

卤胺化合物的特性及其功能化纺织品 在医疗领域的研究进展

王英洋^{1,2} 顾子萌¹ 殷茂力¹

1. 安徽工程大学 纺织服装学院, 安徽 芜湖 241000;
2. 安徽大学 安徽省绿色高分子材料重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要: 医用纺织品的抗菌功能化具有重要意义。卤胺化合物作为一类高效、广谱、生物相容性好、抗菌性能可再生的抗菌剂, 在医疗领域备受关注。根据化学结构特点, 卤胺化合物可分为环状类卤胺、非环状类卤胺及复合类卤胺 3 类。阐述了卤胺化合物的抗菌机制, 探讨了卤胺化合物在卫生保健用纺织品和生物医用纺织品领域的应用。研究为抗菌功能化医用纺织品的进一步设计与研发提供参考。

关键词: 卤胺化合物; 医用纺织品; 抗菌性能; 抗菌机制

中图分类号: TS 206.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)06-0010-12

Characteristics of N-halamine compounds and research progress on their functionalized textiles in medical applications

Wang Yingfeng^{1,2}, Gu Zimeng¹, Yin Maoli¹

1. School of Textile and Garment, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Environment-Friendly Polymer Materials, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China

Abstract: The antibacterial functionalization of medical textiles is of great significance. N-halamine compounds, as a class of highly efficient, broad-spectrum, biocompatible, and regenerable antibacterial agents, have attracted much attention in the medical field. Based on the chemical structural characteristics of N-halamine compounds, they can be classified as cyclic N-halamines, acyclic N-halamines, and composite N-halamines. The antibacterial mechanism of N-halamine compounds was expounded. The application of N-halamine compounds in the field of healthcare and biomedical textiles were discussed. The research provides a reference for the further design and development of antibacterial functionalized medical textiles.

Keywords: N-halamine; medical textile; antibacterial property; antibacterial mechanism

医用纺织品的发展贯穿人类文明进程的始终, 其为人类生命健康与疾病防治等提供着重要支持。传统概念上的医用纺织品主要有医用床单、纱布、缝

合线、口罩等。这类医用纺织品大量应用于医疗场所, 但因其缺乏抗菌功能, 易产生交叉感染问题。据统计, 全球每年约有 1.4 亿人会受到医疗场所病菌

基金项目: 安徽省绿色高分子材料重点实验室开放课题(KF202407); 安徽工程大学校级科研项目(Xjky2022073)

收稿日期: 2025-03-14

作者简介: 王英洋, 男, 1989 年生, 副教授, 主要研究方向为抗菌功能化材料, wangyingfeng@ahpu.edu.cn

交叉感染的影响,其中约 70 万人因感染而死亡^[1]。相关数据表明,在病菌大流行的情况下,采取佩戴口罩等医疗防护措施可在全球范围内减少数百万人的死亡^[2]。基于此,医用纺织品的抗菌功能化整理对抑制细菌交叉感染与提升个人防护能力具有重要意义。

在众多纺织品用抗菌材料中,卤胺化合物因其高效、广谱、可再生、长效等特点而得以广泛应用,并在食品包装、水处理等领域展现出巨大的应用潜力^[3-6]。卤胺化合物是一种结构中含有一个或多个氮卤键的化合物。卤胺前驱体结构中的 N—H 键可以通过与不同的卤化剂发生反应,生成以氯胺、溴胺及碘胺为代表的卤胺化合物。而化合物结构中的卤素被消耗后,还可通过与相应的卤化剂再次发生反应而恢复其抗菌性能,因此卤胺化合物具有很好的抗菌性能可再生特性。各类卤胺化合物中,氯胺因化学稳定性较好,成为卤胺化合物的典型代表。自 1931 年 Berliner^[7]揭示了无机卤胺在水消毒领域的重要作用后,卤胺类抗菌剂开始进入研究者的视线。至 1990 年, Worley 等开始专注卤胺化合物的合成及其抗菌应用的研究,大大拓展了卤胺化合物的应用范围,为后续卤胺类抗菌功能化纺织品的研发奠定了基础。

基于上述背景,本文依据结构对卤胺化合物进

行分类,并围绕卤胺化合物的结构特征,对其抗菌机制展开综述,同时探讨卤胺化合物功能化纺织品在医疗领域的应用情况与研究进展,以期为抗菌功能化医用纺织品的设计与研发提供参考。

1 卤胺化合物的分类

就卤胺化合物而言,其合成可通过针对 N—H 键实施卤化反应这一途径实现。基于此,依据结构特征,可将卤胺化合物划分为环状类、非环状类及两者复合类这 3 类。而其结构的进一步具体细分,则主要取决于卤胺前驱体在合成过程中所呈现的具体结构。

1.1 环状类卤胺

环状类卤胺指的是分子结构中含有一个或多个氮卤键,且构成五元环或六元环结构的一类化合物。常见的环状类卤胺结构主要涵盖海因类、咪唑烷酮类、噁唑烷酮类、琥珀酰亚胺类、哌啶醇类、三氮杂螺类、三嗪类、巴比妥酸类以及三聚氰酸类^[8]。典型环状类卤胺的结构式如图 1 所示,图中的 X 通常为 Cl 或 Br。由于环状结构中不含氮卤键邻位的 α 氢,这使得该结构的脱卤化氢过程难以进行,进而阻止了次卤酸的生成,有效提高了卤胺化合物化学结构的稳定性。

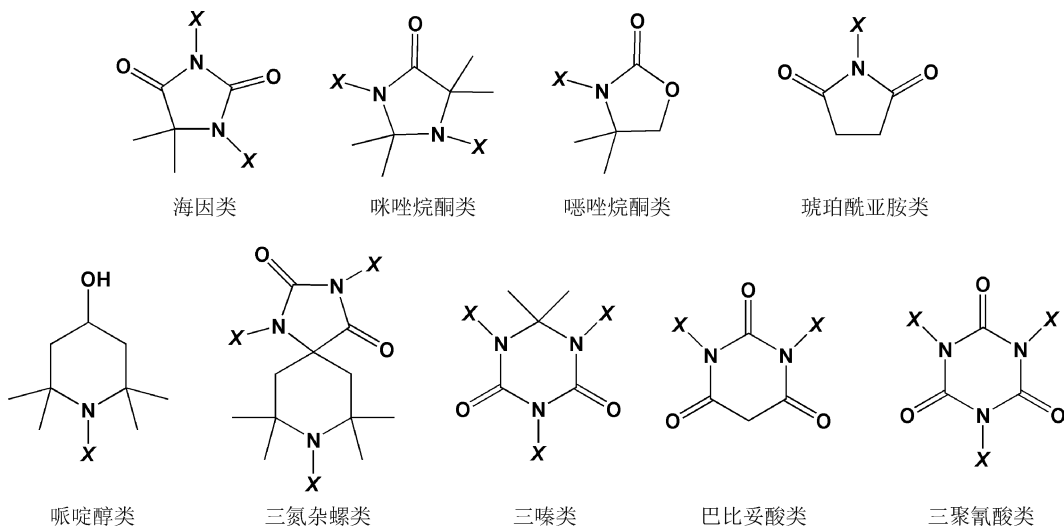


图 1 典型环状类卤胺的结构式

Fig. 1 Structural formulas of typical cyclic N-halamines

几种典型的环状类卤胺化合物的合成过程及结构如图 2 所示。环状类卤胺化合物的制备方法主要

分为直接合成与化学接枝改性 2 种。在直接合成方面,主要借助 Bucherer-Bergs 反应、Gabriel 反应、点

击化学等途径直接制备各类环状类卤胺化合物。如,Orhan 等^[9]通过 Bucherer-Bergs 反应,制备出一种含双键的海因结构,并通过自由基聚合的方式将其制成卤胺高聚物(HP),如图 2a)所示。随后,他们以超临界二氧化碳为介质,将制成的卤胺高聚物

