

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.11.005

基于正交设计的 PEEK 基复合材料摩擦学性能

刘后宝¹, 苏新清¹, 夏炎², 孙克原², 靳予², 王孝刚², 陶杰¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 211106; 2. 南京肯特复合材料股份有限公司, 南京 211162)

摘要: 以高性能特种工程塑料聚醚醚酮 (PEEK) 为基体, 采用正交试验法研究了短切碳纤维 (SCF)、纳米 SiO₂、聚四氟乙烯 (PTFE) 三种填料对 PEEK 基复合材料摩擦学性能的影响, 并对磨损形貌和摩擦转移膜进行观察和分析。通过正交分析优化数据, 得到当 PEEK/SCF/纳米 SiO₂/PTFE 的质量比为 65/15/5/15 时, 所制备的复合材料的摩擦系数和比磨损率最低, 此时多元组分的 PEEK 复合材料的摩擦系数为 0.17, 相比于纯 PEEK 降低了 55.3%; 比磨损率降低至 $0.32 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 相比于纯 PEEK 降低了 93.3%; 拉伸强度为 95.8 MPa, 高于纯 PEEK 13.4%。此成分配比下的 PEEK 复合材料耐磨性能达到最佳, 其主要磨损机制为磨粒磨损。

关键词: 聚醚醚酮; 短切碳纤维; 纳米 SiO₂; 聚四氟乙烯; 摩擦学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)11-0020-05

Tribological Properties of PEEK Composites Based on Orthogonal Design

Liu Houbao¹, Su Xinqing¹, Xia Yan², Sun Keyuan², Jin Yu², Wang Xiaogang², Tao Jie¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Nanjing Comp Tech Composites Co. Ltd., Nanjing 211162, China)

Abstract: The effect of three fillers of short carbon fiber (SCF), nano SiO₂ and polytetrafluoroethylene (PTFE) on the tribological properties of PEEK composites was investigated by orthogonal test. The wear morphology and friction transfer films were observed by means of SEM. It is found that when the mass ratio of PEEK, SCF, nano SiO₂ and PTFE is 65/15/5/15, the composites possessed the lowest friction coefficient and specific wear rate, the friction coefficient of the multi-component PEEK composite is 0.17, which is 55.3% lower than that of pure PEEK, the specific wear rate is $0.32 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, which is 93.3% lower than that of pure PEEK, and the tensile strength is 95.8 MPa, which is 13.4% higher than that of pure PEEK. The PEEK composite of this composition has the best wear resistance, and the main wear mechanism is abrasive wear.

Keywords: poly(ether-ether-ketone); short carbon fiber; nano SiO₂; polytetrafluoroethylene; tribological property

由于高分子材料具有高比强度和刚度, 优异的自润滑能力, 质量轻, 无磁性和高耐蚀性的特性, 目前被广泛应用于各种工程领域。在摩擦学领域中, 与金属、陶瓷和其它材料相比, 高分子材料的一个重要优点是可以通过添加许多类型的增强剂、润滑剂和其它填料来改善摩擦学性能, 以确保具有更广泛的应用^[1-2]。聚醚醚酮 (PEEK) 是具有优良综合性能的高性能特种工程塑料之一。为了满足现代工业的需求, 许多学者将 PEEK 与其它高性能聚合物共混或与纤维、粉状填料复合, 来进一步提高其力学、

热学和摩擦学性能, 改善其在无润滑、高温、高负载、腐蚀等严酷环境下的使用性能, 并降低材料成本, 扩大其使用范围^[3-6]。碳纤维是一种性能优异的碳系材料, 用短切碳纤维 (SCF) 和其它润滑剂增强改性 PEEK 已被证明可有效地提高 PEEK 的耐磨性^[7-8]。J. Flock 等^[9] 研究了碳纤维增强 PEEK 复合材料的摩擦学性能, 研究结果表明, 碳纤维质量分数在 10%~20% 时复合材料具有最佳的耐磨性。彭旭东等^[10] 采用纳米 Al₂O₃ 与聚四氟乙烯 (PTFE) 共混改性 PEEK, 考察了其在干摩擦条件下的摩擦磨损性

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金项目 (BA2015066)

通讯作者: 苏新清, 副教授, 主要研究方向为聚合物基复合材料的制备及其应用, 纳米材料的制备与表征 E-mail: sxq_msc@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2018-09-03

引用格式: 刘后宝, 苏新清, 夏炎, 等. 基于正交设计的 PEEK 基复合材料摩擦学性能 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(11): 20-24.

