

聚醚醚酮材料改性、加工与应用

王新宇, 阮诗伦, 常保宁, 林卜阳, 方海东
(大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要: 聚醚醚酮(PEEK)及其复合材料在航空、汽车、医疗等领域具有很大的应用市场。通过增强改性,聚醚醚酮材料力学、热学等性能得到了很好提升,利用熔融挤出机、注塑成型机以及3D打印机等成型装备,将聚醚醚酮及其复合材料制备成不同类型的产品,以适用不同领域的材料需求。从聚醚醚酮的改性方法、制品成型制备以及主要应用领域3个方面,简要介绍了近些年国内外学者的研究工作与研究重点。

关键词: 聚醚醚酮; 改性; 成型加工; 性能研究

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.01.005

中图分类号: TQ320.66

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2016)01-0027-05

Material Modification, Processing and Application of PEEK

WANG Xin-yu, RUAN Shi-lun, CHANG Bao-ning, LIN Bu-yang, FANG Hai-dong
(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: PEEK and the relevant composites are widely used in aerospace, automotive and medical field due to the perfect performances in thermal, mechanical and other properties. Properties of PEEK can be greatly improved by reinforced modification with inorganic particles, glass fiber, carbon fiber etc. The PEEK and reinforced composites can be processed into different products by extrusion, injection molding and 3D printing, and applied in many engineering fields. This paper mainly reviews the recent investigations of researchers in China and abroad from three aspects which include reinforced modification, processing and application on PEEK.

KEY WORDS: PEEK; material modification; molding and processing; performance investigation

聚醚醚酮(poly-ether-ether-ketone, PEEK)塑料是一种半结晶性、热塑性芳香族高分子材料,是聚芳醚酮(PAEK)中最为重要的一种特种工程塑料。

PEEK具有很多优异的性能,如耐高温性、耐摩擦性、尺寸稳定性、生物相容性等。用玻纤(GF)、碳纤维(CF)等材料增强的PEEK复合材料,力学性能会得到很好地提升,因此,PEEK材料被广泛地应用到了航空航天、汽车、医疗等领域。

针对PEEK材料,国内外学者的研究重点主要可

以分为:PEEK材料改性及其性质研究、PEEK加工成型及其制品性能研究、以及PEEK及其复合材料的应用3个方面。

1 PEEK材料的改性

PEEK工程塑料性能优异,但在一些极端苛刻条件下,PEEK材料依然存在一定的使用局限性,因此,对PEEK材料的改性一直是高分子材料工作者研究

收稿日期: 2015-09-20

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(11432003);中央高校基本科研业务费专项资金资助(DUT15ZD112)

作者简介: 王新宇(1986—)男,吉林人,博士生,主要研究方向为注塑成形工艺优化。

通讯作者: 阮诗伦(1976—)男,江西人,博士,副教授,主要研究方向为高分子复合材料与制造工艺力学。

的重点。

1.1 纤维增强PEEK复合材料

大量文献研究发现,利用玻纤(GF)、碳纳米管(CNT)、碳纤(CF)增强的PEEK复合材料,力学、热学等性能有显著提高^[1-3]。例如:Sharma等人^[4]利用液氮等离子体处理碳纤维,增强了碳纤与PEEK基体之间的结合力,进而提升了CF/PEEK复合材料的抗摩擦性;崔永丽等人^[5]对CF/PEEK复合材料的摩擦性能进行了实验研究,结果发现CF/PEEK复合材料的磨损量在碳纤含量为5%时最好。

1.2 颗粒增强PEEK复合材料

Mishra等人^[6]利用纳米级氧化锆与PEEK材料进行复合,并对其拉伸强度、抗拉模量、抗弯强度等性能进行了分析,发现随着氧化锆含量的增加,PEEK复合材料的力学性能随之增强,但是在氧化锆含量为3%左右时达到稳定。Kuo等人^[7]将SiO₂和Al₂O₃颗粒参杂到PEEK基体中,研究了不同含量的颗粒对复合材料力学强度、材料硬度的增强效果,其中5.0%~7.5%的颗粒含量下,力学强度增强效果最好。

