

稻壳预处理工艺对稻壳砂浆性能的影响

孙振平, 张丽华

(同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 利用稻壳与水泥复合制备稻壳砂浆, 并就稻壳经自来水和饱和石灰水浸泡两种预处理工艺对稻壳砂浆性能的影响进行了试验研究. 结果表明: 与未采取任何预处理措施的稻壳相比, 经过两种预处理工艺处理的稻壳所制备的砂浆其力学性能明显提高, 且饱和石灰水浸泡法预处理的效果优于自来水浸泡法; 饱和石灰水浸泡法预处理后的稻壳制备的稻壳砂浆其水化热峰值最高, 3 d 放热量最大. 利用红外光谱分析了预处理前后稻壳表面官能团的变化, 发现预处理后稻壳表面半纤维素吸收峰减弱, 脂肪族吸收峰消失.

关键词: 稻壳; 预处理; 石灰水浸泡; 稻壳砂浆; 半纤维素

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Effect of Rice Husk Pretreatment Process on Properties of Rice Husk Mortar

SUN Zhenping, ZHANG Lihua

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this paper, rice husk mortar made from rice husk and cement was prepared and the effect of two pretreatment processes, including water soaking and saturated lime water soaking, on the properties of rice husk mortar were studied. The results indicate that the mechanical properties of rice husk mortar made from pretreated rice husk were significantly higher than that made from untreated rice husk. The saturated lime water soaking pretreatment method is better than the water soaking method. The hydration heat peak and heat release in 3 days of rice husk mortar made from saturated lime water soaking is the highest. This paper also analyzes the change of surface functional groups of rice husk by infrared spectrum. The results show that after pretreatment the hemicellulose absorption peak reduces and the aliphatic absorption peak disappears on rice husk surface.

Key words: rice husk; pretreatment; lime water soaking; rice husk mortar; hemicellulose

稻壳是稻米生产过程中的副产品, 约占稻谷总产量的 1/5^[1]. 作为农业大国, 我国每年产生的稻壳总量超过 180 万 t. 由于稻壳中所含木质素和硅质成分较高, 直接施放到田间作肥料不易腐烂, 作为饲料投喂动物也不易被消化吸收, 因此导致稻壳资源化利用率一直很低. 而目前普遍采取的简单焚烧处理措施, 不仅浪费宝贵的自然资源, 而且还带来严重的环境污染, 已成为交通和民航等事故的罪魁祸首. 因此, 资源化高效利用稻壳的研究刻不容缓.

另一方面, 我国农村城镇化的步伐急速迈进, 社会主义新农村建设正如火如荼地进行. 住宅、道路、桥梁和铁路等基础设施的建设已使自然资源严重匮乏. 因此, 合理利用当地天然资源并加大对各种固体废弃物资源化利用的力度, 制备性能可靠的各种建筑材料, 是我国建筑业可持续发展的必然之路.

资料显示, 常见农作物副产品如稻壳、麦秸、稻草和棉杆等均含有大量的纤维, 将这些农作物副产品与水泥或石膏等无机胶凝材料复合, 可以制得易切割的轻质隔热材料^[2]. 利用稻壳与水泥复合制备稻壳砂浆, 既回收利用了农业副产物, 又实现了节约资源、节省能源和保护环境的目的. 然而, 由于农作物副产品自身化学成分和组织结构的特殊性, 在这些农作物副产品制备建筑材料过程中存在诸多技术难题, 致使产品性能受到限制. 已有研究证明, 碱处理后的麦秸表面会变得粗糙, 与未处理的麦秸相比, 所制备的水泥基板材料力学性能有所改善^[3]; 木聚糖酶处理后的麦秸, 可减弱对水泥水化的阻碍作用, 有助于提高所制备的麦秸水泥板的各项性能^[4]; 氢氧化钠溶液处理稻草可以改善稻草纤维与水泥石的界面结构, 有效提高稻草纤维与水泥石间的黏结性^[5]. 但是, 稻壳预处理工艺对稻壳本身性能的影响, 对稻壳与水泥石间界面黏结的改善作用以及对稻壳砂浆性能的影响及其机理等, 至今鲜见报道.

