

纳米改性沥青材料研究进展

金大中¹ 钱国平^{1,2*} 白献萍¹

(1.长沙理工大学交通运输工程学院,长沙 410114;

2.公路养护技术国家工程实验室,长沙 410114)

摘 要 介绍了纳米改性沥青技术进展,分析评价了各种纳米材料对沥青及沥青混合料性能的影响,指出了目前纳米改性沥青技术存在的问题。为提高改性沥青的性能,应综合分析影响纳米改性沥青性能的因素,并对改性效果进行定量评价,为全面评价道路沥青的经济效益、环境效益等提供理论参考。

关键词 纳米材料,改性沥青,改性机理,混合料,性能

Progress in nano modified asphalt material

Jin Dazhong¹ Qian Guoping^{1,2} Bai Xianping¹

(1.School of Traffic and Transportation Engineering,Changsha University of Science & Technology,Changsha 410114;2.National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Technology,Changsha 410114)

Abstract The development of the nanotechnology modification of asphalt was expounded,the influences of modifiers on asphalt and asphalt mixture were analyzed and evaluated,the existing problems of the nano-modified asphalt technology were pointed out.The factors affecting the performance of nano-modified asphalt should be analyzed comprehensively,and the modification effect should be evaluated quantitatively in order to improve the performance of modified asphalt. Therefore, it provided a theoretical reference for comprehensive evaluation of the economic and environmental benefits of paving asphalt.

Key words nanomaterial,modified asphalt,mechanism,asphalt mixture,performance

纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺寸范围(1~100nm)或由其作为基本单元构成的材料^[1]。由于纳米材料的尺寸接近电子的相干长度,其性质因强相干带来的自组织而发生很大变化,并且纳米材料特有的量子尺寸效应、体积效应、表面效应等特殊效应,使其熔点、光学、塑性形变等发生根本性变化^[2]。

基于纳米材料特殊的性能,使用纳米材料对基质沥青进行改性,可从微观尺度上改善沥青性能。研究证明,添加纳米材料可以显著提高沥青材料的粘弹性、高温性能、抗老化、耐疲劳性能以及抗水分损害等性能^[3],解决沥青路面在高温、低温、降雨等环境条件下产生的车辙、开裂、松散等病害,保证路面使用性能,同时延长道路使用寿命。但由于不同种类的改性材料和不同的掺量对沥青以及沥青混合

料的性能影响不同,加之对改性剂的改性效果没有整体的认识,因此在工程实践中难以选择适宜的沥青改性材料。基于此,笔者介绍了常用沥青改性纳米材料的性能,为全面评价道路沥青的经济效益、环境效益奠定基础。

1 纳米改性沥青技术概述

纳米材料特殊的物理、化学性质以及功能,使其得到越来越广泛的应用。目前纳米复合技术已广泛应用于交通、土木工程以及水利工程等领域。在交通运输工程领域,纳米复合技术常用于对沥青进行改性,此技术是通过各种手段将纳米材料添加到沥青中,应用纳米材料特殊的效应来改善沥青的性能,提高沥青路面的使用性能,以满足交通运输行业发展的需要。

基金项目:国家自然科学基金(51778071)

作者简介:金大中(1990-),男,硕士研究生,研究方向为道路结构与材料。

联系人:钱国平(1975-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事道路结构与材料、工程力学、交通环保等研究工作。

2006 年在美国召开的“胶结料纳米改性技术研讨会”上,瑞典材料测试与研究联合实验室人员提出了纳米改性技术在沥青胶结料上应用的理念^[4]。研讨会上 Steyn 教授详细介绍了纳米技术在交通运输工程领域及其基础研究中的应用,并指出了多种纳米材料在改善沥青材料性能、提高其功能等方面的作用,总结了纳米材料在道路安全性、耐久性、经济性、环境友好等方面的应用优势^[5]。之后,国内外专家学者对纳米改性沥青技术进行了大量研究,目前常用于对沥青改性的材料主要有:纳米 TiO_2 、纳米 ZnO 、纳米苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)、纳米聚苯乙烯丁二烯共聚物(SBR)及纳米复合材料。