1.3 其他改性方法

除了纤维和颗粒增强改性以外,Yang等人^[8]将石墨烯与PEEK材料进行复合,成功地提升了PEEK的热学和力学性能。此外,还有大量工作者将PEEK与PEI, PES, TLCP等材料进行了共混改性^[9-11]。

2 PEEK材料的成型加工

2.1 PEEK纤维

英国ZYEX公司于20世纪80年代就已经开始PEEK纤维的生产开发,产品主要包括单丝、复丝、中空PEEK纤维等。美国ZEUS公司于2009年发布了商品化的PEEK单丝与复丝产品,其PEEK纤维具有优良的机械性能和耐腐蚀、耐高温性能。

PEEK材料属于大分子材料,其微观结构形态对宏观性质有着非常大的影响。PEEK材料又属于半结晶型高分子材料。分子取向程度决定了纤维的拉伸强度。晶区的存在可以提升纤维的模量,但是会损失纤维的韧性。分子的取向和晶区的分布与拉伸成型工艺密不可分。Ouellette与Gilbert^[12]对熔融挤出、退火处理以及热拉成型PEEK纤维的微观结构、力学性

质等做了详细的分析。研究结果指出,初丝制备之后的加工方式将对纤维的晶体结构、力学强度、热学性质有很大的影响。例如,热拉成型的纤维,其晶体取向程度最高,屈服应力和拉伸强度最好,但是韧性不如熔融挤出制备的纤维,如图1所示。

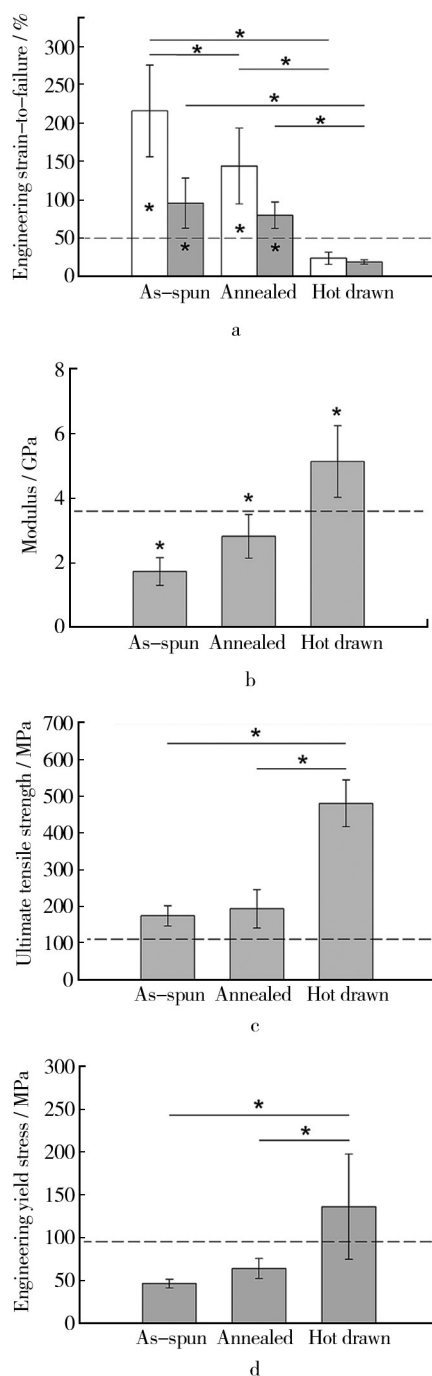


图1 初丝、退火处理和热拉纤维力学性能

Fig.1 Mechanical properties of as-spun, annealed and hot drawn fiber

国内天津工业大学、四川大学、华南理工大学以及吉林大学等单位对PEEK纤维的制备,有非常系统的研究。研究的重点主要集中在PEEK及其复合材

料纤维结构与性能表征,以及制备工艺对纤维性能的影响。例如,于建明及其研究团队^[13-14],采用自制的柱塞式熔融挤出机制备了PEEK纤维,并对PEEK纤维在160~280℃的温度范围内进行热定型处理^[15]。实验结果表明,热定型工艺能够改变PEEK纤维的微观分子和晶区取向,提升纤维的力学强度和耐热性能。胡安等人^[16]利用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射仪、差示扫描量热仪等设备对PEEK纤维的微观结构形态进行了观测分析,并研究了松弛定型比、热定型工艺和热处理工艺对纤维力学断裂强度、耐热老化等性能的影响。