整理到涤纶织物表面,赋予涤纶织物稳定且高效的抗菌性能。这种直接合成的方法为环状海因的制备提供了多样化途径,但 Bucherer-Bergs 反应中使用的氰化钾毒性大,会对环境造成较大的危害。基于此,环状类卤胺化合物的制备更多的是聚焦于对环

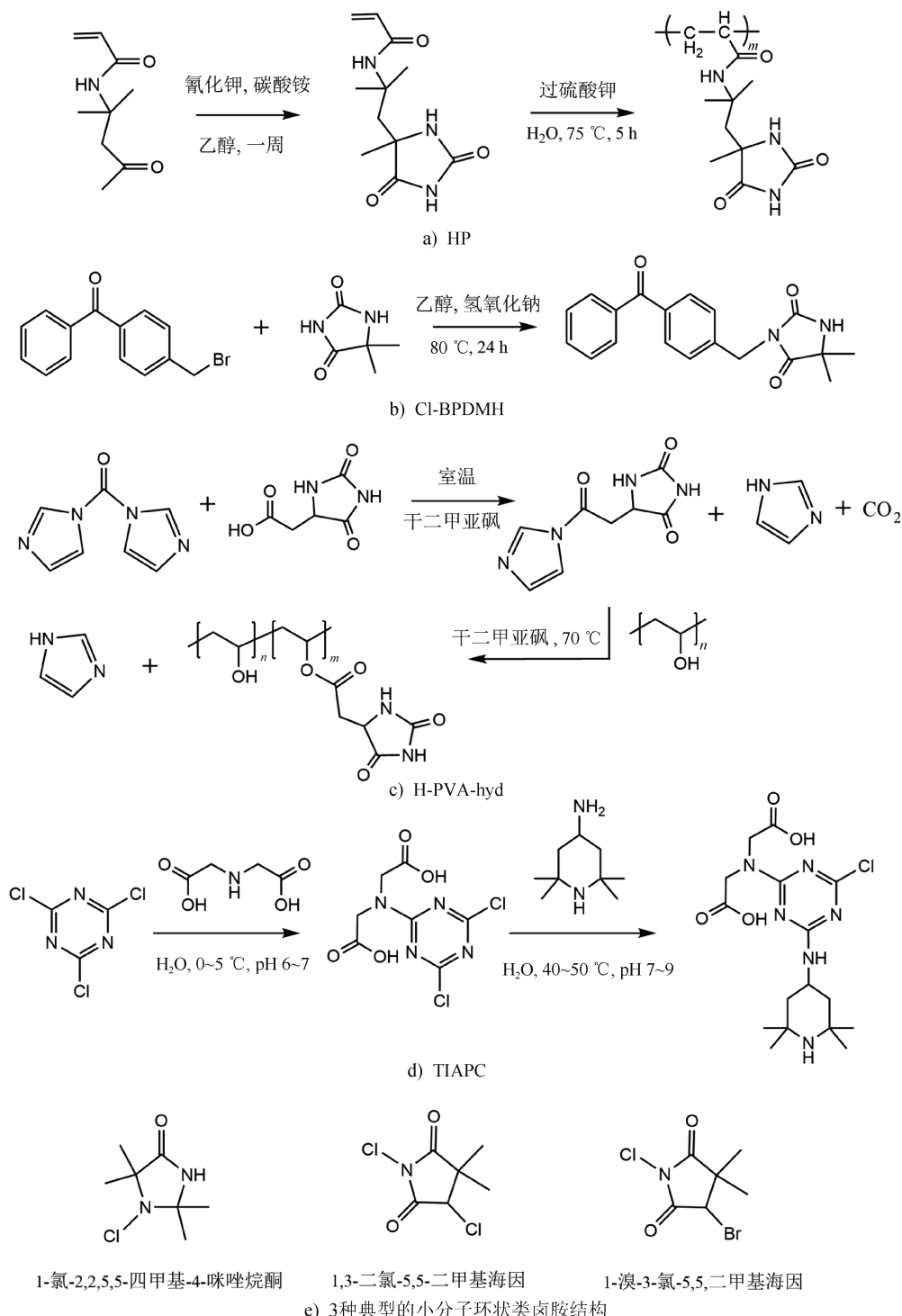


图 2 典型环状类卤胺的合成工艺及结构

Fig. 2 Synthesis processes and structure of typical cyclic-based N-halamines

状结构基团的改性。在化学接枝改性方面, Wang 等^[10]通过将 4-(溴甲基)二苯甲酮与海因反应,再经三氯异氰尿酸的氯化处理,制备出一种基于海因结构的卤胺化合物 Cl-BPDMH,如图 2b)所示。这种卤胺化合物可通过光化学吸氢反应接枝到聚酯织物结构中,赋予其优异的抗菌性能。并且,处理后的聚酯织物在力学性能、舒适性和生物相容性方面,相较于未处理的聚酯织物有所提升。Rosciardi 等^[11]利用 *N,N'*-羰基二咪唑与 5-海因乙酸反应,合成出一种咪唑化的海因类卤胺前驱体结构,再通过酯化反应,使该卤胺前驱体与聚乙烯醇(PVA)发生反应,得到最终产物 H-PVA-hyd,如图 2c)所示。制得的 H-PVA-hyd 因淀粉结构的引入,对枯草芽孢杆菌的抗菌效果增强。如图 2d)所示, Xu 等^[12]基于均三嗪结构,将其与亚胺二乙酸发生反应,制备出一种水溶性卤胺前驱体(TIAPC),并将其接枝到棉织物表面,赋予棉织物较优的抗菌性能和阻燃性能。值得一提的是,环状类卤胺不仅以高聚物或表面接枝的形式在各类材料中发挥作用,还以小分子单体的形式活跃于多种应用场景。如 Cervantes 等^[13]将一种小分子环状卤胺——1-氯-2,2,5,5-四甲基-4-咪唑烷酮与聚丙烯腈共混,通过静电纺丝制得一种功能化静电纺丝膜。该膜能在 2 min 内杀灭 99.999% 的肺炎克雷伯菌和大肠埃希菌,在水消毒领域表现

