

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.06.025

PTFE 改性研究进展

文怀兴,曹蕾,高飒飒

(陕西科技大学机电工程学院,西安 710021)

摘要:概述了聚四氟乙烯 (PTFE) 的优缺点,分析了表面改性、共混改性和填充改性等三种方法对 PTFE 力学性能和摩擦学性能的影响。表面改性可改善难粘接问题,但设备昂贵;共混改性简单无污染,但限制了无机填料的加入从而导致改性效果有限;填充改性操作简单,且多种填料的加入可在很大程度上满足工程实际应用,可提高材料的整体性能。最后,结合近年来的研究成果及研究过程中存在的问题对 PTFE 复合材料的改性研究方向进行了展望。

关键词:聚四氟乙烯;表面改性;共混改性;填充改性;摩擦磨损

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)06-0133-06

Research Progress on Modification of PTFE

Wen Huaixing, Cao Lei, Gao Sasa

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract : The advantages and disadvantages of polytetrafluoroethylene (PTFE) were summarized. The effects of surface modification, blending modification and filling modification on the mechanical properties and tribological properties of PTFE were analyzed. The surface modification can improve the difficult-adhesion problem, but the equipment is expensive. Blending modification is simple and less pollution, but the addition of inorganic filler is limited, resulting in limited modification effect. The filling modification operation is simple, and a variety of fillers are added, it can meet the practical application of the project to a large extent, and improve the overall performance of materials. Finally, the research direction of PTFE composites were prospected in combination with the research results in recent years and the problems in the research process.

Keywords : polytetrafluoroethylene ; surface modification ; blending modification ; filling modification ; friction and wear

聚四氟乙烯 (PTFE) 因构成中含有的强氟碳键而具有良好的耐热性、绝缘性、自润滑性能以及不燃、不粘等优异特性,同时因其耐高温和化学性能稳定而具有抵抗“王水”腐蚀的能力,从而获得“塑料之王”的美誉,被广泛应用于国防、机械工业及医用材料等领域,特别是在摩擦学领域中应用最为广泛^[1],故而在工程塑料领域,PTFE 成为研究者青睐的材料之一。但由于 PTFE 硬度低、易磨损和耐蠕变性差等缺点,在实际应用生产中受到一定限制,因而研究者一直致力于寻找一种在不改变 PTFE 自身优点的同时提高其力学性能的优异方法,从而扩展其应用领域^[2-3]。

PTFE 的改性主要是与其它材料结合达到补偿 PTFE 自身的缺陷,主要包括表面改性、共混改性、填充改性^[4-6],其中共混改性与填充改性主要应用于复合材料的制备,而表面化学改性主要针对粘接问题。

1 表面改性

PTFE 因极低的表面活性和突出的不粘性,降低了与其它材料的粘接程度,而表面改性不仅可以改善其表面惰性以及与填料之间的相容性,还可提高基体材料的表面活性。PTFE 表面化学改性目前主要以等离子体处理法、辐射处理法和化学溶液处理法等为主。这些方法都是去除表面氟离子,将活性较强的官能团接枝在表面上,达到提高基体材料活性的目的。

U. König 等^[7]采用微波水蒸气等离子体处理氟聚合物表面生成自由基,并将稳定均匀的聚丙烯酸利用气相接枝聚合的方法接枝到 PTFE 箔片上,利用 X 射线光电子能谱、原子力显微镜等仪器对改性表面进行表征。研究表明,接枝层的厚度随着丙烯酸蒸汽压的增加而逐渐增大,而与反应时长之间的关系并不大,且发现接枝层厚度约为 70 nm 时持久

基金项目: 陕西科技大学科研启动基金 (2018GBJ-01)

通讯作者: 文怀兴,博士,教授,博士生导师,研究方向为先进制造技术及摩擦学 E-mail : wenhx@ sust.edu.cn

收稿日期: 2019-04-03

引用格式: 文怀兴,曹蕾,高飒飒. PTFE 改性研究进展 [J]. 工程塑料应用,2019,47(6) : 133-138.

Wen Huaixing, Cao Lei, Gao Sasa. Research progress on modification of PTFE[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(6) : 133-138.

