

无油压缩机用高性能固体润滑材料研究进展

李金辉 彭 丹 牟秋红 李 冰 张 硕 于一涛 赵 宁 王 峰 张方志

(齐鲁工业大学(山东省科学院),山东省科学院新材料研究所,
山东省特种含硅新材料重点实验室,济南 250014)

摘 要 基于天然气压缩机对高性能固体润滑材料的迫切要求,介绍了我国压缩机用固体润滑材料存在的主要问题和关键技术难题,从多元聚合物复合、纤维增强、纳米改性和热致结晶聚合物改性等方面综述了高性能聚合物基固体润滑材料的研究进展和发展趋势,提出了高性能无油压缩机用固体润滑材料的解决途径。以耐高温聚合物与热致结晶聚合物复合聚四氟乙烯为基础树脂,采用改性碳纤维为增强填料,利用纳米改性技术、表面处理技术等措施,有望提升我国高性能固体润滑材料在高温条件下的耐压、耐磨性能,满足我国天然气压缩机用固体润滑材料的性能要求。

关键词 固体润滑,压缩机,热致结晶,无油润滑,纤维

中图分类号 TH45;TB743

文献标识码 A

文章编号 1006-3536(2021)05-0257-05

DOI:10.19817/j.cnki.issn 1006-3536.2021.05.058

Trend and application of high performance solid lubricating material for oil-free compressor

Li Jinhui Peng Dan Mou Qiuhong Li Bing Zhang Shuo Yu Yitao Zhao Ning
Wang Feng Zhang Fangzhi

(Shandong Provincial Key Laboratory for Special Silicone-containing Materials,
Advanced Materials Institute,Qilu University of Technology (Shandong Academy
of Sciences),Jinan 250014)

Abstract The material performance defects and the key technologies of solid lubricating materials applied in the field of natural gas compressor were introduced.The research and trend of high performance solid lubricating materials were reviewed from the aspects of multi component polymer composite, fiber reinforced composite, modification of polymer by nanoparticles and thermotropic liquid crystalline polymer toughening. It was projected that the high performance solid lubricating material can be made of multi component polymer matrix including one or more of high temperature resistant polymer, thermal crystallized polymer composite and polytetrafluoroethylene, modified carbon fiber and nano filler as the reinforcing component, so as to improve the wear resistance of solid lubricating materials under high temperature and high pressure, which met the material performance requirements of piston ring and bracket for natural gas compressor.

Key words solid lubricating material, gas compressor, thermotropic liquid crystalline polymer, oil-free lubrication, fiber

压缩机在石油、石化、纺织、汽车、矿产、食品、医疗、动车、航空航天等行业具有广泛的应用。无油压缩机不需要使用润滑油,具有无污染、低能耗等优势,正逐渐取代传统压缩机成为市场的主流机型。高性能活塞环是保证无油压缩机在一定的使用期内

安全、稳定运行的关键部件,其中无油自润滑活塞环凭借其良好的自润滑、耐磨和机械性能,提高了压缩机的工作效率和使用寿命。但无油固体润滑材料成为制约压缩机性能提升的关键,因此,开发高性能新型无油润滑材料具有非常重要的经济与社会意义。

收稿日期:2019-12-17;修回日期:2021-02-22

基金项目:国家自然科学基金(51503118);山东省自然科学基金(ZR2017BB033);山东省科学院科学基金(2019GHPY04)

