

# 浙江余杭凝灰岩摩崖石刻造像 防风化材料性能研究

徐 飞<sup>1</sup> 王 勉<sup>1</sup> 万 俐<sup>1</sup> 陈步荣<sup>2</sup>

(1. 南京博物院, 南京 210016; 2. 南京工业大学, 南京 210009)

**摘要:** 本文以浙江余杭凝灰岩摩崖石刻为研究对象, 根据文物保护原则和对石质文物保护剂的基本要求, 对几种传统石质文物保护剂的保护性能进行了实验室测试, 对石刻保护材料的封护性能、加固性能及耐候性能进行了对比, 最后发现氟硅树脂和派立刻树脂对于凝灰岩石刻的保护, 表现出较好的性能。

**关键词:** 凝灰岩 石刻 防风化

## 1. 引 言

杭州余杭南山摩崖造像石材为凝灰岩。凝灰岩(熔结凝灰岩)是一种分布最广泛、最常见的细粒火山碎屑岩。碎屑主要表现为岩屑、晶屑、玻屑和火山灰, 其碎屑粒径一般小于2.0mm。新鲜的岩石呈灰色、浅黄色, 风化后呈黄褐色、紫色和红褐色。可有斑杂状的色斑分布。外貌疏松多孔有粗糙感。可有清晰的层理。具有典型的凝灰结构和假流纹构造。经过分析检测发现浙江凝灰岩以中酸性和酸性凝灰岩最为典型。岩性化学成分主要为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{O}$ 等, 次要成分为 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{FeO}$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等。酸性凝灰岩 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 一般分别 $>70\%$ 和 $>13\%$ 。 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 通常 $>5\%$ , 其他成分均很低。由此可知酸性凝灰岩化学成分具有高硅、富铝、丰碱和贫铁等特征, 属钙碱系列、铝过饱和岩石。

## 2. 试验材料的选择

### 2.1 加固封护材料

南山石刻文物的材质为凝灰岩, 凝灰岩为多孔材料, 孔隙率大, 孔径大, 外界水分和有害物质如酸性气体, 尘埃, 生物等极易进入, 石刻经过长期风化, 文物表面出现黏土化, 呈现多孔、酥松、吸水性强、易脱落、内层出现缝隙、整体变形、强度下降的特点, 因此, 选择加固材料重点应放在材料孔隙封护性能和防水性能, 另外还需有良好的耐候性能。在查阅大量理论研究<sup>[1~6]</sup>、保

护工程实例资料及市场调研的基础上,根据文物保护原则和对保护材料的要求,拟选择7种加固材料进行室内试验,有关材料的名称、代号及主要成分见表1。

表1 试验用加固材料

名称、代号	产地	主要成分	物态,纯度
MH-1109	北京	有机硅氧烷,小分子量	液体,工业纯
6403	北京	有机硅氧烷,大分子量	液体,工业纯
S-130石材养护剂	江苏	氟硅型	液体,溶剂型
PELICOAT(派力克)	法国	聚合硅氧烷	液体,溶剂型
正硅酸乙酯	上海	硅酸乙酯	液体,浓度28%。
氟硅橡胶		氟硅	固体

## 2.2 试验用石材

对文物进行保护研究,需要选取与文物材质相同或相近的试验用材,这些试验用石材的理化性能包括风化程度、空隙率等也应与文物相同,古人雕刻石器,为运输方便,一般会就地或就近取材,根据章节3中各项性能的测试,证明南山石刻用材为就地取材,因此我们选用当地对应石材为试验用材,两者的差别在于试验用材因取自岩体内部,风化程度很轻微,而石质文物风化严重且程度各不相同,因此选用当地石材为试验用材,不仅材料匀质性好而且在数量上得到保证。试验用材的有关性能已在章节3给出,另外按照GB/T 9966.1—2001《天然饰面石材试验方法 第1部分:干燥、水饱和、冻融循环后压缩强度试验方法》测定了材质的强度,结果见表2。

