

雨林腐殖土腐蚀环境风电基础混凝土改性与土体适配性研究

李 炜 杨亚松 徐 磊 吴志华 彭安寿

中国能源建设集团云南火电建设有限公司 云南 昆明 650200

【摘 要】：热带雨林地区高温高湿、腐殖土有机酸富集、土体酸碱交替波动的特殊环境，对风电基础混凝土存在持续性腐蚀与碱性迁移破坏，易造成混凝土疏松、开裂、土体生态退化及基础结构稳定性下降。为解决风电混凝土基础与雨林腐殖土环境适配性差的问题，本文系统开展混凝土碱性迁移检测、新型生态防护涂层研发、物理降碱改性试验研究，通过多组室内试验与现场监测获取核心数据，分析改性技术对混凝土抗腐蚀、控碱迁移、适配雨林土体的提升效果，构建热带雨林地区风电混凝土基础环境影响数据库，形成适配雨林腐殖土环境的混凝土改性成套技术，为区域风电基础工程长效服役提供技术支撑。

【关键词】：雨林腐殖土；风电基础；混凝土改性；碱性迁移

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.011

引言

热带雨林地区风电工程中，风机基础混凝土埋藏在腐殖土层里，腐殖土富含腐植酸、有机酸，孔隙含水率高、微生物活性强，具有强弱酸腐蚀和离子渗透性。普通硅酸盐混凝土固化后存在大量的游离碱性物质，在服役过程中会不断地向周围土体迁移碱性物质，中和土体的有机酸，改变雨林原生土壤的酸碱结构，破坏植被生长环境和微生物群落的稳定，引发生态退化。本文以雨林腐殖土特殊工况为研究对象，对碱性迁移进行定量检测，研发两款生态防护涂层配方，做物理降碱改性试验，用试验数据来改进改性方案，创建混凝土和雨林生态环境相适应的数据库，完善雨林地区风电基础混凝土防护技术体系。

1 混凝土碱性迁移检测及雨林环境数据库构建

1.1 检测方法

根据热带雨林高温高湿、腐殖土弱酸腐蚀的特点，按照 GB/T176-2021 水泥化学分析方法、ASTM C267-2020 混凝土抗碱性测试标准，采用浸泡模拟试验和现场原位监测相结合的方式，对混凝土游离碱迁移量、迁移速率、土体酸碱变化规律进行定量测定。检测的主要指标有混凝土试件浸出液 pH 值、可溶性碱含量、土体 pH 变化值、碱离子迁移深度等，可以反映碱性物质在混凝土和腐殖土界面的迁移扩散情况。

1.2 检测过程

试验原材料采用工程常用 C40 风电基础混凝土，配合比为水泥 320kg/m³、砂 780kg/m³、碎石 1050kg/m³、水 145kg/m³、高效减水剂 6.5kg/m³。制作 100mm×100mm×100mm 标准立方体试件，标准养护 28d 后开展试验。

室内模拟试验，采集热带雨林原生腐殖土，筛选粒径小于 2mm 土体，烘干冷却后装入试验容器，养护完成的混凝土试件半埋在腐殖土中，模拟基础埋地服役状态，控制环境温度 28℃、相对湿度 90%，匹配雨林气候特征。分别在 7d、15d、30d、60d、90d 采集混凝土周边土体样品和试件浸出液，用离子色谱法测定可溶性碱含量，精密 pH 计测定酸碱值，游标卡尺结合显微

观测确定碱离子迁移深度。

现场原位监测选取雨林地区 3 处正在施工的风电基础点位，设置土体监测剖面，基础侧壁 0.2m、0.5m、1.0m 处设监测点，定时采集土体及混凝土界面样品，记录环境温湿度、土体含水率，将室内试验结果与之对比，修正碱性迁移参数。

