



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230072

抗菌剂 MBC 和 MBT 对纸基渗水材料性能劣化的抑制

窦文芳^{1,2,3}, 王雨潇^{1,2,3}, 贺靖一^{1,2,3}, 周 通^{1,2,3}, 刘泽华^{1,2,3}

(1. 天津科技大学生物源纤维制造技术国家重点实验室, 天津 300457;

2. 天津市制浆造纸重点实验室, 天津 300457; 3. 中国轻工业造纸与生物质精炼重点实验室, 天津 300457)

摘要: 将抗菌剂以浆内添加的方式加入纸基渗水材料中,用以延长纸基渗水材料的使用寿命,研究添加抗菌剂 N-(2-苯并咪唑基)氨基甲酸甲酯(MBC)和亚甲基双硫氰酸酯(MBT)的纸基渗水材料在不同土壤环境中力学性能、质量损失率、聚合度以及表面形貌的变化,分析了抗菌剂抑制材料性能劣化的机理。结果表明:MBC和MBT对纸基渗水材料的力学性能、聚合度、质量损失率的下降均有一定抑制作用,且MBC的抑制效果优于MBT。与空白样相比,材料中添加0.05%MBC时,抗张指数在田园土中由6.41 N·m/g提高到16.03 N·m/g,在沙土中由9.31 N·m/g提高到17.15 N·m/g;材料中添加0.07%MBC时,质量损失率在田园土中由25.53%降至4.10%,在沙土中由23.65%降低至2.06%。添加0.05%MBC时,材料的聚合度下降程度由26.09%降至15.64%。

关键词: 纸基渗水材料; N-(2-苯并咪唑基)氨基甲酸甲酯; 亚甲基双硫氰酸酯; 力学性能; 降解抑制

中图分类号: TS761

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2023)06-0019-08

Inhibition of Antibacterial Agents MBC and MBT on the Degradation of Paper-Based Water Permeable Materials

DOU Wenfang^{1,2,3}, WANG Yuxiao^{1,2,3}, HE Jingyi^{1,2,3}, ZHOU Tong^{1,2,3}, LIU Zehua^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Biobased Fiber Manufacturing Technology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, Tianjin 300457, China;

3. China Light Industry Key Laboratory of Papermaking and Biorefinery, Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to prolong the service life of paper-based permeable materials, the mechanical properties, mass loss rate, polymerization degree and surface morphology of paper-based permeable materials with antibacterial agents methyl 2-benzimidazole carbamate (MBC) and methylene bis (thiocyanate) (MBT) were studied in different soil environments, and the mechanism of antibacterial agents inhibiting the deterioration of material properties was analyzed. The results showed that MBC and MBT inhibited the mechanical properties, polymerization degree and mass loss rate of paper-based permeable materials, and the inhibition effect of MBC was better than that of MBT. Compared with the blank sample, when 0.05% MBC was added to the material, the tensile index increased from 6.41 N·m/g to 16.03 N·m/g in the field soil and from 9.31 N·m/g to 17.15 N·m/g in the sandy soil; when 0.07% MBC was added to the material, the mass loss rate decreased from 25.53% to 4.10% in the field soil and from 23.65% to 2.06% in the sandy soil. The degree of polymerization decreased from 26.09% to 15.64% when 0.05% MBC was added.

Key words: paper-based permeable material; MBC; MBT; mechanical properties; degradation inhibition

渗水材料可广泛应用于建筑、农业、轻工业、水利、交通等领域,对节水灌溉、调节水资源^[1-2]等具有重要作用。渗水材料品种繁多,主要包括混凝土系列

渗水材料、高分子系列渗水材料、陶瓷类渗水材料、金属类渗水材料和纸基渗水材料。研究表明,通过化学改性、机械发泡、高温烧结等方式可以改善渗水材

收稿日期: 2023-03-27; 修回日期: 2023-05-24

作者简介: 窦文芳(1998—),女,山东临沂人,硕士研究生;通信作者: 刘泽华,副研究员, zehual@tust.edu.cn

料的强度,调节渗水速率^[3-9]。丛萍等^[10]为提高负压渗水材料的力学性能等,制备改性聚乙烯醇缩甲醛用来提高材料的渗水稳定性。欧章明等^[11]研究聚乳酸/聚己内酯涂层对植物纤维纸基渗水材料的影响,通过涂布的方式控制透水速率。

纸基渗水材料是以植物纤维为主要原料制备的多孔性可渗水薄层材料,具有节能环保、可生物降解、减少污染、可持续发展等特点,可为干旱缺水地区的绿化提供储水和灌溉条件。但在土壤环境中,纸基渗水材料的强度往往会受湿度、温度、微生物等条件的影响,性能逐渐下降,进而影响其正常使用。N-(2-苯并咪唑基)氨基甲酸甲酯(MBC)和亚甲基双硫氰酸酯(MBT)为非水溶性的高效、广谱、低毒性杀菌剂,在土壤中不易降解,药效持续时间长,在细菌、真菌引起的植物病害预防、纸浆和涂料的防腐等方面具有广泛的应用。本研究旨在通过添加抗菌剂减缓纸基渗水材料性能的劣化,通过湿部添加法加入 MBC 和 MBT,在利用阳离子型湿强剂聚酰胺环氧氯丙烷树脂(PAE)提高湿强度的同时,促进抗菌剂颗粒在纸页中的留着^[12],制备出具有抗菌功能的纸基渗水材料,考察两种抗菌剂对纸基渗水材料聚合度、质量损失、表面微观形貌以及力学性能的影响,并对抗菌剂抑制纤维素纤维降解的机理进行分析。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