本文采用自来水浸泡和饱和石灰水浸泡两种方法对稻壳进行预处理,并通过试验对比了经两种方法预处理的稻壳所制备的稻壳砂浆的性能,还就预处理工艺对稻壳本身及所制备稻壳砂浆性能影响的机理进行了探讨.关于稻壳砂浆的导热系数、保温隔热性能及耐久性能的研究结果,将另文讨论.

1 材料与方法

1.1 原材料

(1) 稻壳.产自江苏盐城,长约6 mm,堆积密度 $50\sim 70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,低温(温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,下同)干燥后备用.

(2) 水泥. P·II 52.5 级水泥,产自南京小野田水泥厂,其化学组成如表1,基本物理性能如表2.

表1 水泥的化学组成

Tab.1 Chemical composition of cement %			
化学物质	质量分数	化学物质	质量分数
SiO ₂	20.70	TiO ₂	0.24
CaO	65.70	SrO	0.03
Al ₂ O ₃	4.48	MnO	0.14
Fe ₂ O ₃	3.01	Na ₂ O	0.06
MgO	0.91	Cr ₂ O ₃	0.01
SO ₃	2.39	ZnO	0.05
K ₂ O	0.72	烧失量	1.56

表2 水泥的基本物理性能

Tab.2 Physical properties of cement

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准稠度 用水量/%	凝结时间/min	
			初凝	终凝
3 090	351	28	130	170

(3) 熟石灰. 产自昆山市西南石灰厂, CaO 质量分数 $\geq 80\%$.

(4) 自来水.

1.2 稻壳预处理工艺

取一定量的稻壳分别用自来水和饱和石灰水(熟石灰与自来水配制而成)浸泡24 h,然后取出,用自来水淘洗,以去除稻壳表面的溶出物和残留物.低温干燥后备用.预处理前后稻壳外观见图1.

1.3 试件制备与性能表征

(1) 稻壳砂浆试件制备. 参照《水泥胶砂强度检验方法(GB17671—1999)》进行稻壳砂浆试件的成型和养护,稻壳砂浆中稻壳与水泥的质量比(m_R/m_C)分别为0.20和0.30,拌合水与水泥的质量比(以下简称水灰比)均为0.50.

(2) 水化热. 参照《水泥水化热试验方法(GB/T—1980)》,利用多通道等温量热仪 TAMAIR C08,测试稻壳-水泥复合体系72 h内水化放热,量热仪的量程设定为600 mW.

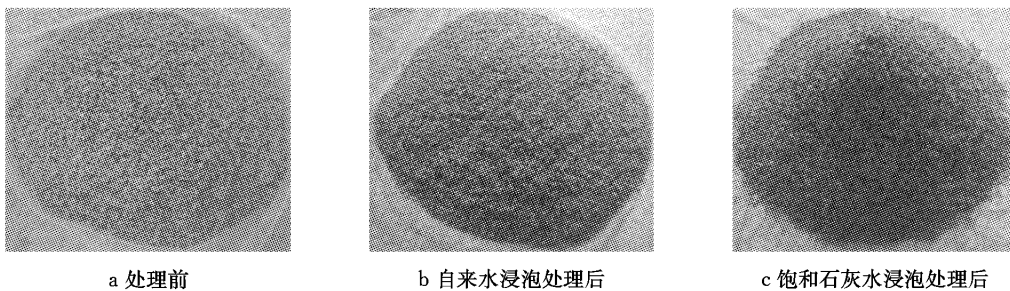


图1 稻壳外观图

Fig.1 Appearance of different rice husks

(3) 稻壳预处理前后化学成分的变化. 洗净稻壳试样表面,低温干燥至恒重,然后在傅里叶变换红外光谱仪上进行测定,得到其红外吸收光谱图.

2 试验结果与讨论

2.1 稻壳预处理工艺对稻壳砂浆强度影响

制备了 m_R/m_C 分别为0.2和0.3的稻壳砂浆,所使用稻壳有3种:①未处理稻壳(WJR),②自来水预浸泡稻壳(JSR);③饱和石灰水预浸泡稻壳(JHR). 稻壳砂浆的强度测试结果见图2和图3.