2.2 PEEK薄膜

现有研究文献表明,PEEK薄膜较其他高分子薄膜有很好的力学强度,通过优化制备工艺,可以很好地提升薄膜的力学性能。例如,邢丹敏及其研究团队^[17]利用浓硫酸磺化法制备了聚醚醚酮质子交换膜,其力学强度高于Nafion 115膜,但是由于磺酸基团连接在苯环上,水解程度较差,导致其导电性能不如Nafion 115膜。Li等人^[18]用熔融挤出拉伸法制备了PEEK薄膜,分析了成型工艺对薄膜拉伸强度的影响,并利用优化后的拉膜工艺制备了拉伸强度为333 MPa的PEEK薄膜。

2.3 PEEK材料的注塑成型

注塑成型加工方式可以生产复杂结构的塑料制品,通过更换成型模具,可以实现不同产品的生产,具有自动化程度高、生产效率高等特点,是现代制造业不可或缺的制造加工方法。PEEK熔体具有很高的黏度特性,可以利用注塑成型的加工方式进行产品的生产,且产品的力学性能优于其他成型方式。例如,王全兵等人^[19]通过对比冷压烧结、高温模压和注塑成型3种加工方式得到了PEEK制品的拉伸强度和压缩强度,发现由注塑成型方式得到的制品,其力学强度和耐磨性最好;但是,如果成型工艺不合理,极易导致PEEK制品充填不足,发生短射,影响成型质量。现有的文献主要从实验分析的角度,研究了成型工艺条件对PEEK及其复合材料的力学性能方面的影响。

注塑成型工艺条件能够诱导PEEK材料微观分子取向和晶体生长。规则的分子取向、适当的晶体大小以及均匀的晶体分布,可以提升PEEK制品成型后的力学性能。注射速率、熔体温度、模具温度成型工艺条件是决定制品成型后力学性能的重要因素。吴新明等人^[20]研究了成型温度、成型压力等工艺条件对

长玻纤增强的PEEK复合材料的力学性能的影响(如图2所示),指出成型条件诱导的不同程度的结晶,是影响PEEK拉伸强度和剪切强度的主要原因,而PEEK晶体的大小与分布是决定其拉伸强度和剪切强度的主要因素。程芳伟等人^[21]研究了注塑成型条件对六钛酸钾晶须(PTW)/PEEK复合材料拉伸、弯曲强度的影响。结果表明,不同的熔体温度决定了PTW和PEEK之间的结合强度、PEEK晶体的生长与分布情况,进而影响了PTW/PEEK复合材料的拉伸和弯曲强度,以及制品的表面质量。Rego等人^[22]用双螺杆挤出机和注塑成型机制备了PEEK和含量为10%的羟磷灰石复合材料,通过热处理的方式提高注塑成型后材料的结晶度,并且详细地分析了成型后材料的微观结构、拉伸强度、冲击强度以及脂肪干细胞的粘附情况,指出10%的羟磷灰石没有降低PEEK的抗冲击性能;但是,由于羟磷灰石的存在,细胞的分裂生长明显优于纯PEEK材料,可以很好地用于制备医用材料。

