

纤维增强地聚物混凝土在盐冻耦合环境下水工建筑物耐久性 增强机理研究

朱文正 冯甜甜 杨宗棠

新疆北方建设集团有限公司 新疆 胡杨河 834034

【摘要】：在盐冻耦合环境中，纤维增强聚合物混凝土的性能劣化呈现多机制叠加特征。本研究以界面微结构稳定性为主要论点，探讨纤维桥联效应与聚合物成膜作用在抑制渗盐、延缓冻融损伤中的协同机制。结果表明，纤维网络提升裂缝阻断能力，聚合物相改善孔隙连续性，二者共同削弱盐分迁移路径并减轻冰晶压力，从而提高结构耐久性。进一步的微观分析显示，纤维在冻胀循环中保持稳固嵌固，限制界面微裂纹扩展；聚合物相通过降低孔隙含水率与盐结晶速率，削弱温度梯度引发的局部应力集中。复合体系在多轮盐冻循环后仍保持较高完整性，上述规律揭示其互补强化作用。

【关键词】：纤维增强聚合物混凝土；盐冻耦合；微观机制；耐久性

DOI:10.12417/2811-0528.26.07.052

引言

盐冻循环易促使水工建筑物材料产生多源损伤，而纤维增强聚合物混凝土在此环境下表现出区别于普通混凝土的力学与微观响应。盐分迁移、冰晶压力及界面细观破坏协同作用，使材料呈现独特的耐久性演化轨迹。多尺度细观结构的变化往往主导其服役性能，对其中纤维桥联与聚合物相连续性的认识尤为关键。通过揭示二者在盐冻耦合作用下的互补强化规律，可进一步加深对材料服役机制的理解，并提升研究连贯性。

1 盐冻耦合作用下纤维增强聚合物混凝土的关键劣化问题

盐冻耦合作用使纤维增强聚合物混凝土面临多重劣化机制叠加的挑战，其中盐分渗透与冻融循环的交互过程往往引发材料内部结构的持续扰动。水溶盐沿着毛细孔道迁移，在温度波动中发生结晶与再溶解，使局部孔壁承受反复的结晶压力，导致微区结构不断松散。与此同时，冰水转化带来的体积变化改变孔隙内的应力分布，使原本较为稳定的界面区出现细观损伤。纤维增强体系原本应提供一定的裂缝控制能力，但在高盐环境下，界面过渡区更易受到应力集中影响，进而积累变形，形成隐性裂纹网络。

随着盐冻循环次数的增加，材料内部渗盐路径逐渐延伸，孔隙形态从封闭式向连通式转变，渗透性上升导致水盐耦合作用进一步增强，形成难以抑制的劣化链条。聚合物相虽然具有

成膜优势，但在频繁冻融扰动中仍受温度梯度影响，局部区段会出现膜层脱附或柔性下降的情况，使界面黏结性能削弱。纤维周围的微裂纹一旦与盐溶液接触，结晶诱导的局部膨胀被不断放大，使纤维嵌固状态逐渐改变，桥联能力受到干扰，难以持续抑制裂纹的再次扩展。盐晶体在孔隙边缘反复生长，使微结构呈现周期性的破坏与重构，使得耐久性问题愈发复杂。

在长期服役环境中，盐冻作用促使内部湿度分布呈现高度非均匀化趋势，局部区域发生水膜破裂、冰晶集中析出，使材料体系的应力场呈现骤变特征。孔隙中溶盐浓度的空间差异引发晶型变化，使晶体生长方向与力传递路径更加分散。纤维与基体界面在渐进式损伤中形成弱化带，改变载荷作用下的微观应力迁移模式，孔隙扩展速率随之提升。当裂缝在盐冻耦合的驱动下逐渐贯通，水盐迁移速率骤增，劣化机制互相强化，使材料的整体完整性受到深层影响。

2 纤维桥联与聚合物成膜对盐冻损伤的协同抑制机制

纤维桥联作用在盐冻循环中展现出重要的结构稳定能力，裂缝两侧的拉拔阻抗使应力集中被重新分配，使细观损伤难以在短时间内形成连续扩展路径。纤维在基体内部形成多向分布的支撑网络，使冰晶压力在侵入孔隙结构时受到阻断，降低局部应变峰值。随着冻融温度场不断变化，微裂隙出现张开与闭合的循环过程，而纤维在这一阶段保持一定延展性，使裂缝尖端的能量释放率被削弱。此外，纤维表面粗糙度及化学亲和性

