

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.028

# 海洋环境下 PEEK 复合材料摩擦学研究进展<sup>\*</sup>

陈威,刘杏,文怀兴

(陕西科技大学机电工程学院,西安 710021)

**摘要:**结合当前海洋装备的发展趋势,分析了海洋环境的特点,概述了国内外聚醚醚酮(PEEK)复合材料在海洋环境中的摩擦磨损研究及应用现状,着重介绍了 PEEK 与金属配副、PEEK 与陶瓷配副、表面工程技术在 PEEK 作为关键摩擦副等在海洋环境下的摩擦学研究现状及发展趋势。

**关键词:**聚醚醚酮;海水;摩擦学

**中图分类号:** TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0135-04

## Tribology and Prospect of PEEK Composites in Marine Environment

Chen Wei, Liu Xing, Wen Huaixing

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

**Abstract:** The characteristics of the marine environment was analyzed and the tribological behavior of the poly(ether-ether-ketone) (PEEK) composite material which as the key friction pair in the marine environment was also summarized. The friction and wear status of different tribological couples was emphatically introduced which including PEEK and metal, PEEK and ceramic, PEEK and high molecular materials. Finally, the application status and development trend of trends of PEEK composite materials in marine engineering assembly was discussed. The future progress of the application of the PEEK composites in marine environment is also prospected.

**Keywords:** poly(ether-ether-ketone); seawater; tribology

随着“一带一路”、“中国制造2025”和“十三五”规划的相继出台与落地实施,对高端船舶与海洋工程装备的需求显得尤为紧迫,在国家政策的提倡下以及瞬息万变的国际形势环境下,海洋装备的发展蓄势以待<sup>[1]</sup>。海洋工程装备是人类开发、利用和保护海洋矿产资源、海洋可再生资源、海洋化学资源、海洋生物资源以及海上运输活动的主要载体和手段,因此,发展海洋装备是促进海洋经济发展的前提。然而,在复杂多变的海洋环境中,金属材料自配副的方式使得金属材料的腐蚀非常严重<sup>[2-3]</sup>。据统计,每年因腐蚀破坏造成的损失大约占世界各国国民生产总值的3%左右,由海水腐蚀约占总腐蚀量的33.3%<sup>[4]</sup>。因此,在这种环境下发展海洋复合材料作为关键摩擦副应用于海洋装备中具有重要的现实意义。基于此,笔者对海洋环境下以聚醚醚酮(PEEK)作为关键摩擦副的摩擦学研究进行了汇总与分析,着重介绍了 PEEK 与金属配副、PEEK 与陶瓷配副等在海洋环境下的摩擦学研究现状及发展趋势,并对该领域进行了展望。

### 1 海洋环境及高分子复合材料的特点

海洋面积约占地球总面积的70.8%,通常被认为是最具腐蚀性的自然环境。它是高度复杂的介质,它包含了周期表中的几乎每一个元素和各种各样的生物体。海洋环境包括

海洋水体环境、海洋上方的大气环境、海底环境和生物环境。海洋环境相当复杂,海洋装备的使用除了考虑海水环境的腐蚀、海洋生物的污浊外还需要承受台风、海浪、潮汐和海流的自然因素的作用,面临的破坏机制复杂多样。苛刻的海洋环境下的摩擦磨损机制是制约海洋应用和发展海洋装备的关键问题。海水化学组成成分见表1。

| 表1 海水主要成分含量 |                 |                 |                 |                  |                  |                |                               | %               |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|-------------------------------|-----------------|
| 元素          | Cl              | Na              | S               | Mg               | Ca               | K              | C                             | Br              |
| 存在形式        | Cl <sup>-</sup> | Na <sup>+</sup> | S <sup>2-</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Br <sup>-</sup> |
| 含量          | 19.3535         | 10.7634         | 2.7124          | 1.294            | 0.4121           | 0.3991         | 0.1356                        | 0.0672          |

由于高分子复合材料具有优异的附着力、力学性能、耐化学腐蚀等优异的性能,且具有良好的机械加工和延展性能。所以,在海洋装备中用高分子复合材料相应的替换部分金属材料是大力发展海洋装备的有效手段。并且,PEEK作为新型的高性能工程塑料,具有很高的玻璃化转变温度和熔融温度,具有高的弹性模量、热稳定性、耐化学稳定性、耐辐