旧瓦楞纸箱,山东某纸厂提供;PAE,固含量 13.10%,河南驻马店市白云纸业有限公司;烷基烯酮二聚体(AKD),固含量 18.11%,山东潍坊华普化学股份有限公司;MBC,优级纯,上海阿达玛斯贝塔试剂有限公司;MBT,色谱纯,上海晶纯生化科技股份有限公司;铜乙二胺,分析纯,凯玛特(天津)化工科技有限公司。

2505 型瓦力打浆机,日本 KRK 公司;ZDJ-100 型打浆度测定仪、73-18 型标准疏解机,瑞典 L&W 公司;M10097 型快速纸页成型器,德国 Karl Frank GmbH 公司;LD23 型电子万能试验机,上海力试科学仪器有限公司;PQX-250 型恒温气候箱,常熟市水北盛威实验仪器厂;JSM-IT300 LV 型扫描电子显微镜,日本 JEOL 电子仪器公司;H550S 型光学显微镜,日本 Nikon 公司;DP-02 AUTO 型纸浆黏度(纤维聚合度)测定仪,北京恒诚科技有限公司;

TR-6D 型土壤水分温度电导率传感器,东莞市东来达电子有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 纸基渗水材料的制备

纸基渗水材料的制备过程如图 1 所示。

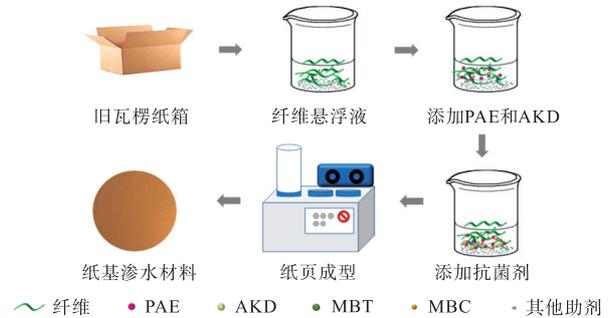


图 1 纸基渗水材料的制备过程

Fig. 1 Preparation process of paper-based permeable material

称取一定质量的旧瓦楞纸箱,根据 GB/T 24325—2009《纸浆 实验室打浆 瓦利(Valley)打浆机法》和 GB/T 3332—2004《纸浆 打浆度的测定(肖伯尔-瑞格勒法)》进行浸泡、疏解和打浆,至打浆度为 35 °SR,甩干至一定干度,放于密封袋中冷藏保存。取一定量的纸浆加水稀释并疏解,得到浆料浓度为 1.5% 的纤维悬浮液,并加入占绝干浆质量 4% 的 PAE 和 2% 的 AKD,混合均匀。采用浆内添加法添加抗菌剂 MBT 或 MBC,匀速搅拌 10 min,用快速纸页成型器抄造后,真空干燥 20 min,并在 105 °C 烘箱中熟化 20 min,得到定量为 600 g/m² 的纸基渗水材料。该材料在温度(23 ± 1) °C、相对湿度(50 ± 2)% 的恒温恒湿条件下平衡 24 h 后,进行性能检测。

1.2.2 纸基渗水材料的老化

采集沙土(校内体育场沙土)和田园土(山东滨州农田有机土),过筛除杂,置于尺寸为 38 cm × 27 cm × 20 cm 且带有密封盖的聚丙烯堆肥反应器中,通过土壤水分温度电导率传感器测试,手动调节不同土壤的含水量至 30%。将添加不同含量抗菌剂的纸基渗水材料裁切后,分别埋入反应器中距土壤表面 10 cm 处,置于 25 °C 的恒温气候箱中进行老化。

1.2.3 纸基渗水材料力学性能的测定

按照 GB/T 12914—2018《纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法(20 mm/min)》,使用电子万能试验机测定纸基渗水材料的抗张强度,测试材料宽度为 15 mm,长度为 80 mm,初始标距为 50 mm,拉伸速率为 20 mm/min。

1.2.4 纸基渗水材料质量损失率的测定

在纸基渗水材料埋入土壤后的不同时间,逐个取出试样并清理干净,在 105 °C 烘箱中加热至质量恒定,每组样品测试 3 个平行样,计算质量损失率。

$$R = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为质量损失率, m_0 为渗水材料样品埋入土壤前的质量, m_t 为渗水材料样品埋入土壤一定时间后的质量。

1.2.5 材料中纤维素聚合度的测定

黏度法是通过测定纤维素溶液的黏度进而测定聚合度的一种方法。参照 GB/T 1548—2016《纸浆铜乙二胺(CED)溶液中特性黏度值的测定》进行测试。分别精确称取纸基渗水材料 0.15 g,放入 30 mL 溶解瓶中,加入 3~5 根铜线,加入 15 mL 水,充分振荡分散 5 min 后加入 15 mL 铜乙二胺溶液,盖紧溶解瓶瓶盖,振荡至材料中的纤维素纤维完全溶解。溶解过程中不宜过分振荡或搅拌,溶解时间应小于 30 min。过滤除杂后,将溶解瓶置于 20 °C 恒温水浴锅中 15 min 后,吸取测试溶液,在专用毛细管黏度计中进行黏度测试。

$$D_p^{0.905} = 0.75[\eta] \quad (2)$$

式中: $[\eta]$ 为特性黏度, mL/g; D_p 为纤维素的聚合度。

1.2.6 红外光谱分析

取约 1 mg 纸基渗水材料与 100 mg KBr 粉末混合,在玛瑙研钵中研磨成细粉后压片,油压机压力为 10 MPa,加压时间 1 min,得到透明薄片,进行测试。

