

内掺改性花岗岩石粉的砂浆制备及其 疏水和力学性能研究

周红敏¹,李俊秋¹,李庆冬²,杨 勇^{3,4},付同华^{3,4},谭长胜¹,王 宁¹,张宪堂¹

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 济南市交通工程建设保障中心, 山东 济南 250101;

3. 济南城建集团有限公司, 山东 济南 250031; 4. 山东汇通建设集团有限公司, 山东 济南 250131)

摘要:为解决花岗岩石粉废弃物利用率低的问题, 有效提高建筑砂浆的疏水性和力学性能, 本研究提出使用无氟无污染的硬脂酸对花岗岩石粉进行改性, 成功研制了超疏水花岗岩石粉, 将其替代砂浆中的细骨料制备疏水砂浆。通过改变超疏水花岗岩石粉替代量, 分析疏水砂浆的润湿性、吸水率以及力学性能的变化规律。结果表明: 当硬脂酸质量为花岗岩石粉质量的3%时, 花岗岩石粉表现出良好的超疏水性; 超疏水花岗岩石粉替代量为0~20%时, 砂浆的疏水性也随着替代量的增加而逐渐提高; 当替代量达到15%时, 疏水砂浆的抗压和抗折强度分别比普通砂浆高17%和19.1%。通过在普通砂浆中内掺硬脂酸改性的花岗岩石粉能够有效提高其疏水性能, 同时其力学性能也得到相应改善。

关键词:硬脂酸; 超疏水花岗岩石粉; 疏水砂浆; 润湿性; 吸水率; 力学性能

中图分类号:TU53

文献标志码:A

Study on preparation of mortar with modified granite powder and its hydrophobicity and mechanical properties

ZHOU Hongmin¹, LI Junqiu¹, LI Qingdong², YANG Yong^{3,4}, FU Tonghua^{3,4},

TAN Changsheng¹, WANG Ning¹, ZHANG Xiantang¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Jinan Traffic Engineering Construction Guarantee Center, Jinan 250101, China; 3. Jinan Urban Construction Group

Co., Ltd., Jinan 250031, China; 4. Shandong Huitong Construction Group Co., Ltd., Jinan 250131, China)

Abstract: To solve the problem of low utilization rate of granite powder waste, and effectively improve the hydrophobicity and mechanical properties of building mortar, this study proposed to prepare the superhydrophobic granite powder from the granite powder modified by using fluorine-free and pollution-free stearic acid was used to modify the granite powder and substitute it for fine aggregate in mortar to prepare hydrophobic mortar. The wettability, water absorption rate and mechanical properties of hydrophobic mortar were analyzed by changing the replacement amount of superhydrophobic granite powder. The results show that when the weight of stearic acid is 3% of the weight of granite powder, the granite powder exhibits good superhydrophobicity. When the replacement amount of superhydrophobic granite powder is 0~20%, the hydrophobicity of mortar also increases gradually with the increase of the replacement amount. When the replacement amount reaches 15%, the compressive strength and

收稿日期:2024-12-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51874189); 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE043); 山东省技术创新项目(202360101063)

作者简介:周红敏(1975—), 女, 河北新乐人, 副教授, 博士, 主要从事工程防灾减灾控制研究. E-mail: skd992064@sdust.edu.cn

王 宁(1986—), 女, 山东枣庄人, 副教授, 博士, 主要从事超疏水材料在海洋土木工程中的应用研究, 本文通信作者. E-mail: ningwang@sdust.edu.cn

flexural strength of hydrophobic mortar are 17% and 19.1% higher than that of ordinary mortar, respectively. By adding stearic acid modified granite powder into ordinary mortar, the hydrophobicity of the mortar can be improved effectively and its mechanical properties can be improved correspondingly.

Key words: stearic acid; superhydrophobic granite powder; hydrophobic mortar; wettability; water absorption rate; mechanical properties

花岗岩石粉是花岗岩石材加工过程中产生的废弃材料。据统计,我国每年因花岗岩加工产生的花岗岩石粉高达 1 000 万吨,目前利用率偏低,不仅占用土地资源,而且会带来水体与空气污染等问题^[1-2]。花岗岩石粉除用作制备涂料、建筑瓷砖、玻璃等材料外,许多学者也将花岗岩石粉作为混凝土充填物并对其性能进行研究^[3-4]。Nakayenga 等^[5]发现少量花岗岩废料代替水泥掺入到水泥砂浆中可以提高其力学强度。申屠存等^[6]通过试验研究发现替换适量的花岗岩石粉能够有效改善砂浆的耐久性和力学性能,其最佳取代率为 12.37%~21.74%,在此范围内,花岗岩砂浆的性能虽有一定程度的下降,但仍能保持与基准组接近的水平。大量研究证明将花岗岩石粉掺入砂浆中不仅可以提高其利用率,也能在一定程度上提高砂浆的力学性能。

