

耐久性超疏水表面的研究进展

杨可成^{1,2} 徐丽慧^{1,2*} 孟云³ 盛宇¹ 王黎明¹

(1.上海工程技术大学服装学院,上海 201620;

2.浙江省清洁染整技术研究重点实验室,绍兴 312000;

3.深圳市计量质量检测研究院,深圳 518000)

摘要 介绍了超疏水表面的性质并指出目前超疏水表面存在耐久性的缺陷,阻碍了其实际应用和推广。对目前制备耐久性超疏水表面的研究进展进行了综述,列出了现今耐久性超疏水表面的应用,指出目前耐久性超疏水存在检测及标准不统一、理论支持不足、制备条件苛刻等问题,并就这些问题对未来耐久性超疏水研究做出了展望。

关键词 超疏水表面,耐久性,自修复,超疏水应用

Research progress of durable superhydrophobic surface

Yang Kecheng^{1,2} Xu Lihui^{1,2} Meng Yun³ Sheng Yu¹ Wang Liming¹

(1.College of Fashion,Shanghai University of Engineering Science,Shanghai 201620;

2.Zhejiang Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology,Shaoxing 312000;

3.Shenzhen Academy of Metrology & Quality Inspection,Shenzhen 518000)

Abstract The properties of superhydrophobic materials were introduced,and the shortcomings of the current superhydrophobic surfaces were pointed out,which had great obstacles to practical application.The current research on the preparation of durable superhydrophobic surfaces and their progress were reviewed,and the applications of the current superhydrophobic surfaces were listed.It was pointed out that current durability of superhydrophobicity detection and standards were not uniform,and the theoretical support was insufficient.The preparation of harsh conditions and other issues,and prospects for future research on the durability of superhydrophobicity were also discussed.

Key words superhydrophobic surface,durability,self-healing property,superhydrophobic application

构建超疏水表面需要两个必要条件:非常低的表面自由能和纳米级粗糙的表面形态。德国植物学家 Barthlott 和 Neinhuis 发现了荷叶表面的超疏水性和自洁性,并阐明了超疏水性与自洁性之间的关系^[1],材料表面的水滴很容易滚落,因此也被称为“荷叶效应”。

由于超疏水表面的特殊性质,它们在自洁、抗反射^[2]、微流体传输^[3-4]方面具有良好的应用前景,因此超疏水表面的研究和制备引起了人们的高度关注。超疏水模型有两种:Wenzel^[5]提出的模型认为水渗入到了粗糙表面;Cassie^[6]提出的模型认为水

位于空气中浮于粗糙表面间隙之间。

所谓超疏水表面是指水滴的接触角(θ)大于 150° 、滚动角小于 10° 的表面。接触角是衡量表面疏水性的标准,动态过程通常通过滚动角或滞后角来测量。滚动角被定义为接触前进角(θ_A)和接触后退角(θ_R)之间的差异。

至今,大多数超疏水表面存在机械强度、化学和环境稳定性差等问题,并且由于物理磨损容易失去超疏水性^[7],从而导致耐久性较差。耐久性问题主要是指表面形态破坏或低表面能涂层失效。对于任何应用而言,提高超疏水表面的耐久性至关重要。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51703123);浙江省清洁染整技术研究重点实验室开放基金项目(项目编号 1801);功能纺织品的开发及其产业化(J2016-FZ-003);上海工程技术大学人才行动计划腾飞计划(2018RC46-2018)

作者简介:杨可成(1995-),男,硕士研究生,主要从事无机纳米材料及其在功能纺织材料的应用研究。

联系人:徐丽慧(1984-),女,副教授,主要研究方向为无机纳米材料及功能纺织品研究。

1 耐久性超疏水表面的研究

1.1 耐久性超疏水表面的测试方法

使用各种形式(线性、圆形)的纺织品或砂纸进行机械磨损是测试超疏水和超疏水表面的机械耐久性的最常用方法。同时,目前也已经开发了水流冲击、砾石冲击、线性磨损、铅笔硬度测试、刀片划线、弯曲和变形测试等新的测试方法^[8]。

