

基于仰韶水泥的砂岩石窟裂隙灌浆 材料室内筛选研究

赵林毅^{1,2}, 王旭东^{1,2}, 李黎³, 严绍军⁴, 蒋思维⁵, 李志鹏⁶, 李最雄^{1,2}, 方云⁴

(1. 敦煌研究院, 甘肃敦煌 736200; 2. 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心, 甘肃敦煌 736200;

3. 中国文化遗产研究院, 北京 100029; 4. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074;

5. 大足石刻研究院, 重庆大足 402360; 6. 敦煌研究院文物保护技术服务中心, 甘肃兰州 730000)

摘要: 偏高岭土是高岭土经高温脱水后形成的一种高活性的人工火山灰材料, 铝酸钙膨胀剂(AEA)是以一定比例的优质高铝熟料、无水石膏等无机材料共同粉磨而成的抗裂防水膨胀剂。在研究“仰韶水泥”的过程中发现, 在烧料礞石水硬石灰中添加偏高岭土后, 可有效提高水硬石灰结石体的强度, 缺点是收缩变形较大。本研究基于对“仰韶水泥”的研究, 结合砂岩石窟及其裂隙加固的特点, 通过室内研究在烧料礞石水硬石灰中添加不同比例偏高岭土和膨胀剂 AEA 后浆液的流动性、凝结时间、收缩率、龄期强度等基本性能, 初步筛选出了适宜砂岩石窟裂隙加固的灌浆材料及配比。

关键词: 仰韶水泥; 砂岩石窟; 裂隙灌浆; 加固材料; 筛选

中图分类号: G264.3 **文献标识码:** A

0 引言

石窟危岩体锚固与裂隙注浆是石窟加固工程中两项非常重要的工程措施。锚固的作用主要从结构上稳定危岩体, 对地处干旱或半干旱地区的石窟来说, 岩体裂隙注浆的作用主要是防止雨水入渗, 以防锚杆锈蚀, 确保锚杆的锚固强度。另外, 岩体裂隙注浆对一些小的危岩体起到与基岩粘连使整个岩体保持完整。对于地处潮湿和多雨水地区的石窟, 岩体裂隙注浆还有一个很重要的作用, 就是防止岩体内的水向外渗漏而导致石质文物风化。

从 20 世纪 60 年代开始, 我国的文物保护工作者根据各地石窟所处的环境特点及石窟岩体的特性, 因地制宜地进行了大量石窟岩体裂隙注浆的研究工作和抢救性的保护加固工程, 抢救了大批濒危的石质文物, 如 20 世纪 70 年代, 在河南洛阳的龙门石窟, 采用环氧树脂进行岩体裂隙注浆; 80 年代, 在四川重庆的大足石窟采用了小分子量的水性环氧树脂进行了岩体裂隙注浆; 90 年代初, 敦煌研究院采用了 PS-F 对甘肃瓜州县榆林窟的砂砾岩体进行了锚固

和岩体裂隙注浆, 这些石窟岩体裂隙注浆的工程措施都对石质文物起到了抢救性的保护作用^[1-8]。

欧美较早将水硬性石灰用于石质文物的保护修复^[9-16], 我国将水硬石灰用于石质文物的保护修复相对较晚^[17-18]。20 世纪 70 年代, 在甘肃秦安大地湾 F-405 和 F-901 的地面材料中发现了世界上目前发现最早的人工烧制水硬石灰, 地面材料中发现了大量的水硬性胶凝材料 β -CaSiO₃ 和 Ca₂Al₂SiO₇, 李最雄先生称其为最早的水泥, 即“仰韶水泥”^[19-20], 该材料是黄土中沉积的钙质结核“料礞石”经高温焙烧而成的。近年来, 对中国传统的料礞石、阿嘎土和坭灰等石灰类材料进行了大量的改性研究工作^[21-25], 将烧料礞石初步应用于岩土文物的保护加固中, 取得了较好的效果。在以上研究的基础上, 本研究选择烧料礞石为胶凝材料对加固岩土质文物进行了较为系统的研究。

