

大雁塔和法门寺砖材保护研究

和 玲

甄 刚, 周伟强

(西安交通大学理学院 陕西西安 710049)

(西安文物保护修复中心 陕西西安 710061)

摘要: 大雁塔和法门寺塔这两座佛教名塔都表现出明显的风化现象, 需要及时的给予保护。通过 X-射线衍射分析、岩相显微镜分析及孔隙度的测定, 分析了大雁塔和法门寺两座佛教名塔的风化特征。在此基础上, 用几种不同的加固保护剂对两种砖材进行加固保护研究。通过渗透深度、孔隙度、毛细吸水和毛细渗透、持水量、透气性、水力学膨胀、等温吸附、抗压强度及酸腐蚀、冻融、热膨胀之后的强度衰减等参数分析, 结果表明含氟聚合物对两种砖材具有良好的加固保护效果。

关键词: 砖材建筑; 孔隙度; 强度; 透气性; 水力学

中图分类号: K876.3 **文献标识码:** A

1 前 言

大雁塔和法门寺塔都是我国两座佛教名塔。大雁塔位于西安市中心以南 4 公里处, 创建于公元 652 年, 塔高 64 米。采用磨砖对缝技术, 属楼阁式砖塔, 砖体结构表现出木结构风格。法门寺位于陕西省扶风县城北 10 公里的法门镇, 是我国古代安置释迦牟尼佛骨舍利的著名寺院。塔高 47 米, 1981 年 8 月 24 日崩塌过。这两座砖塔的砖材结构特征上都表现出较大的孔隙, 因而使它们容易受水及水中可溶性盐的侵袭而风化^[1-3]。风化后的普遍现象是: 接近地面的部位砖体表面颜色较深、潮湿灰暗、表皮粉化或脱落, 有些部位出现细小裂隙或裂缝、磨砖对缝处局部凹陷等, 这些风化造成砖材的力学强度衰减。而砖塔的底部是塔体受力的基础, 因此, 针对这种风化情况, 需要进行合理的保护处理, 其中化学保护方法是一种能起到延缓或阻止这些风化现象且不改变外观的良好保护措施^[4]。

本工作在探讨砖塔风化机理的基础上, 选用含氟聚合物加固剂配方, 分别进行了固化物形成周期、渗透深度、孔隙度、毛细吸水和毛细渗透、持水量、透气性、水力学膨胀、等温吸附、抗压强度、耐酸腐蚀、耐冻融等实验研究来评估加固剂的性能。研究中, 与德国雷马士公司生产的 Remmers 300 产品进行对比分析。

2 实验材料和方法

2.1 矿物组成分析

样品分别取自大雁塔和法门寺修补时更换的原始砖块。X-射线衍射分析: D/MaX-rA (日本理学株式会社), 电流 80mA, 电压 45kV, 铜靶, 石墨单色器。

岩相显微分析: 将砖样块切片并加工磨制成透光的薄片, 以载薄片为呈载体, 借助于岩相光学显微镜进行矿物颗粒分布、颗粒大小、孔隙大小及形状、基体、胶结物等的分析。

2.2 加固材料及方法

加固剂采用以四氟乙烯为主体的含氟聚合物, 缩写为 F4-SS, 不同浓度配方见表 1。

表 1 加固剂体系一览表

Table 1 The consolidation, composition and sources

加固剂体系	主要组成	溶剂	来源
5%F4-SS	含氟聚合物	醋酸丁脂	自制
20%F4-SS	含氟聚合物	醋酸丁脂	自制
30%F4-SS	含氟聚合物	醋酸丁脂	自制
Remmers 300	硅酸乙酯二聚体	无水乙醇	德国雷马士公司
WD-02	硅酸乙酯二聚体	无水乙醇	武汉大学

样块尺寸分别为 5cm×5cm×(0.5cm~1.5cm) (透气性测试)、5cm×5cm×(8cm~15cm) (渗透深度测定)及 5cm×5cm×5cm (其它性能测试)。

