

稻壳灰粒径对水泥砂浆的碱硅酸反应风险影响

刘文丰^{1,2,3}, 李碧雄^{1,2}, 王熠泽^{1,2}, 汪知文^{1,2}, 陈 权¹, 高攀越¹

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065;
3. 华西绿舍建材有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 固废资源化是实现可持续发展的重要内容。稻壳灰的火山灰活性高, 有望作为辅助性胶凝材料用于水泥砂浆或混凝土, 但其中 K_2O 和 Na_2O 含量较大, 需探明不同粒径稻壳灰的掺入可能带来的碱硅酸反应风险。现有研究表明, 粉煤灰的火山灰活性能抑制碱硅酸反应, 已得到广泛应用。对比起见, 设置了基准组、掺 4 种粒径粉煤灰组和稻壳灰组, 在分别测试其抗压、抗折强度的基础上, 测试膨胀率, 通过 SEM 和 EDS 测试了掺粒径为 $5\ \mu m$ 的稻壳灰试件和未掺稻壳灰试件的微观形貌和元素组成。试验结果表明: 稻壳灰或粉煤灰的掺入均可以提高砂浆的力学性能, 稻壳灰粒径越小提高的程度越大, 中值粒径为 $5\ \mu m$ 的稻壳灰可以使砂浆 28 d 抗压强度提高 50.6%, 抗压强度提高 64.7%, 效果均好于粉煤灰; 稻壳灰的粒径不超 $15\ \mu m$ 时, 对砂浆的膨胀率可起到显著的抑制作用, 且抑制效果优于粉煤灰, $5\ \mu m$ 的稻壳灰能使 14 d 膨胀率减小 90%, 并使骨料表现为无害, 而 $8\sim 20\ \mu m$ 粉煤灰均仅减小 60% 左右的 14 d 膨胀率, 骨料仍表现为有害; 稻壳灰的火山灰活性不仅能生成低 Ca/Si 比的 C-S-H 凝胶, 降低碱含量, 还能使砂浆致密性提高, 抑制碱离子和水的渗透, 从而表现为对碱硅酸反应的抑制效果。

关键词: 碱硅酸反应; 稻壳灰; 粒径; 粉煤灰; 微观分析

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0030-08

Effect of rice husk ash particle size on alkali silica reaction risk of cement mortar

LIU Wenfeng^{1,2,3}, LI Bixiong^{1,2}, WANG Yize^{1,2}, WANG Zhiwen^{1,2}, CHEN Quan¹, GAO Panyue¹

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Key Laboratory of Deep Earth Science and Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610065, China;

3. Huashi Green Homeland Building Materials Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: Solid waste recycling is an important part of achieving sustainable development. Rice husk ash has high pozzolanic activity and is expected to be used as an auxiliary cementitious material for cement mortar or concrete. However, the content of K_2O and Na_2O in RHA is high, so it is necessary to find out the risk of alkali silica reaction that may be caused by the mixing of RHA with different particle sizes. The existing research shows that the pozzolanic activity of fly ash inhibits alkali silica reaction and has been widely used. For comparison, a benchmark group, a group with 4 different particle sizes of fly ash, and a group with rice husk ash are set up. On the basis of testing the compressive strength and flexural strength respectively, the expansion rate is tested, and the microstructure and elemental composition of the rice husk ash specimens with a particle size of $5\ \mu m$ and the specimens without rice husk ash are tested by SEM and EDS. The test results show that the mechanical properties of mortar can be improved by adding rice husk ash or fly ash. The smaller the particle size of rice husk ash, the greater the degree of improvement. The RHA with a median particle size of $5\ \mu m$ can increase the 28 d compressive strength of mortar by 50.6% and 64.7%, both of which are better than fly ash. When the particle size of RHA is not more than $15\ \mu m$, it can significantly inhibit the expansion rate of mortar, and the inhibition effect is better than that of fly ash. $5\ \mu m$ rice husk ash can reduce the 14 d expansion rate by 90%, and make the aggregate harmless, while $8\sim 20\ \mu m$ fly ash only reduces the 14 d expansion rate by 60%, and the aggregate is still harmful. The pozzolastic activity of RHA can not only generate C-S-H gel with low Ca/Si ratio and reduce alkali content, but

收稿日期: 2022-09-21

修回日期: 2023-02-03

基金项目: 四川省重点研发计划项目(2023YFQ0047)

第一作者: 刘文丰(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为混凝土固废材料。E-mail: 452503441@qq.com

通信作者: 李碧雄(1970—), 女, 博士, 博导, 主要从事固废建材资源化、工程结构物理脆弱性研究等。E-mail: libix@126.com

also improve the compactness of mortar and inhibit the penetration of alkali ions and water, thus showing an inhibitory effect on alkali silicate reaction.