性良好。其次通过观察动态接触角测试结果发现,接枝层的存在显著增强了材料的亲水性。此种方法不仅具有处理温度低、时间短等特点,还可达到小污染、节能的目的,但由于设备昂贵从而限制了应用范围。而辐射处理操作简单,在室温下便可反应,不需添加催化剂和引发剂,并且接枝率也可通过接枝时间、温度和辐射剂量来控制。作为地球表面主要能源之一的太阳辐射,它的热和光化学效应可引起户外作业设备的材料结构、性能发生重要变化。Ma Guozheng^[8]等利用太阳辐射模拟器对PTFE本体和薄膜样品进行了一系列太阳辐射试验,结果表明,辐照后PTFE表面粗糙度、C元素相对含量和与水之间的接触角均有不同程度的增加。虽然随着辐照时间的增加摩擦系数增大,但经辐照后,磨损表面较光滑,磨损率逐渐降低。辐射处理不仅简单且易操作,但高能射线在穿透较厚的接枝材料时会对PTFE基体造成损伤,从而导致PTFE的力学性能显著降低的同时,表面光滑度消失。

辐射处理和等离子体处理主要用于处理PTFE膜,而化学溶液不仅适用于PTFE膜,也可用于接枝改性PTFE粉末,且改性效果良好。景亚宾等^[9]制备了经钠萘活化处理的PTFE粉料和未经活化处理的纯PTFE粉料,分别与25%玻璃纤维(GF)进行共混,并对其性能分析对比。结果表明,经钠萘活化处理的PTFE的力学性能基本保持不变,且平均摩擦系数可降低至0.11,表面接触角为98.9°,表面能为23.69 J/m²,加入GF共混可发现,其相对应的性能也有所提高。目前,钠萘溶液表面处理是效果最好的改性方法,但也存在一些缺点,如PTFE表面经处理后明显变暗或变成棕黑色,长时间曝光将会减小粘合性能,同时需要处理大量废液,操作风险较高。为此,研究者需对表面化学处理液进行新探索。Song Haiming等^[10]将多巴胺(DA)溶解在盐酸羟甲基氨基甲烷(Tris)中,用来处理PTFE薄膜,结果表明,PTFE膜上成功沉积了聚乙烯亚胺(PEI),改性后的PTFE膜的亲水性和润湿性均有较大提高,且具有较高的渗透通量,故在强酸水溶液中具有长期的稳定性和耐久性,具有广泛的应用前景。化学溶液改性聚合物效果良好,但碱金属盐溶液具有大的反应活性和高操作风险,易造成环境污染且需要处理大量废液。

2 共混改性

共混的基本原理是相似相溶原理,因此进行共混的材料之间溶解度值、表面张力大小必须相近。将PTFE与其它工程塑料进行共混改性,可以在综合各组分长处时达到优势互补的目的,从而在一定程度上拓宽应用领域^[11]。在共混改性中,PTFE既可作为基体材料,又可用作填料来增强其它聚合物。在此主要介绍聚苯酯(POB)、聚苯硫醚(PPS)和

聚醚醚酮(PEEK)。

POB具有优良的耐压蠕变性、硬度较高,可以弥补PTFE的缺点,改善PTFE的力学性能和摩擦学性能。Zhang Sha等^[12]发现,复合材料的硬度随着POB含量的增加而增大,且在含量为20%时综合力学性能最好。除此之外,利用扫描电子显微镜(SEM)对磨损表面进行分析,对比纯PTFE和POB/PTFE的磨损表面,发现其磨损机理由磨粒磨损转为疲劳磨损和剥落。此外POB填充PTFE不仅可以提高复合材料的热扩散系数,还可减缓复合材料摩擦热的大量累积,在减少粘着磨损发生的同时提高材料的耐磨性^[13]。为了进一步研究力学性能,分析摩擦机理,张宏飞等^[14]采用冷压-热烧结法制备POB改性PTFE复合材料,考察POB含量以及在110℃的航空液压油中浸泡后对改性PTFE材料力学性能和摩擦磨损性能的影响。结果显示,改性PTFE材料的硬度随POB含量的增加而增大,但拉伸强度和断裂伸长率则逐渐下降,摩擦系数随POB含量增加呈现先增大后减小的现象,而体积磨损率则呈减小趋势;当POB含量为20%时,PTFE的综合性能最优,摩擦系数稳定在0.2左右。目前,PTFE/POB复合材料具有适当的回弹性,因此在与金属件对磨时不会划伤金属表面,多用作泵、轴承、活塞环等的密封材料。