1.2.7 纸基渗水材料的表面形貌观察

光学显微镜:将试样放在 H550S 型光学显微镜的载物台上,调节白平衡后,选择合适放大倍数,调整焦距,观察样品表面形貌特征并拍摄图像。

扫描电子显微镜(SEM):采用 JSM-IT300 LV 型扫描电子显微镜,在 10 kV 电压下对样品表面进行喷铂处理,对不同土埋时间样品表面形貌进行观察。

2 结果与讨论

2.1 抗菌剂对材料力学性能的影响

使用电子万能试验机对材料进行力学性能测试,得到不同土埋时间纸基渗水材料的抗张指数,结果如图 2 和图 3 所示。

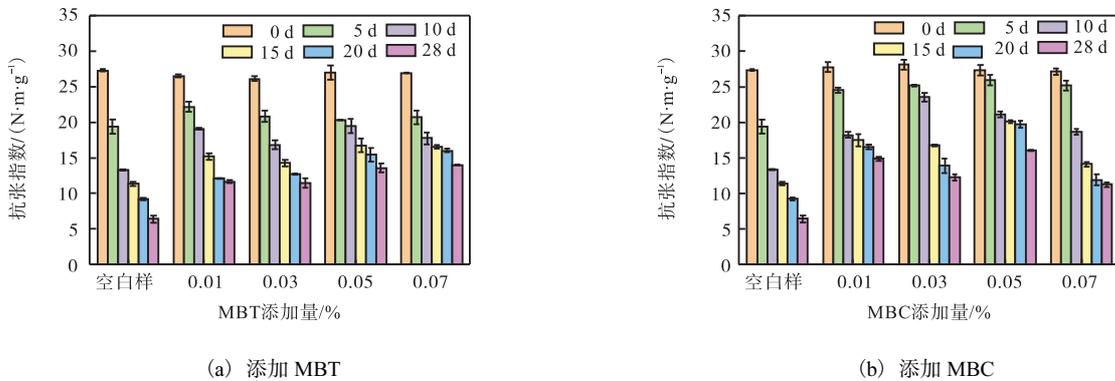


图 2 田园土中 MBT 和 MBC 对纸基渗水材料力学性能影响

Fig. 2 Effect of MBT and MBC on mechanical properties of paper-based permeable materials in pastoral soil

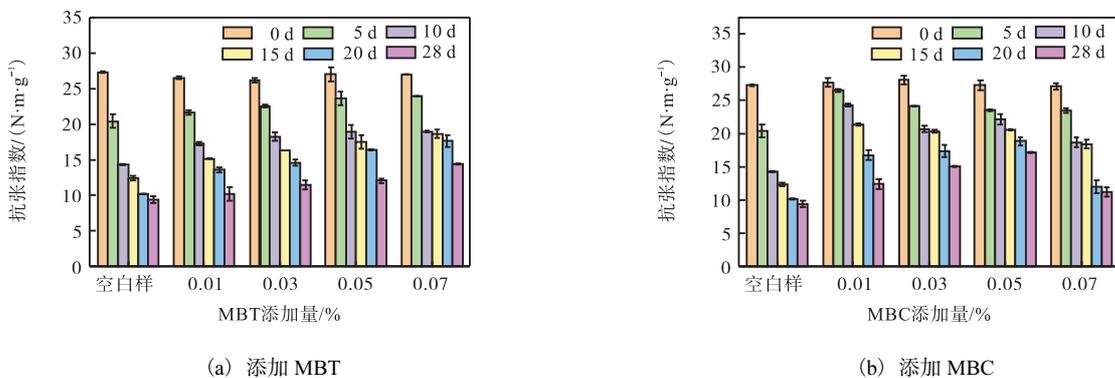


图 3 沙土中 MBT 和 MBC 对纸基渗水材料力学性能的影响

Fig. 3 Effect of MBT and MBC on mechanical properties of paper-based permeable materials in sandy soil

由图 2 和图 3 可知,在田园土、沙土环境中纸基渗水材料的抗张指数均随着时间的延长逐渐降低。其中,未添加抗菌剂的空白样强度下降最快,而添加抗菌剂的纸基渗水材料强度下降变缓,表明抗菌剂对纸基渗水材料强度损失具有抑制作用。土埋 28 d 后,空白样的抗张指数最低,在田园土中仅为 6.41 N·m/g,在沙土中仅为 9.31 N·m/g,而添加抗菌剂纸基渗水材料的抗张指数相对较高,且添加 MBC 的样品抗张指数高于添加 MBT 的样品,沙土中样品的强度高于田园土中的样品,其中添加 0.05% MBC 样品的抗张强度在田园土中为 16.03 N·m/g,在沙土中为 17.15 N·m/g。添加 0.05% MBC 的纸基材料强度损失率最低,为 37.19%。MBT 添加量为 0.07% 与 MBC 添加量为 0.05% 的样品强度较高,田园土实验中,抗张指数保留率分别达到 51.92% 和 58.70%,沙土实验