Liu Houbao, Su Xinqing, Xia Yan, et al. Tribological properties of PEEK composites based on orthogonal design[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(11): 20-24.

能,研究表明,纳米 Al_2O_3 能显著提高材料的耐磨性,当纳米 Al_2O_3 质量分数为 5%~7% 时,复合材料的摩擦系数和比磨损率最低。J. Bijwe 等^[11] 系统研究了 PTFE 含量对 PEEK/PTFE 复合材料的力学性能和不同磨损方式下的摩擦性能的影响,研究表明,通过添加 PTFE 可以使复合材料的摩擦系数和比磨损率明显降低,但力学性能有所下降,在 PTFE 质量分数达到 30% 时,材料表现出最佳的综合性能。

高铁制动系统运行环境的特殊性(高速运行中制动会产生非常大的摩擦力及温度),迫使应用于高铁制动系统执行部件中涡旋式压缩机上的活塞环要具有很高的强度、热稳定性及耐磨性等。传统的金属活塞环易生锈、耐磨性差、质量重、密封性差;而单一的塑料活塞环强度低、耐磨性较差,都难以适应高铁制动系统中的使用环境。因此笔者提出以 SCF 为增强材料,高性能特种工程塑料 PEEK 为基体,配合纳米 SiO_2 及 PTFE,采用热压成型工艺制备出 PEEK 基耐磨复合材料,重点考察了共混改性复合材料的摩擦学性能及磨损机制。利用正交设计科学地安排试验和分析结果,以期获得性能优异的新型 PEEK 基复合材料的最佳组分,在保证强度的同时具有优异的耐磨性,能够满足高铁制动系统运行环境的特殊要求。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PEEK: 770PF, 玻璃化转变温度为 143°C , 熔融温度为 343°C , 吉林省中研高分子材料股份有限公司;

SCF: 单丝直径为 $7\ \mu\text{m}$, 长径比 5~10, 青岛远辉复合材料有限公司;

纳米 SiO_2 : 平均粒径为 $20\ \text{nm}$, 南京天行新材料有限公司;

PTFE: 中昊晨光化工研究院有限公司;

硅烷偶联剂: KH560, 南京创世化工助剂有限公司;

无水乙醇、浓硝酸和脱模剂均为市售。

1.2 主要仪器及设备

摩擦磨损试验机: MMS-2A 型, 济南竞成测试技术有限公司;

微电子控制万能试验机: CTM-C104 型, 深圳市新三思材料检测有限公司;

场发射电子显微镜 (FESEM): 1550 型, 德国卡

尔蔡司公司;

光学显微镜: DMM-580C 型, 上海蔡康光学仪器有限公司;

高速混合机: SHR-10A 型, 张家港市亿利机械有限公司;

高速气流混料机: AM-30L 型, 玉环万润机械有限公司。

1.3 试样制备

将质量分数 1% 的纳米 SiO_2 和硅烷偶联剂 KH560 用无水乙醇稀释, 用磁力搅拌与纳米 SiO_2 充分混合均匀, 之后超声分散 30 min, 烘干至恒重后研磨过筛备用。将 SCF 在体积比为 1:1 的乙醇/丙酮溶液中回流 48 h, 以脱除 SCF 表面的上浆剂。清洗干燥后, 60°C 下在浓硝酸中用 250 W, 40 kHz 的超声处理 2 h。处理完成后用蒸馏水清洗 SCF 至中性, 再于 80°C 烘干至恒重备用。将 PEEK 粉料、SCF, 纳米 SiO_2 在高速混合机中预混, 再加入一定含量的 PTFE 粉料在高速气流混料机中充分混合均匀。将混合好的粉料加入金属模具, 以 390°C 的成型温度, 10 MPa 的成型压力热压成型。最后将制备的试样在 260°C 条件下进行 2 h 的退火处理, 得到 PEEK/SCF/纳米 SiO_2 /PTFE 复合材料。