1 砂砾岩石窟裂隙注浆材料的选择

1.1 注浆材料主剂选择

烧料礞石水硬石灰中有两种主要的化学组

收稿日期: 2015-12-15; 修回日期: 2016-02-23

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAK16B02), 国家文物局文物保护科学和技术研究课题资助(20120207), 甘肃省基础研究创新群体计划资助(2014GS03574)

作者简介: 赵林毅(1975—), 男, 2012 年博士毕业于兰州大学, 敦煌研究院副研究员, 主要从事古代壁画保护与修复研究及岩土质文物保护加固材料研发等方面的工作, E-mail: dhzhly@163.com

分,一类是气硬性胶凝材料氧化钙(CaO),另一类是水硬性的胶凝材料 $\beta - \text{CaSiO}_3$ 和 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 。气硬性胶凝材料氧化钙在大气中的水和二氧化碳作用下缓慢碳化形成多孔隙的碳酸钙,这种多孔隙的碳酸钙不但有很好的透水、透气性,适宜的强度,而且也有与石质文物本体很好的相容性及良好的耐候性,这就是水硬性石灰修复加固石质文物具有良好保护加固效果的原因所在。水硬石灰的这一过程对修复加固石质文物也会产生一些不利的因素,主要就是氧化钙的碳化过程非常缓慢,即修复固结体强度增长非常缓慢,这样易造成修复结石体收缩变形,导致修复固结体与文物本体相容性差,不能牢固结合,久而久之使修复固结体与文物本体剥离。但是,水硬石灰中的水硬性组分 $\beta - \text{CaSiO}_3$ 和 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ 水化过程很快,也就是强度增长很快,可弥补氧化钙因碳化缓慢而强度增长缓慢的缺陷,因此,选择烧料礞石水硬石灰作为主要黏结材料。

1.2 注浆材料添加剂选择

一般的石窟岩体裂隙注浆材料中,常用的填加剂以石英砂为主,但对浆液结石体的堵水性提出较高要求的砂岩石窟,就要求浆液结石体的孔隙率不宜太大,并且浆液结石体应有较高的早期强度。因此,注浆材料的填料除选择石英砂外,还选择了偏高岭土,通过偏高岭土的掺加量控制结石体孔隙率的大小。同时,浆液中掺加偏高岭土能明显提高浆液结石体的早期强度。偏高岭土是高岭土经高温脱水后形成的高活性的人工火山灰材料^[26-28],具有很高的活性,可与水硬石灰中的氧化钙作用,形成水泥的化学组分之一 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$,铝硅酸钙再经过水化形成水化铝硅酸钙,即水泥石,能显著提高浆液结石体的早期强度。

1.3 注浆材料膨胀剂选择

石窟岩体裂隙注浆材料应该有尽可能小的收缩变形性,这样才能确保注浆的密实度和注浆质量,避免浆液结石体因收缩变形与裂隙两壁产生剥离,影响注浆质量。在筛选大足石刻岩体裂隙注浆材料时发现,当在烧料礞石水硬石灰中掺加偏高岭土后,虽然浆液结石体的龄期强度特别是早期强度有明显提高,但收缩变形和孔隙率有增大的趋势,这就需要选择适宜的膨胀剂,以防止浆液结石体因收缩变形增大而影响注浆质量。

AEA是铝酸钙膨胀剂的简称,是以一定比例的优质高铝熟料、无水石膏等无机材料共同粉磨而成

的抗裂防水膨胀剂^[29]。AEA的主要化学组分是铝酸钙 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 熟料、明矾 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 和石膏 CaSO_4 的混合物。当AEA加入烧料礞石水硬石灰中后,高铝熟料中的 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (简称CA)首先与 CaSO_4 及水硬石灰中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作用并水化生成可膨胀结晶体水化硫酸钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$),即钙矾石,使烧料礞石水硬石灰浆液结石体产生适度膨胀、浆液结石体的早期强度明显提高,同时能使浆液结石体的孔隙率明显下降。