表2 试验用材的强度

材料编号	干燥压缩强度/MPa	水饱和和压缩强度/MPa
SC-1(当地石材)	22.40	25.95

# 3. 测试项目和试验方法

## 3.1 测试项目

根据南山石质文物风化严重、表面多孔的特点,加固封护试验主要考察材料的加固封护性能和耐候性能。加固封护性能包括:外观、颜色、色泽变化、固化物形成周期、渗透深度、持水量、憎水性、强度、吸湿性、水力膨胀、空隙率、紫外吸收性能等;耐候性能主要有:耐盐、耐二氧化硫、耐酸、耐碱、耐光、耐湿热、耐冻融等。

## 3.2 结果评价

为便于综合比较各种材料的性能,根据是否满足文物保护要求,将材料的各项性能分为优良中差劣五个等级,用于几种材料性能的相对比较,对保护效果无影响的项目则不作评定。

## 3.3 试验方案和步骤

(1) 试块加工:按测试项目要求的尺寸,将石材加工成试块,试块尺寸主要有:50mm×50mm×50mm,50mm×50mm×20mm,20mm×20mm×20mm,尺寸误差小于2mm,试块

边角要完整，数量应满足要求，加工方法为金刚砂轮切割，表面磨光滑。加工好的试块在110℃烘箱里烘干冷却后备用。

(2) 封护材料配制：在查阅材料使用说明、保护施工实例的基础上，为便于性能对比，溶剂采用1:1丙酮-乙酸丁酯混合溶剂，已加溶剂的保护材料直接使用，不再另行加入混合溶剂，详细的保护材料编号与配比见表3。

表3 保护材料编号与配比

材料编号	材料名称	浓度与配制
B (空白)	(不刷涂)	—
M	MH-1109有机硅氧烷, 小分子量	5%, 溶剂为混合物溶剂
D	6403有机硅氧烷, 大分子量	5%, 溶剂为混合物溶剂
S	S-130多功能石材养护剂	直接使用, 不另加溶剂
P	PELICOAT (派力克)	直接使用, 不另加溶剂
T28	正硅酸乙酯	直接使用, 浓度28%。
T14	正硅酸乙酯	加等体积混合溶剂, 浓度14%。
F	氟硅橡胶	固体溶于混合溶剂中, 浓度5%

(3) 封护用量：材料用量为0.20 L/m<sup>2</sup>，即石材表面积每平方米的保护材料用量为200mL，这个用量是综合各种材料常用量，为便于相互比较而统一设定的。先根据试块的尺寸和数量，计算总面积，再根据0.20 L/m<sup>2</sup>材料用量，计算每种材料的体积用量。

(4) 封护操作：将石材表面清理干净，用记号笔编号，每种配方每种性能的测试需要有2~5只平行试块，称量每个试块的重量；试块的封护可采用浸涂、刷涂、喷涂的方法。为保证均匀性，本次实验采用刷涂法，即用软毛刷将材料涂刷到试块表面，涂刷操作要均匀，特别是边角一定要涂刷到位，涂刷共分2~3次完成，每次间隔2~4h，待表面干燥后再涂刷下一遍，直至把规定用量涂完，涂刷完的试块应放在不锈钢网架上自然晾干。

## 4. 各项性能测试

### 4.1 固化物形成期

固化物形成期指材料固化成膜所需的时间，测定方法是涂刷后每隔一定时间称量试块重量的变化。试块尺寸为50mm×50mm×20mm，每组平行试样2只，试验结果见图1。

从图中结果可看出：封护后各种保护材料的固化速度是不一样的，从快到慢依次为P、M、F、D、S、T14、T28。完全固化时间从几小时到2~3天，修复施工时要注意保证在封护固化后再进行下一步操作。