与POB不同,PPS具有优异的耐磨性能、耐溶剂性、耐热性和易制造等特点,广泛应用于航空航天等领域,同时还可作为超疏水性涂料的基体^[15-16]。而PTFE具有潜在的生物密实度、高热稳定性、高化学惰性、低表面能和良好的自润滑能力等优点,是改善疏水性涂料摩擦学性能的理想选择^[17-18]。为了拓宽PPS/PTFE材料在石油管道中的应用,Wang Huaiyuan等^[19]研究了纳米/微结构超疏水PPS/PTFE复合涂层的摩擦学性能,测试结果表明,PPS/PTFE复合涂层具有优异的超疏水性,观察其表面形貌发现,PPS/PTFE复合涂层表面具有表面纹理效应,可以吸附碎屑,减少沟壑,有利于混合润滑膜的形成,因此有助于提高摩擦学性能。

PEEK和PTFE都是固体润滑复合材料中常见的基体材料。蔡振杰等^[20]制备了PTFE改性PEEK复合材料,并对力学性能和磨损机理进行了研究。当PTFE微粉质量分数为5%时,摩擦系数由0.35降低至0.3左右,体积磨损量达到最低。该复合材料不仅可应用在机械领域,也可应用在医疗领域。L. Major等^[21]通过开发仿生、智能PTFE复合涂层来改善PEEK的生物活性和摩擦学性能。研究发现,对于多孔纳米复合多层结构,PTFE涂层具有良好的生物特性和摩擦学特性,涂层在表面上更具多孔性,细胞更易于增殖,在PEEK基底附近则更密集,从而对摩擦学性质产生积极影响。

共混改性较表面化学改性简单、无污染,但一般只与聚合物共混改性,限制了金属、陶瓷、纤维等无机填料的加入,导致在提高复合材料的强度、硬度及导热性方面的性能有限,除此之外 PTFE 的高惰性使其与其它聚合物的相容性较差,在改性前需对表面进行处理或在改性过程中添加一些特定成分以改善相容性。

3 填充改性

填充改性 PTFE 是一种简单有效的方法,通常是在模塑过程中添加无机填料等。采用该方法制备的 PTFE 复合材料不仅可以保持 PTFE 自身的优点,还可利用复合效应克服 PTFE 的缺陷,有效提高材料的整体性能。

(1) 无机填料。

石墨是良好的固体润滑剂,在 PTFE 中填充石墨不仅可以大幅降低 PTFE 复合材料的磨损^[22-23],还能够改善 PTFE 导热性以及压缩蠕变性差等特点。研究表明,石墨颗粒大小、石墨填充体积分数及其分布对 PTFE 复合材料的导热性能有很大影响,粒径为 58 μm 的石墨的改性效果优于其它尺寸的颗粒,同时若在其中加入纤维,进行复合填充,导热性能还可进一步增强^[24]。但随着实际应用需求的提高,石墨已不能满足当前需求,因此比石墨性能更好的膨胀石墨(EG)进入研究者的视线。V. N. Aderikha 等^[25]研究了填充 EG 对 PTFE 复合材料性能的影响,研究结果表明,超声处理 EG 可提高其分散性,促进 EG 在 PTFE 基体中的均匀分布,提高复合材料的密度、拉伸屈服应力、拉伸弹性模量和摩擦系数,特别是在较高的摩擦滑动速度下提升效果更明显。当填充 EG 的质量分数为 5% 时,虽然 PTFE 复合材料的摩擦系数有所上升,但复合材料的体积磨损率却可降低至 $6 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