2 最佳配比注浆浆材筛选实验

本实验设计最佳配比浆材筛选分两步进行:第一步先做不加膨胀剂的实验,即只做主剂和填加剂的配比实验,选出主剂和填加剂的最佳配比;第二步对已选出主剂和填加剂以最佳配比混合,加入不同配比的膨胀剂进行实验,选出膨胀剂的最佳掺加量。再筛选出最佳灰水比制备浆液,进行物理力学性质实验及耐环境诸因素,如冻融、水稳定性、温度变化、湿度变化等影响性实验,最后对选定的最佳配比浆材再进行现场试验,以验证注浆效果。

石窟岩体裂隙注浆灌浆材料必须符合基本要求:1)为了达到一定的深度和注浆的密实度,浆液必须有好的流动性。2)为了有充分的搅拌时间和注浆时间,浆液的初凝时间不能过早。注浆完毕浆液凝固后必须具有一定的早期强度,这对堵渗水有利,所以浆液的终凝时间也不能太长。3)为了使浆液结石体与遗址本体具有较好的相容性,浆液结石体必须具备适宜的抗拉、抗压强度、低收缩性和较好的抗老化性能等。

2.1 主剂和填加剂最佳配比试验

以过200目筛的烧料礞石水硬石灰为主剂掺入不同比例的过300目筛的偏高岭土和工业用石英砂以一定的水灰比制成浆液,分别按照中华人民共和国国家标准GB/T 2419-2005《水泥胶砂流动度测定方法》、中华人民共和国国家标准GB/T 1346-2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检测方法》测试浆液的流动度和凝结时间。制作40mm×40mm×160mm棱柱试体,按照中华人民共和国国家标准GB/T 17671-1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》测试结石体的龄期强度。按照中华人民共和国行业标准JGJ/T 70-2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》测试结石体28天龄期的收缩变形。按照中华人民共和国国家标准GB/T

50123-1999《土工试验方法标准》测试结石体的孔隙率。以所得数据为依据确定烧料礓石水硬石灰、

偏高岭土、石英砂的最佳配合比。测试结果见表1、图1~2。

表1 不同配比相同水灰比浆液的流动度、凝结时间、收缩率和孔隙率

Table 1 Comparing the fluid, condense time, shrink and porosity in different ratio of quantity and same water cement ratio

填料	质量比	水灰比	流动度/mm	凝结时间		收缩率/%	孔隙率/%
				初凝/min	终凝/h		
烧料礓石、偏高岭土、石英砂	1#	1:0.5:0.5	205	62	21	0.59	45.10
	2#	1:0.6:0.4	200	50	10	0.30	44.90
	3#	1:0.7:0.3	172	41	8	0.40	44.10
	4#	1:0.8:0.2	160	37	5	0.42	43.40

