMWPE composite material.

Keywords: UHMWPE; PTFE; Wear-resistant material; Bridge bearing; Performance

超高分子量聚乙烯耐磨复合材料性能与应用

邓如生, 黄安民, 朱志勇, 姜稳定, 刘银

中国南车株洲时代新材料科技股份有限公司, 株洲 412007

摘要: 本文介绍了两种桥梁支座关键耐磨材料, 即超高分子量聚乙烯(UHMWPE)复合材料和聚四氟乙烯(PTFE)材料的制备与性能。研究表明, 经过改性后的UHMWPE复合材料具有比PTFE材料更加突出的综合力学性能, 且承载能力高、抗蠕变性能好、耐磨损性能突出, 是高速铁路、公路桥梁支座理想的耐磨材料。通过对UHMWPE复合材料磨损形貌表征, 浅析了磨损机理, 指出了影响复合材料耐磨的关键因素。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 聚四氟乙烯; 耐磨材料; 桥梁支座; 性能

近年来, 我国高速铁路发展突飞猛进, 短短几年间建成全球运营时速最快的客运专线, 让世人惊叹。随着列车设计时速越来越高, 对列车运行的平稳性和对桥梁结构抗挠和抗扭刚度及重载、耐磨等安全性提出了更高要求[1]。桥梁支座不仅传递桥梁上部的荷载, 还能调节上部结构和下部结构之间的相对位移, 对高速列车的安全和舒适起着非常重要作用, 因此, 铁道部规定, 时速超过200km的高速铁路桥梁需配置桥梁支座。而桥梁支座耐磨材料是支座中至关重要的滑动部件, 主要起着承载、摩擦作用, 其质量直接影响桥梁支座的性能和使用寿命。这必然要求桥梁支座耐磨材料具有优异的承载能力、抗蠕变性能、自润滑

及耐磨等特性。

聚四氟乙烯(PTFE)耐磨材料具有良好的自润滑性能, 我国上世纪七十年代以来采用PTFE作为公路、铁路桥梁支座耐磨材料得到广泛应用。但其存在设计承载能力偏低、活载位移速率偏小、易冷流[2-4]、磨损率偏高等缺点, 难以满足铁路高速、重载的要求。超高分子量聚乙烯(UHMWPE)具有耐磨损、耐冲击、耐低温、自润滑和不易粘附异物等优良性能[5], 在国外被称为“神奇的塑料”。本世纪初德国毛勒公司将超高分子量聚乙烯改性, 进一步改善了超高分子量聚乙烯的抗蠕变和自润滑特性, 替代PTFE应用于高速铁路及磁悬浮列车的桥梁支座上, 以适应支座快速位移的

需要。

但超高分子量聚乙烯也具有成型加工困难、表面硬度低，机械强度不高，耐热性差、导热性差以及应力开裂等许多缺点。我们通过采用润滑耐磨剂、纳米导热剂共混改性以及化学交联改性，制备了高强度、高承载、抗蠕变、耐热性能好以及优异耐磨性能的改性超高分子量聚乙烯复合耐磨材料[6]，本论文对其性能与PTFE材料进行了对比研究。

1 实验部分

1.1 UHMWPE 复合材料制备

取UHMWPE原料（分子量大于300万）100份，润滑耐磨剂（自制）3份，纳米导热剂2份，有机交联剂0.2份高速混合均匀后于15MPa、 $230 \pm 5^\circ\text{C}$ 加热熔融3h，冷却模压定型为UHMWPE复合材料耐磨板（UHMWPE复合材料）。

1.2 PTFE 材料制备

取PTFE细粉（粒径 $< 50 \mu\text{m}$ ）于30MPa冷压后，室温静置24h后于 $380 \pm 5^\circ\text{C}$ 恒温烧结5h制得PTFE耐磨板材（PTFE材料）。

1.3 性能检测

1.3.1 蠕变率

将样品加工成 $\Phi 100 \times 7 \text{ mm}$ ，使用图1所示的工装，将样品放入限位工装后，对样品匀速加载至90MPa（加载时间1min），记录此时的厚度变化，同时再次