普通砂浆多孔且表面含有水泥水化产生的羟基,具有较强的亲水性,易受到水及氯盐、硫酸盐等物质的冲刷及侵蚀破坏,严重影响砂浆的耐久性^[7-8]。近年来,提高砂浆疏水性的研究受到越来越多的关注^[9-11]。目前,有两种常用方法来提高砂浆疏水性:一种是通过表面处理法使水泥基材料表面产生疏水性^[12];另一种方法是将疏水材料与砂浆混合,以掺入外加剂的形式使疏水材料分布在砂浆内部^[13]。已经有较多研究者采用含氟或硅烷疏水剂实现了砂浆的疏水改性^[14]。而制备工艺中的含氟材料对环境有害,且硅烷材料造价昂贵,不适用于实际的大规模生产应用。

鉴于此,本研究采用无氟无污染的硬脂酸作为低表面能改性剂,对花岗岩石粉进行改性,用疏水性最优的改性花岗岩石粉替代砂浆中的细骨料制备疏水花岗岩石粉砂浆,通过改变超疏水花岗岩石粉替代量,分析砂浆的润湿性、吸水率以及力学强度的变化规律,旨在揭示其微观改性机制。研究成果将为砂浆的疏水性和力学性能的提高提供科学依据,并为相关工程的设计施工提供参考。

1 试验准备与实施

1.1 试验材料

试验选用最大粒径小于 60 μm 的花岗岩石粉、P·O 42.5 硅酸盐水泥以及粒径不超过 1.18 mm 的天然河砂作为细骨料,并利用无水乙醇溶解硬脂酸来制备改性剂溶液。

1.2 试验设计

采用化学改性法^[15]进行花岗岩石粉的制备,为确定最佳的硬脂酸用量,选取硬脂酸质量分别为花岗岩石粉质量的 1%、2%、3%、4%、5% 等几种配比对花岗岩石粉进行改性。分别将花岗岩石粉和不同质量分数的硬脂酸放入含有 50 mL 乙醇的烧杯中,利用 90-2 型磁力搅拌器(常州苏瑞仪器有限公司)以 250 r/min 的转速、40 $^{\circ}\text{C}$ 条件下搅拌混合液 30 min,改性完成后静置 30 min,随后过滤混合液得到改性的花岗岩石粉。将改性花岗岩石粉放入 50 $^{\circ}\text{C}$ 的真空干燥箱中干燥 8 h,使粉末中残存的无水乙醇完全蒸发。通过表征不同用量的硬脂酸改性花岗岩石粉的润湿性,选取疏水性最优的改性花岗岩石粉,分别替代 0%、5%、10%、15% 和 20% 的细骨料制备疏水花岗岩石粉砂浆试件。砂浆配合比及编号见表 1。表中编号 S0、S5、S10、S15 以及 S20 依次表示超疏水花岗岩石粉替代率为 0%、5%、10%、15% 和 20%。

试验使用内径 100 mm、厚度 15 mm 的塑料培养皿作为模具,将超疏水花岗岩石粉、水泥、砂和混合液掺和搅拌均匀倒入模具,待砂浆固化 24 h

表 1 试件配比及编号

Table 1 Proportion and number of specimens g				
编号	水	水泥	砂	超疏水花岗岩石粉
S0	400	800	800	0
S5	400	800	760	40
S10	400	800	720	80
S15	400	800	680	120
S20	400	800	640	160

后脱模,在标准条件下养护 28 d 得到砂浆试件。

1.3 测试原理与方法

1.3.1 微观表征和形貌测试方法

表面润湿性分为疏水和超疏水两种不同状态,二者的主要区别在于表面与水之间的接触角大小^[16]。疏水表面与水之间的接触角通常大于 90°,水滴在疏水表面不易滚动;而超疏水表面与水之间的接触角大于 150°,水滴在超疏水表面几乎呈球形,很难附着在表面上。

为分析硬脂酸对花岗岩石粉的疏水改性机理,以及超疏水花岗岩石粉对砂浆性能的影响,采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对改性前后花岗岩石粉的微观结构进行分析,将砂浆试件分割成 10 mm×10 mm×10 mm 的小块作为微观结构分析的样品;同时借助能谱仪(energy dispersive spectrometer,EDS)以及傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer,FTIR)分析其化学组成和官能团。同时,通过光学接触角测量仪测量改性后花岗岩石粉的水接触角以及不同细骨料替代量的砂浆水接触角,用两个载玻片把少量改性花岗岩石粉压平,保证粉末表面平整均匀且无明显的颗粒,分析花岗岩石粉以及砂浆表面的湿润性。

