

高含泥量天然砂砾水稳基层筑路技术研究及应用

黄勇¹ 腊润涛² 姚文江² 刘婷¹ 斯毅^{1,2} 马旭飞¹

1. 新疆大学 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 乌鲁木齐 830000

DOI: 10.32629/ems.v8i9.22162

[摘要] 针对我国西部干旱半干旱地区高含泥量天然砂砾资源丰富但受现行技术标准限制难以直接用于水泥稳定基层的问题,提出采用绿色低碳高性能水泥作为胶凝材料,通过特种活性激发剂激发天然砂砾中粒径小于0.075 mm细颗粒物的潜在水化活性,实现高含泥量天然砂砾免水洗直接利用。通过系统的室内试验,研究了乌鲁木齐、哈密、喀什、和田四地典型天然砂砾的物理化学特性、配合比优化设计、力学性能及耐久性。结果表明:采用绿色低碳高性能水泥制备的水稳基层,7 d无侧限抗压强度较普通水泥提高13%~34%,且变异系数更小、试件均匀致密。在此基础上,提出了就地取材、免水洗筛分的施工工艺和质量控制要点,为西部高含泥量天然砂砾资源化利用提供了技术支撑。

[关键词] 高含泥量天然砂砾;水稳基层;绿色低碳高性能水泥;配合比优化;施工质量控制

[中图分类号] U416.2 **[文献标志码]** A

引言

天然砂砾是地壳运动和自然风化作用下形成的混合材料,在河流、戈壁、山前冲积扇等地质环境中广泛分布,其主要成分为石英、长石、岩屑及其他矿物颗粒。我国西部地区(新疆、甘肃、青海、西藏、内蒙古等)天然砂砾资源极为丰富,尤其在具有“三山夹两盆”地貌特征的新疆地区,戈壁砂砾储量巨大,分布面积达数十万平方公里。然而,这些天然砂砾长期以来主要用作路基填筑材料或直接废弃,高值化利用率极低,造成了资源的极大浪费。

按照现行《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015)规定,用作水泥稳定基层的粗集料含泥量应不超过2%(重、中、轻交通)或1.2%(极重、特重交通),细集料含泥量不超过3%~5%。然而,受干旱气候和独特地质成因影响,西部地区天然砂砾普遍含泥量偏高,一般在10%~20%之间,远超技术标准限值。按照传统工艺,必须对天然砂砾进行水洗、筛分处理,严格控制含泥量后方可用于水泥稳定基层,这不仅消耗大量宝贵的水资源,还增加了材料生产和运输过程中的能源消耗与碳排放,同时施工成本显著增加、工期延长。

目前,国内外针对含泥量偏高集料的处理技术主要有三

类:一是物理清洗法,即通过水洗、筛分去除泥土颗粒,该方法技术成熟但耗水量大,在干旱缺水地区难以推广;二是化学分散法,即添加减水剂或“抗泥型”减水剂来改善含泥集料的和易性,但所能处治的含泥量一般不超过10%,且未从根本上解决泥土对水化反应的阻碍作用;三是活性激发法,即通过特种激发剂将泥土颗粒中的活性成分转化为胶凝组分,该方法从技术原理上解决了“高含泥”难题,是实现高含泥量天然砂砾资源化利用的根本途径。

绿色低碳高性能水泥技术的发展为高含泥量天然砂砾的直接利用提供了新的技术途径。绿色低碳高性能水泥是在普通硅酸盐水泥基础上添加特种活性激发剂改性而成的新型胶凝材料,能够在常温下有效激发集料中小于0.075 mm细颗粒物中硅基、铝基和钙基等成分的潜在水化活性,使其参与水化反应生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶等胶凝产物,从而将传统意义上的“有害”泥土转化为有益的胶凝组分,从根本上解决了泥土颗粒对水泥稳定基层性能的不利影响。通过系统试验研究,探讨了高含泥量天然砂砾水稳基层的配合比设计、力学性能和施工工艺,并结合乌鲁木齐、哈密、喀什、和田四个典型地区的工程应用验证了技术的可行性和经济性。

1 高含泥量天然砂砾材料特性

1.1 物理化学性质

天然砂砾的物理化学性质直接影响其在水泥稳定基层中的工程性能。通过对新疆多地天然砂砾进行系统检测分析，结果表明砂砾石具有视密度大（2.50~2.87 g/cm³）、孔隙率低（1.29%~6.24%）、含水量小、强度高的特点，针对由砂砾石组成的混合料具有很小的压缩性，是一种具有优良路用潜能的砂石材料。

