

绿色环保沙漠沙水工混凝土渠道结构工程实践探索及应用

马敬¹ 黄勇² 裴晓丹³ 斯毅^{1,2} 马旭飞²

1. 新疆兵团勘测设计院（集团）有限责任公司 乌鲁木齐 830000；

2. 新疆大学 乌鲁木齐 830000；3. 山西建筑工程集团有限公司 山西太原 030002

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21619

[摘要] 西北干旱灌区渠道衬砌长期依赖天然河砂，过度河道采砂引发流域生态破坏，同时砂石远距离运输大幅提升渠道工程造价。新疆全域分布海量风积沙，具备就地取材、低碳减排的资源化应用潜力。本文以新疆昌吉、克拉玛依、和田灌区工程为依托，通过多组风积沙原材料物理性能测试与水工混凝土耐久性能试验，系统研究纯风积沙及复合掺配风积沙混凝土的颗粒级配、含水率、含泥量、抗压强度、抗渗及抗冲磨核心性能，总结适配梯形输水渠道、斗渠衬砌、水稳基层的混凝土配合比、成型工艺与现场施工参数。针对高细粉风积沙混凝土易收缩、泌水的技术缺陷，采用粉煤灰复合掺配、低水胶比调控、专用减水剂协同改性的优化方案，形成适配西北荒漠灌区的绿色渠道混凝土成套技术，为干旱区水利工程固废资源化与低碳建造提供实践参考。

[关键词] 风积沙；水工渠道；绿色混凝土；抗渗；抗冲磨；固废资源化利用

引言

我国新疆、内蒙古西部、河西走廊属于典型干旱区，灌区分布密集，其中新疆灌溉渠道总里程超35万公里，每年渠道衬砌混凝土需求量突破800万 m^3 ，混凝土细骨料长期依赖南北疆河谷天然河砂。随着生态保护政策收紧，河道采砂管控日趋严格，天然河砂开采量大幅缩减，砂石运输距离普遍达到150~350 km，砂石材料成本占渠道工程造价41%以上。同时，大规模河道采砂破坏滩涂植被与水生栖息地，形成水利工程“耗砂毁水”的发展矛盾。

新疆沙漠及荒漠区域堆积大量风积沙，储量丰富、取材便捷，可替代天然河砂作为混凝土细骨料，实现就地取材、降本增效与低碳环保的多重效益^[1]。本文选取和田、克拉玛依小拐、塔克拉玛干三类典型风积沙为研究对象，结合原材料筛分试验、力学性能试验及第三方耐久性能检测数据，从原材料特性、配合比优化、耐久性能表征、现场施工应用、缺陷优化等维度开展系统研究，攻克风积沙混凝土渠道施工的技术痛点，构建干旱区沙漠沙绿色水工渠道建造技术体系。

1 试验原材料与检测方案

1.1 三类典型风积沙基础物理指标

试验原材料取自和田风积沙、克拉玛依小拐风积沙、塔克拉玛干腹地风积沙，严格依据高性能水泥及混凝土技术规

范开展筛分、含水率、含泥量、液塑限全套物理性能检测，核心指标如下：和田风积沙0.075 mm筛通过率23.97%，天然含水率0.22%，含泥量27.5%，塑性指数7.6，细粉含量极高，颗粒集中在0.075~0.15 mm区间，缺失中粗砂颗粒；小拐风积沙0.075 mm筛通过率9.55%，含水率0.3%，含泥量10.1%，塑性指数14.2，粗颗粒占比高，级配连续性最优；塔克拉玛干风积沙0.075 mm筛通过率23.10%，含水率0.8%，颗粒单一性强，以细颗粒为主。

三类风积沙普遍缺失0.3 mm以上中砂颗粒，骨料堆积空隙大，直接拌合混凝土易出现泌水、干缩开裂问题，需通过粉煤灰、超细掺合料优化级配^[2]。试验选用P.042.5普通硅酸盐水泥，玛纳斯、甘河子一级粉煤灰，渠道专用复合型聚羧酸减水剂，粗骨料采用5~20 mm、20~40 mm连续级配戈壁碎石，所有原材料均满足水工混凝土施工规范要求。

1.2 试验分组与检测依据

试验分为水稳基层（C0.5/C1/C5）、渠道衬砌混凝土（C20/C30）两大组别。试件成型规格：抗压强度采用100 mm立方体试件，抗渗性能采用 $\Phi 175/185$ mm圆台试件，抗冲磨性能采用706.86 cm^2 平板试件。所有耐久性能检测严格执行《水工混凝土试验规程》（SL352-2006），第三方检测由新疆远测工程技术有限公司完成，检测报告编号为2021E0031、

2021E0032、2021E0033、2021E0034、2021E0037，试件统一标准养护 28 d，模拟渠道输水冲磨、干湿循环、冻胀渗透等实际服役工况。

1.3 渠道工程模拟工况

西北干旱灌区渠道长期面临三类核心损伤问题：一是渗漏水引发渠基冻胀，造成衬砌结构变形破损；二是高含沙水流长期高速冲刷，导致渠坡、渠底衬砌剥落磨损；三是昼夜温差悬殊，干湿交替引发混凝土收缩裂缝^[3]。本次试验重点以 28 d 抗压强度、抗渗等级、抗冲磨强度为核心控制指标，同步检测混凝土拌和物坍落度、保水性、黏聚性，适配现浇梯形渠道、预制衬砌板的现场施工要求。

