

添加剂对传统糯米灰浆性能的影响及其机理

魏国锋^{1a,1b}, 张秉坚^{1a,1b}, 方世强²

(1. 浙江大学 a. 文物与博物馆学系; b. 化学系, 杭州 310027;

2. 浙江工业大学 化学工程与材料学院, 杭州 310014)

摘要:糯米灰浆是中国古代建筑史上的一项重要科技发明,为了使该传统工艺科学化地为现代文化遗产保护服务,采用 SEM 和 XRD 等技术手段,探讨了纸筋、硫酸铝和二水石膏 3 种添加剂对糯米灰浆性能的影响及其机理。结果表明:纸筋对糯米灰浆抗压强度和耐冻融性的改进最为明显;硫酸铝对改善糯米灰浆的干燥收缩性效果最佳;二水石膏的加入,对样品的耐冻融性并无改进,而且,随着其含量的增加,样品的抗压强度和表面硬度增幅降低。在文化遗产保护实践中,建议采用 6% 的硫酸铝或 3% 的纸筋作为糯米灰浆的添加剂。

关键词:糯米灰浆;纸筋;硫酸铝;二水石膏

中图分类号:TU58 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)05-0143-07

Influence of Admixtures on Properties of Traditional Sticky Rice-lime Mortar and Their Mechanisms

WEI Guo-feng^{1a,1b}, ZHANG Bing-jian^{1a,1b}, FANG Shi-qiang²

(1a. Department of Cultural Relics and Museology; 1b. Department of Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China;

2. School of chemical engineering and materials, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, P. R. China)

Abstract: On the basis of characterization of property of traditional sticky rice-lime mortar, influence of admixtures (aluminum sulfate, gypsum, paper fiber) on properties of traditional sticky rice-lime mortar and their scientific mechanisms are discussed by means of SEM and XRD. It is indicated that paper fiber is the most effective admixture to endure freezing-thawing cycles and increase compressive strength of sticky rice-lime mortar due to disorderly distribution and water-retaining of paper fiber, and the use of aluminum sulfate reduces dry shrinkage values and improves compressive strength because of formation of ettringite in sticky rice-lime mortar. Gypsum is proved to be ineffective to modify freezing-thawing cycles of sticky rice-lime mortar. Meanwhile, compressive strength and surface hardness of sticky rice-lime mortar with gypsum decline as gypsum amounts. It is suggested that 6% aluminum sulfate or 3% paper fiber can be used as admixtures of sticky rice-lime mortar in conservation of cultural relics.

Key words: sticky rice-lime mortar; paper fiber; aluminum sulfate; gypsum

石灰是人类最早使用的人造胶凝材料之一,在古代建筑、城墙、桥梁、堤坝等工程的建造中应用广泛。19 世纪早期,水泥的发明及其广泛使用,导致对石灰的需求大大降低。然而,在文化遗产保护领

收稿日期:2011-03-16

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2010BAK67B16);浙江省文物保护专项(浙财教[2010]264 号);中国博士后科学基金资助项目(20100471728)

作者简介:魏国锋(1975-),男,博士,主要从事不可移动文物保护与科技考古研究,(E-mail)gfwei@zju.edu.cn。
张秉坚(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)zhangbiji@zju.edu.cn。

域,水泥的强度过大、孔隙度过低、与古建筑等文物本体材料的不兼容性、在使用中会引入可溶性盐等问题^[1],逐渐被文物保护工作者所认识。近年来,“尽可能的使用原来的材料和工艺技术”已成为文化遗产保护的一条基本原则。保存至今的古代建筑等不可移动文物在建造过程中大都使用了石灰基胶凝材料^[2]。它们历经千百年的风雨吹蚀,仍然坚硬完整,充分验证了传统石灰基胶凝材料的耐久性及良好的强度。鉴于传统石灰工艺在耐久性、强度、与建筑本体的和谐性等方面的突出优点,传统石灰工艺逐渐成为文物保护工作者研究和利用的重点领域之一。

中国传统石灰工艺的一个鲜明特点就是在石灰中添加有机材料,例如糯米浆、杨桃藤汁、蓼叶汁、白芨浆、蛋清和动物血等^[3-4],从而形成了以糯米灰浆为代表的中国传统灰浆技术。作为中国古代建筑史上的一项重要科技发明,糯米灰浆至迟在南北朝时期已经发展成为较为成熟的技术,在中国古代墓葬、城建和水利工程等领域有着广泛的应用。课题组在前期工作中,采用分析纯氢氧化钙和糯米为原料,对传统糯米灰浆的力学性能、科学原理及其在文化遗产保护中的应用等方面进行了初步研究,取得了一系列重要成果^[5-7]。