超疏水表面的疏水性差是由于两个方面的原因:一是由于在极端环境中表面微纳米结构被破坏;另一种是由于表面被机械磨蚀,低表面能材料被消耗,表面增加能量导致不良的疏水性。所以需要研究涂层的耐磨性,以探索其表面能承受的载荷,磨损长度等。基底的附着力也非常重要,因为较低的附着力容易导致涂层从基底表面脱落。传统方法制备的超疏水表面微纳米结构在使用过程中受到机械磨损和物理冲击时易发生损耗,从而容易从基体上脱落,极大地阻碍了超疏水表面的应用和推广。

1.2 提高超疏水表面耐久性的研究

Wang等^[9]研究了超疏水聚四氟乙烯/聚偏二氟乙烯(PTFE/PVDF)复合材料表面,发现经过100次砂纸磨蚀循环后,复合材料表面的水接触角为 164° ,低滚动角小于 5° ,并且仍具有较好的机械稳定性。Park等^[10]研究了一种非聚合聚二甲基硅氧烷(PDMS)和碳纳米管(CNT)的蜂窝状结构,在1.5N的负载下进行600次橡胶尖端滑动测试之后,该结构仍保持超疏水性能。Zhou等^[11]通过简单的气相沉积工艺将聚苯胺和氟化烷基硅烷引入到棉织物中,发现在1.5kPa载荷的600次磨损循环之后,织物仍保持其超疏水性质(水接触角达到 156°)。

另外,纳米粒子复合材料非常受研究人员的欢迎。研究发现,单微米或纳米级结构的耐磨性比微纳米级复合结构低得多。Nakajima小组^[12]制备的针状勃姆石表面为火山口状半球形孔隙,这种结构在抑制接触角减小方面具有非常重要的作用。

Xiu等^[13]将 SiO_2 纳米粒子引入环氧树脂中以形成超疏水复合层,随后对其机械性能进行了评估,在100次循环磨损后其疏水角仍有 150° 。Xue等^[14]将氟代烷基硅烷改性的 SiO_2 纳米粒子引入羟基丙烯酸树脂中,使用2kPa的负荷在200次磨损循环之后喷涂该复合材料,产生了具有良好耐磨性和稳定粘合性的超疏水性丙烯酸聚氨酯(SAPU)涂层。在另一项类似的工作中,Brown等^[15]使用摩擦磨损试验研究了氟化PC纳米颗粒复合材料表面,

其光学图像显示了负载高达20mN的磨损轨迹的一部分以及当负载增加到45mN时的可观察磨损痕迹。Brown等^[16]发表了一系列使用纳米粒子的论文,其使用具有纳米颗粒的逐层技术来制造超疏水和超疏油涂层,以引入粗糙度并增加涂层的硬度。Wu等^[17]提出了一种浸涂超级耐久超疏水材料,研究发现,即使经过100次砂纸磨损循环,材料表面水的滚动角度仍然低于 10° 。

耐磨性对于织物也非常重要,对机械应力表现出耐久性的织物研究如下:Xue等^[18]研究了聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)织物超疏水表面,实验发现经5000次磨损循环后其仍具有机械坚固性^[18]。Wang等^[19]将具有疏水性 SiO_2 纳米颗粒的PET基材浸渍在甲基苯基硅树脂中,然后用 O_2 等离子体处理其表面,最后使用1H,1H,2H,2H-全氟辛基三氯硅烷进行气相沉积步骤以产生耐久的超疏油性表面^[19]。实验发现,氟硅烷改性树脂涂层不仅表现出优良的耐久性,而且具有良好的防污特性和透明度。

Yokoi等^[20]用聚合物网格制备了透明超疏水表面。扫描电镜分析结果表明,碱蚀刻后栅格表面有很多凹坑。通过氟硅烷的改性和 SiO_2 纳米粒子的沉积,表面粗糙度进一步增加。但与荷叶效应不同,研究组制备的超疏水表面为三层结构,而荷叶表面仅为双层粗糙结构。聚合物网格本身的交织结构非常强大。当在磨损试验中施加10kPa的负荷并且磨损重复100次时,仍然可以保持超疏水性,因为即使表面部分改性的 SiO_2 纳米粒子处于磨损和撕裂中,也存在第二层氟硅烷改性表面可以起到疏水作用。由此可见,超疏水表面耐磨性也可以通过多层沉积得到改善。