二硫化钼(MoS_2)较石墨具有更低的摩擦系数,且性质稳定因而得到广泛应用。M. Trabelsi^[26]和 S. D. Bagi^[27]等均用 MoS_2 改性 PTFE,结果表明, MoS_2 的加入既可降低复合材料的磨损,又可提高复合材料的耐磨性。为了进一步研究其力学性能和摩擦性能, P. M. Patara 等^[28]以填充 GF 质量分数分别为 15%, 20%, 25% 的 PTFE 为基材,添加不同含量的 MoS_2 来提高复合材料的摩擦磨损等性能,研究表明,当 MoS_2 含量为 5% 时,体积磨损率显著降低至 $11.25 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。目前 MoS_2 的价格飞涨,与二硫化钨(WS_2)相差不大,但 WS_2 的干摩擦性能更优越。林启权等^[29]采用粉末冶金的方法制备了 MoS_2 , WS_2 单独和复合填充改性 PTFE 复合材料,对比分析了 PTFE/ MoS_2 , PTFE/ WS_2 复合材料的力学性能和摩擦学性能。结果表明, MoS_2 和 WS_2 在改善力学性能的同时均能提高复合材料的摩擦稳定性和耐磨性,与纯 PTFE 相比,填充 WS_2 的摩擦稳定性可

提高 33.3% 左右,若复合填充时,耐磨性较单一填充时可提高 2.3%。

(2) 纤维增强。

碳纤维(CF)具有高比强度、高模量、低密度、优异的耐磨性和蠕变性能,可以有效地增强 PTFE 的性能,引起科学和工业领域研究者的广泛兴趣^[30]。然而,因表面表现出的高化学惰性,难以直接与聚合物基体产生化学作用^[31-32]。为了改善 CF 与 PTFE 基体之间的界面结合力, Wu Hao 等^[33]利用硅烷偶联剂对 CF 进行改性,提高 CF 与基体之间的相容性。研究发现, CF 增强 PTFE 复合涂层具有良好的摩擦磨损性能。当 CF 质量分数为 20% 时,摩擦系数为 0.17 左右,磨损率为 $2.74 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,几乎比纯 PTFE 涂层低 29.7%。观察其磨损表面发现,采用 20% CF 增强的 PTFE / CF 的表面最为光滑,划痕最少。进一步研究发现, 20% CF 增强的 PTFE / CF 复合涂层的表面形成了更加均匀、连续的转移膜。这一结果表明, PTFE 和 CF 在摩擦过程中形成传递膜,可防止 1045 钢球与涂层直接接触,从而使涂层的磨损降低在一定范围内。硅烷偶联剂虽可在一定程度上提高填料与基体之间的相容性,但效果有限, Lyu Mei 等^[34]采用质子辐照对 PTFE / CF 复合材料进行改性,研究发现,质子辐照后复合材料的摩擦系数随载荷的增加而逐渐减小,同时复合材料的耐磨性得到提高,诱导材料从铜合金表面向 PTFE / CF 转移。

GF 因具有高强度、高模量且价格相对较低等性质,在工业制作摩擦材料的生产中一直受到人们的青睐,且在聚合物的填充改性领域中较 CF 应用更为广泛^[35-36]。在干摩擦情况下, Song Fuzhi^[37]和 D. D. Desale 等^[38]发现,填充 GF 可大幅度降低 PTFE 复合材料的体积磨损率,而在添加润滑剂的情况下, Yang Quanpeng 等^[39]研究发现, GF 的添加使得 PTFE 基体的减摩耐磨性能进一步得到大幅度提升,当填充量为 20% 时, PTFE / GF 复合材料在海水润滑下比其它填充比例的摩擦系数和磨损率更低。对比 CF 填充,胡刚等^[40]研究发现,在固体润滑剂相同的情况下,填充 GF 的摩擦系数要比 CF 的小。由于 GF 与 PTFE 的相容性较差,需要对 GF 进行一些改性处理。Cheng Xianhua 等^[41]利用铅和稀土改性 GF,结果表明,与未改性 PTFE / GF 复合材料相比,改性 PTFE / GF 复合材料的耐磨性有所降低。铅和稀土改性的 GF 可有效地改善与 PTFE 的界面粘接性能,大大提高 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能。