然而,由于石灰本身存在收缩性较大、硬化过程中容易出现裂纹、早期强度较低等问题,在以石灰为基料制备的糯米灰浆中,这些问题并未得到明显改善。文献调研显示,为了改善石灰的收缩性,中国古代糯米灰浆在使用中有添加明矾的现象^[8];为了提高灰浆的抗裂性能,明代宋应星的《天工开物》中就有关于添加纸筋的记载,此技术至今仍在云南白族民居等建筑中使用^[9]。根据文献记载和实践考察,选取了传统灰浆中经常使用的纸筋、硫酸铝(明矾的替代品,以避免钾盐的危害)和二水石膏三种添加剂,探讨其对传统糯米灰浆性能的影响及其机理,从而对传统糯米灰浆配方和性能进行科学改进。

1 实验材料与仪器

1.1 实验原材料

实验所需材料包括:工业灰钙粉(氢氧化钙含量 $\geq 90\%$),浙江建德李家新兴涂料粉剂厂;硫酸铝($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)和二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),分析纯,国药集团化学试剂有限公司;北大荒牌糯米和洁伴牌卫生纸(主要成分为纸筋),超市采购。

1.2 实验仪器

糯米灰浆的制备和性能表征采用以下仪器设备:ZH·DG-80型振动仪;水泥标准稠度凝结测定仪,江苏东台迅达路桥工程仪器厂;LX-A型硬度计,无锡市前洲测量仪器厂;自制抗压强度测试仪;扫描电镜,SIRION-100,FEI(美国);XRD,AXS D8 ADVANCE(德国)。

1.3 糯米灰浆制备

1.3.1 糯米浆的熬制 用研磨机预先将糯米磨成粉,按配制浓度为5%的糯米浆所需的糯米量和水量,分别称取一定质量的糯米粉和去离子水,将两者置于电饭锅内混合均匀。记录此时糯米浆在电饭锅内的刻度,加热煮沸4 h。其间,定时加水,使糯米浆的浓度保持不变。

1.3.2 无添加剂糯米灰浆的制备 称取一定量的灰钙粉放入搅拌桶中,加入灰钙粉质量0.84倍的5%糯米浆,用机械搅拌器搅拌至稠度不变。所配糯米灰浆的水灰比为0.8,氢氧化钙/糯米=0.042。

1.3.3 有添加剂糯米灰浆的制备 纸筋-糯米灰浆的制备:先将卫生纸撕成细条,放入热水中浸泡一段时间。待其泡烂后挤掉多余水分,然后加入到灰钙粉质量0.84倍的5%糯米浆中搅拌均匀。再将含有纸筋的糯米浆加入到所称取的灰钙粉中搅拌至稠度不变。所配糯米灰浆的水灰比为0.8,氢氧化钙/糯米=0.042。

硫酸铝-糯米灰浆的制备:称取灰钙粉质量0.84倍的5%糯米浆,将一定量的硫酸铝加入到糯米浆中,将其搅拌均匀后,再将含有硫酸铝的糯米浆加入到所称取的灰钙粉中搅拌至稠度不变。所配糯米灰浆的水灰比为0.8,氢氧化钙/糯米=0.042。

二水石膏-糯米灰浆的制备:同硫酸铝-糯米灰浆的制备。

2 糯米灰浆性能表征

2.1 稠度测试

2.1.1 糯米灰浆的搅拌时间与稠度的关系 采用工业灰钙粉,按1.3.2所述方法制备糯米灰浆,控制灰浆的水灰比为0.8。在搅拌过程中,每隔3 min测一次灰浆的稠度,直到稠度不变为止,绘制糯米灰浆稠度与搅拌时间的关系曲线,如图1所示。稠度测试参照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》,采用水泥标准稠度凝结测定仪进行测试。