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51405278),陕西科技大学博士科研启动基金项目(BJ11-01),特种材料及制备技术四川省高校重点实验室开放基金项目(szzj2015-088)

联系人:陈威,博士,讲师,研究方向为摩擦学

收稿日期:2017-05-20

射性以及摩擦系数低、耐磨性能好和承载啮合性好等优点,被广泛地应用于各个工业领域<sup>[5]</sup>。

因此,笔者以 PEEK 为关键摩擦副,总结近些年来国内外对 PEEK 的研究现状及研究进展,为发展海洋工程材料提供科学的理论依据。

## 2 海洋环境 PEEK 作为关键摩擦副材料摩擦学研究现状

### 2.1 PEEK 复合材料与金属配副在海水中的摩擦学行为

人类在开发和利用海洋活动中形成了海洋产业,发展了种类繁多的海洋工程金属结构物,主要用于资源勘探、采油作业、海上施工、海上运输,海上潜水作业等,这些产业的兴起得以使大量的金属材料被广泛应用于海洋环境,但海洋环境的复杂多变使得海洋金属装备及结构物面临更为苛刻的服役环境,因此,研究 PEEK 复合材料与金属材料作为摩擦配副在海洋环境中的摩擦学特性尤为必要。

王志强等<sup>[6]</sup>研究了不锈钢 316L 和 9Cr18MO 分别与玻璃纤维增强环氧树脂复合材料 (EP/GF) 及碳纤维增强 PEEK (PEEK/CF) 以上环下盘的配副方式在模拟海水液压马达中主要摩擦副的工作环境下的摩擦学性能。研究发现,无论上端面是 Cr18MO 还是 316L,当下端面的材料为 PEEK/CF 时,摩擦副的摩擦系数均随时间的增加稳定在 0.1 左右,相比于 316L/(EP/GF) 配副,316L/(PEEK/CF) 配副的磨损表面较光滑,耐磨损性更好,因此可以得出 316L/(PEEK/CF) 配副更适合应用于海水液压马达的摩擦副材料。

梁瑛娜等<sup>[7]</sup>为探讨高压海水轴向柱塞泵滑靴副的减阻抗磨机理,研究在 PEEK/CF 试样表面加工出不同形状仿生非光滑单元体,与 316L 不锈钢形成配副的摩擦学性能。结果表明,在海水润滑条件下,316L 不锈钢与光滑表面 PEEK/CF 的摩擦过程以磨粒磨损和粘着磨损为主,摩擦系数高,试样温度升高大,磨损率大。试样表面的非光滑单元体可有效存储海水和磨屑,产生动压润滑效应和降低磨料磨损。此外,316L 不锈钢与 6 种非光滑表面 PEEK/CF 的摩擦过程均以犁沟效应为主,摩擦系数低,试样温度升高小,磨损率小。

Z. Wang 等<sup>[8]</sup>研究了丙烯腈-苯乙烯-丁二烯塑料 (ABS), CF 质量分数为 30% 的聚酰胺-酰亚胺 (CFR30%-PAI), CF 质量分数为 30% 的 PEEK 复合材料 (CFR30%-PEEK) 分别与 316L 不锈钢以环/盘方式配副在海水中的摩擦学性能。结果发现,在海水润滑方面 CFR30%-PEEK 具有优良的耐磨性能,其次是 CFR30%-PAI 和 ABS。由于 CF 可以保护材料免受严重磨损,在自然海水润滑下 316L 的磨损过程中起着重要的作用。此外,CF 增强复合材料在海水产生协同效应使得耐磨损性增强。ABS 的表面温度高于

CFR30%-PAI 和 CFR30%-PEEK,产生这种现象的原因是基于工程塑料的 CF 增强材料,可以大大提高复合材料的力学特性,限制了材料的表面摩擦系数和表面温度。