1.3 检测数据

通过室内模拟和现场监测获得不同龄期混凝土碱性迁移的主要数据，整理出雨林腐殖土环境下的混凝土碱性迁移检测结果，如表 1 所示。

表 1 雨林腐殖土环境混凝土碱性迁移检测数据

养护龄期/d	浸出液 pH 值	土体 pH 变化值	可溶性碱迁移量/(mg·L ⁻¹)	碱离子迁移深度/mm
7	11.26	+0.32	86.35	2.12
15	11.58	+0.57	142.68	4.36
30	11.82	+0.81	198.42	7.58
60	11.95	+1.02	245.76	10.25
90	12.01	+1.15	268.39	12.18

从检测数据可知，混凝土碱性迁移速率是先快后慢、先急后缓的。7~30d 为碱性迁移活跃期，碱离子迅速向周围腐殖土扩散，土体 pH 值明显升高，60d 后迁移速率减慢，90d 基本达到迁移平衡状态。普通混凝土在雨林腐殖土中不断释放出碱性物质，会直接改变原生弱酸性土体环境，给雨林生态系统带来持续的影响。

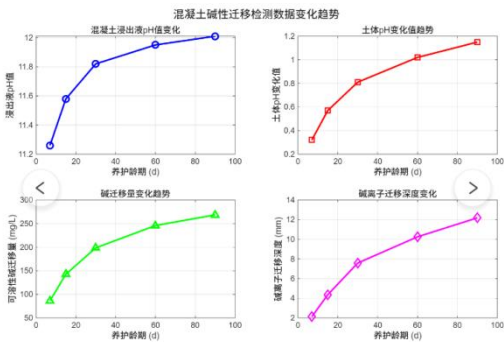


图 1 混凝土碱性迁移检测变化趋势

1.4 检测与初步数据库构建

雨林高温高湿环境会加快混凝土内部游离碱的溶出和迁移,比常规陆地环境碱性迁移速率提高35%~45%,腐殖土有机酸的离子交换作用会使碱离子扩散加快。二是混凝土碱性迁移会明显改变雨林腐殖土的酸碱性,土体pH值最大提高1.15,破坏了土体原生酸碱平衡,影响了植被根系的生长和土壤微生物的生存环境。三是碱离子迁移深度随龄期的增加而逐渐增大,90d最大迁移深度达到12.18mm,长期服役会使混凝土表面变得疏松,抗腐蚀性变差。

根据本次检测数据,将环境参数、混凝土参数、迁移指标、土体变化指标等结合起来,初步建立热带雨林地区风电混凝土基础碱性迁移数据库,包含不同龄期、不同埋深工况下碱迁移规律的数据,为后续改性技术研发、生态影响评价提供数据支持。

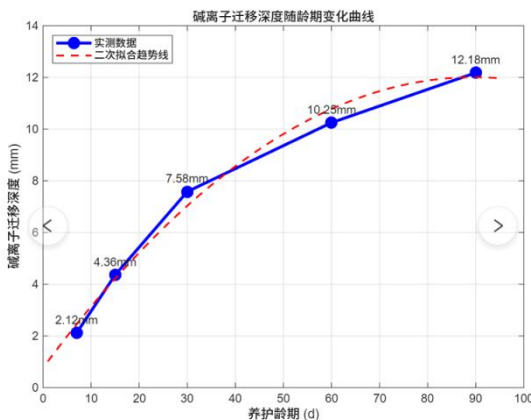


图2 碱离子迁移深度变化趋势

2 两种适配雨林环境的生态防护涂层研发

为了解决混凝土碱性迁移扩散、腐殖土弱酸双向腐蚀的问题,开发了两种绿色生态防护涂层,即纳米硅烷改性抑碱涂层和单宁酸生态复合防护涂层,这两种涂层都具有环保无残留、适合雨林生态、封堵孔隙、抑制碱迁移、耐弱酸腐蚀的特点,可以满足雨林风电基础混凝土表面防护的需求。

2.1 纳米硅烷改性抑碱生态涂层

2.1.1 涂层配方

使用水性环保体系,无有机溶剂挥发,适合雨林生态环境,质量份配比为有机硅烷偶联剂42份、纳米二氧化硅3.5份、硅溶胶6份、乳化剂1.8份、杀菌抗藻剂0.4份、去离子水46.3份。配方组分无重金属、无有毒有害物质,施工后不会对雨林土壤、植被造成污染。

