·综述·

卤胺高分子抗菌材料的研究进展与应用前景

赵鑫玉[1] 丁 放[1] 任学宏[2*]

([1]武汉纺织大学纺织科学与工程学院 武汉 430200)
([2]南通大学纺织服装学院 南通 226019)

摘要：卤胺高分子是一类具有广谱抗菌性能的高分子材料，因其独特的卤胺结构而展现出高效、长效的抗菌活性。近年来，随着材料科学和抗菌技术的快速发展，卤胺高分子在医疗、水处理、纺织品和食品包装等领域的应用研究取得了显著进展。本文综述了卤胺单体和卤胺高分子的种类、制备方法及其在医用防护材料、纺织品、医疗器械涂层、水/空气过滤材料等领域的研究进展，重点探讨了卤胺高分子在抗菌敷料、涂料、口罩、口腔种植体等医用防护产品中的应用，以及其在抗生物膜形成和抗感染方面的优势。此外，还分析了卤胺高分子实际应用中面临的挑战，如长效稳定性和生物相容性等，并展望了未来发展方向，包括开发新型卤胺衍生物、结合纳米技术制备复合抗菌材料以及推动临床应用。卤胺高分子作为一种高效抗菌材料，在医疗防护和公共卫生领域具有广阔的应用前景。

关键词：卤胺高分子；抗菌材料；医用防护；消毒

Research Progress and Application Prospects of *N*-halamine Antibacterial Polymeric Materials

ZHAO Xin-yu[1], DING Fang[1], REN Xue-hong[2*]

([1]*School of Textile Science and Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200*)
([2]*School of Textile and Clothing, Nantong University, Nantong 226019*)

Abstract: *N*-halamine polymers are a class of polymeric materials with broad-spectrum antibacterial properties, which exhibit highly efficient and long-lasting antibacterial activity due to their unique *N*-halamine structure. In recent years, with the rapid development of materials science and antibacterial technology, significant progress has been made in the application of *N*-halamine polymers in fields such as medical care, water treatment, textiles, food packaging and so on. This work reviews the types, preparation methods of *N*-halamine monomers and polymers, as well as their research progress in medical protective materials, textiles, medical device coatings, water/air filtration materials, *etc*. It focuses on discussing the application of *N*-halamine polymers in medical protective products such as antibacterial dressings, coatings, masks, and oral implants, as well as their advantages in anti-biofilm formation and anti-infection. In addition, the challenges *N*-halamine polymers faced in practical applications, such as long-term stability and biocompatibility are analyzed. The future development directions, including the new *N*-halamine derivatives, the preparation of composite antibacterial materials by combining nanotechnology, and the promotion of clinical applications have also been prospected. As efficient antibacterial materials, *N*-halamine polymers have broad application prospects in medical protection and public health fields.

Keywords: *N*-halamine polymers; Antimicrobial material; Medical protection; Disinfection

2025-10-30 收稿，2026-01-05 录用，2026-03-06 网络出版
基金项目：湖北省中央引导地方科技发展专项(项目号 2022BGE253)
* 通信联系人：任学宏，E-mail: xuehongr@hotmail.com
doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.312

引用：赵鑫玉, 丁放, 任学宏. 卤胺高分子抗菌材料的研究进展与应用前景. 高分子通报, **2026**, 39(4), 585–599.
Citation: Zhao, X. Y.; Ding, F.; Ren, X. H. Research progress and application prospects of *N*-halamine antibacterial polymeric materials. *Polym. Bull.* (in Chinese), **2026**, 39(4), 585–599.

随着全球公共卫生问题的日益突出，抗菌材料的研究与开发受到了广泛关注。传统的抗菌剂如银离子、季铵盐等虽具有一定的抗菌效果，但存在耐药性、毒性、环保及持久性等问题[1,2]。因此，开发新型高效、安全、环保的抗菌材料成为当前研究的重点。卤胺高分子作为一种新兴的抗菌高分子材料，因其独特的卤胺结构而表现出优异的广谱抗菌性能，近年来在抗菌材料领域受到广泛关注。卤胺基团通过与微生物细胞膜相互作用，破坏其结构并导致细胞死亡，从而实现高效杀菌[3]。此外，卤胺高分子还具有良好的可再生性，可通过简单的卤化反应恢复其抗菌活性，延长使用寿命。目前，卤胺高分子已广泛应用于抗菌敷料、防护纺织品、医疗器械涂层及过滤材料等领域，展现出显著的抗感染和抗生物膜形成能力[4,5]。

近年来，卤胺高分子的研究取得了显著进展。通过分子设计和材料改性，研究者成功开发出多种具有不同结构和功能的卤胺高分子，并探究了其在医疗、水处理、纺织品、食品包装等领域的应用潜力[6]。例如，在医疗领域，卤胺高分子被用于制备抗菌涂层、伤口敷料和药物载体，显著降低了感染风险；在纺织品领域，其被应用于功能性纤维和面料，赋予纺织品持久的抗菌性能[7]。然而，卤胺高分子的实际应用仍面临一些挑战，如材料稳定性、生产成本及规模化制备等问题。因此，深入研究卤胺高分子的性能优化、环境安全性及其多功能化应用，不仅具有重要的科学意义，也为解决实际公共卫生问题提供了新的思路[8]。本文旨在综述卤胺高分子的制备方法及其在不同领域的应用研究进展，并展望其未来发展方向。通过系统总结现有研究成果，为卤胺高分子的进一步研究与应用提供参考，推动其在抗菌材料领域的广泛应用。

1 卤胺高分子抗菌剂

国外对于卤胺抗菌剂的研究在很早开始，因其具有很强的杀菌能力，并且在水中可以稳定的释放游离氯，备受人们的青睐，然而小分子型卤胺抗菌剂存在抗菌不稳定、含量低、不能直接固着在不同基材表面，很难形成非溶出型抗菌材料等缺点，其使用范围受到了一定程度的限制[9,10]。卤胺高分子抗菌剂的稳定性优于小分子型卤胺抗菌剂，不会扩散到皮肤表面，且卤胺高分子抗菌剂中卤胺含量较小分子抗菌剂中多，杀菌活性也大大增强，因其巨大的应用潜力，在过去十多年中受到广泛关注[11,12]。卤胺高分子抗菌剂是由具有反应性基团的单体通过共聚或接枝获得，合成卤胺高分子的单体需要具有特定反应基团，具有这些反应基团的单体在氧化−还原引发剂体系存在的条件下，可以发生聚合反应获得卤胺高分子抗菌剂。而单体上的反应基团不同，也会对高分子抗菌剂的性能和应用有一定影响，常见的反应基团类型包括不饱和双键、乙酰烯基和有机硅氧烷等[13]。

1.1 聚烯烃类卤胺高分子前驱体

聚烯烃类卤胺高分子是由含有碳碳双键的卤胺单体通过聚合反应形成，该类单体可在引发剂作用下发生接枝聚合反应整理到棉、涤纶等多种织物上，也可多元单体共聚，共聚后的产物具有较强的抗菌效果，卤胺单体中5,5-二甲基海因(DMH)的应用最为广泛。研究者通过以DMH为原料，通过取代法制备聚烯烃类卤胺前驱体。例如，Eknoian等[14,15]以5,5-二甲基海因为原料合成了一系列烯烃类卤胺前驱体(如图1A中结构式a~c)：以4-氯甲基苯乙烯取代DMH海因环上N－H键上氢形成为烯烃类卤胺单体前驱体，经过引发剂引发得到卤胺高分子；以4-甲基苯乙酮和氰化钾、碳酸铵反应得到聚[5-甲基-5-(4-乙烯基苯基)咪唑烷-2,4-二酮]。研究人员以1,3,5-三嗪-2,4-二酮、1,3,5-三嗪烷-2,4-二酮和2,2,6,6-四甲基-4-哌啶醇为原料合成了聚烯烃类卤胺高分子。例如，Sun等[16]以1,3,5-三嗪-2,4-二酮为原料，通过取代反应，得到聚[6-(4-乙烯基苯基)-1,3,5-三嗪烷-2,4-二酮](如图1A中结构式d)、Eknoian等[17]用酰基化聚苯乙烯与二硫脲反应生成聚[6-甲基-6-(4-乙烯基苯基)-1,3,5-三嗪烷-2,4-二酮] (如图1A中结构式e)。Cai等[18]以2,2,6,6-四甲基-4-哌啶醇为原料制备了一种新型的氨基–卤胺共聚物聚苯乙

烯(ANHCPS)纳米粒子(如图1A中结构式f)，可以控制抗菌粒子的形态和大小。为了努力开发新的不溶性卤胺高分子消毒剂，且易于合成和易于再填充以及在水处理中具有良好的耐久性，Sun等[19,20]以DMH和烯丙基溴反应合成了聚(3-烯丙基-5,5-二甲基海因)(如图1B中结构式a)；以DMH、烯丙基溴和7,8-苯并-1,3-二氮杂三[4.5]癸烷-2,4-二酮合成了聚[3-丙烯基-5,5-双(1,2,3,4-四氢萘-2-基)咪唑烷-2,4-二酮](如图1B中结构式b)。现有的乙内酰脲共聚物纳米粒子并没有实现对纳米粒子分散性和粒径的调控。为解决这一问题，Li等[21]采用乳液聚合法，通过调节供氢体和受氢体，合成了两亲性海因共聚物纳米粒子(P(VBDH-BA-NVP)NPs)，并通过氯化处理制备了两亲性卤胺共聚物纳米粒子(P(ClV-BA-NVP)NPs)。

1.2　聚乙酰烯基类卤胺高分子前驱体

烯烃类卤胺单体前驱体在大多数常见溶剂中都不溶，因此它们只适用于制造水和空气过滤器，这限制了它们的应用。基于此，Worley的团队最早发现了经改性的噁唑烷酮，产物类似于用于多种应用的丙烯酸酯单体，这种结构可溶于多种溶剂，突破了烯烃类卤胺高分子消毒剂存在的局限。该单体可以掺入到几乎任何聚合物框架中，使其具有杀菌性，并且只需要掺入少量的卤胺(<5%)，因此整体聚合物性能几乎不会受到影响。