Key words: alkali silica reaction; rice husk ash; particle size; fly ash; micro analysis

水泥砂浆是一种应用最为广泛的土木工程建设材料。近年来,硅灰、矿粉、粉煤灰等矿物掺合料已被大量消耗而变得供给紧张^[1],并且建筑原材料市场充斥各种来源不明、质量无法保证的矿物掺合料,严重威胁着工程质量。因此,寻找新型优质矿物掺和料是解决上述问题的重要途径之一。稻壳作为一种农作物加工的副产品,产量大,且价格低。我国稻壳年产量约为4 000万t,占世界总产量的30%^[2]。将其煅烧后得到的稻壳灰含有大量的无定形SiO₂,含量可高达90%^[3],活性氧化物SAF(SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃)含量约为65%~97%^[4],具有很高的火山灰活性,何凌侠^[5]测得稻壳灰活性指数高达104%,可比肩硅灰。将其作为辅助性胶凝材料掺入水泥砂浆中,一方面,可起到良好的增强改性作用,有效提升强度和耐久性能;另一方面,可减少水泥的用量,达到节能减排的效果,符合国家双碳战略和绿色发展的要求。可见,将稻壳灰作为辅助性胶凝材料用于水泥砂浆具有极大的潜力。

稻壳灰的化学组成及理化性质与其灼烧加工工艺有关,通常含有一定量的K₂O和Na₂O,K₂O含量甚至可高达到4.5%左右^[4]。相关标准^[6]对水泥碱含量的要求是(Na₂O+0.658K₂O)不高于0.6%,稻壳灰的碱含量通常已超过该标准,故有必要关注稻壳灰掺入对碱硅酸反应的影响。碱硅酸反应是来自水泥、外加剂、掺合料、骨料、拌合水等组分及周围环境中的碱与骨料中的活性SiO₂成分反应产生碱硅酸盐凝胶,凝胶固体体积大于反应前的体积,并有强烈的吸水性,吸水后膨胀引起混凝土内部膨胀应力,进而导致混凝土开裂,严重的会使混凝土结构崩溃^[7]。据估计,在全球范围内碱硅酸反应每年造成的经济损失数以亿美元计,已成为严重影响混凝土性能的问题之一。因此,评估掺稻壳灰水泥砂浆硅酸反应是推广稻壳灰应用的必要基础^[8]。

稻壳灰对碱硅酸反应的影响主要有两个方面。一是稻壳灰所含有的碱和活性SiO₂,作为碱硅酸反应的反应物,会促进碱硅酸反应的发生;二是稻壳灰的高火山灰活性,能够抑制碱硅酸反应。因此,稻壳灰对碱硅酸反应的影响究竟如何,需

要深入研究。目前,国内正缺乏对掺稻壳灰水泥砂浆碱硅酸反应的关注,国外已有少量研究,但结论不尽统一。文献[9-11]仅研究了稻壳灰掺量对碱硅酸反应的影响,缺乏对不同粒径影响的研究。文献[12]发现掺入粒径大于7.7 μm的稻壳灰会使水泥砂浆产生碱硅酸破坏,而文献[13]则认为即使粒径达到44 μm的稻壳灰也能抑制碱硅酸反应。文献[14-15]认为粒径为4~6 μm的稻壳灰能够抑制碱硅酸反应,而文献[16]则认为,即使稻壳灰的粒径再小,也会发生团聚现象,从而增加碱硅酸反应风险。综上所述,在目前已有的研究中,对于稻壳灰粒径对碱硅酸反应的影响情况的结论,存在分歧。另一方面,粉煤灰作为辅助性胶凝材料能有效抑制碱硅酸反应^[17],且现已被广泛应用。

为探明不同粒径稻壳灰对砂浆碱硅酸反应的影响,以粉煤灰作为对照组,在测试砂浆力学性能的基础上,采用快速砂浆棒法对比研究不同粒径稻壳灰和粉煤灰的碱硅酸反应风险,并采用SEM和EDS技术,研究稻壳灰对水泥砂浆的水化和微观形貌的影响,以此分析对碱硅酸反应的影响机理,为稻壳灰的推广应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试验材料

水泥采用都江堰拉法基水泥有限公司生产的P·C42.5R复合硅酸盐水泥,中值粒径为15 μm;稻壳灰是由原状稻壳经马弗炉先300℃灼烧后600℃灼烧获得,再通过WZW型球磨机球磨不同时间达到相应粒径,其灼烧后的形貌如图1所示;粉煤灰采用四川济鹏建材有限公司生产的F类Ⅰ级粉煤灰,通过WZW型球磨机球磨不同时间至相应粒径,为保证球磨时间和粒径的关系一致,稻壳灰和粉煤灰的球磨质量均为每次1 kg,转速保持60 r/min不变;细集料为最大粒径不超过1.18 mm的河砂,平均粒径经测定为369.9 μm;减水剂为伟合科技生产公司提供的聚羧酸高性能减水剂,减水率大于20%。各胶凝材料的化学组成成分如表1所示,河砂的化学成分如表2所示,稻壳灰和粉煤灰的研磨时间和粒径如表3和表4所示。水为实验室自来水。