2 单一纳米材料改性沥青

普通沥青的性能具有一定的局限性,为满足交通运输行业发展的需要,研究人员通过在基质沥青中添加纳米材料来改善其性能,同时赋予沥青一些特殊的性能,使其功能化^[6]。根据大比表面积粒子与沥青物理混合的原理,研究人员采用纳米 TiO_2 对沥青进行改性,通过高速剪切法制备了纳米 TiO_2 改性沥青。结果表明:适量的纳米 TiO_2 可改善沥青的高低温性能和抗氧化性能,同时纳米 TiO_2 对紫外光具有独特的屏蔽作用,纳米 TiO_2 改性沥青的抗紫外光老化性能显著提高;纳米 TiO_2 改性沥青混合料的抗车辙性能、抗疲劳性能以及低温抗弯拉应变能力均优于普通沥青混合料^[7-12]。

根据粒子与沥青间的物理化学作用以及范德华力^[13-14]、 ZnO 粒子与沥青之间形成化学键的原理^[15],研究人员利用高速剪切或母液熔融的方法制备了纳米 ZnO 改性沥青,并进行了相关实验。结果表明:与基质沥青相比,掺加适量纳米 ZnO 的改性沥青其高低温性能、黏度、软化点、抗疲劳性能以及抗紫外老化性能均得到明显改善;纳米 ZnO 改性沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、防水性能以及抗永久变形能力均显著提高。

纳米 SiO_2 可与其他材料的分子结合,形成立体网状结构,相互融合;纳米 SiO_2 可以改变基体内部的应力分布,改善基体的热稳定、抗水损害等性能^[16-20]。将纳米 SiO_2 与基质沥青共混,在高速剪切作用下可制备纳米 SiO_2 改性沥青。结果表明:一定量的纳米 SiO_2 可改善沥青的流变性能,增强混合料的强度、高温稳定性、抗车辙性、耐疲劳性以及防水性能。根据实验结果综合考虑,改性沥青中纳米

SiO_2 最佳掺量为 5%(wt,质量分数,下同)。

根据纳米层状硅酸盐可与沥青形成嵌入结构、剥离结构、插层/剥离型结构的原理,研究人员通过高速剪切或母液熔融的方法制备了纳米黏土和纳米蒙脱土改性沥青并进行了系列实验^[21-29]。结果表明:一定量的纳米黏土可改善沥青的黏度和流变性能,增强混合料的低温抗裂性、抗水损害以及抗车辙性能;当纳米黏土掺量为 2%(质量分数)时,改性沥青综合性能最佳。纳米蒙脱土可改善沥青的流变性能、抗老化性能以及热稳定性,提高混合料的低温抗裂性能、抗车辙性能及防水性能。

碳纳米管具有较高的模量、强度和硬度,良好的柔韧性,高比表面能,大长径比等优良性能^[30]。根据纤维网络结构与沥青相融的物理原理,通过高速剪切或母液熔融的方法可制备碳纳米管改性沥青。结果表明:碳纳米管可显著改善沥青的高低温性能、流变性能,降低沥青的温度敏感性,提高混合料抗车辙、抗疲劳性能,延长路面使用寿命^[31-33]。

杨海霞^[34]、张敏江等^[35]根据 SBR 微粒吸收沥青中的饱和分、芳香分和蜡后发生溶胀,并将饱和分、芳香分吸附于其表面形成胶粒作为分散相,以饱和分和芳香分作为分散介质,胶溶于沥青的原理,通过高速剪切法制备了 SBR 改性沥青。结果表明:用于改性沥青的聚合物 SBR 最佳掺量一般为 4%。在此掺量下,沥青的高低温性能最佳,温度敏感性最低;混合料的低温性能、抗车辙性能以及疲劳寿命均得到显著改善。

SBS 是一种最常见的沥青改性剂,在沥青中饱和分和芳香分的作用下 SBS 微粒发生溶胀,与沥青中有机官能团发生化学反应,生成新的化学键^[36-38]。张华等^[36]通过高速剪切的方法制备了 SBS 改性沥青并对其性能进行研究。结果表明:SBS 微粒在沥青中最佳掺量一般为 5%(质量分数)左右,在此掺量下可以提高沥青的黏度、软化点,增强沥青高低温性能以及抗老化性能。

纳米碳酸钙(CaCO_3)粒子的量子尺寸效应、表面效应、体积效应等可促进纳米粒子与其他分子间形成较强的范德华力,并形成稳定体系。马峰^[39]通过高速剪切法制备了纳米 CaCO_3 改性沥青。结果表明:一定掺量的纳米 CaCO_3 粒子可提高沥青黏度、抗老化性能,增强混合料的抗车辙性能,延长疲劳寿命,其最佳掺量一般为 5%(质量分数)左右。