收稿日期: 2003-05-15; 修回日期: 2004-04-20

作者简介: 和玲(1962-), 女, 2003 年毕业于西北工业大学材料学专业, 博士, E-mail: ling121212@sohu.com

处理方法:分别采用了两种处理方法。1)毛细吸收法。将一金属网置于适当容器中,样品放在网上,慢慢添加加固剂于容器中,使加固剂仅靠毛细吸收进入样品内部。10min后,记录加固剂吸收量,并将加固后的样品置于温湿度相对恒定的容器内,防止溶剂快速挥发使样块表面浓度较大而结壳或颜色变深。一周后外露,再在室内干燥2-3周。2)浸泡法。将样品完全浸泡在加固剂中10min,后续处理与毛细吸收法相同。

2.3 加固保护效果评估

根据所选砖质样品本身的特性及机械性能,分别进行了固化物形成量、孔隙度、渗透深度、毛细吸水系数及毛细渗透系数、持水量、抗压强度、透气性、吸附等温线、水力学膨胀、颜色变化、耐冻融性能等测试。毛细吸水系数及渗透系数、持水量、孔隙度、水力学膨胀试验依据 NORMAL 29/88 程序进行。抗压强度、冻融实验根据 ASTM C97-00 及 C67-97 标准^[9]进行。

3 结果与讨论

3.1 砖材结构显微特征及砖塔风化状况

3.1.1 砖材结构显微特征 岩相显微镜分析表明,大雁塔及法门寺两种砖材主要由粘土、粉砂和碳酸盐矿物组成。其中以粘土为主(约40%~50%),粉砂含量约20%~30%,碳酸盐约10%~20%,空洞5%~10%。空洞较大,一般在0.1mm以上,形状不规则,分布也不均匀,见图1和图2所示。粉砂主要由石英和长石组成,少量云母矿物,另有少量可能是有机物碎屑,已碳化成不透明或半透明物质,碎屑呈棱角状,尖棱角状,粒径0.06~0.005mm,分布较均匀。除了石英和长石碎屑完全保持新鲜无任何明显变化外,其余已发生改变,主要是透明度差变成单透明或不透明。粘土已变得混浊,半透明到不透明,但没有因熔化而出现玻璃质,仅是介于两者之间的状态。碳酸盐矿物主要是方解石,部分以球团状态集中出现。

3.1.2 砖材矿物组成分析 通过对砖样内部及表面

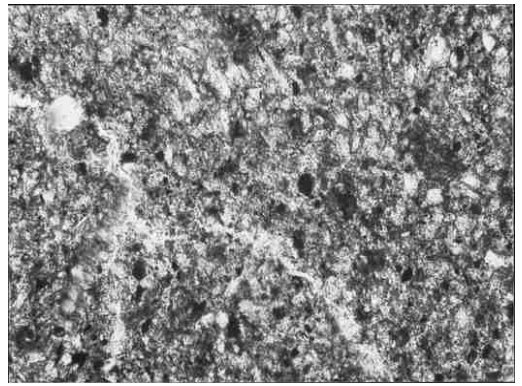


图1 大雁塔砖质偏光显微图像(大孔隙)

Fig. 1 Thin section of Dayan Pagoda brick, $\times 63$

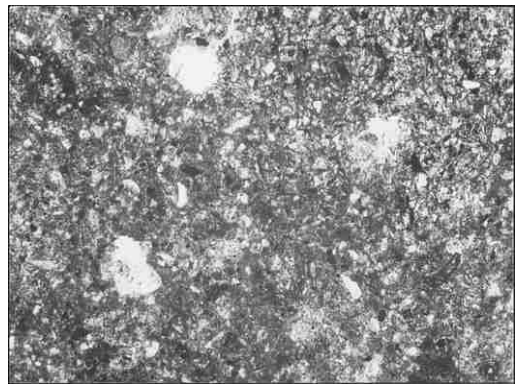


图2 法门寺砖质偏光显微图像(大孔隙)