作者简介:李金辉(1976-),男,副研究员,主要研究方向为高分子材料的制备,E-mail:cyclone0907@126.com。

随着科学技术的发展,固体自润滑材料凭借其无环境污染、耐磨寿命长、低摩擦、自修复等优势成为润滑领域最具前景的发展方向。

1 无油压缩机用自润滑材料存在的问题

我国的无油润滑压缩机开发始于 20 世纪 80 年代初期,但无油润滑材料的研究发展相对滞后,主要存在以下问题:耐热性能差;耐压性能差,高压下蠕变严重;耐磨性差,使用寿命短;热膨胀系数大,受热时膨胀会导致活塞环与缸体磨损加剧等。在无油自润滑体系中,由于聚四氟乙烯 (PTFE) 具有特殊的螺旋形链结构,分子间的作用力很弱,分子之间容易滑动,在摩擦对偶件表面易形成转移膜,从而成为固体自润滑材料的必选材料之一。常规无油气体压缩机的活塞环、轴封及支承环等部件主要采用纤维填充的 PTFE 材料制备。但是,该类材料在较高温度下机械强度低,承载能力差,易冷流,材料膨胀系数较大,因此不宜在高温下使用。这主要因为:一方面,PTFE 软化点约在 $150\sim 160^{\circ}\text{C}$,当工作温度到达 150°C 以上时,活塞环的机械性能急剧下降,导致活塞环易发生蠕变,耐磨性能急剧变差;另一方面,由于 PTFE 表面能低,其形成的转移膜在对偶面上的粘附性能较差,从而会造成较大的磨损。

目前,国产的无油气体压缩机用活塞环及其他的密封元件,当压差在 2.5MPa 以下时,性能尚可达到要求;但是当压差高于 4.0MPa 时,在高压差、高速工作条件下,界面的摩擦磨损行为呈几何数加剧,性能已不能满足要求。当前,大型天然气无油气体压缩机密封件一般要求承受排气压力在 10MPa ,甚至 25MPa 以上,排气温度在 160°C 以上,在该条件下密封件的工作寿命要达到 8000h 以上。目前该类材料以进口为主。国内产品只有优化摩擦磨损性能、耐温性能和导热性能,方可满足密封件在较高温度下密封和耐磨损的要求。

2 无油自润滑材料的制备技术

为提高固体自润滑材料的综合性能,科学工作者对 PTFE 类润滑材料的配方、制备技术和摩擦磨损机理进行了大量的研究^[1]。近年,为提高高温条件下聚合物基自润滑材料的机械性能,开发了耐高温聚合物共混、纤维增强、纳米改性、热致液晶聚合物改性和特殊交联等技术。

2.1 耐高温聚合物体系的构建

采用耐高温聚合物共混是提高聚合物基复合材料耐温性能的重要方法。基于此,科研工作者对聚醚醚酮 (PEEK)、聚苯硫醚 (PPS)、聚酰亚胺 (PI)、聚酰胺^[2-4]等耐高温工程塑料在固体润滑材料中的应用开展了研究。

2.1.1 PEEK 类自润滑材料

PEEK 是一种由聚芳醚酮重复单元构成的结晶性耐高温工程塑料,作为一种新型工程材料,其在材料强度、韧性、耐磨性、耐腐蚀性等方面具有得天独厚的优势,制件的抗蠕变性能和尺寸稳定性优异,长期使用温度在 240°C 以上,在高端制造业等领域应用广泛。将碳纤维、二硫化钼等填料与 PEEK 和 PTFE 混合体系复合,可有效改善固体润滑材料导热和摩擦学性能,改善其在无油、高温、高负载、腐蚀等严酷环境下的使用性能^[5-6]。刘后宝等^[7]以 PEEK 为基体,玻璃纤维为增强材料,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,可满足高铁制动系统运行环境的特殊要求。易蒙等^[8]研究了玻璃纤维、碳纤维、PTFE 等填充改性 PEEK 复合材料在不同环境下的摩擦磨损情况,制备的 PEEK 复合材料具有优异的耐水解、耐腐蚀、自润滑及良好的力学性能和尺寸稳定性,可用作轴承保持架材料,解决了传动系统中关键材料的制备难题。姚光督等^[9]采用耐腐蚀、高强度的 PEEK 复合材料代替镍铬铸铁等制备了可用于核电水循环系统的齿轮,解决了核电领域金属齿轮易于生锈的问题,可有效确保核电的安全运行。