Sun等[22]以噁唑烷酮作为杂环前体合成了聚[(4-乙基-2-氧代噁唑烷-4-基)甲基丙烯酸酯](如图1C中结构式a)，Sun等[23]以2,2,6,6-四甲基-4-哌啶醇为原料合成了聚(2,2,6,6-四甲基哌啶-4-丙烯酸酯)(如图1C中结构式b)，Ren等[24]以5,5-二甲

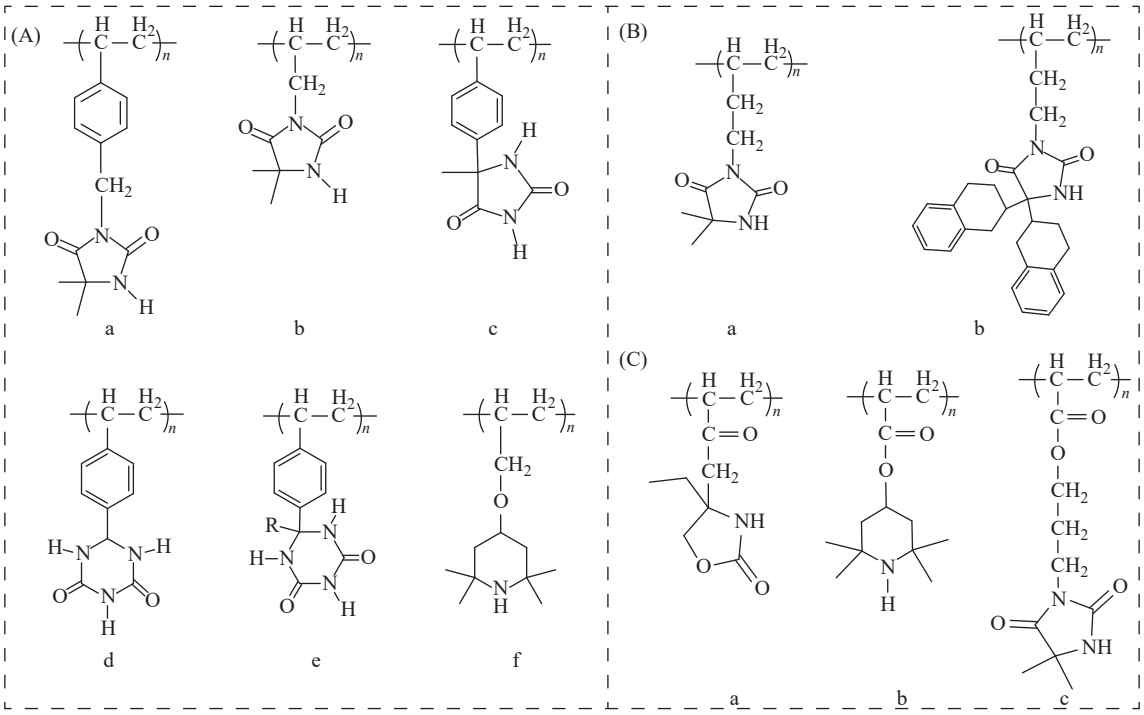


图 1　(A)聚烯烃类卤胺前驱体：聚[3-(4′-乙烯基苄基)-5,5-二甲基海因] (a)、聚(3-烯丙基-5,5-二甲基海因) (b)、聚[5-甲基-5-(4-乙烯基苯基)咪唑烷-2,4-二酮] (c)、聚[6-(4-乙烯基苯基)-1,3,5-三嗪烷-2,4-二酮] (d)、聚[6-甲基-6-(4-乙烯基苯基)-1,3,5-三嗪烷-2,4-二酮] (e)、聚[4-(烯丙氧基)-2,2,6,6-四甲基哌啶] (f)；(B)聚烯烃类卤胺前驱体：聚(3-丙烯基-5,5-二甲基海因) (a)、聚[3-丙烯基-5,5-双(1,2,3,4-四氢萘-2-基)咪唑烷-2,4-二酮] (b)；(C)聚乙酰烯基类卤胺前驱体：聚[(4-乙基-2-氧代噁唑烷-4-基)甲基丙烯酸酯] (a)、聚(2,2,6,6-四甲基哌啶-4-丙烯酸酯) (b)、聚[3-(3′-丙烯酸丙酯)-5,5二甲基海因] (c)

Figure 1　(A) Polyolefin halogen amine precursors: poly(3-(4′-vinylbenzyl)-5,5-dimethylhydantoin) (a), poly(3-allyl-5,5-dimethylhydantoin) (b), poly[5-methyl-5-(4-vinylphenyl)imidazolidine-2,4-dione] (c), poly[6-(4-vinylphenyl)-1,3,5-triazinane-2,4-dione] (d), poly[6-methyl-6-(4-vinylphenyl)-1,3,5-triazinane-2,4-dione] (e), poly[4-(allyloxy)-2,2,6,6-tetramethylpiperidine] (f); (B) Polyolefin halogen amine precursors: poly[3-(but-3-en-1-yl)-5,5-dimethylimidazolidine-2,4-dione] (a), poly[3-(but-3-en-1-yl)-5,5-bis(1,2,3,4-tetrahydronaphthalen-2-yl)imidazolidine-2,4-dione] (b); (C) Polyacryloyl halogen amine precursor: poly[(4-ethyl-2-oxooxazolidin-4-yl)methyl acrylate] (a), poly(2,2,6,6-tetramethylpiperidin-4-yl acrylate) (b), poly[3-(acryloyloxypropyl)-5,5-dimethylhydantoin] (c)

基海因作为杂环前体合成聚[3-(3′-丙烯酸丙酯)-5,5二甲基海因](如图1C中结构式c)。这类卤胺前驱体合成的聚合物能溶于大多数溶剂，特别是常用溶剂水和乙醇等，可以减少其他有机溶剂的使用。

常见的卤胺单体一般只含有1个能形成卤胺基团的N－H键，这就使产品中有效的抗菌成分含量较低。如果单体中含有多个N－H键，则产品中有效抗菌成分的含量会得到很大程度的提高，从而增强产品的抗菌活性。基于此，Kocer等[25]合成了一种新型的单体，乙内酰脲丙烯酰胺(HA)。HA作为一种新型高效的卤胺单体，且具有水溶性，可用于合成水溶性的高分子。HA含有3个N－H位点和31 wt%的理论载氯量为其提供了许多潜在的应用，可以应用于涂料和油漆等领域。HA作为一种新型高效的卤胺单体，水溶性很好，可以加入到涂料中做抗菌剂使用。例如，Kocer等[26]将HA与硅氧烷共聚单体共聚(图2a)，将合成的聚合物以1.5 wt%混合到商业水基乳胶漆中，发现加入共聚物的商业水基乳胶漆依然具有更好的杀生物功效。值得注意的是，乙内酰脲丙烯酰胺有毒，具有健康和环境危害，使用时容易出现安全危害，需合理应对其潜在风险。

1.3 聚硅氧烷类卤胺高分子前驱体

硅氧烷类卤胺单体前驱体的特点是含有硅氧烷结构。该结构具有强反应性，易水解成硅醇，能与各类织物上的羟基反应，与织物以共价键连接，从而整理到织物上，因此适用于各类表面含有羟基的织物的整理改性。但是由于硅氧烷基结构具有疏水性，卤胺硅氧烷仅部分溶于水，并且需要有机溶剂的辅助来溶解，在工业应用中受限。Chen等[27]在研究中表明，乙内酰脲环3位烷基链长度的增加可导致与细胞的接触位点减少，并且由于抗菌材料表面疏水性的增加而导致消毒速率降低。Kocer等[28]研究了卤胺硅氧烷乙内酰脲环5位烷基取代对微生物灭活率的影响，发现烷氧基结构的疏水性会影响卤胺前驱体的消毒效率，因此要提高硅氧烷类前驱体的消毒效率，必须解决其不溶于水的问题，基于此，Ren等[29,30]合成一系列能溶于水的硅氧烷类卤胺前驱体(图2b)，这一研究扩大了聚硅氧烷类卤胺高分子的应用范围。

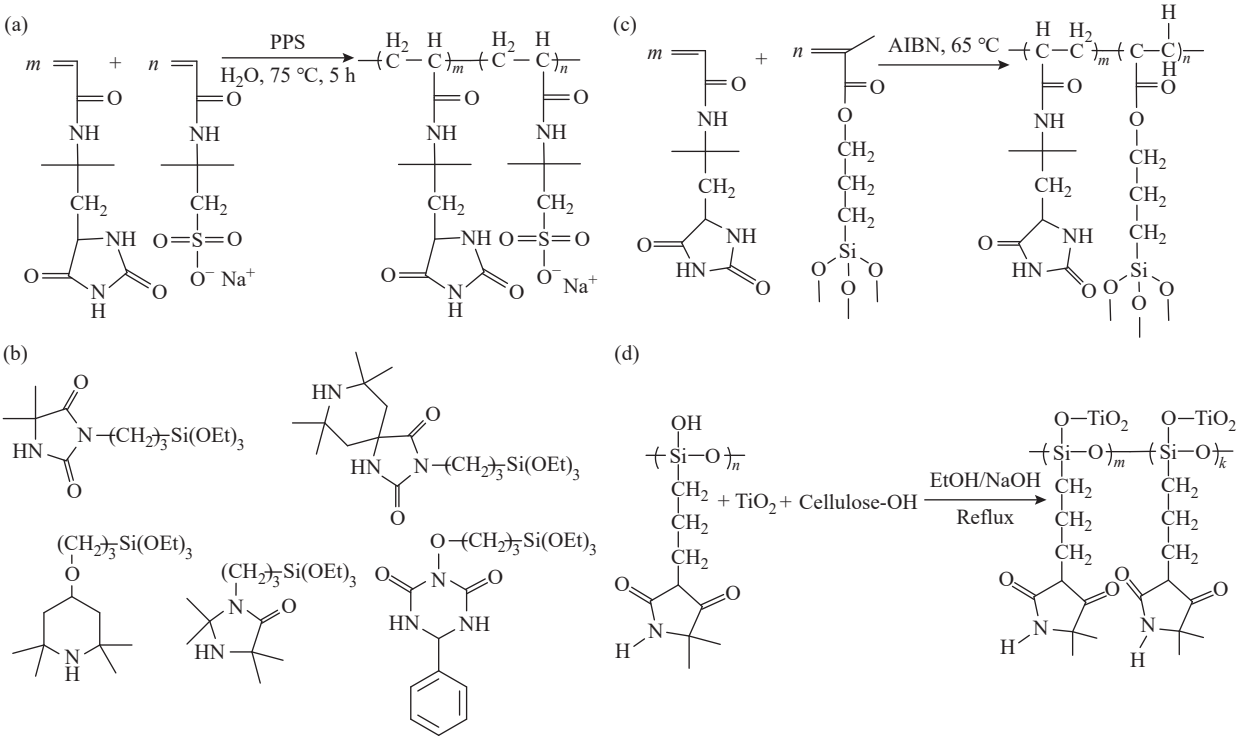


图 2 (a) HA和SA的共聚物；(b)一系列能溶于水的硅氧烷类卤胺前驱体；(c)硅氧烷卤胺前驱体聚合物的制备；(d) TiO_2改性聚合物PSPH整理棉织物的过程图