Fig. 2 Thin section of Famen Temple brick, $\times 63$

刮样的X-射线衍射分析,发现不同砖样的矿物组成基本相同(见表2),表面风化物以碳酸钙为主(见图3)。

表2 两种砖材的显微分析结果(矿物组成)

Table 2 The composition of minerals of different bricks

样品名称	矿物组成	孔隙度
大雁塔砖	伊利石 2%, 蒙脱石 2%, 石英 55%, 斜长石 13%, 钠长石 12%, 方解石 4%, 菱铁矿 3%, 白云石 6%, 未检出 3%	35%
法门寺砖	伊利石 2%, 蒙脱石 3%, 石英 50%, 斜长石 11%, 钠长石 13%, 方解石 5%, 菱铁矿 3%, 白云石 8%, 未检出 3%	34%

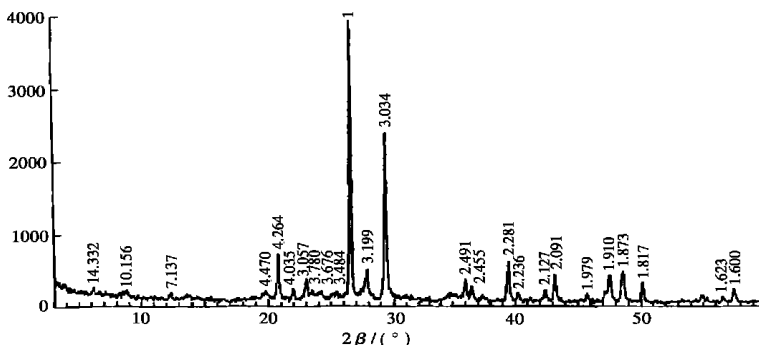


图3 大雁塔砖样表面风化物的X-射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of brick from Dayan Pagoda

3.1.3 砖塔风化成因分析 砖质在经过长时间的水、盐、酸雨等的侵袭时, 加上砖中的大孔隙(孔隙度为 35%)使得砖体容易吸收水分, 会使砖膨胀但不象原来粘土本身那么容易遇水膨胀, 水的长期和反复作用促使粘土矿物膨胀及收缩, 膨胀-收缩-再膨胀反复作用的结果, 使砖质表此粉化、脱落, 甚至产生裂缝。同时, 大雁塔体长年累月受雨水和地下毛细水活动的侵袭, 也会使一些可溶解的矿物随水流失, 造成机械强度降低及砖块表面剥落。在距地面

处(大约 4 米), 外表颜色明显灰暗、潮湿, 并伴随表面片状剥落和起翘现象, 都进一步证明了毛细水的侵蚀。在水的活动中, 夹杂的可溶盐分也会使砖块表面及内部出现裂缝, 气候的冷热循环及盐的结晶-溶解作用, 促使裂缝不断扩大, 有时使砖表面片状剥落(图 4)。除此之外, 盐还会沉积在砖的表面或次表面, 形成硬壳风化物。鉴于以上风化情况, 有必要对大雁塔和法门寺砖体进行加固保护及表面防护处理。

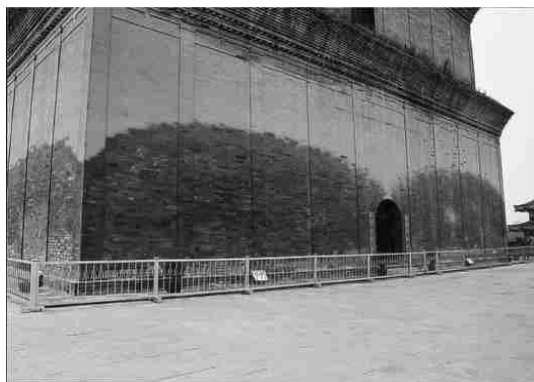


图 4 大雁塔的塔体基座潮湿灰暗(左)及砖的表面风化(右)

