

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.05.027

PEEK 导热性能研究进展

李啊强¹, 陈奇海², 霍绍新², 方良超², 姚芮², 崔益华¹, 张邈¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 211106; 2. 中国电子科技集团第三十八研究所, 合肥 230088)

摘要: 聚醚醚酮 (PEEK) 较低的导热性能限制了其进一步的推广应用, 为此综述了近年来 PEEK 导热性能的研究进展, 重点介绍了几种常用填料对 PEEK 导热性能的影响。最后探讨了 PEEK 导热改性领域目前存在的问题, 分析和总结了进一步改善 PEEK 导热性能的方法, 指出发掘新的填料表面改性技术和研究不同性质填料之间的复配规律是未来研究的发展方向。

关键词: 聚醚醚酮; 导热性能; 研究进展; 表面改性

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)05-0144-04

Research Development on Thermal Conductivity of PEEK

Li Aqiang¹, Chen Qihai², Huo Shaoxin², Fang Liangchao², Yao Rui², Cui Yihua¹, Zhang Miao¹

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

2. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: The low thermal conductivity of polyether ether ketone (PEEK) limited its further application, so the recent research progress on the thermal conductivity of PEEK was summarized, which emphasized on the effects of several common fillers on the thermal conductivity of PEEK. In addition, the existing problems in thermal conductivity modification of PEEK was discussed, and the methods for further improving on the thermal conductivity of PEEK were analyzed and summarized. Exploring surface modification of fillers and the compounding rules between different fillers will be the development direction of future research.

Keywords: polyether ether ketone; thermal conductivity; development direction; surface modification

聚醚醚酮 (PEEK) 作为特种工程塑料, 具有高模量、高强度、耐腐蚀以及尺寸稳定性好等一系列优点, 广泛应用于航空航天、电子电气、能源、医疗等高技术领域^[1-3]。PEEK 在常温下热导率仅为 $0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 限制了其在导热领域的应用。为提高 PEEK 的导热性能, 通常是通过添加高导热填料, 使其在 PEEK 基体中形成导热网络, 从而达到改善 PEEK 导热性能的目的^[4-5]。

笔者归纳了近年来各类导热填料在 PEEK 导热改性中的应用, 阐述了 PEEK 导热改性的原理, 总结了该研究领域中存在的不足之处, 并对其发展方向进行了展望。

1 碳纤维改性 PEEK

碳纤维 (CF) 是含碳量高于 90% 的无机高分子纤维, 具有密度低、模量高、线膨胀系数小以及导热性能优异等特点, 因此广泛应用于改善聚合物导热的性能^[6]。S. R. Kim 等^[7]

将 CF 和 PEEK 高温熔融共混, 制备了 PEEK/CF 复合材料。研究表明, 当 CF 体积含量为 40% 时, 材料的热导率从纯 PEEK 的 $0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 增加到 $3.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

J. A. King 等^[8]研究了 PEEK/CF 复合材料的导热性能。研究表明, PEEK 和 CF 界面结合良好, 如图 1 所示, PEEK/CF 复合材料中明显存在纤维拔出留下的痕迹, 纤维间容易形成导热通路。当 CF 质量分数为 30% 时, 复合材料

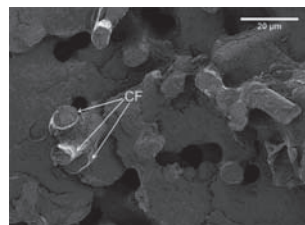


图 1 PEEK/CF 复合材料的场发射扫描电镜照片

通讯作者: 崔益华, 教授, 博士生导师, 主要从事高分子复合材料和纳米复合材料的研究 E-mail: cuiyh@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2019-02-19

引用格式: 李啊强, 陈奇海, 霍绍新, 等. PEEK 导热性能研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5): 144-147, 158.

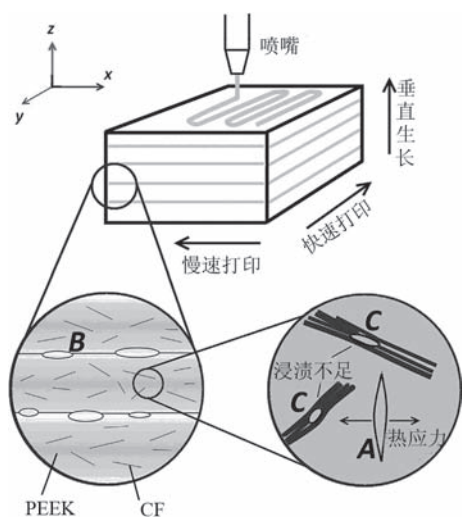
Li Aqiang, Chen Qihai, Huo Shaoxin, et al. Research development on thermal conductivity of PEEK[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5): 144-147, 158.