钛酸钾晶须(PTW)由于其独特的高度有序晶体结构,其力学性能远优于常用的 GF, CF 等。加入 PTW 可大幅度提高复合材料的强度、耐磨性能,同时提高了复合材料的刚度和韧性,既增强又增韧,改变以往 GF 和 CF 改性时出现提

高一个性能却牺牲另一性能的现象,且化学性质稳定、隔热性和耐磨性较好。Feng Xin等^[42]研究发现,填充质量分数5%的PTW,PTFE/PTW复合材料的拉伸强度、断裂伸长率、缺口冲击强度、热变形温度和耐磨性较纯PTFE都得到了提高,且内部结构均匀致密。同时PTFE/PTW复合材料的耐磨性能也优于PTFE/CF复合材料^[43]。虽PTW填充改性效果优于GF,CF,但PTW与基体材料之间的相容性还有待进一步提高。

(3) 金属及其氧化物。

金属颗粒具有优良的导电、导热性,在PTFE中填充金属及其氧化物可以提高其力学性能和摩擦磨损性能。金属填充中以Cu及其合金最为常见。

张招柱等^[44]用金属Cu、Pb及Ni对PTFE材料进行填充改性,Cu、Pb的添加可降低复合材料的摩擦系数和磨损率,而添加Ni后的摩擦系数较高,可能是对偶表面间难以形成均匀的转移膜,故摩擦性能较差,但用作疏水涂层材料具有一定的应用前景。为了进一步改善摩擦性能,Tang Aigui等^[45]发现,PTFE/Ni复合材料的摩擦系数最低为0.11左右,若在其中加入纳米 Al_2O_3 ,虽然摩擦系数有所升高,但耐磨性明显提高。若继续优化纳米 Al_2O_3 在复合材料中颗粒含量的比例,可制备出摩擦性能更佳的PTFE/Ni/纳米 Al_2O_3 复合材料。

研究表明,除填料的填充量外,填料粒径也会对PTFE复合材料的性能产生影响。解挺等^[46]采用离散元法建立了PTFE/Cu复合材料与45#钢摩擦副的滑动摩擦模型,研究了填充量一定时,颗粒粒径对PTFE/Cu复合材料摩擦磨损性能的影响。仿真结果表明,在一定范围内,较大粒径的Cu填充的PTFE基复合材料更加有利于转移颗粒层的形成。随着Cu粒径的增加,滑动摩擦系数呈减小趋势,当粒径为 $0.9\ \mu\text{m}$ 时,摩擦系数达到0.125左右,而磨损率则随Cu粒径的增加呈现先增大后减小的趋势。虽然仿真模拟在很大程度上节约时间和成本,但还需要进行实验来验证仿真结果的正确性。

(4) 纳米粒子。

纳米材料是近年来发展起来的新型材料,其原子数在表面层中占很大比例,且表面原子既无长程序又无短程序的非晶层,当与聚合物进行共混时,由于与聚合物界面之间的相互作用力较大,能够获得理想的界面粘合,同时纳米粒子可束缚PTFE大分子的链间运动,极好地改善复合材料的力学性能和摩擦学性能,具有广阔的应用前景。目前常用的纳米材料有 Al_2O_3 、 SiO_2 等。

SiO_2 具有优异的绝缘性和耐磨损性,因此常被用于填充改性PTFE,以改善其力学性能和摩擦学性能。Qu

Mengnan等^[47]采用成熟工艺合成了填充Cu微粒子或 SiO_2 纳米粒子的PTFE颗粒,将其作为添加剂添加到工业润滑油中,并对润滑油的摩擦学性能进行了研究。研究表明,在润滑油中加入填充有Cu微粒子或 SiO_2 纳米粒子的PTFE颗粒,均可以降低摩擦系数。与PTFE颗粒和填充Cu微粒子的PTFE颗粒相比,填充 SiO_2 纳米粒子的PTFE颗粒的耐磨性能要好得多。虽然纳米 SiO_2 的改性效果显著,但粉体的纳米 SiO_2 容易发生团聚,若过量还可引发塑性变形,从而导致复合材料的摩擦系数和磨损率增大。