1.4 性能测试与表征

拉伸强度按照 GB/T 1040.2-2006 测试, 拉伸速率为 $5\ \text{mm}/\text{min}$, 每组测试 5 个样, 拉伸强度和断裂伸长率为实验值的平均值。

摩擦磨损性能按照 GB/T 3960-2006 测试, 测试方法如图 1 所示。

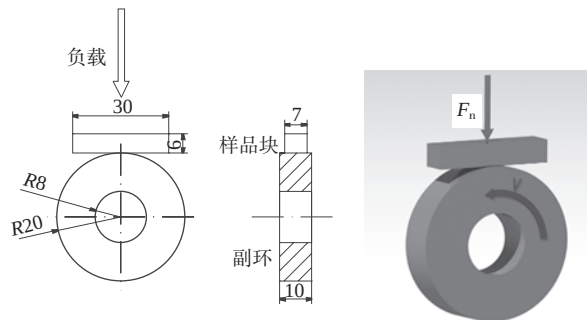


图 1 环-块式摩擦磨损实验示意图

摩擦副的接触方式为环-块接触, 对磨件为 45° 钢环。实验条件为载荷 196 N, 转速 $200\ \text{r}/\text{min}$, 测试时间 2 h, 实验数据取每组 5 个试样的平均值。整个测试过程中的摩擦系数 μ 由摩擦磨损试验机记录, 比磨损率 W 表示材料的耐磨性, 单位为 $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 其计算公式为:

$$W = \frac{\Delta m}{\rho F_n L}$$

式中: Δm ——试样测试前后的质量差, g;

ρ ——试样的密度, g/mm³;

F_n ——试样测试时所受到的正压力, N;

L ——整个测试过程中的实际滑动距离, m。

实验结束后采用 FESEM 观察试样磨损面, 采用光学显微镜对偶钢环表面的转移膜进行观察, 结合测试结果分析磨损机制。

2 结果与讨论

2.1 正交试验方案设计及测试结果

针对涡旋式压缩机用活塞环在高铁制动系统中的特殊环境, 通过添加纳米 SiO₂, SCF 以及 PTFE 进行混合改性, 探索改善 PEEK 复合材料活塞环使用性能的新途径。根据前期的研究成果及参考相关文献, 为了科学有效地找出最佳的成分配方, 采用 3 因素 3 水平的正交试验法设计研究方案, 具体试验方案如表 1 所示。对各组分 PEEK 复合材料的拉伸强度、硬度及摩擦磨损性能进行相关测试, 选用标准正交表 L₉(3⁴), 测试结果如表 2 所示。

表 1 PEEK 复合材料正交试验设计方案

水平	因素			%
	A (SCF)	B (纳米 SiO ₂)	C (PTFE)	
1	5	5	5	
2	10	10	10	
3	15	15	15	

表 2 PEEK 复合材料正交试验测试结果

序号	因素				测试结果			
	A	B	C	D 误差列	拉伸强度 / MPa	硬度 (HD)	μ	$W / [\times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}]$
1	1	1	1	1	91.7	82.4	0.33	2.5
2	1	2	2	2	87.2	83.1	0.23	3.2
3	1	3	3	3	81.6	82.9	0.25	4.3
4	2	1	2	3	98.5	81.2	0.21	1.1
5	2	2	3	1	86.4	84.9	0.24	2.3
6	2	3	1	2	89.7	89.6	0.29	2.7
7	3	1	3	2	95.8	90.6	0.17	0.32
8	3	2	1	3	106.7	97.3	0.22	1.2
9	3	3	2	1	92.9	95.6	0.24	2.6
10 ¹⁾	0	0	0	0	83	81.5	0.38	4.8

注: 1) 序号为 10 表示 PEEK 的测试结果。

2.2 极差分析

为了进一步了解 PEEK 复合材料中各组分对摩擦性能影响的大小和规律, 采用极差分析法来讨论。在极差分析法中, K 值对应的是各水平上各因素所对应的实验结果的均值, 极差 R 的大小用来判断对各影响因素的主次关系, R 值越大, 则该因素的不同水平变化对实验结果的影响越大, 反之, 影响较弱。