从图1可以看出,在开始阶段,糯米灰浆的稠度

值随搅拌时间的增加而升高。当搅拌至 18 min 左右时,灰浆的稠度值已基本稳定,不再随搅拌时间的增加而变化。

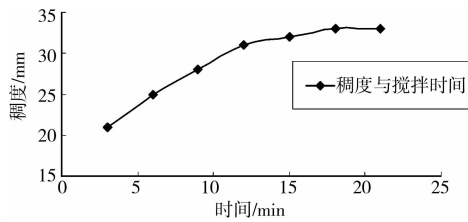


图1 糯米灰浆的稠度与搅拌时间的关系曲线

2.1.2 不同添加剂的用量对糯米灰浆稠度的影响

采用工业灰钙粉,按 1.3.3 所述方法制备分别加入了不同含量硫酸铝、二水石膏和纸筋 3 种添加剂的糯米灰浆,控制灰浆的水灰比为 0.8。根据图 1 的测试结果,搅拌 18 min 后测试每种灰浆的稠度,并绘制糯米灰浆稠度与添加剂含量的关系曲线,如图 2 所示。为便于比较,将空白样品(无添加剂的糯米灰浆)的稠度值也列于图中。

图 2 的结果显示,糯米灰浆的稠度值随着 3 种添加剂用量的增加而减小。其中,二水石膏的加入使糯米灰浆的稠度值减小幅度最大。而硫酸铝的加入,在其用量较低(2%)时,糯米灰浆的稠度值与空白样品相比较稍有升高,这可能是其中 $Al_2(SO_4)_3 \cdot$

$18H_2O$ 含有较多结晶水的缘故。

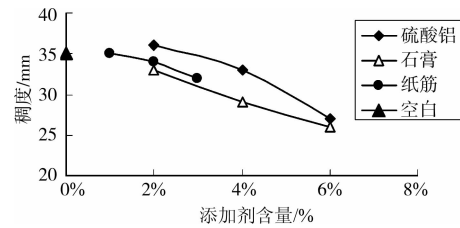


图2 不同添加剂用量与糯米灰浆稠度的关系曲线

2.2 抗压强度测试

参照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》,采用规格为 50.0 mm×50.0 mm×50.0 mm 的三联抗压试模,制备糯米灰浆的立方体抗压强度试块。制备试块前,在模具内壁均匀的涂抹了一薄层脱模剂。试块放置 1 d 后脱模,脱膜后的试块完好无损。将脱膜后的试块在温度为 20~25℃、相对湿度在 60%~80% 的室内条件下自然养护一段时间。养护过程中,对试块表面定期喷洒一定量的去离子水,以保证碳化过程的顺利进行。

抗压强度测试时,将待测试块固定在抗压强度测试仪的样品台上,调整仪器,使样品的上表面与压力竿充分接触,然后以 0.02 MPa/s 的加载速度加压,记录样品破坏时仪器的最高读数,即为抗压强度数值。测试结果见表 1。

表1 不同添加剂糯米灰浆的抗压强度和表面硬度测试结果

| 石灰种类 | 添加剂 | | 28 d 抗压强度 | | 90 d 抗压强度 | | 28 d 表面硬度 | |
|-------|------|------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| | 种类 | 含量/% | 强度值/MPa | 强度增幅/% | 强度值/MPa | 强度增幅/% | 硬度值/HA | 硬度增幅/% |
| 工业灰钙粉 | 空白 | 0 | 0.26 | | 0.58 | | 41.7 | |
| | 硫酸铝 | 2 | 0.32 | 23 | 0.72 | 24 | 43.0 | 3 |
| | | 4 | 0.46 | 77 | 0.90 | 55 | 52.4 | 26 |
| 工业灰钙粉 | 二水石膏 | 6 | 0.44 | 69 | 1.12 | 93 | 57.7 | 38 |
| | | 2 | 0.32 | 23 | 0.84 | 45 | 66.6 | 60 |
| | | 4 | 0.42 | 62 | 0.80 | 40 | 63.8 | 53 |
| | 纸筋 | 6 | 0.32 | 23 | 0.76 | 31 | 45.3 | 9 |
| | | 1 | 0.82 | 215 | | | 43.4 | 4 |
| | | 2 | 0.96 | 269 | 1.06 | 83 | 50.3 | 21 |
| | 3 | 1.18 | 354 | 1.24 | 114 | 54.6 | 31 | |

表 1 的测试结果显示,加入了添加剂的样品,其 28 d 和 90 d 抗压强度明显高于空白样品。其中,纸筋-糯米灰浆强度提高的幅度最大,28 d 和 90 d 抗压强度分别比空白样品最大提高了 354% 和 114%;较之空白样品,硫酸铝-糯米灰浆的 28 d 和 90 d 抗压强度分别最大提高了 77% 和 93%;二水石膏-糯米灰浆的抗压强度提高的幅度最小,28 d 和 90 d 抗压强度分别比空白样品最大仅提高了 62% 和 45%。

