

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.059



# 骨料种类对糯米灰浆性能的影响

胡悦<sup>1</sup>, 魏国锋<sup>1</sup>, 方世强<sup>2</sup>, 李立新<sup>3</sup>, 张秉坚<sup>2</sup>

(1. 安徽大学 历史系, 合肥 230039; 2. 浙江大学 文物与博物馆学系, 杭州 310027; 3. 安徽博物院, 合肥 230061)

**摘要:**采用灰浆性能表征并辅以扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)等技术手段,测定了制备的糯米灰浆的表面强度、抗压强度、抗冻性等性能,探讨了骨料的种类、粒径以及掺量对糯米灰浆性能的影响。结果表明:砖颗粒、河砂、石英砂 3 种骨料的掺入,使糯米灰浆的收缩性和抗冻性均得到较大改善。其中,砖颗粒骨料的加入使糯米灰浆的抗冻性较空白样品提高了 125%;但随着骨料粒径和骨灰比的增大,掺入骨料糯米灰浆的抗压强度、抗冻性和收缩率呈下降趋势。因此,在砖石质文物的保护中,建议使用砖颗粒作为糯米灰浆的骨料,并将骨料粒径控制在 3 mm 以下,骨料/灰的比值控制在 2:1 以下,对改善糯米灰浆的性能效果最佳。

**关键词:**糯米灰浆;骨料;粒径;文物保护

**中图分类号:** TU528      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2019)03-0134-07

## Influence of aggregate type on the properties of traditional sticky rice-lime mortar

Hu Yue<sup>1</sup>, Wei Guofeng<sup>1</sup>, Fang Shiqiang<sup>2</sup>, Li Lixin<sup>3</sup>, Zhang Bingjian<sup>2</sup>

(1. Department of History, Anhui University, Hefei 230039, P. R. China; 2. Department of Cultural Relics and Museology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China; 3. Anhui Museum, Hefei 230061, P. R. China)

**Abstract:** The properties such as surface hardness, compressive strength, freeze-thaw resistance and other properties of the prepared glutinous rice mortar were determined by mortar performance. The influence of the species of aggregate, the size of the particle and the amount of the aggregate on the properties of glutinous rice mortar are discussed and its action mechanism is explored by means of SEM and XRD. Results show that the addition of silica sand, river sand and brick grain improve the shrinkage and freeze-thaw resistance. Among the three aggregates, brick grain make the freeze-thaw resistance of sticky rice-lime mortar increased by 125% compared to blank sample. However, with increase of aggregate particle size and bone ash ratio, the compressive strength, freezing-thawing resistance and shrinkage of aggregates decreased. Therefore, for the protection practice of brick cultural relic, it is suggested that the brick grain is added as the aggregate, the grain size is controlled to be within 3 mm, and the aggregate to lime ratio below 2:1, which is the optimal way to improve the performance of glutinous rice mortar.

**Keywords:** stick rice-lime mortar; aggregate; grain diameter; protection of cultural relic

**收稿日期:** 2018-09-20

**基金项目:** 国家文化科技提升计划([2013]718);“十二五”国家科技支撑计划(2012BAK14B05)

**作者简介:** 胡悦(1994-),女,主要从事科技考古研究, E-mail: 18255928402@163.com.

魏国锋(通信作者),男,副教授,博士生导师, E-mail: weigf@mail.ustc.edu.cn.

**Received:** 2018-09-20

**Foundation item:** National Cultural Science and Technology Promotion Project (No. [2013]718); Twelfth Five-Year Plan of National Science and Technology Support Projects (No. 2012BAK14B05)

**Author brief:** Hu Yue(1994-), main research interest: archaeometry, E-mail: 18255928402@163.com.

Wei Guofeng (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: weigf@mail.ustc.edu.cn.

在中国古代建筑工程中,石灰、石膏等胶结材料使用非常广泛。在众多的胶结材料中<sup>[1]</sup>,糯米灰浆使用的时间最久,历经几千年建筑材料的更新,成为中国传统灰浆技术的代表<sup>[2]</sup>。作为中国古代建筑史上的一项重要科技发明<sup>[2]</sup>,糯米灰浆最早使用于新时代表晚期<sup>[3]</sup>,到清代晚期,其发展已非常成熟<sup>[2]</sup>。

根据这几年对糯米灰浆的实验测试,其耐久性能、防渗性能好<sup>[4]</sup>,强度大,与砖石质文物本体具有较好的兼容性<sup>[5]</sup>,逐渐引起古建筑修复界学者的重视。糯米灰浆开始成为砖石质等不可移动文物保护单位研究的重点领域,在古建筑、城墙、堤坝等工程的修复中,具有重大应用前景<sup>[5]</sup>。