Figure 2 (a) Copolymer of HA and SA; (b) Structural formulae of a series of water-soluble siloxane halamine precursors; (c) Preparation of siloxane halamine precursor polymers; (d) Process diagram of TiO_2-modified polymer PSPH finishing on cotton fabrics

硅氧烷类卤胺单体前驱体自发现以来广泛应用于各类表面含有羟基的织物的整理改性，但硅氧烷卤胺改性棉织物的水洗和抗紫外稳定性能较差，于是有些学者制备了新型硅氧烷卤胺高分子，来解决这一问题。Kocer等[25]通过将卤胺单体与硅氧烷单体发生自由基聚合，制备了一种新型的硅氧烷卤胺高分子(图2c)，该聚合物没有采用硅氧烷链做聚合物主链，而是作为单体中的一个强反应基团，因此经过改聚合物整理后的棉织物具有很好的水洗和抗紫外性能，同时具有良好的再生性能。Li等[31]还通过加入抗紫外整理剂如TiO_2来提高硅氧烷卤胺改性棉织物的抗紫外性能(图2d)，经改善后整理棉织物的抗紫外性能得到极大的提高，在紫外光照下，织物上的活性氯含量下降缓慢，即使经过24 h照射后，织物上仍然具有较高的含氯量，保留着较好的抗菌性能；并且损失的活性氯都能通过再次氯化重新恢复[32]。但是，由于硅氧烷化合物水解后产生的硅醇键具有很强的酸性，并且通过高温烘焙整理到棉织物上，对织物的物理机械性能和手感影响较大，该问题还需后续研究深入解决。

2　卤胺高分子抗菌剂的应用

在过去的几十年里，人们开发了许多不同的卤胺高分子抗菌剂，其中一些已经商业化。卤胺高分子抗菌剂已经在各个领域广泛应用，包括水处理[33~42]、空气净化[43~51]、抗菌纺织品[52~57]、固体表面涂料和抗菌薄膜[58~62]、医疗防护产品[63~75]等。

2.1　水处理

2.1.1　消毒剂

在水处理领域，饮用水源、污水处理厂的废水以及自然水体中常常检测到病原体，这些病原体的存在可能对公众健康构成威胁[33]。水消毒通常依赖于游离氯或水溶性消毒剂。然而，游离氯与有机物质反应时可能生成三卤甲烷等化合物，这些化合物被怀疑具有致癌性[34]。为避免这些问题，可以采用卤胺抗菌剂，这类物质能够有效灭活微生物，同时不会向需要杀菌消毒的饮用水源、污水处理厂的废水等水中释放有毒化学物质[35]。已有研究表明，卤胺高分子在水中具有很好的消毒杀菌效果。最具有代表性并已经投入工厂使用的是Worley等[36]直接合成的多种含卤胺的不溶性聚合物，其中的乙酰脲酰化聚苯乙烯成功应用于HaloSource公司的商业产品。特别值得一提的是，他们的HaloPure溴产品通过共价键将溴与聚苯乙烯多孔珠的氢妥英环结构结合，展现出控制异养微生物污染和抑制生物膜形成的显著能力，能够通过与水中微生物接触，促使其渗透HaloPure介质床。Ahmed等[37]开发了一种新的交联卤胺高分子——交联聚表氯尿醇，研究发现该聚合物对病毒和细菌具有良好的抗菌活性。该聚合物已成功用于实验室规模的水净化，这种系统的大规模应用可以降低目前用于水消毒的游离氯的毒性作用，产生无细菌、病毒和卤离子的水(图3a)。

气凝胶具有独特的多孔结构和优异的物理化学性质，将卤胺高分子加入到气凝胶材料中可以提高卤胺高分子和水的接触面积，提高杀毒效率，此种复合材料在卤胺基水处理材料领域展现出巨大潜力。Yao等[38]创新性地将BODIPY光敏剂与卤胺基团共同修饰到共价有机框架(BCOF-Cl)中，并与天然高分子壳聚糖复合制备了BCOF-Cl@壳聚糖气凝胶。结果表明，BCOF-Cl通过化学和PDT的协同作用展现出多功能的杀菌活性。除了气凝胶，多孔有机聚合物复合纤维材料在水处理领域也得到了广泛应用。Tang等[39]研究者以纤维素基纤维为基础，采用三聚氰氯和多氨基化合物作为卤胺型多孔有机聚合物的前驱体，通过表面活化和原位合成反应，以及次卤酸盐漂洗处理，成功制备了卤胺多孔有机聚合物复合纤维材料(NX-POP@cell)。该材料可用作接触式抗菌水过滤材料，利用其表面具有氧化性的卤胺结构与细菌发生氧化还原反应，从而破坏细菌的蛋白质、DNA、RNA和脂质，达到杀灭微生物的效果，具有在环境水过滤和饮用水净化等领域的广泛应用潜力。Fu等[40]设计了一种氯可再充电纤维支撑的杀生物多孔有机聚合物(即FPOP)。根据在棉纤维上的表面活化原位缩合方法(如图3b)，FPOP中仲胺的存在能够在稀释的氯漂白剂溶液处理后被氯化以形成卤胺结构，从而允许FPOP执行潜在的快速和稳健的生物杀灭活性。解决了目前报道的卤胺材料难以同时实现强杀菌效率和长期稳定性的难题。

2.1.2　油水分离

卤胺高分子不仅可以作为水处理中的消毒剂，还能用于含油废水的油水分离。Ren等[41]利用纳米纤维素(NCC)和壳聚糖(CS)作为原料，开

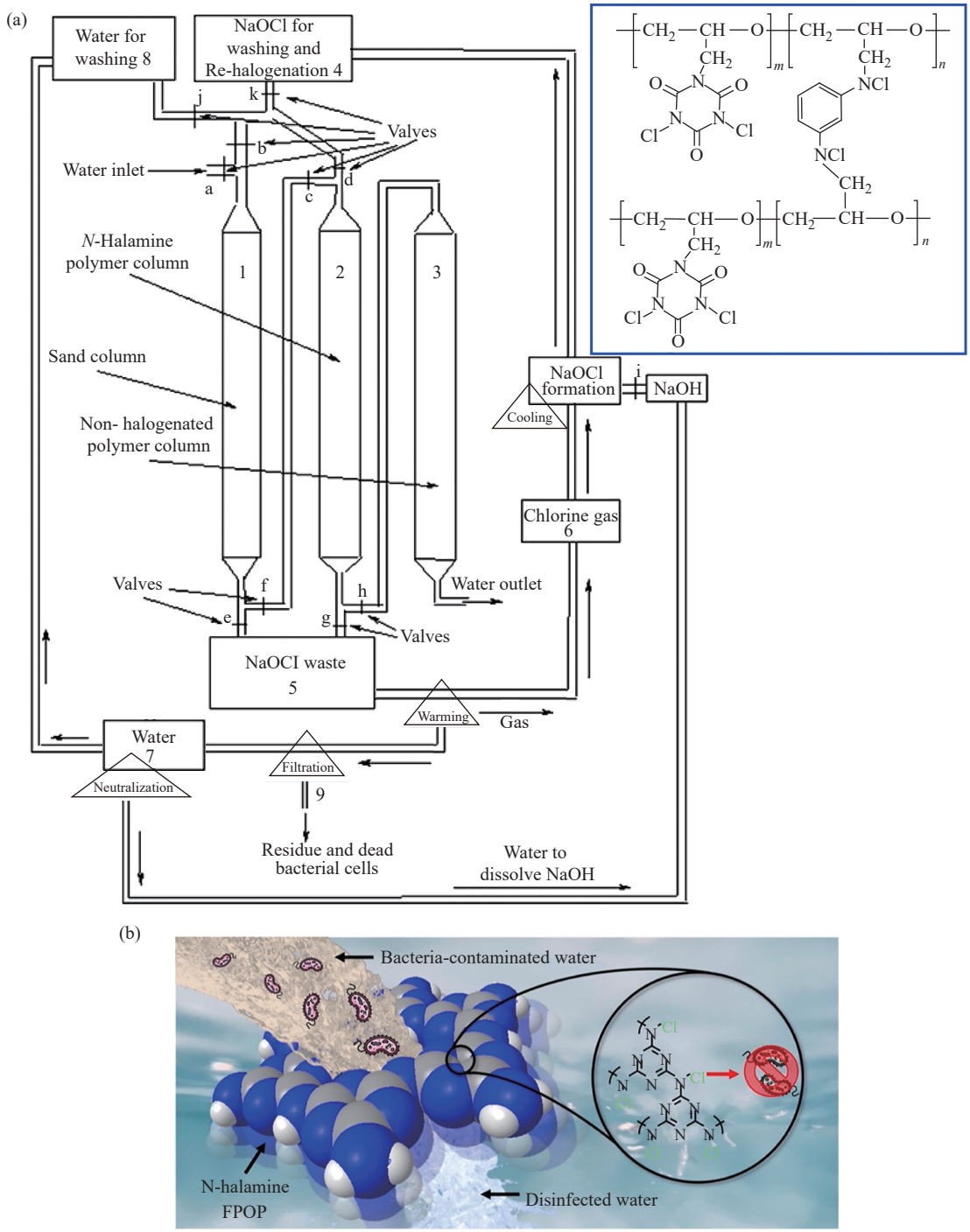


图 3 (a)多重过滤技术的大型净水系统设计实例[37] (2013 American Chemical Society 版权许可)；(b) FPOP生物杀灭功能的说明[40] (2023 American Chemical Society 版权许可)