中分别为 53.30% 和 62.81%。这是因为力学强度一般取决于聚合物的相对分子质量、结晶度的大小^[13]。纸基渗水材料在土埋过程中,材料表面受到生物酶侵袭,相对分子质量降低,导致力学强度下降,而抗菌剂能够抑制微生物的繁殖,减缓微生物对纤维的降解。沙土中有机质含量较低(1.67%),而田园土中有机质含量高(10.54%),微生物容易生长繁殖,破坏纸基渗水材料的结构,导致力学性能下降。

2.2 抗菌剂对材料降解性能的影响

纸和纸板在高温高湿环境中容易在微生物的作用下发生降解,为了延长材料的使用寿命,采取添加抗菌剂的方法进行缓解。在田园土与沙土的模拟环境中,MBC 和 MBT 对纸基渗水材料质量损失率的影响如图 4 和图 5 所示。

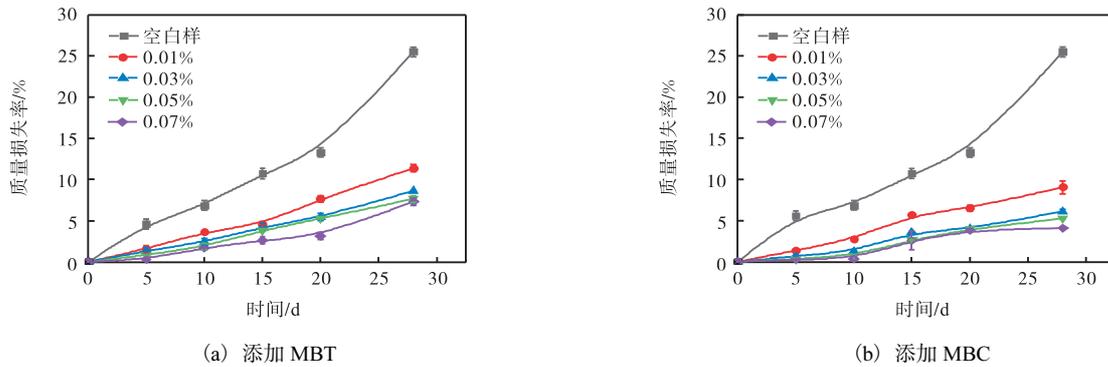


图 4 田园土中 MBT 和 MBC 对纸基渗水材料质量损失率的影响

Fig. 4 Effect of MBT and MBC on the mass loss rate of paper-based permeable material in pastoral soil

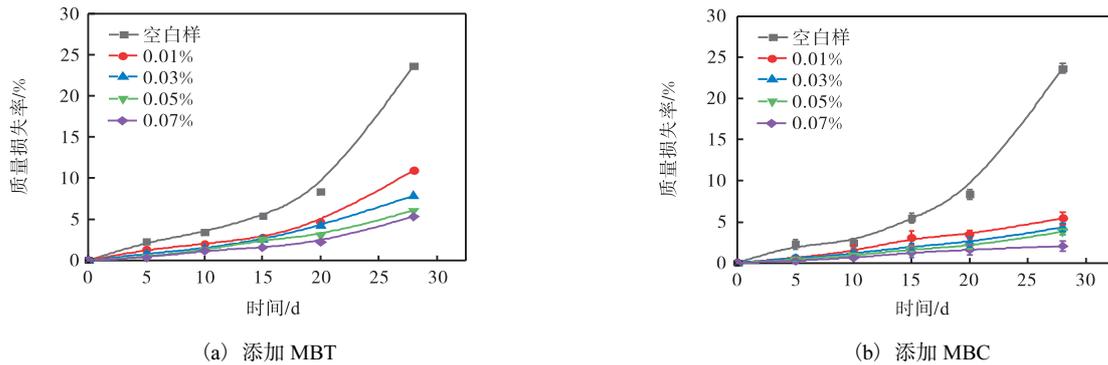


图 5 沙土中 MBT 和 MBC 对纸基渗水材料质量损失率的影响

Fig. 5 Effect of MBT and MBC on mass loss rate of paper-based permeable materials in sandy soil

图 4 和图 5 表明,不同种类抗菌剂及添加量的纸基渗水材料质量损失率不同。随着土埋时间的延长,纸基渗水材料的质量损失率逐渐增加,与空白样相比,添加抗菌剂能明显降低材料的质量损失,且随着抗菌剂添加量的提高,材料的质量损失率逐渐下降。土埋 28 d 后,沙土实验中,空白样的质量损失率为

23.65%,而添加 0.07% MBT 和 MBC 的纸基渗水材料,质量损失率分别降至 5.32% 和 2.06%;田园土实验中,添加 0.07% MBT 和 MBC 纸基渗水材料的质量损失率由空白样的 25.53% 分别降至 8.32% 和 4.10%。