Fig. 4 Deterioration in base part and detailed surface of Dayan Pagoda

3.2 加固保护研究

3.2.1 固化物形成周期及渗透深度 图 5 和图 6 分别记录了用不同加固体系加固 10min、1-4 周后的样块吸收量变化情况。图 5、6 中, 0 点表示加固 10min 后的吸收量, 不同加固体系的胶化物形成速度有明显差异。F4-SS 体系基本在两周后形成稳定的聚合物。WD-02 及 Remmers 300 体系在三周

后基本稳定。这是因为含氟聚合物与有机硅的作用机理不同所致。F4-SS 靠溶剂挥发后自身聚合并牢固地附着在砖质矿物颗粒表面。所以随时间延长, 溶剂挥发, 吸收量减少。而有机硅靠吸收水分发生聚合与矿物颗粒结合, 所以加固后的最初阶段, 重量非但不减轻, 反而增加(吸水)。这也说明这种有机硅在干旱地区的应用受到限制。

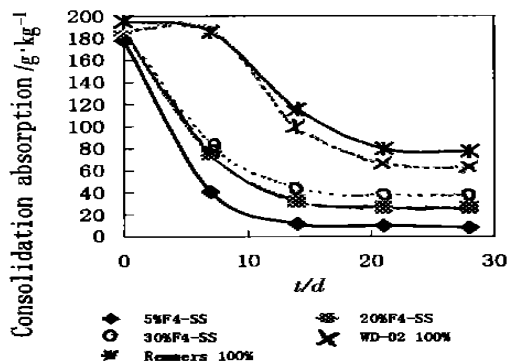


图 5 大雁塔砖材 B-DYT 固化物形成周期

Fig. 5 The gel formation of Dayan Pagoda brick by total immersion

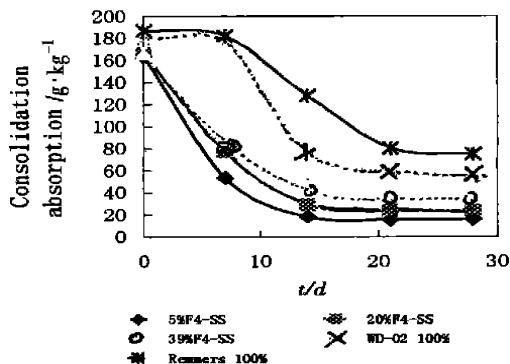


图 6 法门寺砖材 B-DYT 固化物形成周期

Fig. 6 The gel formation of Famen Temple brick by total immersion

图 5.6 中也显示出,不同浓度的含氟聚合物体系,在同种砖质加固的最初阶段,具有基本相同的吸收量,反映出砖材的孔隙较大而不受含氟聚合物浓度引起的粘度差别的影响。最终固化物含量与树脂浓度成正比,30%的含氟聚合物形成最大固化物含量。两种砖质孔隙度接近,所以,每种体系下,大雁塔与法门寺砖有相似的加固剂吸收量。

渗透深度及深度随时间的变化见表 3。在不同浓度的含氟聚合物体系中,5%F4-SS 体系由于粘度小,渗透深度最大,20%F4-SS 体系在处理后的一个月时间内样块渗透度有较大幅度的增长。30%F4-SS 体系因溶液浓度过大,渗透深度增长幅度较小,因为浓度达到一定程度时,含氟树脂首先进行聚合固化反应,很难进一步靠毛细作用继续向样块内部迁移。两种有机硅在渗透深度上与 20%F4-SS 相似。总体上,两种砖材渗透深度比较接近,法门寺砖样稍大一些,5cm 以上的渗透深度足以达到加固保护的要求。