王志强等<sup>[9]</sup>研究了在天然海水环境下,316L 不锈钢与 PEEK450CA30 以上环下盘为配副方式的摩擦磨损性能。结果发现,当转速为 1000 r/min,载荷为 100 N 时,316L/PEEK450CA30 的摩擦系数较小。这是由于低载低速条件下有利于在配副的接触表面形成有效的润滑膜,进而起到减小摩擦的作用,并且,低载低速不会造成因摩擦表面温度骤然上升而引起的对配副材料 PEEK450CA30 的强度和硬度的不利影响,进而可降低发生严重粘着磨损的现象。通过对比转速和载荷对配副的影响作用发现,增大转速,对偶副间摩擦系数的震荡幅度增大,但加大载荷对偶副间的摩擦系数的变化幅度不是特别明显,因此可以认为,转速对摩擦系数的影响作用更大。

B. Chen 等<sup>[10]</sup>研究了不同体积分数 (5%, 10%, 20%, 30%) 的 CF 增强 PEEK 在海水中与 316L 不锈钢以环块方式配副的摩擦学特性。结果表明,相比于在干摩擦和纯水润滑条件下,PEEK/CF 复合材料在海水润滑条件下具有较低的摩擦系数和磨损率,这是由于海水中的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  沉积在滑动表面上且沉积层为浆状<sup>[11]</sup>,不仅具有一定的润滑作用<sup>[12]</sup>,而且可以防止摩擦面直接接触,导致摩擦系数和磨损率降低。CF 的加入可以大大提高 PEEK 在海水润滑下的耐磨性。特别是,在高负载条件下,体积分数为 10% 的 CF 增强 PEEK 复合材料具有最佳的耐磨性能,这是由于暴露在滑动表面上的 CF 起到在接触表面分载施加载荷的作用,从而保护聚合物基体免受严重磨损。

Wang Zhiqiang 等<sup>[13]</sup>研究了不锈钢 316L 与 PEEK (316L-PEEK)、不锈钢 316L 与 PEEK/GF (316L-CFRPEEK) 以及高碳铬不锈钢 9Cr18Mo 与 PEEK/GF (9Cr18Mo-CFRPEEK) 3 种配副在海水环境下的摩擦学性能。研究发现,与 316L-PEEK 相比,316L-CFRPEEK 与 9Cr18Mo-CFRPEEK 均具有较低的摩擦系数和较好的耐磨损性能,其中 316L-CFRPEEK 配副的摩擦学性能最好,摩擦系数在 0.1 左右,摩擦表面温度在 32℃ 左右。摩擦磨损实验后,相比于 9Cr18Mo-CFRPEEK,316L-PEEK 和 316L-CFRPEEK 的表面粗糙度明显降低,表现出了良好的摩擦学特性。

通过以上的研究结果发现,如今研究与 PEEK 在海水中的配副的金属多为 316L,在海水环境中,PEEK 复合材料与金属配副表现出了良好的摩擦学性能,为在苛刻环境中工作的零部件材料的选择提供了科学的依据。在海水环境中,复合材料的主要磨损机制为腐蚀磨损、磨粒磨损。金属材料的磨损程度则主要与海水的压力、微生物的腐蚀等紧密相关。因

此,为改善复合材料的物理化学特性,深入研究 PEEK 复合材料与金属配副在海洋环境下的摩擦磨损性能在发展海洋装备方面具有重要的现实意义。

## 2.2 PEEK 与陶瓷配副在海水中的摩擦学行为

相比于金属材料,非金属材料及其复合材料具有耐压强度高、硬度大、耐高温、耐腐蚀优异的性能,且非金属材料的密度较钢、铁、铜、铝等金属材料小得多,被用来制造罩壳、仪表板等一般轻质结构件,这样可以减轻自重、增加运载能力、节约能源,因而被作为关键摩擦副广泛应用于海水环境中。有些材料如陶瓷因其自身固有的润滑性能和低摩擦系数而能减少摩擦和磨损,故被制成轴承、导轨、活塞环、密封圈等机械零件。也会因其硬度高而耐磨,故被制作成研磨剂和刀具,可供磨削和切削之用。

廖伍举等<sup>[14]</sup>研究了 PEEK/CF(PEEK450-FC30)与氮化硅配副在海水润滑环境下的摩擦磨损性能。结果表明,在一定的滑动速度和接触压力下,该配副持续呈现出较小的磨损率和摩擦系数。由于 PEEK450-FC30 与 SiC 硬度相差较大,故工程塑料表面的磨损主要以塑性涂抹为特征的粘着,而 SiC 表面则主要为由其粗糙峰引起的犁耕。