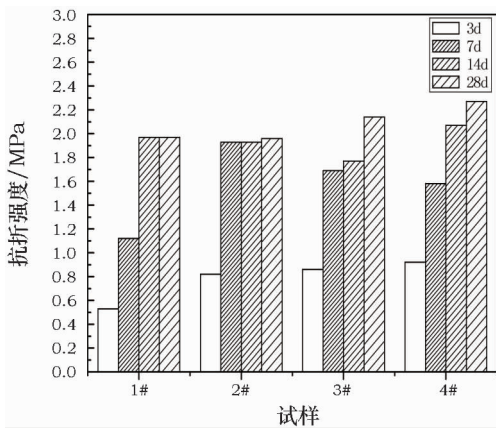


图1 龄期抗折强度与配比关系

Fig.1 The age strength of resistant the break about different quantity

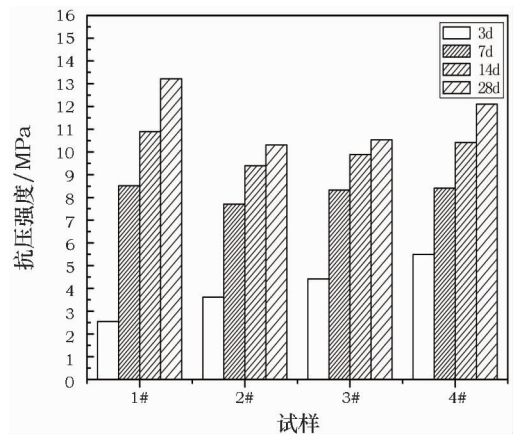


图2 龄期抗压强度与配比关系

Fig.2 The age strength of resistant the press about different quantity

通过以上试验,可以得出:

1) 浆液的流动度随着偏高岭土掺入量的增加而下降,3#、4#两种配比的浆液流动度较小,不符合灌浆要求。

2) 浆液的初凝均可满足灌浆要求,1#配比浆液的终凝时间较长,2#浆液的收缩变形最小。

3) 浆液结石体的孔隙率随偏高岭土掺入量的增加而稍有变大。

4) 掺加偏高岭土能明显提高浆液结石体的龄期强度。

综上所述,2#配比可作为水硬石灰、偏高岭土、石英砂的最佳配比,即烧料礓石水硬石灰、偏高岭土、石英砂的质量比为1:0.6:0.4。

2.2 最佳水灰比筛选试验

将烧料礓石水硬石灰、偏高岭土、石英砂以最佳配比混合,按照2.1所述方法测定不同水灰比制成浆液的流动度、凝结时间,之后测试该浆液结石体龄期强度、收缩变形和孔隙率,以所得数据为依据确定烧料礓石水硬石灰、偏高岭土、石英砂浆液的最佳水灰比。测试结果见表2、图3~4。

表2 不同配比相同水灰比浆液的流动度、凝结时间、收缩率和孔隙率

Table 2 Comparing the fluid, condense time, shrink and porosity in different ratio of quantity and same water cement ratio

填料	质量比	水灰比	流动度/mm	凝结时间		收缩率/%	孔隙率/%
				初凝/min	终凝/h		
烧料礓石、偏高岭土、石英砂	1:0.6:0.4	0.40	145	41	8.1	0.27	40.91
		0.50	200	50	10.0	0.30	44.9
		0.60	230	58	10.8	0.34	45.09
		0.70	245	65	11.8	0.45	48.40

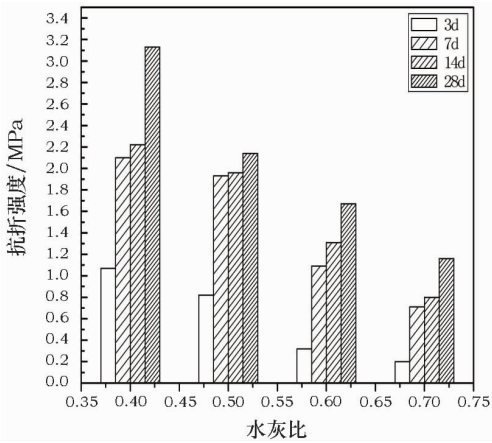


图 3 龄期抗折强度与水灰比关系

Fig. 3 The age strength of resistant the break about different water cement ratio

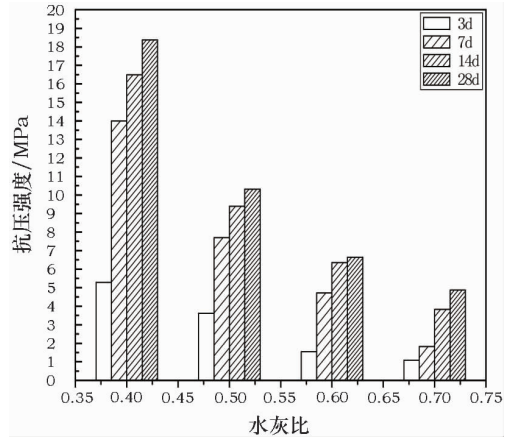


图 4 龄期抗压强度与水灰比关系

Fig. 4 The age strength of resistant the press about different water cement ratio