出潜在应用价值。Wang 等^[14]通过静电纺丝的方式分别将 1,3-二氯-5,5-二甲基海因和 1-溴-3-氯-5,5,二甲基海因复合到聚丙烯腈结构中,制备功能化静电纺丝膜。所得聚丙烯腈基静电纺丝膜在空气细菌杀灭和水体细菌杀灭方面效果显著。他们还对比了溴胺类卤胺与氯胺类卤胺的抗菌性能进行了对比,发现溴胺类卤胺的活性较氯胺类卤胺的高,表现出更好的抗菌性能。

1.2 非环状类卤胺

相较于环状类卤胺,非环状类卤胺是指其分子结构中包含一个或多个氮卤键,且这些氮卤键未处于环状结构中的一类化合物。常见的非环状类卤胺涵盖无机类卤胺、胺类卤胺、酰胺类卤胺、氨基酸类与肽类卤胺及芳香结构卤胺等。各类典型非环状类卤胺的结构式如图 3 所示。与环状类卤胺相比,非环状类卤胺的氮卤键稳定性相对较差,使用持久性有待提升,但其化学活性相对较高,在实际应用中使用效果较好。以无机类卤胺为例,一氯胺(NH_2Cl)、二氯胺(NHCl_2)和三氯胺(NCl_3)是其中的典型代表,它们被广泛应用于水消毒领域。这些无机类卤胺主要通过氮与正一价态的活性氯发生取代反应制得。此外,其他类型的无机类卤胺,如 NBrCl 和 NBrI_2 等,主要通过进行卤化反应来制备^[15]。

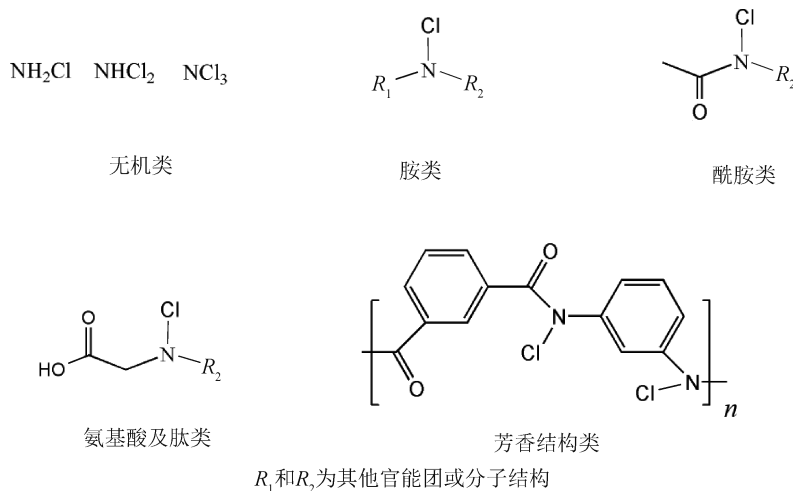


图 3 典型非环状类卤胺的结构式

Fig. 3 Structural formula of typical acyclic N-halamines

对于非环状类卤胺而言,当前的研究主要聚焦卤胺的形成方式与存在形式。目前,卤胺结构的形成主要是通过卤胺前驱体与活性卤化剂在不同 pH

值等条件下发生反应来实现的。常用的活性卤化剂主要有氯气、次氯酸、次氯酸根等。非环状类卤胺化合物化学活性普遍较高,易与常规卤化剂发生反应,

导致自身分解或生成其他副产物。因此,选择合适的卤化剂成为非环状类卤胺应用过程中的关键。目前已发现并应用的有机卤化剂有多种,如 *N*-氯-*N*-甲基-甲苯磺酰胺、*N*-氯代琥珀酰亚胺、次氯酸叔丁酯等,其结构式如图 4a) 所示。这些有机卤化剂的出现,为非环状类卤胺的应用开辟了更广阔的空间。对于非环状类卤胺,多数情况下其是以聚合物的形式存在的。以非环状酰胺类卤胺为例,用于合成这种聚合物类卤胺前驱体的化合物主要有丙烯酰胺、甲基丙烯酰胺、*N*-叔丁基丙烯酰胺等^[16-17]。这种聚合物形式的卤胺化合物能够通过接枝、共聚等方式,整理至棉织物及高聚物膜等各

种材料的表面。

芳香族酰胺因 2 个苯环上存在酰胺结构而成为一类新型卤胺化合物。Kim 等^[18]研究发现,芳香族酰胺通常可分为对位芳香族酰胺(如凯夫拉)和间位芳香族酰胺(如诺梅克斯)2 类,如图 4b) 所示。其中,对位芳香族酰胺在氯化过程中稳定性欠佳,难形成理想的卤胺结构。此外,甲壳素作为一种天然多糖,其结构中的乙酰胺结构能够通过氯化反应形成卤胺结构。而作为甲壳素衍生物的壳聚糖,可以通过接枝改性或直接氯化的形式,形成单个或多个卤胺前驱体反应位点,这为后续的相关研究与应用开辟了新思路。

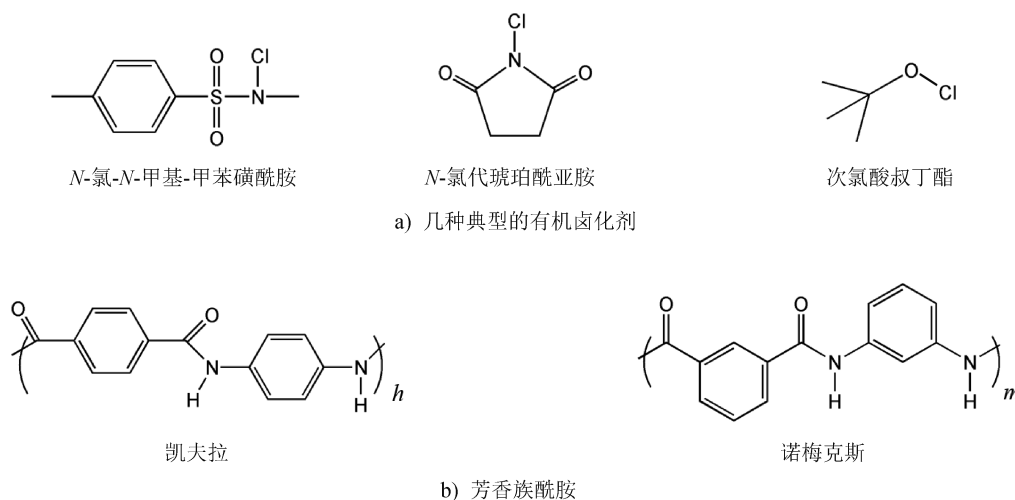


图 4 几种典型的有机卤化剂与芳香族酰胺的结构式

Fig. 4 Structure formulas of some typical organic halogenating agents and aramids