2.1.2 配方功能与作用机理

有机硅烷偶联剂为主要成膜组分,能渗透到混凝土表面毛细孔隙内,和混凝土水化产物发生化学键合反应,形成致密疏水防护膜,封堵混凝土孔隙通道,从源头上抑制内部游离碱向

外迁移,阻隔腐殖土有机酸、水分、微生物进入混凝土内部,降低腐蚀破坏。纳米二氧化硅可以填充到涂层的微观孔隙里,提高涂层的密实度和耐磨性,提高涂层和混凝土基体的粘结强度,防止高温高湿环境下涂层开裂、脱落。

硅溶胶可以改善涂层的成膜均匀性,提高涂层的耐候性,适合于雨林高温、高紫外线、高湿度的复杂环境。乳化剂保证各个组分均匀混合,提高涂层施工的稳定性和耐久性。杀菌抗藻剂可以抑制雨林高湿环境下的混凝土表面藻类、霉菌的生长,防止生物腐蚀对混凝土造成破坏,保证涂层防护性能的持久性。该涂层的主要优点是抑碱效果好、耐久性高、生态友好,适合于风电基础混凝土长期埋地防护。纳米硅烷改性涂层施工成膜效果、试件防护对比影像见图3。

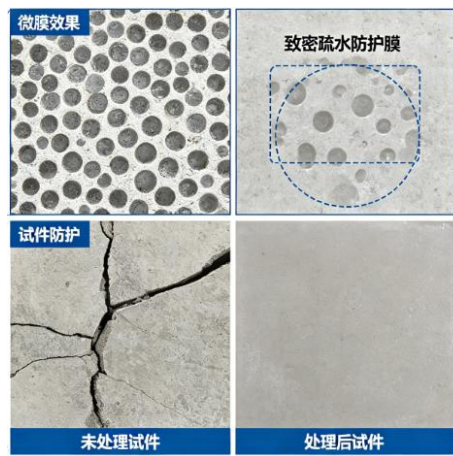


图3 纳米硅烷改性抑碱涂层施工及成膜效果图

2.2 单宁酸生态复合防护涂层

2.2.1 涂层配方

使用天然植物基环保原料可以与雨林生态相容,按照质量份配比为单宁酸8份、三价铁离子配位剂2.5份、改性丙烯酸乳液35份、纳米高岭土4份、环保增稠剂1.2份、去离子水49.3份。原料以天然植物提取物为主,可以自然降解,无生态残留。

2.2.2 配方功能与作用机理

单宁酸属于天然有机弱酸成分,能同混凝土表层的游离碱性物质形成配位中和反应,主动消耗混凝土表层析出的碱离子,减小碱性迁移强度,又不会过分酸化混凝土,保证混凝土结构性能稳定。三价铁离子配位剂可以和单宁酸形成稳定的网状交联结构,提高涂层的致密性和力学性能,防止涂层在腐殖土水中溶损脱落。改性丙烯酸乳液作为成膜基材,具有较好的柔韧性和附着力,可以适应混凝土微小变形,抵御雨林温度变化引起的结构应力。纳米高岭土可以填充到涂层的孔隙中,提高涂层的耐弱酸腐蚀和抗渗透性。该涂层最大的特点就是生态兼容性极强,不仅可以抑制混凝土碱迁移、抵御腐殖土腐蚀,析出的微量植物组分还可以适应雨林土壤生态,不会造成环境