Figure 3 (a) A design example of a large-scale water purification system based on multiple filtration technologies (Reprinted with permission from Ref. [37]; Copyright (2013) ACS); (b) Explanation of the biocidal function of FPOP (Reprinted with permission from Ref. [40]; Copyright (2023) American Chemical Society)

发了一种新型的气凝胶用于处理含油废水。他们合成了季铵化卤胺硅氧烷单体(QHS)，并在NCC和CS的混合溶液中进行水解，得到季铵化卤胺硅氧烷聚合物(PQHS)。天然高分子NCC和CS的强亲水性以及气凝胶的微孔结构赋予了其优异的疏油性能。研究表明，该气凝胶在油水分离过滤材料中的应用效果显著，对不同类型的油水混合物具有较高的分离效率。PQHS中卤胺结构的存在

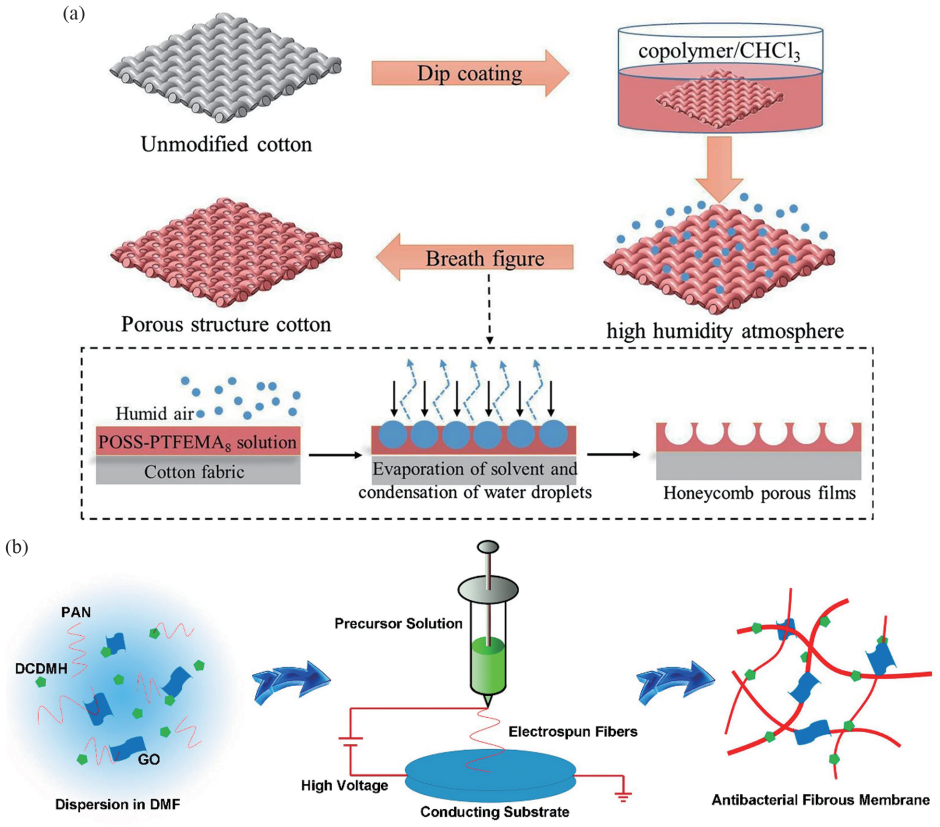
使得气凝胶能够有效杀灭含油污水中的细菌，并抑制细菌在材料表面的生长。Kong 等[42]成功地在棉织物表面制备了 POSS(PTFEMA)$_8$ 嵌段共聚物多孔膜，通过调节聚合物的浓度获得了疏水性能，改性棉织物可以去除十二烷/水混合物中的油(图 4a)。

2.2　空气净化

2019 年，冠状病毒病(COVID-19)的全球大流行，已报告超过 1.2 亿例确诊病例和超过 250 万例死亡[43,44]。COVID-19 的传播主要是通过感染者或无症状者在交谈和呼吸过程中释放的致病气溶胶[45,46]。为了保护人类免受空气传播病原体的影响，尤其是那些致命的病原体，开发具有抗微生物特性的面罩和空气过滤装置显得尤为重要[47]。这些装置可以降低空气传播病原体的感染风险，这一需求可以通过将抗菌剂添加到面罩和空气过滤器材料中来满足[48]。其中，高分子卤胺被认为是最有效的抗菌材料。Lan 等[49]利用静电纺丝技术制备了具有优异抗菌性能的卤胺/氧化石墨烯改性聚合物膜(图 4b)。作者认为，这种卤胺/GO 功能化的纤维膜能够有效对抗由超级细菌引起的抗生素耐药性，并在抗菌相关领域展现出巨大的应用潜力。因此，Chen 等[50]制备出一种亲水性抗微生物层，采用简单的紫外光交联和氯化工艺制备了聚丙烯熔喷非织造布(PP-P(MAA-MBAA)-ClMNF)，有效氯质量分数可达 0.35%。PP-P(MAA-MBAA)-ClMNF 不仅具有优异的亲水性和抗菌性，而且，将 PP-P(MAA-MBAA)-ClMNF 作为亲水性抗微生物层结合到四层 PP 基面罩中具有增强保护和舒适性的巨大潜力(图 4c)。Cerkez 等[51]采用浸轧干燥法和逐层沉积法，在熔喷聚丙烯(PP)非织造布表面沉积单层和多层阴离子和阳离子 HA 聚电解质，以制备可用于空气过滤器、口罩的快速灭活杀菌 PP 网。

2.3　抗菌纺织品

纺织品是微生物的良好载体，可能携带病原微生物，因此，抗菌功能化整理已成为天然和合成纺织品整理的一个重要工序[52]。其中，基于天然纤维的棉织物因其亲水性，更容易成为细菌生长的良好环境。因此，开发抗菌纺织品为临床环境中的感染预防提供了一种有效的解决方案。赋予纺织品抗菌性通常采用的方法是通过聚合将卤胺高分子接枝到棉织物上，以赋予其抗菌功能。Kong 等[53]选择甲基丙烯酸甲酯(MMA)与卤胺



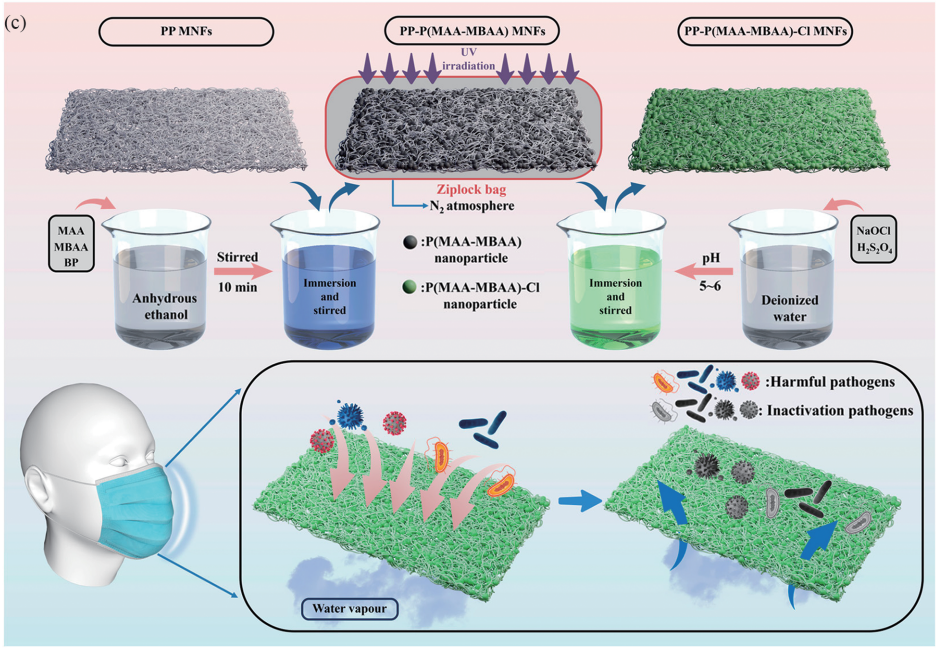


图 4 (a)通过呼吸图方法的棉织物多孔表面的示意图[42] (2023 Springer Nature 版权许可);(b)静电纺丝合成 PAN/GO/DCDMH纤维膜的示意图[49] (开放获取,MDPI 版权许可);(c) PP-P(MAA-MBAA)MNFs的制备工艺示意图[50] (开放获取,MDPI版权许可)

Figure 4 (a) Schematic illustra tion of the cotton fabric porous surface *via* the breath figure method (Reprinted with permission from Ref. [42]; Copyright (2023) Springer Nature); (b) Schematic diagram of electrospinning to synthesize PAN/GO/DCDMH fiber membranes (Reprinted with permission from Ref. [49]; Copyright (2021) MDPI); (c) Schematic diagram of the preparation process of PP-P(MAA-MBAA)MNFs (Reprinted with permission from Ref. [50]; Copyright (2023) MDPI)