1.3 复合类卤胺

相较于单一的卤胺结构,将环状类与非环状类卤胺结构复合使用已成为当前卤胺化合物应用的主要方式。这种复合类卤胺在具有非环状类卤胺高效抗菌性能的同时,兼具环状类卤胺的结构稳定性,能够实现更长久作用时效。值得注意的是,复合类卤胺并无统一、具体的结构分类,其化学结构形态会因合成过程中所采用试剂的不同而呈现出多样性。

彭盼盼等^[19]基于 2-氨基-4-羰基-6-甲基嘧啶,合成出一种兼具酰胺及胺类卤胺结构的复合类卤胺化合物 SCMHBMA,如图 5a) 所示。随后,通过原子转移自由基聚合的方法,将该复合类卤胺化合物整理至棉织物表面,使棉织物具有高效的抗菌性能。

Li 等^[20]合成出一种三唑类的卤胺前驱体 NABTA-DEP,其结构中同时包含环状类及非环状类的胺类卤胺结构,如图 5b) 所示。他们还通过点击化学的方式,将该前驱体整理至棉织物表面。试验结果表明,当整理剂质量浓度为 5 g/L 时,整理后的棉织物能够有效杀灭 99.9% 的金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌。Chen 等^[21]合成了 2 种包含酰胺键和双键的单体,再通过引发聚合的方式在棉织物表面引入非环状类和环状类的酰胺键结构,如图 5c) 所示。改性后的棉织物 DAM-CF 表现出良好的抗菌性能,能够在 10 min 内完全杀灭所有细菌,并且在经过 10 次水洗循环后,抗菌性能仍然保持相对稳定。此外,由于引入了磷元素,改性后的棉织物还具备良好的阻燃性能,其极限氧指数(LOI)值达 27.6%。

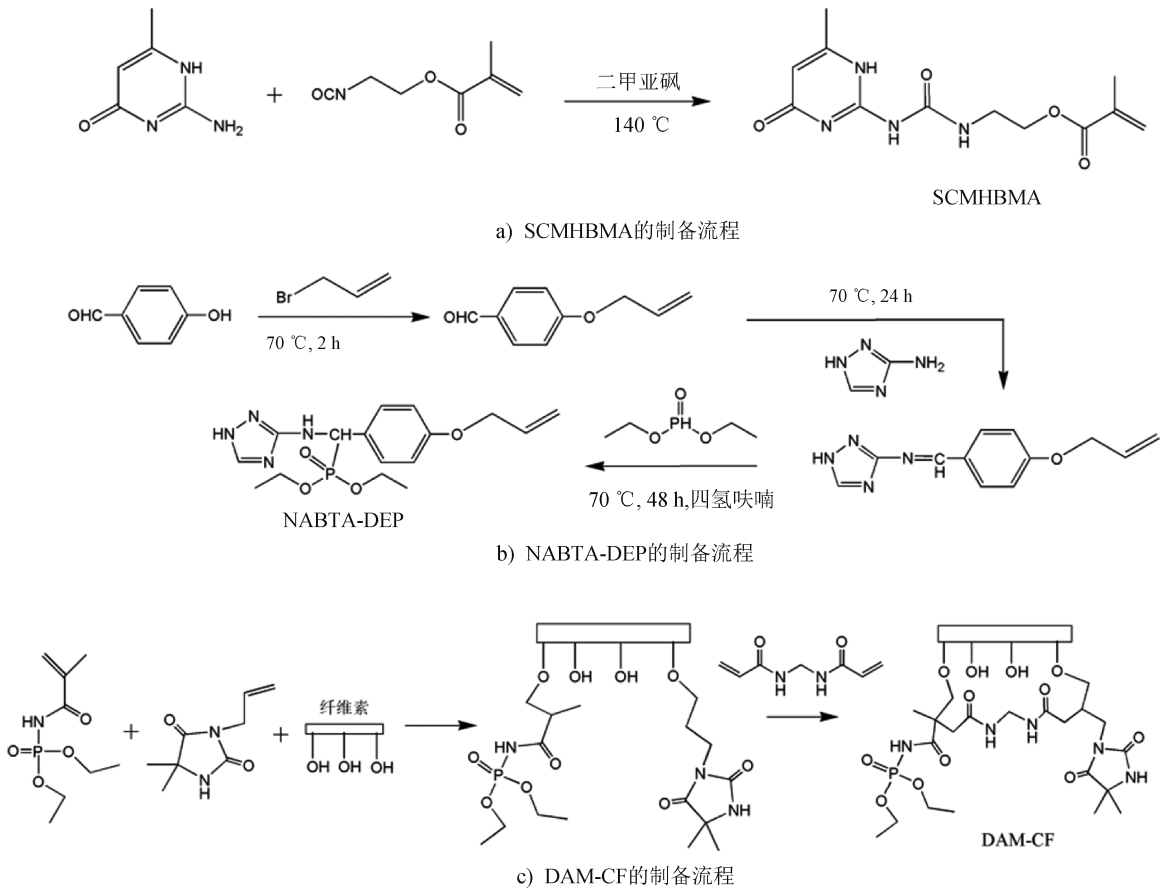


图 5 几种复合类卤胺的合成工艺
Fig. 5 Synthesis process of some composite N-halamines

2 卤胺化合物的抗菌机制

针对卤胺类材料抗菌机制的研究较多,目前所认知的抗菌机制主要分为接触型抗菌、释放型抗菌及转移型抗菌 3 种^[8],如图 6 所示。

接触型抗菌理论认为,卤胺化合物的抗菌能力是因卤胺结构中的活性卤素直接转移到细菌表面产生的。这些活性卤素能够参与细菌新陈代谢中的离子反应,进而干扰细菌细胞膜的正常生理活动并导致细菌死亡。卤胺化合物中氮卤键的稳定性直接影响其抗菌机制。通常而言,稳定性较好的胺类卤胺化合物更多地表现为接触型抗菌。释放型抗菌理论认为,卤胺化合物中氮卤键会在一定条件下发生分解和解离,并释放出大量的活性卤素。这些活性卤素的释放量达一定程度后,能够杀灭材料周边的细菌。抑菌圈法测试结果显示,巴比妥酸类、多糖类、海因类、溴基卤胺及非环状酰胺类卤胺的抗菌机制

均为释放型抗菌^[22-25]。转移型抗菌理论认为,卤胺不仅会发生分解和解离,还会与周围环境中含氨基的介质发生反应,导致活性卤素从卤胺化合物转移至介质中,赋予相应介质以抗菌性能,进而杀灭周围环境中的细菌。相关研究发现,以营养肉汤为接触介质时,卤胺化合物释放的活性卤素含量高于以纯水为介质的^[26]。

就单一的某种抗菌机制而言,无论是接触型抗菌还是释放型抗菌,均无法达到较理想的抗菌效果^[27]。结合 2 种及以上抗菌机制的作用,才能表现出较好的抗菌效果。此外,对于卤胺化合物而言,卤胺键的稳定性是其抗菌机制的主要影响因素,卤胺化合物的作用介质是其抗菌机制的第二大主要影响因素。当周围环境缺乏液体介质时,卤胺化合物偏向于接触型抗菌;而当周围环境存在水溶液时,卤胺化合物的抗菌主要表现为 2 种或 3 种抗菌机制的结合,且释放型抗菌占主导地位。当介质中存在含 N—H 的物质时,卤胺化合物通常也会通过转移型