将传感器置零，保持90MPa压力记录24小时样品形变量，算出样品厚度变化率即为蠕变率。

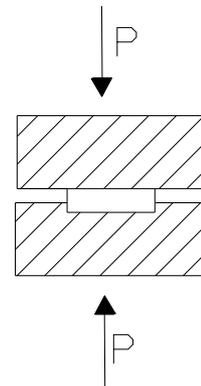


Figure 1. Tooling Schematic diagram of load-carrying capacity testing
图1 承载能力测试工装示意图

1.3.2 摩擦磨耗实验

本论文采用两种摩擦磨耗实验：干摩擦和油脂摩擦。

干摩擦试验参照GB/T 5478-2008标准，采用H-22磨轮，载荷为1Kg，连续磨4000r（转速为60r/min），考察摩擦试验前后重量变化。

油脂摩擦采用双剪试验方法，参照《客运专线桥梁盆式橡胶支座暂行技术条件补充规定》和铁路行业标准TB/T 2331-2004。UHMWPE复合材料与PTFE材料油脂摩擦实验条件及工装示意图分别如表1和图2所示。

Table 1. Test conditions of friction for UHMWPE composites and pure PTFE

表1 UHMWPE复合材料与PTFE材料摩擦实验测试条件

实验条件	压应力/ σ	试验温度	滑动幅度	摩擦速度	累计滑动距离
UHMWPE 复合材料	45MPa	$21 \pm 1^\circ\text{C}$	$\pm 10\text{mm}$	$15\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	50km
PTFE 材料	30MPa	$23 \pm 5^\circ\text{C}$	$\pm 10\text{mm}$	$8\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	10km

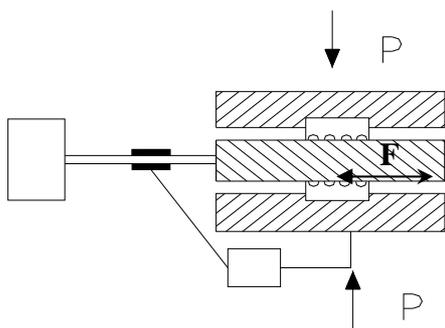


Figure 2. Tooling Schematic diagram of friction testing

图2 摩擦测试工装示意图

1.3.3 其它测试

其它测试均按国家或行业标准要求来进行。

2 结果与讨论

2.1 桥梁支座简介

将改性超高分子量聚乙烯复合原材料通过模压烧结即得耐磨板材，产品实物见图 3。耐磨板典型特点是一表面非常光滑，并带有储油的储油坑，作用是利用光滑面和油脂降低摩擦系数，提高产品耐磨性能；而另外一面带有一定纹路，相对较粗糙，目的是便于产品的安装和固定。耐磨板材是盆式橡胶支座和球型支座等桥梁支座重要组成部分，图 4 是盆式橡胶支座典型结构。在该结构中，耐磨板材起着两个方面的作用：一是利用其竖向刚度和弹性变形，向桥墩传递桥面的支承反力，承受垂直荷载及适应梁端转动；二是通过耐磨材料与滑动板组成的摩擦副，利用其低摩擦系数，可使梁端能自由滑动，水平位移不受限制，保证了桥梁结构在活载、温度变化、混凝土收缩和蠕变等因素作用下能自由变形。因此，耐磨材料在桥梁减振隔震、减少桥梁摩擦、提高桥梁支座使用寿命起了至关重要的作用。