2 风积沙原材料性能对混凝土的影响规律

2.1 颗粒级配对拌和物工作性影响

纯和田风积沙配制 C30 混凝土时，未掺加粉煤灰的配比拌和物坍落度仅 115 mm，黏聚性差、存在轻微泌水现象，无法满足泵送施工要求。掺入 150 kg/m³ 粉煤灰填充细颗粒空隙后，拌和物坍落度提升至 210 mm，保水性、均匀性优良，适配现浇渠道施工。小拐风积沙粗颗粒占比更高，同等配比下坍落度较和田沙提升 30~50 mm，工作性能更优。塔克拉玛干风积沙细粉含量高，需提高 0.3~0.5 个百分点减水剂掺量方可达标施工流动度。当风积沙 0.075 mm 细粉占比超 24% 时，混凝土需水量显著上升，将粉煤灰掺量控制在胶凝材料总量 15%~20%，可有效抵消细粉带来的负面作用，是低成本改性的核心手段。

2.2 含水率与含泥量强度衰减量化分析

含泥量是影响风积沙混凝土强度的关键指标。和田风积沙原生含泥量 27.5%，直接拌合 C30 混凝土 28d 抗压强度为 43.7 MPa；经水洗除泥、含泥量降至 12% 后，同等配比混凝土强度提升至 51.8 MPa，强度增幅达 18.5%。当掺加核心激发剂 1%，7 d 抗压强度 76.2 MPa，28 d 抗压强度可达 96.5 MPa。小拐风积沙含泥量仅 10.1%，无需水洗处理，当掺加核心激发剂 1%，直接配制 C50 混凝土，28 d 强度可达 62.0 MPa，可满足高标准干渠衬砌施工要求。塔克拉玛干风积沙直接配制 C50 混凝土，掺入核心激发剂 1% 后，28 d 抗压强度 54.1 MPa。三类风积沙天然含水率均低于 1%，现场无需大规模烘干，仅需根据表层含水率微调拌合用水量，施工调控难度远

低于天然河砂混凝土。

2.3 不同风积沙混凝土强度发展特征

试验数据表明，三类风积沙混凝土强度发展稳定。塔克拉玛干风积沙 C20 配比混凝土 28 d 抗压强度达 40.3 MPa，满足支渠衬砌设计标准；C30 配比 28 d 抗压强度可达 51.8 MPa。和田风积沙优化水胶比后，混凝土强度显著提升，低水胶比工况下 28 d 抗压强度可达 45.7 MPa。小拐风积沙可配制高强度 C50 混凝土，28 d 抗压强度稳定在 45.3~62.0 MPa，适用于渡槽、泄洪闸等重载渠系建筑物。与同配比河砂混凝土相比，风积沙混凝土强度降幅控制在 8% 以内，经粉煤灰复合改性后可完全弥补强度损失，符合水工混凝土设计规范要求。

3 风积沙水工混凝土耐久性能第三方检测结果

3.1 抗渗性能检测数据分析

渠道防渗是减少输水损失、防止渠基冻胀破坏的关键。本次试验设置河砂混凝土对照组，所有试件在 1.3 MPa 水压下稳压 8 h，检测结果显示：和田、小拐风积沙混凝土试件均无渗漏现象，抗渗等级 ≥ W8，与河砂混凝土防渗性能基本持平。风积沙超细颗粒与粉煤灰水化产物可有效填充混凝土内部毛细孔与次生孔隙，大幅减少连通渗流通道，相较于普通河砂混凝土，长期输水渗漏损失可降低 12%~16%，适配西北灌区干、支渠防渗工程需求。

3.2 抗冲磨性能

高含沙水流冲磨是渠道衬砌主要病害，冲磨强度越高，结构耐久性越好。检测数据显示，河砂基准混凝土冲磨强度均值为 14.92 h/(kg/m²)；和田风积沙混凝土冲磨强度均值 14.79 h/(kg/m²)，与河砂混凝土基本无差异；小拐风积沙混凝土冲磨强度均值达 18.85 h/(kg/m²)，较河砂混凝土提升 26.3%。级配连续的风积沙可提升混凝土基体密实度，有效抵抗泥沙高速冲刷，能够降低渠道衬砌维修更换频次，大幅减少运维成本，尤其适配南疆多泥沙输水渠道工程^[4]。

4 沙漠沙混凝土渠道工程成套配合比与现场施工工艺

4.1 渠道衬砌专用配合比

C20 支渠、斗渠现浇衬砌（和田/塔克拉玛干风积沙）：
P.042.5 水泥 500 kg、一级粉煤灰 150 kg、风积沙 1090 kg、5~20 mm 戈壁碎石 785 kg、拌合水 293 kg、聚羧酸减水剂 5 kg，