同时,对每种添加剂而言,硫酸铝-糯米灰浆和纸筋-糯米灰浆的抗压强度增幅随着添加剂含量的增加而升高;二水石膏-糯米灰浆的 90 d 抗压强度增幅,随着添加剂含量的增加而降低。

2.3 表面硬度测试

将拌好的糯米灰浆置入内径为 5 cm,高度为 1.5 cm 的圆饼状模具内,在 ZH·DG-80 型振动仪上振动 5 s,并将表面抹平,放置 1 d 后脱模。试块

脱模后完好无损,将之置于室内条件(温度 20~25℃,相对湿度 60%~80%)下自然养护 28d,采用 LX-D 型硬度计测试其表面硬度。

测试结果(表 1)表明,硫酸铝-糯米灰浆、二水石膏-糯米灰浆和纸筋-糯米灰浆的 28 d 表面硬度值,较之空白样品分别最大提高了 38%、60%和 31%。对每种添加剂而言,硫酸铝-糯米灰浆和纸筋-糯米灰浆的表面硬度增幅随着添加剂含量的增加而升高,而二水石膏-糯米灰浆的表面硬度增幅随着添加剂含量的增加而降低,这与它的抗压强度增幅随着添加剂含量的变化而改变的规律类似。

2.4 收缩性实验

参照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》,采用规格为 40 cm×40 cm×160 cm 的水泥胶砂试模(ISO)制备收缩实验用试块。制备试块前,先在试模内壁均匀的涂抹一薄层脱模剂,然后将拌好的糯米灰浆装入试模中,在 ZH·DG-80 型振动仪上振动 8 s,并将表面抹平,放置 1 d 后脱模并测其长度。所有试块在同一天制备完成。脱模后的试块完好无损,将之置于室内环境中自然养护 7 d,测试其养护 7 d 时的长度,并计算其 7 d 收缩率。养护期内,室内温度为 20~25℃,相对湿度在 60%~70%之间。收缩性实验结果如表 2 所示。

表 2 不同添加剂糯米灰浆的收缩性实验结果

| 实验编号 | 添加剂 | | 脱模后长度/mm | 7 d 长度/mm | 7 d 收缩率/% |
|------|------|------|----------|-----------|-----------|
| | 种类 | 含量/% | | | |
| 1 | 空白 | 0 | 159 | 150 | 6.3 |
| 2 | 硫酸铝 | 2 | 160 | 150 | 6.3 |
| 3 | 硫酸铝 | 4 | 159 | 152 | 5.0 |
| 4 | 硫酸铝 | 6 | 160 | 154 | 3.8 |
| 5 | 硫酸铝 | 8 | 160 | 149 | 6.9 |
| 6 | 二水石膏 | 2 | 159 | 151 | 5.6 |
| 7 | 二水石膏 | 4 | 159 | 151 | 5.6 |
| 8 | 二水石膏 | 6 | 160 | 150 | 6.3 |
| 9 | 纸筋 | 1 | 160 | 150 | 6.3 |
| 10 | 纸筋 | 2 | 160 | 150 | 6.3 |
| 11 | 纸筋 | 3 | 160 | 151 | 5.6 |
| 12 | 纸筋 | 5 | 160 | 149 | 6.9 |

从表 2 的结果可以看出,硫酸铝的加入使糯米灰浆的干燥收缩值减小的幅度最大。加入 6% 的硫酸铝,可使糯米灰浆的 7 d 干燥收缩率减小到 3.8%,较之空白样品降低了 40%。二水石膏和纸筋的加入,对糯米灰浆干燥收缩值减小的幅度不如

硫酸铝,加入 2% 和 4% 二水石膏使糯米灰浆的 7 d 收缩率减小到 5.6%,较之空白样品降低了 11%。而加入纸筋的 7 d 最小收缩率较空白样品也是只降低了 11%。