表 4 大雁塔和法门寺加固处理后岩石性能及参数

Table 4 The hygric parameters of brick in Dayan Pagoda and Famen Temple

样品名称	加固剂	毛细吸水系数	毛细渗透系数	持水量	孔隙度	膨胀系数	颜色
		$W/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$B/\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$	/ %	/ %	$/\text{t}\cdot\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}$	ΔE
大雁塔砖	5%F4-SS	0.08	0.31	13.20	33.6	797	2.09
	20%F4-SS	0.15	0.20	18.56	20.6	792	1.85
	30%F4-SS	0.07	0.01	4.65	12.0	400	3.28
	WD-02	6.29	2.09	17.16	23.2	1587	8.36
	Remmers 300	4.68	3.02	10.76	14.5	804	5.38
	空白	25.09	7.90	23.15	35.0	1205	—
法门寺砖	5%F4-SS	0.27	0.41	20.18	30.9	399	0.41
	20%F4-SS	0.20	0.90	6.92	4.0	398	4.13
	30%F4-SS	0.11	0.21	6.24	9.6	400	6.90
	WD-02	9.19	2.63	17.39	25.9	809	6.5
	Remmers 300	4.82	2.23	14.76	9.2	808	5.71
	空白	19.67	7.34	20.89	33.4	1197	—

持水量(即样块在水中浸泡 24h 后的含水量)主要取决于样块的孔隙度,因而持水量与样块的孔隙度变化规律相同。从表 4 也可看出,5%~20%的 F4-SS 体系对大雁塔砖质的持水量降低幅度较小,但 30%F4-SS 体系已明显降低了法门寺砖质的持水量。

尽管用含氟聚合物处理的砖样的毛细吸水及渗透系数明显降低,但样块 24h 浸泡在水中却有一定的吸水量。这可能是因为,用含氟聚合物处理后,样块表面具有明显的憎水性,所以毛细现象不明显。但砖样孔隙的大多数仍然保留敞开状态,因此在

表 3 两种砖质渗透深度结果

Table 3 The penetration depth with time after consolidation by different system

加固剂	大雁塔砖样渗透深度/cm			法门寺砖样渗透深度/cm		
	10min	4周后	增长/%	10min	4周后	增长/%
5%F4-SS	5.2	6.8	30.8	5.2	7.0	34.6
20%F4-SS	3.0	5.5	83.3	2.7	5.7	111.1
30%F4-SS	1.4	1.6	14.3	2.3	2.6	13.0
WD-02	3.1	5.7	83.9	3.5	6.3	80.0
Remmers 300	2.5	5.5	120	2.8	5.0	78.6

3.2.2 不同体系的水力学性能 表4是不同体系的水力学参数测定结果。不同浓度的含氟聚合物体系明显降低了砖材的毛细吸水系数和毛细渗透系数。除了 5%的 F4-SS 体系外(几乎不改变砖质的孔隙度),其他体系都降低了两种砖质的孔隙度,且降低幅度与聚合物浓度成正比。20%~30%F4-SS 样块的空隙度与有机硅 WD-02 及 Remmers 接近。

24h 的长时间内持水量没有大幅度下降,这从后边讨论的透气性参数可以看出。

表 4 也给出了水力学膨胀系数。含氟聚合物体系能明显降低两种砖材吸水后的膨胀程度。WD-02 体系的水力学膨胀系数较大(在大量的土质保护中也出现同样情况)。从表 4 中可以看出,大雁塔的水力学膨胀大于法门寺砖,这也说明了水力学膨胀除了与砖的孔隙度有关外,与其矿物组成也密切相关。