2.1.2 PPS 类自润滑材料

PPS 分子主链中的苯环和硫醚键赋予 PPS 优良的耐高温、耐腐蚀、耐辐射和阻燃等性能,而且 PPS 具有均衡的物理机械性能和极好的尺寸稳定性,热变形温度一般大于 260°C ,可在 $200\sim 240^{\circ}\text{C}$ 下长期使用,在耐高温型聚合物基摩擦复合材料领域具有广泛的应用前景^[10]。佟伟^[11]利用 PPS 与 PTFE 良好的相容性和协同效应,有效提升了 PTFE 的成型性、尺寸稳定性、抗蠕变性、压缩强度,可用于制备汽车发动机的活塞环、机械齿轮、阀门等。曹文翰等^[12]采用纳米碳化锆和纳米氧化铝制备了一种性能良好的纳米材料改性填充 PTFE-PPS 复合材料,具有硬度高、耐磨、耐腐蚀、耐高温等特点,是一种性能良好的摩擦材料。邱明等^[13]研究了 PTFE 改性 PPS 自润滑织物衬垫的自润滑性能及其在自

润滑关节轴承中的应用,研究发现,PPS 可与 PTFE 和金属基体牢固的结合,PTFE 可均匀地嵌入 PPS 织物粗糙的空隙内,从而有效地提升了关节轴承抵抗接触压应力和摩擦剪切应力的联合作用,赋予织物衬垫优异的承载能力、低摩擦系数,可实现体系的无油润滑。

2.1.3 PI 类自润滑材料

PI 具有优异的耐高温性能,玻璃化转变温度可达 385℃,在 PTFE 烧结过程中无物理化学变化,非常适合填充增强 PTFE 材料,制备的固体自润滑材料具有抗蠕变性强、热膨胀系数低、硬度高等特点。赵休胜^[14]采用 PTFE/ACF(活性碳纤维)二元添加剂填充 PI,明显地降低了 PI 的摩擦系数,可在各种苛刻环境如高温、高压下运作。杨培娟等^[15]采用金属粉末冶金法制备了一种 PI 填充 PTFE 复合材料,发现 PI 可显著改善 PTFE 的综合性能,复合材料摩擦时表现出粘附的“舌状”磨损,具有良好的耐磨损性能。当 PI 质量分数为 15% 时,PTFE/PI 复合材料的综合性能最优,可用于无油润滑压缩机用活塞环。

2.1.4 多元聚合物复合固体自润滑材料

李振环等^[16]以多种工程塑料为基础原料,利用特定的工艺条件和路线,通过物理和化学作用,制备的多元高分子复合材料密封环具有优异的耐高温、抗蠕变、耐摩擦磨损和耐介质腐蚀等特点,可满足大型天然气压缩机用密封环的性能要求。

2.2 纤维增强聚合物复合材料的制备

在自润滑材料领域最常用的增强纤维包括碳纤维、玻璃纤维等。其中碳纤维具有强度高、弹性好,耐疲劳和耐磨性好,以及耐热性和导热性良好等性能,作为填充材料,可赋予无油润滑复合材料良好的耐热性和耐磨性^[17-19]。胡刚等^[20]研究了 PTFE 复合材料在汽车铰链门套制备技术中的应用,结果表明,碳纤维增强 PTFE 材料优于玻璃纤维增强 PTFE 材料的性能。杨家义等^[21]研究发现,碳纤维增强 PTFE 材料具有更加优异的耐磨性、自润滑性和力学性能,可有效提升密封材料的耐压、耐温和耐摩擦性能。杨学宾等^[22]以碳/碳复合材料浸渍 PTFE,制成的 C/C+PTFE 双基功能复合材料在导热方面远优于以 PEEK 或者 PI 等工程塑料为基体制备的复合材料体系,在摩擦系数、耐磨性、线膨胀系数等方面具有较大的优势,利用该材料制作的密封环有望解决高温、高压条件的密封问题。