中国传统糯米灰浆主要采用气硬性石灰制作而成<sup>[6]</sup>。气硬性石灰具有硬化慢、强度低、收缩性大等问题<sup>[6-8]</sup>,严重制约了其在砖石质文物建筑保护中的应用。骨料在建筑砂浆和混凝土中应用广泛,对于改善砂浆和混凝土的收缩开裂和强度等性能至关重要<sup>[9]</sup>。笔者尝试在糯米灰浆中加入各种骨料,探讨骨料对糯米灰浆性能的影响机制,并筛选一种适用的骨料,改善糯米灰浆的物理性能,为其在砖石质文物建筑保护中的应用提供科学依据。

## 1 实验材料与器材

实验原材料有:工业灰钙粉(氢氧化钙含量 $\geq 90\%$ )<sup>[10]</sup>,采购于安徽凤阳明帝钙业有限公司;北大荒糯米,超市购买;不同粒径的河砂与石英砂,购自建材市场;砖颗粒,采用浙江大学玉泉校区附近建筑工地的红砖破碎而成。

测定糯米灰浆的性能使用的器材包括:水泥标准稠度及凝结时间测定仪,来自江苏东台迅达路桥工程仪器厂;自制抗压强度测试仪(图1);扫描电镜, SIRION-100, FEI(美国); XRD, AXS D8 ADVANCE(德国)。



图1 自制抗压强度测试仪

Fig. 1 Self-made compressive strength tester

## 2 样品制备

### 2.1 糯米浆的熬制

将糯米用研磨机磨至粉末状,按照  $m$  (去离子水):  $m$  (糯米) = 19<sup>[11]</sup> 准确称量出所需质量的糯米粉和去离子水,将两者放入电饭锅内,搅拌至均匀后,加热 4 h。在熬制糯米浆的过程中,记下电饭锅内的刻度,适时地加入一定量的水,以保持糯米浆的浓度不变<sup>[11]</sup>。

### 2.2 无骨料糯米灰浆的制备

称量一定量的灰钙粉,放入搅拌桶中<sup>[12]</sup>,同时,加入灰钙粉质量 0.84 倍的浓度 5% 的糯米浆,然后用搅拌器不断搅拌至稠度不变<sup>[12]</sup>,保证所配制糯米灰浆的水灰比为 0.8<sup>[11]</sup>,  $M$ (氢氧化钙): $M$ (糯米) = 0.042。

### 2.3 添加骨料糯米灰浆的制备

按表1中样品编号 M2~M10 所示配方,以骨料的种类或粒径作为自变量,分别称取一定量控制粒径的砖颗粒、石英砂或河砂,与一定量的灰钙粉和 5% 的糯米浆混合,搅拌均匀,使其满足表1中的水灰比、骨灰比以及稠度,制得的灰浆备用。

表1 仿制灰浆的材料配方

Table 1 Material formula of imitation mortar

编号	石灰种类	米浆种类	骨料		水灰比	骨灰比	稠度
			种类	粒径/mm			
M1	工业灰钙粉	糯米			0.8		41
M2	工业灰钙粉	糯米	石英砂	1~2	0.8	1	31
M3	工业灰钙粉	糯米	河砂	1~2	0.8	1	31
M4	工业灰钙粉	糯米	砖颗粒	1~2	0.8	1	21
M5	工业灰钙粉	糯米	石英砂	2~3	0.8	1	28
M6	工业灰钙粉	糯米	石英砂	3~5	0.8	1	25
M7	工业灰钙粉	糯米	河砂	1~2		2	31
M8	工业灰钙粉	糯米	河砂	1~2		3	30.5
M9	工业灰钙粉	糯米	河砂	1~2		4	31
M10	工业灰钙粉	糯米	河砂	1~2		5	31

## 2.4 制备灰浆试块

依据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009),使用型号 $5.0\text{ cm}\times 5.0\text{ cm}\times 5.0\text{ cm}$ 的三联抗压试模<sup>[13]</sup>,制作立方体的抗压强度试块;采用规格为 $4.0\text{ cm}\times 4.0\text{ cm}\times 16.0\text{ cm}$ 的水泥胶砂试模制备收缩实验用试块<sup>[11]</sup>;采用内径 $5.0\text{ cm}$ ,高 $1.5\text{ cm}$ 的圆柱体试模制备耐冻融循环测试试样<sup>[11]</sup>。制备糯米灰浆试块时,首先将脱模剂均匀地涂抹于各试模的内部,然后将制备好的糯米灰浆倒入其中,待灰浆密实后,将高出试膜部分的刮去磨平,试样放置1 d后脱模,转移至养护室( $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $RH(\%)=65\%\pm 5\%$ )中养护<sup>[10]</sup>。在对糯米灰浆试块的养护过程中,要定期在其表面喷洒适量的去离子水,以确保碳化过程的进行。