由图2可知,当 $m_R/m_C=0.2$ 时,JSR 稻壳砂浆与WJR 稻壳砂浆相比,3,7,28 d 的抗折强度分别提高5.3%,3.7%,50.9%;JHR 稻壳砂浆与WJR 稻壳砂浆相比,3,7,28 d 抗折强度分别提高23.9%,24.8%,56.5%. 当 $m_R/m_C=0.3$ 时,JSR 稻壳砂浆与WJR 稻壳砂浆相比,3,7,28 d 抗折强度分别提高12.1%,58.8%,61.9%;JHR 稻壳砂浆与WJR 稻壳砂浆相比,3,7,28 d 时抗折强度分别提高49.7%,86.9%,128.0%. 可见,用饱和石灰水浸泡预处理稻壳,更有利于稻壳砂浆抗折强度的发展.

由图3可知,当 $m_R/m_C=0.2$ 时,JSR 稻壳砂浆

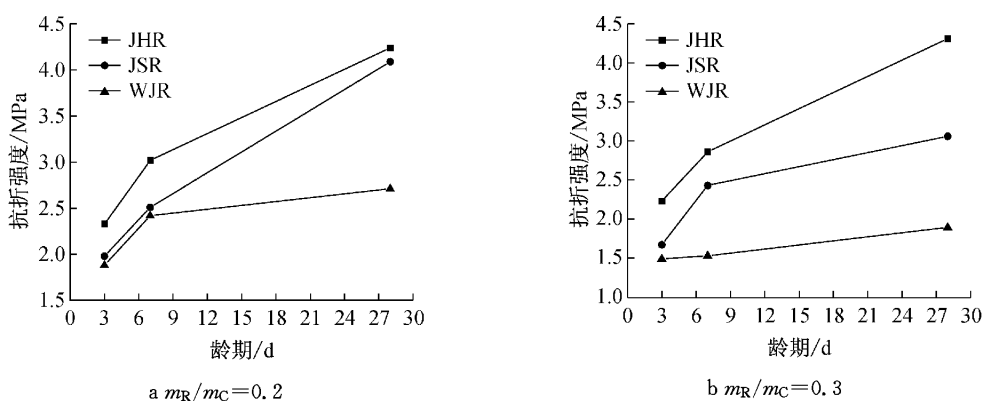


图2 稻壳砂浆的抗折强度

Fig.2 Flexural strength of mortar with different rice husks

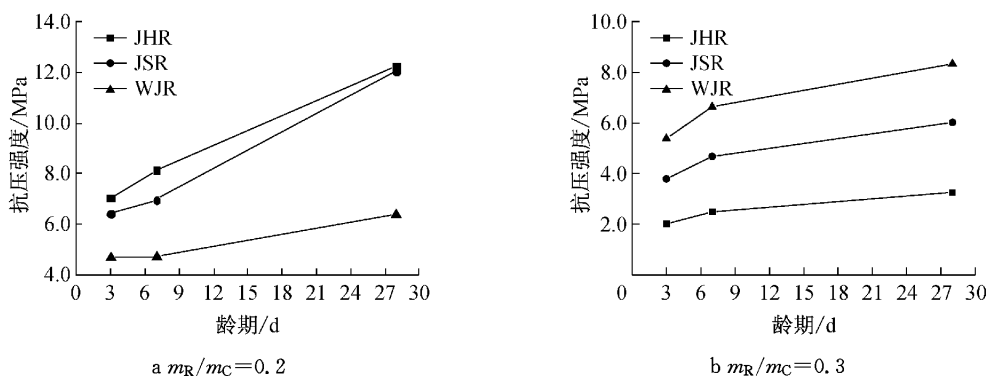


图3 稻壳砂浆的抗压强度

Fig.3 Compressive strength of mortar with different rice husks

与 WJR 稻壳砂浆相比,3,7,28 d 的抗压强度分别提高 36.7%,48.2%,88.9%;JHR 稻壳砂浆与 WJR 稻壳砂浆相比,3,7,28 d 抗压强度分别提高 50.5%,72.8%,92.0%。当 $m_R/m_C = 0.3$ 时,JSR 稻壳砂浆与 WJR 稻壳砂浆相比,3,7,28 d 抗压强度分别提高 88.6%,87.9%,84.7%;JHR 稻壳砂浆与 WJR 稻壳砂浆相比,3,7,28 d 时抗压强度分别提高 168.2%,166.7%,155.6%。可见,用饱和石灰水浸泡预处理稻壳后,也更有利于稻壳砂浆抗压强度的发展。