利用碳纤维、玻璃纤维等协同改性 PTFE,可有效改善复合材料的耐磨性。但由于碳纤维表面反应活性低,与基体粘结界面中存在大量缺陷,使得复合材料的各项力学性能受到不同程度的抑制。为了改善 PTFE 基体与增强体之间的界面相容性,通常采用等离子体处理法^[23-24]、辐照处理法^[25]、钠-萘溶液处理法等表面改性方法,科研工作者还针对 PTFE 复合体系开发了专用的高效改性剂及改性方法^[26-28]。施威等^[29]采用等离子表面处理工艺对碳纤维进行表面活性处理,提高了碳纤维与 PTFE 树脂之间的相容性,所制备的复合材料拉伸强度、压缩强度、韧性均有不同程度的提高,具有良好的抗冷流、蠕变性能,改善了复合材料的耐摩擦磨损性能。Thierry 等^[30]采用电子辐射处理的四氟乙烯和六氟丙烯的共聚物(FEP)与 PTFE 混合,在氮气中通过高温烧结制成自润滑复合材料,FEP 的填充可赋予复合材料更低的摩擦系数(低至 0.09),使复合材料的磨损率大大降低,与硬颗粒填充的 PTFE 复合材料相比,没有刻蚀对摩擦面的副作用。

2.3 纳米材料在固体自润滑材料制备技术中的应用

纳米材料具有良好的塑性及韧性,可赋予高分子材料刚性和耐热性,同时保留了聚合物材料本身的韧性、耐冲击性和易加工性^[31]。近年,将纳米材料用于固体自润滑材料的改性取得了良好的效果^[32],例如采用纳米 SiO₂、纳米 TiO₂、纳米 Al₂O₃^[33-34]、纳米蒙脱石、石墨烯和碳纳米管^[35-36]等填充 PTFE 等聚合物,与传统填料不同,较小的纳米填料用量即可显著改善复合材料的摩擦学特性。何春霞等^[37]研究了纳米 Al₂O₃ 增强改性 PTFE 复合材料的性能,研究发现纳米 Al₂O₃ 提高了 PTFE 聚合物的硬度、抗蠕变性、机械强度和耐磨性,当纳米 Al₂O₃ 含量为 10% 时,自润滑材料耐磨性性能较好。谢文谦等^[38]利用石墨烯纳米片和 PTFE 产生良好的协同作用,有效地解决了纯 PTFE 存在的不导电、不导热、抗蠕变性能差、强度低等。近年来,将石墨烯氟化处理,可制得具有石墨烯和 PTFE 双结构的功能填料,在制备固体润滑材料领域具有独特的优势^[39]。

李朋辉等^[40]以强酸氧化碳纳米管为增强填料制备了 PTFE 复合摩擦材料,有效地降低了摩擦材料的体积磨损率。马伟强等^[41]研究了纳米 SiO₂ 对 PTFE 复合材料的性能影响,结果发现:纳米 SiO₂

的加入,使材料的硬度增加,复合材料的磨损由犁耕磨损和粘着磨损转变为磨粒磨损,有效降低了固体润滑材料的磨损率。

米翔等^[42]将新型纳米碳化硅用作 PI 的填充料,利用纳米碳化硅在硬度、耐磨性、耐高温等方面的优势弥补了 PI 高分子材料的不足,所制备的复合材料具有优异的摩擦性能和力学性能。