不同体系处理后样块颜色的变化说明,5%~20%的含氟聚合物体系对两种砖质的外观颜色影响

不大, 30%的 F4 - SS 体系对法门寺砖有较大改变。有机硅因浓度较大, 颜色变化突出, 尤其是 WD - 02 体系。

不同浓度含氟聚合物对样块的水蒸气透过能力见图 7。μ 值代表抗水蒸气的能力, μ 值越大, 水蒸气的透过能力越差。对于大孔隙材料来说, 5% ~ 30%的 F4 - SS 在固化后并不可能将大多数空隙填补, 仍能保持样块一定的透气性。除此之外, 研究中还对 40%F4 - SS 体系对水蒸气的透过能力进行比较, 结果显示 40%F4 - SS 体系有较大的抵抗性。

3.2.3 湿气对加固保护的影响(吸附等温线) 图

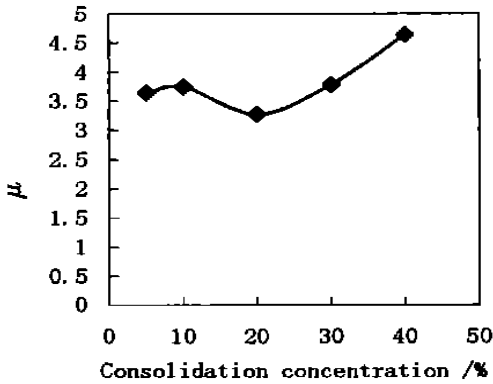


图 7 加固剂浓度对法门寺砖的水蒸气扩散系数 μ 的影响
Fig. 7 Water vapor diffusion of Famen Temple after consolidation

8 是不同体系对大雁塔砖材处理后的吸附等温曲线, 法门寺砖材与此类似。两种砖质的共性是, 有机硅 Remmers 300 和 WD - 02 体系有最大吸附量, 且随环境相对湿度变化时, 吸收量变化不明显, 尤其是 Remmers 300 体系(呈直线)。对大雁塔砖质来说, 20%F4 - SS 体系的吸湿能力较大, 5%的体系较小, 与以上讨论的透气性结果相吻合。法门寺砖质的吸湿量与含氟聚合物的浓度成反比, 5%体系吸湿量较大, 30%体系较小。相同加固剂体系下, 法门寺砖质的吸湿能力大于大雁塔砖质, 而且, 法门寺砖质随湿度变化时的吸湿量增长幅度大于大雁塔砖。

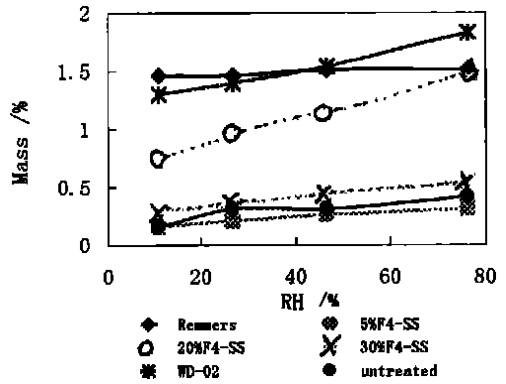


图 8 大雁塔不同体系的吸附等温线
Fig. 8 Absorption isotherms of Da yan Pagoda brick after consolidation

3.2.4 老化对抗压强度的影响 分别进行了加固后一个月的初始抗压强度、冻融 50 个循环后的抗压强度、热膨胀 30 个循环后的抗压强度、10%的 H₂SO₄ 腐蚀后的抗压强度的测定及与加固后的初始强度相比的衰减程度测试, 结果表明, 法门寺砖样与大雁塔砖非常类似, 表 5 给出大雁塔砖样的结

果。每个加固剂体系都使砖质的抗压强度有明显提高。含氟聚合物体系提高的程度与体系的浓度成正比。强度提高的原理是, 聚合物在溶剂挥发后, 聚合形成膜状物质并牢固地附着在矿物颗粒上, 起到加固作用。扫描电镜分析证明了这一结果(见图 9)。

表 5 加固处理后砖样力学强度变化情况
Table 5 Compressive strength after different aging in Dayan Pagoda brick

