

文章编号:1005-1538(2011)02-0001-07

· 研究报告 ·

水硬石灰在花山岩画加固保护中的应用研究

周 霄¹, 胡 源¹, 王金华¹, 戴仕炳²

(1. 中国文化遗产研究院, 北京 100029; 2. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092)

摘要: 水硬石灰兼具石灰和水泥的优点, 低收缩、耐盐、适中的抗压和抗折强度、水溶盐含量低, 同时与传统的砖石建筑兼容性好, 是一种天然、无污染、耐老化的无机材料。本工作针对花山岩画的开裂特点制订出相应的力学参数要求, 配制出两种不同的水硬石灰砂浆, 并对这两种砂浆的力学性能进行了分析。同时探讨了不同养护条件对水硬石灰砂浆拉拔强度的影响。现场试验结果说明, 填补粘结材料可以提供一定的粘结强度, 并且具有使用方便, 污染小的特点, 可用于花山岩画开裂岩体应急保护加固处理。

关键词: 水硬石灰; 拉拔强度; 养护条件

中图分类号: K879.4 **文献标识码:** A

0 引言

花山岩画位于广西南宁明县明江河畔, 是战国至东

汉时期遗留下来的珍贵历史遗迹, 绘于石灰岩崖壁之上。岩画本身存在的病害问题复杂, 其中对岩画影响最大的病害就是表面岩片的层片状开裂(图1)。

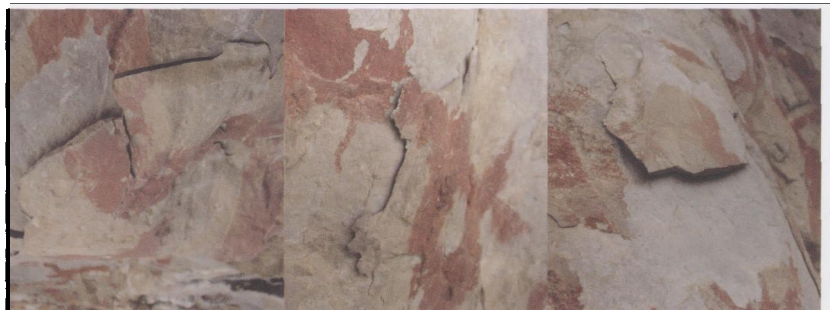


图1 花山岩画表面的层状开裂

Fig. 1 Layer cracks on the surface of the Huashan rock painting

为了使历史遗存能够很好地保存下来, 必须对开裂的岩片进行加固粘结。在最初的保护试验中曾经采用石质文物保护中常用的环氧树脂、硅橡胶等对灰岩表面裂隙的灌浆和粘接处理, 有较好的粘接强度, 但由于岩画所处区域温湿度变化大、日照强烈, 长期来看环氧树脂、硅橡胶耐老化性能欠佳无法满足, 因此需要寻求更为适合的保护材料^[1]。

在建筑中, 需要一种粘合剂把散粒状材料(如沙和石子)或块状材料(如砖石和石块)组合在一起成为一个整体, 这种粘合剂在土木建筑中称为胶凝

材料^[2]。这种胶凝材料现在通称为砂浆, 在我国古代也称其为灰浆。目前在实践中, 作为砖石质文物修复的砂浆使用比较多的有两大类材料, 即水泥材料和有机树脂高分子材料。水泥材料由于粘结强度高、具有优异的抗老化及抗潮湿能力, 得到了广泛应用。但是大量的科学研究与工程实例证明, 现代水泥材料与传统砖石等材料不兼容, 如水泥中的水溶盐会严重损坏砖石材料。而高分子材料(如环氧树脂)与砖石材料的物理化学性质差异更大, 在实践中出现了更多、更严重的兼容性问题, 主要表现为强

收稿日期: 2010-09-27; 修回日期: 2010-12-16

基金项目: 中国文化遗产研究院基本科研业务费资助(2008-JBKY-005)

作者简介: 周 霄(1978—), 女, 2003年毕业于北京化工大学分析化学专业, 中国文化遗产研究院馆员, E-mail: xiao1978cn@yahoo.com.cn