纳米 Al_2O_3 具有硬度高、尺寸稳定性好等特点,因此被广泛应用于强化和增韧各种塑料、橡胶和耐火材料等产品。戴旭阳等^[48]探讨了纳米 Al_2O_3 粒子填充PTFE复合材料的力学性能和摩擦磨损性能。研究表明,加入纳米 Al_2O_3 ,复合材料表面较为光滑且对力学性能起到了增强效果,若经硅烷偶联剂处理,纳米 Al_2O_3 填充PTFE复合材料的摩擦寿命较微米级提高近28倍。Cao Wenhan等^[49]研究了纳米 Al_2O_3 增强PTFE/PPS复合材料在滑动体系中的摩擦学行为和耗能特性,纳米 Al_2O_3 填充剂的加入改善了PTFE/PPS复合材料的抗磨性能。当载荷为200 N、纳米 Al_2O_3 含量为3%(体积分数)时,复合材料的磨损率最低,为 $1.14 \times 10^{-5}\ \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。对比不同载荷下PTFE/PPS体积磨损率,发现体积磨损率随着载荷的增加而逐渐增大。原因可能是摩擦导致材料表面温度升高而致使材料表面软化,随着磨损程度的进行,体积磨损率逐渐增大。此研究阐明了磨损性能与摩擦能量耗散的关系,提出了一个简单的理论模型来研究复合材料的磨损,该方法可作为设计机械零件的工具。

填充改性作为一种简单有效的改性方法,受到广大研究学者的青睐,但无机粒子、纤维等均与PTFE之间存在相容性差和热膨胀系数不匹配的问题,而纳米粒子的出现恰好弥补了这一缺陷;但纳米颗粒具有很高的表面活性,极易与其它原子相结合发生团聚现象。粒子团聚将导致材料的致密性下降,阻断基体之间的连续性,显著降低材料的硬度和力学性能,因此分散纳米粒子、减少团聚有待进一步研究。此外,对于材料内部微观结构与性能之间的关系并未做深入研究,故应进一步通过精密的显微观察仪器或者模拟仿真的方法来验证。

4 结语

PTFE具有优异的综合性能,是氟塑料中应用最多的品种,发挥着越来越重要的作用。随着科技的进步,纯PTFE已不能满足市场需求,因此对PTFE进行改性成为必然趋势,其中主要以表面改性、共混改性和填充改性为主。目前,我国已成为PTFE的主要生产国,同时已基本掌握改性PTFE

的成型加工方法,但与国外相比,技术和产品质量方面仍存在很大差距,因此在改性 PTFE 研究、加工应用和不同工况下的摩擦学行为和机理都有待更深入研究。目前还存在以下问题需要进一步研究:

(1) 在提高 PTFE 表面活性方面,辐射处理操作简单,但容易对 PTFE 基体造成损害,降低 PTFE 基体的力学性能;而化学溶液改性 PTFE 基体效果良好,但易造成环境污染,因此需要选择合适的溶液进行处理,在达到目的的同时减小负面影响。

(2) 无机粒子、纤维等均与 PTFE 之间存在相容性差和热膨胀系数不匹配的问题,而纳米粒子的出现有效地解决了这一问题,但纳米粒子表面活性高,易出现团聚现象,故需进一步研究如何使纳米填料在基体中均匀分布。

(3) PTFE 在加工过程中稳定性差,受温度影响较大,易产生变形从而影响力学性能,为满足实际需求,应进一步优化加工工艺,从根本上提高 PTFE 的摩擦磨损性能;此外分析不同工况下 PTFE 复合材料与不同配副的摩擦磨损性能,掌握其磨损机理,并借助更加先进的显微精密仪器研究其内部材料微观结构和性能的关系,为进一步研究不同应用场合的 PTFE 复合材料做准备。