以上试验结果表明,本文采用的两种预浸泡处理措施均有助于改善稻壳砂浆的强度,且饱和石灰水预浸泡处理的稻壳,其所制备稻壳砂浆的试件强度更高。与 $m_R/m_C = 0.2$ 的稻壳砂浆相比,这一现象在 $m_R/m_C = 0.3$ 的稻壳砂浆中体现得更明显。这说明采取预浸泡的处理措施能够在一定程度上改善稻壳与水泥浆之间的黏结强度。其原因在于,稻壳中本来含有大量的半纤维素^[6],在水中浸泡时会部分溶出;而在碱溶液中浸泡,半纤维素可以水解生成糖类物质,溶出的量更多。对于未经浸泡预处理的稻壳

来说,与水泥浆体混合后,伴随着水泥的初始水化,浆体孔溶液很快呈强碱性,促使半纤维素水解和糖类溶出,溶出的糖类物质阻碍水泥的进一步水化和凝结硬化过程的出现^[7-8]。而对于预先经过碱溶液浸泡处理的稻壳,其所含半纤维素提前水解并转化为糖类物质溶出,在自来水淘洗过程中被除去,避免了制备成稻壳砂浆后对水泥水化和凝结硬化的不利影响^[4]。另一方面,稻壳表面本身存在蜡质层,会影响稻壳与水泥浆体的界面黏结强度,通过碱溶液浸泡处理后,稻壳表面的蜡质层可以部分甚至完全被消除,从而露出粗糙的表面,这将增大水泥浆体与稻壳表面的机械咬合力,从而提高稻壳砂浆的力学性能。与氢氧化钙相比,氢氧化钠的价格相对较高,且氢氧化钠属于强碱性物质,对操作者和环境的腐蚀作用较强。本文选用饱和石灰水浸泡不仅取得较明显的效果,而且可以降低碱溶液浸泡处理的成本,认为应该是一种较理想的措施。

2.2 不同预处理稻壳对水泥水化放热速率影响

通过测定采用不同方法预处理的稻壳所制备稻壳砂浆的浆体水化放热曲线,可以直观地考查稻壳

对于水泥水化进程的影响情况^[4]. 采用量热仪测定了4种复合体系自加水开始到72 h之内的水化放热速率(见图4). 4种复合体系包括:①纯水泥浆体系C;②未处理稻壳-水泥浆复合体系WJR-C;③自来水预浸泡稻壳-水泥浆复合体系JSR-C;④饱和石灰水预浸泡稻壳-水泥浆复合体系JHR-C.