通过以上试验测试,可以得出:

1) 浆液的流动度随着水灰比的增大而增加,当水灰比为 0.40 时浆液流动度较小,水灰比为 0.50、0.60 时浆液达到半流动状态,当水灰比取 0.70 时浆液达到完全流动状态。

2) 几种水灰比浆液的初凝均可满足灌浆要求,当水灰比 0.70 时浆液的终凝时间较长。

3) 浆液的收缩变形随着水灰比的增大而增大。

4) 浆液结石体的孔隙率随水灰比的增加而变大。

5) 浆液结石体的龄期抗折、抗压强度随水灰比的增大而减小。

因此,当烧料礞石水硬石灰、偏高岭土、石英砂质量比为 1:0.6:0.4,以最佳水灰比 0.50~0.60 拌和时,浆液结石体的各项性能最佳。水灰比在 0.60~0.70 时,适宜做岩体裂隙注浆,水灰比在 0.40~0.50 时,适宜做岩体裂隙注浆后岩面的修复与补强。

2.3 膨胀剂的掺入量对浆液结石体的影响

烧料礞石水硬石灰、偏高岭土、石英砂的配合比采用质量比 1:0.6:0.4,选择掺入占总量 4%、7%、10%、13% 的 AEA 膨胀剂,选取 0.60 的水灰比按 2.1 所述方法测试浆液的流动度、凝结时间和结石体的收缩变形、孔隙率及龄期强度变化,测试结果见表 3、图 5~6。

表 3 加入不同比例膨胀剂后流动度、凝结时间、收缩率和孔隙率

Table 3 Comparing the fluid, condense time, shrink and porosity when added different ratio expansion agent

填料	质量比	膨胀剂掺量/%	水灰比	流动度/mm	凝结时间		收缩率/%	孔隙率/%
					初凝/min	终凝/h		
烧料礞石、偏高岭土、石英砂	1:0.6:0.4	4	0.60	157.5	71	5.5	0.21	35.00
		7		192.5	86	6.0	0.19	37.00
		10		228.7	94	9.1	0.11	38.60
		13		245.0	105	9.8	0.16	44.00

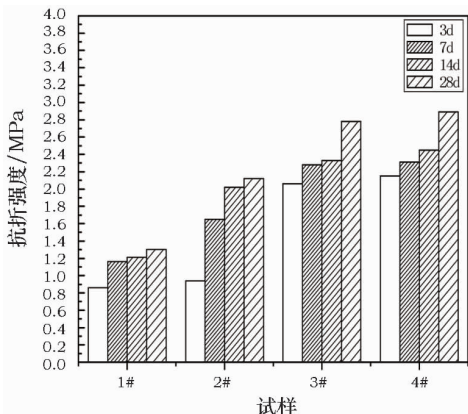


图 5 龄期抗折强度与膨胀剂掺量的关系

Fig. 5 The age strength of resistant the break about different ratio expansion agent

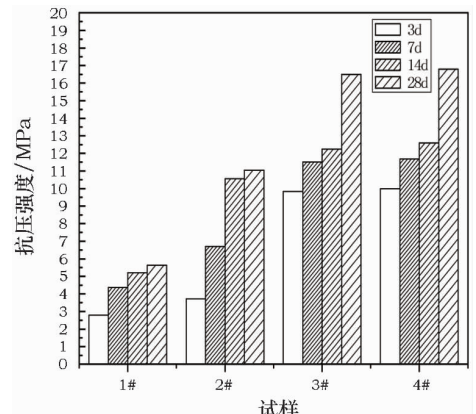


图 6 龄期抗压强度与膨胀剂掺量的关系

Fig. 6 The age strength of resistant the press about different ratio expansion agent