抗菌机制发生作用。

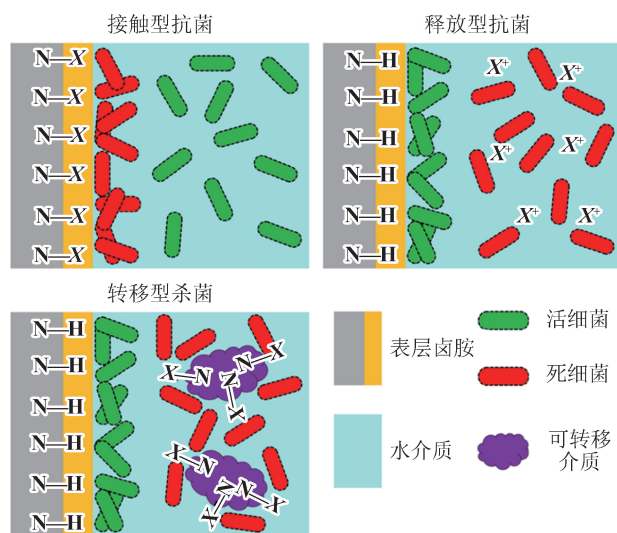


图6 卤胺化合物抗菌机制^[8]

Fig. 6 Antibacterial mechanism of N-halamines compounds^[8]

3 卤胺化合物在医用纺织品领域的应用

感染类疾病通常是由各类致病菌的传播引发的。此类问题在医疗健康领域引起了广泛的关注,进而促进了各类医用材料如医疗器械、手术装备等的抗菌化处理,以降低患者和医护人员遭受感染的风险。与其他类型的抗菌剂不同,卤胺化合物由于其独特的抗菌机制,在医用材料领域获得广泛应用。后文将围绕医用纺织品抗菌性能的实现,简要介绍卤胺化合物在该领域的具体应用情况。

3.1 卫生保健用纺织品

纺织品作为常见的医用材料,被广泛应用于医疗卫生体系和个人防护领域。在医疗卫生场景中,常见的卫生保健类纺织品涵盖医院用床单、医用手术服、个人防护口罩等。鉴于这些纺织品使用场景的特殊性,赋予其抗菌功能显得尤为关键且必要。卤胺化合物在卫生保健类纺织品领域的应用极为广泛。由于不同应用场景对纺织品性能的要求存在差异,其应用方式也各具特点。Cao 等^[28]合成了一种兼具环状酰胺及链状酰胺结构的卤胺前驱体,以异辛酸亚锡为催化剂,将该卤胺前驱体接枝到棉织物表面,如图 7a) 所示。这种卤胺前驱体接枝的棉织

物 CF-PDM-Cl 具有良好的抗菌性能,能够杀灭 99.99% 的金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌,并且经 50 次水洗循环后仍具有很好的抗菌性能。此外,CF-PDM-Cl 还具有优良的力学性能、良好的生物相容性以及适宜的通透性能,这使其具备成为医用纺织品的潜力。Wu 等^[29]利用硅烷偶联剂对棉织物进行表面改性,并通过共聚的形式在棉织物表面接枝了一种季铵化/环状三聚氰酸类卤胺抗菌整理剂,如图 7b) 所示。这种经季铵盐/卤胺改性的棉织物 QACs/Hals@cotton-Cl 综合性能优异,具有高效的抗菌能力,促进伤口愈合能力,以及自清洁、可再生、紫外屏蔽等特性,在医疗卫生材料以及个人卫生防护材料方面展现出巨大的潜在应用价值。除棉织物外,涤纶等化纤织物也是卫生保健类纺织品的主要构成材料。Wang 等^[10]合成了一种基于环状卤胺及二苯甲酮结构的功能化整理剂,并通过电子辐照的方式将其接枝到涤纶织物表面,制备出一种卤胺改性涤纶织物 Cl-BPDMH,其合成流程如图 7c) 所示。研究发现,这种改性涤纶织物能够在 24 h 内完全杀灭所有的金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌,且具有良好的生物相容性。值得一提的是,这种卤胺改性方法不仅适用于涤纶织物,对于其他化纤织物,如聚酰胺织物、聚丙烯织物及聚丙烯腈织物等,同样具有很好的效果。除对纺织品进行功能化整理外,将卤胺化合物与其他材料进行整合,再通过涂覆等方式整理到织物表面,也是一种行之有效的方法。如图 7d) 所示,Li 等^[30]合成了一种具有硅烷结构的环状卤胺聚合物前驱体,并成功使其与二氧化钛结合。随后,他们通过浸轧烘焙的方式,将这种卤胺改性的二氧化钛整理至棉织物表面,赋予棉织物高效的抗菌性能以及良好的紫外稳定性。

除前文提及的常规医疗卫生纺织品外,个人卫生防护材料同样也是卤胺抗菌功能化研究的重要方向。Shao 等^[31]采用静电纺丝技术制备出聚偏二氟乙烯(PVDF)纳米纤维膜,随后通过强氧化、接枝聚合等方法,将含有哌啶醇式结构的环状类卤胺引入 PVDF 分子链中,其具体制备流程如图 8a) 所示。经改性的 PVDF 纳米纤维膜 (PVDF-PAA-TMP-Cl) 性能优异,对直径小于 0.3 μm 的悬浮颗粒 ($\text{PM}_{0.3}$) 的拦截率高达 99.93%,同时具备较高的抗菌效率 (> 98%),是一种理想的空气过滤防护材料。Liu 等^[32]