### 4.2 外观，颜色，光泽变化

用肉眼观察封护前后试块的外观，颜色变化，用光泽仪测定光泽度变化，试块尺寸为50mm×5mm×20mm，每样做4块，结果取平均值。

仪器名称：多角度光泽度测定仪。

生产厂家：德国BYK公司。

试验结果见表4。

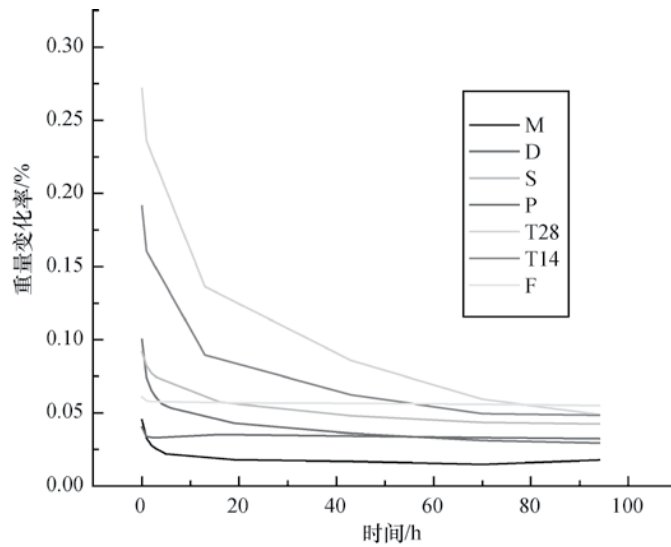


图1 固化物形成期

表4 封护前后外观、颜色和光泽度变化

材料编号	封护后光泽度 (85°)	外观颜色变化	结果评定
B	3.8	—	—
M	2.2	无变化	优
D	4.9	无变化	优
S	5.3	无变化	优
P	3.6	无变化	优
T28	4.3	无变化	优
T14	3.8	无变化	优
F	2.5	表面有润湿感, 色泽有较明显变化	差

除F（氟硅橡胶）外，其余材料封护后试块外观和颜色基本无变化，氟硅橡胶封护后试块色泽有加深，表面有润湿感。

### 4.3 憎水性能

采用润湿角测定仪测定封护后试块的润湿角，润湿角越大，表示憎水性能越好。当润湿角为零时，水滴在表面完全铺展，表示材料完全亲水。每组做5块，结果取平均值。

仪器名称：DSA100型润湿角测定仪。

生产厂家：KRUSS公司。

试验结果见表5。

表5 润湿角测定结果

材料编号	封护后润湿角/(°)	结果评定
B	0	劣
M	40.25	差
D	80.33	中

续表

材料编号	封护后润湿角/(°)	结果评定
S	138	优
P	152.33	优
T28	56.75	差
T14	42	差
F	125.75	良

从表5中可看出：涂保护材料后，憎水性能有不同程度不同的改善，P、S、F有良好的憎水性能，B（空白）不涂保护材料则完全亲水。

#### 4.4 吸湿等温线

吸湿等温线用于考察试块吸收水蒸气的能力，良好的石材保护材料，既要阻止外界水分的进入，又能使石材具有一定的透气性。吸湿等温线的测定是将试块置于一定湿度下的密闭容器中，测量试块重量的变化，不同的相对湿度可用不同种盐的饱和溶液调整。本次实验选用饱和的磷酸氢二钠溶液，25℃时相对湿度为97%。每组2块，取平均值，测定结果见图2。

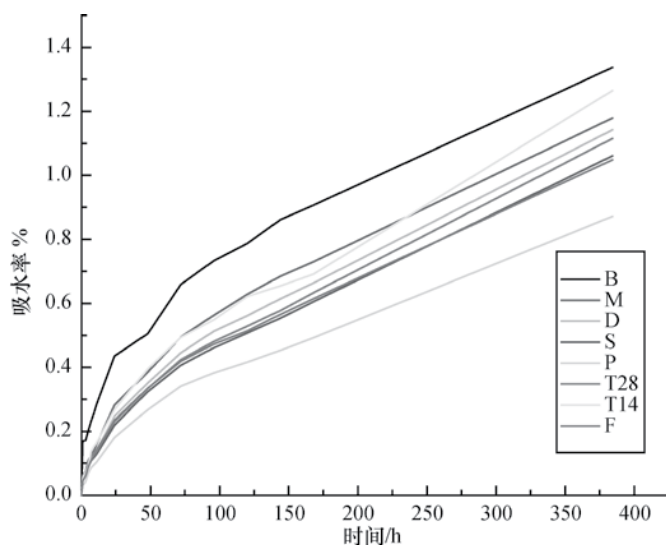


图2 吸湿等温线 (RH=97%, 25℃)