Figure 3. The products of UHMWPE wear resistant composites

图3 UHMWPE 复合耐磨产品

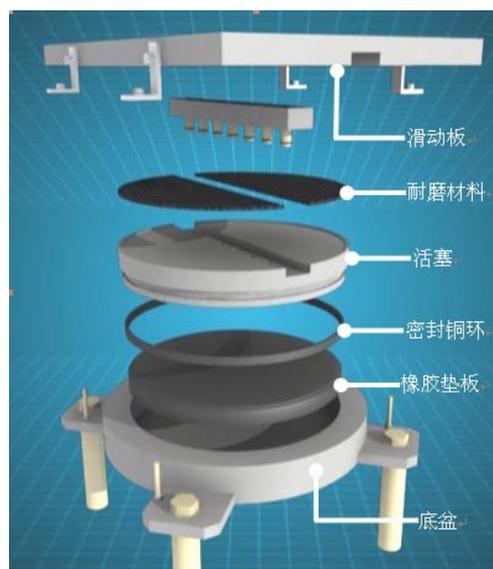


Figure 4. Configuration drawing of pot rubber bearing

图4 盆式橡胶支座结构图

2.2 材料物理机械性能

将制备的 UHMWPE 复合材料及 PTFE 材料在相同测试条件下，按照相同检测方法进行性能检测，其物理机械性能见表 2。从表 2 可以看出，UHMWPE 复合材料密度小，材质轻，PTFE 材料的密度是 UHMWPE 复合材料的 2.3 倍。UHMWPE 复合材料的断裂伸长率为 320%，稍低于 PTFE 材料，但 UHMWPE 复合材料的拉伸强度、弯曲强度、压缩强度以及弹性模量均明显要高于 PTFE 材料，尤其是 UHMWPE 复合材料-60℃低温及室温下缺口冲击均未断。

Table 2. The physicomechanical properties of UHMWPE composites and PTFE

表 2 UHMWPE 复合材料与 PTFE 材料物理机械性能

性能指标	单位	测试方法	典型值	
			UHMWPE 复合材料	PTFE 材料
密度	g/cm ³	GB/T 1033	0.94	2.17
球压痕硬度	MPa	ISO 2039-1	37.3	28.5
拉伸强度	MPa	ISO 527-1	43.1	37
断裂伸长率	%	ISO 527-3	320	380
弹性模量	MPa	GB/T 1040	826	420
压缩强度	MPa	GB/T 1041	35.4	27.9
弯曲强度	MPa	GB/T 9341	18.7	12.3
缺口冲击强度	21℃	ASTM D4020	NB	15
	-60℃		NB	17.3

2.3 耐热性能

纯超高分子量聚乙烯耐热温度较低、热变形温度约 45℃，低于 PTFE 材料热变形温度；导热性能差，导热系数约 0.3 W/m*K，此极大限制了材料的应用。经过改性后的 UHMWPE 复合材料热变形温度有明显提

升，达到 58℃，与 PTFE 材料接近。而且其导热系数也提高近一倍，为替代 PTFE 材料应用于桥梁支座耐磨材料打破了瓶颈，也极大拓展了其在建筑、工程机械等领域应用的可能。

Table 3. The heat-resistance properties of UHMWPE composites and PTFE

表 3 UHMWPE 复合材料与 PTFE 材料耐热性能

性能指标	单位	测试方法	典型值	
			UHMWPE 复合材料	PTFE 材料
热变形温度	℃	GB/T 1634-2004	58	61
导热系数	W/m*K	ASTM D5470	0.58	0.26

