

紫外光亲水改性硅橡胶及其复合材料的研究进展

杨小琛^{1,2}, 母林鹏^{1,2}, 王 娜^{1,2}, 何周坤^{2*}, 兰小蓉^{3,4*}

(1. 成都大学 机械工程学院, 四川 成都 610106; 2. 成都大学高等研究院 成都大学复合材料和表界面工程研究中心, 四川 成都 610106; 3. 西南医科大学口腔医学研究所, 四川 泸州 646000; 4. 西南医科大学附属口腔医院 颌面修复重建和再生泸州市重点实验室, 四川 泸州 646000)

摘要: 基于硅橡胶及其复合材料的抗污需求, 以亲水改性硅橡胶为提高其抗污性能的技术手段, 综述了亲水改性硅橡胶及其复合材料的制备方法。硅橡胶亲水改性方法主要分为表面改性和本体改性, 其中表面改性分为表面物理改性和表面化学改性, 本体改性分为本体物理改性和本体化学改性。阐述了紫外光改性机理, 分类介绍了紫外光亲水改性硅橡胶及其复合材料的研究现状以及对材料抗污性能的影响, 并提出了未来亲水改性硅橡胶的几个重点研究方向, 为亲水改性硅橡胶及其复合材料的润湿性和抗污性能研究提供参考。

关键词: 紫外光; 亲水改性; 硅橡胶; 复合材料; 抗污性能

中图分类号: TQ333.93; TQ316.6

文章编号: 2095-5448(2023)03-0109-06

文献标志码: A

DOI: 10.12137/j.issn.2095-5448.2023.03.0109



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

硅橡胶是以硅氧键(—Si—O—)为骨架组成的一类聚有机硅氧烷。其 —Si—O— 键能约为 $451 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 比常见的碳-碳键键能(约 $345 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)更高, 因此硅橡胶材料的化学稳定性比一般的有机材料更高^[1]。由于硅橡胶同时具备无机和有机物特性, 因此常将硅橡胶与其他无机或有机材料进行复合, 在一定温度下经固化成型得到不同用途的硅橡胶复合材料, 例如硅橡胶隔热材料^[2]、硅橡胶导电材料^[3]、硅橡胶微流控芯片^[4]、3D打印硅橡胶复合材料^[5]和柔性电子硅橡胶材料^[6]等。此外, 硅橡胶无毒、不致癌、不致畸且具备优

良的生物惰性, 其在生物医用领域也得到了广泛应用。然而, 硅橡胶材料的抗黏附性较差, 比如作为生物医用材料, 与血液接触后存在血小板、蛋白质、细胞和细菌等的黏附, 继而造成严重的“生物污染”并导致生物医用材料的失效^[7]。因此, 减少或消除“生物污染”对于硅橡胶材料制备的医疗装置和植入器械等的安全性和功效性是至关重要的, 有必要对其进行抗污处理, 赋予其优异的抗污性能以满足实际应用需求。

根据污染物来源及种类的不同, 通常可以将污染行为分为无机物导致的无机污染、有机物导致的有机污染、生物污染物导致的生物污染和复合污染物导致的复合污染^[8]。由于污染物与材料表面的相互作用与材料表面的化学组成和物理结构密切相关, 而材料表面的化学组成和物理结构又与材料的润湿性相关, 因此污染物和材料表面的相互作用与材料表面的润湿性密不可分。笔者前期针对材料表面润湿性对材料抗污性能的影响进行了系列研究^[8-12]。经研究证实, 在排除电荷等因素的影响外, 疏水表面更有利于蛋白和细

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51873240); 泸州市重点研发项目(2022-GYF-12); 成都大学通识教育选修课建设项目(CDTS202266)

作者简介: 杨小琛(1997—), 男, 贵州贵阳人, 成都大学在读硕士研究生, 主要从事硅橡胶及其复合材料的研究。

通信联系人: 何周坤(1985—), 男, 四川射洪县人, 成都大学高等研究院特聘研究员, 博士, 主要从事功能复合材料及表界面工程的基础研究和应用开发(hezhounhe@163.com); 兰小蓉(1985—), 女, 重庆人, 西南医科大学口腔医学研究所副研究员, 博士, 主要从事生物医用材料及医疗器械的基础研究和应用开发(xiaoronglan@163.com)。