2.4 热致液晶材料在减磨材料中的应用

近年来,将热致液晶聚合物(TLCP)应用于摩擦材料制备引起了摩擦学界的关注^[43]。TLCP 改性 PTFE 复合材料充分发挥了 TLCP 的刚性、高强度、高模量、自增强性,以及接近于金属的线膨胀系数和耐热性,与 PTFE 的独特自润滑性形成优势互补,可满足高温机械对于摩擦密封材料的机械性能和摩擦性能的要求^[44]。赵安赤等^[45]以 TLCP(聚对羟基苯甲酸苯酯)作为 PTFE 的改性剂,制备了一种 TLCP 改性 PTFE 材料,克服了无机材料作为改性剂的缺陷,明显改善了 PTFE 的耐磨损性,可广泛应用于高耐磨自润滑密封材料的制备,成为应用前途广阔的新型密封材料。

唐炜等^[46-47]将 TLCP 与 PTFE 混合,用模压烧结法制备出新型的原位复合材料,TLCP 在复合材料的体系中形成大分子微纤相,从而达到材料增强的目的。这种原位增强方法,可有效避免纤维、纳米填料等增强工艺中存在的相容性。

Xu 等^[48-49]研究了 TLCP 在改善聚偏氟乙烯材料摩擦性能中的应用。研究发现,TLCP 借助摩擦温度在摩擦界面构建了 TLCP 纳米涂层,可在聚偏氟乙烯材料与摩擦副之间起到桥梁作用,既减少了聚偏氟乙烯材料与摩擦副的直接接触,降低了材料的磨损率,又有效降低了体系的摩擦系数。这种 TLCP 纳米涂层有望在分子减磨材料领域取得广泛的应用。

当然,TLCP 存在晶体材料固有的各向异性,在改性聚合物中存在强度不均匀等问题。对于这些问题,一方面可通过 TLCP 结构设计与改性来解决,如在大分子链中引入弯折结构和不对称结构,开发出综合性能更好的 TLCP 树脂;另一方面,探索 TLCP 改性复合材料的制备技术工艺,实现 TLCP 在复合材料中的定向分布与功能化。

3 结语与展望

多元聚合物复合和纳米改性等技术可有效提升

固体润滑材料的强度、硬度和热稳定性,降低固体润滑材料的摩擦系数,实现复合材料在较宽温度范围内的自润滑性能。新型复合材料制备方法和工艺、新型固化交联技术和纳米技术将成为高性能减磨材料的研究方向;纳米材料的摩擦学机理与应用开发成为摩擦学研究的热点;新型金属陶瓷基自润滑材料、仿生摩擦材料逐渐成为固体自润滑材料的研究方向。当然,在自润滑机理研究与模型构建等方面还有大量的工作需要开展,例如建设应用数据库,为耐磨自润滑材料选择提供数据支持等。对固体自润滑材料的深入研究将为提升我国机械制造业及相关产业的发展产生巨大的推动作用。

参考文献

- [1] 杨培娟,楼锦超.无油润滑压缩机用活塞环材料研究[J].汽车实用技术,2017(22):52-54.
- [2] You Y, Li D, Liu S, et al. Tribological and mechanical properties of graphite/polytetrafluoroethylene/glass fiber filled polyamide 6 composite[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(8): 85-89, 95.
- [3] Rudresh B M, Kumar B N R. Influence of experimental parameters on friction and wear mechanisms of PA66/PTFE blend reinforced with glass fiber[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71(2): 339-349.
- [4] Rudresh B M, Kumar B N R. Influence of Experimental Parameters on Friction and Wear Mechanisms of PA66/PTFE Blend Reinforced with Glass Fiber[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71(2): 339-349.
- [5] Patra P M, Lathkar G S. Optimization of glass fiber and MoS₂ filled PTFE composites using non traditional optimization techniques[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 7310-7319.
- [6] Liu L, Yan F, Gai F, et al. Enhanced tribological performance of PEEK/SCF/PTFE hybrid composites by graphene[J]. RSC Advances, 2017, 7(53): 33450-33458.
- [7] 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(11):20-24.
- [8] 易蒙,段海涛,陈松,等.乏油润滑下 PEEK 复合材料的摩擦学性能[J].工程塑料应用,2018,46(6):108-133.
- [9] 姚光督,王文东,沈景凤,等.PTFE 微粉/CF 改性 PEEK 复合材料的摩擦磨损性能[J].材料科学与工艺,2018(3):59-65.
- [10] 曹文翰,龚俊,杨东亚,等.纳米 Al₂O₃/聚苯硫醚改性聚四氟乙烯复合材料摩擦特性[J].高分子材料科学与工程,2017,33(5):78-84.
- [11] 佟伟.聚苯硫醚摩擦复合材料的研究[D].成都:四川大学,2006.
- [12] 曹文翰,龚俊,杨东亚,等.纳米碳化硅改性填充聚四氟乙烯-聚苯硫醚复合材料摩擦磨损性能[J].高分子材料科学与工程,2018,34(2):48-55.

