文章编号:1007-9629(2025)03-0270-06

再生风积沙骨料表面疏水改性方法与机制研究

李 闯1, 任永峰1, 张 宏1,*, 吴 平2, 杨亚雄3

(1.内蒙古大学交通学院,内蒙古 呼和浩特 010021; 2.内蒙古交通集团蒙通养护有限责任公司,内蒙古 呼和浩特 010060; 3.内蒙古路桥集团有限责任公司,内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要:针对风积沙作为混凝土骨料使用时粒径小、比表面积大、吸水性强的问题,采用水泥胶结与表面疏水改性的方法,制备了大粒径表面疏水型再生风积沙骨料.结果表明:经硅烷偶联剂配合有机硅树脂改性的再生风积沙骨料,其吸水率明显降低,改性剂配比对再生风积沙骨料吸水率的影响较小; 疏水改性不会降低再生风积沙骨料的强度以及再生风积沙骨料与水泥石间的黏结强度;使用表面改 性再生风积沙骨料制备混凝土,其力学性能和工作性能明显改善;疏水改性可以优化再生风积沙骨 料表面的微观结构,增大其表面浸润角.

关键词:风积沙;再生骨料;疏水改性;硅烷偶联剂;有机硅树脂;混凝土 中图分类号:TU528.041 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.010

Surface Hydrophobic Modification Methods and Mechanisms of Recycled Aeolian Sand Aggregates

LI Chuang¹, REN Yongfeng¹, ZHANG Hong^{1,*}, WU Ping², YANG Yaxiong³

(1. College of Transportation, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China;

2. Inner Mongolia Transportation Group Mengtong Maintenance Limited Liability Company, Huhhot 010060, China;

3. Inner Mongolia Road and Bridge Group Limited Liability Company, Huhhot 010011, China)

Abstract: To address the issue of small particle size, large specific surface area and high water absorption when aeolian sand was used as concrete aggregate, a large particle size surface hydrophobic recycled aeolian sand was prepared using cementation and surface hydrophobic modification. The results demonstrate that the water absorption of the recycled aeolian sand modified by a silane coupling agent with silicone resin is significantly reduced, and the modifier ratio has less influence on the water absorption of the recycled aeolian sand. Furthermore, hydrophobic modification does not reduce the strength of the recycled aeolian sand and the bond strength between recycled aeolian sand aggregate and cement stone. The mechanical properties and workability of concrete prepared with surface-modified recycled aeolian sand are significantly improved. The hydrophobic modification can optimize the surface microstructure of recycled aeolian sand and increase its surface contact angle.

Key words: aeolian sand; recycled aggregate; hydrophobic modification; silane coupling agent; organic silicone resin; concrete

风积沙分布广泛,流动性强,既破坏耕地,又是 扬尘的重要成因^[1].因此,对风积沙的有效治理和资 源化利用是目前研究的重点^[24].风积沙的粒径小(约 0.25 mm)而均匀,作为骨料使用时级配严重不良.同

收稿日期:2024-04-23;修订日期:2024-06-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51968053,52268071);国家杰出青年科学基金资助项目(2023JQ03);内蒙古自治区自然科学基金 资助项目(2024QN05023);内蒙古大学高层次人才科研启动基金项目(10000-22311201/008)

第一作者:李 闯(1987—),男,内蒙古赤峰人,内蒙古大学讲师,博士.E-mail:lichuang8787@163.com 通讯作者:张 宏(1978—),男,内蒙古乌兰察布人,内蒙古大学教授,博士生导师,博士.E-mail:zhanghong3537@126.com

时,由于其比表面积大、吸水性强,导致由风积沙制 备的混凝土性能不佳.相关研究表明,风积沙会劣化 混凝土的孔隙结构和界面过渡区质量,导致混凝土 的抗压强度降低^[5],坍落度下降^[6],抗冻性能降低^[7-9]. 尽管风积沙作为骨料使用时存在以上不足,但面对 天然河砂、碎石短缺,以及开采过程中带来的环境破 坏问题,利用风积沙替代传统骨料制备性能优良的 混凝土仍是目前的研究热点.