1.3.2 吸水率试验

砂浆的疏水性能可以用吸水率来表示,砂浆的吸水率越小,表明其防水渗透能力越好。本试验采取全部浸泡的方法验证砂浆的整体疏水性。在进行试件浸泡前,采用烘干箱将养护结束的砂浆试件烘干至恒重,烘干温度设置为 55 °C,待试件烘干冷却后称取其质量 M_0 。将试件完全浸没在水中,称取累计浸泡时间为 0~102 h 的试件质量 M_i ,每次称量前擦去试件表面水分。每组取 3 个相同条件下试件测得的吸水率平均值作为最终值。各时段吸水率计算公式为:

$$X_i = (M_i - M_0) / M_0. \quad (1)$$

式中: X_i 为各时段吸水率,%; M_i 为各时段试件质量,g; M_0 为试件初始质量,g。

1.3.3 抗折抗压试验

分别制备尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 和 40 mm×40 mm×160 mm 的试件用于测试砂浆的抗压和抗折强度^[17]。借助万能试验机并依据 JGT/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》分别测定养护 28 d 后不同细骨料替代量的砂浆抗压和抗折强度,取 3 次测量平均值作为其最终取值。

2 结果与分析

2.1 形貌与化学成分表征分析

普通花岗岩石粉和改性花岗岩石粉的表面形貌如图 1 所示。由图 1 可知,改性过程中硬脂酸粘附在粉末粒子表面,使改性花岗岩石粉的表面呈现粗糙结构。通过 SEM 图像测得颗粒的粒径分布如图 2 所示,发现改性花岗岩石粉的平均粒径要比普通的花岗岩石粉小得多。由于强磁搅拌作用,花岗岩石粉颗粒之

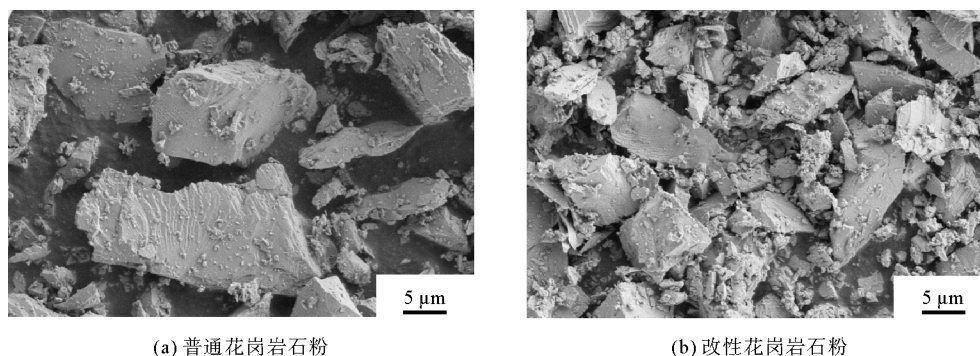


图 1 样品 SEM 图

Fig. 1 SEM image of samples

间相互碰撞摩擦,导致石粉的粒径逐渐变小。而粒径较小的超疏水花岗岩石粉不仅填充了砂浆内部的空隙,也为砂浆表面提供了粗糙度条件。

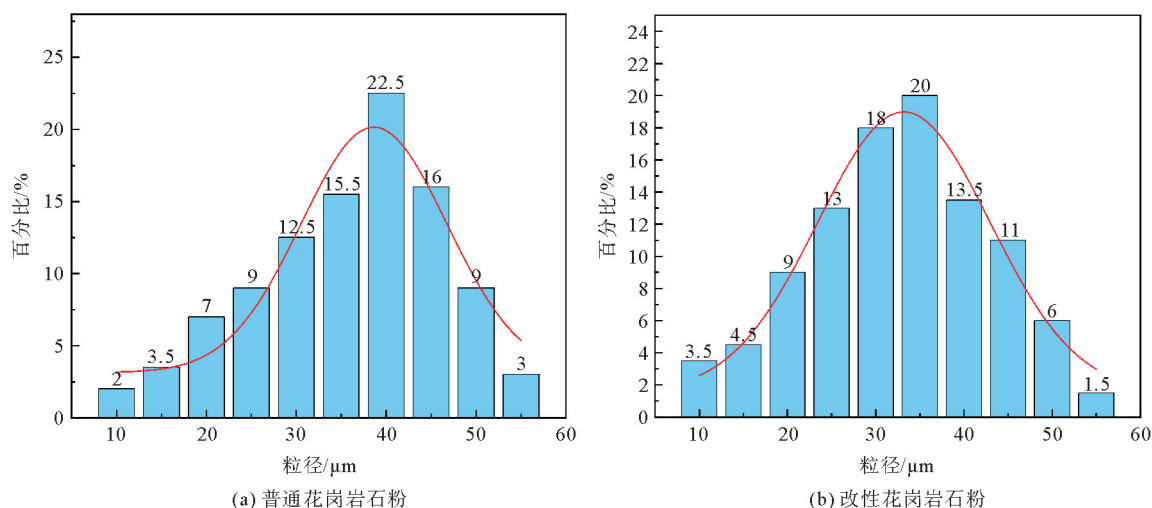


图2 样品粒径分布图

Fig. 2 Grain size distribution of samples

由图3可知,改性前后的花岗岩石粉所含的元素种类未发生明显变化,表明改性过程中并未引入新的化学元素。但通过对比可知,改性花岗岩石粉中C和O元素的含量较普通花岗岩石粉明显增加。由于硬脂酸分子中富含C和O元素,因而结果证明花岗岩石粉已经被硬脂酸成功改性。

