

功能化高分子涂层在抗菌领域的创新设计与应用

吴 斌 王 力 林青儿 谢芳玉

汉基森科技(杭州)有限公司 浙江 杭州 310000

摘 要: 基于功能化高分子涂层具有特殊性和可设计性的优点, 利用高分子材料功能化改性来导入抗菌活性基团或者纳米颗粒等手段来达到材料长期高效抗菌的目的, 根据已经介绍的抗菌涂层的设计思想, 并结合论文的工作来阐述抗菌涂层设计的基本原理, 阐述抗菌机理, 材料改性以及结构性能控制, 对其表面性质以及相应的杀菌作用进行对比分析, 针对一些重要的应用包括医疗、食品包装、公共设施等, 对其所涉及的核心要素以及具体的应用场景进行描述, 同时, 通过对应材料的性能特点、制备工艺特点和实际需求的特点来进行挖掘研究。

关键词: 功能化高分子; 抗菌涂层; 创新设计; 材料改性; 应用领域

1 引言

在世界各国大力宣传提高全球公共卫生安全意识的当下, 抗菌材料研究与开发成为了材料科学与生物医学交叉领域重要方面。因其具有较强的可设计性、优良的成膜性和生物相容性等特点, 能从根源上防止杀菌剂的使用并能长效保持涂层的抗菌性, 功能化高分子涂层是防止表面微生物污染的较好选择, 通过向高分子材料中引入抗菌活性基团或纳米粒子等功能单元可获得抗菌性能持久稳定的抗菌高分子材料; 通过调节涂层微观结构和功能化技术来改善其杀菌效率、生物安全性能、环境稳定性等。本文以功能化高分子抗菌涂层为重点, 详细地介绍了其工作原理、制备方法以及应用现状等内容, 希望通过本文的分析可为抗菌涂层材料的相关研究人员给予一定的参考意义。

2 功能化高分子抗菌涂层设计原理

2.1 抗菌机制与作用靶点

抗菌机制作为功能化高分子涂层实现抗菌、杀灭微生物的基础。目前常用的抗菌机制主要有接触杀菌、释放杀菌和光催化杀菌3种。其中, 接触杀菌主要是利用高分子涂层表面季铵盐、胍基等阳离子基团与细菌细胞膜磷脂双分子层发生静电吸附, 造成细菌细胞膜完整性的破坏, 使细菌细胞内物质泄露; 释放杀菌是利用涂层中载有的银离子、抗生素等活性成分的释放抑制微生物DNA的复制和蛋白质的合成; 光催化杀菌则是利用TiO₂、ZnO等纳米材料经光照后可产生活性极强的羟基自由基·OH、超氧阴离子·O₂⁻和过氧乙酰硝酸酯等活性物种, 可将微生物内部结构和代谢酶进行氧化破坏, 因此该机制作用靶点为细菌细胞膜、细胞壁、DNA和蛋白质等。该机制属于多靶点协同作用, 避免了单独杀菌方式可能导致的耐药性, 是高性能抗菌涂层设计的科学依据。

2.2 高分子材料功能化改性策略

高分子材料功能化改性是获得抗菌涂层的重要手段。物理改性是将抗菌剂分散在高分子基体内部, 通过共混、涂覆等方式, 使纳米银颗粒在聚氨酯复合涂层中共存, 利用纳米银的广谱抗菌性能提高材料的抑菌效果; 化学改性是在高分子链上引入抗菌基团, 通过接枝、交联等方式使抗菌活性物质附着于链端, 可用ATRP原子转移自由基聚合技术将季铵盐单体接枝到聚丙烯酸酯主链上, 并将接枝点处形成的链段作为抗菌基团进行均匀分布^[1]; 表面改性是在高分子表面进行等离子体处理或者化学气相沉积等操作, 使高分子材料表面存在一层抗菌的功能层, 可以在降低抗菌剂含量的同时不会影响高分子本身的性能。不同的改性方法存在各自的优缺点, 可根据需要选择相应的应用及联合应用, 既要保证材料具有良好的抗菌性能又要保证材料具有较好的稳定性。