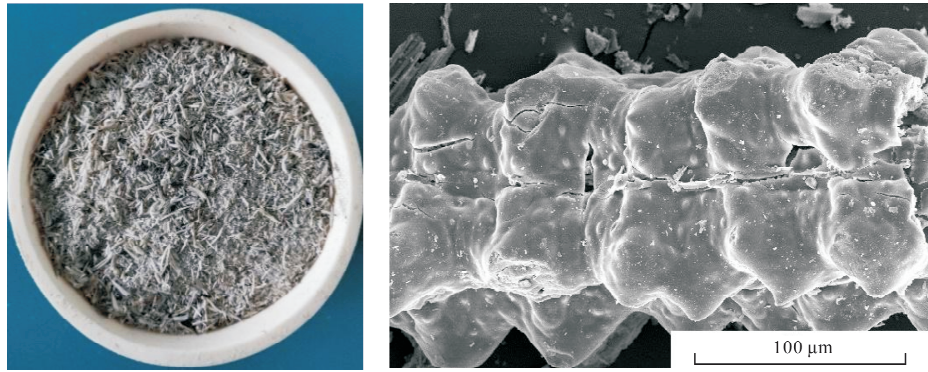


图 1 灼烧后的稻壳灰形貌

Fig. 1 Morphology of rice husk ash after burning

表 1 胶凝材料化学组成(%)

Tab. 1 Chemical composition of cementitious materials/%

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
水泥	17.78	2.49	2.5	63.67	3.09	4.77
稻壳灰	91.09	0.26	0.11	0.83	0.43	0.53
粉煤灰	48.28	24.56	5.01	9.88	0.98	0.41

表 2 河砂的化学组成(%)

Tab. 2 Chemical composition of river sand/%

材料	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MnO
河砂	69.85	3.92	3.61	13.55	0.783	1.58	0.031	1.822	0.079

表 3 稻壳灰研磨时间与对应粒径和比表面积

Tab. 3 Particle size and specific surface area corresponding to grinding time of rice husk ash

研磨时间/min	中值粒径大小/μm	比表面积/m ² ·kg ⁻¹
0	55.2	282.74
15	15.8	1 042.76
40	10.5	1 490.07
180	5.5	2 466.77

表 4 粉煤灰研磨时间与对应粒径和比表面积

Tab. 4 Particle size and specific surface area of fly ash corresponding to grinding time

研磨时间/min	粒径大小/μm	比表面积/m ² ·kg ⁻¹
0	20.8	742.42
25	14.8	1 090.00
90	11.6	1 400.78
180	8.3	1 914.16

1.2 试验方法

1.2.1 抗压抗折测试

水泥砂浆的抗压、抗折强度试验方法依照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)实施, 每组 3 个试件, 试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 养护方式为常温养护, 力学性能通过万能试验机搭配相对应的模具进行试验。

加载形式为位移控制, 抗折强度加载速度为 0.4 mm/s, 抗压强度加载速度为 0.8 mm/s。

1.2.2 碱骨料膨胀率试验

水泥砂浆的碱骨料膨胀率试验方式按照欧标《ASTMC1260—14》进行, 采用仪器为 JKS 型碱骨料试验箱, 如图 2 所示。将搅拌好的砂浆倒入尺寸为 25 mm×25 mm×280 mm 的钢模具当中, 在振捣台上振捣 60 s 之后, 先置于 80 ℃ 恒温水槽中水浴 24 h, 再浸入 1 mol/L 的 NaOH 溶液在 80 ℃ 恒温条件下养护, 并测试每组 3 个试件相应龄期的膨胀率。膨胀率通过图 3 所示比长仪进行测量, 并使用千分表进行读数, 千分表安装前需调至零点, 试件的铜测头与千分表接触后读数, 需注意另一端的铜测头要置入凹槽中, 整个装置需要保持平整。试件在拆模后进行第一次测量。之后每隔 3、7 和 14 d 测量一次。千分表如图 3 所示。膨胀率计算公式如下。

$$E_x = \frac{L_x - L_1}{250} \times 100$$

式中: L_x 为相应龄期读数; L_1 为初始值。根据标准: 当 14 d 膨胀率小于 0.1%, 骨料无害; 膨胀率大于 0.2%, 具有潜在有害碱活性; 膨胀率在

0.1%和 0.2%之间为可疑骨料.



图 2 JKS 型碱骨料试验箱
Fig. 2 JKS type alkali aggregate test chamber

1. 2. 3 微观测试

分别制取掺稻壳灰和未掺稻壳灰水泥砂浆试件, 稻壳灰粒径为 5 μm . 常温养护 28 d 后, 通过对微观形貌和元素组成的观测辨别砂浆的水化程度和产物, 并从水化角度来评价稻壳灰对力学性能和碱硅酸反应的影响. 通过 SEM 和 EDS 对稻壳灰水泥砂浆试件进行微观形貌和元素组成检测. 采用仪器为双束超高分辨场发射扫描电镜(FIB-SEM), 并配有配套的能谱仪(EDS).