加固剂体系	大雁塔砖材样块抗压强度/ MPa			
	加固一月后	冻融 50 个循环	热胀 30 个循环	10%H ₂ SO ₄ 酸腐蚀
5%F4 - SS	18. 83	裂(19 循环)	17. 19(- 8. 7)	17. 04(- 9. 5)
20%F4 - SS	21. 32	20. 15(- 5. 5)	17. 86(- 16. 2)	18. 76(- 12. 0)
30%F4 - SS	24. 75	22. 74(- 8. 1)	22. 71(- 8. 2)	21. 59(- 12. 8)
WD - 02	19. 24	裂(49 循环)	18. 67(- 3. 0)	23. 89(+ 24. 2)
Remmers 300	23. 24	21. 66(- 6. 8)	25. 73(+ 10. 7)	19. 35(- 16. 7)
空白	15. 28	21. 91(+ 43. 4)	17. 65(+ 15. 5)	12. 57(- 17. 7)

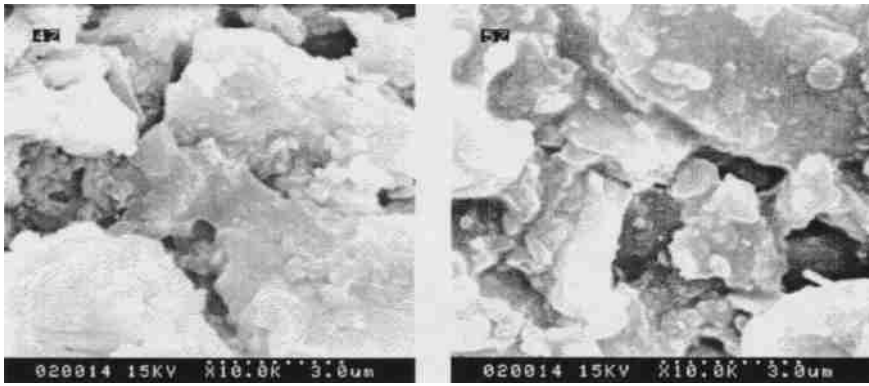


图 9 20%F4-SS 加固大雁塔砖质表面(左)和剖面(右)的 SEM 图像

Fig. 9 SEM image of surface(left) and inner part(right) of treated Dayan Pagoda brick with F4-SS

大雁塔砖质的 5%F4-SS 体系在第 19 个循环冻融后产生裂缝, WD-02 体系样块在 49 个循环后破裂, 因此无法计算出强度衰减。法门寺砖材的混合加固剂及空白样块在 27 个循环出现裂缝。相比之下, 含氟聚合物在冻融 50 个循环后强度衰减程度小于有机硅和混合体系。大雁塔砖耐冻融性比法门寺砖的耐冻融能力强, 表现在强度衰减量较小。强度实验属破坏性测试, 所以上述实验数据是不同的样块测定的结果的平均值, 尽管在选择上尽可能排除样块本身的干扰, 但砖样属人工制备成型, 孔隙分

布不均一, 可能会存在构造上的差异, 导致有些数据偏差较大。有机硅的耐热胀性能较好, 耐硫酸腐蚀性性能差。

耐盐风化结果也显示出含氟聚合物的优越性, 见图 10。实验中, Na_2SO_4 对大雁塔砖样具有明显的剥蚀作用, 已使砖质空白样块表皮出现坑凹及边沿缺损现象, 见图 11。但 20%F4-SS 处理后的样块表面风化比较少。后又进行了脱盐处理, 发现 10%~20%F4-SS 样块的脱盐溶液基本清亮透明, 表明风化物量很小。