抗菌剂对聚合度的影响如图 6 所示。在相同测

试条件下, 经过 90 d 老化, 空白样纤维素聚合度下降 26.09%, 而添加 0.07% MBT 材料的纤维素聚合度下降 17.26%, 添加 0.05% MBC 材料的纤维素聚合度下降 15.64%。聚合度是表征纤维素老化的主要参数之一, 老化过程与大分子降解、小分子增加以及聚合度降低有关, 纤维素老化会产生机械性能下降的不良影响^[14]。研究表明, 加速降解过程中纤维素的聚合度下降与力学性能损失之间的关系被确定为线性关系^[15]。

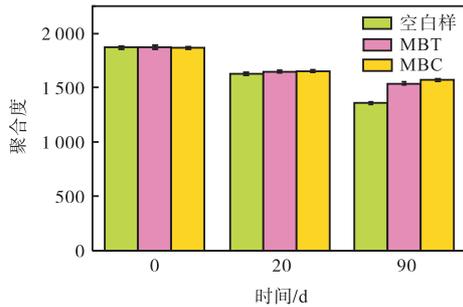
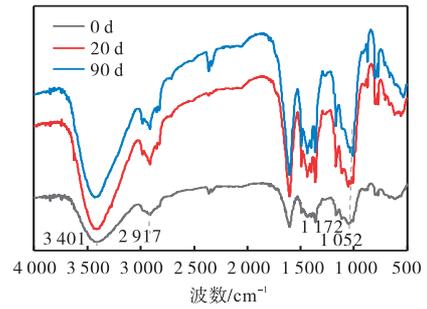


图 6 纸基渗水材料中纤维素聚合度的变化

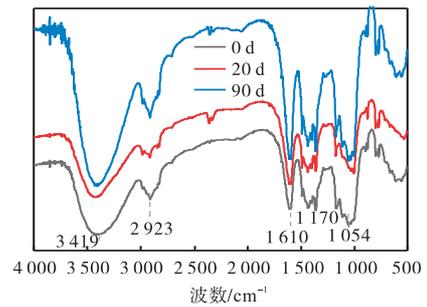
Fig. 6 Change in cellulose polymerization in paper-based permeable materials

通过红外光谱中一些特征官能团吸收峰相对强度的变化可以分析纤维素的降解程度^[16-18]。不同处理条件下纸基渗水材料的红外光谱如图 7 所示。

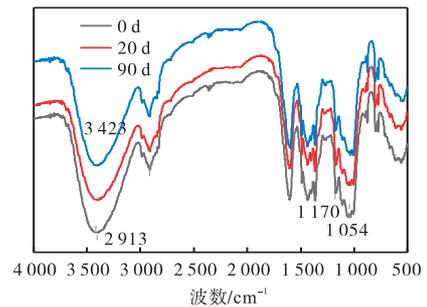
由图 7 可知: 随着土埋时间的延长, 所有纸基渗水材料土埋样品并没有旧吸收峰的消失和新吸收峰的形成, 但部分基团的吸收峰的强度和位置发生变化。3400 cm^{-1} 处为 O—H 的伸缩振动, 2917 cm^{-1} 处为 C—H 的伸缩振动, 1170 cm^{-1} 处为 C—O—C 的弯曲振动^[19]。对红外光谱进行归一化处理, 得到 O—H、C—O—C 和 C—H 吸收峰的相对强度, 进而计算添加 MBC 和 MBT 纸基渗水材料中 O—H 与 C—H、C—O—C 与 C—H 相对强度变化。90 d 后, 空白样的 O—H 与 C—H 红外吸收强度的比值下降 16.32%, 添加 MBT 的纸基渗水材料下降 14.88%, 添加 MBC 的纸基渗水材料下降 11.38%; 空白样的 C—O—C 与 C—H 红外吸收强度的比值降低 29.93%, 添加 MBT 的纸基渗水材料降低 12.30%, 添加 MBC 的纸基渗水材料降低 9.53%。微生物作用于纤维素纤维的表面, 纤维素大分子中 O—H 被氧化, C—O—C 键发生断裂^[20], 导致 O—H 与 C—H 以及 C—O—C 与 C—H 的吸收强度比值下降。而 MBC 和 MBT 纸基渗水材料中 O—H 与 C—H、C—O—C 与 C—H 相对强度变化减弱, 说明抗菌剂具有抑制纤维结构破坏的作用, 且 MBC 的抑制效果更加明显。



(a) 空白样



(b) 添加 0.05% MBC 纸基渗水材料



(c) 添加 0.07% MBT 纸基渗水材料

图 7 不同处理条件下纸基渗水材料的红外光谱

Fig. 7 Infrared spectra of paper-based permeable materials under different treatment conditions

2.3 MBC 与 MBT 对材料表面形貌的影响

通过光学显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 对材料表面形貌进行观察, 以表征土埋环境对纸基渗水材料表面的影响, 结果如图 8 所示。

由图 8(a) 和图 8(b) 可知: 90 d 后, 所有纸基渗水材料均出现黑色菌落, 且表面出现纤维断裂、被细菌包围等现象。空白样中出现黑色菌落最多, 添加 0.07% MBC 纸基渗水材料相较于添加 0.07% MBT 纸基渗水材料的菌落少, 表面仅有极少菌落, 表现出较好的抗菌性。土壤中通常有大量微生物, 包括真菌、细菌和放线菌等^[21], 其中有少量细菌和霉菌可以产生微量的纤维素酶, 可对纸质材料产生较缓慢的降解, 且随着时间的延长, 纸基渗水材料表面菌落越来越明显, 对纸基渗水材料性能影响也较为明显。