- [13] 邱明,周占生,周大威,等.聚四氟乙烯/聚苯硫醚织物自润滑关节轴承的摩擦学性能[J].摩擦学学报,2018,38(5):58-64.
- [14] 赵休胜.二元添加剂(PTFE/ACF)填充PI复合材料摩擦学性能研究[D].秦皇岛:燕山大学,2017.
- [15] 杨培娟,黄健.PI填充PTFE复合材料[J].工程塑料应用,2018,46(1):9-12.
- [16] 李振环,杨家义,刘杰,等.多元高分子复合材料在密封产品中的应用现状[J].流体机械,2017,45(12):55-57.
- [17] 万芳新,何春霞,黄晓鹏.碳纤维填充PTFE复合材料摩擦磨损性能研究[J].甘肃农业大学学报,2009,44(2):157-160.
- [18] 项东虎,席博,朱亚波,等.碳纤维增强PTFE复合材料的摩擦磨损性能研究[J].淮阴工学院学报,2010,19(5):4-9.
- [19] 范清,叶素娟.石墨及纤维填充聚四氟乙烯复合材料的摩擦学研究[J].润滑与密封,2008,33(5):86-88.
- [20] 胡刚,陈学庆,金石磊.不同纤维增强和不同固体润滑剂改性PTFE复合材料的摩擦磨损性能[J].机械工程材料,2018,42(7):41-44.
- [21] 杨家义,杨博峰,李香,等.全无油往复压缩机用碳纤维增强聚四氟乙烯密封材料的性能研究[J].流体机械,2017,45(3):6-10.
- [22] 杨学宾,魏刚强.高压无油润滑压缩机密封材料的选择[J].压缩机技术,2004(1):35-36.
- [23] Ronghao L, Keqiang L, Haiyong T, et al. Mechanical properties of plasma-treated carbon fiber reinforced PTFE composites with CNT[J]. Surface & Interface Analysis, 2017, 49(10):1064-1068.
- [24] Chen J, Zhang H, Liu G, et al. Study on surface adhesion of plasma modified polytetrafluoroethylene hollow fiber membrane[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 108(2):022024.
- [25] Wang Xiangli, Liu Baixing, Zhang Guoheng, et al. Effect of atomic oxygen irradiation on the structural and tribological characteristics of polytetrafluoroethylene and its composites[J]. Surface & Interface Analysis, 2017, 49(2):112-116.
- [26] Jian W, Huang X, Berglund K, et al. CuO nanosheets produced in graphene oxide solution: an excellent anti-wear additive for self-lubricating polymer composites[J]. Composites Science & Technology, 2018, 162:86-92.
- [27] Aderikha V N, Krasnov A P, Naumkin A V, et al. Effects of ultrasound treatment of expanded graphite (EG) on the sliding friction, wear resistance, and related properties of PTFE-based composites containing EG[J]. Wear, 2017, 386/387:63-71.
- [28] Patore P M, Lathkar G S. Optimization of glass fiber and MoS₂, filled PTFE composites using non traditional optimization techniques[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 7310-7319.
- [29] 施威,陈晔,阚松.表面处理工艺对碳纤维增强PTFE密封垫片性能的影响[J].轻工机械,2014,32(5):27-30.
- [30] Lotz B, Thierry A, Schneider S. Molecular origin of the scroll-like morphology of lamellae in PVF₂ spherulites[J]. Comptes Rendus De L'Academie Des Sciences, 1998, 1(10): 609-614, 616.