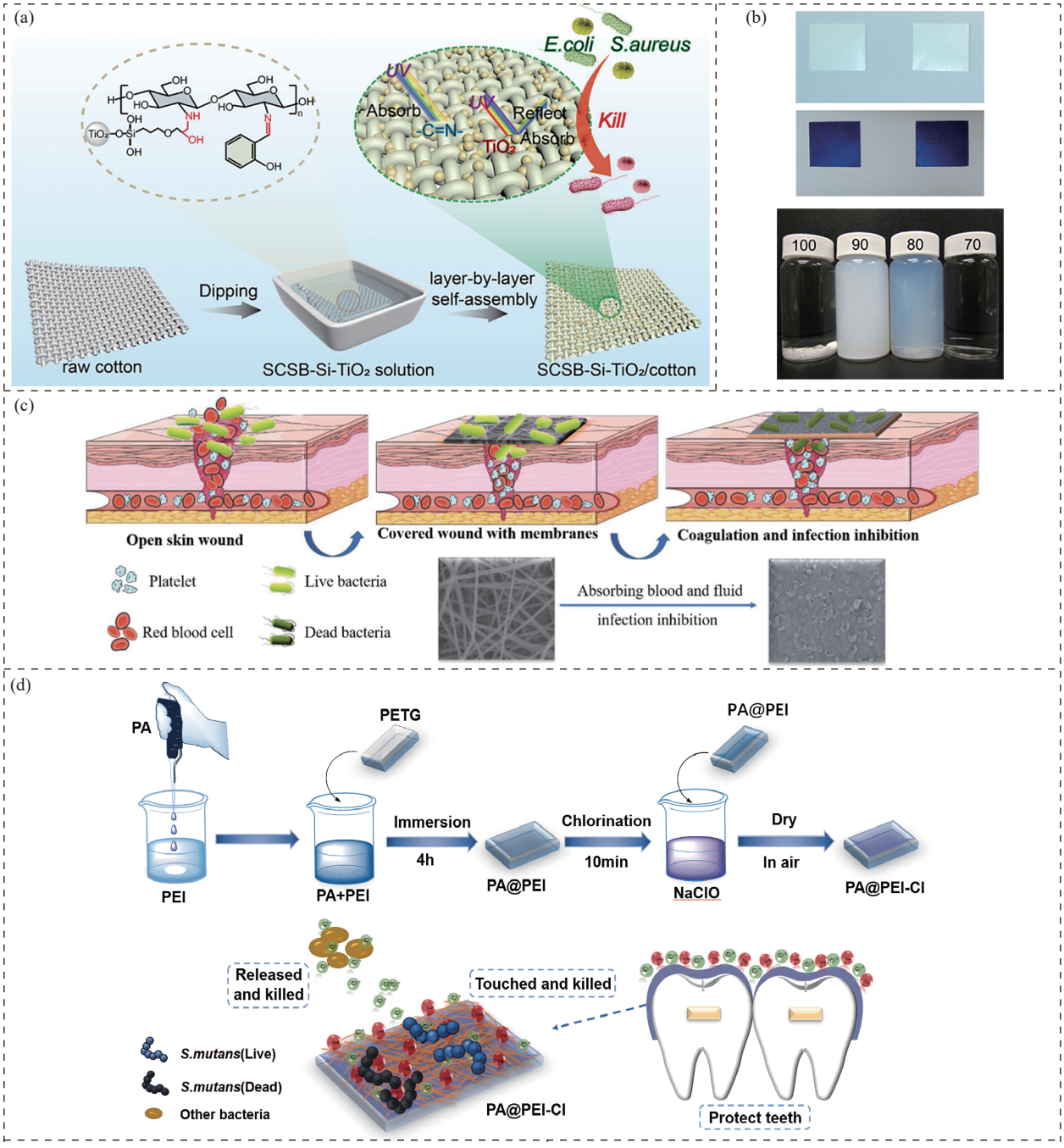
单体共聚以获得卤胺改性的聚(甲基丙烯酸甲酯)(PMMA),合成的卤胺纤维对2种细菌都具有良好的杀菌性能。Wu等[54]以QAC和卤胺为功能基团,通过简单的水相自由基共聚法制备了棉织物涂层。经氯化处理后QAC/HALS@Cotto*N*-Cl具有高效的抗菌活性、伤口愈合、自清洁、可充电和显著的紫外线阻隔性能。Bromberg等[55]使用的是带有亲核双胍、双胍和海因基团的聚合物,通过首先在棉、尼龙-棉和玻璃纤维织物上制备双功能硅氧烷或异氰酸酯前驱体涂层,然后进行聚合物附着,形成了无浸出涂层。目前,有学者发现将织物反复浸泡在阴阳离子聚合物的溶液中可以让织物表面存在一层抗菌膜,该方法被称为层层自组装(LbL),Tian等[56]通过层层静电自组装的方法在棉织物基材上沉积石墨烯掺杂聚阴离子卤胺高分子和壳聚糖,制备出具有优异电学性能和坚固紫外线防护性能的多功能和延展性棉织物。Xu等[57]设计并合成了一种水杨醛-二氧化钛改性壳聚糖席夫碱(SCSB-Si-TiO_2 Schiff碱)。采用层层自组装的方法将包覆在棉织物上,得到了具有优异抗菌抗紫外线性能的功能性棉织物(SCSb-Si-TiO_2光催化剂/棉(图5a)。

2.4 固体表面涂料和抗菌薄膜

由于在住宅、商业、公共机构、工业和卫生应用中控制表面微生物污染的需求快速增长,抗微生物涂料,即在接触时能够抑制/消灭微生物的涂料,正在经历巨大的增长。虽然多种消毒剂可以有效灭活医院等表面的细菌,但细菌计数在消毒后数小时内可能会恢复到预处理水平[58]。在这种背景下,研究者将卤胺高分子加入涂料中或做成抗菌膜使用,发现抗菌效果显著且稳定,在过去几十年中取得了显著进展。卤胺部分可以通过化学键、表面聚合或离子相互作用与表面结合,并且可以作为添加剂与油漆等基材结合,以提供抗菌性能。卤胺高分子抗菌剂作用于固体表面目前有两大类方法。一种是做成卤胺高分子抗菌膜,含有乙烯基类、乙酰烯基类和有机硅氧烷等卤胺高分子与固体结合。其中,卤胺硅氧烷聚合物最先被Worley小组发现卤胺高分子可以用于构建杀生物表面涂层。Worley等[59]合成的2-丙烯酰胺-2-

甲基-1-(5-甲基乙内酰脲基)丙烷和甲基丙烯酸-3-氯-2-羟丙基酯的共聚物(HACM)可以附着在不锈钢表面。这项工作证明了通过接枝到表面上的HACM共聚物的共价附着成功地对不锈钢表面进行了改性。与之前报道的研究相比，这种新开发的抗菌卤胺共聚物改性不锈钢具有优越的抗菌性能，在15 min接触时间内就能灭活全革兰氏阴性和革兰氏阳性菌群。卤胺高分子抗菌膜逐渐往智能方向发展，Yan等[60]报道了一种含有分层聚合物刷的pH响应涂层。含有水合聚(甲基丙烯酸)(PMAA)的顶层在生理条件下表现出防污性能，以防止轻度细菌黏附，PMMA呈现塌陷的构象，当大量细菌积聚在表面并产生局部酸性环境时，含有抗菌肽的亚层出现在表面以杀死细菌。

第二种方法则是将卤胺前体与商业涂料配方结合，制备卤胺高分子涂料。由于有机溶剂对人身体有害，近年来，水性涂料因其环保安全性被广泛应用，因此研究人员开始探索水溶性卤胺高



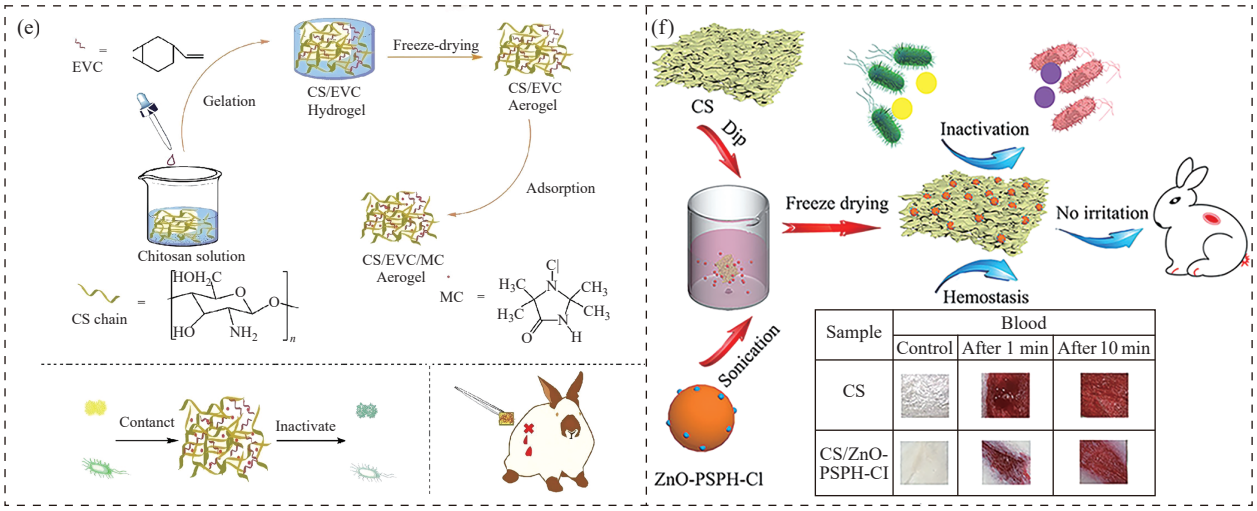


图 5 (a) SCSb-Si-TiO_2光催化剂/棉的抗菌示意图[57] (2024 American Chemical Society 版权许可)；(b)加入聚合物的不同水性乳胶漆[26,61] (2009 American Chemical Society 版权许可，2012 Elsevier 版权许可)；(c)纳米纤维膜的抗菌止血示意图[74] (2020 Elsevier 版权许可)；(d) PA@PEI-Cl涂层的制备及其抗菌性能示意图[68] (2025 Elsevier 版权许可)；(e) CS/EVC/MC制备和应用[72] (2021Elsevier 版权许可)；(f) ZnO/卤胺杂化纳米颗粒的新型壳聚糖敷料的制备和应用[73] (2019 American Chemical Society 版权许可)

Figure 5 (a) Antibacterial schematic diagram of SCSb-Si-TiO_2 photocatalyst/cotton (Reprinted with permission from Ref. [57]; Copyright (2024) American Chemical Society); (b) Adding different water-based latex paints with polymers (Reprinted with permission from Ref. [26], Copyright (2009) American Chemical Society; Reprinted with permission from Ref. [61]; Copyright (2012) Elsevier); (c) Schematic diagram of antibacterial hemostasis by nanofiber membranes (Reprinted with permission from Ref. [74]; Copyright (2020) Elsevier); (d) Schematic diagram of the preparation of PA@PEI-Cl coating and its antibacterial properties (Reprinted with permission from Ref. [68]; Copyright (2025) Elsevier); (e) Preparation and application of CS/EVC/MC (Reprinted with permission from Ref. [72]; Copyright (2019) American Chemical Society); (f) Preparation and application of a new chitosan dressing based on ZnO/Halamine hybrid nanoparticles (Reprinted with permission from Ref. [73])