图 8(c) 为纸基渗水材料表面形貌的 SEM 图。土埋前纸基渗水材料纤维表面相对平整光滑, 土埋后受微生物的作用, 表面形貌发生较大的变化。未添加抗菌剂纸基渗水材料表面出现大量的菌丝和菌球, 而添加抗菌剂纸基渗水材料表面菌丝和菌球数量明显减

少, 其中 0.07% MBC 纸基渗水材料受到微生物作用最小, 纤维破坏程度最低, 抗菌效果最好。在高温高湿的环境中, 细菌容易作用于纸基渗水材料形成点状菌落, 初期为白色孢子, 逐渐成长为黑曲霉, 破坏纤维结构, 从而使纸基渗水材料强度逐渐降低。

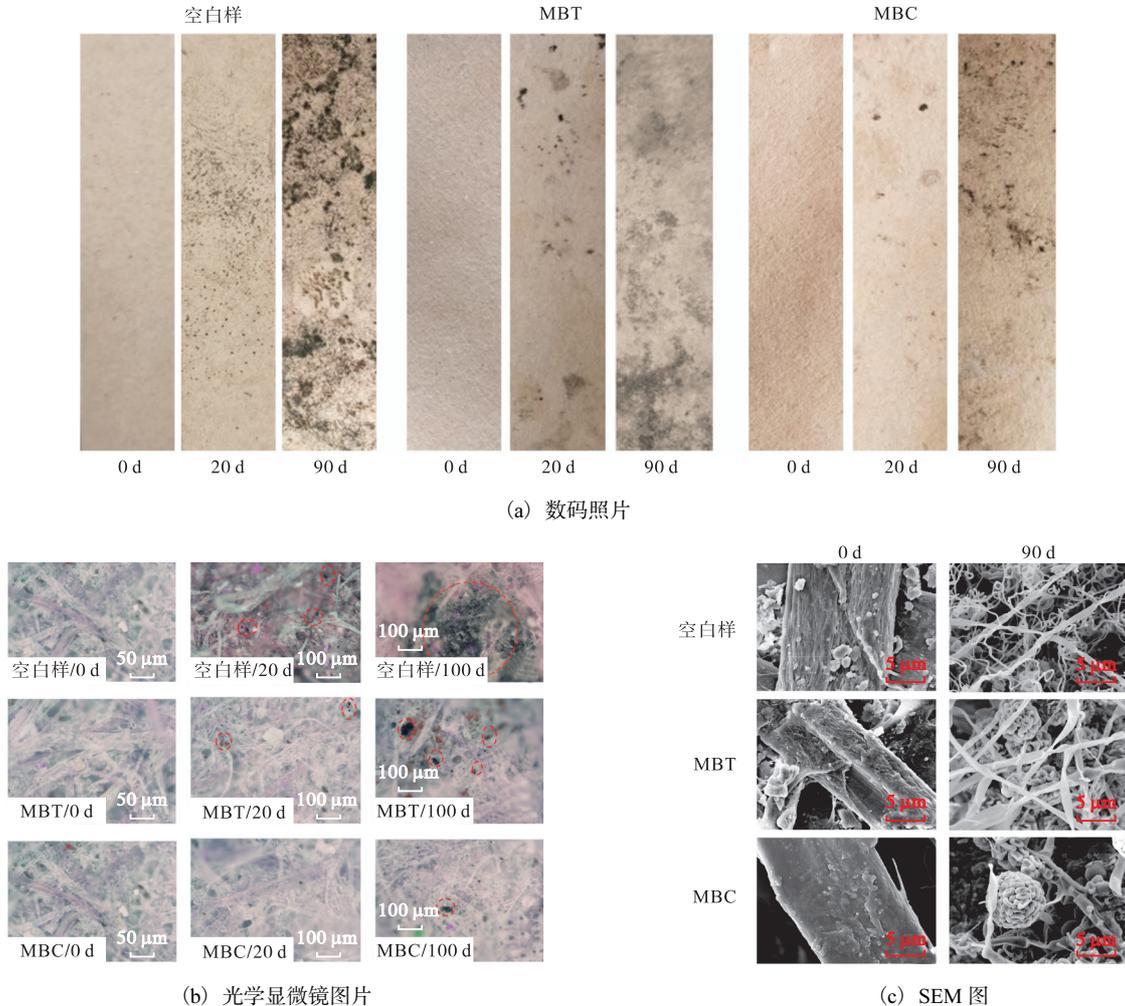


图 8 不同土埋时间的纸基渗水材料表面形貌图
Fig. 8 Paper surface topography of different soil burying time

上述实验结果表明, 随着土埋时间的延长, 不同环境中纸基渗水材料的质量、力学强度、聚合度以及特征官能团相对强度均呈现下降趋势。这是因为土壤环境中适宜的温度、水分、有机质等促进了微生物的生长繁殖, 并将其吸附在纤维表面, 进而破坏纸基渗水材料的结构, 降低纸基渗水材料的性能。添加抗菌剂 MBT 和 MBC 对材料的降解均具有抑制作用, 且 MBC 的抗菌效果优于 MBT。