唐群国等<sup>[15]</sup>研究了 Ti(C,N) 金属陶瓷与 PEEK/CF 配副在海水环境下的摩擦磨损性能。结果发现,在试验速度较低时,摩擦系数随速度的增加下降较快,但当试验速度较高时,摩擦系数趋向于稳定值。然而,接触压力对摩擦系数的影响作用较小。且通过表征发现,PEEK/CF 的磨损机制主要以机械切割和机械犁耕引起的塑性变形和脱落为主,并向陶瓷面转移。金属基陶瓷在摩擦过程中会产生大量剥落坑,PEEK/CF 产生的磨屑充当填充物堆积在剥落坑中,因此可以起到有效减摩的作用,改善摩擦性能。

申凤梅<sup>[16]</sup>研究了 PEEK/CF 分别与氮化硅、碳化硅、316L 不锈钢、17-4PH(0Cr17Ni4Cu4Nb) 配副作为海水柱塞泵材料的性能。结果发现,从滑动速度对陶瓷和 PEEK 摩擦系数和磨损率的影响分析可知,氮化硅摩擦系数基本稳定在 0.12 左右,碳化硅的摩擦系数在 0.02~0.04,且碳化硅配对的 PEEK 的磨损率稳定性较好,因此可以得出氮化硅受滑动速度的影响较大,不适于滑动速度经常变化的配副环境。通过压力对摩擦系数的影响得出,氮化硅适用于压力不断变化的场合。在给定正压力和速度条件下可知碳化硅、氮化硅 316L 材料磨损率较低,具有良好的耐磨性,适用于海水柱塞泵的配副材料。

Zhang Z 等<sup>[17]</sup>研究了 PEEK/CF 摩擦学行为对碳化硅陶瓷在海水润滑滑动的影响。结果表明,在海水润滑条件下,摩擦副具有优异的摩擦磨损性能,且存在明显的磨合过程。当接触压力超过 1.32 MPa,摩擦副的摩擦系数小于 0.1,摩擦

系数随滑动速度的增加先减小后略有增加。摩擦系数随接触压力的增加呈下降趋势,当滑动速度保持 0.75 m/s 和 1.5 m/s 时接触压力略有增加,PEEK/CF 的磨损率减小,而碳化硅陶瓷的质量损失可以忽略不计。且碳化硅陶瓷表面的主要磨损机制是粘着磨损和机械犁削。该研究为海水液压元件关键摩擦副材料筛选奠定了基础。

A. Dwars 等<sup>[18]</sup>研究了热喷涂双相不锈钢基陶瓷涂层(WC/CoCr)在海水液压泵中的反渗透性能。试验制备了 5 种涂层材料( $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$ , WC/Co, WC/CoCr-1, WC/CoCr-2),经表征发现,相比于喷  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  涂层,WC/CoCr-2 材料具有更好的耐磨性。在模拟海水液压装置试验中发现,PEEK/WC/CoCr-1 配副在流体运动作用下摩擦系数平稳上升,但该配副的反渗透能力较好。

通过不同改性方法改善 PEEK 复合材料在海水环境中的摩擦学性能是现在人们常用的一种方法,但其摩擦磨损性能依旧受配副材料的影响。然而,陶瓷材料因硬度高、耐磨等性能被制作成可供磨削和切削之用的材料,并借其自身固有的润滑性能和低摩擦系数而能减少摩擦和磨损,可制成轴承、导轨、活塞环、密封圈等机械零件,因此,研究 PEEK 复合材料与陶瓷配副的摩擦磨损性能为在苛刻环境中工作的配副材料提供了更多的选择。

## 3 表面工程技术在 PEEK 作为关键摩擦副中的应用

表面工程技术可以分为表面涂镀技术、表面改性技术和薄膜技术。表面工程技术成型工件的效率是磨削的 5~20 倍、车削的 10~50 倍以上,并使表面得到挤压硬化,耐磨性、疲劳强度提高,有效消除表面受力塑性变形,尺寸精度能相对长期保持稳定。