- [31] Amin M R, Alharthi M A, Imran S M, et al. Effect of nanoparticles on mechanical and flame-retardant properties of polyether-block-polyamide polymer nanocomposites[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2018, 57(1):1-8.
- [32] Mashkov Y K, Ruban A S, Rogachev E A, et al. PTFE-nanocomposites structure and wear-resistance changing in various methods of structural modification[J]. Journal of Physics Conference Series, 2018, 944:012078.
- [33] 曹文翰,龚俊,杨东亚,等.纳米Al₂O₃/聚苯硫醚改性聚四氟乙烯复合材料摩擦特性[J].高分子材料科学与工程,2017,33(5):78-84.
- [34] Wang B, Lv Q, Hou G. Tribological behavior of Nano-Al₂O₃ and PEEK reinforced PTFE composites[C]//American Institute of Physics Conference Series, 2017, 1794:020030.
- [35] Makowiec M E, Blanchet T A. Improved wear resistance of nanotube- and other carbon-filled PTFE composites[J]. Wear, 2017(374-375):77-85.
- [36] Cheng Z, Cao B, Zan L, et al. An approach for preparation of excellent antiwear PTFE nanocomposites by filling As-prepared carbon nanotubes/nanorods (CNT/CNR) mixed nanocarbon material[J]. China Petroleum Processing & Petrochemical Technology, 2018, 20(2):34-40.
- [37] 何春霞,沈惠平.纳米Al₂O₃填充聚四氟乙烯摩擦磨损性能的研究[J].摩擦学学报,2000,20(2):153-155.
- [38] 谢文谦.石墨烯改性聚四氟乙烯复合材料制备及性能研究[D].上海:华东理工大学,2016.
- [39] 王雅珍,庆迎博,孟爽,等.石墨烯制备及应用研究进展[J].化学世界,2019,60(7):385-394.
- [40] 李朋辉,侯根良,毕松,等.碳纳米管改性PTFE复合材料摩擦磨损性能[J].工程塑料应用,2018,46(5):108-112.
- [41] 马伟强,侯根良,苏勋家,等.纳米SiO₂填充改性聚四氟乙烯复合材料的摩擦磨损性能研究[J].塑料工业,2017,45(5):43-47.
- [42] 米翔,龚俊,曹文翰,等.纳米SiC与PI填充改性PTFE复合材料的摩擦磨损性能[J].材料导报,2017,31(18):102-108.
- [43] 徐下忠,张良武,王文理,等.液晶材料改性聚四氟乙烯的开发与应用[J].塑料,2003,32(4):24-27.
- [44] 唐炜,朱宝亮.新型密封材料PTFE/TLCP合金耐磨机理研究[J].润滑与密封,1999(1):50-52.
- [45] 赵安赤,黄淑辉.液晶聚合物/氟塑料合金耐磨机理的研究[J].塑料,1997(1):8-15.
- [46] 唐炜,赵安赤.液晶微纤原位增强PTFE复合材料抗磨性能与磨损机理[J].摩擦学学报,2000,20(1):10-13.
- [47] 唐炜,朱宝亮,刘家浚.一种由液晶类聚合物增强的聚四氟乙烯复合材料的制备方法:中国,99109356.9[P].1999-06-25.
- [48] Xu F, Xin Y, Li T. Tribological enhancement effect of main-chain thermotropic liquid crystalline polymer[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2018, 108:69-78.
- [49] Xu F, Xin Y, Li T. Friction-induced lubricating nanocoatings of main-chain thermotropic liquid crystalline polymer[J]. Polymer, 2018, 140:269-277.