度太高、发脆、老化产物与砖石完全不同、不吸水、不透气。因此,近年来研究人员把目光又投向了传统石灰材料与传统工艺。传统砖石建筑本身曾经大量采用石灰类材料,所以石灰类材料的使用在兼容性方面天然具有优势。但是,传统石灰材料与水泥、环氧树脂等现代材料相比,仍存在固化慢、强度低、收缩较大、耐水性差等问题,造成粘结、填补及加固的保护效果并不理想,特别是在潮湿或干湿度变化较大的环境下,因此不符合施工的要求。基于这种现状,水硬性石灰材料作为一种文物建筑保护中的新型材料开始日益受到人们重视。例如,李最雄研究发现在甘肃秦安大地湾遗址房屋地面建筑中发现的胶结材料是以当地的料礓石(含 CaCO_3 60% ~ 80%, 含其他粘土矿物 20% ~ 40%)为原料烧制^[3]。陈庚龄,马清林等采用水合烧料礓石无机胶凝材料对酒泉丁家闸五号壁画进行加固粘结也取得较好的效果^[4]。1994 ~ 1998 年,德国联邦环保基金会(DBU)资助了“文物建筑保护中的水硬性石灰材料研究”,该研究表明水硬性石灰在文物建筑保护领域具有广阔的应用前景^[5]。虽然水硬性石灰材料的具体配方和施工工艺等方面的研究还存在很多不

足,但是整体上来说作为石灰粘结剂使用的,带有天然水硬成分的砂浆的优点非常突出:它兼具石灰和水泥的优点,具有低收缩、耐盐、适中的抗压和抗折强度、低水溶盐含量等优点,同时与传统的砖石建筑兼容性好,是一种天然、无污染、耐老化的无机材料。也是目前来看非常适合花山岩画粘结加固的一种胶凝材料。

1 试验材料和方法

1.1 原材料

本试验研究的填补粘结材料主要由三部分组成:胶结材料,骨料和少量助剂。采用的天然水硬石灰为德国 HESSLER KALKWERKEGMBH 公司出品的 NHL2,其固化 28 天后的抗压强度可达 2MPa。其主要化学组成见表 1。其主要矿物组成是 43% 气硬性组分氢氧化钙,25% 水硬性组分二钙硅石,还含有少量碳酸钙,铝硅酸钙等组分。其固化机理分为两个过程:水硬过程和气硬过程。

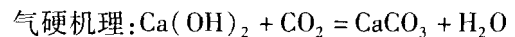
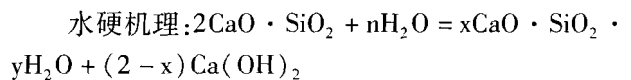


表 1 NHL2 化学成分(按照欧标 459-1)

Table 1 Chemical composition of NHL2 (according to European standard 459-1) (%)

成分	氧化钙	氧化镁	SO ₃	自由钙	CO ₂	自由水	结晶水	烧失量
测试结果	68.5	2.5	1.03	29.5	0.8	0.7	13.2	13.9

骨料采用石灰岩磨制而成的粉末,通常平均粒径 $d \leq 1\text{mm}$ 。石灰岩粉末按其平均粒径 d 可以分为粗粉($d = 0.5 \sim 0.7\text{mm}$)、细粉($d = 0.2 \sim 0.5\text{mm}$)、极细粉($d < 0.2\text{mm}$)。助剂包括胶粉,保水剂,减水剂等几种。其中聚合物胶粉为国民淀粉公司的 ELOTEX[®] FX7000 产品。触变润滑剂为 ROCKWOOD 公司的 OPTIBENT[®] 987。保水增稠材料为山东赫达股份有限公司生产的甲基纤维素醚 MC500。消泡剂为德国 MUNZING - CHEMIE 公司的 AGITAN[®] P803。减水剂为法国爱森的 C - SP 减水剂。木质纤维为德国 JRS 公司的 ARBOCEL[®] FD40。去离子水。

1.2 试验方法

1.2.1 材料的性能要求 花山岩画表面具有特殊的开裂病害,所在区域环境较为特殊,如岩面受日光直射,表面温度可达 50℃ 以上。因此对加固保护材料提出了较高要求,不仅要具有稳定、长久的粘结强度,而且材料本身与岩画岩体在化学组成和物理性能上也能相近。为此对材料的性能指标提出了具体

要求,为了满足岩画加固保护的要求,材料的性能指标需达到一定标准,见表 2。

表 2 岩画加固粘结砂浆的性能指标

Table 2 Main performance index of the binding material for rock painting

抗压强度	28 天: 1 ~ 5MPa, 最终强度为风化岩石的 20%, 10 ~ 15MPa;
抗压抗折比	≤ 3
拉拔强度	0.1 ~ 0.5MPa
流动性	好的触变性,不挂流
热膨胀性	$\leq 10 \times 10^{-6}$, 和灰岩处于同一数量级
透气性	\geq 石灰岩的透气性,越高越好
吸水性	吸水速度高于石灰岩,毛细吸水系数 $\geq 2\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$
收缩性	$\leq 0.15\%$, 无裂纹