1.3 自修复耐久性超疏水表面的研究

自修复材料是一类新兴的智能材料,能够在外部刺激(如热、光、溶剂等)下自主/自发地或受到刺激地修复其损伤。国内外学者^[21-23]均对这一材料展开了研究。如果这种自修复功能嫁接到超疏水表面中,将显著提高其寿命和耐久性。研究表明,通过结合修复剂或使用先进材料(如形状记忆聚合物,SMP)可以实现超疏水表面的自我修复。

与简单的疏水性材料相比,通过恢复粗糙的微结构来实现超疏水材料表面的愈合更加困难。例如,Chen和Yang^[24]用模板法制备了基于环氧微柱阵列的SMP超疏水表面。当表面发生变形时,水滴表现为Wenzel状态,只须简单地将材料表面加热至 80°C ,即可使表面恢复超疏水性。Wei等^[25]最

近提出了类似的理论,他们使用热响应性 SMP 来实现水和十六烷的可逆润湿转变。实验发现,对于十六烷,当材料表面微结构的柱子塌陷时,接触角从 146° 降至 10° ,而加热后即可恢复至 147° 。

含有氟烷基硅烷(FAS)的胶囊掺入乳胶中,可用作机械损伤或有机污染情况下的修复剂,紫外线照射后即可恢复超疏水性。这种技术帮助涂层在户外超过 2160h 后仍旧保持超疏水性^[26]。采用上述技术的超疏水性 PDMS/ODA(十八烷基胺)包覆的 PET 织物^[27]在被空气等离子体(19W, 1min)损伤后,在室温下 12h 即可实现自愈。最近,曼纳等提出了一种有趣的自修复方法^[28],即在超疏水聚合物表面的多层结构被破坏后,只要利用液态水处理就能修复表面结构从而恢复其超疏水性。

Chi 等^[29]采用亲水性金属氧化物对聚合物超滤膜表面进行改性,成功地使钛白粉功能薄膜固定在超疏水性 PTFE 超滤膜上,可有效地提高其防污性能和水通量。通过手动清洗和紫外线辅助清洗的方法,对被牛血清白蛋白污染的 PTFE 改性超滤膜进行清洗,可以降解和削弱部分蛋白质的超滤膜结合力,以恢复其水通量及自我清洁性能。

2 耐久性超疏水表面的应用

迄今为止,耐久性聚合物超疏水表面已被应用于微流体、化学屏蔽、油水分离等诸多领域^[30]。

2.1 油水分离

油水分离和水净化技术对环境保护和资源保护非常重要。此类应用的理想物质是多孔超疏水性和同时亲油/超亲油性表面或聚合物涂覆的网孔和织物,因为油容易穿过多孔表面或网状物,水则会被截留在另一侧。耐久性差会降低这些材料在分离应用中的成功率^[31],因此耐久性的提高可以带来高的分离效率^[32]。Tuteja 领导的小组^[33]对这一课题进行了广泛的研究,他们提出了选择性地被油或水润湿以及防止润湿的设计方法,研究表明,表面孔隙度和突破压力是设计方法中的两个重要物理特征。最近,人们开始使用超疏水/亲油表面来避免油污^[34],还有研究者^[35]采用涂布在铜网表面上的多功能聚合物纳米薄膜来实现油水分离。

2.2 防冰、疏冰

荷叶超疏水表面可以用于防冰领域,因为它们能够将冰粘附强度降低至 50kPa ^[36],而且还可以延迟冰的形成。另一种避免表面粘附冰的方法是使用滑性预浸润表面(SLIPS)。Wong 等^[37]的研究表