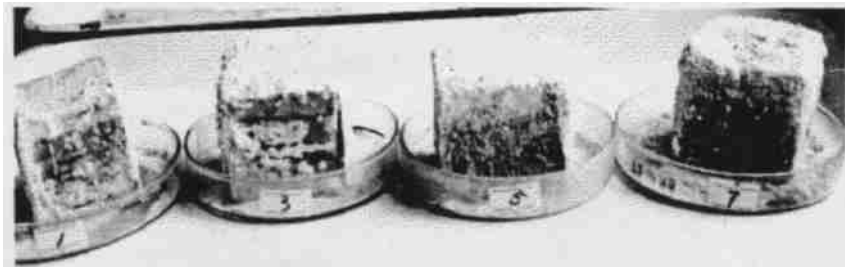


图 10 Na_2SO_4 对砖样块的表面风化现象

Fig. 10 Deterioration of surface after treating with F4-SS and Remmers in Dayan Pagoda brick

1. 20%F4-SS 3. 10%F4-SS 5. 5%F4-SS 7. 100%Remmers 300



图 11 含 Na_2SO_4 样块的裂缝及边缘缺损 A(untreated) B(5%F4-SS)

Fig. 11 Deterioration of cracks after immersion in the solution of Na_2SO_4 A(untreated) B(5%F4-SS)

4 结论

通过以上多项参数分析结果的讨论, 可以看出,

含氟聚合物能显著提高大雁塔和法门寺砖质的抗压强度, 而且强度随深度均匀分布, 能提高砖质对毛细水侵袭的抵抗能力。由于砖材具有较大孔隙, 含氟

聚合物加固后良好的透气性, 不影响文物内部水蒸气的活动, 使文物体内外的水分能自由的流通, 保持了文物的必要呼吸, 起到长效保护的效果。在适当的浓度范围内不改变砖质的外观颜色, 适合于多孔砖质文物的加固保护。研究结果也说明了, 要达到与原砖材的强度协调, 加固剂的浓度应按实际需要选择。

参考文献:

- [1] Charola E, Nunberg S, Freedland J. Salts in ceramic bodies. I. Introducing salts into ceramics[J]. *Int J Restorat Build Monuments*, 2001, 7: 117-174.
- [2] Antonucci V, Mastrangeli C, Mersitieri G. Gas and water vapour transport through polymer based protective materials for stone monuments;

fluorinated polyurethanes[J]. *Mater Struct*, 1998, 206: 104-110.

- [3] Ciardelli F, Aglietto M, Castelvetro V, *et al.* Structurally modulated fluoropolymers for conservation of monumental stones: synthesis, stability and applications[A]. In: Choi, Suckwon ed. *New millennium international forum on conservation of cultural property*, Kongju, Korea[M]. Kongju: Institute of Conservation Science for Cultural Heritage, 2000. 166-181.
- [4] Alessandrini G, Toniolo L, Colombo C. Partially fluorinated acrylic copolymers as coatings for calcareous stone materials[A]. In: Roy, Ashok ed. *Tradition and innovation: advances in conservation*[C]. Contributions to the IIC Melbourne congress, 10-14 October 2000. International Institute for Conservation (IIC), London, United Kingdom, 2000, 1-6.
- [5] ASTM C67-97. Standard test method of sampling and testing brick and structural clay tile. 2000.

The deterioration and consolidation of Dayan Pagoda and Famen Temple

HE Ling

(College of Science, Xian Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ZHEN Gang, ZHOU Wei-qiang

(Xian Center for the Conservation and restoration of Cultural Property, Xi'an 710061, China)

Abstract: The characteristic deterioration mechanism of Dayan Pagoda and Famen Temple were discussed in this paper according to the analysis of minerals by XRD and thin-sectioning. On the basis of these investigations, the penetration depth, porosity, capillarity, water uptake, water vapor diffusion, hygric dilatation, compressive strength and aging-resistance, and so on, were determined before and after treatment with several different consolidates. Fluorinated polymer gave the best results compared with others. The data were confirmed by SEM examination.

Key words: Brick building; Porosity; Compressive strength; Water vapor diffusion; Hydraulic property