1.2.2 材料的主要性能指标 这里主要介绍粘结强度和吸水性能。

1) 粘结强度。花山岩体粘结加固砂浆最重要的指标是粘结强度即拉拔强度,强度是否适合,可以通过如下简单计算验证。

若设定花山粘结砂浆7天的最低拉拔强度不低于0.1MPa,也就是说1cm²可以拉住1kg的材料。花山岩石的密度为2.7g/m³,一个长20cm,宽10cm,厚2cm的岩片的重量约为1.08kg,在没有任何支撑的自由重力的作用下,只需要≥1.08kg的力量就拉住它不脱落。如采用拉拔强度为0.1MPa的材料,只需要有1cm²的面积就可以拉住重1.08kg,长20cm,宽10cm,厚2cm的岩片,这个面积只占整个岩片面积的1%。换句话说,设定粘结砂浆的拉拔强度为0.1MPa时,只需粘住厚度为2cm的岩片的1%的面积,该岩片就不会脱落。所以设定最低拉拔强度为0.1MPa。同时对现场的粘结试验面的分析可以看出,在开裂的岩画表面存在多条裂缝,当主要裂缝被粘结加固后,加固的主裂缝的强度如果过高,新的变形将沿着次裂缝发育,导致新的开裂。所以要求加固砂浆必须具有一定的粘结强度,但是粘结强度又不能太高。

2) 吸水性能。由于花山岩画表面会产生凝结水,对岩画裂隙造成危害。所以要求采用的新的粘

结砂浆及其充填的裂隙吸水,象海绵一样将空气中产生的水储存在裂隙中,减低岩画表面的水分,这样可以缓解凝结水对岩画本体颜料的危害⁶¹。

在2009年3月的环境条件下,理论上如1m²表面有3条长200mm,高100mm,宽50mm的裂隙,当期表面凝结的水膜厚度为0.1mm的时候,1m²的岩画表面结露的水量为0.11L。三条裂隙的体积为0.2×0.1×0.05×3×1000=3L,如果粘结加固砂浆的体积吸水率大于0.11/3×100=3.7vol%,那这些凝结水就可以全部储存在粘结加固的新材料中而不会停留在岩画表面。

参照德国外立面材料吸水性能指标,当毛细吸水系数≥2kg/(m²·h)^{1/2}的时候,为吸水材料,因此确定本指标为封口粘结加固材料及注射粘结加固材料的吸水性指标。确定另一个指标为体积吸水率≥10%(上述计算的3倍)。如果采用不吸水的粘结砂浆粘结封闭裂隙,原来在裂隙中结露的水会在岩画表面结露,水膜的厚度在此可以增加0.1/0.11×10%达到0.11m,这就加大了对岩画本身的危害。

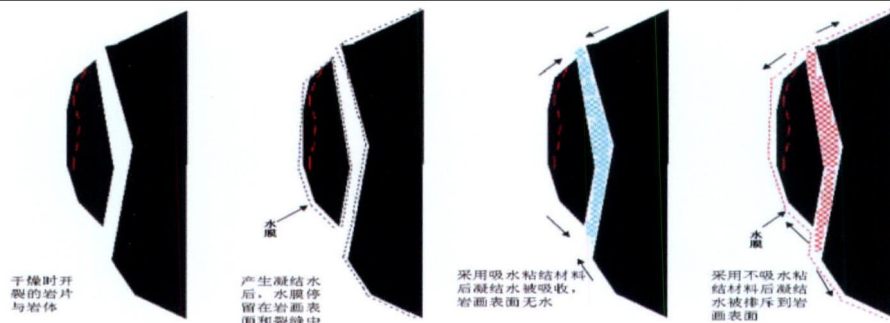


图2 吸水的粘结剂与不吸水粘结剂在岩画表面结露时的影响

Fig.2 Effect of the hydrophilic and hydrophobic binding material on the dew condensation