PEEK 是一种高性能的聚合物被用于各种应用场所,如齿轮、密封环、衬套和轴承,由于其力学和摩擦学性能优异且熔点高<sup>[19-21]</sup>,PEEK 可以作为有效的金属基体上的涂层。此外,PEEK 近年来被用于替代金属基板,包括碳钢、不锈钢、铝、镁、黄铜和青铜等材料<sup>[21]</sup>。为此,研究表面工程技术对 PEEK 作为关键摩擦副中的应用具有重要的现实意义。

M. Hedayati 等<sup>[22]</sup>研究通过静电粉末喷涂技术沉积在普通碳素钢上的无定形和半结晶 PEEK/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料涂层的摩擦学和力学性能。结果发现,半结晶的涂层具有较高的硬度,降低粘附强度,较低的摩擦系数和较低的磨损率可以改善其摩擦学性能。无论 PEEK 的晶体结构如何,当 SiO<sub>2</sub> 纳米粒子充满涂层时,其耐磨性得到了改善,但其摩擦系数也略有增加。涂层材料的主要磨损机制是犁削和粘结。

G. Zhang 等<sup>[23]</sup>研究了用火焰喷涂和印刷喷涂制备铝基 PEEK 涂层的结构和摩擦学性能,通过表征和球盘摩擦试验表明,PEEK 涂层表现了优异的摩擦学性能,降低了摩擦

系数和磨损率。并且,半结晶态的 PEEK 涂层比无定形态的 PEEK 涂层具有更低的摩擦系数和磨损率。在 PEEK 基体中添加 SiC 和石墨颗粒可以显著提高涂层耐磨性但涂层的摩擦系数稍有增加。

J. Tharajak 等<sup>[24]</sup>研究了磁场对 PEEK 涂层摩擦系数和磨损率的影响。结果发现,磁场强度对距离基材 50 ~ 150  $\mu\text{m}$  的 PEEK 涂层具有积极作用且在 100  $\mu\text{m}$  处观察到最明显的效果。这与 PEEK 的分子取向和排列有关。摩擦系数和磨损率的变化与涂层的局部结晶度和局部硬度密切相关,PEEK 涂层的具体磨损率和摩擦系数随磁强度的增加而降低。在较低的施加载荷 (5 N) 下,磁场对 PEEK 涂层具有更显著的作用。所以,在热喷涂工艺中成功地使用了磁场来改善 PEEK 涂层的耐摩擦和耐磨性。

近年来研究人员对于 PEEK 涂层在干摩擦条件下的摩擦学性能开展了一些研究,但是,对于海水环境中的摩擦学行为的研究甚少。大多数的摩擦副在海水环境中腐蚀行为主要为电化学腐蚀、载荷和腐蚀作用下的耦合摩擦学行为<sup>[25-27]</sup>,因此研究海水环境中材料的耐腐蚀、耐磨损显得尤为必要。为此,为了丰富 PEEK 在海洋环境中的应用,拓展不同技术对海洋环境下关键摩擦副的优化,扩充表面工程技术对 PEEK 在海水环境中的研究是今后学者关注的方向。

随着陆地资源的日益紧张,大规模、全面地开发利用海洋资源和海洋空间已显得刻不容缓<sup>[28-29]</sup>。全世界石油产量的 1/3 以上来自海洋,而我国新增石油产量的 85% 来自于海上,海洋资源的重要性日益凸显。我国作为能源消费大国对加紧海洋油气资源的开发显得迫在眉睫<sup>[30]</sup>,发展海洋工程装备制造业是发展海洋资源的保障,全面发展对海洋环境下材料的适用性研究是必然趋势,因此,深入研究海洋环境下材料的摩擦磨损性能是促进海洋工程装备发展的必要举措。

#### 4 结语

研究海洋环境下材料的摩擦磨损性能可能面临以下挑战:1) 人们对海洋领域的开发已由浅海进入深海,海洋环境更加复杂,这使得其对配副材料的交互影响机制更加繁杂,因此,完善交互作用对摩擦副的影响机制显得尤为关键;2) 与发达国家相比,我国海洋工程装备行业的发展比较滞后,研发能力和创新能力有待提高,丰富海洋专用材料面临的挑战更加严峻;3) 产业体系缺乏健全的机制,阻碍了海洋工程装备的快速发展。因此,深入研究关键配套设备和系统,掌握关键共性技术,为我国海洋工程装备的快速发展提供有力支撑是大力发展我国海洋工程装备的必备举措,为海洋领域的开发利用提供有效的保障。

#### 参考文献

[1] 赵金楼,等. 学习与探索,2014(4):110-112.