分别在乌鲁木齐、哈密、喀什、和田选取代表性样品，经过筛分试验（干筛法）、含泥量检测（水洗法）和液塑限

试验。试验结果见图 1 及表 1。

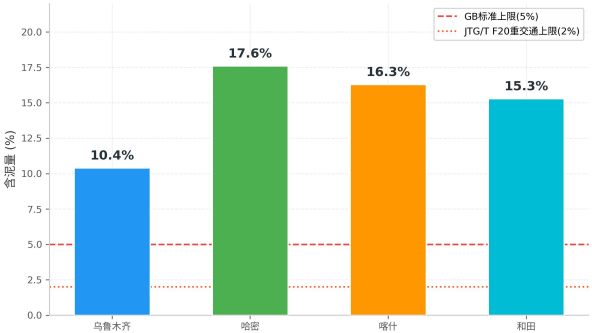


图 1 新疆不同地区天然砂砾含泥量对比

表 1 新疆不同地区天然砂砾基本物理指标

检测项目	乌鲁木齐	哈密	喀什	和田
含泥量 (%)	10.4	17.6	16.3	15.3
压碎值 (%)	—	15.2	—	13.4
塑性指数	5.7	8.3	6.3	5.8
液限 (%)	18.3	22.5	20.1	19.2
塑限 (%)	12.6	14.2	13.8	13.4

由图 1 和表 1 可知，新疆天然砂砾含泥量指标整体偏高，均在 10%以上，远超现行国家及行业技术标准。其中哈密地区含泥量最高，达 17.6%；喀什地区 16.3%；和田地区 15.3%；乌鲁木齐地区 10.4%。通过液塑限检测，所取样品的塑性指数均在 10 以内，以粉土为主，粘土矿物（尤其是膨胀性强的蒙脱石）含量较少，这一特征为后续活性激发技术的应用提供了有利条件。

1.2 含泥量对水稳基层性能的影响机理

砂石中的泥土主要成分为粘土矿物，其中蒙脱石、高岭石、伊利石是最常见、含量最多的三种。蒙脱石为 2:1 型层状硅酸盐结构，带有较强的负电荷，层间距 1.0~4.0 nm，分子作用力较弱，层间物质为含水的可交换阳离子，极易吸附水分子，吸水量可达 8 g/g，比表面积达 750 m²/g，对混凝土性能影响最为显著；伊利石层间距约 1.0 nm，层间主要通过钾离子联结，水分子不易进入；高岭石为 1:1 型结构，层间距 0.7 nm，层间氢键联结紧密，不易吸附水分子。三种粘土矿物对水泥水化和混凝土性能影响的程度存在显著差异。

在传统水泥稳定基层中，粘土矿物主要通过三种途径产

生不利影响：一是吸附拌合水，增加实际水灰比，降低强度；二是包裹水泥颗粒，阻碍水泥水化反应的进行；三是削弱集料与水泥石界面的粘结力，导致界面过渡区强度降低。这也是现行标准对含泥量严格限制的根本原因。因此，要实现高含泥量天然砂砾的直接利用，关键在于通过技术手段将泥土颗粒从“有害”组分转变为“有益”的胶凝组分。

2 高含泥量水稳砂砾配合比试验研究

2.1 原材料选择

选用绿色低碳高性能水泥 42.5 作为胶凝材料，对比水泥为普通硅酸盐水泥 P·O 42.5，两种水泥强度等级相同，便于在同等条件下比较绿色低碳高性能水泥的活性激发效果。集料采用就地取材的高含泥量天然砂砾，经破碎至 50 mm 以下，免洗筛分分档成 20~50 mm、5~20 mm、0~5 mm 三级配，再按目标合成级配进行复配。

基于本技术的特点，对原材料的技术指标要求进行了合理调整：粗集料含泥量（小于 0.075 mm）基层可放宽至 15%（高速公路和一级公路）或 20%（二级及以下公路），但要求小于 0.075 mm 颗粒中伊利石或绿泥石含量不大于 10%，以