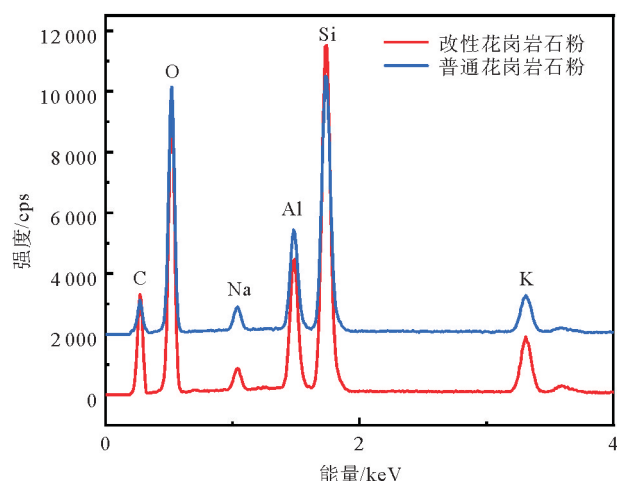


图3 样品EDS能谱图

Fig. 3 EDS spectra of samples

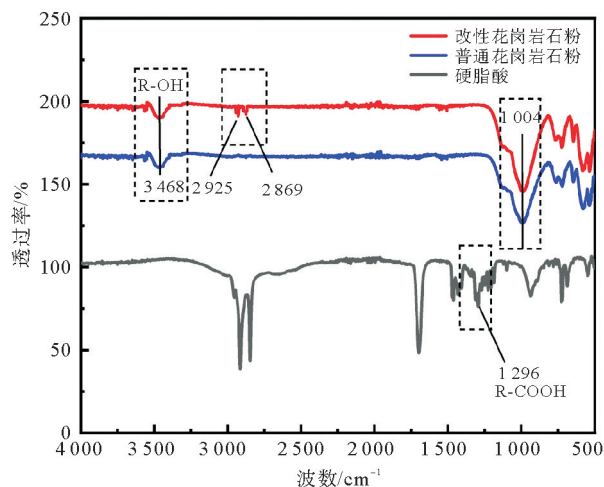


图4 样品的FTIR光谱

Fig. 4 FTIR spectra of samples

采用FTIR分析改性前后的花岗岩石粉的主要官能团组成,进一步研究硬脂酸改性对花岗岩石粉化学成分的影响。FTIR试验采用溴化钾压片法,即将干燥的样品(约1 mg)与干燥的KBr(约200 mg)在玛瑙研钵中研磨至少1 min,充分研细并混和均匀后压片,试验测试范围设定在 $4000\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 。由图4所示,改性花岗岩石粉和花岗岩石粉的FTIR光谱相似。 1004 cm^{-1} 附近是Si—O—Si对称伸缩振动引起的,表明花岗岩石粉中有大量石英的存在。与普通花岗岩石粉相比,改性花岗岩石粉的光谱在2869和2925 cm^{-1} 附近出现两个峰,这主要归因于 $-\text{CH}_3$ 和 $-\text{CH}_2$ 的非对称伸缩振动。在1296 cm^{-1} 处观察到的吸收峰是由硬脂酸中羧基($-\text{COOH}$)的伸缩振动形成的。普通花岗岩石粉和改性花岗岩石粉在3468 cm^{-1} 处都存

在羟基($-OH$)的伸缩振动吸收峰,而羟基($-OH$)是花岗岩石粉与硬脂酸发生酯化反应的前提条件,花岗岩石粉中的羟基($-OH$)与硬脂酸的羧基($-COOH$)发生酯化反应,硬脂酸得以成功接枝到花岗岩石粉上^[18],降低了花岗岩石粉的表面能。另外,通过对改性花岗岩石粉化学成分的分析,发现利用硬脂酸制备的花岗岩石粉中不存在含氟的有害物质。因此,利用无氟无污染的硬脂酸改性超疏水花岗岩石粉有望在废物利用等方面得到广泛应用。