通过以上试验,可以得出:

1) 当水灰比一定时浆液的流动度随膨胀剂加入量的增加而变大,当膨胀剂的加入量为4%时浆液的流动性较小。

2) 加入不同比例的膨胀剂后浆液的初凝与终凝时间均符合灌浆要求,与不加膨胀剂前比较浆液的初凝时间推迟,而终凝时间提前。

3) 浆液结实体的收缩变形性因掺加膨胀剂而明显下降,当膨胀剂的掺入量为10%时,浆液结石体的收缩变形性下降特别明显。

4) 当掺加4%、7%、10%的膨胀剂时,浆液结石体的孔隙率明显下降,当掺加13%的膨胀剂时,浆液结石体的孔隙率又明显增大。

5) 浆液结石体的抗压、抗折强度随膨胀剂掺入量增大而明显增大,早期强度增大更明显。

3 结 论

通过最佳配比、最佳水灰比及适宜膨胀剂掺量的三项试验测试,可以得出如下结论:

1) 烧料礞石水硬石灰、偏高岭土、石英砂以质量的最佳配比为1:0.6:0.4。

2) 当烧料礞石水硬石灰、偏高岭土、石英砂以质量比1:0.6:0.4配合作为岩体裂隙注浆材料时,最佳水灰比为0.6。

3) 选择膨胀剂AEA的最佳掺量为10%,在不影响浆液其它性能时,可降低浆液结石体的收缩率。

烧料礞石水硬石灰、偏高岭土、石英砂以最佳配合比混合后掺加不同比例的膨胀剂,以水灰比0.60制成浆液,其浆液结石体的各种性能都有明显改善。当膨胀剂的加入量为10%时,其浆液结石体的各种性能有明显改善,特别是浆液结石体的收缩变形性非常小、几乎达到无收缩变形,孔隙率明显下降,其龄期强度,特别是早期强度明显提高,裂隙注浆时可以起到很好的堵水效果。因此,这种配比的材料可以作为砂岩石窟裂隙的注浆加固材料。

参考文献:

[1] 李最雄,易武志. PS-C对砂砾岩石窟岩体裂隙灌浆的研究[J]. 文物保护与考古科学,1989,(2):19-28.
LI Zui-xiong, YI Wu-zhi. A Study on restoration works of fissured gravel rock-body in grottoes using PS-C grouting[J]. Sci Conserv Archaeol, 1989,(2):19-28.

[2] 李最雄,张鲁,王亨通. 砂砾岩石窟岩体裂隙灌浆的进一步研究[J]. 敦煌研究,1993,(3):79-97.
LI Zui-xiong, ZHANG Lu, WANG Heng-tong. A further study on restoration work of fissured gravel rock-body in grottoes using PS

grouting[J]. Dunhuang Res, 1993,(3):79-97.

[3] 李最雄,张虎元,王旭东. PS-F灌浆材料的进一步研究[J]. 敦煌研究,1996(1):125-139.
LI Zui-xiong, ZHANG Hu-yuan, WANG Xu-dong. Further studies on the use of PS-F as a grouting mixture[J]. Dunhuang Res, 1996(1):125-139.

[4] 杨涛,李最雄,堪文武. PS-F灌浆材料的物理力学性能[J]. 敦煌研究,2005(4):40-50.
YANG Tao, LI Zui-xiong, CHEN Wen-wu. Mechanical and physical properties of PS-F grouting materia[J]. Dunhuang Res, 2005(4):40-50.

[5] 李最雄,王旭东. 榆林窟东崖的岩体裂隙灌浆及其效果的人工地震检测[J]. 敦煌研究,1994,(2):174-184.
LI Zui-xiong, WANG Xu-dong. Results of the grouting of cracks of the eastern face of the Yu Lin grottoes and artificial earthquake monitoring[J]. Dunhuang Res, 1994,(2):174-184.