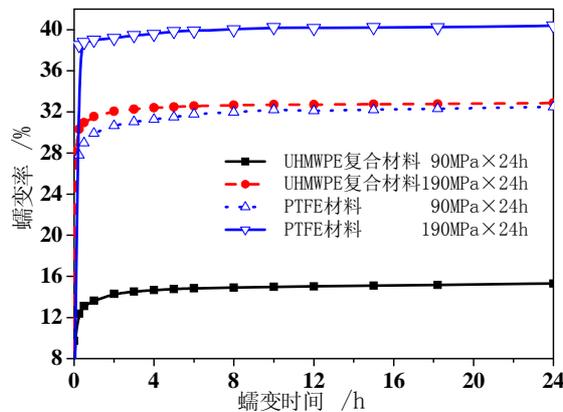


Figure 5. The creep rate of UHMWPE compounds and PTFE under different pressures

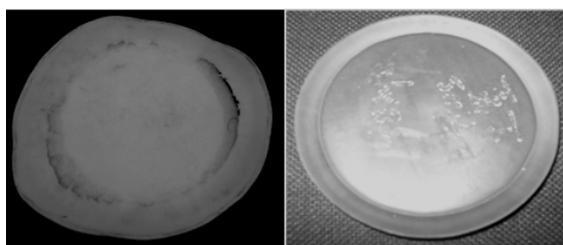
图 5 UHMWPE 复合材料与 PTFE 材料不同压力下的蠕变率

2.4 抗重载性能

本论文采用蠕变率来表征材料的承载能力。超高分子量聚乙烯与 PTFE 两种耐磨板在不同压力下的蠕变率见图 5。从图 5 可见，两种材料在承载压力情况下，随着时间增加，蠕变率明显上升，蠕变 4h 后，变化不大，材料蠕变性能基本趋于稳定，蠕变率约 15%；同时表明 UHMWPE 复合材料在 90MPa 和 190MPa 压应力下的限位承载压缩蠕变率均要明显低于 PTFE 材料，其在 90MPa 压应力下的形变量约为 PTFE 材料蠕变率的 1/2，在 190MPa 压应力下的形变量与 PTFE 材料在 90MPa 压应力下的蠕变情况相当，蠕变量为 32%。从材料蠕变后情况（图 6）也可以明显看出，即使在 190MPa 压力下恒压 24h，UHMWPE 复合材料样品变形较小，而此时 PTFE 材料变形已接近破坏，实验表明 UHMWPE 复合材料 PTFE 材料具有更高的承载能力和抗蠕变能力。



(a) 90MPa (Left : PTFE , right :UHMWPE composites)



(b) 190MPa (Left : PTFE , right : UHMWPE composites)

Figure 6 Sample drawings of UHMWPE composites and PTFE under different pressures creeped after 24 hours

图 6 UHMWPE 复合材料与 PTFE 材料不同压力下蠕变 24h 后样品图

2.5 耐磨性能

将纯 UHMWPE 及 UHMWPE 复合材料干磨后的样品表面通过扫描电镜进行观察，表面形貌见图 7。可以看出，纯 UHMWPE 干磨后样品表面出现大量毛刺，这是 UHMWPE 表层被抽丝形成的碎屑。而 UHMWPE 复合材料表面毛刺的大小和数量明显减少，但形成了少量犁沟沟痕。

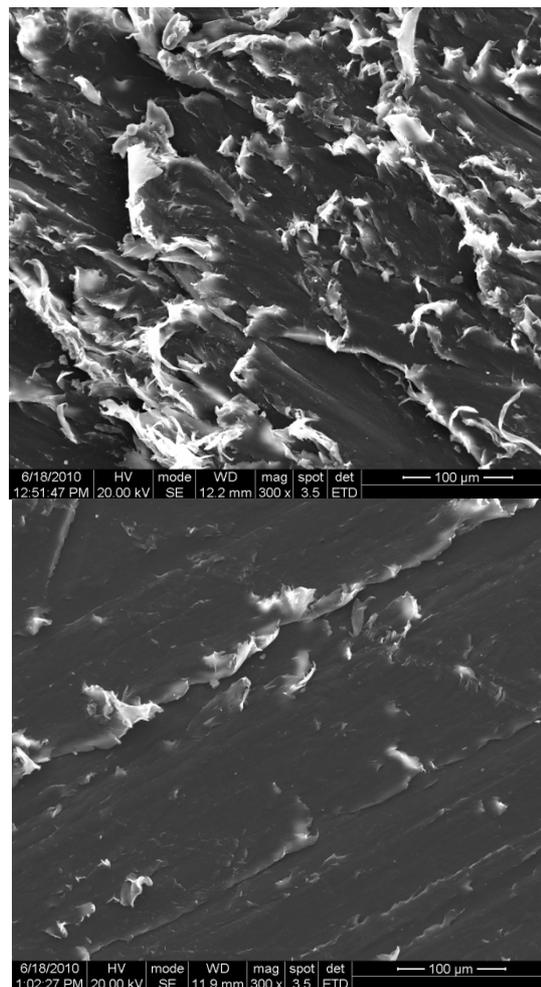


Figure 7. The SEM of wear surfaces of pure UHMWPE and UHMWPE composites

图 7 纯 UHMWPE 材料（左）与 UHMWPE 复合材料（右）磨损表面 SEM 照片

将 UHMWPE 复合材料通过压制储油坑在疲劳试验机上进行摩擦系数及 50km 磨耗测试，结果表明：UHMWPE 复合材料的静摩擦系数低，在磨耗里程为 3-25km 时，动摩擦系数比较稳定，这是由于配方中的