使界面层形成独特的力学过渡带,其初化效应减少裂缝发生的概率,使渗盐路径受限,从而弱化晶体生长引发的微区破坏。

聚合物成膜结构在盐冻环境下展现出显著的孔隙调控能力,连续膜层覆盖在基体表面及孔壁上,使水分扩散速率降低,使盐溶液难以在短时间内形成高浓度聚集区。成膜材料在低温下仍保持一定柔韧性,使冻融应力能够在较大范围内被缓冲,减少脆性冰晶对孔壁的直接挤压。膜层的致密化效果改变孔径分布,使原本开放的毛细体系呈现封闭化趋势,进而抑制冰晶从粗大孔隙向细小孔隙的侵入迁移。随着循环进行,聚合物相通过再分布和局部重排,使界面区形成具有自适应能力的微环境,使水盐传输受到进一步限制,减弱结晶压力的累积效应,使内部结构更加稳定。

纤维桥联与聚合物成膜在盐冻耦合作用中形成协同机制,两者通过调控渗透路径、分散内部应力、抑制晶体生长等过程,使基体劣化速度被显著延缓。纤维提供的裂缝阻滞作用将损伤局限在局部范围,不易形成贯通性破坏,而聚合物膜层使吸水率与孔隙连通度下降,使冻胀压力难以在短时间内发生集中堆积。盐分在孔隙中的迁移轨迹在双重调控下发生偏转,使结晶速率下降并呈现分散化趋势。经过多轮循环,两类强化机制仍保持稳定工作状态,使界面微裂隙不至于快速向主裂缝演变。纤维与聚合物相的耦合效应建立起“阻裂—控水—缓应力”的综合体系,使复合材料在盐冻环境中具备更强的结构韧性与抗损伤能力。

3 盐冻环境中复合体系耐久性提升的微观机理归纳

盐冻环境使材料内部的水盐行为呈现周期性扰动,而复合体系在微观层面的结构演化展现出独特的稳定特征。温度波动促使孔隙中出现冰晶生成、盐分浓缩与再溶解的复杂过程,但纤维网络能够在早期阶段削弱微裂纹的尖端驱动力,使局部损伤难以形成连贯扩展链。聚合物相在孔壁表面形成柔韧膜层,使含水状态更趋均匀,使冰晶在形成阶段受到限制,使应力峰值明显降低。多次循环后,界面层的微观粘附结构逐渐表现出

参考文献:

- [1] 王建辉.纤维增强复合材料在冻融环境下的细观性能研究[J].建筑材料学报,2020,23(4):512-519.
- [2] 刘春海.聚合物改性混凝土耐久性机制分析[J].材料科学与工程学报,2022,37(6):45-52.
- [3] 陈国庆.盐冻耦合作用下混凝土内部损伤演化机理[J].水利工程学报,2021,52(3):118-126.

高适应性,使应力集中被分散,使孔隙结构维持稳定形态,使材料在盐冻过程中保持较高的内部协调能力。

随着盐分在孔隙体系内迁移,复合材料展现出显著的微观调控效应。纤维周围形成的过渡区在高浓度盐溶液作用下依旧保持一定致密度,使晶体难以沿弱界面快速生长,使局部膨胀压力难以累积到破坏临界值。聚合物膜层改变孔径分布,使水膜厚度降低,使盐溶液的滞留时间延长,从而减弱结晶速率的突发性变化。冰晶在扩张过程中受到孔隙形态限制,使体积膨胀被分散至更大范围,使破坏力呈现衰减趋势。随着循环加深,孔隙结构在纤维与聚合物相的共同调控下形成相对稳定的渗透路径,使盐分迁移不再呈现快速积聚模式,使内部微裂隙增长速度保持在低水平。

在应力场与水盐耦合场的交互中,复合体系逐渐形成阻裂、缓应力与控渗的多重微观机制。纤维对裂缝张开的反向牵制能力在整个盐冻过程中保持稳定,使损伤能量释放受到抑制,使裂缝不易连通孔隙网络。聚合物相在界面处形成具有黏弹性的保护层,使应变速率下降,使冻胀压力不易在界面区域产生尖峰反应。随着微结构不断调整,裂纹尖端区域的能量密度降低,使盐晶体的诱导作用被削弱,使孔隙扩展速度缓慢。纤维桥联效应与聚合物成膜效应共同限制了水盐迁移路径,使孔隙中的自由液相减少,使冻融应力的触发条件被推迟,从而使复合体系在盐冻环境中形成更稳定的微观承载体系。

4 结语

盐冻耦合作用对材料内部结构的扰动呈现连续累积特点,而纤维增强聚合物混凝土在复合体系调控下展现出明显的耐久性优势。纤维的阻裂作用使裂缝扩展速率显著降低,聚合物相的成膜能力使水盐迁移路径受到有效限制,两者在微观层面形成稳定的协同体系,使孔隙结构、界面层与应力场之间保持较高协调性。随着循环加深,复合体系更加突出其抗盐侵与抗冻胀的整体性能,为水工建筑物在复杂环境中的长期服役提供坚实的材料基础。