## 3 实验结果以及讨论

### 3.1 骨料种类对糯米灰浆性能的影响

实验选择砖颗粒、石英砂、河砂3种骨料,将其粒径均控制在 $1\sim 2\text{ mm}$ ,骨灰比均为1,水灰比均为0.8。

1) 骨料种类对糯米浆稠度的影响 依据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》,使用水泥标准稠度凝结测定仪对糯米灰浆的稠度进行测试。

根据图2的稠度测试结果可以看出,与空白样品相比,骨料的掺入导致糯米灰浆的稠度下降。其中,掺入砖颗粒的糯米灰浆稠度值下降幅度高达48.8%。在水灰比和骨灰比一定的情况下,骨料的掺入,导致单位体积糯米灰浆的含水量减小,从而其稠度降低。石英与河砂质地较为致密,吸水性较小,而砖颗粒表面粗糙、多孔,吸水率较高,因此,砖颗粒的掺入导致糯米灰浆稠度大幅下降。

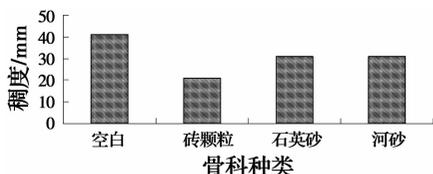


图2 骨料种类对糯米灰浆稠度的影响图

Fig. 2 Influences of aggregate types on consistency of glutinous rice mortar

2) 骨料种类对糯米灰浆抗压强度的影响 对糯米灰浆进行抗压强度实验,把样品固定于抗压强度测试仪操作台上,将测试仪的压力杆调整至与样品上表面充分接触,然后,以 $0.02\text{ MPa/s}$ 的加载速度加压,样品破损时仪器的最高读数,即为抗压强度数

值<sup>[2]</sup>。待测试块的抗压强度结果如图3所示。

图3的测试结果显示,较之空白样品(未加骨料的灰浆),骨料的添加使糯米灰浆的28、60 d抗压强度有所降低。其中,掺入砖颗粒的糯米灰浆抗压强度下降幅度最低,与空白样品相比,其28、60 d抗压强度仅分别下降了8.2%和6.8%。

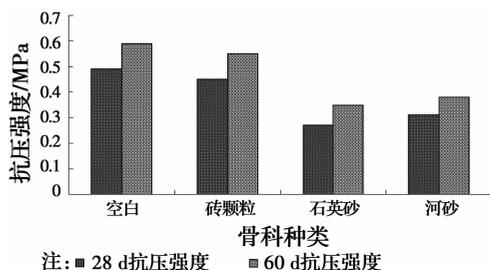


图3 添加不同骨料的糯米灰浆抗压强度柱形图

Fig. 3 Column diagram of compressive strength of glutinous rice mortar with different aggregates

3) 骨料种类对糯米灰浆收缩性的影响 收缩性测试采用规格为 $0.04\text{ mm}\times 0.04\text{ mm}\times 0.16\text{ mm}$ 的水泥胶砂试模制备的试块,使用精确度为 $1\text{ mm}$ 的直尺测量样品的4个侧面,记录数值,测量3次,取平均值。准确测量试块脱模后1、3、5、7、14、28 d的长度,并记录数值,然后计算其1、3、5、7、14、28 d收缩率。

骨料自身的体积稳定性高,它的掺入可抑制石灰浆体的收缩<sup>[14-15]</sup>。在图4中,较之空白样品,添加骨料的糯米灰浆收缩率显著降低,其7、14 d收缩率分别最大下降了49.2%和54.1%,表明砖颗粒、石英砂和河砂可显著改善灰浆的收缩性能。空白样品的收缩主要在脱模后两周内完成,以后基本保持稳定,收缩率变化幅度较大;添加骨料的糯米灰浆,其收缩主要在脱模后一周内完成,以后逐渐趋于稳定,收缩率变化幅度较小,且3种骨料对糯米灰浆收缩率的影响无明显差异。