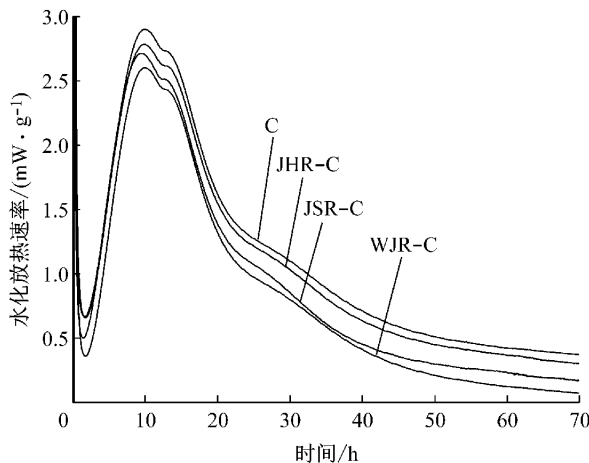


图4 不同稻壳-水泥复合体系水化放热速率曲线图

Fig.4 Hydration curve of cement-rice husk mixture with different rice husks

从图4可以看出,与单纯的水泥浆体系C相比,加入稻壳的WJR-C浆体体系的放热峰有明显降低,最大放热速率从 $2.92 \text{ mW} \cdot \text{g}^{-1}$ 降低到 $2.58 \text{ mW} \cdot \text{g}^{-1}$,降低幅度为11.6%. 相对于未经预处理的稻壳-水泥复合体系,采用自来水预浸泡处理和饱和石灰水预浸泡处理的稻壳的复合体系,其水泥浆体放热峰有所提高,分别提高到 $2.72 \text{ mW} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $2.80 \text{ mW} \cdot \text{g}^{-1}$,放热峰提高幅度分别为1.9%和4.9%. 参照《水泥水化热试验方法(GB2022—1980)》可计算出4种体系中水泥的3 d水化热,从大到小的顺序依次为C, JHR-C, JSR-C, WJR-C, 对应的数值分别为279.43, 263.10, 225.70和202.31 $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$. 可见,正如前言中所述,稻壳的存在的确对水泥水化有抑制作用,而本文采取的预浸泡处理工艺可以在一定程度上减弱这种抑制作用. 体系JHR-C的放热峰比体系JSR-C的更高,说明饱和石灰水预浸泡处理效果优于自来水.

2.3 预处理前后稻壳的红外光谱分析

稻壳预处理前后红外吸收光谱如图5所示. 图5中 $3500 \sim 3200 \text{ cm}^{-1}$ 为分子间氢键O—H伸缩振动,为宽的吸收峰; $2930 \sim 2900 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 $-\text{CH}_2$ 基团的C—H反对称伸缩振动,主要来自于碳水化合物和脂肪族化合物; $1700 \sim 1300 \text{ cm}^{-1}$

为木质素和纤维素; $1450 \sim 1410 \text{ cm}^{-1}$ 为碳酸根的吸收峰; $1111 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 为硅酸盐矿物 SiO_2 中Si—O的伸缩振动和多糖类的—C—O伸缩振动吸收峰^[9-12].

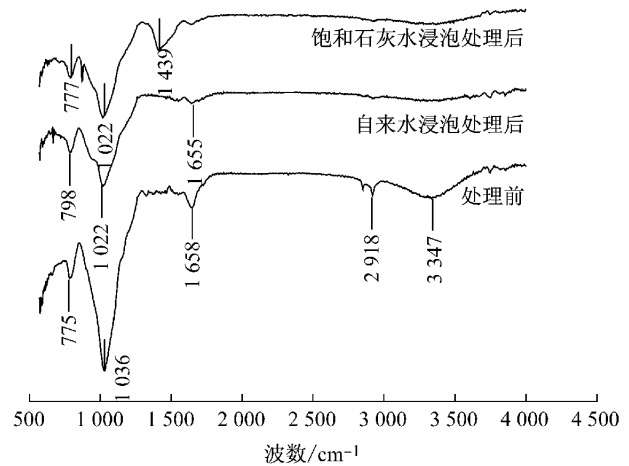


图5 稻壳预处理前后红外光谱图

Fig.5 IR diagram of rice husk before and after being soaked

分析图5中两种预浸泡处理后稻壳的红外光谱吸收峰可知,预处理后 3347 cm^{-1} 处宽吸收峰消失, 2918 cm^{-1} 处的吸收峰消失. 这说明预浸泡处理后稻壳表面蜡质层减少. 而经饱和石灰水预浸泡处理后,稻壳的 1658 cm^{-1} 处的吸收峰消失,经自来水预浸泡处理后稻壳在 1658 cm^{-1} 处的吸收峰偏移至 1655 cm^{-1} ,且强度明显减弱,说明采用预处理工艺去除了稻壳中的部分木质素和纤维素,且饱和石灰水预浸泡处理的效果更加明显. 饱和石灰水预浸泡处理后出现 1439 cm^{-1} 吸收峰,是稻壳表面残存的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 反应生成碳酸盐所致;预处理后 1036 cm^{-1} 处的吸收峰明显减小,说明稻壳中的糖类成分减少.