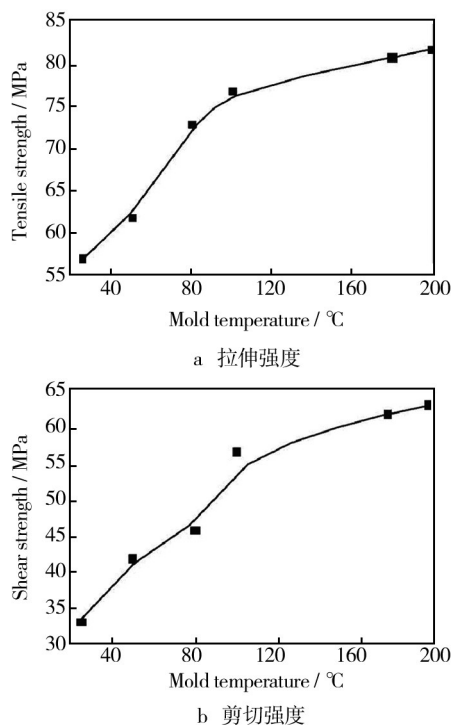


图2 模具温度对拉伸强度和剪切强度的影响

Fig.2 Effect of mold temperature on tensile strength and shear strength

此外,Feng等人^[23]利用Taguchi和BP神经网络方法对注塑成型工艺条件进行了分析与优化,选取最优的成型条件提升了PEEK螺栓的抗拉强度和抗扭强度。Zhang等人^[24]将注塑模具嵌件表面添加CrN涂层,对带有微米级圆柱形阵列微结构PEEK制品的表面进行了研究,发现添加涂层的PEEK制品能够得到

较好的成型表面。

2.4 PEEK材料的3D打印成型

3D打印技术是制造业的一次技术革新。利用3D打印技术不仅可以实现复杂制品的加工制造,而且可以根据用户需求进行个性化、个人化的产品定制。PEEK的玻璃化转变温度在145℃左右,成型温度通常在390℃左右,甚至更高,这使得PEEK材料通过3D机器进行产品的加工制造,具有非常高的工艺要求。

针对这一成型特点,赵帝^[25]利用自主研发的3D打印设备,解决了PEEK的3D打印成型,并对打印的PEEK试样进行了实验测试,结果表明3D打印的PEEK材料强度低于注塑成型得到的材料强度。此外,Wu等人^[26]分析了打印层厚度和打印角度对PEEK材料的拉伸、弯曲和压缩强度的影响,如表1所示。可以发现,PEEK材料力学强度与打印层和打印角呈一定的非线性关系,其中,力学强度在打印层厚度为300 μm时最高,在打印角度为0°/90°时最高。

表1 不同打印层和打印角的力学性质的影响

Table 1 Mechanical properties in different layer thickness and different raster angels

因素		拉伸强度	弯曲强度	压缩强度
		/MPa	/MPa	/MPa
打印层厚度/ μm	200	40.1	52.1	53.6
	300	56.6	56.1	60.9
	400	32.4	48.7	54.1
打印层角度/(°)	0/90	56.6	56.1	
	30/-60	41.8	48.5	
	45/-45	43.3	43.2	

3 PEEK材料的应用

3.1 机械工业领域

PEEK材料具有密度小、力学强度高、耐摩擦性能优异等特性,大量的汽车、航空航天零部件材料(如阀片、船舰泵体等^[27])正逐步被PEEK等工程特种塑料所取代。

3.2 医疗领域

PEEK材料具有很好的生物相容性,对生物体无毒性、无致癌性,因此被广泛地应用到现代医学中。例如,詹碧水等人^[28]从临床的角度研究了PEEK材料制备的椎间融合器,在颈椎病临床实践中的治疗效

果,通过长期的临床观察,PEEK椎间融合器能够很好地改善病人的脊椎病变,维持病人正常的生理功能。Nakahara等人^[29]将碳纤维增强PEEK材料用以制备大腿骨骨干,分析了PEEK复合材料人造骨头的力学强度,为股骨头患者更换人造骨头提供了十分重要的研究依据。

3.3 其他领域

PEEK材料在极广的温度范围可以呈现出良好的绝缘性能,因此PEEK材料已被用于制备极端环境条件下的电缆材料^[30]。

4 结语

特种工程塑料PEEK及其复合材料具有许多优良的热学、力学、电学特性,并且具有很好的生物相容性,在国家航空、航天、汽车、深海、医疗、电气等领域拥有非常大的应用前景。研究PEEK及其复合材料的性质、加工方式以及材料性能的成型预测方法,对其实际应用具有非常重要的现实意义。

参考文献:

- [1] WERNER P, ALTST DT V, JASKULKA R, et al. Tribological Behavior of Carbon-Nanofibre-Reinforced Poly (Ether Ketone)[J]. Wear, 2004, 257: 1006—1014.
- [2] 邓杰,李辅安,刘建超. 玻璃纤维增强PEEK复合材料成型工艺研究[J]. 高科技纤维与应用, 2004, 29(3): 28—31.
- [3] DENG Jie, LI Fu-an, LIU Jian-chao. Studies of the Processing Conditions of Glass Fiber Reinforced PEEK Composites [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2004, 29(3): 28—31.
- [4] 王志,雷卓研,张晓玲,等. 聚醚醚酮/多壁碳纳米管复合材料力学及阻燃性能研究[J]. 中国塑料, 2014, 28(11): 42—46.
- [5] WANG Zhi, LEI Zhuo-yan, ZHANG Xiao-ling, et al. Mechanical and Flame Retardant Properties of PEEK/MWCNT Composites[J]. China Plastics, 2014, 28(11): 42—46.
- [6] SHARMA M, BIJWE J, MADER E, et al. Strengthening of CF/PEEK Interface to Improve the Tribological Performance in Low Amplitude Oscillating Wear Mode[J]. Wear, 2013, 301: 735—739.
- [7] 崔永丽,江利,史月丽,等. 碳纤维增强PEEK复合材料的摩擦学性能研究[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(10): 5—8.
- [8] CUI Yong-li, JIANG Li, SHI Yue-li, et al. Study on the Tribological Property of Carbon Fiber Reinforced Polyetheretherketone Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(10): 5—8.
- [9] MISHRA T K, KUMAR A, VERMA V, et al. PEEK Compos-

- ites Reinforced with Zirconia Nan Filler[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72: 1627—1631.
- [7] KUO M C, TSAI C M, HUANG J C, et al. PEEK Composites Reinforced by Nano-sized SiO_2 and Al_2O_3 Particulates[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 90: 185—195.
- [8] YANG L L, ZHANG S L, CHEN Z, et al. Design and Preparation of Graphene/Poly (Ether Ether Ketone) Composites with Excellent Electrical Conductivity[J]. Journal of Materials Science, 2014, 49: 2372—2382.
- [9] GENSLER R, B?GUELIN P H, PLUMMER C J G, et al. Tensile Behavior and Fracture Toughness of Poly (Ether Ether Ketone)/Poly(Ether Imide)Blends[J]. Polymer Bulletin, 1996, 37: 111—118.
- [10] NANDAN B, KANDPAL L D, MATHUR G N. Poly (Ether Ether Ketone)/Poly (Aryl Ether Sulfone) Blends: Relationships between Morphology and Mechanical Properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90: 2887—2905.
- [11] NAFFAKH M, GOMEZ M A, ELLIS G, et al. Isothermal Crystallization Kinetics of PEEK/Vectra Blends by DSC and Time-Resolved Synchrotron X-Ray Diffraction[J]. Polymer Engineering and Science, 2006, 46(10): 1411—1418.
- [12] OUELLETTE E S, GILBERT J L. Production and Characterization of Melt Spun Poly(Ether Ether Ketone)Fibers for Bio-medical Applications[J]. Polymer, 2015, 63: 10—18.
- [13] 于建明, 边栋材, 周晓峰, 等. 聚醚醚酮纤维研制[J]. 纺织学报, 1995(5): 260—263.
- YU Jian-ming, BIAN Dong-cai, ZHOU Xiao-feng, et al. Preparation of Poly (Ether Ether Ketone) Fibres[J]. Journal of Textile Research, 1995(5): 260—263.
- [14] 于建明, 边栋材, 周晓峰. 聚醚醚酮(PEEK)纤维牵伸工艺研究[J]. 天津纺织工学院学报, 1996, 15(1): 23—27.
- YU Jian-ming, BIAN Dong-cai, ZHOU Xiao-feng. Studies on Drawing Processing of PEEK Filaments[J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 1996, 15(1): 23—27.
- [15] 于建明, 边栋材, 周晓峰, 等. 热定型对PEEK纤维性能影响[J]. 高分子材料科学与工程, 1997(13): 106—109.
- YU Jian-ming, BIAN Dong-cai, ZHOU Xiao-feng, et al. The Effects of Heat-set Process on the Properties of PEEK Fibers[J]. Polymeric Materials Science & Engineering, 1997(13): 106—109.
- [16] 胡安, 刘鹏清, 徐建军, 等. 聚醚醚酮纤维的结构与性能[J]. 合成纤维工业, 2009, 32(6): 14—17.
- HU An, LIU Peng-qing, XU Jian-jun, et al. Structure and Properties of Poly-Ether-Ether-Ketone Fiber[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2009, 32(6): 14—17.
- [17] 邢丹敏, 付永柱, 刘富强, 等. 燃料电池用磺化聚醚醚酮质子交换膜的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(3): 282—285.
- XING Dan-min, FU Yong-zhu, LIU Fu-qiang, et al. Sulfonated Poly (Ether Ether Ketone) Membranes for Proton Exchange Fuel Cell[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2005, 21(3): 282—285.
- [18] LI W L, WANG G B, JIANG Z H, et al. Preparation and Characterization of High-strength Poly (Ether Ether Ketone) Films[J]. Applied Polymer, 2014, 131(9): 40172—40178.
- [19] 王全兵, 张志军, 刘爱学, 等. 高承载耐磨PEEK复合材料配方与制备工艺研究[J]. 塑料工业, 2013, 41(1): 116—119.
- WANG Quan-bing, ZHANG Zhi-jun, LIU Ai-xue, et al. Study on Formula and Forming Process of High Bearing and Wear-Resisting PEEK Composite[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(1): 116—119.
- [20] 吴新明, 齐暑华, 贺捷, 等. 长玻纤增强注塑聚醚醚酮复合材料加工工艺与力学性能的研究[J]. 航空材料学报, 2009, 26(6): 98—101.
- WU Xin-ming, QI Shu-hua, HE Jie, et al. Processing Conditions and Mechanical Property of Long Glass Fiber Reinforced Injection-Moulded PEEK Composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 26(6): 98—101.
- [21] 程芳伟, 姜其斌, 张志军, 等. 注塑工艺对PTW/PEEK制品力学性能的影响[J]. 塑料工业, 2014, 42(10): 68—71.
- CHENG Fang-wei, JIANG Qi-bin, ZHANG Zhi-jun, et al. Effect of Injection Molding Process on Mechanical Properties of PTW/PEEK Products[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(10): 68—71.
- [22] REGO B T, NETO W A R, PAULA A C C, et al. Mechanical Properties and Stem Cell Adhesion of Injection-molded Poly (Ether Ether Ketone) and Hydroxyapatite Nan Composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(14): 41748—41761.
- [23] FENG C, KUO J, SU T, et al. Construction and Analysis in Combining the Taguchi Method and Back Propagation Neural Network in the PEEK Injection Molding Process[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2007, 46: 841—848.
- [24] ZHANG Y, HANSEN H N, SORENSEN S. Replication of Micro-Pillars by PEEK Injection Molding with CrN-Coated Ni Tool[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(1—4): 383—388.
- [25] 赵帝. 仿生人工骨3D打印流场分析及试件力学性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- ZHAO Di. The Fluid Analysis of Biological Artificial Bone Manufactured by 3D Printing and the Mechanical Property Study of Printing Parts[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [26] WU W Z, GENG P, LI G W, et al. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of