控制膨胀性粘土矿物的比例；细集料塑性指数控制在 $10\sim 17$ 之间；压碎值根据交通等级分别控制在 $22\%\sim 35\%$ 以内。

2.2 合成级配设计

合成级配设计本着因地制宜、能用尽用、经济合理的原则，以高含泥量天然砂砾为主要原材料。图2展示了新疆不同地区天然砂砾的级配分布与合成级配范围的对比关系。

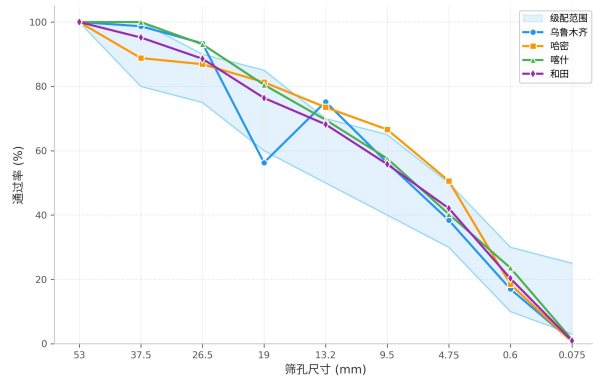


图2 新疆不同地区天然砂砾级配分布与合成级配范围

从图2可以看出，新疆不同地区天然砂砾级配存在一定波动，但均在合成级配范围之内或接近边界。乌鲁木齐和田地区天然砂砾偏细，需适当增加 $20\sim 50\text{ mm}$ 粗档料进行调节；哈密和喀什地区天然砂砾偏粗，可通过增加 $0\sim 5\text{ mm}$ 细档料或适当减少粗档料来调整。合成级配设计时，应根据就地取材的天然砂砾实际级配状况，通过配合比计算和试拌验证，确定合理的三档料配比。

2.3 击实试验

采用重型击实方法，分别对不同水泥品种（绿色低碳高性能水泥和普通水泥）、不同水泥剂量（ 4.0% 、 4.5% 、 5.0% ）的混合料进行了击实试验，以确定最佳含水量和最大干密度。以和田地区（含泥量 15.3% ）为例，不同水泥剂量的含水量与干密度关系曲线见图3。

由图3可知，含泥量对最佳含水量和最大干密度均有显著影响。含泥量较高的天然砂砾需要更高的最佳含水量才能达到最大干密度，这是因为 0.075 mm 以下细颗粒物（泥土）在击实功作用下需要更多的水分才能达到最佳的压实状态，细颗粒的填充效应和吸水效应共同导致了最佳含水量的升高。同时，随着水泥剂量的增加，最大干密度呈增长趋势。

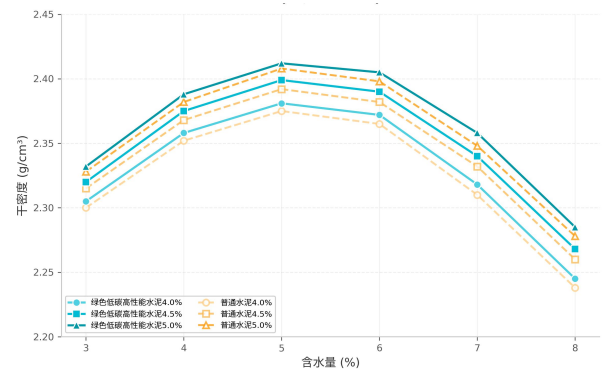


图3 和田地区不同水泥剂量含水量与干密度关系曲线

2.4 无侧限抗压强度试验

根据击实试验确定的最佳含水量和最大干密度，按 98% 压实度成型 $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 试件，标准养护 6 d 、浸水 1 d 后进行 7 d 无侧限抗压强度试验。为深入研究绿色低碳高性能水泥的持续水化特性，部分试件标准养护 27 d 、浸水 1 d 后进行 28 d 强度试验。四地区试验结果汇总对比见图4。

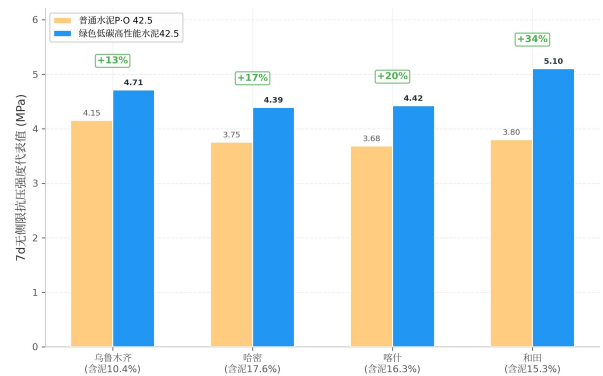


图4 不同地区高含泥量天然砂砾水稳基层 7 d 强度对比(水泥剂量 4.5%)

从图4可以看出，在相同水泥剂量条件下（ 4.5% ）条件下，绿色低碳高性能水泥稳定基层的 7 d 无侧限抗压强度整体显著高于普通水泥稳定基层。乌鲁木齐地区（含泥量 10.4% ）强度提高约 13% ；哈密地区（含泥量 17.6% ）强度提高约 17% ；喀什地区（含泥量 16.3% ）强度提高约 20% ；和田地区（含泥量 15.3% ）强度提高最为显著，达 34% ，和田天然砂砾以粉砂土为主黏聚性较小更利激发胶凝。

