

浓缩洗衣液中抗菌成分的稳定性与释放性能研究

张训庭 吴又仙

浙江康满家日用品有限公司 浙江 金华 321000

【摘要】：浓缩洗衣液是衣物清洁护理重要产品，其抗菌功能依赖抗菌成分在配方体系的稳定性与释放行为。本研究聚焦浓缩洗衣液中抗菌成分的分子环境适应性、界面作用机制及释放动力学规律，经理论分析与逻辑推演，系统探讨浓缩体系高浓度电解质、表面活性剂胶束及复杂相行为对抗菌成分稳定性的影响，揭示抗菌成分在衣物纤维表面吸附-解吸过程与释放效率的关联机制。研究表明，抗菌成分分子结构极性、与表面活性剂相互作用强度及配方体系相平衡状态是决定其稳定性与释放性能的核心因素。调控抗菌成分分子设计与配方微环境，可实现其储存时结构稳定、使用时高效释放，为浓缩洗衣液抗菌功能精准调控提供理论依据。

【关键词】：浓缩洗衣液；抗菌成分；稳定性；释放性能；分子相互作用；相行为

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.062

引言

随着消费者对衣物清洁和健康防护需求提升，抗菌成为洗衣液重要附加属性，浓缩洗衣液成为市场主流。但浓缩体系给抗菌成分的化学稳定性、物理分散性和功能释放效率带来挑战，抗菌成分储存时易活性衰减，使用时释放效率影响抗菌效果。现有研究缺乏对浓缩洗衣液复杂体系中抗菌成分稳定性与释放机制的系统理论分析。本研究从分子层面探讨抗菌成分与浓缩配方各组分相互作用规律，分析其结构演化与行为模式，构建理论框架，为浓缩洗衣液抗菌功能优化设计提供理论支撑。

1 浓缩洗衣液体系的结构特征与抗菌成分的分子适配性

1.1 浓缩洗衣液体系的分子聚集体结构特征

浓缩洗衣液因其高活性物含量与低水含量，形成了高度有序且动态变化的分子聚集体结构。这些聚集体主要包括球状或棒状胶束、层状液晶相以及囊泡等多尺度组装体。其形成机制源于表面活性剂分子在有限水环境中的自组装行为，受浓度、温度、电解质及助剂等多重因素调控。此类结构不仅决定了体系的流变性能与稳定性，也构建了抗菌成分所处的微观分子环境，对其溶解、分散及释放行为产生决定性影响。

1.2 抗菌成分与浓缩体系的分子适配性机制

抗菌成分在浓缩洗衣液中的效能与分子结构特性密切相关，体现在极性/疏水平衡、电荷性质及空间构型等方面。阳离子型抗菌剂易与阴离子表面活性剂生成不溶性离子对，导致有效浓度降低甚至失活；非离子型抗菌剂通过疏水作用嵌入胶束内核，活性基团难以接触微生物靶点。此外，浓缩体系中的高浓度电解质会调控抗菌成分的分配行为，特定金属离子还可能与抗菌分子官能团发生配位作用，引发结构异构或降解。因此，要实现抗菌成分在浓缩体系中的高效适配，需从分子层面优化亲疏水参数、引入空间位阻基团抑制不利相互作用，并结合电

解质种类与浓度的系统筛选，确保其化学稳定性与生物活性。

2 抗菌成分在浓缩洗衣液中的化学稳定性机制

2.1 氧化降解机制与抗氧化保护策略

浓缩洗衣液中高浓度表面活性剂、助剂和微量金属离子构成复杂氧化还原微环境，挑战抗菌成分化学稳定性。易氧化抗菌成分会被体系中残留溶解氧、过氧化物杂质和过渡金属离子催化发生不可逆降解。部分表面活性剂的不饱和脂肪链也会间接促进氧化反应。为抑制降解，需在配方中引入协同抗氧化体系，包括主抗氧化剂、辅助抗氧化剂和金属螯合剂，以提升抗菌成分氧化稳定性。

2.2 酸碱水解与结构耐受性调控

浓缩洗衣液为保障去污性能维持弱碱性（pH 8 - 10），但对含特定结构的抗菌成分有水解风险。碱性条件下，OH⁻会攻击敏感官能团，部分弱酸性抗菌分子会脱质子化，削弱其与微生物细胞膜的作用能力。为此，一方面用缓冲体系精准调控体系pH，另一方面从分子设计增强抗菌成分结构鲁棒性，提升其在碱性浓缩体系中的化学稳定性。