2.5 耐冻融循环

将拌好的糯米灰浆制备成内径为 5 cm,高度为 1.5 cm 的圆饼状样品,在室内条件下自然养护 60 d 后进行耐冻融实验。养护过程中,对试块表面定期喷洒一定量的去离子水,以保证碳化过程的顺利进行。进行耐冻融循环实验时,首先将所有样品置入常温去离子水中浸泡 12 h,浸泡时水面应至少高出试样上表面 20 mm。将浸泡过的试样取出放入-30℃的冰箱中进行冷冻,12 h 后取出迅速放入常温去离子水中进行融化,水中融化 12 h 后,观察并记录样品表面的变化情况,以样品表面出现开裂时的循环次数确定为耐冻融次数,然后再置入常温去离子水中浸泡。按此方法循环冻融共计 10 次。耐冻融循环实验前样品表面的状况见图 3(a),10 次冻融循环后样品的状况见图 3(b)。不同添加剂-糯米灰浆样品的耐冻融循环次数如图 4 所示。

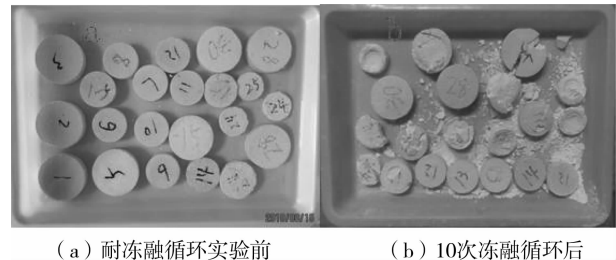


图 3 各种添加剂-糯米灰浆样品耐冻融循环实验前后的表面状况

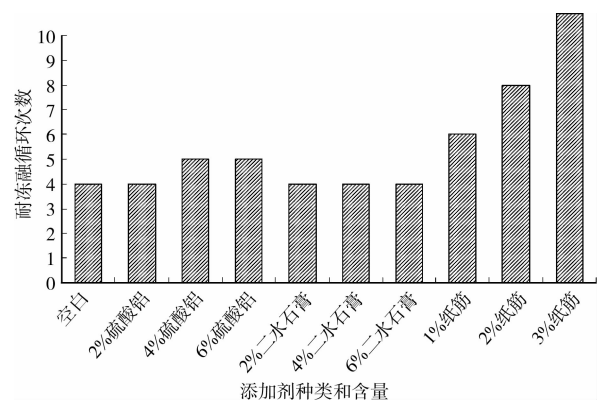


图 4 不同添加剂-糯米灰浆样品的耐冻融循环实验结果

根据图 4 的实验结果,纸筋-糯米灰浆的耐冻融性最好,其耐冻融性随着纸筋含量的增加而增强,3% 的纸筋-糯米灰浆样品在 10 个冻融循环后仍然完好无损;在硫酸铝-糯米灰浆和二水石膏-糯米灰

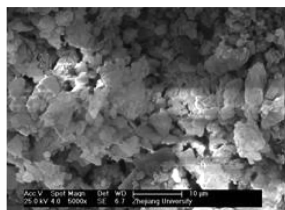
浆中,除4%和6%的硫酸铝-糯米灰浆样品的耐冻融性稍有改善外,其它样品的耐冻融性并无明显改善,经历4个冻融循环就开始被破坏。

3 微结构与成分分析

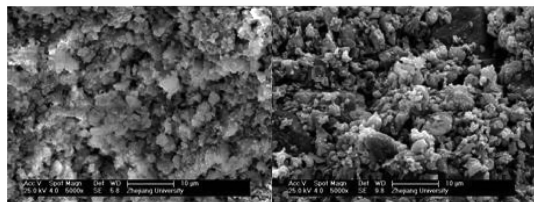
3.1 SEM分析

前期研究发现,糯米浆对碳酸钙矿化过程具有生物调控作用^[5-7]。在糯米浆的参与下, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 矿化反应生成的碳酸钙是纳米尺度的方解石晶型的细小颗粒,比不加糯米浆的结果要细小和致密得多。

对养护28d的糯米灰浆试块,选择无添加剂的空白样品、6%硫酸铝-糯米灰浆、6%二水石膏-糯米灰浆和1%纸筋-糯米灰浆,采用钢锯切割下来一小块,表面喷金后采用美国FEI公司制造的SIRION-100扫描电镜(SEM)进行观察。SEM观察结果如图5-6所示。

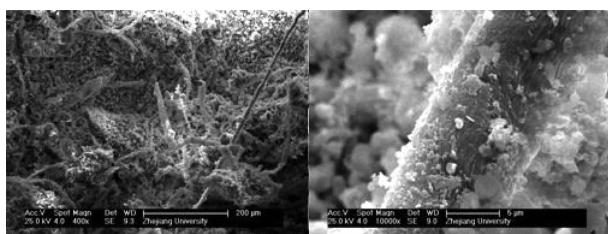


(a) 空白样品(5000倍)