2.4 抗菌剂抑制纸基渗水材料劣化的机理

在土壤环境中, 随着时间的推移, 在水和生物酶的作用下, 纸基渗水材料的性能降低, 添加抗菌剂能够减弱微生物的侵袭, 从而抑制材料性能的劣化。结

合本实验结果, 推测 MBC 和 MBT 抑制纸基渗水材料性能劣化的机理如图 9 所示。

由于真菌和细菌在细胞壁组成和细胞器方面存在差异, 当抗菌剂和它们接触时, 会通过不同的方式进行作用。图 9(a) 表示 MBC 对细菌、真菌的抑制机理, MBC 进入细胞结构, 通过与 mRNA 模板结合, 抑制细菌核糖体蛋白质的合成和 DNA 的合成, 使得细菌逐渐凋亡, 从而达到抑菌效果; MBC 与蛋白配体复合物具有较高的亲和力, 能与蛋白靶结合进而抑制真菌生长, 能够表现出显著的抑菌活性, 抗菌剂可以阻止细菌新陈代谢, 达到抑制细菌对纤维素纤维作用的目的^[22]。图 9(b) 表示 MBT 对细菌、真菌的破坏

机理,细菌暴露于MBT一段时间后,细胞膜和细胞壁之间的空间变宽,细胞内容物收缩,细菌细胞的结构被破坏,MBT进入细菌结构中破坏DNA和蛋白质的合成。MBT对真菌的抑制机理是影响葡萄糖降解和ATP含量,破坏线粒体的功能进而抑制真菌的

呼吸作用,从而抑制真菌新陈代谢^[23]。

由图9(c)可知分布在纤维中的抗菌剂,能够有效降低细菌在纤维表面的吸附破坏作用,从而减缓纸基材料性能下降,而未添加抗菌剂的材料容易受到微生物作用。

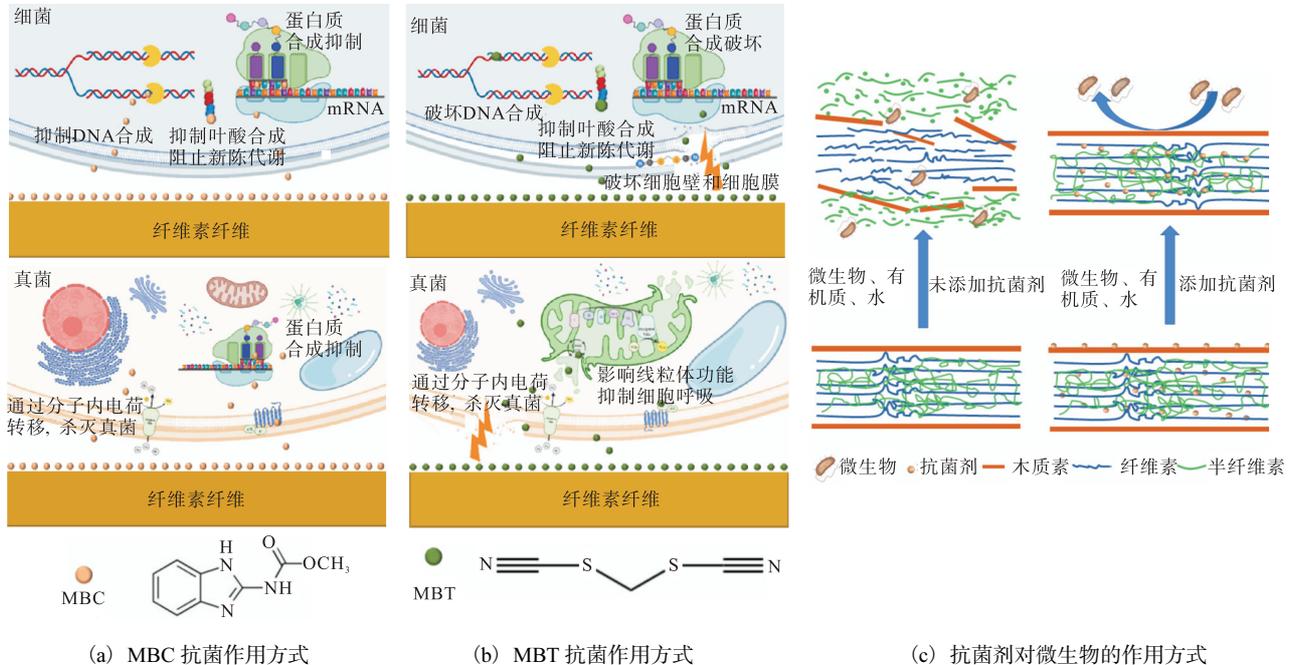


图9 MBC和MBT抑制纸基渗水材料性能劣化的机理

Fig. 9 Mechanism of MBC and MBT to inhibit the deterioration of the properties of paper-based water-permeable materials

3 结论

本研究采用浆内添加抗菌剂的方式,得到具有抗菌性的纸基渗水材料,探究了MBT和MBC对材料力学性能、质量损失率、聚合度以及表面微观形貌变化的影响,并对抗菌剂抑制材料降解的作用机理进行分析。

(1) 材料的力学性能研究结果表明,MBT、MBC的添加能够减缓纸基渗水材料力学强度的下降,其中MBC的抗菌效果优于MBT,添加量为0.05%MBC的纸基材料强度损失率最低为37.19%。