从图2中可看出，不同保护材料的试块吸湿速度不同，其中P、S、F的吸湿速度较慢，吸湿量低，结果评定见表6。

表6 吸湿性测定结果评定

材料编号	结果评定
B	劣
M	中
D	中
S	良

续表

材料编号	结果评定
P	优
T28	中
T14	差
F	良

#### 4.5 持水量

持水量是样块在去离子水中浸泡24h后的吸水量，用吸水量的质量百分率表示。试验结果见表7。

表7 持水量测定结果

材料编号	吸水量 ( $\Delta W/W\%$ )	结果评定
B	3.31	劣
M	2.59	优
D	2.79	优
S	2.95	良
P	2.85	优
T28	3.11	中
T14	3.14	中
F	3.04	良

可以看出各种材料封护后，吸水性都有不同程度的下降，下降原因为封护材料的憎水作用和试块空隙率的下降。

#### 4.6 空隙率和孔径分布

采用自动压汞仪测定封护后试块的空隙率和孔径分布。

仪器型号：Poremaster GT-60。

生产厂家：美国QUANTACHROME公司。

测定封护前后孔径分布曲线见图3。

图中横坐标为孔直径 $D$  (mm)的对数，纵坐标为每克样品中孔的体积 ( $\text{cm}^3$ )，B为未封护样品。从图中可看出：用不同材料封护后，试块平均孔径和孔体积均明显减少 (M总孔隙率略有增加，异常可能为试块不均匀或测定误差引起的)，由于测定结果为整块试块的平均值，而封护材料主要是在表层封护，虽然总空隙率下降不大，但表层的空隙率应是大幅下降的，材料的表层封护效果是明显的。总空隙率测定结果和评价见表8。

表8 总空隙率测定结果

材料编号	总空隙率/%	结果评定
B	10.59	劣
M	10.90	劣
D	9.71	差
S	8.92	中
P	7.09	优

续表

材料编号	总空隙率/%	结果评定
T28	9.68	差
T14	8.15	良
F	5.99	优

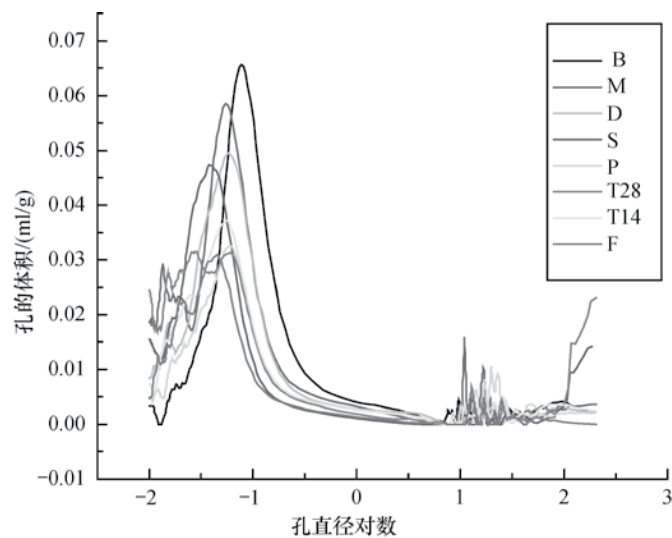


图3 封护前后孔径分布曲线

#### 4.7 抗压强度

保护材料除了起封护防渗透作用外，对脆弱的表层还有加固作用，我们对试块加固前后的抗压强度进行了对比测试，结果表明各试块的强度数值离散性较大，同一封护材料和不同封护材料试块的强度值无明显差别，分析原因可能是试验用石材因未经风化，表层无粉化脆弱现象，因而本身具有较高强度，保护材料的加固作用难以发挥，增强效果并不明显。为便于考查和比较各个材料的加固增强作用，我们在试验室人工制作模拟脆弱试块，方法是将试验用石材磨细成粉，用粉末压片机在模具中加压成型，制作成低强度的圆柱形试块，每只试块的重量和尺寸保持一致，然后进行封护，测定抗压强度。