的耐磨剂形成了耐磨剂转移膜，避免了摩擦副与耐磨板的直接接触摩擦。随着磨耗里程增加，动摩擦系数逐渐增大，这可能是摩擦生热并破坏了转移膜所致。50km 动摩擦系数达到 0.04（见图 8），磨耗为 $0.5 \mu\text{m}/\text{km}$ ，满足高速铁路桥梁支座对超高分子量聚乙烯耐磨板的使用要求。从图也可以看出，UHMWPE 复合材料经过 50km 磨耗后，产品有轻微变形，储油坑明显变浅，表面有类似刮伤的沟痕。从表 3 对照数据可以明显看出 UHMWPE 复合材料静摩擦系数稍高于 PTFE 材料，但耐磨性能远好于 PTFE 材料。

将两种耐磨材料在相同测试条件下进行磨耗试验发现，PTFE 材料在经过 4km 摩擦后就明显变形，且表面破坏磨损严重，有较多碎屑被拉出。这表明在摩擦条件更苛刻情况下，UHMWPE 复合材料耐磨性能

仍明显好于 PTFE 材料。

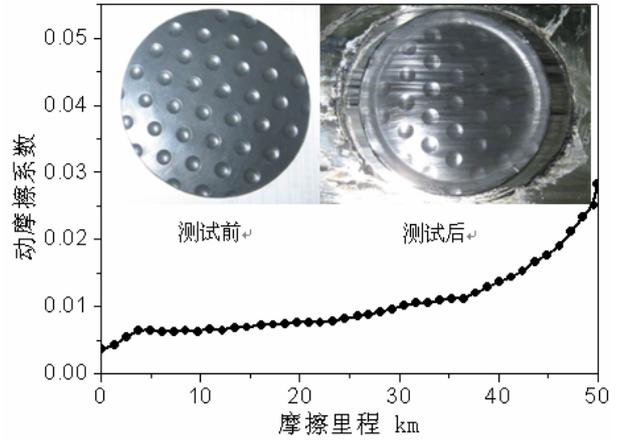


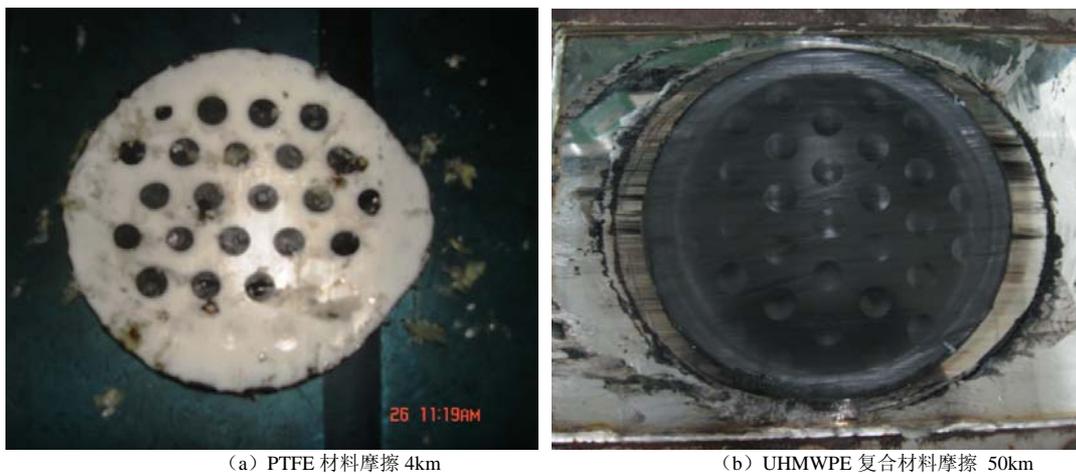
Figure 8 The dynamic friction coefficient drawings of UHMWPE composites changed with abrasion miles

图 8 UHMWPE 复合材料随磨耗里程动摩擦系数变化图

Table 4 The wear-resisting property of UHMWPE composites and PTFE

表 4 UHMWPE 复合材料与 PTFE 材料耐磨性能

性能指标	单位	测试方法	典型值	
			UHMWPE 复合材料	PTFE 材料
初始静摩擦系数	/	客运专线桥梁盆式橡胶支座暂行技术条件补充规定	0.0035	0.0027
线磨耗率	$\mu\text{m}/\text{km}$		0.4	13.5