热导率为 $0.42 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 相比于未改性 PEEK 热导率提升了 68%。

CF 的分散状态和处理工艺同样会影响 PEEK 的导热性能。针对该问题, 廖俊波^[9] 采用了湿法工艺制备了 PEEK/CF 复合材料。研究发现湿法分散的 CF 尺寸越大, 其制备的复合材料导热性能越低, 该结果可能和纤维的分散状态有关。随着 CF 含量增加, PEEK 的导热性能先缓慢下降再迅速上升, 当 CF 含量为 40% 时, PEEK 的热导率为 $0.36 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

Wang Qiufeng 等^[10] 通过热压烧结技术制备了 PEEK/CF 复合材料, 研究了 CF 尺寸对 PEEK 导热性能的影响。研究表明, 相较于微米级的 CF, 纳米级的 CF 可以大幅改善 PEEK 的导热性能。这与 CF 在 PEEK 基体中形成导热通路的难易程度有关, 纳米级的 CF 在 PEEK 基体中分散状态更好。

目前制备 PEEK 复合材料多采用热压成型和挤出成型技术, 往往需要大量的机加工来满足实际使用需求。为了提高 PEEK 零件的制造精度和最大限度地减少后续加工, A. A. Stepashkin 等^[11] 采用 3D 打印技术制备了 PEEK/CF 复合材料。结果表明, 当 CF 质量分数为 20% 时, 材料的热导率从纯 PEEK 的 $0.21 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 提升至 $0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。提升幅度未达预期, 这是由于 3D 打印制备的 PEEK/CF 复合材料孔隙率较高导致的, 图 2 显示了 3D 打印的过程以及 PEEK/CF 复合材料的分级结构和固有孔隙率。作者认为采用连续 CF 纱线改性 PEEK 可以解决孔隙率较高的问题。



A—层界面粗孔系统; B—通道面处的细孔系统; C—纱线浸渍不足

图 2 3D 打印 PEEK/CF 复合材料的缺陷层次模型

CF 改性 PEEK 可以有效提升其导热性能和力学性能, 但在生产工艺上有一定的限制。如在热压工艺中, CF 与

PEEK 混合过程容易出现团聚现象, 导致混合料的均匀性较差^[12]。因此, 可以通过偶联剂涂层法^[13]、等离子体处理法^[14]、能量束处理法^[15]和稀土处理法^[16]等表面改性技术强化 CF 与基体材料之间的界面结合性能, 改善 CF 与基体的粘结效果。

2 碳纳米管改性 PEEK

碳纳米管具有超高的热导率, 单壁碳纳米管 (SWCNT) 的热导率高达 $6000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 多壁碳纳米管 (MWNT) 的热导率为 $3000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[17]。在聚合物中加入少量的碳纳米管理论上可大幅提高其热导率。吴立豪^[18] 采用模压法制备了 PEEK/碳纳米管复合材料, 其热导率随着碳纳米管含量的增加而增加, 当碳纳米管含量为 10% 时, PEEK 的热导率为 $0.35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。复合材料热导率的提高幅度远远低于预期值, 其原因可能是碳纳米管和 PEEK 的界面热阻削弱了热量在复合材料间的传递。

为了降低碳纳米管与 PEEK 基体的界面热阻, A. M. Díez-Pascual 等^[19] 首先将 PEEK 进行羟基化处理, 随后与酸化处理后的 SWCNT 发生酯化反应, 制备出 PEEK/碳纳米管复合材料。结果表明, 当 SWCNT 含量为 76% 时, 材料在室温下的热导率为 $1.52 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 相比于纯 PEEK 提升了 6 倍。PEEK 导热性能提升的原因可能有两点, 一是 SWCNT 表面接枝 PEEK 可以提高其分散性, 二是与接枝后 SWCNT 增加了声子散射点有关。

Y. Hwang 等^[20] 在 PEEK/氧化石墨烯 (GO) 体系中引入烷基胺化和苯基胺化的碳纳米管。结果表明, MWNT 可以充当 GO 层之间的搭桥, 这有利于 GO 之间形成导热通路。当烷基胺化和苯基胺化的 MWNT 的含量为 0.5% 时, 材料热导率分别为 $0.43 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $0.45 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