2.3 涂层结构与性能调控理论

涂层结构和性能调控是实现抗菌效果的最大化原理基础。从微观上讲, 涂层交联密度、孔隙率以及抗菌剂的分散状态均会对抗菌性产生影响, 合理提高涂层交联密度可以提高涂层稳定性, 但是过高交联会抑制抗菌剂释放; 孔隙结构可促使抗菌剂与微生物接触, 但过大的孔隙会影响涂层的机械性能。从宏观上看, 利用多层复合结构的设计思路可以实现代生协同, 在底层采用增加附着力方式, 中间层加入抗菌剂, 表层采用疏水/自清洁形式来阻拦微生物的附着。通过调控涂层厚度、表面粗糙度等可改善材料与微生物之间的接触界面, 进而提高抗菌效率。根据上述理论, 并结合材料科学和材料工程, 通过涂层结构调控实现抗菌涂层的多维性能控制。

3 创新设计方法与技术

3.1 新型抗菌高分子材料合成

合成新型抗菌高分子材料着眼于分子结构创新及功能集成,利用可控聚合方法调控抗菌基团在分子链上的分布和密度;例如利用RAFT技术将季铵盐单元通过聚合手段在疏水聚乙二醇主链上间规分布并均匀连接,保证了其具有高效的抗菌活性以及较强的水溶性和生物相容性^[3];而天然高分子的改性也是重点之一,例如将壳聚糖进行化学修饰,引入银纳米颗粒或抗菌肽,这样既可以保持抗菌材料的生物可降解性又能提升抗菌性能和稳定性;除此外,基于条件切换条件下的智能响应型高分子也得到了重点关注,如用接枝抗菌基团后的温敏型聚N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAM),可通过改变温度使得PNIPAM发生相应转变,让抗菌成分从链节中释放出来达到按需抗菌的目的,该类型抗菌材料也被引入到医学领域,成为动态抗菌的新生力量,如表一所示:

表1 不同合成技术对新型抗菌高分子材料性能的影响

合成技术	典型材料	抗菌剂接枝率 (%)	生物降解率 (1个月)	最小抑菌浓度 (MIC, $\mu\text{g/mL}$)
ATRP技术	聚甲基丙	85	5%	10
	烯酸酯-季铵盐			
点击化学	胍基改性	92	3%	8
	聚氨酯			
天然高分子改性	壳聚糖-银纳米颗粒	-	30%	5

3.2 涂层制备工艺优化路径

创新涂层制备工艺是制备高性能抗菌涂层的重要技术手段之一,而且传统的涂覆技术不断改进升级:静电喷涂通过电荷作用力将涂料粒子均匀附着在基材上,提高了涂层的均匀性和致密性,并减少了材料浪费,适用于大批量的工业化生产;电泳沉积能根据基材复杂的形状以及多孔性质,可使涂料粒子在电场的作用下发生定向迁移并沉积,适用范围很广,在医用导管、人工关节等异形器械的抗菌处理方面有很大的优势;3D打印技术根据需要可以很精准地打印出想要的形状和厚度以及成分分布,这使得制备抗菌涂层的过程本身也具备抗菌功能,并且对于一些对抗菌性能和结构精度要求比较高的个性化医疗植入体、组织工程支架等方面有很大的优势,极大地拓宽了抗菌涂层的应用。

3.3 多维度性能协同设计策略

抗菌涂层实际运用时,需要综合考虑抗菌性能、力学强度、化学稳定性等各种性能指标,在此前提下,实现上述各项性能的均衡兼顾是运用的实际所需。可以利用梯度复合结构使各方面指标进行优化:在外层涂覆高含量的抗菌剂,具有较好的杀菌能力;在中间层内加入

柔性的高分子链段,从而保证涂层有较好的韧性和抗冲击性;在底层中通过化学键或者界面改性的方式增强基材与涂层之间的结合力,形成了“抗菌-力学-界面”的三重功能体系。在此基础上,通过利用无机纳米抗菌剂(例如纳米银、纳米二氧化钛)与高性能聚合物基体(如聚醚醚酮、环氧树脂)相互搭配,既利用了无机纳米材料高浓度下的强效抑菌作用,也结合了高性能聚合物的良好力学和化学性能^[4]。同时,通过分子动力学模拟、有限元分析等手段,能够在一定范围内预先判断不同配方与不同结构设计对涂层性能的影响,然后通过参数优化—实验验证—参数调整—再次实验验证的方法,最终实现抗菌性能、耐磨性能以及耐腐蚀性能等方面的协同提升,使得涂层能够针对不同应用场景的不同需求制作出满足相应使用场景要求的高性能抗菌涂层。