2.2 润湿性分析

光学接触角测量试验中采用 $5\ \mu\text{L}$ 的水滴进行滴定测量,取同一样品的三个不同位置的水接触角平均值作为研究改性前后花岗岩石粉润湿性的最终结果。图 5 为改性前后花岗岩石粉的润湿情况。当水滴在普通花岗岩石粉上时,水会完全渗入石粉中,表现出很强的亲水性;当水滴到改性花岗岩石粉上时,水珠呈球形竖立在改性花岗岩石粉表面。试验结果表明,经硬脂酸改性后,花岗岩石粉表面自由能小于水滴的表面自由能,表面形成的较高表面张力使得水滴能够稳定地站立而不易被吸收。从而证明硬脂酸的改性实现了花岗岩石粉由亲水性向疏水性的转变。

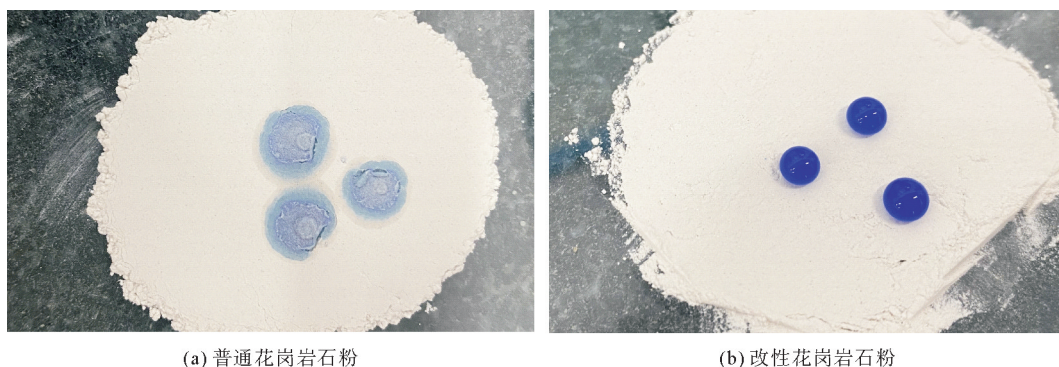


图 5 样品润湿情况

Fig. 5 Wetting condition of samples

按照 1.2 节试验设计方案开展不同硬脂酸用量对花岗岩石粉改性后的水接触角试验,分析不同硬脂酸用量对花岗岩石粉润湿性影响,如图 6 所示。结果表明,改性花岗岩石粉的水接触角随着硬脂酸含量的增加呈现先上升后下降的趋势,而水滚动角则呈现先下降后上升的趋势。当硬脂酸与花岗岩石粉质量比为 1% 时,接触角为 135° ;当硬脂酸与花岗岩石粉质量比为 2% 时,接触角为 142° ;当硬脂酸与花岗岩石粉质量比为 3% 时,接触角达到最大值 151° ,滚动角达到最小值 6° ,此时花岗岩石粉达到超疏水状态。然而,当硬脂酸与花岗岩石粉质量比超过 3% 时,水接触角减小,此时花岗岩石粉疏水效果变差。在花岗岩石粉改性过程中,一方面,硬脂酸分子中的羧基($-COOH$)与花岗岩石粉表面的羟基($-OH$)能够发生化学键合;另一方面,由于长链烃基的相互缠绕,使花岗岩石粉表面被硬脂酸单分子层包覆,达到花岗岩石粉表面的有机化,从而在石粉表面形成一层疏水的有机膜。使得粉末的疏水性增强,但当硬脂酸添加量过高时,硬脂酸在花岗岩石粉表面过度聚集、分散性变差,从而影响硬脂酸