##### (1) 试块制作

仪器型号：769YP-15A粉末压片机；

生产厂家：天津市科器高新技术公司；

石材粉末细度：120目；

成型压力：1.5MPa；

试块尺寸：直径15mm，高15mm。

##### (2) 强度测定

试块封护干燥后抗压强度的测定。

试验仪器：WDW-100型电子万能材料试验机；

生产厂家：中科院长春试验机研究所；

加压速率：1mm/min；

测定结果见表9。

表9 脆弱试块加固强度测定结果

材料编号	强度/N	结果评定
B	29.80	劣
M	31.2	劣
D	30.42	劣
S	60.46	优
P	53.33	良
T28	51.38	良
T14	44.16	中
F	54.16	良

用不同材料封护后,人工模拟脆弱试块的抗压强度均有增加,说明几种材料都有加固作用,但加固强度有明显差别,其中S、P、F、T28加固效果较好。

#### 4.8 水力学膨胀

水力学膨胀是测定样块在水中浸泡后的尺寸变化,并计算水力学膨胀系数。

仪器型号:测微表(精度0.01mm);

生产厂家:上海量具刃具厂;

操作步骤:将封护后的试块(50mm×50mm×20mm)用测微表测量其三个不同方向中间线的尺寸,置于水中浸泡24h,用拧干的湿抹布擦干,再测量每个方向的尺寸,记录其尺寸变化。浸泡后的尺寸变化见表10。

表10 水力学膨胀测定结果

材料编号	浸泡前尺寸/mm	浸泡后尺寸/mm	结果评定
B	50.76/51.78/20.72	50.77/51.80/20.75	优
M	51.48/51.14/21.50	51.51/51.21/21.62	优
D	53.82/51.76/21.12	53.94/51.83/21.37	优
S	52.82/52.72/21.72	52.96/52.85/21.92	优
P	51.08/52.50/22.84	51.21/52.75/22.92	优
T28	52.76/51.62/21.64	52.85/51.73/21.79	优
T14	52.45/51.96/21.90	52.52/52.06/21.94	优
F	51.86/50.96/20.98	51.95/51.02/21.09	优

浸泡后三维尺寸均无明显变化。

#### 4.9 膜层的透光率(紫外吸收能力)

文物保护要求保持原貌,因此所用材料应无色透明,不影响文物的外观,膜层的透光率采用分光光度法测定,将封护材料均匀涂刷在石英玻璃试片上,干燥后使用紫外可见分光光度计测定吸光度和透光率。

仪器型号:UV1900P紫外可见分光光度计;



生产厂家：上海亚研电子仪器公司；

扫描波长范围：190 ~ 1100nm ；

参比为同批石英玻璃片，各个样品的吸光度曲线见图4。

由图可知样品在200 ~ 300nm紫外区有吸收峰，而在可见光区无选择性吸收，部分样品在可见光区有较均匀的吸收，因此样品膜均为无色，但透明度有所差别。

### 4.10 渗透速率试验

封护材料需渗透到文物内部才能更好地起到加固封护作用，因此，渗透速率是一项重要指标。本项测定采用毛细管法测定渗透速率，将石材磨细成粉，装入直径为5mm的玻璃管中，玻璃管下端预先用棉纱布封闭，样品高度为50mm，采用微压计测量不同时间的渗透高度，重复实验2~3次，结果取平均值。结果见图5。