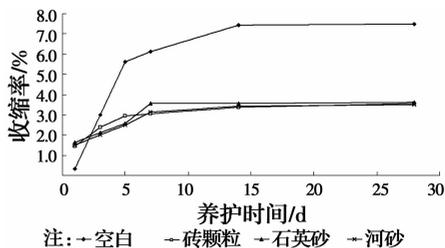


图4 灰浆收缩性与骨料种类的关系

Fig. 4 The relationship between shrinkage of mortar and aggregate types

4) 骨料种类对糯米灰浆抗冻性的影响 根据中华人民共和国行业标准《建筑砂浆基本性能试验方

法标准》(JGJ/T 70—2009)<sup>[11]</sup>,对糯米灰浆进行冻融实验。第1步,将上述制备的糯米灰浆切成半径2.5 cm,高1.5 cm的圆饼状试样,然后将养护60 d的圆饼状样品置于纯净水中浸泡48 h<sup>[11]</sup>,浸泡过程中,应保持水面高于样品表面2.0 cm。第2步,将经过浸泡处理后的灰浆试块置于-30℃的恒温冰箱中冷冻,12 h后取出样品,放入自来水中,待其融化,12 h后观察记录样品表面的变化情况,按此方法对样品进行循环冻融实验,将试样出现明显破坏(分层、裂开、贯通缝)时的循环次数确定为耐冻融次数<sup>[4]</sup>。

根据掺入骨料的糯米灰浆抗冻性实验结果(图5),3种骨料的添加使灰浆的耐冻融循环次数均显著增加,灰浆的抗冻性得到了明显改善。掺入砖颗粒的糯米灰浆耐冻融循环次数高达9次,较之空白样品,其抗冻性提高了125%,耐冻融效果最佳。

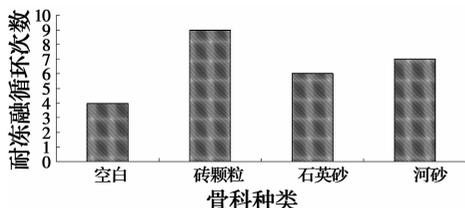


图5 添加不同种类骨料的糯米灰浆的抗冻性实验结果

Fig. 5 Experimental results of frost resistance of glutinous rice mortar with different kinds of aggregates

### 3.2 骨料粒径对糯米灰浆性能的影响

实验选择石英砂作为糯米灰浆的骨料,石英砂粒径大小控制为1~2 mm、2~3 mm、3~5 mm这3种规格,水灰比均为0.8,骨灰比均为1。

1) 骨料粒径对糯米灰浆稠度的影响 图6的稠度测试结果显示,掺入不同粒径骨料的糯米灰浆,其稠度随骨料粒径的增加而减小。当水灰比和骨灰比固定时,骨料粒径的增大,导致其流动性变差,从而使其稠度降低。

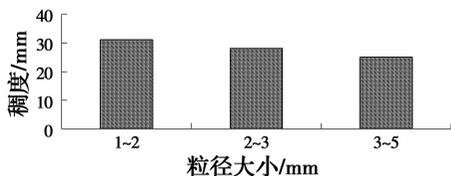


图6 骨料粒径对灰浆稠度的影响

Fig. 6 Effect of aggregate size on consistency of mortar

2) 骨料粒径对糯米灰浆抗压强度的影响 在图7中,当石英砂粒径大小在2~3 mm时,糯米灰浆的28、60 d抗压强度分别为0.3、0.37 MPa,均高于石

英砂粒径为1~2 mm和3~5 mm的糯米灰浆。可见,添加骨料时,骨料的粒径大小宜控制在2~3 mm之间。

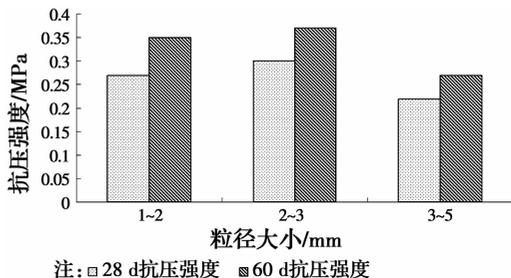


图7 骨料粒径大小与灰浆抗压强度的关系

Fig. 7 The relationship between aggregate size and compressive strength of mortar

3) 骨料粒径对糯米灰浆收缩性的影响 由图8可以看出,随着骨料粒径增大,糯米灰浆的收缩率呈减小趋势。当石英砂的粒径为3~5 mm时,灰浆的7、14 d收缩率较空白样品分别下降了78.7%和74.3%。由此可见,骨料的粒径越大,对灰浆收缩性的改善越明显。