为降低无机材料表面的吸水性或增强无机、有 机材料界面间的相容性,无机材料的表面改性处理 是目前经常使用的技术手段^[10-11].王晓等^[12]为提高羟 基磷灰石在聚合物介质中的相容性和分散稳定性, 采用硅烷偶联剂对羟基磷灰石进行表面改性处理, 取得了良好的效果.桑超等^[13]利用硅溶胶对硅莫砖 再生骨料进行浸润处理,降低了硅莫砖再生骨料的 吸水率.Barnat-Hunek等^[14]研究表明,经有机硅树脂 处理后轻质骨料的表面吸水性明显降低.

为解决风积沙级配不良、比表面积大和吸水性 强的问题,本研究尝试采用水泥胶结与表面疏水改 性的方法制备大颗粒表面疏水型再生风积沙骨料, 探究改性后再生风积沙骨料和再生风积沙骨料混凝 土的物理性能变化规律及相关作用机制,为风积沙 在建筑材料领域的资源化利用提供参考.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用金隅冀东牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水 泥,Ⅱ级粉煤灰取自呼和浩特市金桥电厂;细骨料为 河砂,细度模数为2.8;减水剂采用聚羧酸高效减水 剂,减水率(质量分数,文中涉及的减水率、水灰比等 除特别说明外均为质量分数或质量比)为16%;拌 和水为自来水;硅烷偶联剂采用γ-丙基三甲氧基硅 烷;有机硅树脂采用甲基苯基聚硅氧烷树脂;风积沙 取自内蒙古库布其沙漠,其粒径小于1 mm,不均匀 系数为5,属级配严重不良的骨料,粒径分布如图1 所示.

1.2 普通再生风积沙骨料的制备

采用水泥固化风积沙的方式制备普通再生风积 沙骨料,具体过程如下:首先,制备水泥净浆(水灰比 0.5);随后,加入风积沙(胶砂比1:4)并搅拌均匀,将 拌和物装入模具内振捣密实,脱模后在标准养护条 件下((20±2)℃、相对湿度95%)养护28d后脱模; 最后,将水泥固化风积沙试件打碎,筛选出粒径约 5mm的固化颗粒,即普通再生风积沙骨料.



1.3 表面疏水再生风积沙骨料的制备

在制备出普通再生风积沙骨料的基础之上,采 用硅烷偶联剂和有机硅树脂对普通再生风积沙骨料 进行改性处理,以制备表面疏水再生风积沙骨料。使 用以上2种改性材料原因在于:再生风积沙骨料属于 无机材料,有机硅树脂属于疏水性的有机材料,无机 与有机材料之间的很难形成牢固的化学键;为此,需 要硅烷偶联剂作为2类材料之间的媒介.硅烷偶联剂 遇水后,一端的烷氧基水解成硅羟基,硅羟基能与风 积沙、水泥石表面的羟基发生缩聚反应,形成牢固的 氢键及Si—O—Si共价键;硅烷偶联剂的另一端可与 有机硅树脂反应形成共价键^[15-16].

此外,考虑到硅烷偶联剂用量小时,骨料表面与 有机硅树脂之间缺少连接媒介,可能导致有机硅树 脂无法将骨料表面完全包裹;而硅烷偶联剂用量过 大时,包裹层过厚可能影响骨料与胶凝材料之间的 黏结强度.为此,在疏水改性处理中,以硅烷偶联剂 溶液中有效成分(γ-丙基三甲氧基硅烷)的质量分数 (5%、10%、15%)为控制变量,对应试件编号为 OR5、OR10、OR15,普通再生风积沙骨料试件编号 记为OR0,天然河沙骨料试件编号记为S.再生风积 沙骨料表面疏水改性处理的具体过程如下:首先,将 普通再生风积沙骨料在硅烷偶联剂溶液中浸渍3h; 随后,放入有机硅树脂中浸泡12h,在实验室条件下 等待骨料表面改性剂自然固化.