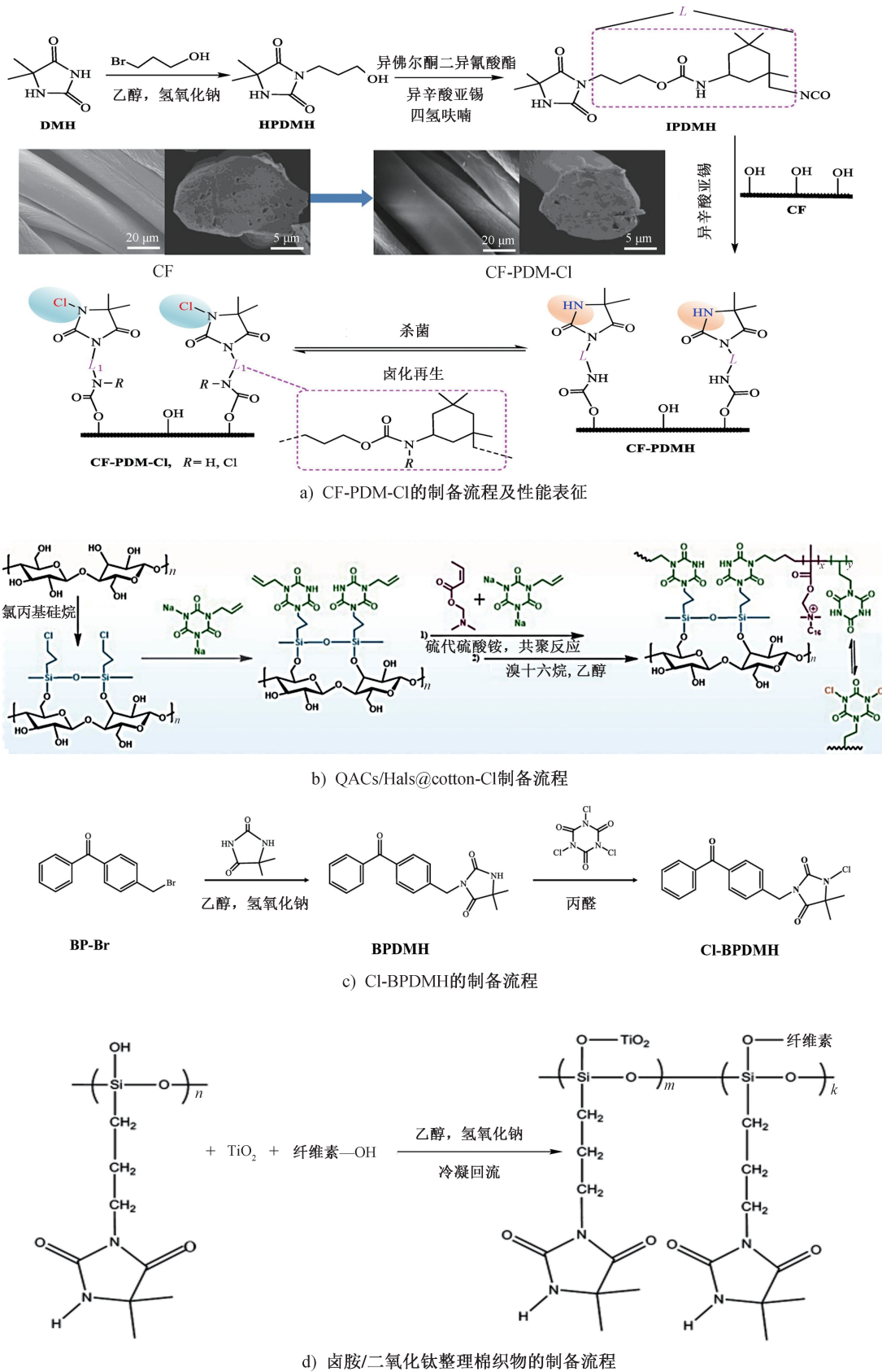


图 7 几种卤胺化合物的制备流程及其在卫生保健用纺织品中的应用

Fig. 7 Preparation and application of some N-halamines compounds in the healthcare textiles

基于聚氨酯(PU)高分子,合成了2种不同的嵌段高聚物,分别为卤胺改性聚氨酯(HAPU)和季铵盐改性聚氨酯(SBPU)。随后将这2种聚氨酯进行共混纺丝,制备出一种大尺寸的纳米纤维膜,如图8b)所示。该纳米纤维膜对SARS病毒具有很好的灭活性能,且对常见的细菌及耐药菌也表现出很好的抗菌效果,在个人防护领域,尤其是空气过滤方面,展现出较大的应用价值。与传统的膜状过滤材料不同,Wang等^[33]先对细菌纤维素和硅纳米纤维进行均质化处理,再添加小分子环状类卤胺改性,最后通过冷冻干燥的方法制备出一种网笼状的纳米纤维气凝胶(CSAs),如图8c)所示。这种纳米纤维气凝胶对PM_{0.3}的拦截率高达99.97%,且可在5min的接触时间内完全杀灭数量级为6的细菌和病毒。其独特的网笼状结构赋予CSAs高效捕捉细菌和病毒的能力。

3.2 生物医用纺织品

在生物医用纺织品领域,卤胺化合物的应用主要集中在伤口敷料方面。由于伤口敷料形式多样,卤胺化合物的具体应用方式也各不相同。对于传统的止血材料棉纱布,表面功能化整理是赋予其抗菌性能的主要方法。Zhang等^[34]合成了一种由两性离子与环状类卤胺共聚而成的高聚物,随后通过浸渍工艺制备出功能化纱布 HaloCare dressing,如图9a)所示。这种功能化纱布在保持自身强力的同时,能够在15min内完全杀灭大肠埃希菌及5种耐药菌。此外,HaloCare dressing还表现出优异的凝血性能和良好的生物相容性。Yin等^[35]合成了一种含有季铵盐结构的环状类卤胺,并通过环氧基反应将其接枝到壳聚糖分子链中,再将这种接枝壳聚糖(CSENDMH)与PVA共混后制备纳米纤维膜[图9b)]。制得的纳米纤维膜表现出优异的抗菌性能、良好的生物相容性和凝血性能。除了对传统敷料进行改性及开发纳米纤维膜材料外,新型伤口敷料通常选择纺织材料,如丝素蛋白、壳聚糖等作为原材料,制备各类凝胶化伤口敷料。Zheng等^[36]以1,2-环氧-4-乙烯基环己烷为交联剂,壳聚糖为基材,1-氯-2,2,5,5-四甲基-4-咪唑烷酮为抗菌组分,制备出一种干凝胶状伤口敷料CS/EVC/MC,制备流程如图9c)所示。CS/EVC/MC能够在30min内完全杀灭数量级为