水胶比 0.45, 坍落度 90~180 mm, 28 d 抗压强度 40.3 MPa, 抗渗等级 W8, 适用于流量 $<5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的田间斗渠。

C30 干渠、分干渠衬砌(三类风积沙通用): 水泥 600 kg、粉煤灰 150 kg、风积沙 980 kg、碎石 910 kg、水 284 kg、减水剂 6 kg, 水胶比 0.379, 坍落度 180~210 mm, 28 d 抗压强度 51.8 MPa, 适配梯形现浇主干渠道。

C5 水稳渠基(沙漠沙基层): 水泥 250 kg、粉煤灰 80 kg、风积沙 1337 kg、水 228 kg, 无粗骨料, 7 d 无侧限抗压强度均值 3.8 MPa, 可替代传统砂砾石基层, 简化渠基施工流程。

4.2 现场施工关键控制要点

原材料预处理: 含泥量超 25% 的和田风积沙需经简易水洗处理, 控制含泥量 $\leq 12\%$; 小拐、塔克拉玛干风积沙仅需露天晾晒 24 h 平衡含水率, 无需水洗。搅拌工艺采用分级干拌+湿拌制度, 先将碎石与风积沙干拌 90 s, 再加胶凝材料干拌 60 s, 最后加水与减水剂湿拌 120 s, 杜绝细沙团聚结块。

浇筑养护阶段, 沙漠高温多风环境下, 现浇渠道收面后需覆盖土工布保湿养护 7 d; 干渠每 8 m 设置伸缩缝, 采用沥青杉板+651 止水带填充, 抵消混凝土干缩应力。预制衬砌板采用 65℃ 蒸汽恒温养护 19 h, 1 d 抗压强度可达 34.7 MPa, 生产周转效率较河砂预制板提升 12%。

5 现存缺陷与优化技术路径

5.1 风积沙混凝土核心病害

新疆南疆高细粉风积沙颗粒粒径小、粉粒占比高, 直接配制的混凝土干缩值较河砂混凝土增大 11%~17%。沙漠地区高温、大风、强蒸发的施工环境, 易导致混凝土表层水分快速流失, 养护不及时会产生大量细微收缩裂缝, 为水分、有害离子侵入提供通道, 长期服役下裂缝持续扩张, 降低结构强度与耐久性^[5]。同时, 高细粉风积沙混凝土保水性差, 高温施工易出现泌水、骨料浆体分层、表层起砂等问题, 严重影响渠道衬砌施工质量与使用寿命。

5.2 改性优化措施

掺合料复配改性: 采用 15% I 级粉煤灰+5%超细矿粉双掺替代部分水泥, 超细矿粉填充微观空隙、降低孔隙率, 粉煤灰优化拌和物易性、降低水化热, 可降低混凝土干缩率 10%以上, 提升后期强度与体积稳定性。

外加剂功能优化: 选用抗收缩复合型聚羧酸减水剂, 复掺微量有机膨胀组分, 通过水化微膨胀效应补偿干缩变形, 同时降低单位用水量, 从根源减少收缩裂缝产生。

原生级配调节: 将小拐粗颗粒风积沙与和田细颗粒风积沙按 7:3 比例混合, 无需水洗、不掺河砂即可优化骨料级配, 兼顾骨架支撑与孔隙填充效果, 彻底改善拌和物泌水、粘聚性差的问题, 降低施工成本。

6 结论

新疆干旱灌区利用风积沙就地替代天然河砂配制水工混凝土, 可有效解决区域建材短缺、运距远、造价高、河道生态破坏等工程难题。本文通过三类典型风积沙试验与现场应用研究, 明确了不同区域风积沙的性能差异及混凝土强度、抗渗、抗冲磨性能变化规律, 探明了高细粉风积沙混凝土干缩开裂、泌水起砂的核心病害机理。通过掺合料复配、专用外加剂改性、原生骨料级配调节的综合优化技术, 可彻底改善风积沙混凝土的工作性能与耐久性能, 各项指标均满足西北灌区渠道衬砌、渠基水稳施工的规范要求。该技术体系就地取材、低碳环保、造价低廉, 无需大规模原材料预处理, 适配沙漠地区施工条件, 为新疆干旱区水利工程绿色建造、固废资源化利用提供了可靠的技术支撑, 具备极高的工程推广价值。

[参考文献]

[1] 高玉生, 程汝恩, 李英海, 等. 中国沙漠风积沙工程性质研究及工程应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[2] 吴俊臣, 申向东, 董伟, 等. 风积沙水泥基混凝土的工程应用与耐久性性能研究现状 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(10): 2845-2850.

[3] 薛慧君, 申向东, 刘倩. 高寒灌区风沙吹蚀对农业水利工程混凝土抗冻耐久性的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 115-122.

[4] 王康健, 杨仁泽, 刘海峰. 沙漠砂混凝土抗压性能及在 U 型渠道衬砌中的应用 [J]. 四川建材, 2026, 2: 1-4.

[5] 董伟, 林艳杰, 刘江森. 风积沙混凝土耐久性与损伤劣化行为 [M]. 北京: 中国建设科技出版社, 2026.