参考文献

- [1] 张雷,等.当代化工,2018,47(3):603-606.
Zhang Lei, et al. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(3):603-606.
- [2] 王战辉,等.当代化工,2018,47(11):2 255-2 258.
Wang Zhanhui, et al. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(11):2 255-2 258.
- [3] 马伟强,等.工程塑料应用,2017,45(9):33-37.
Ma Weiqiang, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9):33-37.
- [4] Yang Mingming, et al. European Polymer Journal, 2015, 67(6):143-151.
- [5] Rudresh B M, et al. Materials Today:Proceedings, 2018, 5(1):2 503-2 511.
- [6] Jin Zunlong, et al. Computational Materials Science, 2015, 102:45-50.
- [7] König U, et al. Colloids & Surfaces B Biointerfaces, 2002, 24(1):63-71.
- [8] Ma Guozheng, et al. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science, 2019, 34(1):223-229.
- [9] 景亚宾.化工生产与技术,2016,23(5):10-12.
Jing Yabin. Chemical Production and Technology, 2016, 23(5):10-12.
- [10] Song Haiming, et al. Reactive & Functional Polymers, 2017, 114(5):110-117.
- [11] 李翠.填充改性聚四氟乙烯的摩擦磨损性能研究[D].扬州:扬州大学,2016.
Li Cui. Study on friction and wear properties of filled modified polytetrafluoroethylene[D]. Yangzhou:Yangzhou University, 2016.
- [12] Zhang Sha, et al. Advanced Materials Research, 2011, 194-196: 1 728-1 731.
- [13] 蔡立芳,等.郑州轻工业学院学报:自然科学版,2008(2):20-23.
Cai Lifang, et al. Journal of Zhengzhou University of Light Industry:Natural Science Edition, 2008(2):20-23.
- [14] 张宏飞,等.润滑与密封,2017,42(1):97-101.
Zhang Hongfei, et al. Lubrication Engineering, 2017, 42(1):97-101.
- [15] Golchin A, et al. Wear, 2015, 328-329:456-463.
- [16] 张鼎,等.摩擦学学报,2017,37(4):527-536.
Zhang Ding, et al. Tribology, 2017, 37(4):527-536.
- [17] Vail J R, et al. Wear, 2011, 270:737-741.
- [18] Aderikha V N, et al. Wear, 2011, 270:970-976.
- [19] Wang Huaiyuan, et al. Wear, 2014, 319:62-68.
- [20] 蔡振杰,等.机械工程材料,2018,42(5):69-73.
Cai Zhenjie, et al. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(5):69-73.
- [21] Major L, et al. Tribology International, 2016, 104(12):309-320.
- [22] 张招柱,等.复合材料学报,1999,16(4):58-63.
Zhang Zhaozhu, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16(4):58-63.
- [23] Zhang Zhaozhu, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 80:1 891-1 897.
- [24] Jin Zunlong, et al. Computational Materials Science, 2015, 102:45-50.
- [25] Aderikha V N, et al. Wear, 2017, 386-387:63-71.
- [26] Trabelsi M, et al. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2016, 69(5):1 119-1 128.
- [27] Bagi S D, et al. Lubricants, 2015, 3(4):687-711.
- [28] Patore P M, et al. Materials Today:Proceedings, 2018, 5(2):7 310-7 319.
- [29] 林启权,等.高分子材料科学与工程,2016,32(11):51-57.
Lin Qiquan, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32(11):51-57.
- [30] Luo Wei, et al. Composites Part B:Engineering, 2016, 91:579-588.
- [31] Rezaei F, et al. Materials & Design, 2016, 30:260-263.
- [32] Wang Zike, et al. Polymer Composites, 2015, 47:816-817.
- [33] Wu Hao, et al. Progress in Organic Coatings, 2019, 28:90-98.
- [34] Lyu Mei, et al. Tribology International, 2019, 132:237-243.
- [35] Gweon J H, et al. Wear, 2016, 362-363:61-67.
- [36] Markovicová L, et al. Materials Today:Proceedings, 2016, 3:1 056-1 059.