碳纳米纤维作为一种典型的纳米改性纤维,具有高模量、高拉伸强度以及大比表面积等优性能。

其纤维网络结构可与沥青物理相融,进而影响沥青的性能^[40-42]。Mohammad 等^[43-44]通过高速剪切法制备了碳纳米纤维改性沥青并对其性能进行研究。结果表明:碳纳米纤维可提高沥青的粘弹性,同时可增强混合料的刚度和抗车辙性能,延长其使用寿命;碳纳米纤维最佳掺量一般为 5.5%(质量分数)。

3 复合纳米材料改性沥青

单一纳米材料能够在一定程度上改善沥青的性能,赋予普通沥青特殊性能,但是单一纳米材料改性沥青有其局限性^[45]。为进一步提高沥青的综合性能,研究人员通过采用多种纳米材料对沥青进行改性,以获得性能更优的改性沥青。

肖鹏等^[46]、Zhang 等^[47]对纳米 ZnO/SBS 改性沥青微观结构、共混机理以及改性沥青(混合料)的性能进行了研究。研究表明:在纳米 ZnO/SBS 改性沥青中,SBS 吸附在 ZnO 表面,降低了自由能;ZnO 有效改善了 SBS 在沥青中的分散效果与稳定性,进一步优化了改性沥青的综合性能。改性沥青的高温、低温以及抗老化等性能均得到明显提高;混合料的抗车辙性能、抗开裂性能得到显著改善;当 ZnO、SBS 掺量均为 5%时,混合料综合性能最佳。

Mehmet 等^[48]通过研究发现,碳纳米管网络结构可与沥青物理相融,同时 SiO₂ 微粒在沥青中分散混溶。课题组通过高速剪切的方法制备了 SiO₂/碳纳米管改性沥青并对其性能进行研究。结果表明:SiO₂/碳纳米管改性剂的适宜掺量为 1.5% SiO₂+1.5% 碳纳米管,改性沥青抗老化性能可提高 8.45%;混合料的抗车辙性能可提高 10.12%,抗疲劳性能可提高 37.72%,抗水损害性能可提高 17.5%;在此掺量下 SiO₂/碳纳米管改性沥青综合性能最优。

研究发现,SBS 微粒在沥青中发生溶胀并与其物理共混,微粒与沥青中有机官能团发生化学反应,生成新的化学键;纳米 SiO₂ 在与沥青的共混中分散、相融^[49]。Sajad 等^[50]通过高速剪切的方法制备了纳米 SiO₂/SBS 改性沥青并对其性能进行研究。结果发现:一定量的纳米 SiO₂/SBS 可改善沥青及其混合料的性能,其掺量一般为 2% 纳米 SiO₂+5% SBS,该掺量下混合料的综合性能最好;与基质沥青混合料相比,改性沥青混合料的模量、强度以及防水性能均得到显著提升。

张洪亮课题组^[51-52]的研究表明,SBR 与沥青共混主要发生物理反应,纳米 CaCO₃ 与沥青之间发生

物理化学反应;纳米 CaCO₃ 可促进 SBR 在沥青中的分散,增强了与沥青的结合能力。利用高速剪切的方法制备了纳米 CaCO₃/SBR 改性沥青并对其性能进行了研究。结果表明:纳米 CaCO₃ 可改善 SBR 改性沥青的高温性能和流变性能;在掺量为 5% 纳米 CaCO₃+4% SBR 时,混合料抗车辙性能最佳,动稳定度提升了 38.2%。

研究发现,纳米蒙脱土可与沥青形成剥离型纳米复合结构,同时促进 SBS 在沥青中形成网络结构;此外,纳米蒙脱土可改善改性沥青的储存稳定性^[53-56]。刘超^[53]利用高速剪切的方法制备了纳米蒙脱土/SBS 改性沥青,并与基质沥青的性能进行对比。结果表明:在基体中掺杂适量的纳米蒙脱土/SBS,改性沥青的流变性能、低温抗裂性能可达到最佳状态,同时可增强其抗紫外老化性能。