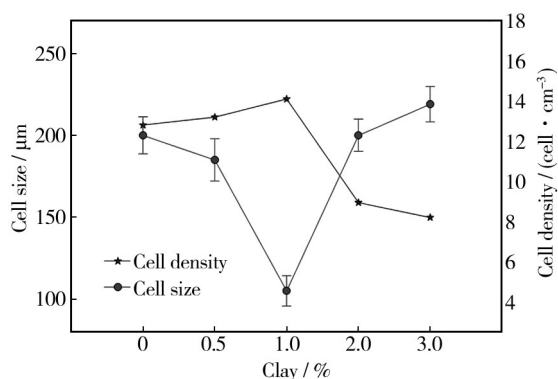


图12 气泡大小与密度的关系

Fig.12 The relation between cells' size and density

3 结论

1) 机械性能(拉伸与冲击)测试结果表明,当选择较大的纳米颗粒($35\mu\text{m}$)与较高的混炼螺杆转速(100 r/min)时,其机械性能最优,这代表大的纳米颗粒与高的混炼螺杆转速皆可使纳米黏土更均匀地分散。

2) 在机械性能(拉伸与磨耗)测试结果发现,在蒙托土含量为1.0%时,其性能是最好的,这是因为纳米黏土能均匀地分散在高分子基材中,故能提高其机械性能,但含量超过2.0%后,性能开始下降,这可能是由于过多的黏土,造成团聚现象所引起的。