1.2.3 试验方法 用水硬石灰直接配制粘结加固砂浆。其中,水砂比为1:3,水灰比为0.27。60%湿度养护28天后,抗折强度1.40MPa,抗压强度2.24MPa,但是与石灰岩基面粘结的拉拔强度样品自然脱落,没有获得拉拔强度数据。这主要是因为石灰类材料在干燥的过程中收缩太大,在不添加助剂的情况下,水硬石灰的初期粘结强度无法抵消收缩所产生的内部应力从而导致样品脱落。因此本试验借鉴工业砂浆的研究方法在水硬石灰胶凝体系中添加一定量的助剂,从而改善水硬石灰胶凝体系的工作性能,提高其初期粘结强度,从而获得良好的试验效果。

经大量的试验筛选出的填补粘结砂浆配方如表3所示。其中,砂浆1的骨料较粗适合较大裂缝的粘结,砂浆2的骨料较细适合较小裂缝的粘结。

表3 填补粘结砂浆配方

Table 3 Formula of the binding Mortar (wt%)

组分	砂浆1	砂浆2
水硬性石灰(NH1.2)	35	49
灰岩粉	63	49
乳胶粉(FX7000)	1	1
助剂(减水剂、消泡剂、木质纤维素、触变润滑剂)	1	1

将上述比例的干粉原料混合均匀后加水制备样块进行性能检测,水灰比为0.26~0.28。抗压强度和抗折强度检测参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》GB/T17671-1999进行,样品龄期28天。粘接性能参照《墙体饰面砂浆》JC/T1024-2007检测砂浆和花山灰岩的拉拔强度。热膨胀性能采用德国DIL-402PC热膨胀仪对线膨胀率和热膨胀系数进行测定,样品尺寸为(20~25)mm×4mm×4mm的

长方体,温度范围 25 ~ 150℃。吸水性检测参照建筑砂浆基本性能试验方法 JGJ70 - 90 进行,砂浆试样固化龄期 28 天。为分析样品的固化状况,采用 X 射线衍射分析仪对砂浆不同阶段的成分进行分析。

2 结果与讨论

2.1 测试结果

1) 筛选出的粘结砂浆的基本力学性能。砂浆

表 4 粘结砂浆的基本力学性能

Table 4 Mechanical performance of the binding mortar

样品	28 天抗压强度 /MPa	28 天抗折强度 /MPa	28 天抗压/抗折	7 天拉拔强度 /MPa	28 天拉拔强度 /MPa	90 天拉拔强度 /MPa
砂浆 1	5.92	2.77	2.14	0.40	1.61	1.70
砂浆 2	2.77	2.17	1.28	0.14	0.42	0.60

2) 热膨胀系数。分别测试了花山岩画所在区域的石灰岩和水硬性石灰粘结砂浆的热膨胀系数,试验结果见表 5。表 5 表明,在 60℃ 下,实验室和花山现场条件养护的砂浆样品具有和花山灰岩相近的线膨胀率,热膨胀系数在 30 ~ 60℃ 范围里和花山灰岩在同一数量级上。

表 5 填补粘结砂浆的热膨胀系数

Table 5 Coefficient of linear thermal expansion of the binding mortar

样品	60℃ 时的线膨胀率/%	30 ~ 60℃ 热膨胀系数/ $1/k$
花山灰岩	0.021	$4.65 * E^{-6}$
砂浆 1	0.022	$4.92 * E^{-6}$
砂浆 2	0.028	$6.56 * E^{-6}$
花山现场养护材料的热膨胀比较		
砂浆 1	0.016	$3.45 * E^{-6}$
砂浆 2	0.020	$5.18 * E^{-6}$

3) 吸水率。岩画表面产生的凝结水对岩画造成一定程度的破坏。水硬性石灰砂浆的吸水率远高于石灰岩,可以使岩画表面的凝结水储存到加固材料中,减小对岩画的危害。参照标准《建筑砂浆基本性能试验方法 JGJ70 - 90》测得 60% 湿度下养护 28 天后的粘结砂浆 1 和粘结砂浆 2 的吸水率为 17.0%、28.8%,远远大于灰岩的 0.15%。

2.2 讨论

1) 拉拔强度。将制好的拉拔样品在 3 种条件下进行养护:1) 温度 20℃,湿度 90% 的养护箱内养护 28 天后取出待表面干燥后进行拉拔实验。2) 温度 20℃,湿度 60% 的养护箱内养护 28 天后取出进行拉拔实验。3) 温度 20℃,湿度 60% 的养护箱内养护 28 天后取出,在水中浸泡 2 个小时,擦干表面后,60℃ 烘干两个小时,为一个循环。如此循环做 30 个后进行拉拔强度测试。三种条件下的测试结果见图 3