胞等物质的黏附,而亲水表面则不利于细胞的黏附。硅橡胶材料抗污性能的不足主要是由于其本身具有一定的疏水性,以常见的聚二甲基硅氧烷(PDMS)为例,其平整表面的水滴接触角通常为 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$ ^[5,13-15]。因此为了得到亲水硅橡胶及其复合材料,通常需要对其进行亲水改性,从而提高其抗污能力。紫外光处理作为一种快捷方便的改性方式,通过其对硅橡胶及其复合材料进行亲水改性不仅工艺简单,也更有利于其在生物医用领域的实际应用。

本工作综述了采用紫外光处理对硅橡胶及其复合材料亲水性及抗污性能的影响,为相关研究提供参考。

1 亲水改性方法

目前硅橡胶及其复合材料的亲水改性方式主要可以分为表面改性^[16-29]和本体改性^[30-37]两种。常见的表面改性包括表面物理改性^[16-18],如亲水涂层改性^[16],以及表面化学改性^[19-29],如等离子体改性^[19-21]。常见的本体改性包括本体物理改性^[30-33],如亲水材料共混改性^[30],以及本体化学改性^[34-37],如共价接枝改性^[34]。

1.1 亲水表面物理改性

硅橡胶材料亲水表面物理改性通常采用亲水涂层对材料表面进行物理覆膜,通过非化学键作用实现亲水涂层对硅橡胶的亲水改性。曲祥军等^[16]在硅烷偶联剂处理过的医用硅橡胶材料表面涂覆亲水的聚乙烯吡咯烷酮(PVP)涂层后,使其改性后表面的水滴接触角减小至约 20° 。亲水涂层表面物理改性的优势是亲水涂层来源丰富、涂覆工艺多样成熟等,但也存在明显不足。首先,亲水涂层难以直接在疏水材料表面进行均匀涂覆,通常需要采用硅烷偶联剂等中间过渡层进行辅助涂膜。其次,亲水涂层难以长期稳定存在于疏水材料表面。因此,与表面物理改性相比,表面化学改性在均匀改性和长期稳定性方面更有优势。

1.2 亲水表面化学改性

硅橡胶材料亲水表面化学改性是利用化学反应将材料的亲水基团接枝在硅橡胶的大分子链上,从而在不改变硅橡胶材料内部结构的同时实现对其表面的亲水化学改性。亲水表面化学改

性方法主要包括等离子体改性^[19-21]、臭氧活化接枝^[24]、高能粒子活化接枝^[25]等。等离子体被称为物质除固、液、气态外的第四态,等离子体改性是利用辉光或电晕放电方式生成 O_2 、 NH_3 、 N_2 、氩(Ar)等部分离子化的气体,然后轰击材料表面并产生特定的化学基团,从而实现对材料的化学改性。胡宝荣等^[19]使用 N_2 低温等离子体处理硅橡胶表面20 min即可显著提高材料的亲水性,使改性材料表面水滴接触角减小至 21.5° 。彭向阳等^[20]使用Ar等离子体处理硅橡胶材料表面3 min,材料转为超亲水,其表面水滴接触角减小至 0° 。等离子体改性技术的优势在于处理均匀、处理时间短、易于操作、改性发生在材料表面而对材料本体性能无明显影响,因而其在航天航空和电子元器件等相关领域具有比较广泛的应用。但其仍存在明显的不足,即等离子体改性硅橡胶材料表面的亲水性持续时间较短,无法满足长期稳定性的要求,因为硅橡胶分子链会由内部逐渐迁移至表面,使材料的疏水性恢复至最初状态。

1.3 亲水本体物理改性

硅橡胶材料亲水本体物理改性是将亲水材料填充或与硅橡胶本体进行共混,利用非化学键作用,实现对硅橡胶材料的亲水改性。共混改性是一种常见的本体物理改性方法。张良俊等^[30]以聚氧乙烯山梨醇酐单油酸酯改性滑石粉,制备得到亲水改性的滑石粉,然后将其与硅橡胶进行共混,实现了对硅橡胶材料的亲水改性,当滑石粉质量分数达到70%时,硅橡胶材料表面水滴接触角减小至约 20° 。亲水材料共混本体物理改性由于在硅橡胶材料中填充了大量的亲水材料,因而能够有效减缓硅橡胶分子链向表面迁移的影响,有利于提高亲水改性效果的长期稳定性。但此类改性方式仅仅依靠亲水材料自身的物理阻隔以及一些非化学键合的抑制作用,因此只能在一定程度上改善亲水改性的长期稳定性。与亲水本体物理改性相比,通过亲水材料与硅橡胶分子链之间的本体化学改性,引入化学键束缚作用,有望进一步提高其亲水改性的长期稳定性。