明,SLIPS 表面具有极强的防结冰和抗结霜性能,其冰粘附强度仅为未涂覆表面粘附强度的 1.2%。

2.3 控制蛋白质吸附

蛋白质是生物体中重要的有机体,它可增强或减少生物材料上各种细胞类型的附着^[38],在生物界中起着重要的作用。在微流体或其他医疗设备(例如导管)的材料表面上如果有蛋白质吸附会导致人体产生许多不良现象,例如出现血栓、溶血等。因此,抑制这些材料表面上的蛋白质粘附意义重大^[39]。实验发现,用氨基对酰氨基基团进行化学修饰可以减少蛋白质吸附^[40]。另外,影响表面电荷和蛋白质之间的静电力^[41]也可以减少蛋白质的吸附。表面形态和表面可润湿性是影响蛋白质与表面相互作用的方式的关键因素。具体来说,孔隙的粗糙度、大小和分布,纳米结构的曲率半径,以及槽结构的取向和尺寸都是重要的影响因素^[42]。超疏水性是表面形态和表面能的综合作用,因此蛋白质吸附与超疏水性密切相关。一些研究表明,粘附在具有微米尺度粗糙度的超疏水表面上的蛋白质的数量大于光滑和纳米尺度粗糙表面上的蛋白质的数量^[43]。

2.4 控制细菌粘附

细菌是小型细胞,与细胞类似,它们可以与各种表面发生复杂的相互作用。例如,致病菌的粘附可能会导致严重感染和生物医学或修复的设备失效;抗生素使用的增加使得微生物和细菌出现耐药性,人们需要发明新的方法来应对它们。因此,科研工作者正在研究开发具有抗菌性能的新型材料。最近对新一代抗菌生物材料的研究已经通过审查^[44]。其中一种抗菌模式是采用超疏水表面来减少细菌的粘附,例如 Jin 等^[45]所做的研究,他们首先将超疏水纤维素(商品滤纸)粗糙化,然后在其表面涂覆 1H, 1H, 2H, 2H-全氟辛基三甲氧基硅烷(PFOTMS),此表面可以抑制溶源性大肠杆菌的粘附。

2.5 控制细胞粘附

自然界的细胞具有粘附在一个表面并大量生长的能力^[46],这一行为需要在某些应用中加以控制,如组织工程、微流体等领域。然而,当前人们对生物材料的细胞行为尚未完全理解,因为细胞行为的影响因素较多^[47]。为此,研究人员又期待超疏水表面能够在需要控制细胞附着的应用中发挥作用,并对此展开了研究^[48]。

3 结语与展望

超疏水表面的耐久性研究是从事超疏水研究的

科学家和工程师关注的热点。功能化超疏水表面虽然许多领域具有良好的应用前景,但目前仍存在一些问題。就耐久性而言,尽管许多研究小组已经对超疏水表面的耐久性进行了测试,但这些测试方法尚没有统一的标准,建议针对不同的测试类型分别制订特定的机械耐久性标准。在理论研究中,目前超疏水表面的模型和公式仍以经验为基础,关于超疏水表面上的水滴运动的分析非常少。因此,从理论分析到选材到超疏水涂料的制备,再到涂料的实际应用,还有很长的路要走^[49]。

回顾近年来超疏水表面的研究,目前已经制备了多种类型的超疏水表面,其中大部分是用氟硅烷改性的,并且大部分功能化表面可以应用于耐磨损、耐腐蚀涂层,如自清洁玻璃、微流体运动、太阳能电池和油水分离等,但在生产工艺和应用方面还存在很多局限性,这使得近年来超疏水表面的发展陷入了一个瓶颈期。目前,超疏水表面的许多模型和公式只是经验性的,最常用的是 Cassie-Wenzel 模型,其他方面的研究很少。其次,大部分超疏水表面是用氟硅烷改性、酸改性或聚合物改性,目前迫切需要一种适用于大规模生产的环保、实惠的改性剂。不仅如此,一些实验还需要先进的设备和苛刻的操作环境,目前许多实验室还达不到这一要求,工业化更是任重道远。

建议超疏水表面未来工作着重于以下几个方面:(1)为不同应用制定耐久性超疏水表面的耐久性标准及测试标准;(2)加强超疏水性理论研究,为制备透明耐久性超疏水表面提供更多的理论支持;(3)尽可能提高超疏水表面的耐久性;(4)开发可广泛应用的环境友好型和经济型的改性剂,创造一个简单灵活的经营环境,并尽快将实验转向工业化生产。