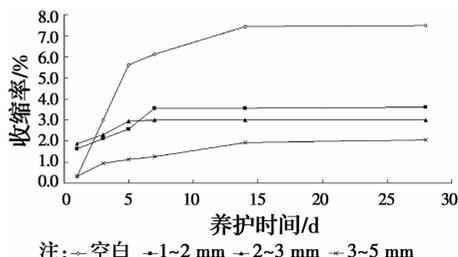


图8 骨料粒径大小与灰浆收缩性的关系

Fig. 8 The relationship between aggregate size and shrinkage of mortar

4) 骨料粒径对糯米灰浆抗冻性的影响 耐冻融实验结果显示(图9),随着骨料(石英砂)粒径的增大,灰浆的抗冻性呈不断降低的趋势。当石英砂粒径为1~2 mm时,灰浆的抗冻性最佳,其耐冻融循环次数高达6次,较空白样品提高了50%;而当石英砂粒径为3~5 mm时,灰浆的耐冻融循环次数下降到3次,其抗冻性尚不如空白样品。

### 3.3 骨灰比(体积比)对糯米灰浆性能的影响

实验选择河砂作为糯米灰浆的骨料,加入河砂的直径在1~2 mm之间,灰浆稠度在30~31 mm之间,探讨骨灰比对灰浆性能的影响,以期选择出合理的骨灰比值。

1) 骨灰比对糯米灰浆抗压强度的影响 在图10中,当骨灰比为2:1时,灰浆的60 d抗压强度最

大,之后,随着骨灰比值的增大,抗压强度逐渐下降。

50%;当骨灰比大于 3:1时,灰浆的抗冻性能下降到跟空白样品相当。

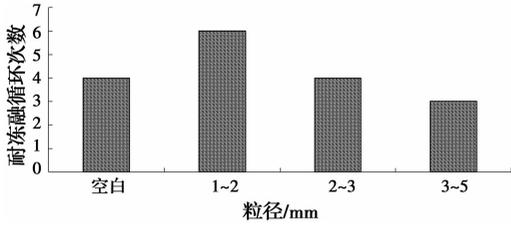


图 9 骨料粒径大小与灰抗冻性的关系  
Fig. 9 The relationship between aggregate size and frost resistance of ash

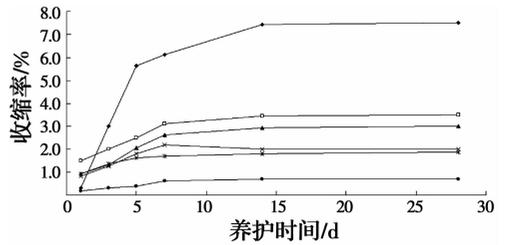


图 11 骨料/灰比值与糯米灰浆收缩性的关系  
Fig. 11 Relationship between aggregate/ash ratio and shrinkage of glutinous rice mortar

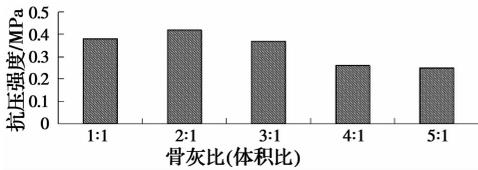


图 10 骨料/灰比值与糯米灰浆抗压强度的关系  
Fig. 10 Relationship between aggregate/ash ratio and compressive strength of glutinous rice mortar

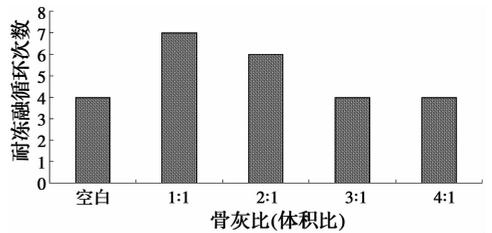


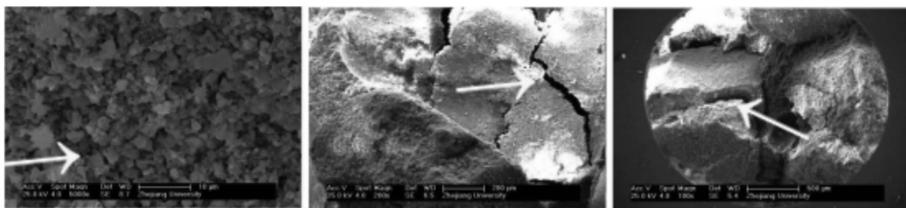
图 12 骨灰比与糯米灰浆抗冻性的关系  
Fig. 12 Relationship between ashration and freeze resistance of gluow rice slurry

