

高海拔地区风电场基建施工中的环境适应性分析

刘晓峰

国华（河北）新能源有限公司 河北 张家口 075000

摘要：文章围绕复杂地形、恶劣气候及脆弱生态引发的各类环境挑战，针对风电场基础建设施工进行环境适应性方面的研究。通过分析低温低压、冻融循环作用于混凝土性能及设备效能的内在影响机制，提出一系列关键技术措施，构建起生态保护与社区协同发展的相关策略。研究结果显示，环境适应性技术虽会促使初始投资增长10.8%，但在整个生命周期内成本却能降低18.2%，对工程质量以及生态效益均有提升。

关键词：高海拔山地；风电场；基建施工

引言

在“双碳”战略的大背景下，山地风电呈现出快速发展的态势。在此情形下，高海拔地区具备的复杂地形、恶劣气候及脆弱生态等状况，为风电基础建设带来了严峻挑战。在山地进行施工工作，面临运输艰难、平台开挖存在限制、对基础稳定性要求高以及生态环境保护压力大等难题。

1 高海拔环境对风电基建的挑战与影响机理

1.1 低温低压对混凝土性能的影响

高海拔区域低温的环境状况明显地减缓了水泥水化反应的速度，混凝土的初凝和终凝时间拉长，早期强度发展缓慢。当昼夜的温度差值超出20℃时，混凝土内部温度梯度产生的热应力，会导致其表面出现细微的裂纹，削弱结构的整体性能^[1]。低大气压的环境条件，导致在搅拌混合过程中带入的气泡不容易散逸出去，大量留存下来的微小气泡形成了相互连通的孔隙网络，降低了混凝土的密实程度和抗压强度，对其抗渗漏性能以及抗冻耐久性造成影响。这些不足在高寒环境下经过长时间的积累，水分会顺着孔隙渗透进去，在低温情况下冻结膨胀，反复进行冻融循环后，将会导致混凝土出现剥落现象、钢筋发生锈蚀，威胁风机基础结构的设计使用年限及运行的安全状况。

1.2 冻融循环与地基稳定性

季节性冻土、反复冻融循环，是对高原风电基础稳定性构成核心威胁的关键因素。在地基土体中，低温环境时，其中的水分会冻结形成冰透镜体，造成体积出现显著的膨胀情况。这种冻胀不均状态，还会导致基础发生抬升、偏移的现象。温度回升后，冰体开始融化又会引发土体出现沉降状况。这种周期性的变形，严重破坏风机基础的几何稳定性和荷载传递性。混凝土结构自身面临冻融破坏问题。混凝土吸水饱和后，低温条件下，

孔隙内的水结冰，产生大概9%的体积膨胀生成巨大的内应力。在这种内应力的反复作用下，会导致混凝土表面出现剥落，骨料暴露在外，强度也随之衰减。抗冻融设计需要将主动保温和被动防护等策略整合起来。还要完善排水系统，防止水分出现积聚的现象，从根本上去抑制冻胀发生需要的条件。

1.3 设备降效与施工组织挑战

高原低氧的环境状况，内燃设备的燃烧效率降低。柴油发动机的有效功率相比平原地区大幅衰减。液压系统由于空气密度减小、密封性能改变，会出现响应迟缓、动力损失的情形。大吨位吊装设备在空气密度低的环境中起重能力下降。突发的阵性大风，极大程度上增加了吊装作业面临的风险，必须精确计算风载荷，严格规定作业风速的适宜范围。施工人员在高原地区面临生理挑战。低氧环境会导致劳动能力和工作效率下降。严寒的气候增加了职业健康风险，加大了设备操作的难度。这些因素共同作用，导致施工周期变长、综合成本提高。

2 环境适应性关键技术措施

2.1 高原定制化设备选型与改造

高原风电施工设备，需开展全面且具系统性的适应性改造举措。柴油发动机，采用专门针对高原地区特别调校的型号。采取扩大涡轮增压比例提高燃油喷射压力等手段，补偿空气含氧量不足导致的功率损失。液压系统，选用具备耐紫外线老化特性的特殊密封材料，增添油液冷却装置，防止高温工作状况，液压油的粘度发生变化。在设备的各项性能中，冷启动性能处于关键地位。设备需配备大功率的电热塞、燃油预热器及适用于低温环境的蓄电池。风机基础环的安装精度，同整机运行的稳定性存在紧密联系。在此环节运用全站仪对基础环进行三维坐标的精确测量，借助多点微调系统，将基