1.4 再生风积沙骨料混凝土配合比

为测试再生风积沙骨料对混凝土工作性能和力 学性能的影响,制备了再生风积沙骨料混凝土.试件 的配合比如表1所示.

1.5 浸润角

采用北斗仪器CA200型自接触角测量仪,选取 表面平整的再生风积沙骨料,在其表面滴上同质量 的蒸馏水以形成水滴,随后对水滴的浸润角进行连 续观测.

表1 试件的配合比

Table 1Mix proportions of specimens

						enit: kg/ in
Specimen	Cement	Water	Fly ash	Recycled aeolian sand aggregate	Ordinary aggregate	Water reducer
S	310.0	155.0	80.0	0	900.0	7.8
OR0	310.0	155.0	80.0	900.0	0	7.8
OR5	310.0	155.0	80.0	900.0	0	7.8
OR10	310.0	155.0	80.0	900.0	0	7.8
OR15	310.0	155.0	80.0	900.0	0	7.8

1.6 再生风积沙骨料与水泥石的黏结强度(τ)

采用推出法测试再生风积沙骨料与水泥石的黏 结强度^[17],具体过程如下:首先,制备与再生风积沙骨 料组成完全相同的圆柱体试件(*q*150×200 mm)并 对其外表面进行疏水处理;随后,在圆柱体试件周围 浇筑水泥净浆;待水泥净浆固化后,在竖向荷载作用 下将圆柱形试件从水泥净浆中推出(如图2所示),所 施加的竖向极限荷载经换算后(式(1))即为再生风 积沙与水泥石的黏结强度.

$$\tau = \frac{F_{\text{max}}}{\pi D(H-X)} \tag{1}$$

式中:F_{max}为最大荷载,N;X为再生风积沙材料与水 泥石的相对位移,mm;D为试件直径,mm;H为再生 风积沙材料与水泥石的接触面高度,mm.



图 2 推出法测试再生风积沙材料与水泥石的黏结强度 Fig. 2 Push-out method for testing the bond strength of recycled aeolian sand material with cement paste

2 结果与分析

2.1 吸水率

图 3 为试件的吸水率.由图 3 可见:试件 OR0 的 吸水率较高,约为 5.01%;表面疏水再生风积沙骨料 试件的吸水率明显降低,约为 1.00%;硅烷偶联剂溶 液中有效成分含量的变化对表面疏水再生风积沙骨 料吸水率的影响相对较小,不同试件间的吸水率差 距小于 0.05%.

2.2 压碎值

图4为试件的压碎值,测试方法符合JTG 3432— 2024《公路工程集料试验规程》.由图4可见,试件OR5、 OR10、OR15的压碎值在17.5左右,与试件OR0压碎 值(18.1)的差距很小,并明显高于试件S(9.2).这说明 疏水改性剂不会影响再生风积沙骨料试件的强度,再 生风积沙骨料试件的强度小于天然河砂骨料试件.

2.3 黏结强度

图5为再生风积沙骨料与水泥石的黏结强度.由



图 5 可见:普通再生风积沙骨料与水泥石的黏结强度 约为 0.77 MPa,表面疏水再生风积沙骨料与水泥石 的黏结强度为 0.82~1.12 MPa;随着硅烷偶联剂溶液 有效成分含量的提升,黏结强度呈先上升后下降的 趋势,其中硅烷偶联剂有效成分含量为 5% 时,表面 疏水再生风积沙骨料与水泥石之间的黏结强度最高 (约 1.12 MPa,相较普通再生风积沙骨料提升了约

Unit · kg/m³



Fig. 5 Bond strength between recycled aeolian sand and cement stone

45%).以上试验现象说明,表面疏水再生风积沙骨料 与水泥石的黏结强度高于普通风积沙再生骨料,并 且硅烷偶联剂用量会影响表面疏水再生风积沙骨料 与水泥石之间的黏结强度.这可能与硅烷偶联剂材 料厚度过大,在剪切荷载作用下容易出现硅烷偶联 剂层内部断裂、破坏的情况有关.