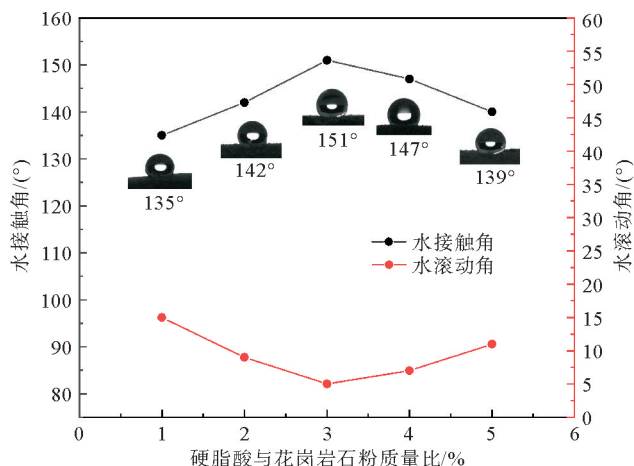


图 6 不同硬脂酸用量对花岗岩石粉润湿性影响

Fig. 6 Effect of different stearic acid dosage on wettability of granite powder

对花岗岩石粉的疏水改性作用^[19]。

选用疏水效果最优的改性花岗岩石粉分别代替0%、5%、10%、15%、20%的细骨料制作疏水砂浆,探究超疏水花岗岩石粉的替代量对水泥砂浆润湿性能的影响。各砂浆的水接触角如图7所示。随着超疏水花岗岩石粉替代量的增加,砂浆表面接触角逐渐增大。当超疏水花岗岩石粉替代量小于10%时,砂浆无法达到疏水状态,且当水滴与普通砂浆接触后,迅速渗透到砂浆中,水接触角接近6°,表明普通砂浆具有超亲水性。当超疏水花岗岩石粉替代量超过10%时,砂浆表面接触角均大于90°,且替代量为20%时,砂浆的水接触角达到126°。试验结果表明,随着超疏水花岗岩石粉替代量的增加,砂浆的疏水性逐渐提高。由于超疏水花岗岩石粉作为硬脂酸的载体均匀地分散到砂浆中,赋予砂浆 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 疏水性基团,随着替代量的增加,砂浆中引入更多 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 疏水基团增强表面对水的排斥力。因此,超疏水花岗岩石粉的掺入使得砂浆的表面能降低,在砂浆表面形成一层疏水屏障。

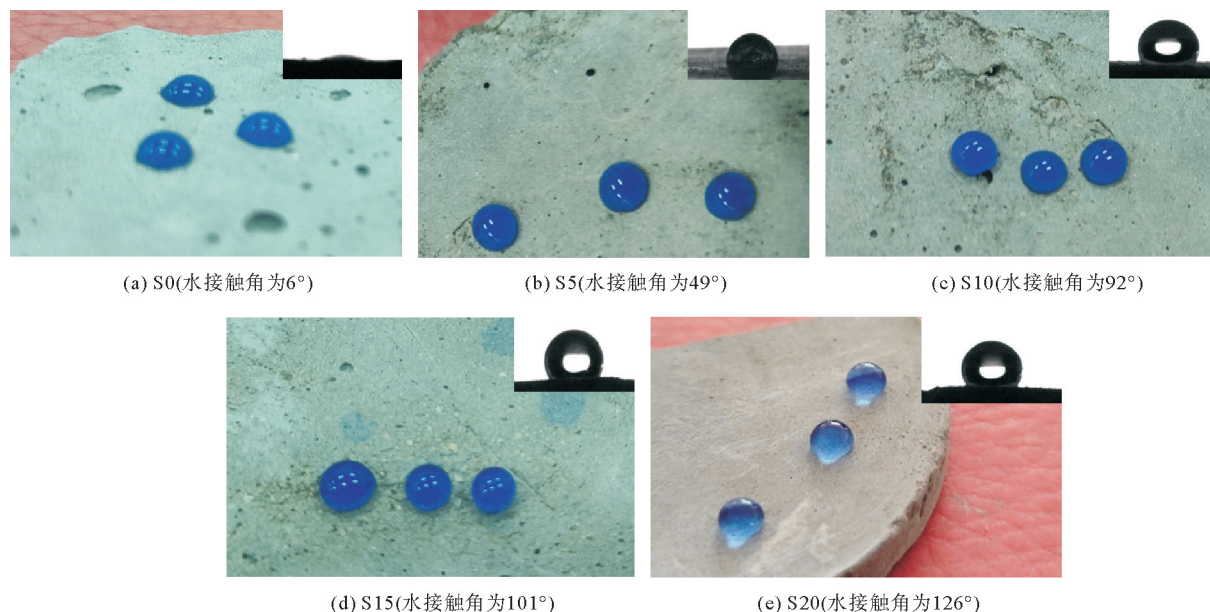


图7 不同配比砂浆水接触角

Fig. 7 Water contact angle of mortar with different proportions

2.3 吸水率分析

图8为不同超疏水花岗岩石粉替代量的砂浆试件的累计吸水率的变化规律,所有试件的吸水率曲线呈现出相似的变化趋势。试件吸水过程可分为两个阶段:快速提升阶段和稳定阶段。在试验初期6 h内,所有试件的吸水率都急剧上升,6~54 h所有试件的吸水率的增长速度较前6 h有所放缓,但吸水率的增加速度依旧较快,直至54 h后吸水率曲线趋于稳定;54~102 h,吸水率增加缓慢,基本保持不变。

由图8可知,样品S0在102 h的吸水率高达4.15%,而试件S5、S10、S15、S20的吸水率分别为3.5%、3.11%、2.80%、2.48%。相比普通砂浆试件,添加超疏水花岗岩石粉的砂浆试件吸水率均有所降低,且当超疏水花岗岩石粉替代量达到20%时,疏水砂浆的吸水率比普通砂浆降低40.24%。吸水率试验结果与上述砂浆表面润湿性分析结果一致,砂浆的疏水性随着超疏水花岗岩石粉替代量的增加而提高。综上所述,适量超疏水花岗岩石粉的加入可以降低砂浆的润湿性,建立砂浆内部疏水性,优化砂浆的孔隙结构,增强砂浆的防水渗透能力。