1 和砂浆 2 的 28 天抗压强度,抗折强度,压折比和拉拔强度均都达到预期的指标要求。两种砂浆固化 7 天的拉拔强度可达 0.1MPa 以上,而且随着固化时间增加,拉拔强度不断增加,确保了材料的性能。尽管砂浆 1 的水硬石灰含量低于砂浆 2,但砂浆 1 的各项强度指标均高于砂浆 2(表 4)。这说明水硬石灰砂浆的强度不完全由水硬石灰含量决定,较粗的骨料有利于水硬石灰砂浆的强度增加。

从图 3 中可以看出,在养护条件 2 下也就是湿度 90%,温度 20℃ 的养护条件下,两种粘结砂浆基本没有任何拉拔强度。这主要是因为水硬石灰的凝结是碳酸化和水化作用相互作用的结果。以试验的主材料 NHL2 为例,其中水硬组分的比例为 45% ~ 50%,气硬组分的比例为 50% ~ 55%。因此在空气湿度过大的时候,会使得砂浆中的空隙充满了水分,而 CO_2 在水中的渗透速度比在空气中慢大约一万倍^[7]。因此,空气湿度过大就会严重阻碍碳酸化的过程,而使得样品中主要发生的是水硬反应。

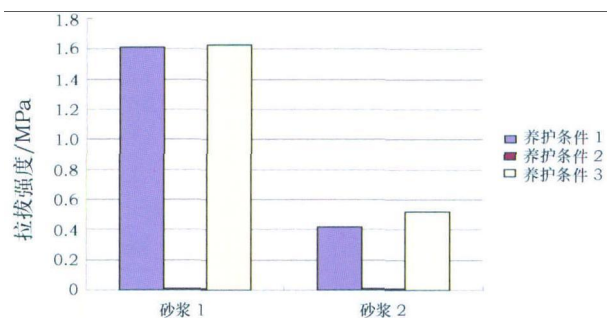


图 3 不同养护条件下的样品拉拔强度

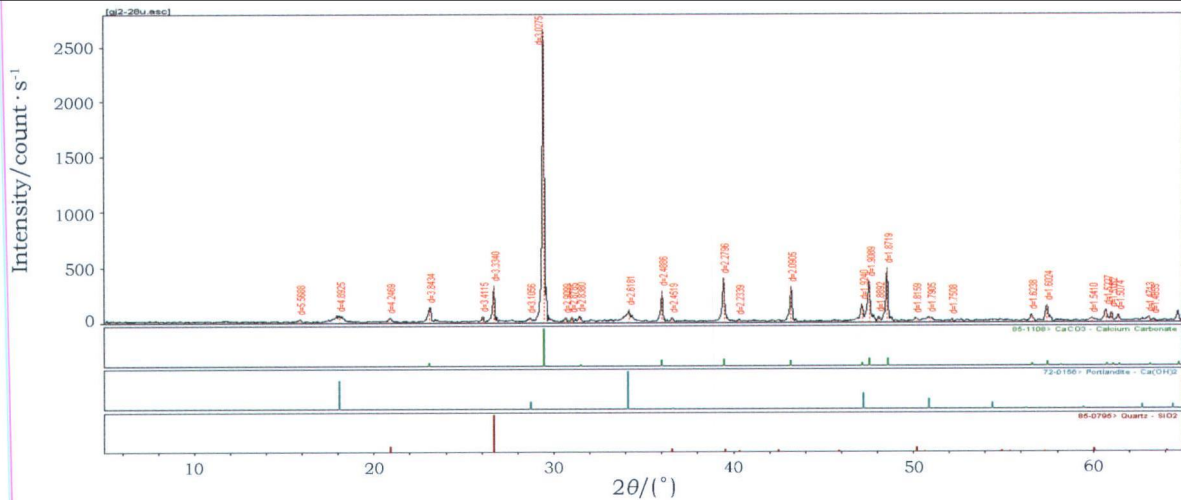
Fig. 3 Pull-out strength of the sample in different curing conditions

而从水硬反应的机理上来看,水硬反应结束以后会产生大量的 $Ca(OH)_2$ 。如果没有充分的 CO_2 参与完成后续的碳化进程,无法产生足够的拉拔强度。而在第三种养护条件下,30 个干湿循环后样品的拉拔强度,较循环前的样品有较大的提高。其中砂浆 2 拉拔强度从 0.42MPa 提高到 0.53MPa,而砂浆 1 的拉拔强度从 1.61MPa 提高到了 1.63MPa。其主要原因首先是水硬石灰含量不同,砂浆 2 中水硬石灰的含量为 49.1%,而砂浆 1 中水硬石灰的含量为 35%。这说明虽然水硬石灰的初期粘结强度