2.4 稻壳与水泥浆体界面性能

图6是稻壳砂浆断面图(数码相机拍摄). 由图6a可知,未经预处理的稻壳砂浆试件中水泥石结构较疏松,孔隙较多,试件受力后断开形式多为稻壳拔出,说明水泥与稻壳界面黏结不紧密,黏结力较差. 图6b和6c显示,经预处理的稻壳砂浆,水泥石结构致密,水泥与稻壳界面黏结相对牢固,试件受力后断开形式多为稻壳拔断,这对增加稻壳砂浆破坏过程中的断裂能有益. 其原因之一在于,经过两种预浸泡方法处理后,稻壳表面的蜡质层被溶出,稻壳表面粗糙度增加,加强了水泥石与稻壳界面处的机械咬合力,使得界面结合更牢固. 有关稻壳砂浆不同破坏形式下砂浆断裂能的问题,将进行专门试验研究.

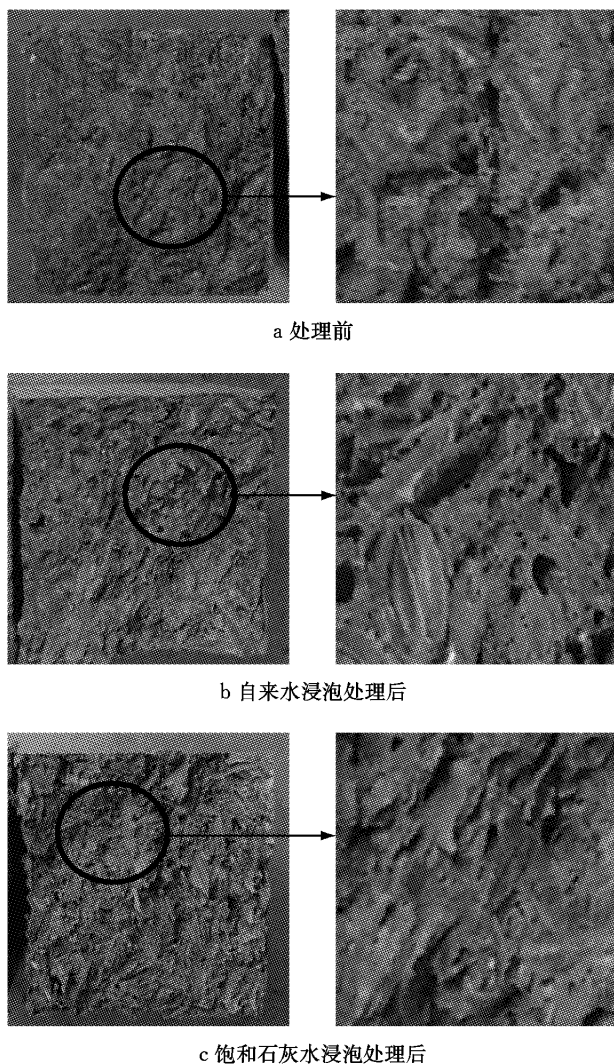


图 6 稻壳砂浆断面照片

Fig. 6 Cross-section of rice husk mortar specimen

图 7 是采用扫描电镜(SEM)拍摄的养护 28 d 后稻壳砂浆中稻壳-水泥浆体界面过渡区的微观图片。从图 7a 中可以看出,未经预处理的稻壳所制备砂浆中稻壳-水泥浆体界面区尽管有水泥水化产物,但产物晶粒粗大,且存在尺寸较大的孔隙。与未经预处理的稻壳所配制砂浆相比,经自来水浸泡预处理的稻壳所制备砂浆中,稻壳-水泥浆体界面区水化产物尺寸较小,且填充较密实(图 7b)。特别要提及的是,稻壳经过石灰水浸泡预处理后,所制备稻壳砂浆中稻壳-水泥浆体的界面区则存在大量 CSH(水化硅酸钙)凝胶,且形成较多 AFt(钙矾石)晶体,AFt 晶体被 CSH 凝胶包裹并填充了孔隙(图 7c),形成较为密实的界面过渡区。这进一步说明稻壳砂浆破坏断面所显示的经过预处理的稻壳所制备的稻壳砂浆破坏时,稻壳被拔断,而未经预处理的稻壳所制备的稻壳砂浆破坏时,稻壳是从浆体中拔出的真正原因。