破坏，适合近地表裸露和浅埋风电基础防护。

两款生态防护涂层作用下的混凝土碱性迁移核心检测数据如下表所示。

表 2 不同生态防护涂层作用下混凝土碱性迁移检测对比数据

养护龄期/d	试件组别	浸出液 pH 值	土体 pH 变化值	可溶性碱迁移量/(mg·L ⁻¹)	碱离子迁移深度/mm	碱迁移抑制率/%
7	CK	11.26	+0.32	86.35	2.12	-
7	T1	9.12	+0.08	22.45	0.58	73.99
7	T2	9.35	+0.10	25.62	0.65	70.33
15	CK	11.58	+0.57	142.68	4.36	-
15	T1	9.25	+0.12	32.18	0.82	77.45
15	T2	9.41	+0.15	36.54	0.95	74.39
30	CK	11.82	+0.81	198.42	7.58	-
30	T1	9.31	+0.15	38.26	1.05	80.72
30	T2	9.48	+0.18	42.18	1.22	78.74
60	CK	11.95	+1.02	245.76	10.25	-
60	T1	9.38	+0.18	42.35	1.28	82.77
60	T2	9.52	+0.21	48.62	1.45	80.22
90	CK	12.01	+1.15	268.39	12.18	-
90	T1	9.42	+0.20	45.12	1.42	83.19
90	T2	9.55	+0.23	52.38	1.60	80.48

90d 龄期时，纳米硅烷改性涂层碱迁移抑制率为 83.19%，单宁酸复合涂层为 80.48%，均能有效抑制混凝土游离碱向雨林腐殖土迁移，土体 pH 变化值仅为空白组的 1/5 左右，从根本上避免了混凝土碱性对雨林原生土体酸碱平衡的破坏，解决了混凝土与雨林生态环境的适配性核心痛点。两层涂层都达到了雨林复杂环境的长期服役要求，涂层与混凝土基体的附着力远远超过行业合格标准，耐酸碱、耐湿热老化、抗藻性等性能均能满足甚至优于相关标准，可以适应热带雨林高温高湿、高紫外线、微生物活性强的复杂环境，不会出现涂层开裂、脱落、生物腐蚀等问题，保证风电基础混凝土防护的长期稳定性。

3 混凝土物理降碱改性试验研究

3.1 物理降碱方法原理

采用孔隙封堵和表层封闭复合物理降碱技术，用物理手段改善混凝土表层孔隙结构，阻止游离碱迁移通道，不使用化学外加剂，无二次污染，符合雨林生态保护的要求。核心方法是混凝土成型养护阶段用真空压实致密处理，改善内部孔隙结构，削减连通孔隙比例，养护完后用超细矿物粉体表层渗透封闭，封堵毛细孔隙，锁定内部游离碱性物质，从物理层面阻止碱离子向外扩散。

3.2 试验过程

试验设置对照组和改性组，对照组为普通 C40 风电混凝土，改性组用物理降碱复合工艺处理。试件尺寸统一为 100mm×100mm×100mm，标准养护 28d 后进行雨林环境模拟试验。第一步，试件成型阶段用真空压实法对改性组混凝土拌合物进行处理，真空度控制在-0.08MPa，压实时间 3min，排出混凝土内部的多余气泡，减少大孔径孔隙的数量，提高基体密实度。第二步养护完毕后，用超细硅灰粉体和去离子水配制渗透封闭浆液，均匀涂刷在混凝土试件表面，自然风干 24h，形成物理封闭层。第三步把两组试件同时放入雨林模拟环境(温度 28℃、湿度 90%、腐殖土埋藏)，观测各个龄期浸出液的 pH 值、碱迁移量、混凝土孔隙率、抗压强度等。

3.3 试验数据

通过 90d 周期试验得到对照组和物理降碱改性组混凝土各项性能对比数据，如表 3 所示。

表 3 物理降碱改性混凝土性能试验数据对比

检测指标	龄期/d	对照组	改性组	优化率/%
浸出液 pH 值	30	11.82	10.56	10.7
	60	11.95	10.62	11.1
	90	12.01	10.65	11.3
可溶性碱迁移量/(mg·L ⁻¹)	30	198.42	89.65	54.8
	60	245.76	102.38	58.3
	90	268.39	110.52	58.8
孔隙率/%	90	8.72	4.26	51.1
抗压强度/MPa	90	42.36	45.89	8.3