图 3 比长仪和千分表
Fig. 3 Comparator and dial indicator

1. 3 试验配合比

试验分为水泥砂浆碱骨料试验和微观分析试验, 碱骨料试验配合比如表 5 所示. 组别中 FA 代表粉煤灰, RHA 代表稻壳灰, 数字代表粉煤灰或稻壳灰的粒径微米数, 如 FA-20 代表掺入粒径为 20 μm 的粉煤灰. 减水剂用量均为胶凝材料的 1%. 稻壳灰和粉煤灰掺量均为胶凝材料总量的 20%. 微观试验配合比如表 6 所示, 稻壳灰粒径为 5 μm . 微观试验主要分析稻壳灰的掺入对水化产物和微观形貌两个方面的影响, 并以此说明稻壳灰对碱硅酸反应的影响机理. 因此, 微观试验试件不再用 NaOH 溶液浸泡, 仅常温养护且另用配

合比.

表 5 碱骨料试验配合比 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Tab. 5 Mix proportion of alkali aggregate test/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

组别	水泥	粉煤灰	稻壳灰	河砂	水	减水剂
JZ	300	0	0	675	141	3
FA-20	240	60	0	675	141	3
FA-15	240	60	0	675	141	3
FA-10	240	60	0	675	141	3
FA-8	240	60	0	675	141	3
RHA-55	240	0	60	675	141	3
RHA-15	240	0	60	675	141	3
RHA-10	240	0	60	675	141	3
RHA-5	240	0	60	675	141	3

表 6 微观分析试验配合比 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Tab. 6 Mix proportion of microanalysis test/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

组别	稻壳灰	水泥	河砂	水	减水剂
A0	0	450	1 350	225	4. 5
A1	45	405	1 350	225	4. 5

2 试验结果与分析

2. 1 抗折和抗压强度

采用稻壳灰或粉煤灰替代 20% 水泥制备的水泥砂浆的抗压强度如图 4 和图 5 所示.

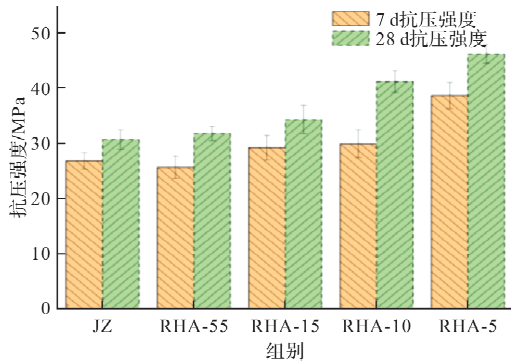


图 4 稻壳灰水泥砂浆抗压强度
Fig. 4 Compressive strength of RHA cement mortar

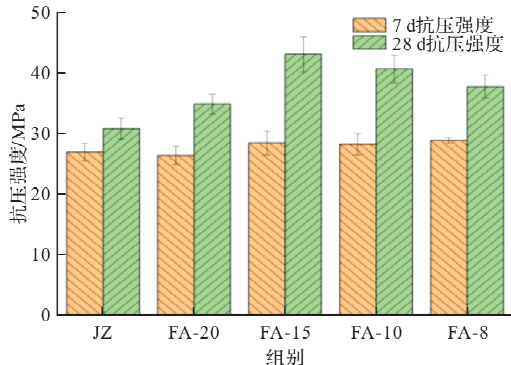


图 5 粉煤灰水泥砂浆抗压强度
Fig. 5 Compressive strength of FA cement mortar

由图4和图5可知,掺入稻壳灰和粉煤灰替代20%水泥对抗压强度有明显的提升效果.其中掺稻壳灰的水泥砂浆抗压强度随着稻壳灰粒径的减小逐渐提升,当稻壳灰粒径为 $5\mu\text{m}$ 时,28d抗压强度相比于JZ组能够提高50.6%.对于掺粉煤灰组试件,其抗压强度随着粉煤灰粒径的减小呈现出先增大后减小的变化趋势,粒径为 $15\mu\text{m}$ 的粉煤灰对于抗压强度的提升效果最好.当稻壳灰的粒径为 $55\mu\text{m}$,试件的7d抗压强度相较于基准组有所下降,28d抗压强度也没有明显的变化,是由于粗粒径的稻壳灰比表面积小,火山灰反应慢,其具有的吸水特性还会阻碍水泥的水化反应,延长凝结时间,从而对水泥砂浆的孔结构和强度产生不利影响^[18].各组水泥砂浆的抗折强度如图6和图7所示,从图中可以看出抗折强度变化趋势与抗压强度规律基本相同,稻壳灰的28d抗折强度与粒径的关系几乎呈线性相关,粒径为 $5\mu\text{m}$ 的稻壳灰可以使28d抗折强度提升64.7%.