3) 在传统注射与微细发泡注射的比较中,可以发现加入发泡工艺后,其拉伸性能会略为下降23%,但冲击强度却可提高达18%,可以运用于一些硬脆材料上以提高韧性,使其不易发生脆裂。

4) 在热性能方面,证明添加蒙脱土确实能提高材料的熔点(T_m),这是因为蒙脱土会限制住分子的移动,造成熔点温度的上升。

5) 在纳米层间距(XRD与TEM)方面,得知双螺杆挤出可以有效地撑开高分子的层间距使纳米黏土

能插入其中,并可让原本的高分子基材转变为插层型纳米复合材料,提升材料性能。

6) 在微结构方面,观测气泡尺寸可以得知添加蒙脱土可有效地提升气泡密度,降低大气泡的发生机率,但添加过量的蒙脱土反而会造成团聚现象,使其性能下降,这点需要注意。另外也可从微结构来判断拉伸与耐磨耗试验的准确性,因为气泡越密集,材料的刚性就越大,拉伸与耐磨耗的性能就会越好。

参考文献:

- [1] COLTON J S, SUH N P. Nucleation of Microcellular Foam: Theory and Practice[J]. Polymer Engineering and Science, 1987, 27(7): 500.
 - [2] V MARTINI J E, SUH N P, WALDMAN F A. Microcellular Closed Cell Foams and their Method of Manufacture, U.S. Patent, 4,473[P]. 1984.
 - [3] KELVIN T, OKAMOTO. Microcellular Processing[M]. Hanser Gardner Publications, Inc, Cincinnati, 2003.
 - [4] WANG Z, PINNAVAIA T. Nandayer Polyurethane[J]. Chem Mater, 1998, 10: 3769.
 - [5] GILMAN J W, JACKSON C L, MORGAN A B, et al. [J]. Chem Mater, 2000, 12: 1866.
 - [6] 李泽昌. 短玻璃纤维增强聚丁烯对苯二甲酸酯复合材料之磨耗性质研究[D]. 中央大学, 2002: 84—87.
 - [7] 蔡文伟. PBT/GF注射成型制程优化及挫屈特性研究[D]. 中央大学, 2002: 38—42.
 - [8] CHISHOLM B J, MOORE R B, BARBER G, et al. [J]. Macromolecules, 2002, 35(14): 5508.
 - [9] ZENG C, HAN X, LEE L J, et al. Structure of Nanocomposite Foams[J]. SPE ANTEC Tech Papers, 2002, 60(2): 1504.
 - [10] YUAN Ming-jun, TURNG Lih-Sheng, GONG Shao-qin, et al. Study of Injection Molded Microcellular Polyamide-6 Nanocomposites[J]. Polymer Engineering and Science, 2000, 44(4): 673—686.
-
- (上接第31页)
- 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS[J]. Materials, 2015, 8(9): 5834—5846.
- [27] 班玉红, 吴兆山, 孔建, 等. 聚醚醚酮复合材料的性能及在通用机械中的应用[J]. 流体机械, 2009, 37(5): 43—45.
- BAN Yu-hong, WU Zhao-shan, KONG Jian, et al. Performance and Application in General Machinery of PEEK Composites[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(5): 43—45.
- [28] 詹碧水, 蒋雪生, 姬亚峰, 等. 颈椎自锁PEEK椎间融合器在颈椎病治疗中的应用[J]. 临床骨科杂志, 2012, 15(1): 7—9.
- ZHAN Bi-shui, JIANG Xue-sheng, JI Ya-feng, et al. Self-Locking PEEK Cage of Cervical Vertebra for Cervical Myelopathy[J]. Journal of Clinical Orthopedics, 2012, 15(1): 7—9.
- [29] NAKAHARA I, TAKAO M, BANDO S, et al. Fixation Strength of Taper Connection at Head-Neck Junction in Retrieved Carbon Fiber-Reinforced PEEK Hip Stems[J]. Journal of Artificial Organs, 2014, 17: 358—363.
- [30] 闫春子, 关鹏. 聚醚醚酮在电缆上的应用[J]. 电线电缆, 2013(4): 16—18.
- YAN Chun-zi, GUAN Peng. Application of PEEK in Cables [J]. Electric Wire & Cable, 2013(4): 16—18.