疏水改性对再生风积沙骨料与水泥石界面之间 的黏结强度主要存在两方面的影响:一方面,经疏水 改性后,再生风积沙骨料与水泥石之间的化学结合 性降低,从这一角度考虑,疏水化性不利于提升再生 风积沙骨料与水泥石之间的黏结强度;另一方面,疏 水改性后,再生风积沙骨料表面的孔隙被疏水改性 剂填充、覆盖,降低了其表面对水泥浆体中水分的吸 收能力,保障了水泥浆体硬化过程中对水分的需求, 提升了界面处水泥石的水化质量,进而提高了界面 黏结强度.结合黏结强度可以看出,以上两方面影响 中,后者起主要作用,前者起次要作用.

2.4 流动性

图 6 为试件的摊铺直径.由图 6 可见:所有试件 中,试件 OR0 的摊铺直径最小,约为 40 cm;试件 OR5、OR10、OR15 的摊铺直径明显提高,约为



50 cm,已接近试件S的摊铺直径(55 cm).

2.5 力学性能

表 2 为试件的力学性能.由表 2 可见:养护7 d 时,试件OR0的抗压强度最低(22.6 MPa),表面疏水 再生风积沙骨料混凝土中试件OR5的抗压强度最高 (31.7 MPa,相较于试件OR0提升了约40%),已接近 天然河砂骨料混凝土试件S的抗压强度(33.5 MPa); 养护28 d时,试件OR0的抗压强度依然最小 (25.3 MPa),表面疏水再生风积沙骨料混凝土与天 然河砂骨料混凝土抗压强度的差距进一步缩小(如 试件OR10的抗压强度已超过30 MPa);此外,养护 28 d时,试件OR0的抗折强度最低(2.8 MPa),表面 疏水再生风积沙骨料混凝土中,试件OR5的抗折强 度最高(3.5 MPa,相较于试件OR0提升了约25%); 再生风积沙骨料混凝土的抗折强度明显低于天然河 砂骨料混凝土.

表 2 试件的力学性能 Table 2 Mechanical properties of specimens

			Unit: MPa	
C	Compressi	ve strength	28 d flexural strength	
Specimen	7 d	28 d		
S	33.5	36.6	4.2	
OR0	22.6	25.3	2.8	
OR5	31.7	34.3	3.5	
OR10	28.5	31.2	2.8	
OR15	25.0	27.8	2.4	

2.6 骨料表面疏水性与微观结构

图 7 为骨料表面的浸润角.由图 7 可见:水滴刚 接触骨料表面时(0 h),普通再生风积沙骨料表面的 水滴迅速展开,浸润角为锐角(约 38°,图 7(a));表面 疏水再生风积沙骨料的浸润角为钝角(约 110°,图 7 (b));2 h后,普通再生风积沙骨料表面的水滴几乎被 完全吸收(浸润角约 7°,图 7(c));表面疏水再生风积 沙骨料表面的水滴依然"饱满",浸润角仍为钝角(约 96°,图7(d)).

图 8 为骨料表面的微观形貌.由图 8 可见:普通 再生风积沙骨料表面孔洞、裂隙较多,微观结构疏



(c) OR0, 2 h

松,孔隙率相对较高(图8(a));表面疏水再生风积沙 骨料表面被凝胶状附着物紧密包裹,微观结构致密, 孔隙率大幅度降低(图8(b)).