[6] 李最雄. 李最雄石窟保护论文集[M]. 兰州:甘肃民族出版社,1994.
LI Zui-xiong. LI Zui-xiong grottoes conservation[M]. Gansu National Press, Lanzhou, 1994.

[7] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京:科学出版社,2003.
LI Zui-xiong. Ancient site conservation of Silk Road[M]. Science Press, Beijing, 2003.

[8] 丁济新,计丽珠. 大足石窟岩体补强材料初步研究[J]. 地下空间,1995,15(1):45-50.
DING Ji-xin, JI Li-zhu. A preliminary study on repair materials for stone statue rockmass in Dazu, Sichuan[J]. Underground Space, 1995,15(1):45-50.

[9] Hydraulic lime[J]. J Franklin Institute, 1913, 175(5):510.

[10] Moorehead D R. Cementation by the carbonation of hydrated lime[J]. Cement Concrete Res, 1986,16(5):700-708.

[11] Fassina V, Favaro M, Naccari A, et al. Evaluation of compatibility and durability of a hydraulic lime-based plasters applied on brick wall masonry of historical buildings affected by rising damp phenomena[J]. J Cultural Heritage, 2002,3(1):45-51.

[12] Mosquera M J, Benitez D, Perry S H. Pore structure in mortars applied on restoration-effect on properties relevant to decay of granite buildings[J]. Cement Concrete Res, 2002,32(12):1883-1888.

[13] Lanás J, Berna J L P, I, Bello M A, et al. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars[J]. Cement Concrete Res, 2004,34(12):2191-2201.

[14] Pav'la S, Treacy E. A comparative study of the durability and behaviors of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars[J]. Materials and Structures, 2006,39(3):391-398.

[15] Victoria I. Pingarrón Alvarez. Performance analysis of hydraulic lime grouts for masonry repair[D]. University of Pennsylvania, 2006.

[16] Pavía S, Toomey B. Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly-hydraulic lime mortars[J]. Materials and Structure, 2008,41(3):559-569.