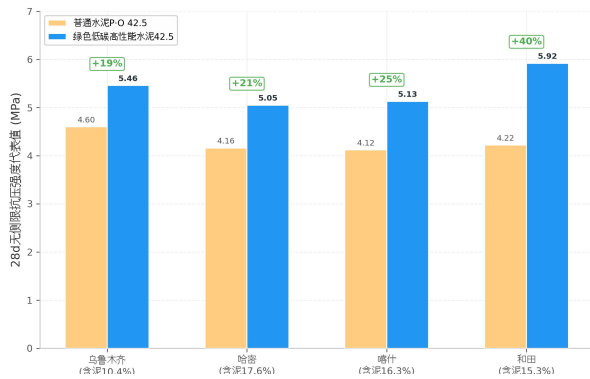


图5 不同地区高含泥量天然砂砾水稳基层 28 d 强度对比
(水泥剂量 4.5%)

从图5可以得出28 d龄期强度增长绿色低碳高性能水泥稳定基层的强度增幅(15%~16%)明显高于普通水泥(10%~13%),说明随着龄期增加,绿色低碳高性能水泥的水化反应持续进行,活性激发剂使泥土中的硅铝成分持续参与水化反应,生成更多的水化产物,从而不断提升基层强度。在外观质量上,绿色低碳高性能水泥基层试件表面均匀致密、无宏观裂纹,而普通水泥稳定基层试件表面松散麻面、宏观裂纹较多。

3 高含泥量天然砂砾水稳基层施工技术

基于上述试验研究成果,提出了高含泥量天然砂砾水稳基层的就地取材、免水洗施工工艺。主要施工流程包括:(1)天然砂砾就地取材,采用挖掘机配合自卸汽车运输至施工现场或料场;(2)采用破碎机将天然砂砾破碎至50 mm以下,确保最大粒径满足要求;(3)免洗筛分分档成20~50 mm、5~20 mm、0~5 mm三级配,此过程无需水洗,仅通过振动筛进行干式筛分;(4)按合成级配设计比例将三档料进行复配;(5)掺入规定剂量的绿色低碳高性能水泥和适量特种活性激发剂;(6)通过拌合设备充分拌合均匀;(7)摊铺、碾压成型;(8)及时养护。

施工过程中应重点关注含水量的实时控制。由于高含泥量天然砂砾的最佳含水量相对较高(一般在5%~11%),且受现场温度、风速、日照等环境因素影响较大,建议根据现场实际情况在试验确定的最佳含水量基础上增加0.5%~1.0%的补偿量。碾压应遵循“先轻后重、先慢后快、先边后中”的

原则,初压采用轻型压路机稳压1~2遍,复压采用18 t以上振动压路机振动碾压4~6遍,终压采用轮胎压路机收光1~2遍,确保压实度达到设计要求(一般不低于98%)。施工接缝应妥善处理,纵向接缝采用垂直平接缝,横向接缝采用阶梯形接缝,确保结构的整体性。

4 典型工程应用

4.1 乌鲁木齐市地区工程应用

乌鲁木齐市地区位于新疆北疆,是新疆的政治经济文化中心,公路交通流量大。本次选取的天然砂砾含泥量10.4%,塑性指数5.7。采用4.5%水泥剂量时,绿色低碳高性能水泥稳定基层7 d无侧限抗压强度代表值达4.71 MPa,较普通水泥的4.15 MPa提高约13%(见图4)。虽然该地区含泥量相对较低(10.4%),但仍远超JTG/T F20-2015规定的2%限值,通过绿色低碳高性能水泥的活性激发,强度仍满足高速公路和一级公路基层3.0~6.0 MPa的设计要求,验证了该技术在含泥量10%以上天然砂砾中的适用性。



图6 乌鲁木齐市市政道路水稳基层应用

4.2 哈密地区工程应用

哈密地区位于新疆东疆,气候干旱少雨,天然砂砾资源分布广泛。本次选取的天然砂砾含泥量 17.6%,压碎值 15.2%,塑性指数 8.3。采用 4.5%水泥剂量时,绿色低碳高性能水泥稳定基层 7 d 无侧限抗压强度代表值达 4.39 MPa,较普通水泥的 3.75 MPa 提高约 17% (见图 4)。值得关注的是,该地区含泥量 17.6%已远超 JTG/T F20-2015 规定的 2%限值达 8.8 倍,但通过绿色低碳高性能水泥的活性激发,强度仍满足高速公路和一级公路基层设计要求,充分验证了该技术对高含泥量天然砂砾的适用性。