分子以制备卤胺高分子水性涂料，Cao 等[61]首次使用氯化单体氯-2,2,6,6-四甲基-4-哌啶基甲基丙烯酸酯(Cl-TMPM)成功地制备了聚(Cl-TMPM)乳液。聚(Cl-TMPM)胶乳乳液可以直接与商业水基乳胶漆以任何比例混合，而没有凝固和/或相分离。聚(Cl-TMPM)的涂料提供了针对细菌、真菌和病毒的有效抗菌效果，完全抑制霉菌生长。为了扩大卤胺高分子水性涂料的应用范围(图5b)。Kocer 等[26]将卤胺丙烯酰胺单体与2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸钠进行共聚反应，制得水分散/水溶性聚合物。这些聚合物添加到水性乳胶漆中，氯化油漆曝露在荧光和紫外线下几段时间，聚合物上的结合氯是非常稳定的，并且在几周的光曝露后，经处理的油漆上的剩余氯足以在5~10 min接触时间内提供革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌的6-log灭活。Cicek 等[62]合成了2-二甲氨基乙基甲基丙烯酸酯 (DMAEMA)和4-乙烯基苯基硼酸(VPBA)的季铵盐同源共聚物和共聚物，并将其用作水性抗菌涂料的掺杂剂，并对均聚物和共聚物进行季铵盐化。将得到的季铵盐化均聚物和共聚物添加到水性乳胶漆中，得到均匀的油漆-聚合物混合物，涂在聚酯板上，结果发现产物均具有很高的杀菌活性。

2.5 医疗防护

医院作为病菌密集的场所，医疗器械、医护人员的防护装备以及患者的护理用品等，时刻面临着细菌、病毒等微生物的污染威胁。因此，开发高效、安全且持久的抗菌材料成为医疗防护领域亟待解决的关键问题[63]。卤胺高分子具有诸多优势，如抗菌活性高、杀菌速度快、可重复使用、稳定性好以及不易产生耐药性等[64]。这些优异的性能使得卤胺高分子在医疗防护领域展现出巨大的应用潜力[65]。

2.5.1 在口腔种植体中的应用

口腔种植体周围感染是影响种植成功率的关键因素。牙科综合治疗台水管上形成的细菌生物

膜增加了口腔患者交叉感染的风险。简单的表面接枝方法可以实现卤胺高分子在PU管中形成涂层，Sun等[66]开发了一种简单实用的表面接枝方法，该方法允许将基于卤胺的抗菌功能引入连续小孔径PU牙科综合治疗台水管的内表面。在这种方法中，使用过氧化二异丙苯的四氢呋喃溶液作为自由基引发剂，在随后的接枝聚合的甲基丙烯酰胺(MAA)到管的内壁上。接枝MAA侧链的酰胺基在氯漂白处理后转化为线性卤胺。PU管内的生物膜形成被完全阻止超过3周。最近的研究表明，通过使用1,6-二异氰酸酯作为偶联剂，DMH也可以共价连接到PU表面，Xing等[67]探索了一种一步沉积法制备耐用和可再生的抗菌聚氨酯水管卤胺高分子涂层。该方法利用与聚乙烯亚胺(PEI)和植酸(PA)形成的螯合物，然后通过氯化来激活抗菌性能。在此基础上，Zhou等[68]开创了PA@PEI-Cl涂层在透明对准器中的应用。它提供了一种创新的解决方案来增强矫正器的功能，通过抑制生物膜的形成，降低白斑病变(WSLS)风险，并增强治疗安全性，为预防或牙科并发症提供了一种变革性的解决方案(如图5d)。

2.5.2　在抗菌敷料中的应用

伤口愈合是一个复杂的生理过程，涉及炎症反应、细胞增殖、组织重塑等多个阶段[69]。在这一过程中，伤口极易受到细菌、真菌等微生物的感染，导致愈合延迟、疤痕增生，甚至引发全身性感染，严重影响患者的健康和生活质量[70,71]。因此，开发具有抗菌功能的新型伤口敷料成为近年来的研究热点。要开发具有抗菌功能的新型伤口敷料常通过将高分子卤胺制备成抗菌膜浸渍或涂覆到标准非抗菌伤口敷料。Zheng等[72]以1,2-环氧-4-乙烯基环己烷(EVC)为交联剂，制备了一种具有低密度、高孔隙率、三维多孔结构和高吸附性能的新型壳聚糖基结构(CS/EVC/MC复合物)(图5c)。结果表明其具有相对较低的凝血指数和无细胞毒性，因此，该材料具有巨大的生物医学应用潜力。Ma等[73]制备了一种浸渍有ZnO/卤胺杂化纳米颗粒的新型壳聚糖敷料。加入锌离子可以促进角质形成细胞向伤口表面的迁移，促进伤口愈合，与纯壳聚糖对照组相比，该敷料具有快速抗菌性能、出色的止血效果(图5e)。Yin等[74]合成了卤胺季铵盐改性壳聚糖前驱体，并将其与聚乙烯醇共混，利用静电纺丝技术制备了新型抗菌止血创面敷料纳米纤维膜。在全血凝血实验中，PVA/CSENDMH和PVA/CSENDMH-Cl膜表现出良好的凝血活性，不仅具有显著的血浆吸附能力，而且还能诱导血小板的黏附和激活(图5f)。在紫外线照射20 min后保留了0.19%的活性氯，远高于不添加TiO_2的卤胺敷料。Zhang等[75]合成了一种三官能共聚物，由卤胺前体部分、海洋激发的表面结合多巴胺部分和黏合在商业棉纱上的两性离子防黏连部分组成，得到的HaloCare™创面敷料具有很好的杀菌和止血效果，可用来预防感染和止血。

3　抗菌作用机制

卤胺抗菌剂通过其分子中的氮-卤素(*N*-X)共价键实现高效、可再生抗菌。当与微生物接触时，*N*-X键释放出活性卤素正离子(X^+)，卤胺的抑菌作用机制大致可分为3种类型：(1)接触杀灭，即将正卤素从卤胺直接转移到细菌受体；(2)释放杀死，即正卤素从卤胺解离到溶液中，随后失活；(3)转移杀死，即将卤素从卤胺转移到培养基成分，抑制细菌生长和生存[76]。如图6所示，这种多靶点、非特异性的强氧化机理使其能广谱杀灭细菌、真菌和病毒，且微生物难以产生耐药性。抗菌后材料可通过再卤化再生，实现长效循环使用。

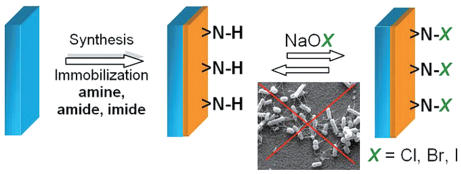


图6　卤胺材料抗菌机理图[76] (2013 ACS版权许可)

Figure 6　Antibacterial mechanism of halamine materials (Reprinted with permission from Ref. [76]; Copyright (2013) American Chemical Society)

4　结论与展望

卤胺高分子作为一种高效、广谱的抗菌材料，在医用防护和公共卫生领域展现出巨大的应用潜力。其独特的抗菌机制、可再生性以及长效稳定性使其成为开发抗菌敷料、防护纺织品、医疗器械涂层等产品的理想选择。本文综述了卤胺高分子的合成和种类及卤胺高分子抗菌材料在净水、空气净化、涂料、抗菌膜和纺织品应用的研究进展，还提出了多种方法来制备先进的卤胺高分子抗菌材料用于抗菌应用，探索了这些材料作为高效杀

菌剂的潜在用途。其中提到了卤胺高分子在预防致病性感染方面的研究进展，在所涉及领域，许多研究小组已经开发出了卤胺高分子抗菌材料的有效方法。然而，卤胺高分子在实际应用中仍面临两大核心挑战：一是长期化学稳定性，特别是在复杂环境中活性氯的缓慢释放与损失，二是相对较高的生产成本与规模化制备工艺不成熟。具体表现在当前许多卤胺抗菌材料在实际使用中，抗菌性能衰减较快，难以满足某些领域(如植入式医疗器械、长效防腐涂层)对数年稳定性的要求。随着材料科学、生物技术与纳米医学的深度融合，解决这些挑战的路径日益清晰。卤胺高分子的未来，不再局限于单一化学结构的改良。通过深度融合智能材料设计、纳米技术和绿色化学等多学科前沿，系统地攻克其在稳定性和成本规模化方面的瓶颈，旨在将卤胺高分子从一种“消耗性”抗菌剂，升级为智能响应、长效自再生、高效催化且环境友好的新一代功能性材料，为其在高端生物医用材料、智能防腐涂层、个人防护装备及公共卫生领域的大规模、高附加值应用开辟道路。通过构建微环境响应释放和自修复体系提升长效稳定性；利用纳米限域和仿酶催化设计降低活性成分消耗与成本；开发生物基单体和绿色连续化生产工艺，推动其规模化应用。这些交叉学科策略将助力其在高附加值领域实现突破。

参考文献

1 Hao, Y. J.; Liu, S.; Cai, H. T.; Zhang, Q. Y.; Gao, G.; Hao, X. F. A silicone with one quaternary ammonium salt and three *N*-halamine sites in the repeating unit for improved antibiotic ability on submicrospheres. *Colloid Interface Sci. Commun*., **2023**, 56, 100731.

2 Luo, H.; Yin, X. Q.; Tan, P. F.; Gu, Z. P.; Liu, Z. M.; Tan, L. Polymeric antibacterial materials: design, platforms and applications. *J. Mater. Chem. B*, **2021**, 9(12), 2802–2815.

3 Olmos, D.; González-Benito, J. Polymeric materials with antibacterial activity: a review. *Polymers*, **2021**, 13(4), 613.

4 Liu, J. L.; Zhao, J.; Qu, L. Y.; Jiang, Z. M.; Xu, Y. J. Scalable one-pot synthesis of hindered amine-functionalized melamine resin microspheres as robust *N*-halamine antimicrobial platforms. *Chem. Eng. J*., **2025**, 522, 168179.