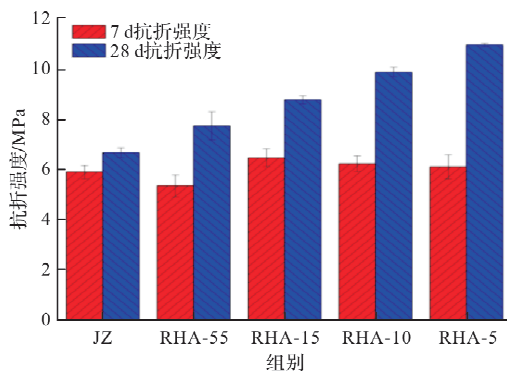


图6 稻壳灰水泥砂浆抗折强度

Fig. 6 Flexural strength of RHA cement mortar

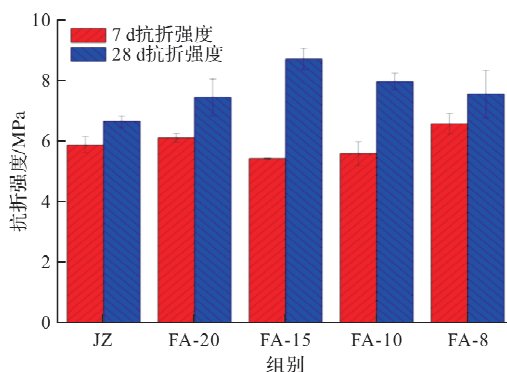


图7 粉煤灰水泥砂浆抗折强度

Fig. 7 Flexural strength of FA cement mortar

对比稻壳灰和粉煤灰对抗压、抗折强度的提升效果,当稻壳灰粒径为 $5\mu\text{m}$ 时,掺入稻壳灰能使水泥砂浆的28d抗压强度和抗折强度达到46.2和11.2 MPa,分别大于掺 $15\mu\text{m}$ 粉煤灰水泥砂浆

的28d抗压强度和抗折强度42.9和6.5 MPa.

2.2 膨胀率及碱硅酸反应风险分析

掺粉煤灰和稻壳灰的水泥砂浆3、7、14d的膨胀率试验结果分别如图8、9所示.由图可知,JZ组的14d膨胀率为0.79%,而根据标准ASTM C1260,当膨胀率大于0.2%时,骨料就具有潜在有害碱活性,证明所掺河砂为活性骨料,给水泥砂浆带来一定的碱硅酸反应风险.

由图8可知,因河砂活性较大,粉煤灰组的14d膨胀率均大于0.2%,但其膨胀率明显低于基准组,14d时下降的幅度均达60%左右.可见,相较于水泥,粉煤灰对水泥砂浆的碱硅酸反应具有明显的抑制作用,文献[19-21]中的研究也得出了近似结论.此外需要指出的是,粉煤灰的粒径大小对粉煤灰抑制碱硅酸反应的效果影响甚微.

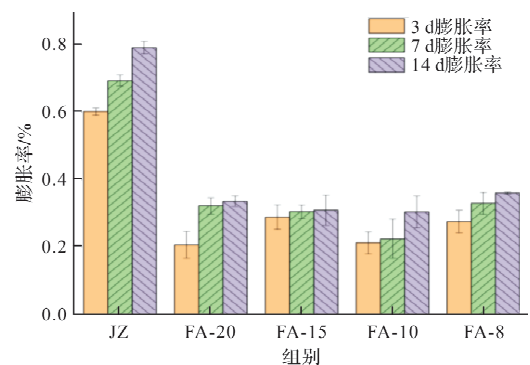


图8 粉煤灰水泥砂浆膨胀率

Fig. 8 Expansion rate of FA cement mortar

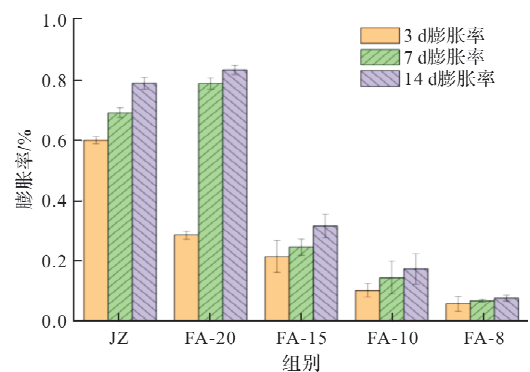


图9 稻壳灰水泥砂浆膨胀率图

Fig. 9 Expansion rate of RHA cement mortar

由图9可知,掺稻壳灰水泥砂浆的膨胀率随稻壳灰粒径的减小而逐渐减小.当稻壳灰的粒径小于 $15\mu\text{m}$ 时,对碱硅酸反应的抑制效果优于粉煤灰.尤其是粒径为10和 $5\mu\text{m}$ 的稻壳灰能够使水泥砂浆的14d膨胀率均低于0.2%,相比于基准组下降75%和90%,使河砂表现为无害骨料.可见

当稻壳灰的粒径小于 $10\ \mu\text{m}$, 其抑制碱硅酸反应的效果十分优异. 究其原因, 一方面是小粒径的稻壳灰比表面积较大, 因此其火山灰活性更高, 发生的火山灰反应更强, 有研究表明, 火山灰反应是稻壳灰能够抑制碱硅酸反应的主要原因^[15]. 另一方面是当稻壳灰的粒径足够小时, 能有效填充水泥砂浆内部孔隙, 从而提高水泥砂浆的抗渗性^[22]. 当水泥砂浆内部的渗透性降低, 可阻止碱硅酸反应所需水分的渗透, 从而起到抑制碱硅酸反应的效果^[23].