图7 哈密矿区道路建设项目

4.3 喀什地区工程应用

喀什地区位于新疆南疆西部,天然砂砾资源丰富但含泥量较高。本次选取的天然砂砾含泥量 16.3%,塑性指数 6.3。采用 4.5%水泥剂量时,绿色低碳高性能水泥稳定基层 7 d 无

侧限抗压强度代表值达 4.42 MPa,较普通水泥的 3.68 MPa 提高约 20% (见图 4)。含泥量对普通水泥稳定基层强度影响更为显著,当含泥量从乌鲁木齐的 10.4%增加到喀什的 16.3%时,普通水泥稳定基层强度下降了 11.3%,而绿色低碳高性能水泥仅下降 6.2%,体现了绿色低碳高性能水泥对高含泥量条件的良好适应性和抗泥性能。



图8 喀什农村公路建设项目

4.4 和田地区工程应用

和田地区位于新疆南疆塔克拉玛干沙漠南缘,气候极端干旱,年降水量不足 50 mm,水资源极度匮乏,水洗工艺较为困难。本次天然砂砾取自和田洛浦县,含泥量 15.3%,压碎值 13.4%,塑性指数 5.8。采用 4.5%绿色低碳高性能水泥剂量时,7 d 无侧限抗压强度代表值达 5.10 MPa,较普通水泥的 3.80 MPa 提高 34% (见图 4),是四个地区中强度提升幅度最大的。这充分说明绿色低碳高性能水泥对于南疆高含泥量天然砂砾具有优异的活性激发和固化胶凝效果。和田地区的成功应用对于推动整个南疆地区公路建设具有重要的示

范意义,为解决干旱缺水地区公路基层施工中的材料瓶颈问题提供了有效的技术方案。



图9 和田农村公路建设项目

四个地区试验结果综合对比表明:采用绿色低碳高性能水泥可以稳定、可靠地实现含泥量 10%~20%天然砂砾的高值化利用,7 d 无侧限抗压强度均满足各等级公路基层设计要求,且强度提升幅度与含泥量呈正相关关系,含泥量越高,绿色低碳高性能水泥的活性激发优势越显著。

5 结论

(1) 我国西部地区天然砂砾含泥量普遍在 10%~20%之间,远超现行技术标准限值。但其所含粘土矿物以粉土为主,膨胀性强的蒙脱石含量相对较低,具备通过活性激发技术实现资源化利用的基本条件。

(2) 采用绿色低碳高性能水泥制备的高含泥量天然砂砾水稳基层,7 d 无侧限抗压强度较普通水泥提高 13%~34%,且强度提升幅度与含泥量呈正相关;28 d 强度持续增长,增幅

高于普通水泥;试件外观均匀致密,变异系数更小。

(3) 配合比设计方面,粗集料含泥量可放宽至 15%~20% (需控制膨胀性粘土矿物含量),细集料塑性指数控制在 10~17,通过合理的合成级配设计和水泥剂量选择 (推荐 4.5%),可制备满足各级公路基层设计要求的水稳材料。

(4) 经乌鲁木齐、哈密、喀什、和田四个典型地区验证,技术可行、经济合理,为高含泥量天然砂砾的资源化利用和公路建设的绿色低碳发展提供了有效的技术支撑和工程示范。

[参考文献]

[1] JTG/T F20-2015 公路路面基层施工技术细则[S]. 北京:人民交通出版社,2015.

[2] GB/T 14684-2022 建设用砂[S]. 北京:中国标准出版社,2022.

[3] GB/T 14685-2022 建设用卵石、碎石[S]. 北京:中国标准出版社,2022.

[4] 张华,李明,王强. 高含泥量集料水泥稳定基层性能研究[J]. 公路交通科技,2021,38(5):25-32.

[5] 刘洋,陈刚,赵伟. 活性激发剂改性水泥稳定高含泥砂砾的力学性能[J]. 建筑材料学报,2022,25(3):412-419.

[6] 杨帆,黄磊,孙杰. 绿色低碳高性能水泥在道路基层中的应用[J]. 混凝土与水泥制品,2023(2):78-83.

[7] 周鹏,吴磊,郑涛. 新疆天然砂砾路用性能评价及工程应用[J]. 中外公路,2022,42(4):156-162.

[8] 马军,胡伟,林峰. 含泥量对水泥稳定碎石基层强度的影响规律[J]. 筑路机械与施工机械化,2021,38(8):65-70.

[9] 徐志刚,黄小明,李建华. 干旱地区公路基层就地取材免水洗施工技术[J]. 公路工程,2023,48(1):89-95.

[10] GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.