2)骨灰比对糯米灰浆收缩性的影响 收缩性实验结果(图 11)显示,随着骨料/灰比值的增大,灰浆的收缩率逐渐下降。当骨料/灰的比值增大到 5:1 时,灰浆的 7、14 d 收缩率较空白样品分别下降 90.2%和 90.5%。可以看出,骨料/灰的比值越大,对灰浆收缩性的改善越明显。

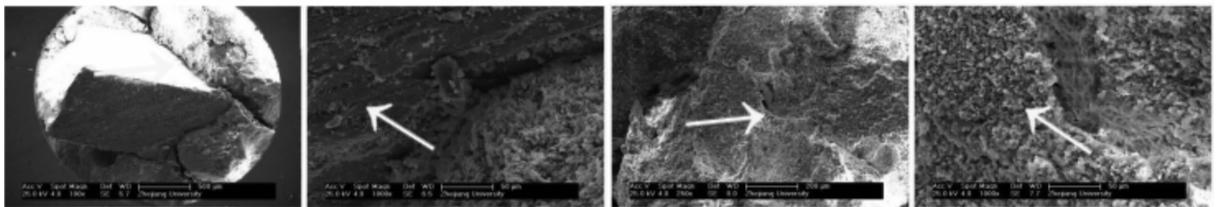
3)骨灰比对糯米灰浆抗冻性的影响 总体来看,随着骨灰比的增大,糯米灰浆的抗冻性逐渐下降(图 12)。当骨灰比值为 1:1 和 2:1 时,骨料的掺入,使糯米灰浆的抗冻性比空白样品分别提高 75%和

### 3.4 微结构与物相分析

3.4.1 SEM 分析 为了深入探讨骨料对糯米灰浆性能的影响机制,分别选择养护 28 d 的掺入砖颗粒、石英砂和河砂 3 种骨料的糯米灰浆样品,采用 SIRION-100 型扫描电镜进行微观结构观察,SEM 观察结果如图 13 所示。



(a)空白(5 000倍) (b)河砂(200倍) (c)河砂(100倍)



(d)石英砂(100倍) (e)石英砂(1 000倍) (f)砖颗粒(250倍) (g)砖颗粒(1 000倍)

注:“↑”箭头标志处为裂缝位置。

图 13 掺入骨料的糯米灰浆的 SEM 照片

Fig. 13 SEM photographs of aggregate-glutinous rice morta

从电镜观察结果可以看出,空白糯米灰浆样品(无骨料)颗粒细小、均匀,结构致密;与之相比较,掺

入骨料的糯米灰浆样品,沿着骨料与灰浆的界面出现不同程度微裂缝,导致其强度出现不同程度的下

降,微裂缝的出现可能和骨料与灰浆之间的粘结力有关。掺入骨料的糯米灰浆孔隙增多,有利于二氧化碳和水分进入灰浆内部,从而增加碳化程度,生成纳米尺度的方解石晶型的细小颗粒,比空白糯米灰浆更加致密、细小,致使其抗冻性高于空白样品。

对于 3 种骨料而言,石英砂多棱角、表面较光滑,河砂少棱角、表面光滑、呈圆形或椭圆形,两者较为光滑的表面,使得灰浆与石英砂和河砂界面的粘接力较弱,从而降低了糯米灰浆的抗压强度;砖颗粒是经人工破碎而成的,表面糙粗、多孔,具有不规则的多角形形貌,易于与灰浆粘结,使砖颗粒与灰浆界面的粘结强度增加,粘结得较为紧密<sup>[16]</sup>,这是掺入砖颗粒的糯米灰浆的抗压强度和抗冻性高于掺入河砂与石英砂的糯米灰浆的原因之一。较之河砂与石英砂,砖颗粒的吸水率高,在糯米灰浆中可以起到“蓄水”作用。此外,砖颗粒具有火山灰性质<sup>[17-19]</sup>,将其作为骨料加入到糯米灰浆中,砖颗粒会与石灰浆发生火山灰反应,生成凝胶状的水化硅酸钙,充填在砖颗粒与石灰浆的界面裂缝中,从而增强砖颗粒与灰浆界面的粘结强度,这是掺入砖颗粒的糯米灰浆抗压强度和抗冻性高于掺入河砂与石英砂的糯米灰浆的另一原因。