2.4 抗压和抗折强度分析

砂浆的力学强度是关系到其能否用于建筑结构的重要指标。本试验对不同超疏水花岗岩石粉替代量的砂浆试件进行28 d的抗压及抗折强度分析,结果如图9所示。随着超疏水花岗岩石粉替代量的增加,砂浆的抗压和抗折强度均呈先上升后下降的趋势,且在超疏水花岗岩石粉替代量为15%时达到最大值,并且砂浆的抗压强

度和抗折强度分别比普通砂浆高 17% 和 19.1%。当超疏水花岗岩石粉替代量为 20% 时,砂浆强度虽有所下降,但抗压强度和抗折强度仍能比普通砂浆的强度高 9.7% 和 11.5%。

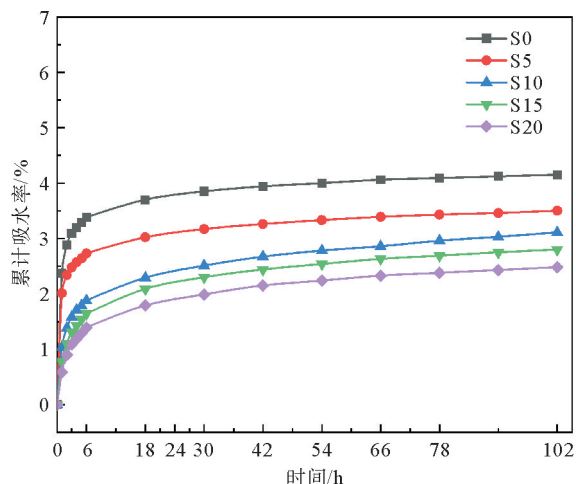


图 8 砂浆试件累计吸水率变化图

Fig. 8 Change of cumulative water absorption rate of mortar specimen

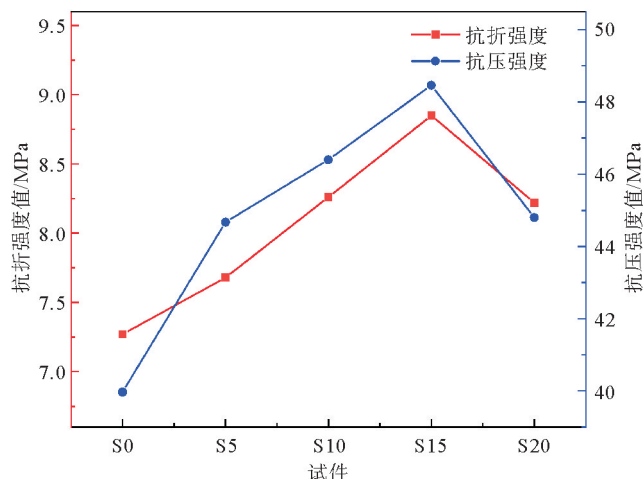


图 9 砂浆试件的抗压抗折强度

Fig. 9 Compressive and flexural strength of mortar specimen

试验结果表明,适量的超疏水花岗岩石粉替代砂浆细骨料能促进水泥水化,粒径细小的超疏水花岗岩石粉颗粒可以填充砂浆内部,改善砂浆的孔隙结构,从而提高砂浆的强度。但当砂浆中超疏水花岗岩石粉替代量大于 15% 时,过量的超疏水花岗岩石粉表面的疏水屏障阻碍了水泥水化,对砂浆的强度产生了不利影响,导致砂浆力学强度降低。

3 结论

1) 相比于传统含氟改性剂,本研究提出使用无氟无污染的硬脂酸对花岗岩石粉进行改性,成功研制了超疏水花岗岩石粉。通过分析不同硬脂酸含量对花岗岩石粉疏水性的影响规律,发现当硬脂酸质量为花岗岩石粉质量的 3% 时,改性花岗岩石粉的水接触角可达到 151° ,水滚动角达到 6° ,表现出良好的疏水性。

2) 将所研制的超疏水花岗岩石粉替代砂浆中的细骨料,制备了具有良好疏水性的花岗岩石粉砂浆。疏水花岗岩石粉砂浆的疏水性明显优于普通砂浆,并且随着超疏水花岗岩石粉替代量的增加,砂浆的水接触角逐渐增大,吸水率逐渐降低。

3) 适量的超疏水花岗岩石粉的掺入可促进水泥水化,并且细小的超疏水花岗岩石粉颗粒可以填充砂浆,改善砂浆的孔隙结构,从而提高了普通砂浆的力学强度。当砂浆的抗压抗折强度在技术要求范围内时,可以通过掺入 20% 的超疏水花岗岩石粉替代细骨料来提高砂浆的疏水性以及耐久性,但如果同时考虑砂浆的疏水性以及力学强度时,掺入 15% 的超疏水花岗岩石粉替代细骨料是最优选择。

参考文献:

- [1] JAIN L K, SANCHETI G, GUPTA K L. Durability performance of waste granite and glass powder added concrete[J/OL]. Construction and Building Materials, 2020, 252. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119075.
- [2] 周翔翔,张云升,钱如胜,等.花岗岩石粉对机制砂混凝土基本性能及气体渗透特性的影响[J].复合材料学报,2024,41(7):3704-3715.
ZHOU Aoxiang, ZHANG Yunsheng, QIAN Rusheng, et al. Influence of granite stone powder on the basic properties and gas permeability characteristics of mechanism sand concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(7):3704-3715.
- [3] 张凌强,陈倩,黄兴,等.石粉含量对 C50 花岗岩机制砂混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(7):2154-2158.