(b) 6%硫酸铝-糯米灰浆 (5000倍) (c) 6%二水石膏-糯米灰浆 (5000倍)

图5 无添加剂糯米灰浆、6%硫酸铝-糯米灰浆和6%二水石膏-糯米灰浆的SEM照片



(a) 放大400倍 (b) 放大10000倍

图6 纸筋糯米灰浆的SEM照片

根据图5的SEM照片,无添加剂的糯米灰浆样品,其颗粒呈细小片状交联,较为疏松(图5a);含有硫酸铝和二水石膏的糯米灰浆结构较为致密,其细

小的颗粒紧密交错,相互咬合(图5(b)-5(c))。相关研究表明,多孔材料的孔隙度与其强度、耐冻融性等性能成负相关^[10-11]。因此,硫酸铝-糯米灰浆和二水石膏-糯米灰浆的致密结构,是其抗压强度、表面硬度及耐冻融性等物理性能得以提高的微观解释。

图6为纸筋糯米灰浆的SEM照片,在放大400倍时(图6(a)),可以看到在灰浆中呈乱向交错分布的纸筋纤维。纸筋的纤维素纤维内含有的空腔,能够在灰浆硬化初期储存部分自由水,从而在硬化过程中可避免水分过快蒸发,对糯米灰浆的早期干燥收缩性有一定改善^[12]。纸筋-糯米灰浆的7d收缩率较低,原因即在于此,这有效降低了糯米灰浆早期收缩开裂的风险。石灰的碳化过程需要水分的参与^[13],纸筋纤维空腔中储存的水分,可使灰浆的碳化程度更高,结构更加致密,从而导致了其抗压强度、表面硬度和耐冻融性的提高。纸筋纤维在糯米灰浆中的乱向交错分布(图6(a)),可在灰浆中起到拉结和骨架作用,对灰浆强度、耐冻融性和抗裂性的提高有一定的补充增强作用。同时,纸筋纤维表面附着的大量糯米灰浆颗粒(图6(b)),增加了糯米灰浆与纸筋纤维之间的握裹力,可进一步加强这种补充增强作用,提高其抗裂性能。

3.2 XRD分析

为了进一步了解添加剂对糯米灰浆性能的影响,在6%硫酸铝-糯米灰浆、6%二水石膏-糯米灰浆和1%纸筋-糯米灰浆样品的外部和内部分别取样,用玛瑙研钵研磨后,采用德国制造的X射线衍射光谱仪(AXS D8 ADVANCE),进行XRD分析,测试波长为1.54埃。分析结果分别见图7-9。

据图7可知,采用灰钙粉制备的无添加剂糯米灰浆,外部样品方解石衍射峰的强度高于内部样品方解石的强度,表明外部的碳化程度相对较高;而纸筋-糯米灰浆的外部 and 内部衍射图谱基本一致,主要成份均为方解石和一定量的氢氧化钙,表明其外部和内部的碳化程度相当,其整体碳化程度,高于无添加剂的糯米灰浆样品。较高的碳化程度,是纸筋-糯米灰浆强度较高的本质原因。前已述及,纸筋纤维的空腔可以在灰浆硬化初期储存一定的自由水。在糯米灰浆碳化过程中,灰浆中的水分不断被消耗。此时,吸附在纤维中的水分就开始释放,在糯米灰浆中起到了“内养护”的保水作用,为碳化反应的顺利进行提供了必要的水分补充,从而使纸筋-糯米灰浆的碳化程度得以提高。