4 结语与展望

纳米材料在改善沥青性能方面发挥了重要作用。纳米改性沥青的制备方法主要有 2 种:高速剪切和母液熔融。纳米材料因独特的纳米效应以及自身特殊的结构,使其在沥青中发生物理化学反应,形成各种结构,对沥青性能产生影响。通过力学、微观等分析发现,纳米材料对沥青以及混合料的性能均产生了有利影响,这为改善沥青路面路用性能、延长使用寿命指明了方向。目前,有关纳米改性沥青材料的研究较多,但仍有一些问题需要解决:

(1)影响纳米改性沥青性能的因素较多,主要有纳米粒子种类、含量、粒径、生产工艺等。目前对纳米粒子粒径的研究较少,需深入研究纳米粒子的粒径对改性沥青性能的影响。

(2)纳米材料改性沥青过程中,因聚合物吸收沥青中轻质组分而导致沥青和聚合物的性质发生改变,进而影响改性效果,因此需研究影响程度以及减轻负面影响的措施。

(3)纳米材料在沥青中均匀分散并能保持稳定是保证改性沥青使用性能的前提条件,目前无法评价纳米材料的分散效果,需建立定量评估体系来评价纳米粒子的分散程度。

参考文献

- [1] 黄彭,徐国财,张立德.纳米复合材料[M].北京:化学工业出版社,2002:65.
- [2] Li X,Zhan Z,Peng G,et al.A new method for preparing completely exfoliated epoxy/clay nanocomposites:nano-disassembling method[J].Polymer Bulletin,2011,67(4):719-727.

- [3] Magdy Abdelrahman, Dinesh R Katti, Amir Ghavibazoo, et al. Engineering physical properties of asphalt binders through nanoclay-asphalt interactions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(12): 04014099.
- [4] Manfred N. Perspective on nanotechnology in construction materials with a focus on asphaltic materials[R]. Florida: NSF Workshop on Nano-modifications of Cementitious Materials, 2006.
- [5] Steyn W J vd M. Research and application of nanotechnology in transportation[R]. South Africa: Proceedings of the 27 Southern African Transport Conference (SATC), 2008.
- [6] 叶超, 陈华鑫. 纳米 SiO_2 和纳米 TiO_2 改性沥青路用性能研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(6): 82-84.
- [7] Tanzadeh J, Vahedi F, Kheiry P T, et al. Laboratory study on the effect of nano TiO_2 on rutting performance of asphalt pavements[J]. Advanced Materials Research, 2013, 622: 990-994.
- [8] Shafabakhsh G H, Mirabdolazimi S M, Sadeghnejad M. Evaluation the effect of nano- TiO_2 on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 566-571.
- [9] 于江, 李文博, 李林萍. 纳米二氧化钛对沥青老化性能的影响研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017, 36(10): 26-30.
- [10] Hossein Nazari, Koorosh Naderi, Fereidoon Moghadas Nejad. Improving aging resistance and fatigue performance of asphalt binders using inorganic nanoparticles[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 591-602.
- [11] Saeed Sadeghpour Galooyak, Masoud Palassi, Ahmad Goli, et al. Performance evaluation of nano-silica modified bitumen[J]. International Journal of Transportation Engineering, 2015, 3(1): 55-66.
- [12] 何小芳, 杨南南, 贺超峰, 等. 纳米 TiO_2 在聚合物抗紫外光老化中的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(15): 50-53.
- [13] Brabani M, Shakeri V, Sadeghnejad M, et al. Experimental investigation of nano zinc oxide effect on creep compliance of hot mix asphalt[C]//Howson J E, Lytton R L. 7th Symposium on Advances in Science and Technology. Bander-Abbas: Neumann & Giese, 2013: 156-163.
- [14] 陈渊召, 陈爱玖, 李超杰, 等. 纳米氧化锌改性沥青混合料性能分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7): 25-32.
- [15] 张明祥. 纳米氧化锌改性沥青及其抗老化性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [16] 孙璐, 辛宪涛, 于鹏. 纳米 SiO_2 改性沥青混合料的路用性能[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 1-5.
- [17] Mehmet Saltan, Serdal Terzi, Sebnem Karahancer. Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 976-984.
- [18] Saeed Sadeghpour Galooyak, Masoud Palassi, Ahmad Goli, et al. Performance evaluation of nano-silica modified bitumen[J]. International Journal of Transportation Engineering, 2015, 3(1): 55-66.
- [19] Mostafa Sadeghnejad, Gholamali Shafabakhsh. Use of nano SiO_2 and nano TiO_2 to improve the mechanical behaviour of stone mastic asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 965-974.
- [20] Mehmet Saltan, Serdal Terzi, Sebnem Karahancer. Examination of hot mix asphalt and binder performance modified with nano silica research article[J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 976-984.
- [21] Yao Hui, You Zhanping, Li Liang, et al. Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 159-170.
- [22] Elfadil A A Siddig, Cheng Peifeng, Li Yiming. Effects of ethylene vinyl acetate and nanoclay additions on high-temperature performance of asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 276-282.
- [23] Erol Iskender. Evaluation of mechanical properties of nanoclay modified asphalt mixtures[J]. Measurement, 2016, 93: 359-371.
- [24] 付玉. 纳米蒙脱土改性沥青及沥青混合料老化特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [25] Yu Jianying, Zeng Xuan, Wu Shaopeng, et al. Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 447(1/2): 233-238.
- [26] Yu Jianying, Feng Pengcheng, Zhang Henglong, et al. Effect of organo-montmorillonite on aging properties of asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23: 2636-2640.
- [27] Vargas M A, Moreno L, Montiel R, et al. Effects of montmorillonite (Mt) and two different organo-Mt additives on the performance of asphalt[J]. Applied Clay Science, 2017, 139: 20-27.
- [28] 崔亚楠, 刘涛. 纳米蒙脱土改性沥青的抗老化性能及老化机理[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 626-633.
- [29] Pei Jianzhong, Wen Yong, Li Yanwei, et al. Organic montmorillonite modified asphalt materials: preparation and characterization[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2014, 42(1): 118-125.
- [30] 杨骞. 碳纳米管增强沥青混合料的力学性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [31] João Victor Staub de Melo, Glicério Trichês, Lucas Torres de Rosso. Experimental evaluation of the influence of reinforcement with Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) on the properties and fatigue life of hot mix asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 369-382.
- [32] 许晨. 基于碳纳米管改性沥青的结构和性能的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [33] Hassan Latifi, Parham Hayati. Evaluating the effects of the wet and simple processes for including carbon Nanotube modifier in hot mix asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 326-336.
- [34] 杨海霞. 抚顺地区 SBR 改性沥青及改性沥青混合料低温抗裂