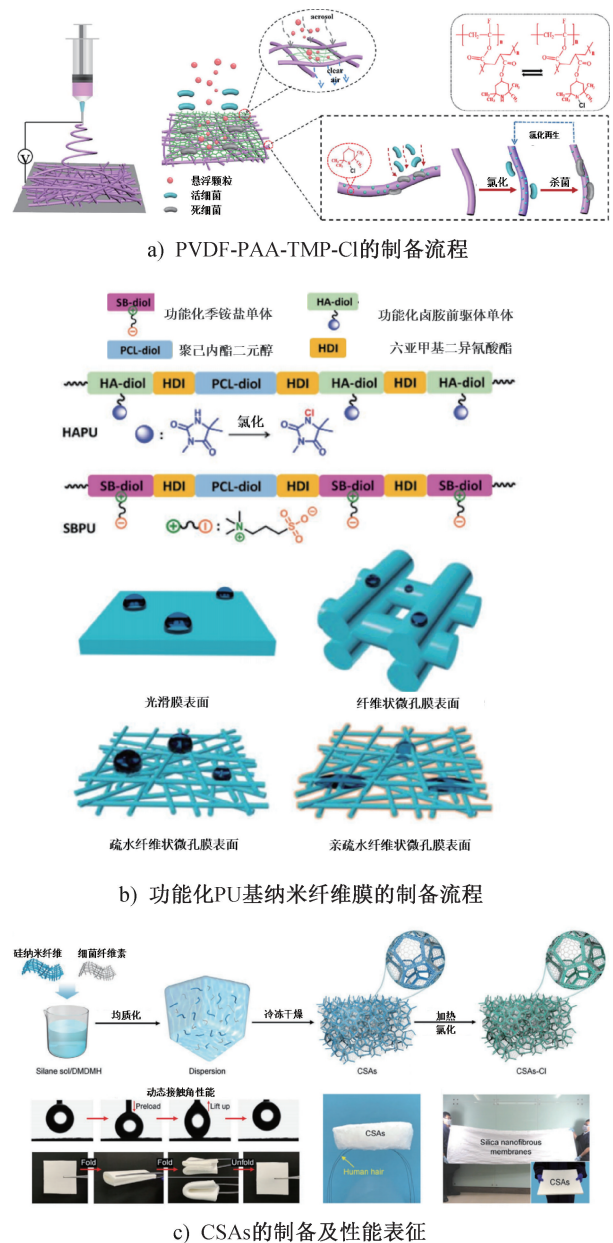


图8 几种卤胺化合物的制备流程及其在个人防护用纺织品中的应用

Fig. 8 Preparation and application of some N-halamines compounds in the personal protective textiles

6的金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌,同时还具备凝血和血小板黏附性能。这种干凝胶状伤口敷料无细胞毒性,是一种具有潜在应用价值的生物医用材料。除上述应用外,卤胺功能化医疗用纺织品的应用范围正在不断拓展,在血液消毒、工程支架植入、生物补片等方面已取得一定成果。相信在不久的将来,卤胺化合物能够进一步应用于这些领域的生物医用纺织品中^[37-39]。

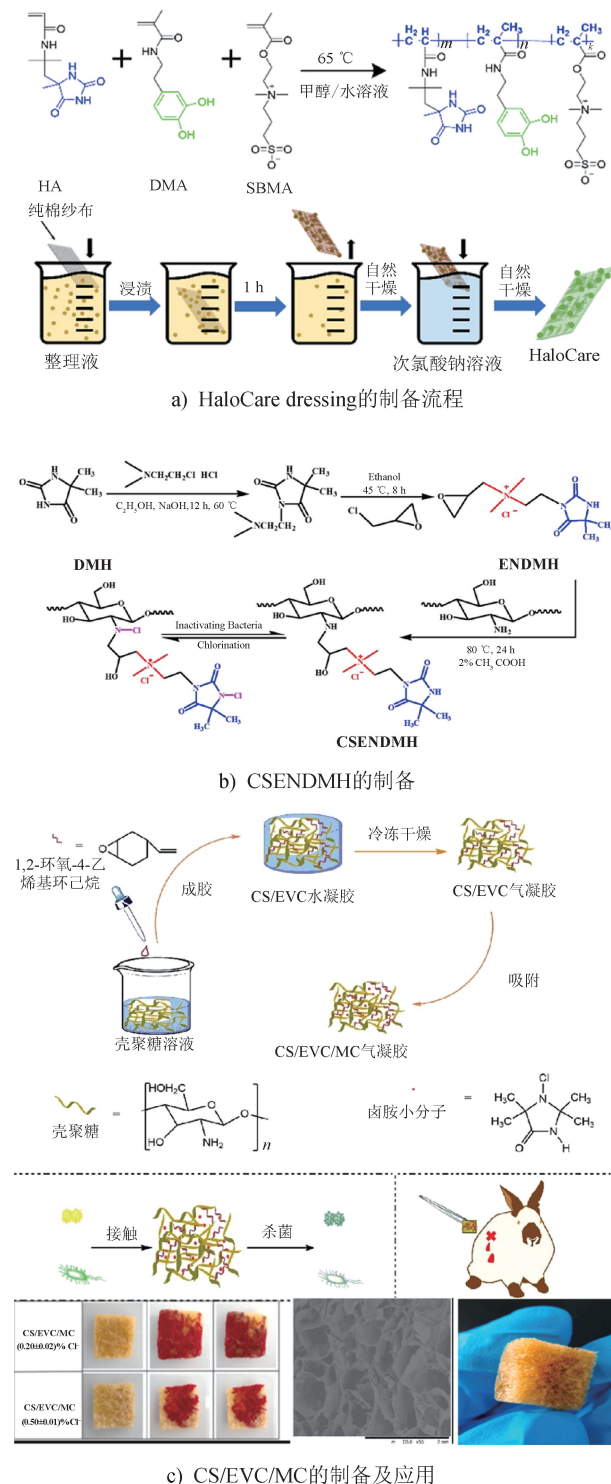


图 9 几种卤胺化合物的制备流程及其在生物医疗用纺织品中的应用

Fig. 9 Preparation and application of some N-halamines compounds in the biomedical textiles

4 结束语

目前,随着人们对生命健康领域关注度的愈发提高,对抗菌功能化医用纺织品的需求也不断增长。医用纺织品的抗菌功能化,无疑是一个伴随人类发展进程长期存在的议题。卤胺化合物的问世为抗菌功能化医用纺织品开辟了新的发展路径,指明了新的研究方向。基于此,本文围绕医用纺织品的抗菌功能化这一主题,剖析了卤胺化合物在医用纺织品领域的应用情况及相应研究进展,并阐述了其抗菌机制。尽管目前卤胺化合物在医用纺织品领域的应用大多集中在传统医用纺织品方面,如医用棉织物、传统敷料等,但随着纺织材料在医疗卫生领域应用的不断深入,卤胺化合物在人工血管、人工心脏瓣膜、植入性补片等新型医用纺织品领域将表现出广阔的应用前景,其对于预防疾病传播和避免交叉感染具有重要的研究价值。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] RAOOFI S, KAN F P, RAFIEI S, et al. Global prevalence of nosocomial infection: a systematic review and meta-analysis [J]. PLoS One, 2023, 18 (1): e0274248.
- [2] CHU D K, AKL E A, DUDA S, et al. Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis [J]. Lancet, 2020, 395: 1973-1987.
- [3] AN L, PERKINS P, YI R L, et al. Development of polylactic acid based antimicrobial food packaging films with N-halamine modified microcrystalline cellulose [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124685.