1.4 亲水本体化学改性

硅橡胶材料亲水本体化学改性是利用亲水材料与硅橡胶之间的化学反应,通过化学键作用实

现对硅橡胶的亲水改性。共价接枝改性是一种常见的硅橡胶本体化学改性技术。将亲水的聚环氧乙烷(PEO)通过共价接枝到PDMS的侧基上,能够得到亲水本体化学改性的聚(二甲基硅氧烷-环氧乙烷)(PDMS-*b*-PEO),即使将此PDMS-*b*-PEO作为表面活性剂进一步添加到PDMS中,得到的复合材料的水滴接触角仍可减小至约21.5°,并且其亲水性至少能够保持4个月无明显变化,从而大幅度提高亲水改性的长期稳定性^[34]。

2 紫外光改性的发展及其机理

古希腊人将沥青油涂抹在船体表面,通过太阳光的固化作用形成坚固的防水层,其固化原理主要是太阳光中的紫外线作用。1956年,G. OSTER等^[38-39]首次利用紫外光辐照技术诱导聚乙烯发生交联反应。1968年,德国Bayer公司基于不饱和树脂与安息香酸开发了第1代紫外光固化涂料产品^[40]。20世纪70年代初,丙烯酸系列紫外光固化油墨开发成功,我国也开始研究紫外光固化材料,随后液态、粉末型、水分散型等不同类型的紫外光固化材料及技术得到迅速发展^[40]。紫外光固化技术具有“5E”优势:效率(Efficiency)、环境友好(Ecology)、节约能源(Energy)、适用性广(Enabling)和经济(Economy),因而成为近年来的研究热点,获得高速的发展,并广泛应用于涂料、油墨、印刷、生物医疗器械和塑料等领域^[41-42]。

紫外光根据其波长范围分为UVA(315~400 nm),UVB(280~315 nm),UVC(200~280 nm)和UVD(100~200 nm)^[43]。紫外光固化是指在紫外光作用下,将可发生光引发自由基聚合或者光引发阳离子聚合的感光材料(大部分是液态材料)转变为固态材料的过程^[44-45]。

光引发自由基聚合通常包括4个过程:(1)自由基引发,光引发剂在紫外光作用下从基态向激发态转变,并分解得到自由基;(2)链增长,自由基与单体中的碳-碳双键结合,之后通过链式增长,使碳-碳双键发生聚合;(3)链转移;(4)链终止。光引发剂产生的自由基会随着碳-碳双键发生聚合而进行转移以实现连续聚合,当聚合完成时发生链终止,形成最终的固体材料。自由基引发剂包括裂解型自由基和夺氢型自由基两类引

发剂^[40]。常见的自由基引发剂有安息香及其衍生物、苯乙酮类、芳香酮类和酰基磷氧化物等^[46]。

光引发阳离子聚合是在紫外光作用下将阳离子光引发剂光解后产生质子酸催化环氧基的开环聚合或富电子碳-碳双键的阳离子聚合过程^[44-45]。常见的阳离子光引发剂有芳香重氮盐、芳香碘鎓盐、芳香硫鎓盐、磷鎓盐和混合配位的铁-芳基配合物以及有机铝/三苯基硅烷体系等^[46-47]。

3 硅橡胶及其复合材料的紫外光亲水改性

虽然紫外光改性通常会涉及到紫外光交联化学反应,但是若化学反应不涉及硅橡胶及其复合材料本身,那么这种改性方式仍然属于对硅橡胶及其复合材料的物理改性,若化学反应有硅橡胶及其复合材料的参与,那么改性方式则应归属于化学改性。