3 无机粒子填充改性 PEEK

3.1 微米粒子

采用无机粒子改性 PEEK 时, 填料的粒径对 PEEK 的导热性能有着重要影响。同一种导热填料, 粒径越小, 越有利于提高材料的导热性能^[21]。宁洋等^[22] 研究了铜粉粒径对 PEEK 材料导热性能的影响。结果表明, 粒径细小的铜粉有利于 PEEK 热导率的提高, 但是在高填充量下, 粒径尺寸对 PEEK 导热性能的影响将减弱。原因可能是在填料含量较高的情况下, 导热网络已经形成, 粒径大小的影响可以忽略^[23-24]。当铜粉用量为 30%、粒径为 $10 \mu\text{m}$ 时, 复合材料的热导率为 $0.39 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 相比于纯 PEEK 提高了 67.80%。

PEEK 复合材料的制备方式会影响导热填料在基体中的分散状态, 从而影响材料导热网络的形成。为了研究制备方式对复合材料的导热性能的影响, 廖俊波^[9] 研究了超声处理后的膨胀石墨 (EG) 与 PEEK 的共混方式对材料导热性

能的影响。结果表明,高速剪切法>超声共混法>机械混合法,造成这种现象的原因是高速剪切法可以使得 PEEK 吸附或者直接进入 EG 层间,从而借助于 EG 既定存在的导热结构以获得更高导热性能。当填料含量 40% 为时,复合材料热导率有效提高至 $5.32 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。S. R. Kim 等^[7]则采用熔融共混的方式制备 PEEK/碳化硅复合材料,当碳化硅体积含量为 50% 时,材料的热导率从纯 PEEK 的 $0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 增加至 $2.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

为了探究后期热处理工艺条件对 PEEK 复合材料性能的影响,聂琰等^[25]制备了 PEEK/氮化铝复合材料。研究发现,后期热处理会影响复合材料的力学性能,但对导热性能影响较小。作者认为热处理导致 PEEK 分子链排列有序,对导热网络的形成影响不大。当氮化铝的质量分数为 10% 时,PEEK 热导率为 $0.42 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

3.2 纳米粒子

纳米粒子能否在 PEEK 材料改性中发挥作用与许多因素有关,其中以下两方面比较突出:一是分散问题,纳米粒子由于其特殊的表面结构容易团聚,无法分散均匀形成导热网络^[26]。二是界面结合问题,无机填料和 PEEK 基体界面相容性差,使得两者界面存在空隙,不利于界面热阻的降低。

针对纳米粒子填充改性存在的问题,研究人员通常会对导热填料进行表面处理来提高其分散性,如表面包覆处理^[27]、表面化学改性^[28]等。Z. Wahab 等^[29]用苯基磷酸酯(PPA)官能化的纳米金刚石(ND)改性 PEEK 材料。研究结果表明,PPA 改性的羧化 ND 在 PEEK 基体中分散均匀,当 ND 含量为 3% 时,PEEK 热导率为 $0.35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。肖彬等^[30]利用八苯基 POSS 改性石墨烯,进一步改性 PEEK 制备复合材料。研究结果表明,POSS 可以降低石墨烯的表面能,改善了石墨烯的分散性,进而提高 PEEK 的导热性能。

在 L. Rivière 等^[31]研究中,他们将银纳米粒子 AgNP 作为 PEEK 的导热填料,制备了 PEEK/AgNP 复合材料。研究表明,银纳米粒子可以改善 PEEK 的导热性能。当银粒子体积分数为 13.5% 时,银粒子导热网络逐渐形成,如图 3 所示。当银纳米粒子体积分数为 8% 时,PEEK 复合材料的热导率为 $0.49 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

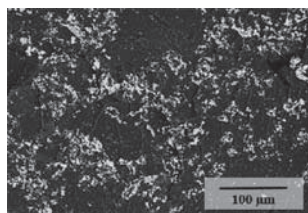


图3 PEEK/AgNP 的 SEM 照片

在众多的增强材料中,碳基纳米材料和无机富勒烯类

二硫化钨纳米颗粒最受关注。Wang Nannan 等^[32]采用新型核壳结构化的无机富勒烯类二硫化钨(IF-WS₂@CNP)改善 PEEK 的导热性能。研究发现,IF-WS₂@CNPs 提高了 IF-WS₂ 在 PEEK 基体中的分散能力,促进了小球晶结构的形成,并大幅改善了 PEEK 的导热性能。当 IF-WS₂@CNPs 含量为 8% 时,PEEK 复合材料的热导率为 $0.82 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