(b) OR5, 0 h

84°



图 7 骨料的表面浸润角 Fig. 7 Surface contact angle of aggregate



(a) OR0



(b) OR5

图 8 骨料的表面微观形貌 Fig. 8 Surface micromorphology of aggregate

从再生风积沙表面浸润角和微观结构可以看 出,表面疏水再生风积沙骨料混凝土之所以表现出 相对良好的工作性能与力学性能,主要原因在于:首 先,改性剂(硅烷偶联剂配合有机硅树脂)提高了再 生风积沙骨料表面的疏水性(见图7),在混凝土处于 流动状态时,表面疏水再生风积沙骨料不会大量吸 收混凝土中的自由水(见图2),因此不会出现因自由 水减少导致的流动性下降的现象(见图6),保证了混 凝土的工作性能和成型后的质量;同时,疏水性使得 骨料表面的水泥浆体内可以保留足量的水分,确保 骨料与水泥石界面之间的黏结强度得以充分的发展 (见图5),因此表面疏水再生风积沙骨料混凝土的力 学性能优于普通再生风积沙骨料混凝土(见表2).其 次,在改性剂作用下,再生风积沙骨料表面的微观结 构非但没有出现劣化的现象,反而得到一定程度的 改善(见图7),因此相较于普通再生风积沙骨料,表 面疏水再生风积沙骨料本身的力学性能并未出现劣 化的现象(见图3).

3 结论

(1)在不降低再生风积沙骨料自身强度的前提下,硅烷偶联剂配合有机硅树脂可以显著提升再生风积沙骨料的疏水性.疏水化改性后,再生风积沙骨料的吸水率由5.01%下降至约1.00%,硅烷偶联剂溶液中有效成分含量的变化对再生风积沙骨料吸水率的影响较小.疏水改性处理不会影响再生风积沙骨料自身的强度.经5%硅烷偶联剂配合有机硅树脂处理后,再生风积沙骨料与水泥石之间的黏结强度可提升约45%.

(2)相比普通再生风积沙骨料混凝土,采用表面疏 水再生风积骨料制备的混凝土的工作性能、力学性能 明显改善,其流动性接近天然河砂骨料混凝土,抗压强 度、抗折强度明显高于普通再生风积沙骨料混凝土.其 中采用经5%硅烷偶联剂配合有机硅树脂处理后的再 生风沙骨料配置的混凝土,其抗压强度、抗折强度相较

275

普通再生风积沙骨料混凝土提高了约40%和25%.

(3)经硅烷偶联剂配合有机硅树脂疏水改性后, 再生风积沙骨料表面的浸润角增大.硅烷偶联剂与有 机硅树脂形成的凝胶状物质能够紧密包裹再生风积 沙骨料,改善骨料表面的微观结构,降低表面孔隙率.

参考文献:

- [1] MAZG, LIXF. Experiments on the state boundary surface of aeolian sand for road building in the Tengger Desert[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(2):879.
- [2] 王尧鸿,楚奇,韩青.库布齐风积沙对各分级河砂的填充效应
 [J].建筑材料学报,2021,24(1):191-198.
 WANG Yaohong, CHU Qi, HAN Qing. Filling effect of Kubuzi eolian sand on river sand of various grades[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):191-198. (in Chinese)
- [3] 陶嘉伟,苏占东,冉秀峰,等.龄期对剑麻纤维风积沙改性土工程特性的影响[J].铁道科学与工程学报,2024,21(8): 3200-3212.

TAO Jiawei, SU Zhandong, RAN Xiufeng, et al. Influence of age on engineering properties of sisal fiber modified soil witheolian sand[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21 (8):3200-3212. (in Chinese)

[4] 元永帅,高玉峰,何稼,等.可溶性大豆多糖对大豆脲酶诱导 碳酸钙沉积固化风积沙效果的影响研究[J].岩土工程学报, 2024,46(4):823-832.

QI Yongshuai, GAO Yufeng, HE Jia, et al. Effects of soluble soybean polysaccharides on soybean urease-induced calcium carbonate deposition for curing eolian sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4):823-832. (in Chinese)