(a) PTFE 材料摩擦 4km

(b) UHMWPE 复合材料摩擦 50km

Figure 9 Sample drawings of two kinds of wear resistant materials tested different miles under the same conditions

图 9 相同条件下两种耐磨材料摩擦不同里程后样品图

2.6 产品应用

为满足国内高速铁路建设的需要，我们从 2007 年着手开发桥梁支座用超高分子量聚乙烯耐磨材料，建成了国内第一条自动化生产线，实现了批量生产，产品在武广、京沪、厦深等高速铁路桥梁支座中得到广泛应用。

3 展望

本论文研制的 UHMWPE 复合耐磨材料更能适应载荷量更大、相对位移速度更快、累计滑动位移量更长和耐磨要求更高的工作环境，是高速铁路、公路桥梁支座耐磨材料理想之选。根据国家《中国铁路中长期发展规划》，未来 10 年，我国高速铁路建设里程超过 1.6 万公里，而铁路桥梁占总里程达 80% 左右。可以预料，所研制的高性能改性超高分子量聚乙烯复合耐磨材料在高速铁路、公路桥梁支座有着广阔的应用前景。

References(参考文献)

- [1] WANG Zhao-hu . Design of JingHu High Speed Railway Bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2 (5): 13-16
王召祐. 京沪高速铁路桥梁设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2 (5): 13-16
- [2] DANG Xue—ming , CHEN Yu—hang , LE Qi—fa , ZHANG Cheng—de , HUANG Wen—hao. Microstructure measurement of

PTFE filled with nanoparticle by atomic force microscopy. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2003, 22 (2): 145-148

- 党学明, 陈宇航, 乐启发等. 纳米颗粒填充的 PTFE 微结构的原子力显微镜测量. 电子显微学报, 2003, 22 (2): 145-148
- [3] China Plastics Industry. Study of Property of Filled PTFE Composit. China Plastics Industry, 2004, 32 (8): 4-7
回素彩, 陈旭. 填充改性聚四氟乙烯复合材料的性能. 塑料工业, 2004, 32 (8): 4-7
- [4] HE Peng, PENG Xin, WANG Huai-yuan . Tribological and mechanical properties of fiber/Ekonol/PTFE composites. Journal of Functional Materials, 2007, 38 (12): 2044-2047
何鹏, 冯新, 汪怀远等. 纤维/Ekonol/PTFE 复合材料的力学与摩擦学性能研究. 功能材料, 2007, 38 (12): 2044-2047
- [5] Lei Yi Guo Jianliang . Friction and Wear Behavior of Nano-particulates and Polytetrafluoroethylene Filled Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composites. Lubrication Engineering, 2007, 32 (5): 23-26
雷毅, 郭建良. 纳米粒子和聚四氟乙烯填充 UHMWPE 复合材料的摩擦磨损性能研究. 润滑与密封, 2007, 32 (5): 23-26
- [6] Jiang Wending, Huang Anmin, Deng Rusheng . PREPARATION AND COMPARATIVE STUDY OF TWO KINDS OF SLIDING BLOCKS FOR HIGH-SPEED RAILWAY BRIDGE BEARINGS. Engineering Plastics Application, 2009, 37 (11): 51-53
姜稳定, 黄安民, 邓如生等. 两款高速铁路桥梁支座滑块的制备及对比研究. 工程塑料应用, 2009, 37 (11): 51-53
- [7] XUE Yang. Ultra High Molecule Weight Polyethylene / High Density Polyethylene/ Carbon Nanotube Friction Composites and Tribology Research [D]. Shanghai : School of Material Science and Engineering, East China University of Science and Technology, 2006.
薛扬. 超高分子量聚乙烯/ 高密度聚乙烯/ 纳米碳管摩擦复合材料的制备与摩擦学研究[D]. 上海: 华东理工大学材料科学与工程学院, 2006
- [8] Unal H., Mimaroglu A. Friction and Wear Behaviour of Unfilled Engineering Thermoplastics [J]. Materials and Design, 2003, (24): 183-187