- 性能研究[D].吉林:吉林大学,2016.
- [35] 张敏江,陈刚,焦兴华.SBR 改性沥青在寒冷地区的路用性能[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2009,25(5):858-862.
- [36] 张华.纳米 ZnO/SBS 改性沥青混合料路用性能评价[J].中外公路,2016,36(2):289-292.
- [37] 刘超.纳米蒙脱土(OMMT)/SBS 改性沥青流变特性研究[D].大连:大连海事大学,2016.
- [38] 祝伟.SBS 掺量对改性沥青混合料路用性能的影响[D].西安:长安大学,2012.
- [39] 马峰.纳米碳酸钙改性沥青路用性能及改性机理研究[D].西安:长安大学,2004.
- [40] Abbas Kebritchi, Azam Jalali-Arani, Ali Asghar Roghanizad. Rheological behavior and properties of bitumen modified with polymeric coated precipitated calcium carbonate[J].Construction and Building Materials,2011,25:2875-2882.
- [41] Fereidoon Moghadas Nejad, Azarhoosh A R, Gholam Hossein Hamed, et al.Characterization of permanent deformation resistance of precipitated calcium carbonate modified asphalt mixture[J].Journal of Civil Engineering and Management, 2015,21(5):615-622.
- [42] Hao Xiuhong, Zhang Aiqin, Yang Wei.Study on the performance of nano calcium carbonate modified asphalt concrete AC-13[J].Advanced Materials Research,2012,450-451:503-507.
- [43] Mohammad Jamal Khattak, Ahmed Khattab, Hashim R Rizvi.Characterization of carbon nano-fiber modified hot mix asphalt mixtures[J].Construction and Building Materials,2013,40:738-745.
- [44] Mohammad Jamal Khattak, Ahmed Khattab, Hashim R Rizvi, et al.The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology[J].Construction and Building Materials,2012,30:257-264.
- [45] Khattak M J, Khattab A, Rizvi H R.Mechanistic characteristics of asphalt binder and asphalt matrix modified with nano-fibers[R].Dallas (TX):Proceedings of the geo-frontiers 2011 conference,2011.
- [46] 肖鹏,李雪峰.纳米 ZnO/SBS 改性沥青微观结构与共混机理[J].江苏大学学报:自然科学版,2006,27(6):548-551.
- [47] Zhang Hongliang, Su Manman, Zhao Shifeng, et al.High and low temperature properties of nano-particles/polymer modified asphalt[J].Construction and Building Materials,2016,114:323-332.
- [48] Mehmet Saltan, Serdal Terzi, Sebnem Karahancer. Performance analysis of nano modified bitumen and hot mix asphalt[J].Construction and Building Materials,2018,173:228-237.
- [49] Ghasemi M, Marandi S M, Tahmooreesi M, et al.Modification of stone matrix asphalt with nano-SiO₂ [J].Journal of Basic and Applied Scientific Research,2012,1(1):1338-1344.
- [50] Sajad Rezaei, Hassan Ziari, Shams Nowbakht. High-temperature functional analysis of bitumen modified with composite of nano-SiO₂ and styrene butadiene styrene polymer[J].Petroleum Science and Technology,2016,34(13):1203.
- [51] 赵宝俊,赵士峰,张洪亮,等.纳米 CaCO₃/SBR 复合改性沥青的性能与机理[J].长安大学学报:自然科学版,2017,37(5):15-22.
- [52] 孙培,韩森,张洪亮,等.纳米 CaCO₃/SBR 复合改性沥青及混合料的高温性能[J].材料导报,2016,30(8):122-126.
- [53] 刘超.纳米蒙脱土(OMMT)/SBS 改性沥青流变特性研究[D].大连:大连海事大学,2016.
- [54] 杨泽清,肖新颜.纳米蒙脱土改性沥青复合材料研究进展[J].现代化工,2013,33(3):33-37.
- [55] Zhang Henglong, Yu Jianying, Wang Huacai, et al. Investigation of microstructures and ultraviolet aging properties of organo-montmorillonite/SBS modified bitumen [J]. Materials Chemistry and Physics,2011,129(3):769-776.
- [56] Liu Shengjie, Zhou Shengbo, Xu Yinshan.Evaluation of cracking properties of SBS-modified binders containing organic montmorillonite [J]. Construction and Building Materials, 2018,175:196-205.