当稻壳灰粒径为 $55\ \mu\text{m}$ 时, 14 d 的膨胀率相较于基准组有明显上升. 此时由于稻壳灰粒径较大, 砂浆内部不仅发生了由活性骨料导致的碱硅酸反应, 还发生了由稻壳灰含有的活性 SiO_2 导致的碱硅酸反应. 一方面, 粒径大且粗糙的稻壳灰会增加砂浆内部空隙, 导致水分更易流动, 碱硅

酸反应增强, 从而产生膨胀^[15]; 另一方面, 稻壳灰本身所携带的活性 SiO_2 与孔溶液中的碱发生反应而膨胀开裂, Ha Thanh Le 等^[16]在研究中发现, 大粒径稻壳灰类似活性骨料, 提供了碱硅酸反应所需的活性 SiO_2 , 其反应机理如图 10 所示. 对于大粒径的稻壳灰, 其表面的活性 SiO_2 发生火山灰反应生成 C-S-H 凝胶将稻壳灰包裹住, 稻壳灰颗粒内部活性 SiO_2 无法与孔溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 接触; 另一方面, 孔溶液中稻壳灰带入的钠离子和钾离子因粒径远小于钙离子, 可透过 C-S-H 凝胶进入稻壳灰内部与活性 SiO_2 发生碱硅酸反应, 使稻壳灰颗粒膨胀破裂. 而对于粒径较小的稻壳灰, 因其比表面积大, 活性 SiO_2 与孔溶液接触充分, 火山灰反应较为彻底, 故 Na^+ 、 K^+ 不能再与活性 SiO_2 反应生成 ASR 凝胶.

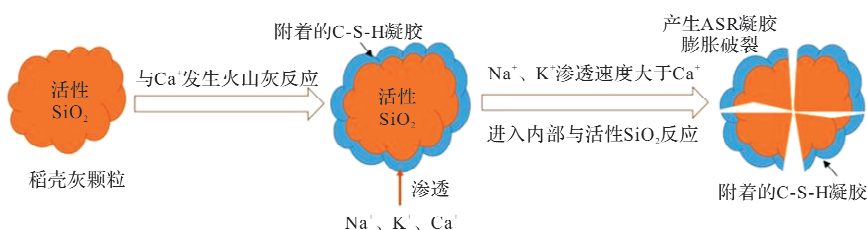


图 10 稻壳灰活性 SiO_2 膨胀原理

Fig. 10 Expansion principle of activated SiO_2 from RHA

2.3 碱硅酸反应的抑制机理

稻壳灰水泥砂浆界面过渡区微观形貌图如图 11 所示. 由图 11 可发现, 由于稻壳灰的火山灰反应在降低 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体数量的同时也会削弱其取向程度, 使 A1 组骨料与浆体界面过渡区相比于 A0 组更加密实, 这不仅会使强度得到显著提高, 还会提高水泥砂浆的致密性, 降低其渗透率, 从而抑制水和碱离子扩散^[24]. 水泥砂浆 28 d 的 EDS 图谱由图 12 和表 7 所示. 由图 12 可知, A1 组含有更多的针状物并且大量聚集, 该物质为钙矾石和针状 C-S-H 凝胶, 表明掺入稻壳灰后, 促进了二次水化反应, 生成了更多的 C-S-H. 由表 7 可知, A0 与 A1 组相比, 浆体微区中 Ca/Si 明显降低至 1.5 以下, 表明浆体中大量 Ca 元素参与反应被消耗, 即有大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 参与二次水化反应生成 C-S-H. 同时, Glasser 等^[25]基于表面电荷理论, 认为当 Ca/Si 值较低时, C-S-H 表面电荷就会为负, 由于负电荷的增加, 其吸附碱金属离子等阳离子的能力就会增强. 在 C-S-H 大量吸附碱金属离子后, 碱硅酸反应就会受到抑制.