5 Fu, J. N.; Wang, C. F.; Liu, X. M.; Zhu, S. L.; Zheng, Y. F.; Li, Z. Y.; Cui, Z. D.; Zhang, Y.; Jiang, H.; Cao, Y. P.; Chu, P. K.; Wu, S. L. Smart responsive materials for antibacterial therapy: progress, opportunities, and challenges. *Prog. Mater. Sci*., **2026**, 155, 101532.

6 Wu, Y. Z.; Liu, P.; Mehrjou, B.; Chu, P. K. Interdisciplinary-inspired smart antibacterial materials and their biomedical applications. *Adv. Mater*., **2024**, 36(17), 2305940.

7 Wang, C. Q.; Xu, P.; Li, X. X.; Zheng, Y. H.; Song, Z. M. Research progress of stimulus-responsive antibacterial materials for bone infection. *Front. Bioeng. Biotechnol*., **2022**, 10, 1069932.

8 Lan, G. B.; Chu, X.; Li, C. H.; Zhang, C.; Miao, G. Q.; Li, W. Y.; Peng, F.; Zhao, X. D.; Li, M. Surface modification of titanium with antibacterial porous *N*-halamine coating to prevent peri-implant infection. *Biomed. Mater*., **2023**, 18(1), 015005.

9 李平，董阿力德尔图，孙梓嘉，高歌．*N*-卤胺类高分子与纳米抗菌材料的制备及应用．化学进展，**2017**, 29(S2), 318–328.

10 Dong, A.; Wang, Y. J.; Gao, Y. Y.; Gao, T. Y.; Gao, G. Chemical insights into antibacterial *N*-halamines. *Chem. Rev*., **2017**, 117(6), 4806–4862.

11 Smola-Dmochowska, A.; Lewicka, K.; Macyk, A.; Rychter, P.; Pamuła, E.; Dobrzyński, P. Biodegradable polymers and polymer composites with antibacterial properties. *Int. J. Mol. Sci*., **2023**, 24(8), 7473.

12 Guo, M. M.; Zhang, X. H.; Ismail, B. B.; He, Q.; Yang, Z. H.; Xianyu, Y.; Liu, W. T.; Zhou, J. W.; Ye, X. Q.; Liu, D. H. Super antibacterial capacity and cell envelope-disruptive mechanism of ultrasonically grafted *N*-halamine PBAT/PBF films against escherichia coli. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(32), 38910–38929.

13 Parcheta, M.; Sobiesiak, M. Preparation and functionalization of polymers with antibacterial properties-review of the recent developments. *Materials*, **2023**, 16(12), 4411.

14 Yoshinaga, Y.; Yoshida, Y. Stereospecific radical polymerization of methacrylate bearing oxazolidone structure and improvement of glass transition temperature of urethane methacrylate copolymers. *J. Polym. Sci*., **2023**, 61(17), 2050–2059.

15 Eknoian, M. W.; Worley, S. D.; Harris, J. M. New biocidal *N*-halamine-PEG polymers. *J. Bioact. Compatible Polym*., **1998**, 13(2), 136–145.

16 Jia, Z. Q.; Peng, W. J.; Zhang, T. Q.; Hao, S.; Xu, X.; Chen, Y. L.; Li, S. D.; Wen, J. P. Syntheses and applications of *N*-halamines antimicrobial agents. *Mini Rev. Org. Chem*., **2022**, 19(8), 955–967.

17 Eknoian, M. W.; Worley, S. D. New *N*-halamine biocidal polymers. *J. Bioact. Compatible Polym*., **1998**, 13(4),

303–314.

18 Cai, Q.; Bao, S.; Zhao, Y.; Zhao, T. Y.; Xiao, L. H.; Gao, G.; Chokto, H.; Dong, A. Tailored synthesis of amine *N*-halamine copolymerized polystyrene with capability of killing bacteria. *J. Colloid Interface Sci*., **2015**, 444, 1–9.

19 Sun, Y. Y.; Sun, G. Durable and refreshable polymeric *N*-halamine biocides containing 3-(4′-vinylbenzyl)-5, 5-dimethylhydantoin. *J. Polym. Sci. Part A Polym. Chem*., **2001**, 39(19), 3348–3355.

20 Sun, Y. Y.; Sun, G. Synthesis, characterization, and antibacterial activities of novel *N*-halamine polymer beads prepared by suspension copolymerization. *Macromolecules*, **2002**, 35(23), 8909–8912.

21 Li, J.; Huang, P.; Cheng, X. Q.; Wang, R. M.; He, Y. F.; Song, P. F. Amphiphilic *N*-halamine copolymer antibacterial nanoparticles with hydroge*N*-donor and hydroge*N*-acceptor. *Appl. Surf. Sci*., **2024**, 666, 160382.

22 Eknoian, M. W.; Worley, S. D.; Bickert, J.; Williams, J. F. Novel antimicrobial *N*-halamine polymer coatings generated by emulsion polymerization. *Polymer*, **1999**, 40(6), 1367–1371.

23 Cao, Z. B.; Sun, Y. Y. Polymeric *N*-halamine latex emulsions for use in antimicrobial paints. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2009**, 1(2), 494–504.

24 Li, X. L.; Liu, Y.; Jiang, Z. M.; Li, R.; Ren, X. H.; Huang, T. S. Synthesis of an *N*-halamine monomer and its application in antimicrobial cellulose *via* an electron beam irradiation process. *Cellulose*, **2015**, 22(6), 3609–3617.

25 Kocer, H. B.; Worley, S. D.; Broughton, R. M.; Huang, T. S. A novel *N*-halamine acrylamide monomer and its copolymers for antimicrobial coatings. *React. Funct. Polym*., **2011**, 71(5), 561–568.

26 Kocer, H. B. Residual disinfection with *N*-halamine based antimicrobial paints. *Prog. Org. Coat*., **2012**, 74(1), 100–105.

27 Chen, Z. B.; Sun, Y. Y. *N*-halamine-based antimicrobial additives for polymers: preparation, characterization, and antimicrobial activity. *Ind. Eng. Chem. Res*., **2006**, 45(8), 2634–2640.

28 Kocer, H. B.; Akdag, A.; Ren, X. H.; Broughton, R. M.; Worley, S. D.; Huang, T. S. Effect of alkyl derivatization on several properties of *N*-halamine antimicrobial siloxane coatings. *Ind. Eng. Chem. Res*., **2008**, 47(20), 7558–7563.

29 Ren, X. H.; Kou, L.; Liang, J.; Worley, S. D.; Tzou, Y. M.; Huang, T. S. Antimicrobial efficacy and light stability of *N*-halamine siloxanes bound to cotton. *Cellulose*, **2008**, 15(4), 593–598.

30 Ren, X.; Akdag, A.; Zhu, C.; Kou, L.; Worley, S.; Huang, T. Electrospun polyacrylonitrile nanofibrous biomaterials. *J. Biomed. Mater. Res. Part A*, **2009**, 91(2): 385–390.

31 Li, J.; Liu, Y.; Jiang, Z. M.; Ma, K. K.; Ren, X. H.; Huang, T. S. Antimicrobial cellulose modified with nanotitania and Cyclic*N*-halamine. *Ind. Eng. Chem. Res*., **2014**, 53(33), 13058–13064.

32 Liang, J.; Chen, Y.; Barnes, K.; Wu, R.; Worley, S. D.; Huang, T. S. *N*-halamine/quat siloxane copolymers for use in biocidal coatings. *Biomaterials*, **2006**, 27(11), 2495–2501.

33 Li, C. H.; Gerile, S.; Du, N.; Zou, L.; Wang, Z. Q.; Liu, Y. F.; Hou, J. L.; Song, K. T.; Xiao, Y. H.; Ren, H.; Kang, J.; Dong, A.; Xu, R. Multi-active-site antibacterial modification of dopamine-hyaluronic acid hydrogel with *N*-halamine for skin tissue engineering. *Carbohydr. Polym*., **2025**, 358, 123565.

34 Khalid, R.; Rosli, M. I.; Zulkarnain, N. A.; Sheikh Abdullah, S. R.; Idris, M. I.; Buhari, J. Assessing risks of chlorine usage as a disinfectant in drinking water treatment plant. *Model. Earth Syst. Environ*., **2025**, 11(4), 276.

35 Joakim Larsson, D. G.; Flach, C. F. Antibiotic resistance in the environment. *Nat. Rev. Microbiol*., **2022**, 20(5), 257–269.

36 Coulliette, A. D.; Enger, K. S.; Weir, M. H.; Rose, J. B. Risk reduction assessment of waterborne Salmonella and Vibrio by a chlorine contact disinfectant point-of-use device. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, **2013**, 216(3), 355–361.

37 Ahmed, A. E. I.; Cavalli, G.; Bushell, M. E.; Wardell, J. N.; Pedley, S.; Charles, K.; Hay, J. N. New approach to produce water free of bacteria, viruses, and halogens in a recyclable system. *Appl. Environ. Microbiol*., **2011**, 77(3), 847–853.

38 Liu, S.; Yao, L. L.; Wang, X. R.; Zhao, G. Y.; Li, F.; Yao, B. J.; Dong, Y. B. BODIPY and *N*-halamine-decorated covalent organic framework with synergistic antibacterial capabilities for sunlight-powered water sterilization. *J. Mater. Chem. A*, **2025**, 13(6), 4530–4537.

39 Kim, S. S.; Jung, D.; Choi, U. H.; Lee, J. Antimicrobial m-aramid nanofibrous membrane for nonpressure driven filtration. *Ind. Eng. Chem. Res*., **2011**, 50(14), 8693–8697.

40 Fu, S. J.; Wang, Y. H.; Tang, P. X. Fiber-supported biocidal porous organic polymer with high-density *N*-halamine structures for chlorine rechargeable water disinfection. *ACS Appl. Polym. Mater*., **2023**, 5(7), 5620–5629.

41 Zhang, Y.; Yin, M. L.; Li, L.; Fan, B. J.; Liu, Y.; Li, R.; Ren, X. H.; Huang, T. S.; Kim, I. S. Construction of aerogels based on nanocrystalline cellulose and

chitosan for high efficient oil/water separation and water disinfection. *Carbohydr. Polym*., **2020**, 243, 116461.