- ZHANG Lingqiang, CHEN Qian, HUANG Xing, et al. Influence of stone powder content on performance of C50 granite manufactured sand concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(7): 2154-2158.
- [4] SHAMSABADI A E, GHALEHNOVI M, BRITO D J, et al. Performance of concrete with waste granite powder: The effect of superplasticizers[J/OL]. Applied Sciences, 2018, 8(10). DOI: 10.3390/app8101808.
- [5] NAKAYENGA J, OMAKI N, HATA T. Effect of granite powder on the strength, durability and sustainability of soil treated using steel slag or cement[J/OL]. Construction and Building Materials, 2024, 451. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138793.
- [6] 申屠存, 郑广远, 谭幸森, 等. 花岗岩废石粉对砂浆强度及耐久性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(11): 4150-4158.
- SHEN Tucun, ZHENG Guangyuan, TAN Xingmiao, et al. Effect of granite waste powder on strength and durability of mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(11): 4150-4158.
- [7] 乔智威, 刘壮, 张宪堂, 等. 水沙流作用下粗糙度对圆柱体结构受力特性及冲蚀的影响[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 44-49.
- QIAO Zhiwei, LIU Zhuang, ZHANG Xiantang, et al. Effect of roughness on the force and erosion of cylindrical structures under water-sand two phase flow[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(3): 44-49.
- [8] QIN Q L, MENG Q S, GAN M G, et al. Deterioration mechanism of coral reef sand concrete under scouring and abrasion environment and its performance modulation[J/OL]. Construction and Building Materials, 2023, 408. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133607.
- [9] 来晓鹏, 王元战, 王禹迟, 等. TA/SiO₂ 疏水涂层及其对混凝土抗侵蚀性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(1): 30-36.
- LAI Xiaopeng, WANG Yuanzhan, WANG Yuchi, et al. TA/SiO₂ hydrophobic coating and its effect on corrosion resistance of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(1): 30-36.
- [10] 张非凡, 裴万胜, 张熙胤, 等. 超疏水涂层的制备及在寒区混凝土中的应用研究综述[J]. 材料导报, 2023, 37(增2): 196-207.
- ZHANG Feifan, PEI Wansheng, ZHANG Xiyin, et al. A review on the preparation and application of superhydrophobic coatings to concrete in cold regions[J]. Materials Reports, 2023, 37(S2): 196-207.
- [11] WANG N, WANG Q, XU S S, et al. Green fabrication of mechanically stable superhydrophobic concrete with anti-corrosion property[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127836.
- [12] XU S S, WANG Q, WANG N, et al. Fabrication of superhydrophobic green surfaces with good self-cleaning, chemical stability and anti-corrosion properties[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(19): 13006-13016.
- [13] WANG N, WANG Q, XU S S. A review on applications of superhydrophobic materials in civil engineering[J/OL]. Advanced Engineering Materials, 2021, 24(6). DOI: 10.1002/adem.202101238.
- [14] SHEN L, JIANG H, WANG T, et al. Performance of silane-based surface treatments for protecting degraded historic concrete[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 129: 209-216.
- [15] WANG N, WANG Q, XU S S, et al. Fabrication of multifunctional amphiphobic surfaces on copper substrates[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 577: 509-516.
- [16] WANG N, WANG Q, XU S S, et al. Fabrication of hierarchical structures on concrete surfaces with superhydrophobicity using replicated micro-nano dendritic structures[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 103: 314-321.
- [17] 朱春琪, 田稳苓, 姜磊, 等. 玄武岩纤维增强水泥长期力学性能试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(4): 49-55.
- ZHU Chunqi, TIAN Wenling, JIANG Lei, et al. Experimental study on long-term mechanical properties of basalt fiber reinforced cement[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(4): 49-55.
- [18] SONG W H, WANG Q, QU L, et al. Study of water absorption and corrosion resistance of the mortar with waste marble powder[J/OL]. Construction and Building Materials, 2022, 345. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128235.
- [19] YANG L, PANG Y Y, CHEN X H, et al. Effect of the stearic acid modified metakaolin on sulfate resistance of mortar based on the experimental study and capillary theory analysis[J/OL]. Journal of Building Engineering, 2023, 71. DOI: 10.1016/j.job.2023.106513.