在无机粒子填充改性 PEEK 的体系中,填料的尺寸大小对 PEEK 材料的导热性能影响显著。研究发现大颗粒相比小颗粒存在更少的晶格和表面缺陷,因此使用微米级的填料和纳米级的填料复配填充可以大幅降低填料之间的接触热阻^[30]。

4 混杂改性 PEEK

对于单一的导热填料,虽然改善 PEEK 的导热性能效果显著,但仍不能满足当今迅速发展的材料科技以及工业的要求。采用混杂填料改性 PEEK 可以充分发挥各组元间的协同作用,弥补或克服单一填料的不足,进一步提升 PEEK 的导热性能。

苏亚男等^[33]使用层间喷涂法制备了 PEEK/CF/石墨烯复合材料,复合材料的制备过程如图 4 所示。研究发现,PEEK 复合材料的热导率随着石墨烯含量的增加而增加,当石墨烯质量分数为 0.5% 时,PEEK 的热导率为 $0.29 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。PEEK/CF/石墨烯复合材料与 PEEK/CF 相比具有更优良的综合性能。

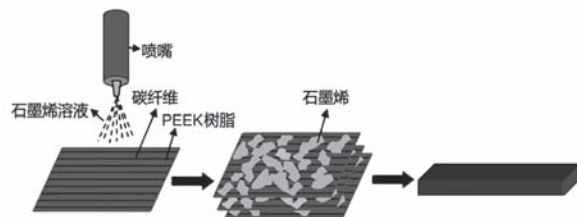


图4 PEEK/CF/石墨烯复合材料的制备过程

J. A. King 等^[8]将三种不同的碳填料(碳黑,石墨烯纳米片和 CF)添加到 PEEK 中,研究了填料含量对复合材料的导热性能的影响。研究发现,当炭黑质量分数超过 10% 时,复合材料因黏度较高无法挤出注塑成型。导热性能最好的复合材料是 PEEK/30% CF/7.5% CB,其热导率为 $0.52 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

刘浏^[34]制备了 PEEK/CF/石墨烯复合材料。研究结果表明,较低含量的 CF 对复合材料的热传导并没有太大的贡献。当添加质量分数 0.7% 的石墨烯时,复合材料的热导率迅速升高,比未添加石墨烯的复合材料热导率提高 35.5%,达到了 $0.33 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。当石墨烯含量为 1% 时,复合材料的热导率仍在提高但是变得缓慢。这是因为当石墨烯超过临界值之后,其在 PEEK 中分散变得困难,可能会产

生团聚现象,从而减弱了热导率的改善效果。

表面处理后的 CF 可以改善与基体材料之间的界面性能,提高其分散状态和与基体的粘结效果。孙诗良^[35]将等离子体处理后的短碳纤维 (SCF) 和铜粉作为复配填料,制备了 PEEK/SCF/Cu 导热复合材料。结果表明,等离子体处理后的 SCF 与 PEEK 的粘结作用明显增强。SCF 起到桥接作用,将铜粒子连接起来,有利于导热通路的形成,显著提高了复合材料的热导率。当铜粉用量为 10% 时,随着 SCF 用量的增加,复合材料的热导率明显提高。当 SCF 用量为 20% 时,复合材料的热导率为 $0.83 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,相比于 PEEK 提高了 162%。

除了 CF,玄武岩纤维也是常用的增强材料。侯天武等^[36]以碳化硅、碳化硼和玄武岩纤维复配作为填料改性 PEEK,显著改善了 PEEK 的导热性能,PEEK 材料热导率最高可达到 $0.89 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。玄武岩纤维可作为“搭桥”将孤立的碳化硅和碳化硼填料连接起来,有利于形成导热通路。另一方面玄武岩纤维可以增强 PEEK,几乎承载了所有的外力作用,并且由于纤维在基体中分散均匀,从而避免了复合材料的应力集中。

5 结语

PEEK 的导热性能较差,为解决这一问题,研究人员主要采用了导热填料改善其热导率。目前来看,虽然导热填料很大程度上提高了复合材料的热导率,但 PEEK 复合材料的热导率仍然与计算出的理论热导率有一定差距。这可能是三方面原因造成的:

(1) PEEK 基体在合成与加工过程中改变分子结构可以改善自身的导热性能,但目前针对 PEEK 本身性质影响其导热性能的研究还不够深入。

(2) 关于 PEEK 基体和导热填料界面结合性能的研究较少,还需进一步探索相应的填料改性技术。

(3) 导热填料的高填充和复配使用是提高 PEEK 热导率的主要方法,而高填充势必影响 PEEK 的力学性能。

针对这些问题,未来 PEEK 导热改性应该有不同的侧重点。首先需要加强 PEEK 本身性质对导热性能影响的研究,其次发掘新的表面改性技术来改善填料在 PEEK 中的分布状态,最后深入研究不同性质填料之间的复配规律,找出最佳填料配比。

参考文献

- [1] Panayotov I V, et al. *Journal of Materials Science:Materials in Medicine*, 2016, 27(7):118–129.
- [2] Hassan E A M, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2018, 112:155–160.
- [3] 段翔远. *化工新型材料*, 2013, 41(5):183–185.
- [4] Gong Feng, et al. *Carbon*, 2014, 78:305–316.
- [5] 李珺鹏. 功能型聚合物基导热 / 导电复合材料的制备与应用 [D]. 西安:西北工业大学, 2016.
- [6] Li Junpeng. *Synthesis and application of functional polymer-based composites with thermal and electrical conductivity*[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [7] Park J M, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2014, 67:22–29.
- [8] Kim S R, et al. *Solid State Phenomena*, 2007, 124:1 079–1 082.
- [9] King J A, et al. *Polymer Composites*, 2016, 39:E807–E816.
- [9] 廖俊波. 聚醚醚酮基导热复合材料的制备与性能研究 [D]. 上海:华东理工大学, 2013.
- [10] Liao Junbo. *The preparation and investigation of PEEK-based thermal conductivity composites*[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology, 2013.
- [10] Wang Qiufeng, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, 29:896–905.
- [11] Stepashkin A A, et al. *Composites Science & Technology*, 2018, 164:319–326.
- [12] Davim J P, et al. *Wear*, 2009, 266(7):795–799.
- [13] Wu Weili, et al. *Silicon*, 2018, 10(5):1 903–1 910.
- [14] Han S H, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2014, 60:98–105.
- [15] Tiwari S, et al. *Wear*, 2011, 270(9):688–694.
- [16] Xu Ying, et al. *Journal of Jiangsu University*, 2011, 32(2):167–170.
- [17] Abbasi S, et al. *Experimental Heat Transfer*, 2016, 29(6):781–795.
- [18] 吴立豪,等. *塑料科技*, 2018, 46(3):36–39.
- [18] Wu Lihao, et al. *Plastics Science and Technology*, 2018, 46(3):36–39.
- [19] Díez-Pascual A M, et al. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2012, 43(6):1 007–1 015.
- [20] Hwang Y, et al. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2013, 55(2):195–202.
- [21] Zhang S, et al. *Express Polymer Letters*, 2011, 5(7):581–590.
- [22] 宁洋,等. *塑料科技*, 2017, 45(9):25–28.
- [22] Ning Yang, et al. *Plastics Science and Technology*, 2017, 45(9):25–28.
- [23] Nielsen L E. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 17(12):3 819–3 820.
- [24] Qian Rong, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2013, 24(3):348–356.
- [25] 聂琰,等. *复合材料学报*, 2016, 33(4):749–757.
- [25] Nie Yan, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(4):749–757.