4 抗菌涂层应用方向拓展

4.1 医疗与卫生领域应用

功能化高分子抗菌涂层是目前医疗、卫生领域的必需产品。手术器械采用抗菌涂层后,能很好的避免术后感染的发生,在银系抗菌剂和医用级聚合物复合后,其银离子的广谱抗菌性能够很好的阻断细菌的吸附以及生物膜的生成,延长手术器械寿命;植入性医疗产品如心脏起搏器、人工关节等产品表面涂覆抗菌涂层要求不仅要有高效抗菌性能还要有优良的生物相容性,用聚多巴胺与抗生素形成的复合涂层能在保证抗菌的同时,获得良好的界面结合力和可控的药物释放性能,从而减少植入体相关的感染发生率;而医院公共设施如门把手、病床扶手等使用含有季铵盐抗菌涂层的医疗工具能起到良好的长效抑菌作用,阻止病菌的传播,有效地防止了交叉感染的发生。

4.2 食品与包装领域应用

例如,在食品和包装中应用抗菌涂层,能保障食品的质量和延长食品的货架期;而在食品接触材料表面涂覆的抗菌涂层必须满足相关标准的要求。由于其既具有天然抗菌作用又可以实现光催化自清洁,所以将壳聚糖-纳米TiO₂复合涂层用作食品包装膜是一个很好的选择。而针对新鲜果蔬保鲜使用的可食性抗菌涂层,则将溶菌酶、茶多酚等天然抗菌剂与可降解高分子相结合,在抑制霉菌生长的同时,保持果蔬正常呼吸。冷链物流的运输设备上比如冷藏车车厢的内壁、周转箱等场所使用的抗菌涂层可防止嗜冷菌滋生,进而保证食品在储存、运输过程中不受微生物污染,减少微生物造成的食品损耗(见表二)。

表2 抗菌涂层在食品包装不同应用场景下的效果数据

应用场景	涂层材料	微生物增长率降低	保质期延长
食品包装膜	壳聚糖-纳米TiO ₂	80% (15天)	2-3倍
果蔬保鲜	溶菌酶-可降解高分子	75% (7天)	1.5-2倍
冷链设备	季铵盐改性聚氨酯	65% (30天)	1-1.5倍

4.3 公共设施与环境领域应用

由于公共设施与环境等领域需要长效抑菌和环保的特性，所以对使用场所为人员聚集较广的电梯按键、自动扶梯扶手、城市公共交通工具上的座椅和扶手，以及场所地面等部位均可使用包含光催化纳米材料的抗菌涂层，通过太阳光分解有机物并杀菌；或将具有超疏水性能的抗菌涂层应用于上述场所，使这些部位不容易被玷污，并且在日常管理中可以减少保洁频率、便于清洁，并且能够物理阻隔部分微生物粘附；同样，在建筑物外表面也存在自清洁抗菌涂料的应用场景，可以通过结合纳米ZnO及有机硅树脂，使得该类涂料兼有光催化效应分解空气回流污染物与抑制藻类、霉菌等微生物作用，保持建筑物外表面干净清爽的同时，提高环境质量、节省维护费用^[5]。

5 结语

功能化高分子抗菌涂层利用抗菌功能创制及联用并

应用于多领域的产品表面可大幅提升产品的抗菌性，并且能维护好人们的公共健康。材料改性、工艺优化、性能协同是改善高分子抗菌涂层性能的基础。后续可着力于构建智能化响应型涂层、降低其制造成本、提高其环保性等方面开发长效抗菌性和优良生物安全性兼得的抗菌涂层，进而进一步驱动抗菌涂层向更加高效、智能、绿色的崭新时代前行。

参考文献

[1]刘骏锋,马浩迪,葛树爱,孙浩洋,王豫鑫,权春善,张丽影.高分子抗菌材料研究进展[J].化工新型材料,2025,53(1):224-229+237.

[2]郑怀礼,刘薇,孙漫梨.具有抗菌功能的天然高分子絮凝剂研究进展[J].应用化学,2024,41(2):177-189.

[3]赵鸣岐,黄威嫔,胡米,任科峰,计剑.生物医用材料表面高分子基涂层的功能化构筑[J].材料导报,2019,33(1):27-39.

[4]廖依敏,陈汉霖,王方方,张虎.功能化自清洁涂层在车载镜头表面的应用综述[J].表面技术,2025,54(6):36-46.

[5]许雨岑,杨建军,吴庆云,吴明元,张建安,刘久逸.抗菌型高分子水凝胶研究进展[J].化工新型材料,2022,50(9):218-224+228.