参考文献

- [1] Barthlott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [2] Shi E, Li H, Yang L, et al. Colloidal anti-reflection coating improves graphene-silicon solar cells[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(4): 1776-1781.
- [3] Ellerbee A K, Phillips S T, Siegel A C, et al. Quantifying colorimetric assays in paper-based microfluidic devices by measuring the transmission of light through paper[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(20): 8447-8452.
- [4] Lee J, Jha A K, Bose A, et al. Imaging new transient nanostructures using a microfluidic chip integrated with a controlled environment vitrification system for cryogenic transmission electron microscopy[J]. *Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids*, 2008, 24(22): 12738-12741.
- [5] Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. *Ind Eng Chem*, 1936, 28(8): 988-994.
- [6] Cassie A B D, Baxter S. Wettability of porous surfaces[J]. *Trans Faraday Soc*, 1944, 40(1): 546-551.
- [7] 徐文华, 张丽东, 赵利, 等. 耐久性超疏水表面研究进展[J]. *化工进展*, 2012, 31(10): 2260-2264.
- [8] Tian X, Verho T, Ras R H. Moving superhydrophobic surfaces toward real-world applications[J]. *Science*, 2016, 352(6282): 142.
- [9] Wang F J, Lei S, Ou J F, et al. Superhydrophobic surfaces with excellent mechanical durability and easy repairability[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 276(3): 397-400.
- [10] Park S H, Cho E H, Sohn J, et al. Design of multi-functional dual hole patterned carbon nanotube composites with superhydrophobicity and durability[J]. *纳米研究(英文版)*, 2013, 6(6): 389-398.
- [11] Zhou X, Zhang Z, Xu X, et al. Robust and durable superhydrophobic cotton fabrics for oil/water separation[J]. *Acs Appl Mater Interfaces*, 2013, 5(15): 7208-7214.
- [12] Yanagisawa T, Nakajima A, Sakai M, et al. Preparation and abrasion resistance of transparent super-hydrophobic coating by combining crater-like silica films with acicular boehmite powder[J]. *Materials Science & Engineering B*, 2009, 161(1): 36-39.
- [13] Xiu Y, Liu Y, Balu B, et al. Robust superhydrophobic surfaces prepared with epoxy resin and silica nanoparticles[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology*, 2012, 2(3): 395-401.
- [14] Xue F, Jia D, Li Y, et al. Facile preparation of a mechanically robust superhydrophobic acrylic polyurethane coating[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(26): 13856-13863.
- [15] Brown P S, Bhushan B. Durable, superoleophobic polymer-nanoparticle composite surfaces with re-entrant geometry via solvent-induced phase transformation[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21048.
- [16] Brown P S, Bhushan B. Bioinspired, roughness-induced, water and oil super-philic and super-phobic coatings prepared by a adaptable layer-by-layer technique[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 14030.
- [17] Wu L, Zhang J, Li B, et al. Facile preparation of super durable superhydrophobic materials[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2014, 432(20): 31.
- [18] Xue C H, Bai X, Jia S T. Robust, self-healing superhydrophobic fabrics prepared by one-step coating of PDMS and octadecylamine[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27262.
- [19] Wang Y, Bhushan B. Wear-resistant and antismudge superoleophobic coating on polyethylene terephthalate substrate using SiO₂ nanoparticles[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(1): 743-55.
- [20] Yokoi N, Manabe K, Tenjimayashi M, et al. Optically trans-