计算各因素在不同水平下的平均摩擦系数和比磨损率以及其均值的极差如表 3 和表 4 所示。

表 3 PEEK 复合材料摩擦系数的极差分析

项目	因素			
	A	B	C	D 误差列
K_{1j}	0.270	0.237	0.281	0.270
K_{2j}	0.247	0.230	0.224	0.230
K_{3j}	0.210	0.260	0.220	0.227
R	0.060	0.030	0.061	0.043

表 3 的极差分析结果表明, 各因素对 PEEK 复合材料摩擦系数影响的主次顺序为 PTFE>SCF> 纳米 SiO₂。在所研究的水平范围内, 摩擦系数随着 SCF 和 PTFE 含量的增加而减小, 而过高含量的纳米 SiO₂ 会在基体中发生团聚导致摩擦系数升高。

对于 PEEK/SCF/ 纳米 SiO₂/PTFE 复合材料, 由于 SCF 独特的石墨状结构, 在滑动磨损条件下具有很好的润滑作用, 有利于减少摩擦系数^[12]; 纳米 SiO₂ 在低填充量下有助于形成高质量的摩擦转移膜, 能很好地降低复合材料的摩擦系数^[13]; PTFE 作为内部润滑剂与基体复合能使复合材料的摩擦系数有效地降低。

表 4 PEEK 复合材料比磨损率的极差分析

项目	因素			
	A	B	C	D 误差列
K_{1j}	3.333	1.307	2.133	2.467
K_{2j}	2.033	2.233	2.300	2.073
K_{3j}	1.373	3.200	2.307	2.200
R	1.960	1.893	0.174	0.394

极差分析结果表明, 各因素对 PEEK 复合材料比磨损率影响的主次顺序为 SCF> 纳米 SiO₂>PTFE。在所研究的水平范围内, 比磨损率随着 SCF 含量的增加而减小, 而纳米 SiO₂ 含量增加会导致比磨损率上升, PTFE 含量对比磨损率影响不明显。

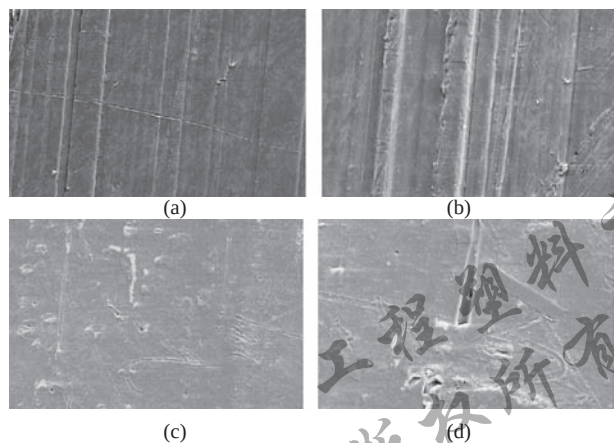
对于 PEEK/SCF/ 纳米 SiO₂/PTFE 复合材料, SCF 在基体中能有效地承载外部载荷, 从而可以有效地降低 PEEK 基体的磨损; 纳米 SiO₂ 在低填充量下促使复合材料在摩擦对偶面上形成高质量的摩擦转移膜, 能很好地降低金属钢环对材料的刮擦和切削作用, 从而提高复合材料的耐磨性^[14], 但高含量纳米 SiO₂ 在基体中极易发生团聚, 在摩擦过程中团聚体块状的脱落会造成较高的磨损; PTFE 的润滑作用虽然可以有效降低复合材料的摩擦系数, 但对复合材料的耐磨性影响不明显。

通过表 2 中的测试数据及相关的极差分析, 结合实际应用中高强耐磨的要求, 通过多元组分

的复合,确定最优组分为 A3B1C3,即在 PEEK/SCF/纳米 SiO₂/PTFE 复合材料中,SCF 质量分数为 15%,纳米 SiO₂ 质量分数为 5%,PTFE 质量分数为 15%。此时 PEEK 复合材料的摩擦系数为 0.17,相比于纯 PEEK 降低了 55.3%;比磨损率降至 $0.32 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,相比于纯 PEEK 降低了 93.3%;拉伸强度为 95.8 MPa,也高于纯 PEEK 13.4%。