42 Kong, Q.; Ren, X. H.; Li, Z. G. Three-dimensional porous structure on cotton fabric through the breath figure method with functions of self-cleaning and oil/water separation. *Cellulose*, **2023**, 30(6), 3915–3930.

43 Chan, J. F.; Yuan, S. F.; Chu, H.; Sridhar, S.; Yuen, K. Y. COVID-19 drug discovery and treatment options. *Nat. Rev. Microbiol*., **2024**, 22(7), 391–407.

44 Parhiz, H.; Atochina-Vasserman, E. N.; Weissman, D. mRNA-based therapeutics: looking beyond COVID-19 vaccines. *Lancet*, **2024**, 403(10432), 1192–1204.

45 Yuan, Y. L.; Jiao, B. H.; Qu, L. L.; Yang, D. M.; Liu, R. J. The development of COVID-19 treatment. *Front. Immunol*., **2023**, 14, 1125246.

46 Adu, P.; Popoola, T.; Medvedev, O. N.; Collings, S.; Mbinta, J.; Aspin, C.; Simpson, C. R. Implications for COVID-19 vaccine uptake: a systematic review. *J. Infect. Public Health*, **2023**, 16(3), 441–466.

47 Qiu, G. Y.; Zhang, X. L.; DeMello, A. J.; Yao, M. S.; Cao, J. J.; Wang, J. On-site airborne pathogen detection for infection risk mitigation. *Chem. Soc. Rev*., **2023**, 52(24), 8531–8579.

48 Sivakumar, R.; Lee, N. Y. Recent advances in airborne pathogen detection using optical and electrochemical biosensors. *Anal. Chim. Acta*, **2022**, 1234, 340297.

49 Lan, S.; Zhang, J. H.; Li, J.; Guo, Y. N.; Sheng, X. L.; Dong, A. An *N*-halamine/graphene oxide-functionalized electrospun polymer membrane that inactivates bacteria on contact and by releasing active chlorine. *Polymers*, **2021**, 13(16), 2784.

50 Chen, Z.; Zhao, Q. H.; Chen, J. H.; Mei, T.; Wang, W. W.; Li, M. F.; Wang, D. *N*-halamine-based polypropylene melt-blown nonwoven fabric with superhydrophilicity and antibacterial properties for face masks. *Polymers*, **2023**, 15(21), 4335.

51 Cerkez, I.; Worley, S. D.; Broughton, R. M.; Huang, T. S. Antimicrobial surface coatings for polypropylene nonwoven fabrics. *React. Funct. Polym*., **2013**, 73(11), 1412–1419.

52 Zhang, Y. P.; Huang, P.; Cheng, X. Q.; Wang, R. M.; He, Y. F.; Song, P. F. Regulation of *N*-halamine copolymer morphology: transition from membrane to multiped nanospheres and antibacterial applications. *Appl. Surf. Sci*., **2025**, 688, 162425.

53 Kong, Q.; Li, Z. G.; Ding, F.; Ren, X. H. Hydrophobic *N*-halamine based POSS block copolymer porous films with antibacterial and resistance of bacterial adsorption performances. *Chem. Eng. J*., **2021**, 410, 128407.

54 Wu, K.; Hu, Y. L.; Wu, X. L.; Wang, S. L.; Shang, M. Y.; Yang, L.; Sun, J. J. Fabrication of multifunctional cotton fabrics with quaternized *N*-halamine endowing the synergetic rechargeable antibacterial, wound healing and self-cleaning performances. *Int. J. Biol. Macromol*., **2024**, 275, 133493.

55 Bromberg, L.; Magariños, B.; Concheiro, A.; Hatton, T. A.; Alvarez-Lorenzo, C. Nonleaching biocidal *N*-halamine-functionalized polyamine-, guanidine-, and hydantoi*N*-based coatings. *Ind. Eng. Chem. Res*., **2024**, 63(14), 6268–6278.

56 Tian, M. W.; Hu, X. L.; Qu, L. J.; Zhu, S. F.; Sun, Y. N.; Han, G. T. Versatile and ductile cotton fabric achieved *via* layer-by-layer self-assembly by consecutive adsorption of graphene doped PEDOT: PSS and chitosan. *Carbon*, **2016**, 96, 1166–1174.

57 Xue, T.; Fang, D. J.; Si, L. L.; Yin, Y. J. Preparation of antibacterial and UV-protective cotton through coating with TiO_2-modified chitosa*N*-based schiff bases. *ACS Appl. Polym. Mater*., **2024**, 6(14), 8073–8083.

58 Jiang, L.; Zhu, X. J.; Li, J. Q.; Shao, J.; Zhang, Y.; Zhu, J. T.; Li, S. H.; Zheng, L. N.; Li, X. P.; Zhang, S. H.; Li, H. G.; Zhong, G. J.; Xu, H. Electroactive and breathable protective membranes by surface engineering of dielectric nanohybrids at poly(lactic acid) nanofibers with excellent self-sterilization and photothermal properties. *Sep. Purif. Technol*., **2024**, 339, 126708.

59 Demir, B.; Broughton, R. M.; Huang, T. S.; Bozack, M. J.; Worley, S. D. Polymeric antimicrobial *N*-halamine-surface modification of stainless steel. *Ind. Eng. Chem. Res*., **2017**, 56(41), 11773–11781.

60 Yan, S. J.; Shi, H. C.; Song, L. J.; Wang, X. H.; Liu, L.; Luan, S. F.; Yang, Y. M.; Yin, J. H. Nonleaching bacteria-responsive antibacterial surface based on a unique hierarchical architecture. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2016**, 8(37), 24471–24481.

61 Sun, X. B.; Cao, Z. B.; Porteous, N.; Sun, Y. Y. Amine, melamine, and amide *N*-halamines as antimicrobial additives for polymers. *Ind. Eng. Chem. Res*., **2010**, 49(22), 11206–11213.

62 Cerkez, I.; Kocer, H. B.; Worley, S. D.; Broughton, R. M.; Huang, T. S. *N*-halamine biocidal coatings *via* a layer-by-layer assembly technique. *Langmuir*, **2011**, 27(7), 4091–4097.

63 Zhang, X. Q.; Lv, Q.; Liu, S.; Xu, T. Preparation and properties of recycled waste disposable medical protective clothing fragment modified asphalt. *Constr. Build. Mater*., **2025**, 471, 140738.

64 Yang, J. J.; Wang, J. H.; Fan, C. H.; Wu, Q.; Yang, Y.; Luo, D.; Xiong, X. J.; Fan, M.; Ou, L. Effect of step potential on the structure and properties of ceramic

coating on the surface of 2024 aluminum alloy thin sheets. *Ceram. Int*., **2025**, 51(2), 1392–1404.

65 Oluomachi, E.; Ahmed, A. Securing the future of healthcare: building a resilient defense system for patient data protection. *Computer Science and Information Technology.*, **2024**, 27–39.

66 Porteous, N.; Luo, J.; Hererra, M.; Schoolfield, J.; Sun, Y. Y. Growth and identification of bacteria in *N*-halamine dental unit waterline tubing using an ultrapure water source. *Int. J. Microbiol*., **2011**, 2011(1), 767314.

67 Xing, M.; Zhang, H. F.; Li, Z. Y.; Zhang, L.; Qian, W. H. Long-lasting renewable antibacterial *N*-halamine coating enable dental unit waterlines to prevention and control of contamination of dental treatment water. *Front. Mater*., **2024**, 11, 1399597.

68 Zhou, Z. M.; Liu, X. J.; Mei, L.; Guo, X. Q.; Gao, Y.; Hao, Y. P. Fabrication of *N*-halamine coatings with long-lasting bacterial inhibition and bacterial biofilm disruption functions for invisible aligner applications. *Mater. Today Bio*, **2025**, 33, 102112.

69 Liu, Y. H.; Dong, T.; Chen, Y. H.; Sun, N.; Liu, Q.; Huang, Z. K.; Yang, Y. F.; Cheng, H.; Yue, K. Biodegradable and cytocompatible hydrogel coating with antibacterial activity for the prevention of implant-associated infection. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(9), 11507–11519.

70 Li, B.; Liao, Y.; Su, X. Y.; Chen, S. Y.; Wang, X. M.; Shen, B. D.; Song, H.; Yue, P. F. Powering mesoporous silica nanoparticles into bioactive nanoplatforms for antibacterial therapies: Strategies and challenges. *J. Nanobiotechnol*., **2023**, 21(1), 325.

71 Kristanti, R. A.; Hadibarata, T.; Syafrudin, M.; Yılmaz, M.; Abdullah, S. Microbiological contaminants in drinking water: current status and challenges. *Water Air Soil Pollut*., **2022**, 233(8), 299.

72 Zheng, Y. X.; Pan, N. Y.; Liu, Y.; Ren, X. H. Novel porous chitosan/*N*-halamine structure with efficient antibacterial and hemostatic properties. *Carbohydr. Polym*., **2021**, 253, 117205.

73 Ma, W.; Li, L.; Lin, X. H.; Wang, Y. F.; Ren, X. H.; Huang, T. S. Novel ZnO/*N*-halamine-mediated multifunctional dressings as quick antibacterial agent for biomedical applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2019**, 11(34), 31411–31420.

74 Yin, M. L.; Wang, Y. F.; Zhang, Y.; Ren, X. H.; Qiu, Y. Y.; Huang, T. S. Novel quaternarized *N*-halamine chitosan and polyvinyl alcohol nanofibrous membranes as hemostatic materials with excellent antibacterial properties. *Carbohydr. Polym*., **2020**, 232, 115823.

75 Zhang, Y. D.; Demir, B.; Bertsch, G.; Qiao, M. Y. Zwitterion and *N*-halamine functionalized cotton wound dressing with enhanced antifouling, antibacterial, and hemostatic properties. *Int. J. Biol. Macromol*., **2023**, 230, 123121.

76 Hui, F.; Debiemme-Chouvy, C. antimicrobial *N*-halamine polymers and coatings: a review of their synthesis, characterization, and applications. *Biomacromolecules*, **2013**, 14(3), 585–601.