[17] 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.
- [18] 周霄, 胡源, 王金华, 等. 水硬石灰在花山岩画加固保护中的应用研究[J]. 文物保护与考古科学, 2011, **23**(2): 1-7.
- ZHOU Xiao, HU Yuan, WANG Jin-hua, *et al.* Study on hydraulic lime mortar for consolidation of Huashan rock paintings[J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2011, **23**(2): 1-7.
- [19] 李最雄. 我国古代建筑史上的奇迹[J]. 考古, 1985, (8): 741-747.
- LI Zui-xiong. Ancient architectural history of China's miracle[J]. *Archaeology*, 1985, (8): 741-747.
- [20] 李最雄. 世界上最古老的混凝土[J]. 考古, 1988, (8): 751-756.
- LI Zui-xiong. The world's oldest concrete[J]. *Archaeology*, 1988, (8): 751-756.
- [21] LI Zui-xiong, ZHAO Lin-yi, LI Li. Light weight concrete of Yangshao Period of China: The earliest concrete in the world[J]. *Sci Chin Technol Sci*, 2012, **55**(3): 629-639.
- [22] 赵林毅, 李黎, 李最雄, 等. 中国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的研究[J]. 无机材料学报, 2011, **26**(12): 1327-1334.
- ZHAO Lin-yi, LI Li, LI Zui-xiong, *et al.* Study on two kinds of traditional silicate material China ancient buildings[J]. *J Inorg Mat*, 2011, **26**(12): 1327-1334.
- [23] 李黎, 赵林毅, 王金华, 等. 我国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的物理力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(10): 2120-2127.
- LI Li, ZHAO Lin-yi, WANG Jin-hua, *et al.* Study on the physical and mechanical properties of two kinds of traditional silicate materials of China ancient buildings[J]. *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, **30**(10): 2120-2127.
- [24] 李最雄, 赵林毅, 李黎. 砂砾岩石窟岩体裂隙灌浆新材料研究[J]. 敦煌研究, 2011, (6): 59-64.
- LI Zui-xiong, ZHAO Lin-yi, LI Li. Gravel rock grotto rock fissure grouting materials research[J]. *Dunhuang Res*, 2011, (6): 59-64.
- [25] 李黎, 赵林毅, 李最雄. 中国古建筑中几种石灰类材料的物理力学特性研究[J]. 文物保护与考古科学, 2014, **26**(3): 74-84.
- LI Li, ZHAO Lin-yi, LI Zui-xiong. Study on the physical and mechanical properties of several lime materials in ancient Chinese architecture[J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2014, **26**(3): 74-84.
- [26] 方永浩, 郑波, 张亦涛. 偏高岭土及其在高性能混凝土中的应用[J]. 硅酸盐学报, 2003, **31**(8): 801-805.
- FANG Yong-hao, ZHENG Bo, ZHANG Yi-tao. Metakaolin and its application in high performance concrete[J]. *J Chinese Ceramic Society*, 2003, **31**(8): 801-805.
- [27] 李克亮, 黄国泓, 王冬, 等. 高活性偏高岭土的研究[J]. 混凝土, 2005, (11): 49-59.
- LI Ke-liang, HUANG Guo-hong, WANG Dong, *et al.* High reactivity metakaolin[J]. *Concrete*, 2005, (11): 49-59.
- [28] 郭文瑛, 吴国林, 文梓芸, 等. 偏高岭土活性评价方法的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, **28**(3): 76-79.
- GUO Wen-ying, WU Guo-lin, WEN Zi-yun, *et al.* Research on the estimation method for the reactivity of metakaolin[J]. *J Wuhan Uni Technol*, 2006, **28**(3): 76-79.
- [29] 施惠生, 郭晓璐. 混凝土膨胀剂研究及其应用[J]. 粉煤灰, 2006, (1): 12-15.
- SHI Hui-sheng, GUO Xiao-lu. Study on concrete expansion admixture and its application[J]. *Coal Ash China*, 2006, (1): 12-15.

The lab selection study on Yangshao concrete grouting materials to treat the cracks of sandstone grottoes

ZHAO Lin – yi^{1,2}, WANG Xu – dong^{1,2}, LI Li³, YAN Shao – jun⁴, JIANG Si – wei⁵,
LI Zhi – peng⁶, LI Zui – xiong^{1,2}, FANG Yun⁴

- (1. *The Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China*; 2. *National Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings and Earth Sites, Dunhuang 736200, China*; 3. *Chinese Academy of Cultural Heritage, Beijing 100029, China*;
4. *China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China*; 5. *Dazu Academy of Carved Stone, Dazu 402360, China*;
6. *The Service Center of Cultural Relics Conservation Technology, The Dunhuang Academy, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Metakaolin is a type of high activity, man – made volcanic ash material, formed by high – temperature heating of dehydrated kaolin a certain ratio good quality high alumina clinker, anhydrite and other inorganic materials. It is an expansion agent that has properties of being anti – cracking and water resistant. During a study on “Yangshao Concrete”, it is found that when metakaolin is added into hydraulic lime (contained in calcinated ginger nut), the strength of the stone body formed by the hydraulic lime could be improved significantly; however, the shortcoming is a big distortion due to shrinkage. This paper describes a study of “Yangshao Concrete”, aimed at using it for consolidation of the cracks in the conglomerate grottoes, by studying in the laboratory different ratios metakaolin and the expansion agent AEA to hydraulic lime of calcinated ginger nut, in order to learn the basic properties of the mixture, e. g. , fluidity, setting time, shrinkage and strength on aging. Suitable grouting materials and ratios are selected to treat the cracks of sandstone grottoes.

Key words: Yangshao concrete; Sandstone grottoes; Grouting cracks; Consolidation material; Selection

(责任编辑 马江丽)