2.3 磨损表面形貌及摩擦转移膜分析

图 2 为 PEEK 及 PEEK/SCF/纳米 SiO₂/PTFE (其中 SCF 质量分数为 15%,纳米 SiO₂ 质量分数为 5%,SCF 质量分数为 15%) 复合材料的磨损后的表面形貌 SEM 照片。



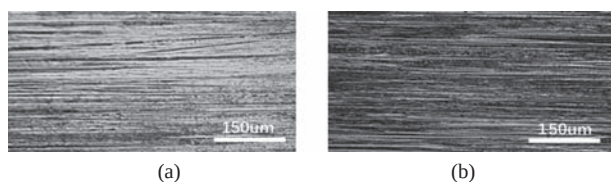
a—纯 PEEK(放大 500 倍); b—纯 PEEK(放大 1000 倍);
c—PEEK/SCF/纳米 SiO₂/PTFE(放大 500 倍);
d—PEEK/SCF/纳米 SiO₂/PTFE(放大 1000 倍)

图 2 PEEK 及其复合材料磨损表面 SEM 照片

从图 2a 和 2b 可以看出,纯 PEEK 材料的摩擦磨损表面除了存在许多的犁沟,还存在明显的擦痕,并附有少量 PEEK 材料的磨屑,这是因为界面剪切强度较低的纯 PEEK 基体很容易被撕下来,形成磨屑。除此之外,纯 PEEK 材料还具有塑形流动“飞边”,其产生是由于在摩擦过程中摩擦温度升高导致 PEEK 的表层材料在周期的应力作用下产生热塑性变形和流动。此时的主要磨损机制为磨粒磨损,同时伴有一定的黏着磨损。从图 2c 和 2d 可以看出,PEEK/SCF/纳米 SiO₂/PTFE 复合材料摩擦磨损表面的磨损形貌痕迹比纯 PEEK 材料显著减轻,出现了 SCF 脱落和裸露的现象。在摩擦过程中,复合材料的表面部分基体磨损,从而使 SCF 裸露,SCF 在摩擦界面处起到传递载荷和承载应力的作用,可以有效地保护基体,防止基体的进一步磨损。除此

之外,还可以看出,PEEK/SCF/纳米 SiO₂/PTFE 复合材料的摩擦磨损表面也分布着一些磨粒,参与了摩擦过程,能有效地降低摩擦时的界面剪切力。此时的主要磨损机制为轻微的磨粒磨损。

在滑动摩擦条件下,聚合物及其复合材料的摩擦学性能在很大程度上取决于聚合物在另一侧形成转移膜的能力^[15]。图 3 为 PEEK 及 PEEK/SCF/纳米 SiO₂/PTFE 复合材料摩擦后在对偶件表面形成的摩擦转移膜。对于纯 PEEK,从图 3a 可以看出,此时的转移膜连续性差且分布不均匀,这是由于磨屑在钢盘表面没有很好的保持力,即转移膜稳定性和保持力差,且润滑性不如碳纤维及 PTFE 碎屑。对于 PEEK/SCF/SiO₂/PTFE 复合材料,由于 SCF 独特的石墨化结构和 PTFE 极好的润滑能力,纳米粒子具有较高的强度和刚度、良好的导热性和自润滑性能,有助于摩擦接触区热量的传导或散发,使摩擦区温度增加幅度减小,同时也有助于 PEEK 向对偶件表面转移,生成薄而连续均匀的转移膜(见图 3b),这层转移膜附着在对偶钢的表面,会削弱钢盘凸凹表面对材料的刮擦、犁削和破坏。因此添加适量的 SCF,PTFE 和纳米 SiO₂ 能有效降低 PEEK 复合材料的摩擦系数,提高复合材料的耐磨性。



a—纯 PEEK; b—PEEK/SCF/纳米 SiO₂/PTFE

图 3 PEEK 及其复合材料摩擦转移膜光学显微镜图

3 结论

(1) 通过设计正交试验的方法研究了多组不同成分配比的 SCF,纳米 SiO₂,PTFE 填充的 PEEK 耐磨复合材料摩擦磨损性能,确定其中的最佳配方为 PEEK 质量分数为 65%,SCF 质量分数为 15%,SiO₂ 质量分数为 5%,PTFE 质量分数为 15%。