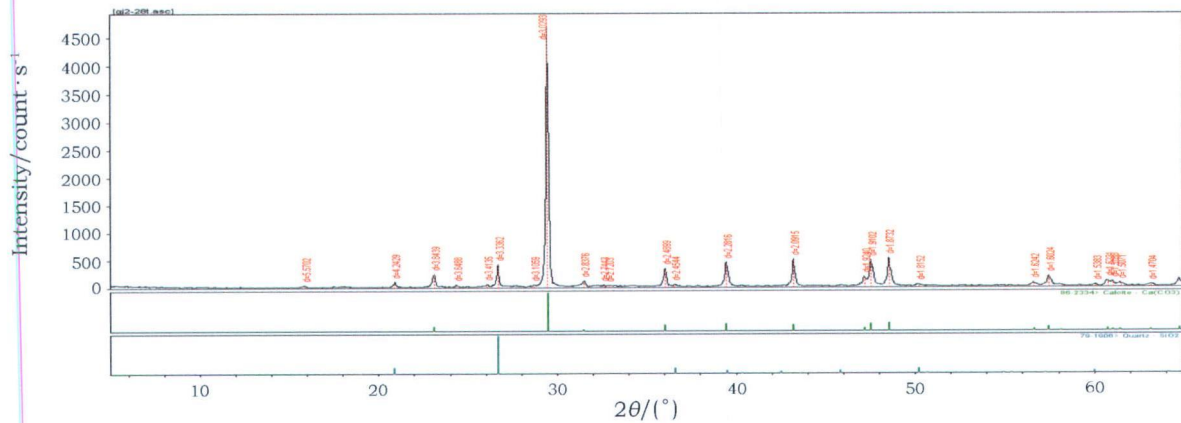
较小,但是随着碳酸化程度的不断增加,拉拔强度也在不断地增加。而干湿交替的养护有助于水硬石灰的碳酸化进程。

2) 化学成分。图 4 为样品 X 射线衍射分析结果。由图 4 可知:粘结砂浆中未碳酸化的部分化学成分以 CaCO_3 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 为主,含有少量 SiO_2 。这

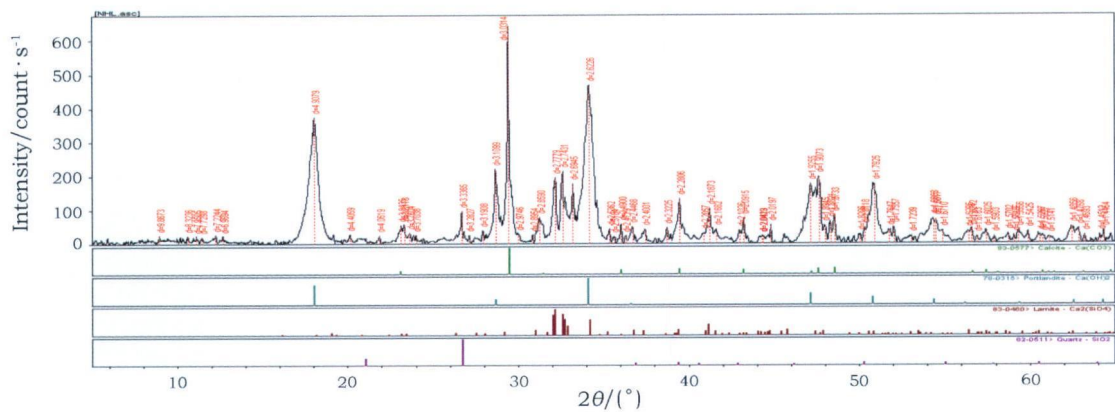
是因为在干混料中 NHL2 主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,而灰岩粉骨料主要成分为 CaCO_3 。碳化部分的化学成分以 CaCO_3 为主。跟天然水硬性石灰 NHL2 相比,整个样品中水硬性组分 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的峰已经消失,说明在有一定湿度的情况下水硬反应完成的很快,而碳酸化的进程是一个长期的非常缓慢的过程。