- 110(1):177-186.
- [12] 王声洁,等.石油学报(石油加工),2010,26(2):201-207.
Wang Shengjie, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 26(2):201-207.
- [13] 王声洁,等.华东理工大学学报:自然科学版,2010,36(1):20-24.
Wang Shengjie, et al. *Journal of East China University of Science and Technology: Social Science Edition*, 2010, 36(1):20-24.
- [14] 王声洁.乙炔氢氯化非汞催化反应制取氯乙烯单体研究[D].上海:华东理工大学,2010.
Wang Shengjie. Study on non-mercury catalytic acetylene hydrochlorination to produce vinyl chloride monomer (VCM) [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2010.
- [15] 曾军建,等.现代化工,2016(2):72-76.
Zeng Junjian, et al. *Modern Chemical Industry*, 2016(2):72-76.
- [16] Wang L, et al. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2017, 95(6):1 069-1 075.
- [17] Wan F, et al. *Catalysis Communications*, 2017, 101:120-124.
- [18] Mitchenko S A, et al. *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*, 2004, 212(1-2):345-352.
- [19] 杨琴,等.四川化工,2007,10(5):13-15.
Yang Qin, et al. *Sichuan Chemical Industry*, 2007, 10(5):13-15.
- [20] 戴卉,等.石河子大学学报:自科版,2014,32(6):677-682.
Dai Hui, et al. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2014, 32(6):677-682.
- [21] Li X, et al. *Catalysts*, 2017, 7(11):311-324.
- [22] Wang B, et al. *Organometallics*, 2017, 36(3):523-529.
- [23] 赵璞君,等.分子催化,2014,28(3):259-267.
Zhao Pujun, et al. *Journal of Molecular Catalysis*, 2014, 28(3):259-267.
- [24] 魏小波,等.过程工程学报,2008,8(6):1 218-1 222.
Wei Xiaobo, et al. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2008, 8(6):1 218-1 222.
- [25] Hu D, et al. *Rsc Advances*, 2017, 7(13):7 567-7 575.
- [26] Hu D, et al. *Chinese Chemical Letters*, 2018, 29(9):1 413-1 416.
- [27] 郭燕燕,等.应用化学,2014,31(5):624-626.
Guo Yanyan, et al. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2014, 31(5):624-626.
- [28] 赵文丽. Cu、Co和Fe基催化剂的乙炔氢氯化催化性能研究[D].石河子:石河子大学,2017.
Zhao Wenli. The catalytic performance study of Cu, Co and Fe based catalysts for acetylene hydrochlorination[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.
- [29] Zhao W L, et al. *Catalysis Communications*, 2017, 98:22-25.
- [30] Xu H, et al. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2017, 15(4):1 542-1 580.
- [31] Dai H, et al. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 2017, 50:72-78.
- [32] Dai H, et al. *Catalysts*, 2017, 7(7):200-213.
- [33] Chao S, et al. *Sci Rep*, 2017, 7:39 789-39 796.
- [34] Li X, et al. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(7):4 913-4 926.
- [35] Li P, et al. *Acs Catalysis*, 2017, 7:8 572-8 577.
- [36] Dong X, et al. *Journal of Catalysis*, 2018, 359:161-170.
- [37] Lin R, et al. *Acs Catalysis*, 2018, 8(2):1 114-1 121.
- [38] 马宁,等.石河子大学学报:自科版,2013,31(3):377-381.
Ma Ning, et al. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2013, 31(3):377-381.
- [39] Jia Y, et al. *Journal of Catalysis*, 2017, 348:223-232.
- [40] 胡静逸,等.化学反应工程与工艺,2016,32(3):231-236.
Hu Jingyi, et al. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2016, 32(3):231-236.
- [41] Zhao J, et al. *Applied Catalysis B Environmental*, 2017, 206:175-183.
- [42] Xu H, et al. *Catalysis Science & Technology*, 2018, 8(4):1 176-1 182.
- [43] Shang S, et al. *Acs Catalysis*, 2017, 7(5):3 510-3 520.
- [44] Yang L, et al. *Aiche Journal*, 2018, 64(7):2 536-2 544.
- [45] 赵飞.纳米碳催化乙炔氢氯化反应机理的DFT研究[D].石河子:石河子大学,2017.
Zhao Fei. A DFT study of the mechanism of nanocarbon catalyze for acetylene hydrochlorination reaction[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.

(上接第147页)

- [26] Xu Yunsheng, et al. *Composite Interfaces*, 2000, 7(4):243-256.
- [27] Huang Xingyi, et al. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(25):13 629-13 639.
- [28] Zhou Yongcun, et al. *Scientific Reports*, 2014, doi:10.1038 /srep04779
- [29] Wahab Z, et al. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology*, 2017, 7(2):165-177.
- [30] 肖彬,等. CN105086740A.2015-11-25.
Xiao Bin, et al. CN105086740A.2015-11-25.
- [31] Rivière L, et al. *European Polymer Journal*, 2016, 85:115-125.
- [32] Wang Nannan, et al. *RSC Advances*, 2017, 7:35 265-35 273.
- [33] 苏亚男,等.新型炭材料,2017,32(2):152-159.
Su Yanan, et al. *New Carbon Materials*, 2017, 32(2):152-159.
- [34] 刘浏.石墨烯对碳纤维增强聚醚醚酮复合材料性能的影响[D].长春:长春工业大学,2016.
Liu Liu. Effect of graphene on the carbon fiber reinforced poly(ether ether ketone) composites[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2016.
- [35] 孙诗良,等.塑料科技,2015,43(5):52-55.
Sun Shiliang, et al. *Plastics Science and Technology*, 2015, 43(5):52-55.
- [36] 侯天武,等. CN107459770A.2017-12-12.
Hou Tianwu, et al. CN107459770A.2017-12-12.