2.3 温度波动下的相行为耦合降解效应

实际储存和运输中，温度变化影响抗菌成分稳定性，高温加速热激活反应，低温使抗菌成分析出、结晶或形成聚集体，降低有效分散浓度并加剧化学降解。因此，需优化表面活性剂复配比例、添加相稳定助剂和筛选具有宽温域溶解性的抗菌分子结构，构建温度鲁棒型配方体系，确保抗菌成分的化学完整性与功能活性。

3 抗菌成分在浓缩洗衣液中的物理稳定性与相行为调控

3.1 胶束载体作用与抗菌成分的分相行为

浓缩洗衣液中，表面活性剂自组装的胶束是抗菌成分主要物理载体。抗菌成分在胶束-水两相间的分配由亲疏水平衡、分子极性及胶束微区极性决定。高疏水性抗菌分子嵌入胶束疏水

内核，有一定亲水性的分子分布于胶束 Stern 层或水相。若抗菌成分极性与胶束内核不匹配，会导致热力学不稳定，析出纳米级聚集体，降低有效浓度、引发光散射等。因此，需调控表面活性剂碳链长度、EO 数及复配比例，调节胶束微环境极性，实现抗菌成分稳定共存。

3.2 浓缩体系相行为对分散均一性的调控机制

表面活性剂浓度高于临界胶束浓度时，浓缩洗衣液易进入多相共存区域，有序介观结构虽提升体系稳定性，但可能导致抗菌成分分配失衡。如层状相中，疏水性抗菌剂与亲水性组分空间隔离，相转变动力学缓慢会诱发分层或絮凝。所以，配方设计要避免相分离窗口，优选宽单相区的表面活性剂组合，用流变学与小角 X 射线散射监测相态，保障抗菌成分均匀分布。

3.3 抗菌成分浓度与分子间作用对物理稳定性的制约

抗菌成分的溶解度极限和分子间非共价相互作用影响物理稳定性。添加量超表观溶解度易结晶析出，含特定基团的抗菌分子易形成二聚体或多聚体，导致粒径增大、分散性下降。对此，要控制添加浓度，采用分子修饰策略提升溶解能力，必要时辅以助溶剂或分散稳定剂，维持体系稳定性。

4 抗菌成分在洗涤过程中的释放动力学与界面作用机制

4.1 胶束解离驱动的抗菌成分释放动力学

洗涤初始，浓缩洗衣液被水稀释，表面活性剂浓度降至临界胶束浓度附近或以下，引发胶束解离，驱动抗菌成分向水相释放。释放速率由抗菌成分在胶束相与水相间的分配系数和胶束解离的动力学常数决定。高疏水性抗菌分子释放缓慢且不完全，适度亲水的分子可随胶束快速释放。通过分子工程调节亲疏水平衡或设计响应性胶束结构，可实现“按需释放”。

4.2 水相传输过程中的扩散与环境耦合效应

抗菌成分释放至水相后，需传质迁移至衣物纤维表面，传输效率受分子本征性质与洗涤工况影响。小分子、低电荷密度及弱水合作用的抗菌剂扩散系数高，易穿透边界层；大分子或强极性抗菌成分扩散受限。搅拌强度、温度、水硬度等外部条件会影响扩散。评估抗菌效能时，需结合实际洗涤参数建立传质-反应耦合模型，以预测纤维界面瞬时有效浓度。

4.3 纤维-抗菌成分界面吸附机制与功能阈值

抗菌成分抵达纤维表面后，通过多模式相互作用吸附固定，这是发挥抗菌功能的前提。天然纤维和合成纤维的吸附作用主导因素不同，吸附量受溶液 pH、离子强度及共存表面活性剂竞争吸附等因素调控。仅当纤维表面抗菌成分浓度超过最低抑菌浓度 (MIC) 的局部阈值时，才能抑制细菌增殖。适度解吸有助于维持长效抗菌性能，过度解吸会导致功能衰减。理想抗菌成分应具备“强吸附-缓释放”特性，通过分子设计平衡