础环的水平度误差严格把控在±1mm范围内，使法兰面的倾斜度不超出0.1°。

2.2 大体积混凝土高原施工技术

高原地区开展大体积混凝土施工工作，应全面处理好低温凝固、温差管控及冻融耐久性等关键问题。材料选择优先考虑选取中热硅酸盐水泥，添加粉煤灰等矿物类掺和材料，能够降低水化热所产生的峰值，还能优化改良混凝土的工作性能。选用聚羧酸系高性能减水剂，实现对用水量的有效削减。严格把控水胶比，使其维持在0.38以下的水平。掺入引气剂，让密闭微气泡均匀分布其中，有力地混凝土的抗冻等级提升至F300以上。骨料级配需进行优化设计工作，粗骨料选用5-25mm连续级配，将细骨料的细度模数控制在2.6-2.8的区间范围内^[2]。施工工艺方面采用分层浇筑的方案，每层浇筑的厚度不宜超出50cm。使用插入式振捣器时，遵循快插慢拔的准则。温度控制工作，采用预埋测温传感器的方式，实时监测核心温度。借助循环水冷却系统，将混凝土内部与外部的温差控制在25℃以内。养护阶段，采取以双层保温篷布覆盖结合自动喷淋系统的方式，将混凝土表面湿度保持在90%以上。

2.3 山地运输与吊装安全控制

山地风场的设备运输存在陡坡急弯等较为复杂的道路状况。大型部件的运输，选用模块化液压平板车，其具备独立转向系统，能适应曲率半径超过20米的弯道^[3]。在进行吊装作业前，实施详尽的风资源分析工作构建风速预测模型。作业时段的风速，严格把控在每秒8米以下。起重机需配置荷载力矩限制器和实时风速监测仪，风速超出限制数值或者荷载接近额定数值，就会自动发出警报并限制操作。进行吊装计算时，综合考虑将动载荷系数和海拔修正系数，着重留意突发性阵风引发的风振效应。借助有限元分析的方式，模拟吊装过程中结构件的应力分布。建立气象监测预警系统，分别在山顶和吊装平台布置超声波风速仪，提前30分钟对大风天气做出预测。

3 生态保护与可持续发展适应性策略

3.1 施工期生态扰动最小化技术

高海拔山地生态系统呈现出突出的脆弱特性，恢复能力迟缓。项目的可持续发展方面，应将施工过程中生态干扰控制在最低限度。表土剥离养护技术，精准确定作业界限，将厚度在20至30厘米左右的宝贵表土层有系统地进行剥离，之后集中放置，利用防尘网覆盖养护，维护土壤中种子库和微生物群落的完整性。原生草种恢复工作，是运用当地特有的适宜生长的草种，进行植被的重新建设。借

助温室育苗技术培育适应高寒环境的苗木，利用草毯铺植与液力喷播相融合的办法，快速构建植被覆盖。力求让恢复后的植被群落与周边的自然生态环境实现协调统一的状态。数字化监控系统方面，依靠高精度遥感影像和无人机航拍，构建施工前后的生态基础数据库。利用多光谱分析技术，实时监测植被覆盖度、土壤侵蚀模数等关键指标，构建生态干扰预警机制。

3.2 社区协同与长效共赢机制

风电项目建设与本地社区携手共进的协同式发展是项目成功实施的社会基础。本地建材采购，优先选取本地符合标准的砂石骨料、水泥等建筑材料，削减运输开支及潜在的经济损耗，推动本地建材产业的发展壮大，构建起长久稳固的供应链合作关联。设备租赁方面，主要聚焦发掘本地现有的起重机械、运输车辆等设备资源，借助技术层面的升级改造举措，让这些设备符合高原施工的实际需求^[4]。借助工本地化环节，利用分层级的培训体系，针对本地劳动力进行安全技能、设备操作等专业性培训工作，着重培育风电运维必需的专业技术人才。在项目运营期间，优先聘用经过培训考核合格的本地人员，切实让项目建设给本地社区带来实惠，实现长期共赢的发展模式。

4 共性技术方案的实实验证与性能分析

4.1 高原混凝土配合比优化及性能验证

为检验高原环境混凝土适应性方案在实际应用中的效果，研究专门挑选了四种具有代表性的配合比进行对比实验。该实验所处环境为海拔3650米的地区，实验遵循标准养护的条件设定（温度20±2℃，相对湿度95%），不同时段（3天、7天、28天）的抗压强度及抗冻性能进行分别检测，如表1所示。