3.1 紫外光亲水表面物理改性

通过紫外光对硅橡胶材料表面进行物理改性,通常是先将能在紫外光作用下进行反应的亲水涂层涂覆在硅橡胶表面,然后紫外光使亲水涂层自身交联固化,但亲水涂层与硅橡胶表面并未发生化学反应,因而仍属于表面物理改性的范畴。朱海锬^[18]将能够通过可逆加成断裂链转移(RAFT)聚合合成亲水无规共聚物聚[(2-甲基-2-噁唑啉)-*r*-4-乙烯基吡啶]的涂层涂覆于PDMS表面,然后通过紫外光辐照制备得到亲水PDMS,其水滴接触角可减小至约5°,同时亲水PDMS表面具有良好的生物相容性和生物抗污性能(抗蛋白、血小板及细胞黏附)。

3.2 紫外光亲水表面化学改性

相对于紫外光亲水表面物理改性,紫外光亲水表面化学改性得到更广泛的研究,且理论上能够得到亲水稳定性更加持久的表面亲水涂层。虽然PDMS经紫外光直接辐照处理也可提高其亲水性^[28],但由于PDMS分子链的表面迁移,会存在明显的疏水性恢复。姚树寅等^[29]利用真空紫外光对PDMS进行亲水改性得到的亲水表面由于具有类玻璃物质,从而相对于普通紫外光处理PDMS的亲水表面具有更持久的亲水稳定性。但通过紫外光在PDMS表面化学接枝其他亲水聚合物则是一种更加有效且常见的延长其亲水稳定性的表

面化学改性方式^[24-27]。例如, H. GHALEH等^[24]通过紫外光臭氧活化处理PDMS基材表面, 将具有活性原子转移自由基聚合引发剂3-(2-溴异丁酰胺)丙基(三甲氧基)硅烷接枝固定在材料表面, 在PDMS基材上制备一层亲水性聚甲基丙烯酸羟乙酯(PHEMA)。在PDMS表面接枝PHEMA提高了材料表面的润湿性, 表现出优异的抗蛋白和血小板黏附性能, 较未接枝的PDMS基体材料, 其白蛋白吸附率降低至12.2%。Q. CAO等^[25]将N,N-二甲基-N(3-甲基丙烯酰胺丙基)-N-(3-磺丙基)铵甜菜碱在紫外光的照射下化学接枝到预处理后的有机硅薄膜表面, 表面化学改性的材料表面的水滴接触角可减小至约38°, 同时通过细菌黏附测试结果证明亲水改性后的材料表面具有更优异的生物抗污能力。S. ZHOU等^[26]将硅橡胶材料置于含有亲水甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)单体的溶液中进行浸涂, 然后经紫外光交联处理, 清洗掉未反应的单体后即可得到PHEMA亲水改性的硅橡胶材料, 其水滴接触角可减小至9°左右。

此外, 亲水改性硅橡胶不仅有效地改善了材料的亲水性, 而且能够降低硅橡胶材料表面的摩擦性能, 在模拟血液中亲水改性硅橡胶的摩擦系数比未含亲水涂层的疏水硅橡胶降低了98.0%, 有效拓展了亲水改性硅橡胶材料在生物医用领域的应用。

3.3 紫外光亲水本体物理改性

紫外光对硅橡胶的亲水表面改性虽然不改变硅橡胶本体性能, 但当表面亲水层被破坏后即丧失亲水性, 因而通过紫外光对硅橡胶本体进行改性, 能够实现硅橡胶整体均具有良好的亲水性, 即使表面层被破坏, 内部新产生的表面层仍具有良好的亲水性。紫外光亲水本体改性分为紫外光亲水本体物理改性和紫外光亲水本体化学改性。

紫外光亲水本体物理改性主要是通过共混的方式引入可发生紫外光反应的亲水改性材料, 但这种亲水改性材料与硅橡胶本体不发生紫外光反应, 利用亲水材料与硅橡胶分子链之间物理缠结的非化学键作用, 实现对硅橡胶本体的亲水物理改性。例如, A. HILLERSTRM等^[32]在紫外光作用下通过自由基聚合制备得到PVP亲水本体物理改性的PVP/PDMS互穿网络结构(IPN), 通过溶剂