- Zhao Jinlou, et al. Study & Exploration, 2014(4):110-112.
- [2] 文怀兴,等. 材料导报,2016(15):85-91, 112.  
Wen Huaixing, et al. Materials Review, 2016(15):85-91, 112.
- [3] 陈君,等. 材料热处理学报,2014(12):166-171.  
Chen Jun, et al. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014(12):166-171.
- [4] 徐发玉. 皮革化工,2007(1):41-44.  
Xu Fayu. Leather Chemicals, 2007(1):41-44.
- [5] Zhu Yanji, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(21).DOI:1002/app.409.
- [6] 王志强,等. 中国表面工程,2016,29(2):49-57.  
Wang Zhiqiang, et al. China Surface Engineering, 2016, 29(2):49-57.
- [7] 梁瑛娜,等. 中国表面工程,2017,30(1):115-124.  
Liang Yingna, et al. China Surface Engineering, 2017, 30(1):115-124.
- [8] Wang Z, et al. Materials & Design, 2013, 51:983-988.
- [9] 王志强,等. 中国科技论文,2014,9(8):874-877.  
Wang Zhiqiang, et al. China Sciencepaper, 2014, 9(8):874-877.
- [10] Chen B, et al. Tribology International, 2012, 52:170-177.
- [11] Sokoloff L, et al. Wear, 1983, 88(2):207-219.
- [12] Wang J Z, et al. Wear, 2009, 267:1 634-1 641.
- [13] Wang Zhiqiang, et al. Materials & Design, 2014, 53:881-887.
- [14] 廖伍举,等. 液压与气动,2015(8):16-19.  
Liao Wujun, et al. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(8):16-19.
- [15] 唐群国,等. 润滑与密封,2011(1):1-3.  
Tang Qunguo, et al. Lubrication Engineering, 2011(1):1-3.
- [16] 申凤梅. 海水柱塞泵关键摩擦副的材料选配及可靠性研究 [D]. 北京:北京工业大学,2014.  
Shen Fengmei. Material matching property and reliability research of key friction paris in the seawater hydraulic piston pump[D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2014.
- [17] Zhang Z, et al. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2014, 228(12):1 421-1 432.
- [18] Dwars A, et al. Materials and Corrosion, 2008, 59(11):870-877.
- [19] Najeeb S, et al. Journal of Prosthodontic Research, 2016, 60(1):12-19.
- [20] Tharajak J, et al. Surface and Coatings Technology, 2015, 273:20-29.
- [21] Hanafi I, et al. Procedia Technology, 2016, 22:195-202.
- [22] Hedayati M, et al. Progress in Organic Coatings, 2012, 74(1):50-58.
- [23] Zhang G, et al. Progress in Organic Coatings, 2007, 60(1):39-44.

(下转第 147 页)