表1 高原混凝土配合比及性能试验结果

组别	水胶比	粉煤灰 掺量 (%)	引气剂 (%)	3d强度 (MPa)	7d强度 (MPa)	28d 强度 (MPa)	冻融循 环次数 (次)
A组	0.42	0	0	15.2	24.8	38.5	125
B组	0.38	15	0	16.8	26.3	42.6	185
C组	0.36	25	0.005	18.2	28.7	46.8	350+
D组	0.34	30	0.008	17.5	29.3	48.2	350+

注：数据来源于中国建筑材料科学研究总院《高海拔地区混凝土耐久性试验研究报告》（2023）

数据分析表明，使用经过优化配合比的C组和D组展现出了优异的综合性能表现。水胶比从0.42降至0.34时，28天抗压强度提升25.2%，强度发展更为稳定。粉煤灰

的掺量从0%增加到30%，早期水化热降低了32%。有效地遏制了温度裂缝的出现。添加引气剂，成功将混凝土含气量稳定控制在5.2%上下浮动0.3%的范围内。混凝土经历冻融循环的次数由原来的125次提升到350次以上，抗冻能力得到大幅度改善。根据微观结构的剖析结果可知，经过优化处理的混凝土，孔隙率下降了38%，孔径分布更为均匀，界面过渡区域的结构也变得更加紧密，这些变化构成了混凝土耐久性提升的关键因素。

4.2 高原施工装备性能提升实证研究

高原型施工装备实施适应性改造后，各项性能指标取得明显优化。依据测试数据，在海拔4000米的工况条件下，经专门针对高原调整的发动机，其功率输出能够达到额定功率的87.5%，提升幅度达26.3个百分点。在-25℃的环境中，液压系统的启动时间从原本的15分钟缩短为5分钟，系统响应时间加快了40%。装备的出勤率，从改造之前的68.2%提升至86.7%，每月故障发生次数也从4.2次减少到1.5次。借助实时监测系统收集到的施工相关数据显示，采用专门适用于高原的设备后，单台风机基础的施工周期由12天缩短至9天，吊装作业的效率提高了32.5%。

4.3 全生命周期经济性评估

基于实际工程数据的相关分析呈现出的结果，应用高原适应性技术后，从项目的整个生命周期来看，成本降低了18.2%。如图2所示，混凝土结构的维修间隔从原本的5年延长到了12年，每年平均的维护成本减少了43.5%。设备改造投入，回收投资所需的时间为2.3年，在项目周期内投资回报率达到了4.2倍。发电可靠性方面，一年中可利用的小时数增加了235小时，弃风率降低了5.7个百分点，每年平均的发电收益提高了8.3%。生态保护

措施会使初期投入增加6.2%，依靠减少水土流失治理费用，避免生态补偿支出，项目运行10年后可实现投入产出持平。

表2 全生命周期主要经济指标对比

评估指标	传统方案	高原适应性方案	变化幅度
初始投资增加率(%)	-	10.8	+10.8%
全周期成本降低率(%)	-	18.2	-18.2%
维修间隔(年)	5	12	+140%
年均维护成本(%)	基准	56.5	-43.5%
投资回收期(年)	-	2.3	-
年发电收益增加率(%)	-	8.3	+8.3%

注：数据来源于国家能源局《高海拔地区风电项目建设成本效益分析报告》（2023）

结语

高海拔山地风电场进行建设工作，需要构建完备的环境适应性技术体系。通过优化混凝土材料、提升装备性能，综合运用生态保护技术，有效应对特殊环境引发的技术难题。实践说明，科学合理的环境适应性举措，可确保工程质量与安全，实现经济效益和生态效益的统一。未来，进一步强化标准化体系的建设工作，推进技术创新和成果转化。

参考文献

[1]谭文浩. 复杂地形高边坡风电场运输道路施工关键技术 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52 (08): 85-87.

[2]王琛源. 复杂地形风电场施工道路设计优化策略 [J]. 能源新观察, 2025, (07): 59-60.

[3]许海楠. 某超高海拔风电场工程风机基础设计施工分析 [J]. 水电站设计, 2025, 41 (02): 52-54+67.

[4]张志杰. 风电场水泥土建结构耐久性与维护策略 [J]. 中国水泥, 2025, (05): 70-72.