吸附亲和力与解吸动力学，实现高效、持久的界面抗菌作用。

5 抗菌成分释放效率的影响因素与调控策略

5.1 配方体系对抗菌成分释放效率的调控机制

配方中表面活性剂的种类、比例及浓度是调控释放效率的关键内因，决定胶束微结构及与抗菌成分的相互作用强度。阴离子表面活性剂易与阳离子抗菌剂形成强静电络合物，抑制释放；高 EO 数的非离子表面活性剂通过空间位阻效应促进释放；两性表面活性剂可调节界面电荷，缓解拮抗作用。采用阴/非/两性表面活性剂多元复配策略，能优化胶束解离动力学，构建“缓释-促释”平衡微环境，实现抗菌成分在洗涤初期高效释放、漂洗阶段适度保留的目标。

5.2 洗涤工况对释放动力学的协同强化作用

温度与机械搅拌作为外部操作参数，影响抗菌成分的释放与传输效率。温度升高降低胶束聚集数、加速解离，提升分子扩散系数；搅拌强度增加增强湍流强度与边界层扰动，提高抗菌成分与纤维的碰撞频率。温度与搅拌存在协同效应，高温下低粘度体系易被湍流穿透，强搅拌可防止再吸附损失。实际应用中应依据洗涤程序匹配抗菌配方的释放特性，必要时引入温度响应型助剂，最大化释放效率。

5.3 纤维基质特性导向的抗菌分子精准设计

不同纤维材质的表面化学与物理结构影响抗菌成分的界面行为。天然纤维对阳离子抗菌剂亲和力高，蛋白质纤维兼具静电与氢键吸附能力，合成纤维依赖范德华力与疏水作用吸附非极性抗菌分子。纤维的比表面积、孔隙率及表面粗糙度调控吸附容量与结合牢固度。抗菌成分的分子设计应采取“纤维适配”策略，针对不同纤维材质优化结构，提升初始吸附效率，调控解吸速率，延长织物抗菌持久性。

6 抗菌成分的生物安全性与环境友好性评估

浓缩洗衣液中抗菌成分的安全性与生态相容性是应用推广的关键前提。使用时，抗菌成分可能经皮肤接触、吸入进入人体，也可能随洗涤废水排入环境，对生态系统有潜在风险。生物安全性方面，要重点评估其对皮肤的刺激性、致敏性和细胞毒性。部分抗菌成分会破坏皮肤脂质屏障，引发干燥或瘙痒，某些分子可能诱发过敏反应。所以，需通过规范毒理学测试确保其对人体健康无显著危害。如图 1 所示，所研究的抗菌肽在高浓度下溶血率 < 5%，细胞存活率处于可接受水平，说明其生物相容性良好。

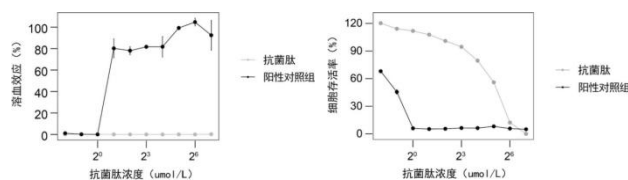


图 1 抗菌肽对人红细胞的溶血效应与细胞存活率

图1展示抗菌肽不同浓度下人红细胞溶血效应(左图)与细胞存活率(右图)。结果显示,阳性对照组溶血效应随抗菌肽浓度增加而显著(最高达100%),而抗菌肽组在各测试浓度下溶血性均不明显(<5%),表明其血液相容性良好。同时,抗菌肽对细胞存活率影响小,即便在高浓度(2° μmol/L)下仍维持约10%以上,提示对正常细胞毒性低。注:灰色线代表抗菌肽,黑色线代表阳性对照组。

在环境友好性方面,需关注降解性、生物累积性及对水生生物的生态毒性。难降解或高累积性抗菌成分可能通过食物链放大威胁高等生物。因此,分子设计阶段应优先引入易生物降解基团并开展环境行为研究。抑菌实验(图2-4)显示该抗菌肽对多种革兰氏阳性/阴性菌及真菌有广谱高效活性,扫描电镜观察(图5)证实其通过破坏细菌膜结构杀菌,作用机制明确且不易诱导耐药性,利于降低环境选择压力。

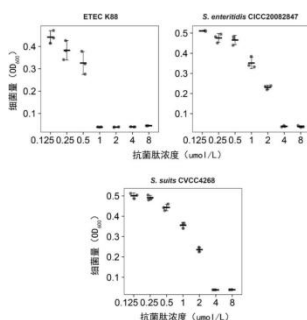


图2 抗菌肽对多种细菌的抑菌活性

图2显示抗菌肽对三种典型致病菌的抑菌效果。结果表明,随抗菌肽浓度升高,细菌OD₆₀₀值显著下降,当浓度≥1 μmol/L时,三种菌株均被完全抑制,说明该抗菌肽有广谱高效抗菌能力。注:每个子图分别表示对不同菌株的抑制效果,误差棒表示标准差