- [5] 李玉根,张慧梅,刘光秀,等.风积砂混凝土基本力学性能及 影响机理[J].建筑材料学报,2020,23(5):1212-1221.
 LI Yugen, ZHANG Huimei, LIU Guangxiu, et al. Basic mechanical properties and influencing mechanism of wind-deposited sand concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020,23(5):1212-1221. (in Chinese)
- [6] LIYG, ZHANGHM, LIUGX, et al. Multi-scale study on mechanical property and strength prediction of aeolian sand concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118538.
- [7] 董伟,王雪松,计亚静,等.碳化-盐冻作用下风积沙混凝土损伤劣化机理及寿命预测[J].建筑材料学报,2023,26(6):623-630.
 DONG Wei, WANG Xuesong, JI Yajing, et al. Damage deterioration mechanism and life prediction of concrete in eolian sand under carbonation-salt freezing [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):623-630. (in Chinese)
- [8] 薛慧君,申向东,邹春霞,等.基于NMR的风积沙混凝土冻融 孔隙演变研究[J].建筑材料学报,2019,22(2):199-205.
 XUE Huijun, SHEN Xiangdong, ZOU Chunxia, et al. Study on freeze-thaw pore evolution of eolian sand concrete based on NMR
 [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):199-205. (in Chinese)

- [9] 邹欲晓,申向东,李根峰,等.MgSO₄-冻融循环作用下风积沙 混凝土的微观孔隙研究[J].建筑材料学报,2018,21(5):817-824.
 ZOU Yuxiao, SHEN Xiangdong, LI Genfeng, et al. Microporosity study of eolian sand concrete under MgSO₄-freeze-thaw cycle [J]. Journal of Building Materials, 2018,21(5):817-824. (in Chinese)
- [10] 杜常博,朱明皓,易富,等.玄武岩纤维表面改性对混凝土力 学性能的影响[J].建筑材料学报,2024,27(7):573-579.
 DU Changbo, ZHU Minghao, YI Fu, et al. Effect of basalt fiber surface modification on mechanical properties of concrete [J].
 Journal of Building Materials, 2024, 27(7):573-579. (in Chinese)
- [11] 高颖,王伟赫,李彦苍,等.聚合物预浸改性钢渣及其混合料的力学性能[J].建筑材料学报,2022,25(10):1101-1108.
 GAO Ying, WANG Weihe, LI Yancang, et al. Mechanical properties of polymer prepreg-modified steel slag and its blends
 [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(10):1101-1108. (in Chinese)
- [12] 王晓,杨启鹏,徐龙泉,等. 硅烷偶联剂KH-570表面修饰羟基
 磷灰石的结构与吸附性能研究[J]. 材料导报,2012,26(6):
 117-120.

WANG Xiao, YANG Qipeng, XU Longquan, et al. Structure and adsorption properties of hydroxyapatite modified with silane coupling agent KH-570[J]. Materials Review, 2012, 26(6): 117-120. (in Chinese)

[13] 桑超,肖国庆,丁冬海,等.硅溶胶浸渍硅莫砖再生骨料对 Al₂O₃-SiC-C浇注料性能的影响[J].硅酸盐学报,2022,50(3): 828-838.

SANG Chao, XIAO Guoqing, DING Donghai, et al. Effect of silica sol impregnation of recycled aggregate of silica-mo brick on the properties of Al₂O₃-SiC-C castables[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(3):828-838. (in Chinese)

- [14] BARNAT-HUNEK D, GRZEGORCZYK-FRAŃCZAK M, SUCHORAB Z. Surface hydrophobisation of mortars with waste aggregate by nanopolymer trietoxi-isobutyl-silane and methyl silicon resin[J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120175.
- [15] 肖庆一,钱春香,解建光.偶联剂改善沥青混凝土性能及油石
 界面试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2004,34(4):
 485-489.

XIAO Qingyi, QIAN Chunxiang, XIE Jianguang. Experimental study on improvement of asphalt concrete properties and oil-stone interface by coupling agent[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2004, 34(4):485-489. (in Chinese)

- [16] 李毅强,熊光晶.水泥浆/花岗岩的界面偶联机理初探[J].华中 科技大学学报(自然科学版),2004,32(11):94-96.
 LI Yiqiang, XIONG Guangjing. A preliminary study on the interfacial coupling mechanism of cement paste/granite [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 32(11):94-96. (in Chinese)
- [17] ZHAN B J, XUAN D X, POON C S, et al. Characterization of interfacial transition zone in concrete prepared with carbonated modeled recycled concrete aggregates[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 136:106175.