- [4] EL NAHHAL I M, AL AQAD M, KODEH F S, et al. N-halamine-modified mesoporous silica for water disinfection [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 293: 126936.
- [5] WANG Y F, LI K Z, XUE W J, et al. Preparation of N-halamine-based mesoporous composites for decontamination of formaldehyde and simultaneous deactivation of bacteria [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 700: 134664.
- [6] 马宗敏, 闫子硕, 斯阳, 等. 水消毒用卤胺改性 EVOH 纳米纤维膜的制备及性能表征 [J]. *产业用纺织品*, 2022, 40(4): 7-12.
- [7] BERLINER J F T. The chemistry of chloramines [J]. *Journal AWWA*, 1931, 23(9): 1320-1333.
- [8] DONG A, WANG Y J, GAO Y Y, et al. Chemical insights into antibacterial N-halamines [J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(6): 4806-4862.
- [9] ORHAN M, DEMIRCI F, KOCER H B, et al. Supercritical carbon dioxide application using hydantoin acrylamide for biocidal functionalization of polyester [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2020, 165: 104986.
- [10] WANG S, LI J N, CAO Y H, et al. Non-leaching, rapid bactericidal and biocompatible polyester fabrics finished with benzophenone terminated N-halamine [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, 4(1): 119-128.
- [11] ROSCIARDI V, BANDELLI D, BASSU G, et al. Highly biocidal poly(vinyl alcohol)-hydantoin/starch hybrid gels: a “Trojan Horse” for bacillus subtilis [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 657: 788-798.
- [12] XU D H, WANG S J, HU J W, et al. Enhancing antibacterial and flame-retardant performance of cotton fabric with an iminodiacetic acid-containing N-halamine [J]. *Cellulose*, 2021, 28(5): 3265-3277.
- [13] CERVANTES M Y G, HAN L, KIM J, et al. N-halamine-decorated electrospun polyacrylonitrile nanofibrous membranes: characterization and antimicrobial properties [J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2021, 168: 105058.
- [14] WANG Y F, ZHANG W Y, HONG J, et al. Removal of bacteria from air and aqueous phase based on N-halamine decorated polyacrylonitrile nanofiber membrane [J]. *ChemistrySelect*, 2023, 8(23): e202300168.
- [15] HAAG W R. The formation of *N*-bromo-*N*-chloro-amines in chlorinated saline waters [J]. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 1980, 42(8): 1123-1127.
- [16] BADROSSAMAY M R, SUN G. Acyclic halamine polypropylene polymer: effect of monomer structure on grafting efficiency, stability and biocidal activities [J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2008, 68(12): 1636-1645.
- [17] CHEN Z, ZHAO Q H, CHEN J H, et al. N-halamine-based polypropylene melt-blown nonwoven fabric with superhydrophilicity and antibacterial properties for face masks [J]. *Polymers*, 2023, 15(21): 4335.
- [18] KIM S S, JUNG D, CHOI U H, et al. Antimicrobial *m*-aramid nanofibrous membrane for nonpressure driven filtration [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(14): 8693-8697.
- [19] 彭盼盼, 杨建军, 程传政, 等. 原子转移自由基聚合法制备氮卤胺型抗菌棉织物及性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(8): 17-25.
- [20] LI L F, ZHOU D M, ZHU Y F, et al. Multifunctional antibacterial cotton fabrics based on a triazole-halamine-diethyl phosphite [J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119571.
- [21] CHEN X Y, DING F, HOU X L, et al. Novel efficient flame-retardant, smoke suppression and antibacterial treatment for cotton fabrics by surface graft copolymerization [J]. *Cellulose*, 2024, 31(15): 9487-9502.
- [22] AHMED A E I, HAY J N, BUSHELL M E, et al. Macroscopic N-halamine biocidal polymeric beads [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 116(4): 2396-2408.
- [23] FARAH S, AVIV O, DAIF M, et al. *N*-bromohydantoin grafted polystyrene beads: synthesis and nano-micro beads characteristics for achieving controlled release of active oxidative bromine and extended microbial inactivation efficiency [J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2016, 54(5): 596-610.
- [24] SUN X B, CAO Z B, PORTEOUS N, et al. An N-halamine-based rechargeable antimicrobial and biofilm controlling polyurethane [J]. *Acta Biomaterialia*, 2012, 8(4): 1498-1506.
- [25] ZHOU C G, KAN C W. Plasma-assisted regenerable chitosan antimicrobial finishing for cotton [J].

- Cellulose, 2014, 21(4): 2951-2962.
- [26] AHMED A E I, HAY J N, BUSHELL M E, et al. Optimizing halogenation conditions of N-halamine polymers and investigating mode of bactericidal action [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113(4): 2404-2412.
- [27] CHEN Z B, LUO J, SUN Y Y. Biocidal efficacy, biofilm-controlling function, and controlled release effect of chloromelamine-based bioresponsive fibrous materials [J]. Biomaterials, 2007, 28(9): 1597-1609.
- [28] CAO Y H, WANG S, SU Y, et al. Rapid and persistent bactericidal cotton fabrics finished facilely with reactive N-halamine [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 240: 124495.
- [29] WU K, HU Y L, WU X L, et al. Fabrication of multifunctional cotton fabrics with quaternized N-halamine endowing the synergetic rechargeable antibacterial, wound healing and self-cleaning performances [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275: 133493.
- [30] LI J, LIU Y, JIANG Z M, et al. Antimicrobial cellulose modified with nanotitania and cyclic N-halamine [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53: 13058-13064.
- [31] SHAO W L, LI J L, ZHANG Y T, et al. Polyvinylidene fluoride multi-scale nanofibrous membrane modified using N-halamine with high filtration efficiency and durable antibacterial properties for air filtration [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 628: 627-636.
- [32] LIU Q S, ZHANG Y D, LIU W J, et al. A broad-spectrum antimicrobial and antiviral membrane inactivates SARS-CoV-2 in minutes [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31: 2103477.
- [33] WANG F, SI Y, YU J Y, et al. Tailoring nanonets-engineered superflexible nanofibrous aerogels with hierarchical cage-like architecture enables renewable antimicrobial air filtration [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31: 2107223.
- [34] ZHANG Y D, DEMIR B, BERTSCH G, et al. Zwitterion and N-halamine functionalized cotton wound dressing with enhanced antifouling, antibacterial, and hemostatic properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 230: 123121.
- [35] YIN M L, WANG Y F, ZHANG Y, et al. Novel quaternized N-halamine chitosan and polyvinyl alcohol nanofibrous membranes as hemostatic materials with excellent antibacterial properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 232: 115823.
- [36] ZHENG Y X, PAN N Y, LIU Y, et al. Novel porous chitosan/N-halamine structure with efficient antibacterial and hemostatic properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 253: 117205.
- [37] LIU W X, TAO Z F, WANG D, et al. Engineering a black phosphorus-based magnetic nanosystem armed with antibacterial N-halamine polymer for recyclable blood disinfection [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 415: 128888.
- [38] WANG Z M, TANG Y C, WANG P, et al. Dynamical integration of antimicrobial, anti-inflammatory, and pro-osteogenic activities on polyetheretherketone *via* a porous N-halamine polymeric coating [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(41): 2307286.
- [39] YANG Z M, FAN S S, MA W, et al. Flexible adhesive GelMA/SF-based patch embedded with polydopamine N-halamine nanoparticles for repair of infected wounds [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 460: 141732.

(上接第 9 页)

- [29] ISLAM M M, SHAHRUZZAMAN M, BISWAS S, et al. Chitosan based bioactive materials in tissue engineering applications; a review [J]. Bioactive Materials, 2020, 5(1): 164-183.
- [30] ZHAO X, YIN M Y, GU T Y, et al. pH-responsive and chemiluminescent carboxyethyl chitosan nanocarriers for intelligent targeted phototherapy sterilization [J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(13): 12402-12412.