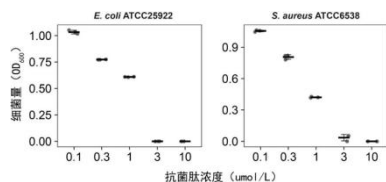


图3 抗菌肽对革兰氏阴性与阳性菌的杀菌效果对比

图3展示了抗菌肽对大肠杆菌(E. coli)与金黄色葡萄球菌(S. aureus)的杀菌效果对比。研究表明,抗菌肽在低浓度(0.1-1 μmol/L)下就能显著抑制这两种细菌的生长,并且当浓度达到或超过3 μmol/L时,几乎可以完全杀灭细菌,体
参考文献:

[1] 王泽云,陈海兰. 纤维素酶失活影响因素分析及其在浓缩洗衣液中的应用[J]. 中国洗涤用品工业,2024(6):25-33.
 [2] 陈佳福. pH对超浓缩洗衣液洗涤能力的影响研究[J]. 河南科技,2021,40(12):122-124.
 [3] 石佳,刘泽明,马桥,等. 个人护理品中常见抗菌剂的环境分布及毒理学研究进展[J]. 生态毒理学报,2024,19(6):48-63.
 [4] 田晶. 典型表面活性剂对阳离子杀菌洗衣液去污性能研究[J]. 中国洗涤用品工业,2025(4):88-93.
 [5] 王波,孙鹤元,陈红. 一种具有柔顺和杀菌功能洗衣液的配制[J]. 中国洗涤用品工业,2024(9):40-47.

现了其对于革兰氏阴性菌和阳性菌均具备高效的杀菌能力。

注:左侧为E. coli,右侧为S. aureus,数据点带误差棒。

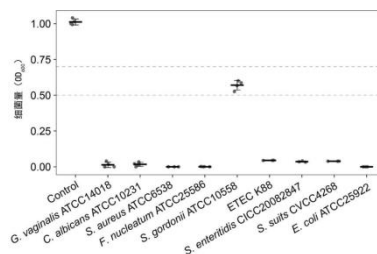


图4 抗菌肽对多种临床常见病原体的广谱抑菌活性

图4展示了抗菌肽对10种临床常见病原体的抑菌效果。结果显示,除G. vaginalis ATCC14018外,其余9种病原体在抗菌肽处理后OD₆₀₀值均降至接近零,表明该抗菌肽具有广泛的抗菌谱,尤其对S. aureus、E. coli等常见致病菌表现出优异的抑制能力。注:Control为对照组,其余为不同病原体处理组。

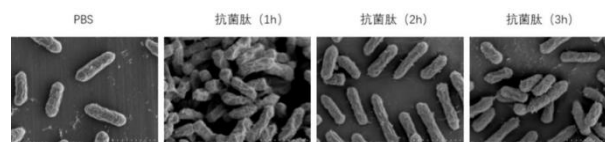


图5 抗菌肽作用下细菌形态的扫描电镜观察

图5为抗菌肽处理前后大肠杆菌的扫描电镜图像。PBS对照组细菌形态完整、表面光滑;处理1小时后,细菌表面出现凹陷和皱褶;2小时后,部分细菌发生裂解;3小时后,多数细菌呈现破碎或空壳状,表明抗菌肽可诱导细菌膜结构破坏,导致细胞死亡。注:从左至右分别为PBS对照、处理1h、2h、3h后的细菌形貌。

7 结论

本研究揭示了浓缩洗衣液中抗菌成分稳定性与释放性能机制,阐明其在高浓度、低水活度体系中的分子适配性、稳定性及洗涤界面行为规律。研究表明,抗菌成分的分子结构、与表面活性剂/电解质相互作用强度及体系相行为决定其储存稳定性与使用效能。通过分子修饰与配方微环境优化,可实现“储时稳定、用时高效”。未来发展聚焦绿色化、智能化与长效化:一是开发易降解、低毒的天然或仿生抗菌成分;二是结合控释技术实现按需释放与精准抗菌;三是探索新路径提升耐久性并减少环境残留。同时,要强化生物安全性与生态风险评估,构建兼顾功效、安全与可持续的抗菌浓缩洗衣液技术体系,为高端衣物护理提供支撑。