- [26] 沈晓伟. 模具制造, 2015, 15(3):60-65.  
Shen Xiaowei. Die & Mould Manufacture, 2015, 15(3):60-65.
- [27] 谭鹏. 长玻纤增强聚丙烯制品成型模拟工艺优化及应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.  
Tan Peng. Research on molding simulation optimization and application of long glass fiber reinforced polypropylene product[D]. Changsha:Hunan University, 2015.
- [28] 孙显俊. 聚丙烯及其复合材料注塑件翘曲变形数值模拟与实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
Sun Xianjun. Warpage of injection molded parts manufactured with polypropylene and its composites[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015.
- [29] 何政军. 基于实例的注塑模具 CAD/CAE/CAM 技术研究与应用 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.  
He Zhengjun. Technology research and application on CAD / CAE / CAM based on an actual example of injection mold[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2014.
- [30] 张琦. 基于实例的注塑模具 CAD/CAE/CAM 集成技术研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.  
Zhang Qi. Integration technology research on CAD/CAE/CAM based on an actual example of injection mold[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2012.
- [31] 潘秀石, 等. 工程塑料应用, 2015, 43(1):80-84.  
Pan Xiushi, et al. Engineering Plastics Application, 2015, 43(1):80-84.
- [32] 尹小定. 塑料科技, 2016(6):61-65.  
Yin Xiaoding. China Plastics Industry, 2016(6):61-65.
- [33] 王蕾, 等. 新技术新工艺, 2014(2):86-89.  
Wang Lei, et al. New Technology & New Process, 2014(2):86-89.
- [34] 周慧兰, 等. 中国塑料, 2012(2):63-67.  
Zhou Huilan, et al. China Plastics, 2012(2):63-67.
- [35] 李勇, 等. 中国塑料, 2010, 24(2):78-82.  
Li Yong, et al. China Plastics, 2010, 24(2):78-82.
- [36] 黄益宾, 等. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(4):657-665.  
Huang Yibin, et al. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4):657-665.
- [37] 万齐访. 塑料异型材气辅包覆共挤数值模拟与实验研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.  
Wan Qifang. Numerical simulation and experimental study on plastic profile gas-assisted coated coextrusion[D]. Nanchang:Nanchang University, 2015.
- [38] 柳和生, 等. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(10):113-116.  
Liu Hesheng, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(10):113-116.
- [39] 陈巧悦, 等. 高分子学报, 2015(10):1 231-1 234.  
Chen Qiaoyue, et al. Acta Polymerica Sinica, 2015(10):1 231-1 234.
- [40] 白晓鹏, 等. 湖南工业大学学报, 2014(6):32-37.  
Bai Xiaopeng, et al. Journal of Hunan University of Technology, 2014(6):32-37.
- [41] 陈吉平, 等. 机械工程材料, 2016, 40(7):64-67.  
Chen Jiping, et al. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(7):64-67.
- [42] 赵伟伟. 新型组合管节点抗震性能研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.  
Zhao Weiwei. Study on Seismic performance of new combination tube node[D]. Zhenjiang:Jiangsu University of Science and Technology, 2015.
- [43] 杨方沁. 金属 / 聚合物复合结构对材料导热性能的影响研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.  
Yang Fangqin. The Study on thermal conductivity of polymer / metal composite materials[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology, 2013.
- [44] 高智芳, 等. 塑料工业, 2014, 42(11):63-67.  
Gao Zhifang, et al. China Plastics Industry, 2014, 42(11):63-67.
- [45] 曹玉瑞, 等. 周口师范学院学报, 2010, 27(2):54-56.  
Cao Yurui, et al. Journal of Zhoukou Normal University, 2010, 27(2):54-56.
- [46] 陈娟, 等. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2016, 39(7):875-879.  
Chen Juan, et al. Journal of Hefei University of Technology : Natural Science, 2016, 39(7):875-879.
- [47] 李文文. 成型加工流场中黏弹性高分子熔体的流变响应分析 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.  
Li Wenwen. Analysis of rheological response of viscoelastic polymer melts in molding processing fields[D]. Qingdao:Qingdao University of Science & Technology, 2016.
- [48] 韩铁. 工程技术: 文摘版, 2016(5):174.  
Han Yi. Engineering Technology:Abstract Edition, 2016(5):174.

## (上接第 138 页)

- [24] Tharajak J, et al. Wear, 2017, 372:68-75.
- [25] 王宏智, 等. 化工学报, 2013(4):1 359-1 363.  
Wang Hongzhi, et al. CIESC Jorunal, 2013(4):1 359-1 363.
- [26] 陶永奇, 等. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 36(6):587-594.  
Tao Yongqi, et al. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 36(6):587-594.
- [27] 曹攀, 等. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(1):12-20.  
Cao Pan, et al. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 35(1):12-20.
- [28] 王颖, 等. 舰船科学技术, 2010(10):108-113.  
Wang Ying, et al. Ship Science and Technology, 2010(10):108-113.
- [29] 彭涛, 等. 中国工程科学, 2016, 18(4):109-112.  
Peng Tao, et al. Engineering Science, 2016, 18(4):109-112.
- [30] 杜利楠, 等. 海洋开发与管理, 2013, 30(3):1-6.  
Du Linan, et al. Ocean Development and Management, 2013, 30(3):1-6.