- parent superhydrophobic surfaces with enhanced mechanical abrasion resistance enabled by mesh structure[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(8):4809-4816.
- [21] Wu D Y, Meure S, Solomon D. Self-healing polymeric materials: a review of recent developments[J]. *Progress in Polymer Science*, 2008, 33(5):479-522.
- [22] Yang Y, Urban M W. Self-healing polymeric materials[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(17):7446-7467.
- [23] Chen D, He P, Yang H. Self-healing polymeric materials[J]. *Progress in Chemistry*, 2012, 42(17):7446-7467.
- [24] Chen C M, Yang S. Directed water shedding on high-aspect-ratio shape memory polymer micropillar arrays[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(8):1283.
- [25] Wei W, Salazar J, Vahabi H, et al. Metamorphic superomniphobic surfaces[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27):1700295.
- [26] Chen K, Zhou S, Yang S, et al. Fabrication of all-water-based self-repairing superhydrophobic coatings based on UV-responsive microcapsules[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(7):1035-1041.
- [27] Xue C H, Bai X, Jia S T. Robust, self-healing superhydrophobic fabrics prepared by one-step coating of PDMS and octadecylamine[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:27262.
- [28] Manna U, Lynn D M. Restoration of superhydrophobicity in crushed polymer films by treatment with water: self-healing and recovery of damaged topographic features aided by an unlikely source[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(36):5104-5108.
- [29] Qian Y, Chi L, Zhou W, et al. Fabrication of TiO₂-modified polytetrafluoroethylene ultrafiltration membranes via plasma-enhanced surface graft pretreatment[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 360(Part B):749-757.
- [30] Jiang T, Guo Z, Liu W. Biomimetic superoleophobic surfaces: focusing on their fabrication and applications[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(5):1811-1827.
- [31] Wang B, Liang W, Guo Z, et al. Biomimetic super-lyophobic and super-lyophilic materials applied for oil/water separation: a new strategy beyond nature[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(1):336.
- [32] Kota A K, Kwon G, Choi W, et al. Hygro-responsive membranes for effective oil-water separation[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(48):1025.
- [33] Kwon G, Post E, Tuteja A. Membranes with selective wettability for the separation of oil-water mixtures[J]. *Mrs Communications*, 2015, 5(3):475-494.
- [34] Xue Z, Wang S, Lin L, et al. A novel superhydrophilic and underwater superoleophobic hydrogel-coated mesh for oil/water separation[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(37):4270.
- [35] Wang Y, Lin F, Dong Y, et al. A multifunctional polymeric nanofilm with robust chemical performances for special wettability[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(9):5153-5161.
- [36] Golovin K, Kobaku S P, Lee D H, et al. Designing durable ice-phobic surfaces[J]. *Science Advances*, 2016, 2(3):e1501496.
- [37] Wong T S, Kang S H, Tang S K Y, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. *Nature*, 2011, 477(7365):443.
- [38] Marmur A. Super-hydrophobicity fundamentals; implications to biofouling prevention[J]. *Biofouling*, 2006, 22(2):107-115.
- [39] Tsougeni K, Petrou P S, Papageorgiou D P, et al. Controlled protein adsorption on microfluidic channels with engineered roughness and wettability[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2012, 161(1):216-222.
- [40] Chen H, Zhang Z, Chen Y, et al. Protein repellent silicone surfaces by covalent immobilization of poly(ethylene oxide)[J]. *Biomaterials*, 2005, 26(15):2391-2399.
- [41] Pasche S, Vörös J, Griesser H J, et al. Effects of ionic strength and surface charge on protein adsorption at PEGylated surfaces[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2005, 109(37):17545-17552.
- [42] Roach P, Farrar D, Perry C C. Surface tailoring for controlled protein adsorption: effect of topography at the nanometer scale and chemistry[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128(12):3939.
- [43] Koc Y, de Mello A J, Mchale G, et al. Nano-scale superhydrophobicity: suppression of protein adsorption and promotion of flow-induced detachment[J]. *Lab on a Chip*, 2008, 8(4):582-586.
- [44] Hasan J, Crawford R J, Ivanova E P. Antibacterial surfaces: the quest for a new generation of biomaterials[J]. *Trends in Biotechnology*, 2013, 31(5):295-304.
- [45] Jin C, Jiang Y, Niu T, et al. Cellulose-based material with amphiphobicity to inhibit bacterial adhesion by surface modification[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(25):12562-12567.
- [46] Robertus J, Browne W R, Feringa B L. Dynamic control over cell adhesive properties using molecular-based surface engineering strategies[J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39(1):354-78.
- [47] Parent C A, Devreotes P N. A Cell's sense of direction[J]. *Science*, 1999, 284(5415):765-770.
- [48] Song W, Mano J F. Interactions between cells or proteins and surfaces exhibiting extreme wettabilities[J]. *Soft Matter*, 2013, 9(11):2985-2999.
- [49] Si Y, Zhu H, Chen L, et al. A multifunctional transparent superhydrophobic gel nanocoating with self-healing properties[J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(94):16794-16797.

收稿日期:2018-03-07

修稿日期:2018-04-23