的调整可以获得具有不同亲水性的PVP/PDMS-IPN。庞凯敏^[33]先将固体硅橡胶进行一定时间的高温硫化处理后, 将其浸泡在含有HEMA或N-乙烯基吡咯酮(NVP)的溶液中, 最后通过紫外光交联反应制备得到硅橡胶和PHEMA或PVP的IPN结构, 此时硅橡胶分子链与PHEMA或PVP聚合物分子链为物理缠结作用, 属于非化学键作用, 从而实现通过紫外光对硅橡胶的亲水本体物理改性。

3.4 紫外光亲水本体化学改性

紫外光亲水本体化学改性是指所引入的可发生紫外光反应的亲水材料不仅自身存在紫外光反应, 还可与硅橡胶本体进行紫外光反应, 利用亲水材料与硅橡胶分子链之间紫外光反应后的化学键作用, 实现对硅橡胶本体材料的亲水化学改性。相对于紫外光本体物理改性而言, 化学改性能够进一步增强亲水材料与疏水硅橡胶之间的相互作用, 实现对硅橡胶的稳定亲水改性。例如, 张威^[36]先制备PDMS-聚氨酯(PU)大单体, 然后通过紫外光将PDMS-PU大单体与亲水单体N,N-二甲基丙烯酰胺(DMA)和NVP进行自由基共聚合得到PDMS-PU-co-DMA-co-NVP本体共聚膜, 亲水单体的加入使得共聚膜材料的表面水滴接触角可减小至88°。Y. GU等^[37]将均含有反应性甲基丙烯酸酯基团的PDMS和聚乙二醇(PEG)在紫外光交联下制备得到本体化学改性的两亲性PDMS/PEG聚合物, 并将两亲性PDMS/PEG制成涂层, 其表面水滴接触角可减小至32.9°, 而且涂层具有优异的抗蛋白和细菌黏附等生物抗污性能。

4 结语

本文从硅橡胶润湿性与抗污性能的关系出发, 将硅橡胶亲水改性的现有技术方法归属为表面改性和本体改性, 表面改性分为表面物理改性和表面化学改性, 本体改性分为本体物理改性和本体化学改性。然后以紫外光亲水改性为例, 介绍了紫外光改性的机理, 以及紫外光亲水改性硅橡胶及其复合材料的相关研究现状和紫外光亲水改性对材料抗污性能的影响, 为通过紫外光亲水改性硅橡胶及其复合材料的润湿性和抗污性能研究提供理论和技术参考。

在亲水改性硅橡胶的后期相关研究中, 仍有

以下几个方面值得重点关注：(1)亲水改性的持久稳定性。目前虽然有部分文献报道,但距离实际应用仍有一定的差距。(2)本体改性的亲水性与材料原有本体性能之间的平衡。硅橡胶的亲水本体改性不可避免地会对硅橡胶本体原有的力学性能、热性能以及抗降解性能等产生影响,实际应用中需要考虑二者的综合影响。(3)亲水改性硅橡胶的亲水程度与材料抗污性能之间的定量或半定量关系的规律揭示。亲水材料的表面水滴接触角具有较大的范围,而亲水程度的不同势必会导致材料抗污性能的不同。

参考文献:

- [1] 杨怡,刘巧云,屠山山,等.橡胶表面紫外光接枝聚丙烯酰胺的研究[J].中国塑料,2014,28(12):30-34.
- [2] 曹蕾,白智名.隔热填料对硅橡胶性能的影响[J].特种橡胶制品,2022,43(4):33-36.
- [3] 杨晓东,逢见光,李洪春.填充型导电硅橡胶的制备与性能研究[J].橡胶工业,2021,68(7):503-507.
- [4] 刘莹.PDMS软/硬膜体系中表面微结构的应变调控及其微流控应用[D].湘潭:湘潭大学,2021.
- [5] HE Z, CHEN Y, YANG J, et al. Fabrication of polydimethylsiloxane films with special surface wettability by 3D printing[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 129(11): 58-65.
- [6] 付亚飞.基于硅橡胶复合材料高强柔性电子皮肤[D].重庆:重庆大学,2019.
- [7] SZYCHER M. Biostability of polyurethane elastomers: A critical review[J]. Journal of Biomaterials Applications, 1988, 3(2): 297-402.
- [8] HE Z, LAN X, HU Q, et al. Antifouling strategies based on superhydrophobic polymer materials[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 157: 106285.
- [9] HE Z, YANG X, MU L, et al. A versatile "3M" methodology to obtain superhydrophobic PDMS-based materials for antifouling applications[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 998852.
- [10] HE Z, YANG X, WANG N, et al. Anti-biofouling polymers with special surface wettability for biomedical applications[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9(1260): 807357.
- [11] LAN X, LEI Y, HE Z, et al. A transparent hydrophilic anti-biofouling coating for intraocular lens materials prepared by "bridging" of the intermediate adhesive layer[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2021, 9(17): 3696-3704.
- [12] LEI Y, LAN X, HE Z, et al. Multifarious anti-biofouling bioprosthetic heart valve materials with the formation of interpenetrating polymer network structures[J]. Materials & Design, 2021, 206: 109803.
- [13] SIDDIQUIE R Y, GADDAM A, AGRAWAL A, et al. Anti-biofouling properties of femtosecond laser-induced submicron topographies on elastomeric surfaces[J]. Langmuir, 2020, 36(19): 5349-5358.
- [14] HE Z, MA M, XU X, et al. Fabrication of superhydrophobic coating via a facile and versatile method based on nanoparticle aggregates[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(7): 2544-2550.
- [15] HE Z, MA M, LAN X, et al. Fabrication of a transparent superamphiphobic coating with improved stability[J]. Soft Matter, 2011, 7(14): 6435-6443.
- [16] 曲祥军,魏志勇,任振傲,等.胶表面的亲水改性[J].功能材料,2011,42(10):1765-1767.
- [17] 李业,杨贺,方菁崑,等.医用导管聚合物亲水润滑涂层研究进展[J].中国医疗器械杂志,2021,45(1):57-61.
- [18] 朱海银.紫外光交联抗污涂层和紫外光3D打印多孔材料的制备及应用[D].合肥:中国科学技术大学,2020.
- [19] 胡宝荣,马烨,孙慕瑾.硅橡胶表面冷等离子体改性的研究 I. 改性对粘接性能的影响[J].特种橡胶制品,1990,11(2):1-5.
- [20] 彭向阳,汪政,黄振,等.基于等离子体处理的硅橡胶憎水恢复物理模型及评价方法研究[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6481-6493.
- [21] ZHOU J, ELLIS A V, VOELCKER N H. Poly (dimethylsiloxane) surface modification by plasma treatment for DNA hybridization applications[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2010, 10(11): 7266.
- [22] 高仁伟.医用硅橡胶材料改性研究[J].中国医疗器械杂志,2015,39(2):122-124,138.
- [23] 孙小渠.医用硅橡胶表面亲水性改性[D].西安:西安科技大学,2014.
- [24] GHALEH H, JALILI K, MAHER B M, et al. Biomimetic antifouling PDMS surface developed via well-defined polymer brushes for cardiovascular applications[J]. European Polymer Journal, 2018, 106: 305-317.
- [25] CAO Q, WU S, WANG L, et al. Effects of the morphology of sulfobetaine zwitterionic layers grafted onto a silicone surface on improving the hydrophilic stability, anti-bacterial adhesion properties, and biocompatibility[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135: 43-44.
- [26] ZHOU S, QIAN S, WANG W, et al. Fabrication of a hydrophilic low-friction poly (hydroxyethyl methacrylate) coating on silicon rubber[J]. Langmuir, 2021, 37(45): 13493-13500.
- [27] 许脉,赵亚群,李洪敏.医用硅橡胶紫外光亲水改性后的抗菌粘附能力研究[J].科学技术与工程,2014,14(28):265-268.
- [28] 孟斐,陈恒武,方群,等.聚二甲基硅氧烷微流控芯片的紫外光照表面处理研究[J].高等学校化学学报,2002,23(7):1264-1268.
- [29] 姚树寅,吴仲岩,杨军,等.PDMS真空紫外光表面亲水改性研究[J].湖北大学学报(自然科学版),2010,32(2):188-191.
- [30] 张良俊,张林,李燕燕,等.室温硫化硅橡胶表面亲水改性研究[J].有机硅材料,2021,35(6):27-30.