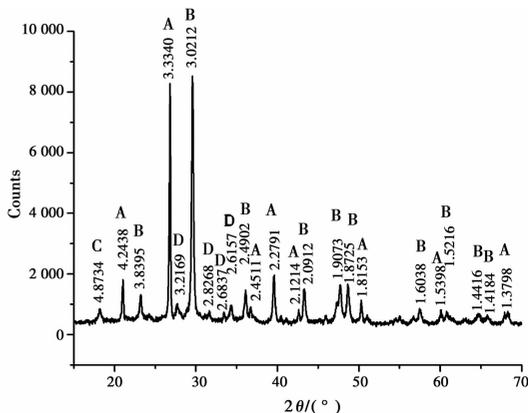
3.4.2 XRD 分析 掺入砖颗粒糯米灰浆的 XRD 衍射图谱如图 14 所示。从图中可以看出,在掺入砖颗粒糯米灰浆中,主要物相为方解石、二氧化硅、氢氧化钙及少量硅酸钙,未见有水化硅酸钙的衍射峰。这可能是因为生成的水化硅酸钙是非晶态的缘故。

对于掺有不同粒径骨料的糯米灰浆而言,随着骨料颗粒粒径的增大,其总表面积变小,从而降低了骨料与灰浆的粘结面积,使骨料表面包裹的灰浆数量减少,导致界面粘结强度降低。此外,骨料粒径的增大容易在骨料与石灰浆界面形成应力集中,使灰浆易产生缺陷。所以,掺有不同粒径骨料的糯米灰浆,其抗压强度和抗冻性会随着骨料粒径的增大而减小。

对于具有不同骨灰比的糯米灰浆来说,骨料的体积掺量增加,石灰浆量就相对减少,致使石灰浆体和骨料界面的粘结质量下降,最终引起掺入骨料糯米灰浆的抗压强度和抗冻性降低。

骨料自身的体积稳定性高,骨料的掺入可抑制石灰浆体的收缩,从而改善糯米灰浆的收缩性能。实验中所掺入的砖颗粒、河砂与石英砂 3 种骨料,其表面特征、颗粒形状虽然不同,但都显著减小了糯米灰浆的收缩率,而且 3 种骨料对石灰浆收缩率的影响并无明显差异。

骨料粒径越大,骨料附近就越容易形成水膜,相当于增大了局部水灰比,使石灰浆内部相对湿度升



注:A:二氧化硅 B:方解石 C:氢氧化钙 D:硅酸钙

图 14 掺入砖颗粒的糯米灰浆的 XRD 图谱

Fig. 14 XRD Atlas of brick granule-glutinous rice mortar

高,从而减小石灰浆的收缩率;糯米灰浆的收缩主要由石灰浆引起,当骨灰比升高时,灰浆中的骨料增多,石灰浆减少,从而由石灰浆引起的收缩就会减小;此外,随着骨料粒径和骨灰比的增大,骨料对石灰浆收缩的抑制作用会增强。掺入骨料的糯米灰浆收缩率随骨料粒径和骨灰比的增大而减小的原因即在于此。

## 4 结论

实验结果表明,砖颗粒、河砂、石英砂 3 种骨料的掺入,使糯米灰浆的收缩性和抗冻性得到较好改善,其中,砖颗粒糯米灰浆的抗冻性较空白样品提高了 125%,综合效果优于石英砂与河砂。砖颗粒表面粗糙、多孔、多棱角,与石灰浆界面的粘结强度高;此外,砖颗粒具有火山灰性,可与灰浆中的石灰材料发生火山灰反应,生成凝胶状的水化硅酸钙,从而进一步提高骨料与石灰浆界面的粘接强度。对实验结果进行综合考虑,建议在砖、石质文物的保护实践中,使用砖颗粒作为糯米灰浆的骨料,将骨料粒径控制在 3 mm 以下,骨料/灰比值控制在 2:1 以下。

## 参考文献:

- [1] 赵佩. 糯米灰浆对遗址土的加固效果及机理研究[D]. 兰州:兰州大学,2017.  
ZHAO P. Study on the effect and mechanism of glutinous rice mortar on site soil reinforcement [D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2017. (in Chinese)
- [2] 魏国锋,张秉坚,方世强. 添加剂对传统糯米灰浆性能的影响及其机理[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 143-149.  
WEI G F, ZHANG B J, FANG S Q. Influence of admixtures on properties of traditional sticky rice-lime mortar and their mechanisms [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2011, 33