收稿日期:2018-06-28

修稿日期:2019-08-19

(上接第 31 页)

- [28] Ivanova T V, Krumpolec R, Homola, et al.Ambient air plasma pretreatment of nonwoven fabrics for deposition of antibacterial poly(L-lactide) nanoparticles[J].Plasma Processes & Polymers,2017,14:e1600 231.
- [29] Li L, Luo X, Leung P H, et al.Controlled release of borneol from nano-fibrous poly(L-lactic acid)/cellulose acetate butyrate membrane[J].Textile Research Journal,2016,86(11):1202-1209.
- [30] Yuan Yony T, M Jenkins Phillip, Ann Marie DiGeorge Foushee, et al.Electrospun chitosan/polyethylene oxide nanofibrous scaffolds with potential antibacterial wound dressing applications[J].Journal of Nanomaterials,2016,2016(4):25-34.
- [31] Liao N, Joshi M K, Tiwari A P, et al.Fabrication, characterization and biomedical application of two-nozzle electrospun polycaprolactone/zein calcium lactate composite nonwoven mat[J].Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials,2016,60:312-323.
- [32] Kim S E, Cong Z, Advincula A A, et al.Protein and bacterial antifouling behavior of melt coextruded nanofiber mats[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2016,8(14):8928-8938.
- [33] Lin J H, Chen A P, Li T T, et al.Preparation technique and antibacterial evaluation of high absorbent composite fabrics[J].Journal of Industrial Textiles,2014,45(5):915-929.
- [34] Perteghella S, Vigani B, Mastracci L, et al.Stromal vascular fraction loaded silk fibroin mats effectively support the survival of diabetic mice after pancreatic islet transplantation[J].Macromolecular Bioscience,2017,17(1):1700131.
- [35] Ye C, Wang H, Yang C, et al.In vitro studies of PBT nonwoven fabrics adsorbent for the removal of low density lipoprotein from hyperlipemia plasma[J].Applied Surface Science, 2011,257(17):7521-7528.

收稿日期:2018-08-03