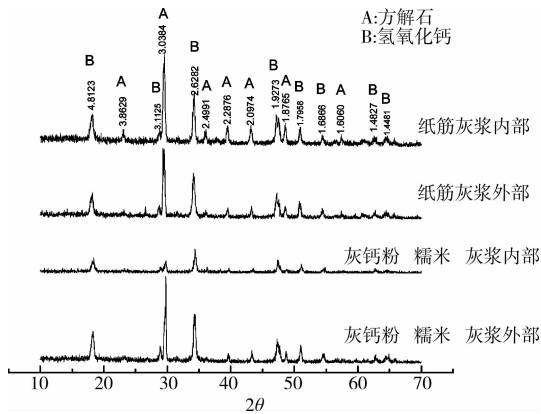


图 7 1%纸筋-糯米灰浆和无添加剂的灰钙粉糯米灰浆的 XRD 图谱

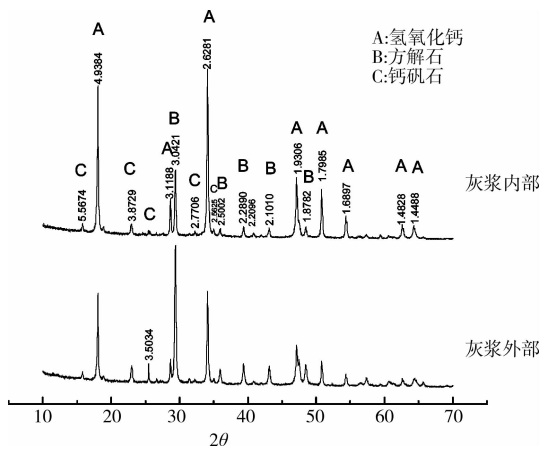


图 8 6%硫酸铝-糯米灰浆的 XRD 图谱

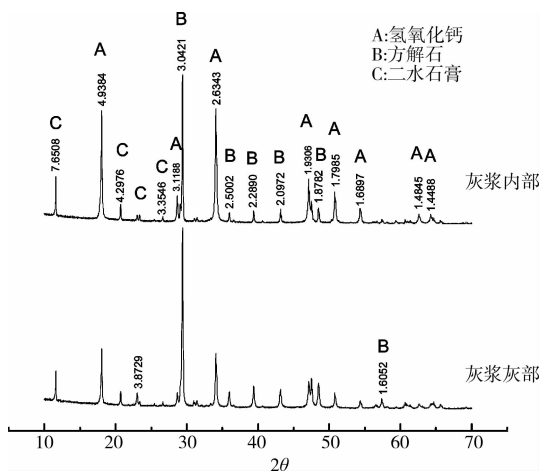


图 9 6%二水石膏-糯米灰浆的 XRD 图谱

硫酸铝-糯米灰浆的衍射图谱(图 8)表明,其外部样品和内部样品的主要物相均为方解石和氢氧化钙,同时,均可见少量钙矾石的生成。从衍射峰的角度来看,灰浆外部的方解石含量明显高于内部,表明外部的碳化程度相对较高。研究表明,钙矾石晶体在形成过程中,其固相体积可增加 120% 左

右^[14-15]。其固相体积的膨胀,对糯米灰浆的干燥收缩在一定程度上起到了有效的补偿,使其收缩性大大降低;同时,钙矾石的体积膨胀,填充了部分孔隙,使灰浆孔隙量减少,结构较为致密,使灰浆的表面硬度和抗压强度大大提高。硫酸铝-糯米灰浆中钙矾石的生成,是其表面硬度、抗压强度和收缩性的得以改善的本质原因。

二水石膏-糯米灰浆的衍射图谱(图 9)显示,其外部样品和内部样品的主要物相均为方解石和氢氧化钙,同时,均含有少量二水石膏。从方解石和氢氧化钙衍射峰的强度来看,灰浆外部的碳化程度相对较高。结合扫描电镜的结果,二水石膏的加入,没有新的物相生成,它只是改善了糯米灰浆的孔隙度,使得灰浆结构更为致密,含水量大大减少,从而提高了其抗压强度和表面硬度,降低了其干燥收缩值。二水石膏的硬度较低^[16],这可能是二水石膏-糯米灰浆的抗压强度和表面硬度增幅随二水石膏含量的增加而呈现下降趋势的原因。同时,因为二水石膏的加入仅仅改善了灰浆的孔结构,所以其对灰浆的干燥收缩性的改善不如硫酸铝。

4 结 论

实验结果表明,纸筋对糯米灰浆抗压强度、耐冻融性和早期干燥收缩性有较好的改善。它的加入使灰浆的 28 d 和 90 d 抗压强度分别比空白样品最大提高了 354% 和 114%,耐冻融性可提高至 10 个循环仍完好无损。纸筋纤维空腔所储存的自由水,在灰浆内部起到“内养护”的作用,从而提高灰浆的碳化程度,使其结构更加致密,这是其早期干燥收缩性、抗压强度、耐冻融性改进的重要原因。同时,纸筋纤维在糯米灰浆中的乱向交错分布,对糯米灰浆强度和耐冻融性的提高有补充增强作用。