(a) 28 天龄期末碳化部分 XRD 图



(b) 28 天龄期碳化部分 XRD 图



(c) NHL2 的 XRD 图

图 4 样品及天然水硬性石灰 NHL2 的 XRD 图谱

Fig.4 XRD pattern of uncarbonated and carbonated and NHL2 at the age of 28d

3 现场工艺试验

通过大量的室内试验研究,说明填补粘结砂浆具有一定的粘接强度,可作为花山岩画剥落开裂部位的加固。2009年3月在花山现场进行了现场试验,主要对点粘接工艺,封口粘接工艺和注浆工艺进行了试验,为今后的保护施工提供工艺和操作上的经验。本研究仅介绍点粘接工艺试验。

点粘接是在较小干预原则下对现有开裂不稳定部位的抢救加固,采用局部填补裂隙边缘,确保处于较危险部位的岩片不会掉落。这也是开裂岩体应急抢救性加固工程主要工作内容。现场点粘接工艺实验选取了两种不同粘结用料,分别针对不同宽度的裂隙。砂浆1用于宽度5mm以上的裂隙,砂浆2用于裂隙5mm以下的裂隙。现场试验的主要方法如下:

1) 清理裂隙。在确保试验部位岩片安全的前提下,采用竹签、试管刷等清除裂隙中的虫穴、泥垢等。清理、打磨后的裂隙采用压缩空气吹净。为防备意外发生,在开裂岩体部位做好支护准备,岩片下

部铺垫聚乙烯塑料泡沫垫片。

2) 选择粘结点。根据开裂岩片的重量、裂隙走向和薄弱部位,在裂隙边缘选择合适的粘结点。填补长度2~4cm左右。在确保维持开裂岩片现状稳定前提下,尽可能保持裂隙通畅,为未来的注浆加固等保护修复工作留有余地。

3) 润湿粘接面。采用软毛笔(刷)蘸取去离子水对粘结点两边的岩面进行润湿。

4) 填充粘结。用已调配好的、具有适当粘度的填补粘接砂浆在粘结点处的开裂岩片及岩面上刮抹一层,确保材料和岩面充分接触。再用薄竹签将填补粘接砂浆填入粘结点处的缝隙,并不断逐层捣压密实,材料表面的少量水分渗出用棉签吸走。最终使材料表面凹入缝隙2~5mm,从正面不会看到填补材料。

5) 表面清理。及时对接触过粘接剂的岩面表面进行清理,方法是采用棉签蘸少量去离子水擦拭残留在岩面表面的填补材料。修复后的效果图片见图5。



图5a 修复后的效果(侧面)
Fig. 5a Effect of restoration(front)

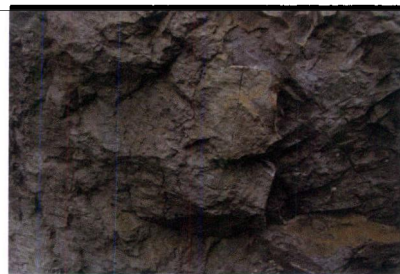


图5b 修复后的效果(正面)
Fig. 5b Effect of restoration(side)

4 结论

1) 水硬石灰砂浆可以提供足够的粘结强度,同时热膨胀系数和灰岩处于同一数量级,吸水率远大于灰岩,非常适合用于石灰岩质地文物的修复和保护。

2) 由于水硬石灰砂浆的碳酸化进程长而缓慢,因此必须添加一定量的胶粉和其他助剂用以提高材料的初期粘结强度。

3) 水硬石灰砂浆的拉拔强度受养护条件的影响很大,高湿度养护对水硬石灰胶凝材料的粘结强度的提高不利,干湿交替的养护最有利于提高材料的粘结强度。花山地区昼夜温湿度差异大,非常适宜使用水硬石灰加固粘结材料。

4) 现场试验说明水硬石灰砂浆在粘接过程中使用方便,工艺简单,目前该材料和工艺已经用于花

山岩画第一期应急保护加固工程。

致谢:本研究得到了中国文化遗产研究院自主科研课题《石灰岩质文物注浆材料及工艺研究》的资金支持。同时在试验过程中得到了广西省文物局和宁明县文管所的大力协助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 郭宏,韩汝芬,赵静,等.广西花山岩画抢救性保护修复材料的选择试验[J].文物保护与考古科学,2006,18(3):18-24.
GUO Hong, HAN Ru-fen, ZHAO Jing, et al. Selection experiment on the urgent conservation materials for the petroglyphs on the Flower Mountain, Guangxi[J]. Sci Conserv Archaeol, 2006, 18(3): 18-24.
- [2] 柳俊哲.土木工程材料[M].北京:科学出版社,2005:37.
LIU Jun-zhe. Civil engineering material[M]. Beijing: Science Press, 2005: 37.
- [3] 李最雄.世界上最古老的混凝土[J].考古,1988,(8):81-86.
LI Zui-xiong. The oldest concrete in the world[J]. Archaeology, 1988, (8): 81-86.