- [37] Song Fuzhi, et al. Tribology International, 2016, 104:392-401.
- [38] Desale D D, et al. Procedia Manufacturing, 2018, 20:414-419.
- [39] Yang Quanpeng, et al. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(18): 12-18.
- [40] 胡刚,等. 机械工程材料, 2018, 42(7):41-44.
Hu Gang, et al. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(7):41-44.
- [41] Cheng Xianhua, et al. Materials Letters, 2003, 57(16-17):2 553-2 557.
- [42] Feng Xin, et al. Materials Science and Engineering, 2007, 448(1-2):253-258.
- [43] 史以俊,等. 润滑与密封, 2009, 34(01):59-62.
Shi Yijun, et al. Lubrication Engineering, 2009, 34(1):59-62.
- [44] 张招柱,等. 高分子材料科学与工程, 1999, 15 (1):68-72.
Zhang Zhaozhu, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 1999, 15 (1):68-72.
- [45] Tang Aigui, et al. Surface and Coatings Technology, 2015, 282 (11):121-128.
- [46] 解挺,等. 摩擦学学报, 2016, 36(1):35-41.
Xie Ting, et al. Tribology, 2016, 36(1):35-41.
- [47] Qu Mengnan, et al. Tribology International, 2017, 110(6):57-65.
- [48] 戴旭阳,等. 山东化工, 2017, 46(14):33-34, 38.
Dai Xuyang, et al. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(14):33-34, 38.
- [49] Cao Wenhan, et al. Journal of Central South University, 2017, 24(9):2 001-2 009.

投稿须知

1 稿件内容

稿件应注重科学性、实用性及时效性,要求技术新颖,论点明确,论据可靠,数据准确,文字通顺、简练。稿件内容必须真实,避免抄袭,请作者文责自负。引用他人成果时,请按《著作权法》有关规定说明出处。内容应未曾发表过或被其他出版物刊载过,且无一稿多投。

2 稿件要求

凡属于重大科技获奖的论文和重点项目资助的论文,请在来稿第一页注明名称及批准号,本刊将优先刊登。

(1) 题目、作者署名及单位。题目力求简明、醒目,反映出文章的主题,一般不超过 20 个汉字。作者姓名在题目下按序排列,不同工作单位的作者,应在姓名右上角加注阿拉伯数字序号。作者单位须写全称并注明省份、城市和邮政编码。联系人信息(包括姓名、学历或职称、主要研究方向)注在第一页下方。

(2) 摘要及关键词。论文需要同时提供中文和英文摘要,摘要以提供论文的内容梗概为目的,不加评论和补充解释,应简明、确切地论述研究目的、原理和结论,具有相对独立性。中文和英文摘要均要求采用报道性摘要类型。具体要求:中英文摘要均为一段式,内容比较具体,一般需要列举关键数据。中英文摘要内容基本一致,中文摘要以 200~300 字为宜,英文摘要可略详。关键词要求 3~8 个。

(3) 正文。正文各部分都应简洁明了。层次标题一律用阿拉伯数字连续编号,尽量减少层次;不同层次的数字之间用小圆点相隔,末位数字不加标点符号。如“1”,“1.1”等。文中量、单位及符号的使用应符合国际标准和国家标准。

(4) 图表。图表要设计合理,简单自明。每一幅图都应有图序和简短确切的图名,横纵坐标均要注明物理量及其单位,线条图要用矢量格式的图,或将 *.opg, *.dwg, *.eps 等格式的图打包压缩随投稿一起上传。表格请使用三线表,每一表格都应有表序和简短确切的表题。图表标题一律用中文表达。

(5) 参考文献。以作者亲自阅读过的主要原始文献为限,不可引用非公开出版或发表的文献,不能引用其他文章中引用的但未经核对原文的文献,要注意引用最新的文献。参考文献要有一定的数量,研究性论文至少 10 篇。参考文献的著录按文章中引用的顺序依次排列,中文参考文献要有对照英文部分(英文部分不编号)。无论中外文的作者,一律采用姓前名后的形式著录;作者不超过 3 人时可全部著录,超过 3 人时,只著录前 3 位,其后加“等”或“et al”。综述类论文的参考文献著录项目适当简化,可参见本刊相关栏目文章样式。作者对所引文献的准确性和完整性负责。

3 投稿方式

请作者登陆“工程塑料网”(http://www.epa1973.net),进入杂志社之页,点击“网上投稿”后投稿。来稿请注明详细地址、电话、邮箱等信息,便于通知联系。一般一个月左右可以查询稿件审理意见,超过 3 个月未收到修改意见或回复的可自行处理。

4 注意事项

为适应我国信息化建设需要,扩大学术交流渠道,本刊已编入国内外著名数据库。稿件一经录用,将同时被数据库收录,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意收录,请在投稿时声明,否则将视为同意。