硫酸铝对改善糯米灰浆的干燥收缩性效果最佳,6%的硫酸铝的加入,使得糯米灰浆的 7 d 收缩率减少到 3.8%,较之空白样品降低了 40%。同时,硫酸铝的加入使糯米灰浆的抗压强度有较大程度提高。在硫酸铝-糯米灰浆的硬化过程中,钙矾石晶体的生成及其固相体积膨胀,填充了灰浆的部分孔隙,使灰浆的结构更为致密,这是其强度提高和干燥收缩性得以改善的本质原因。

二水石膏的加入对糯米灰浆抗压强度和表面硬度的提高有一定作用。然而,随着二水石膏含量的增加,其抗压强度和表面硬度增幅逐渐降低,耐冻融

性并未得到改进。因而,不建议采用二水石膏作为糯米灰浆的添加剂。

综上所述,在古代建筑、桥梁、水利工程等砖石质文化遗产保护实践中,建议采用6%的硫酸铝或3%的纸筋作为糯米灰浆的添加剂。

参考文献:

- [1] SEABRA M P, PAIVA H, LABRINCHA J A, et al. Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars [J]. *Construction and Building Materials*, 2009,23:1147-1153.
- [2] KEVIN BECK, MUZAHIM AL-MUKHTAR. Formulation and characterization of an appropriate lime-based mortar for use with a porous limestone[J]. *Environ Geol*, 2008,56:715-727.
- [3] 李泓铭. 传统灰浆材料之特性与配比最佳化之探讨 [D]. 台湾:国立成功大学,2005.
- [4] 马涛,白崇斌,齐扬. 中国古建油饰彩画保护技术及传统工艺科学化研究[J]. *文博*,2009(6):412-421.
MA TAO, BAI CHONG-BIN, QI YANG. Studies on the traditional techniques and the conservation method of polychrome paintings on wooden structures of Chinese traditional buildings[J]. *Wen Bo*, 2009(6): 412-421.
- [5] YANG F, ZHANG B, MA Q. Study of sticky rice-lime mortar technology for the restoration of historical masonry construction[J]. *Acc. Chem. Res.*, 2010,43(6):936-944.
- [6] 曾余瑶,张秉坚,梁晓林. 传统建筑泥灰类加固材料的性能研究与机理探讨[J]. *文物保护与考古科学*,2008,20(2):1-7.
ZENG YU-YAO, ZHANG BINGJIAN, LIANG XIAOLIN. Study on characteristics and consolidation mechanism of historical mortar materials[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2008, 20(2): 1-7.
- [7] ZENG YUYAO, ZHANG BINGJIAN, LIANG XIAOLIN. A case study and mechanism investigation of typical mortars used on ancient architecture in China[J]. *Thermochimica Acta*, 2008,473: 1-6.
- [8] 张慧,万俐. 江阴黄山小石湾炮台遗址修复用灰土最佳配方筛选研究[J]. *文物保护与考古科学*,2010,22(2):23-26.
ZHANG HUI, WAN LI. Research on the optimal formula of "lime-soil" for restoration of the Xiaoshi harbor fort site at Huangshan, Jiangyin[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2010, 22(2): 23-26.
- [9] 李莉,刘娅,周敏. 从地域技术视角剖析云南白族传统室内装饰艺术[J]. *广西轻工业*,2010(7):93-94.
LI LI, LIU YA, ZHOU MIN. Analyzing the traditional and indoor decoration art of Bai nationality from the angle of region[J]. *Guangxi Journal of Light Industry*, 2010(7): 93-94.
- [10] PANDEY S P, SHARMA R L. The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000,30: 19-23.
- [11] LANAS J, ALVAREZ J I. Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior[J]. *Cement and Concrete Research*,2003,33:1867-1876.
- [12] IZAGUIRRE A, LANAS J, ÁLVAREZ J I. Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(7): 1081-1095.
- [13] PAIVA H, VELOSA A, VEIGA R, et al. Effect of maturation time on the fresh and hardened properties of an air lime mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010,40:447-451.
- [14] AZIZ M ABD EI, ALEEM S ABD EI, HEIKAL M, et al. Hydration and durability of sulphate-resisting and slag cement blends in Caron's Lake water[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005,35:1592-1600.
- [15] LANAS J, SIRERA R, ALVAREZ J I. Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments[J]. *Thermochimica Acta*, 2005,429:219-226.
- [16] 钱觉时. 建筑材料学[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2007.