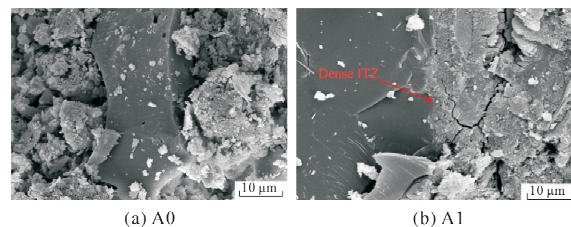


图 11 水泥砂浆 28 d 的 SEM 图

Fig. 11 SEM of cement mortar mixed with rice husk ash for 28 days

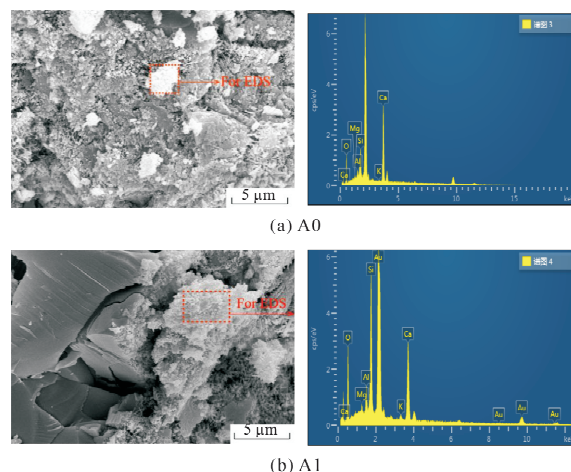


图 12 水泥砂浆 28 d 的 SEM-EDS 图

Fig. 12 SEM-EDS diagram of 28 d cement mortar

上述微观研究表明,稻壳灰作为一种高火山灰活性的辅助性胶凝材料,其对碱硅酸反应的影响机理主要有两点:

(1)使浆体和骨料界面过渡区致密性得到提高,水泥砂浆渗透率降低,使得水和碱金属的扩散受到影响,以此抑制碱硅酸反应及其胶凝的吸

水膨胀;

(2)生成低 Ca/Si 比的 C-S-H 凝胶,并与溶液中的碱结合,降低碱含量,抑制碱硅酸反应。

由于稻壳灰的粒径越小,火山灰反应程度和填充效应越大^[18],因此细粒径的稻壳灰在力提升学性能和抑制碱硅酸反应两方面均表现出更好的效果。

表 7 水泥砂浆 EDS 元素分析表 (%)

Tab. 7 EDS element analysis table of cement mortar/%

组别	元素	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ca/Si
A0	At%	58.14	1.01	2.02	5.60	0.34	32.90	5.88
A1		58.94	1.19	3.80	17.41	0.82	17.84	1.03

3 结论

本文为探究稻壳灰粒径对水泥砂浆的碱硅酸反应风险的影响,以粉煤灰作为对比,在测试抗折和抗压强度的基础上,通过快速砂浆棒法测试了试件膨胀率,并用 SEM 和 EDS 方法研究了稻壳灰对水泥砂浆的水化和微观形貌的影响,得出了以下结论:

(1)掺入稻壳灰或粉煤灰均能提高水泥砂浆的抗压及抗折强度,掺有稻壳灰的水泥砂浆试件的力学性能随稻壳灰粒径的减小而逐渐增大,当稻壳灰粒径为 5 μm 时,28 d 抗压强度和抗折强度能够分别提升 50.6%和 64.7%,效果均优于粉煤灰;

(2)稻壳灰和粉煤灰的掺入均能抑制碱硅酸反应,稻壳灰的粒径越小,对碱硅酸反应的抑制效果越显著,当稻壳灰的粒径小于 15 μm 时,效果优于粉煤灰.粒径为 5 μm 的稻壳灰能够降低 90%的 14 d 膨胀率,使膨胀率小于 0.1%,使得河砂从有害骨料表现为无害骨料;

(3)当稻壳灰粒径大于 55 μm 时,会增大碱硅酸反应风险.粒径较大的稻壳灰,会增加砂浆内部空隙,导致水分和碱更易流动,从而使碱硅酸反应增强.同时稻壳灰本身所携带的活性 SiO₂ 会使其作为活性骨料,与孔溶液中的碱发生碱硅酸反应;

(4)当稻壳灰粒径小于 15 μm 时,对碱硅酸反应有较强的抑制作用.原因是小粒径稻壳灰的火山灰反应作用不仅可以降低碱含量,还能改善水泥砂浆的界面结构,提升强度的同时使其渗透性降低,使得水和碱金属离子的扩散受到影响,以此抑制碱硅酸反应及其胶凝的吸水膨胀。

参考文献 References

[1] 胡艳香,任雪琪,涂佳辉,等. 锂渣和橡胶粉掺量对水泥砂浆力学性能影响研究[J]. 混凝土, 2022(6): 117-120,124.

HU Yanxiang, REN Xueqi, TU Jiahui, et al. Effect of lithium slag and rubber powder on mechanical properties of cement mortar[J]. Concrete, 2022(6): 117-120,124.

[2] 刘振正,谢春磊,王学营,等. 稻壳灰的制备及其对地聚物力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(12): 3881-3888.

LIU Zhenzheng, XIE Chunlei, WANG Xueyin, et al. Preparation of rice husk ash and its effect on mechanical properties of geopolymer[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(12):3881-3888.

[3] 王维红,景何仿,李新睿,等. 高性能混凝土热工性能及耐高温性能试验研究[J]. 混凝土, 2021(9): 94-97.

WANG Weihong, JING Hefang, LI Xinrui, et al. Experimental study on thermal performance and high temperature resistance performance of high performance concrete[J]. Concrete, 2021(9): 94-97.

[4] 汪知文,李碧雄. 稻壳灰应用于水泥混凝土的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9003-9011.

WANG Zhiwen, LI Bixiong. Research progress on application of rice husk ash in cement and concrete[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9003-9011.