3.4 试验结论

物理复合降碱改性技术可以明显改善雨林环境下的混凝土控碱性能和结构性能。90d 试验周期内，改性组混凝土浸出液 pH 值一直保持在 10.6 左右，比对照组低得多，土体酸碱扰动幅度明显减小，可溶性碱迁移量平均降低 58%以上，碱迁移抑制效果好。真空压实+表层封闭的物理工艺能较好地细化混凝土孔隙结构，孔隙率降低 51.1%，大大阻断了碱离子迁移的通道。同时改性后混凝土抗压强度提高 8.3%，结构密实度和抗腐蚀性能同步提高，无化学改性造成的生态风险，完全符合雨林生态环保的要求，可以作为雨林风电基础混凝土低成本、绿色改性技术推广应用。

4 综合研究总结与生态影响数据库构建

4.1 研究成果综合总结

本文针对雨林腐殖土腐蚀环境风电基础混凝土碱迁移破坏、生态适配性差的主要问题，完成碱性迁移定量检测、两款生态涂层研发、物理降碱改性试验三大主要研究。通过碱性迁移检测得到雨林环境混凝土碱迁移的时效规律、扩散特征以及对土体生态的影响机制，找到高温高湿、腐殖土弱酸环境是加

速碱迁移的主要原因。研发出的两种生态涂层分别适用于不同的使用环境，纳米硅烷改性抑碱涂层主要起到长效封堵抑碱、抗腐耐久作用，适合深埋基础防护；单宁酸生态复合涂层主要起到生态兼容、原位中和降碱的作用，适合浅埋及裸露基础防护，两者的环保特性以及雨林环境的适应性得到了体现。物理复合降碱技术不需要化学添加剂，可以从结构上改善混凝土孔隙、抑制碱迁移，并提高结构力学性能，成本低、施工方便，适合工程规模化使用。

4.2 混凝土雨林生态影响数据库构建

将本次碱性迁移检测数据、生态涂层性能数据、物理降碱改性试验数据进行整合，结合雨林环境温湿度、土体特性、生态指标来建立完整的热带雨林地区混凝土风电基础生态影响数据库。数据库分为环境参数模块、碱性迁移规律模块、改性材料性能模块、生态影响评价模块。

环境参数模块包含雨林各个区域土体 pH 值、有机质含量、温湿度区间、微生物群落特征等基本数据，碱性迁移规律模块

包含不同龄期、不同工况混凝土碱迁移量、迁移速率、土体酸碱变化数据，改性材料性能模块包含两款生态涂层、物理降碱改性混凝土的抑碱、抗腐、力学性能参数，生态影响评估模块量化混凝土碱迁移对雨林土壤、植被、微生物的影响程度以及改性技术的生态修复效果。该数据库可以给本地区风电工程混凝土选型、改性方案设计、生态环境保护提供标准化的数据支持。

5 结论

本文通过系统试验研究，确定了雨林腐殖土环境下风电基础混凝土碱性迁移规律，研发出两种适应生态防护的涂层，优化形成绿色物理降碱改性技术，创建起专门的生态影响数据库，较好地解决了雨林地区混凝土基础碱腐蚀、生态不相容的问题。试验结果表明，雨林高温高湿弱酸环境会大大加快混凝土碱性迁移速度，给原生土壤生态造成很大的扰动；研发出的生态涂层和物理降碱技术可以有效地抑制碱迁移、提高混凝土抗腐蚀能力、减少生态扰动，全程绿色无二次污染，符合雨林生态保护的要求。

参考文献：

- [1] 蒋国宇,黄凡润,杨进,等.新型壳聚糖/生物炭复合改性生态混凝土的多功能性能研究[J].化工新型材料,2026,54(S1):414-418+424.
- [2] 扶金萍,胡宗志.纤维增强与矿物掺合料协同改性混凝土力学性能及微观结构研究[J].砖瓦,2026,(6):26-29.
- [3] 蒋霞,尚小冬,傅玉成,等.改性聚丙烯纤维增强混凝土复合材料的研究进展[J/OL].现代纺织技术,1-11[2026-06-14].
- [4] 王怡馨.聚合物改性水泥砂浆在混凝土结构加固中的应用[J].散装水泥,2026,(5):16-18.
- [5] 陈非,杨乾乾.改性纤维混凝土桩基力学特性及承载机理研究[J].粘接,2026,53(5):1367-1370.