- (5): 143-149. (in Chinese)
- [3] 刘效彬. 中国传统灰浆的化学组成特征及粘结机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
LIU X B. Investigation of the chemical characteristics and bonding mechanism of Chinese traditional lime mortars [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [4] 李祖光, 方世强, 魏国锋, 等. 无机添加剂对糯米灰浆性能影响及机理研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(3): 462-468.  
LI Z G, FANG S Q, WEI G F, et al. Influence of inorganic admixture on performance of sticky rice-lime mortar and its mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(3): 462-468. (in Chinese)
- [5] 魏国锋, 周虎, 方世强, 等. 石灰种类对传统糯米灰浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 873-878.  
WEI G F, ZHOU H, FANG S Q, et al. Effect of lime type on properties of traditional sticky rice-lime mortar [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 873-878. (in Chinese)
- [6] 崔源声. 天然水硬性石灰水泥发展报告[C]//2013 中国水泥技术年会暨第十五届全国水泥技术交流会, 2013.  
CUI Y S. Study on the development of natural hydraulic lime cement [C]// 2013 China Cement Technology Annual Conference and the Fifteenth National Cement Technology Exchange Conference Proceeding, 2013. (in Chinese)
- [7] 李博, 宋燕, 马清林, 等. 中国传统灰土灰浆材料改性试验研究[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2013, 19(4): 18-24.  
LI B, SONG Y, MA Q L, et al. Studies on modified Chinese traditional lime-clay mortar [J]. Journal of Guangxi University for Nationalities (Natural Science Edition), 2013, 19(4): 18-24. (in Chinese)
- [8] 秦拥军, 刘志刚, 于江. 分类再生细骨料对建筑砂浆性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2014(11): 127-131.  
QIN Y J, LIU Z G, YU J. Classification recycled fine aggregate impact on the performance of building mortar experimental study [J]. Concrete, 2014(11): 127-131. (in Chinese)
- [9] VYŠVAŘIL M, ŽIŽLAVSKÝ T, BAYER P. The effect of aggregate type on the properties of lime mortars [J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 861: 141-148.
- [10] 魏国锋, 方世强, 张秉坚, 等. 传统糯米灰浆碳化过程中 Liesegang 环的形成机理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2181-2184.  
WEI G F, FANG S Q, ZHANG B J, et al. Study on the mechanism of liesegang pattern development during carbonating of traditional sticky rice-lime mortar [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(8): 2181-2184. (in Chinese)
- [11] 郑晓平, 魏国锋, 张秉坚. 自制硅酸盐对传统糯米灰浆性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(4): 128-133.  
ZHENG X P, WEI G F, ZHANG B J. Influence of prepared silicate on properties of traditional sticky rice-lime mortar [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(4): 128-133. (in Chinese)
- [12] 周虎. 传统糯米灰浆在砖石质文物保护中的应用[D]. 合肥: 安徽大学, 2016.  
ZHOU H. Study of sticky rice-lime mortar for the conservation of stone culture relics [D]. Hefei: Anhui University, 2016. (in Chinese)
- [13] 建筑砂浆基本性能试验方法: JGJ 70 — 2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Standard for test method for basic properties of construction mortar: JGJ 70-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [14] BINDIGANAVILE V, ISLAM M T, SURESH N. Evaluation of water permeability in fibre reinforced hydraulic lime mortar intended for conservation [J]. Key Engineering Materials, 2016, 711: 630-637.
- [15] 张伟潼, 江守恒, 王洪生. 粗集料特征参数对混凝土自收缩影响[J]. 低温建筑技术, 2012(4): 11-12.  
ZHANG W T, JIANG S H, WANG H S. Effect of characteristic parameter of coarse aggregate on autogenous shrinkage of concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, (4): 11-12. (in Chinese)
- [16] 李新建, 韩涛, 靳秀芝, 等. 废黏土砖颗粒对砂浆强度的影响[J]. 建材技术与应用, 2011(3): 1-3.  
LI X J, HAN T, JIN X Z, et al. Influence of waste clay brick particles on strength of mortar [J]. Research & Application of Building Materials, 2011(3): 1-3. (in Chinese)
- [17] OLIVEIRA M A, AZENHA M, LOURENÇO P B, et al. Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 38-48.
- [18] GRILO J, FARIA P, VEIGA R, et al. New natural hydraulic lime mortars - Physical and microstructural properties in different curing conditions [J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 378-384.
- [19] LIU X B, MA X, ZHANG B J. Analytical investigations of traditional masonry mortars from ancient city walls built during Ming and Qing dynasties in China [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2016, 10(5): 663-673.