(2) 材料的降解研究结果表明,不同抗菌剂均能够显著降低材料的质量损失率,并能抑制纤维聚合度的下降,且MBC的效果优于MBT。在田园土中,0.07%添加量MBC纸基渗水材料在降解过程中质量损失率最低为4.10%;在沙土中,质量损失率最低为2.06%。纸基渗水材料表面的形貌观察结果表明,添加MBC抗菌剂纸基渗水材料表面中菌落增长最少,能有效减少细菌对纤维的劣化作用,降低强度损失,

有利于提高纸基渗水材料的耐久性和稳定性;在一定应用时间内添加MBC,与空白样相比纸基渗水材料在实际应用时可以延长应用时间,提高纸基渗水材料的使用寿命。

参考文献:

- [1] 丛萍. PVFM 负压渗水材料的制备与性能分析[D]. 北京:中国农业科学院, 2015.
- [2] 黄阿岗. 多孔渗水混凝土材料的制备及性能研究[J]. 当代化工, 2017, 46(8): 1564-1567.
- [3] WANG X F, ZHANG X. Preparation and component optimization of resin-based permeable brick[J]. Materials, 2020, 13(12): 2701.
- [4] ZHAI H X, LI C F, LIU Y L, et al. Study on the preparation and performance of a prefabricated pervious-cement-based concrete pavement slab[J]. Symmetry, 2022, 14(7): 1295.
- [5] 陈鸿, 安鹏, 孙保伟, 等. 超疏水材料改性粗粒土垫层防排渗水试验研究[J]. 河南科学, 2021, 39(2): 250-255.

- [6] 胡明玉,蔡国俊,付超,等. 利用稻壳灰及废砖制备渗水蓄水生态建筑材料[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(1): 21-26.
- [7] VOLOLONIRINA O, PERRIN B. Inquiries into the measurement of vapour permeability of permeable materials[J]. Construction and building materials, 2016, 102: 338-348.
- [8] SUDPRASERT S, SANKAEWTHONG S. Utilization of rice husks in a water-permeable material for passive evaporative cooling[J]. Case studies in construction materials, 2018, 8: 51-60.
- [9] 池凯,欧章明,石爽,等. 聚丙烯酸酯对植物纤维纸基透水材料性能的影响[J]. 中国造纸学报, 2021, 36(4): 18-24.
- [10] 丛萍,龙怀玉,岳现录,等. 聚乙烯醇缩甲醛负压渗水材料的制备及可行性分析[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(10): 133-139.
- [11] 欧章明,窦文芳,王慧,等. 聚乳酸/聚己内酯涂布纸基透水材料的性能[J]. 天津科技大学学报, 2022, 37(4): 30-36.
- [12] 梁晓菲,龙柱,吕文志. 阳离子聚丙烯酰胺基复合物助留助滤及其作用机理[J]. 纸和造纸, 2015, 34(4): 50-53.
- [13] MUTHURAJ R, MISRA M, MOHANTY A K. Hydrolytic degradation of biodegradable polyesters under simulated environmental conditions[J]. Journal of applied polymer science, 2015, 132(27): 42189.
- [14] ŠPĚROVÁ M, NASADIL P, PRŮŠOVÁ A, et al. A hint on the correlation between cellulose fibers polymerization degree and their thermal and thermo-oxidative degradation[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2012, 110(1): 71-76.
- [15] MALEŠIČ J, KRAŠEVEC I, KRALJ CIGIĆ I. Determination of cellulose degree of polymerization in historical papers with high lignin content[J]. Polymers, 2021, 13(12): 1990.
- [16] 常玲菲. 可生物降解材料在不同环境中降解机理的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [17] LI H X, WANG Q, ZHANG L M, et al. Influence of the degrees of polymerization of cellulose on the water absorption performance of hydrogel and adsorption kinetics[J]. Polymer degradation and stability, 2019, 168: 108958.
- [18] LIU L, GONG D C, BRATASZ L, et al. Degradation markers and plasticizer loss of cellulose acetate films during ageing[J]. Polymer degradation and stability, 2019, 168: 108952.
- [19] ISLAM M S, AHMAD M B, HASAN M, et al. Natural fiber-reinforced hybrid polymer nanocomposites: effect of fiber mixing and nanoclay on physical, mechanical, and biodegradable properties[J]. BioResources, 2015, 10(1): 1394-1407.
- [20] LI H X, ZHANG K, ZHANG X H, et al. Contributions of ultrasonic wave, metal ions, and oxidation on the depolymerization of cellulose and its kinetics[J]. Renewable energy, 2018, 126: 699-707.
- [21] DU H, XIE Y Q, WANG J. Microplastic degradation methods and corresponding degradation mechanism: research status and future perspectives[J]. Journal of hazardous materials, 2021, 418: 126377.
- [22] MOL G P S, ARULDHAS D, JOE I H, et al. Spectroscopic investigation, fungicidal activity and molecular dynamics simulation on benzimidazol-2-yl carbamate derivatives[J]. Journal of molecular structure, 2019, 1176: 226-237.
- [23] CHEN Y F, QIN H B, KE W J, et al. Antibacterial potential and mechanism of action of dithiocyano-methane as a bactericidal agent for farm disinfection[J]. Journal of applied microbiology, 2021, 131(2): 647-657.

责任编辑: 周建军