(2) 极差分析结果表明,PTFE 与 SCF 含量是影响 PEEK 复合材料摩擦系数的主要因素,SCF 和纳米 SiO₂ 含量为影响 PEEK 复合材料磨损率的主要因素。

(3) 通过观察磨损面可以看出,纯 PEEK 的主要磨损机制是磨粒磨损和黏着磨损,而添加了 SCF,纳米 SiO₂,PTFE 后的 PEEK 复合材料主要磨损机制为轻微的磨粒磨损。

参考文献

- [1] Lin Leyu, Schlarb A K. Effect of the varied load conditions on the tribological performance and the thermal characteristics of PEEK-based hybrid composites[J]. Tribology International, 2016, 101:218-225.
- [2] Rodriguez V, Sukumaran J, Schlarb A K, et al. Influence of solid lubricants on tribological properties of polyetheretherketone (PEEK) [J]. Tribology International, 2016, 103:45-57.
- [3] Mizobe K, Honda T, Koike H, et al. Relationship between load, rotation speed and, strength in all PEEK and PEEK race PTFE retainer hybrid polymer bearings under dry rolling contact fatigue[J]. Advanced Materials Research, 2012, 567:66-70.
- [4] Thomas S, Visakh P M. Handbook of engineering and specialty thermoplastics[J]. Wiley John Sons, 2011, 73(1):3-15.
- [5] Veazey D, Hsu T, Gomez E D. Next generation high - performance carbon fiber thermoplastic composites based on polyaryletherketones [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 134(6):DOI: 10.1002/app.44441.
- [6] Zhang G, Schlarb A K. Morphologies of the wear debris of polyetheretherketone produced under dry sliding conditions:Correlation with wear mechanisms[J]. Wear, 2009, 266(7):745-752.
- [7] Dyson C J, Priest M, Fox M F, et al. The tribological behaviour of carbon fibre reinforced polyaryletherketones (PAEKs) through their glass transitions[J]. Journal of Engineering Tribology, 2016, 230(10):1 183-1 196.
- [8] Tang Q, Chen J, Andrea V. Tribological behaviors of carbon fiber reinforced PEEK sliding on ion-nitrided 2Cr13 steel lubricated with tap water[J]. ASLE Transactions, 2015, 58(4):691-697.
- [9] Flock J, Friedrich K, Yuan Q. On the friction and wear behaviour of PAN-and pitch-carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. Wear, 1999, 225-229(4):304-311.
- [10] 彭旭东, 马红玉, 雷毅. 纳米 Al_2O_3 和聚四氟乙烯填充聚醚醚酮基复合材料摩擦学特性研究 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(2):68-70.
- Peng Xudong, Ma Hongyu, Lei Yi. Tribological properties of nano- Al_2O_3 and PTFE filled PEEK composite[J]. Journal of China University of Petroleum:Natural Science Edition, 2004, 28(2):68-70.
- [11] Bijwe J, Sen S, Ghosh A. Influence of PTFE content in PEEK-PTFE blends on mechanical properties and tribo-performance in various wear modes[J]. Wear, 2005, 258(10):1 536-1 542.
- [12] Jacobs O, Jaskulka R, Yan C, et al. On the effect of counterface material and aqueous environment on the sliding wear of various PEEK compounds[J]. Tribology Letters, 2005, 18(3):359-372.
- [13] Xue Qunjia, Wang Qihua. Wear mechanisms of polyetheretherketone composites filled with various kinds of SiC[J]. Wear, 1997, 213(1-2):54-58.
- [14] 龙春光, 戴文利, 陈平. 聚醚醚酮复合材料的转移膜研究 [J]. 润滑与密封, 2005(3):16-19.
- Long Chunguang, Dai Wenli, Chen Ping. A study on the transfer film s of PEEK composites[J]. Lubrication Engineering, 2005(3):16-19.
- [15] Zhao Q, Bahadur S. Investigation of the transition state in the wear of polyphenylene sulfide sliding against steel[J]. Tribology Letters, 2002, 12(1):23-33.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2018 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 19 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2018 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元 / 套。

2. 2000 ~ 2018 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元 / 盘。本光盘除收录 2000 ~ 2018 年 19 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 600 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>