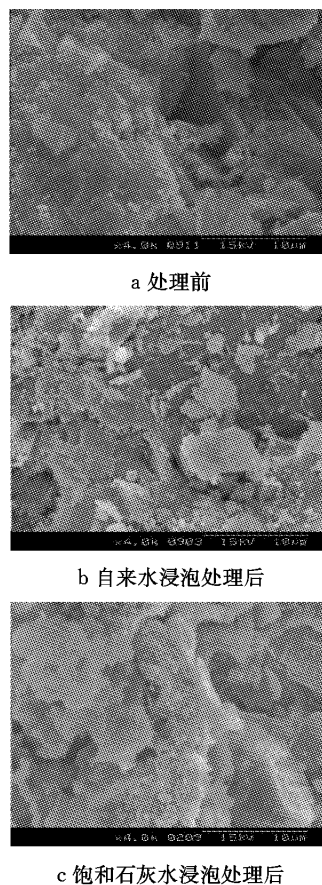


图 7 稻壳-水泥浆体界面过渡区 SEM 图

Fig. 7 SEM of interfacial transition zone between rice husk and paste

3 结论

(1) 对稻壳进行自来水预浸泡和饱和石灰水预浸泡处理,可以明显提高稻壳砂浆的强度,而且经饱和石灰水预浸泡处理后,稻壳-水泥石界面区改善效果更好,所制备的稻壳砂浆强度更高。

(2) 水化热分析表明,砂浆中未经任何预处理稻壳的存在会减缓水泥的水化速率,而对稻壳进行预浸泡处理可以一定程度上消除稻壳对水泥水化的延缓作用,使水化热速率最高峰增强,3 d 水化放热量增加。采用饱和石灰水对稻壳进行预浸泡处理的效果优于自来水。

(3) 对比稻壳处理前后的红外光谱图发现,稻壳经预浸泡处理后,其半纤维素和表面蜡质层减少,有利于改善稻壳与水泥石界面的黏结强度。采用饱和石灰水对稻壳预浸泡处理的效果优于自来水。

(4) 对稻壳砂浆断面图的观察表明,未经预处理的稻壳所制备的稻壳砂浆破坏时,稻壳从浆体中拔出,而经过预处理后,砂浆破坏时稻壳则被拔断,

这与稻壳预处理后稻壳-水泥浆体界面过渡区微观结构的改善也有很大关系。

参考文献:

- [1] Zhang M H, Lastra R, Malhotra V M. Rice-husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(6): 963.
- [2] Jaubertie R, Rendell F, Tamba S, *et al.* Properties of cement-rice husk mixture [J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(2): 239.
- [3] 凌启飞, 郑霞, 李新功, 等. 碱处理对麦秸纤维增强水泥板力学性能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(1): 157.
LING Qifei, ZHENG Xia, LI Xingong, *et al.* Effects of alkaline treatment on mechanical properties of straw fiber-reinforced cement board [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(1): 157.
- [4] 刘一星, 李刚, 韩景泉, 等. 木聚糖酶预处理麦秸对麦秸/水泥体系水化的影响[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(6): 864.
LIU Yixing, LI Gang, HAN Jingquan, *et al.* Influence of xylanase pretreatment of wheat straw on the hydration process of wheat straw-cement mixture [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(6): 864.
- [5] 李家和, 王政, 祝瑜. 水泥基稻草纤维材料性能及结构的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(5): 13.
LI Jiahe, WANG Zheng, ZHU Yu. Research on properties and structure of cementitious straw fiber composite [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(5): 13.
- [6] 连海珠, 潘明珠, 周定国, 等. 预处理方法对稻草中纤维性能的影响[J]. 木材工业, 2007, 21(2): 4.
LIAN Haizhu, PAN Mingzhu, ZHOU Dingguo, *et al.* Effect of pretreatments on properties of rice-straw medium density fiberboard [J]. China Wood Industry, 2007, 21(2): 4.
- [7] Frybort S, Mauritz R, Teischinger A, *et al.* Cement bonded composites-a mechanical review [J]. Bio Resources, 2008, 3(2): 602.
- [8] Mansour A, Srebric J, Burley B J. Development of straw-cement composite sustainable building material for low-cost housing in egypt [J]. Journal of Applied Sciences Research, 2007, 3(11): 1571.
- [9] 沈其荣, 徐勇, 杨红, 等. 化学处理水稻秸秆水溶性有机物的光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(2): 211.
SHEN Qirong, XU Yong, YANG Hong, *et al.* Spectral analysis of dissolved organic matter derived from rice straw after chemical treatment [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(2): 211.
- [10] 吴章康, 周定国. 稻草原料表面特性 FTIR 和 XPS 分析[J]. 木材工业, 2003, 17(6): 6.
WU Zhangkang, ZHOU Dingguo. Surface characterization of rice straw and its fibers by FTIR and XPS [J]. China Wood Industry, 2003, 17(6): 6.
- [11] 贾敬华, 金东青. 稻草改性的红外光谱分析[J]. 环境保护科学, 2008, 34(2): 104.
JIA Jinghua, JIN Dongqing. Infrared spectra analysis on modification of rice straw [J]. Environmental Protection Science, 2008, 34(2): 104.
- [12] 贾敬华. 稻草的醚化改性[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
JIA Jinghua. Modification of straw by etherification [D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.

(上接第 378 页)

- [3] ZHAO Xiaoling, ZHANG Lei. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures [J]. Engineering Structures, 2009, 29: 1808.
- [4] 沈祖炎, 郭小农, 李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 100.
SHEN Zuyan, GUO Xiaonong, LI Yuanqi. State-of the-arts of research on aluminum alloy structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 100.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50429—2007 铝合金结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50429—2007 Code for design of aluminum structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [6] 王奔, 郭小农, 蒋首超, 等. FRP 加固金属结构研究综述[J]. 结构工程师, 2012, 28(5): 183.
WANG Ben, GUO Xiaonong, JIANG Shouchao, *et al.* Art state of the metal structures strengthened with FRP [J]. Structural Engineers, 2012, 28(5): 183.
- [7] 郭小农, 王奔, 郭晓燕, 等. 碳纤维布加固铝合金黏结性能试验研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(5): 144.
GUO Xiaonong, WANG Ben, GUO Xiaoyan, *et al.* Experimental study on the bond performance of aluminum alloy plates strengthened with CFRP sheets [J]. Structural Engineers, 2013, 29(5): 144.
- [8] 王奔, 郭小农, 罗永峰, 等. FRP 加固铝合金结构研究现状简述[J]. 工业建筑, 2013(增): 902.
WANG Ben, GUO Xiaonong, LUO Yongfeng, *et al.* Art state of the aluminum alloy structures strengthened with FRP [J]. Industrial Construction, 2013(Suppl.): 902.
- [9] 郭晓燕, 蒋首超, 王奔, 等. CFRP 增强铝合金焊缝受力性能研究[J]. 钢结构, 2012(增): 477.
GUO Xiaoyan, JIANG Shouchao, WANG Ben, *et al.* Study on mechanical behavior of CFRP reinforced aluminum alloy welding [J]. Steel Structure, 2012(Suppl.): 477.
- [10] 袁菁颖. 碳纤维布加固 H 型钢梁的试验研究和数值分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
YUAN Jingying. Experimental research and numerical simulation on H-shaped steel beam strengthened with CFRP [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [11] Albat A M, Romilly D P. A direct linear-elastic analysis of double symmetric bonded joints and reinforcements [J]. Composite Science Technology, 1999, 59: 1127.
- [12] 卢亦焱, 张号军, 刘素丽. 碳纤维布与钢板黏结剪切性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 60.
LU Yiyan, ZHANG Haojun, LIU Suli. A study on the adhesive shear performance of steel plates bonded by carbon fiber reinforced polymer [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 60.