- [4] 马清林,陈庚龄,卢燕玲,等. 潮湿环境下壁画地仗加固材料研究[J]. 敦煌研究,2005,(5):66-70
MA Qing-lin, CHEN Geng-ling, LU Yan-ling, *et al.* The enforcement material for the Wall - Paintings plaster under high humidity condition[J]. Dunhuang Res,2005,(5):66-70.
- [5] Strubel G, Kraus K, Kuhl O. Hydraulische Kalke fuer die Denkpflege[M]. IFS - Bericht,1998.
- [6] 郭 宏,韩汝玢,赵 静,等. 水在广西花山岩画风化病害中的作用及其防治对策[J]. 文物保护与考古科学,2007,19(2):5-13.
GUO Hong, HAN Ru-fen, ZHAO Jing, *et al.* The effect of water on the weathering damage of Huashan rock paintings in Guangxi and its prevention[J]. Sci Conserv Archaeol,2007,19(2):5-13.
- [7] 李天杰,赵 焯,张科利,等. 土壤地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:157.
LI Tian-jie, ZHAO Ye, ZHANG Ke-li, *et al.* Soil geography [M]. Beijing:China Higher Education Press,2004:157.

Study on hydraulic lime mortar used for consolidation of Huashan rock paintings

ZHOU Xiao¹, HU Yuan¹, WANG Jin-hua¹, DAI Shi-bin²

(1. Chinese Academy of Cultural Heritage, Beijing 100029, China;

2. Tongji University, College of Architecture and City Planning, Shanghai 200092, China)

Abstract: Hydraulic lime has the advantages of both lime and cement. It has low shrinkage, good anti-salting properties, medium compressive and flexural strength, a low content of soluble salts and compatibility with the traditional masonry materials. It is a natural, pollution-free and anti-aging material. The focus of this research is to describe the mechanical requirements of a mortar, based on the characteristics of cracks in Huashan rocks. Based on these requirements, two kinds of binding mortar were prepared and the mechanical performance of each was tested. Also the relationship of different preservation conditions and the tensile strength of the mortar were discussed. In-site experiments show that the mortars can provide bonding strength for the rock. The mortar is also user-friendly and produces little pollution. Hydraulic lime mortar can be applied to cracks in the Huashan rock paintings in case of emergency.

Key words: Hydraulic lime mortar; Tension strength; Preservation condition

(责任编辑 潘小伦)

· 科技信息 ·

利用多种无损测试技术综合研究中国古代玉器

过去十年里,无损测试技术研究古代玉器主要着重于矿物鉴定、玉石来源、加工工艺、加热处理和埋藏变化的分析。本实验样品的挑选以颜色为基础,从半透明的白色到近乎黑色。包括七块现代已知产地来源的透闪石样品,以及芝加哥艺术学院博物馆收藏的三件古代玉器(一件象牙白色新石器时代玉环、一件带斑点的暗绿色商代有领璧和一件深绿近黑色的商代早期玉璋)。实验技术包括X射线衍射(XRD)、显微拉曼光谱(RM)、X射线荧光光谱(XRF)和紫外可见反射光谱等。借以分析阳离子替代引起的自然变化以及人工加热处理对于玉器颜色的影响。

为了研究加热处理的影响,将一个和田软玉子料锯成薄片,每片抛光一个面,并逐个放入马弗炉的氧化气氛中加热24h,温度从500到1100℃,以100℃递增。保留一个不经加热处理的薄片样品做对比。

XRD分析得知商早期玉璋主要由铁阳起石构成,包含部分绿泥石杂质。解释了其深绿近黑色的颜色成因。XRD结果显示衍射谱线由春川玉和小梅岭玉样品的透闪石特征,向临洮绿黄、褐绿色玉样品的阳起石特征转变。在阳起石样品中,Fe²⁺对Mg²⁺的替代增加了晶格参数,减小了衍射角,使得谱线向低角度漂移。尽管递增的Fe含量以及由浅至深的绿色与光谱特征一致,但如果要定量分析颜色变化与谱线漂移的关系,尚待更详细的XRD谱线分析。