- [31] 牟善松,屠美,汤顺清,等. 羟基磷灰石对硅橡胶复合材料抗凝血性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2003(2): 162-164.
- [32] HILLERSTRM A, ANDERSSON M, PEDERSEN J S, et al. Transparency and wettability of PVP/PDMS-IPN synthesized in different organic solvents[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 114: 1828-1839.
- [33] 庞凯敏. 抗菌亲水硅橡胶的制备、表征及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- [34] YAO M, FANG J. Hydrophilic PEO-PDMS for microfluidic applications[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(2): 025012.
- [35] YILGÖR E, ISIK M, SÖZ C K, et al. Synthesis and structure-property behavior of polycaprolactone-polydimethylsiloxane-polycaprolactone triblock copolymers[J]. Polymer, 2016, 83: 138-153.
- [36] 张威. 聚硅氧烷-聚氨酯膜的制备及其与亲水单体的共聚研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [37] GU Y, ZHOU S, LUO H, et al. Temperature-dependent phase-segregation behavior and antifouling performance of UV-curable methacrylated PDMS/PEG coatings[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2016, 54(16): 1612-1623.
- [38] OSTER G, OSTER G K, MOROSON H. Ultraviolet induced crosslinking and grafting of solid high polymers[J]. Journal of Polymer Science, 1959, 34(127): 671-684.
- [39] OSTER G. Crosslinking of polyethylene with selective wave lengths of ultraviolet light[J]. Journal of Polymer Science, 1956, 22(100): 185.
- [40] 刘茵, 张鹏云, 原炳发, 等. 紫外光固化涂料的研究进展及发展趋势[J]. 精细与专用化学品, 2011, 19(9): 42-46.
- [41] 孔令涛. 紫外光固化亲水防雾丙烯酸酯涂层的制备及性能研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- [42] 王娟娟, 马晓燕, 晁小练. 辐射固化技术研究进展[J]. 材料保护, 2005, 38(1): 44-47, 72.
- [43] 张群, 朱洁, 潘晓, 等. 水厂微型动物泄漏与控制技术的研究进展[J]. 四川环境, 2012, 31(4): 119-123.
- [44] 王颖. 紫外光固化环氧丙烯酸酯纳米复合涂层的制备及性能研究[D]. 长春: 东北大学, 2017.
- [45] 王锋. 紫外光固化树脂的合成及其涂膜的性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2008.
- [46] 姚桃花. 紫外光固化涂料用光引发剂的研究进展[J]. 甘肃石油和化工, 2007, 21(3): 8-13.
- [47] 丁立朋, 李拥军, 马兴法. 阳离子聚合光引发剂及其阳离子反应机理[J]. 热固性树脂, 1997(2): 47-54.

收稿日期: 2023-01-10

Research Progress of Hydrophilic Modification of Silicone Rubber and Its Composites by Ultraviolet

YANG Xiaochen^{1,2}, MU Linpeng^{1,2}, WANG Na^{1,2}, HE Zhoukun², LAN Xiaorong^{3,4}

(1. School of Mechanical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 2. Institute for Advanced Study, Research Center of Composites & Surface and Interface Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 3. Institute of Stomatology, Southwest Medical University, Luzhou 646000, China; 4. Luzhou Key Laboratory of Oral & Maxillofacial Reconstruction and Regeneration, the Affiliated Stomatological Hospital of Southwest Medical University, Luzhou 646000, China)

Abstract: Based on the anti-fouling demand of silicone rubber and its composites, the preparation methods of hydrophilic modified silicone rubber and its composites were reviewed in this paper, which took hydrophilic modification of silicone rubber as the technical means to improve its anti-fouling ability. The hydrophilic modification methods of silicone rubber were mainly divided into surface modification and bulk modification, among which surface modification was divided into surface physical modification and surface chemical modification, and bulk modification was divided into bulk physical modification and bulk chemical modification. The mechanism of ultraviolet modification was introduced, the research status of ultraviolet hydrophilic modification of silicone rubber and its composites was presented, and the influence of ultraviolet hydrophilic modification on the anti-fouling performance of the materials was discussed. Several key research directions of hydrophilic modification of silicone rubber in the future were put forward, which could provide a reference for the research on the wettability and anti-fouling ability of hydrophilic modified silicone rubber and its composites.

Key words: ultraviolet; hydrophilic modification; silicone rubber; composite; anti-fouling ability