[5] 何凌侠,尹健,田冬梅,等. 稻壳灰对活性粉末混凝土强度的影响[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2016, 38(2): 23-28.

HE Lingxia, YIN Jian, TIAN Dongmei, et al. Effect of rice husk ash on the strength of reactive powder concrete[J]. 2016, 38(2): 23-28.

[6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 通用硅酸盐水泥: GB175—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. General Portland Cement: GB175—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

[7] 龚青南,王德辉. 混凝土碱硅酸反应膨胀预测模型的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(12): 3891-3902.

- GONG Qingnan, WANG Dehui. Review of expansion prediction models for alkali-silica reaction of concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (12): 3891-3902.
- [8] 王威,刘连新,张毅. 青藏地区集料碱硅酸反应的研究分析[J]. 混凝土, 2019(6): 93-95.
WANG Wei, LIU Lianxin, ZHANG Yi. Analysis of the reaction study of aggregate alkali silicic acid in the Qinghai Tibet area[J]. Concrete, 2019(6): 93-95.
- [9] ABBAS S, KAZMI S, MUNIR M. Potential of rice husk ash for mitigating the alkali-silica reaction in mortar bars incorporating reactive aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2017, 132(Feb.1): 61-70.
- [10] RAMEZANIANPOUR A A, ZARRABI K, MAHDI-KHANI M. Mitigation of alkali aggregate reaction of concretes containing rice husk ash (RHA) [C]//13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete. Trondheim, Norway: Department Genie Civil, 2008.
- [11] Khan Kaffayatullah, Ullah Muhammad Fahad, Shahzada Khan, et al. Effective use of micro-silica extracted from rice husk ash for the production of high-performance and sustainable cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119589.
- [12] LE H T, SIEWERT K, LUDWIG H M. Alkali silica reaction in mortar formulated from self-compacting high performance concrete containing rice husk ash [J]. Construction and Building Materials, 2015, 88: 10-19.
- [13] Mohammad Badrul Ahsan, Zahid Hossain. Effect of particle size of rice husk ash (RHA) in mitigating alkali silica reaction (ASR) in concrete pavement[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11:861-866.
- [14] ZERBINO R, GIACCIO G, BATIC O R, et al. Alkali-silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 796-806.
- [15] NICOLE P H, PAULO J, CARASEK H. Effect of silica fume and rice husk ash on alkali-silica reaction [J]. Materials Journal, 2000, 97(4): 486-492.
- [16] LE H T, LUDWIG H M. Alkali silica reactivity of rice husk ash in cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2020, 243:118-145.
- [17] 丁建彤, 白银, 蔡跃波. 基于碱-硅反应抑制效果的粉煤灰品质评价指标[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(2): 239-243, 252.
- DING Jiantong, BAI Yin, CAI Yuebo. Evaluation of fly ash quality based on its effectiveness against alkali-silica reaction [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(2): 239-243, 252.
- [18] 马嘉琛, 黄鑫, 仵江涛, 等. 稻壳灰粒径对水泥砂浆性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(12): 3878-3883, 3904.
MA Jiashen, HUANG Xin, WU Jiangtao, et al. Effect of rice husk ash particle size on the properties of cement mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(12): 3878-3883, 3904.
- [19] 王威, 刘连新, 赵宣. 粉煤灰掺量对集料碱硅酸反应的试验研究[J]. 混凝土, 2019(3): 74-77.
WANG Wei, LIU Lianxin, ZHAO Xuan. Experimental study on inhibition of fly ash alkali aggregate reaction[J]. Concrete, 2019(3): 74-77.
- [20] 杨冬鹏. 粉煤灰对微膨胀碱活性骨料混凝土的影响[J]. 金属矿山, 2016(3): 180-184.
YANG Dongpeng. Effects of fly-ash on micro expansion concrete with alkali active aggregate[J]. Metal Mine, 2016(3): 180-184.
- [21] 胡明玉, 陈露璐, 郑江, 等. 粉煤灰和抛光渣抑制碱硅酸反应及其机理研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (4): 739-747.
HU Mingyu, CHEN Lulu, ZHENG Jiang, et al. Mechanism of fly ash and ceramic polishing powder on inhibition alkali silica reaction[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 739-747.
- [22] 龚晓强, 刘杰胜, 邢珊珊, 等. 稻壳灰水泥砂浆的耐久性研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2018, 37(3): 64-69.
GONG Xiaoqiang, LIU Jiesheng, XIN Shanshan, et al. The study of the durability of the rice husk ash cement mortar[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2018, 37(3): 64-69.
- [23] SINGH B. Rice husk ash[J]. Waste & Supplementary Cementitious Materials in Concrete, 2018: 417-460.
- [24] MULTON S, SELLIER A, CYR M. Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion[J]. Cement & Concrete Research, 2009, 39(6): 490-500.
- [25] GLASSER F P, MARR J. The alkali binding potential of OPC and blended cements[J]. Cement, 1985, 82: 85-94.

(编辑 郑晓龙 沈 波)