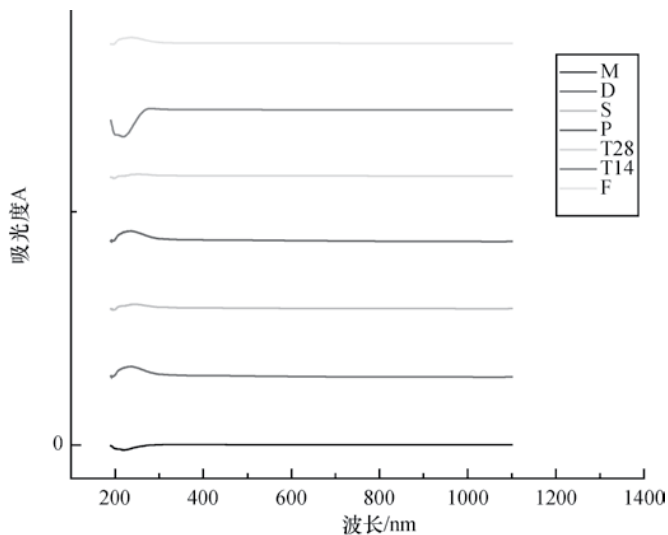


图4 保护材料膜的吸光度曲线

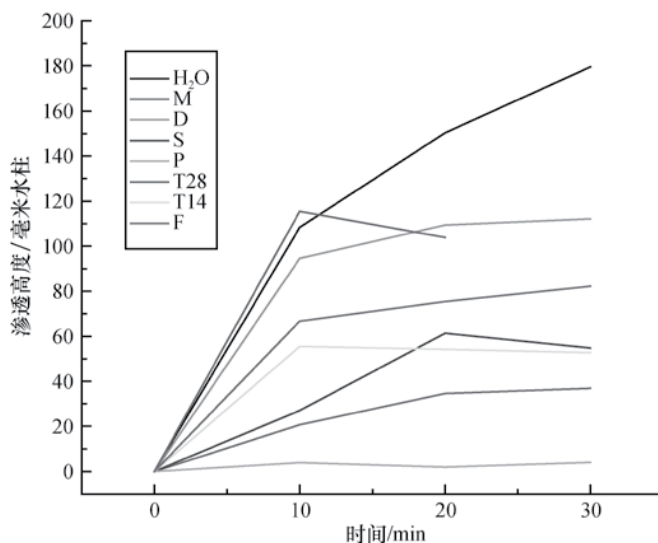


图5 渗透速率试验结果

从图中可看出刚开始时渗透速率很快，到一定时间后速度减慢甚至下降。T28和D的渗透速率较快，而P、M较慢。结果见表11。

表11 渗透速率测定结果

材料编号	结果评定
水	优
M	中
D	优
S	中
P	差
T28	优
T14	良
F	良

#### 4.11 耐盐浸蚀

耐盐浸蚀试验是将试块浸泡在盐的饱和溶液中，经过一定时间后取出，烘干后再次浸泡，按此周期反复循环，由于盐溶液通过孔隙侵入内部，试块烘干后盐结晶产生较大压力，从而使样块开裂溃散，通过观察破坏出现的时间和程度，能够比较样块的空隙率和强度大小。选用的可溶盐是岩石文物中常见的几种盐如NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、CaSO<sub>4</sub>等，本次试验采用Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>饱和溶液。具体操作为：将加固后的样块用饱和硫酸钠溶液浸泡12h，在105~110℃下烘干12h，冷却后再浸泡12h，烘干12h，如此反复循环，直至试块出现严重缺陷为止。本批每组2块，部分样品循环5次后破坏，剩余样品循环15次后破坏。试块变化情况见表12。

表12 耐盐试验结果

材料编号	循环5次后外观	循环15次后外观	结果评定
B	缺角，较均匀脱落，少量孔，局部有微裂纹	—	差
M	缺大角，粗裂纹	—	劣
D	缺大角，粗裂纹，近溃散	—	差
S	多孔	缺大角，粗裂纹，近溃散	优
P	缺角（大），粗裂纹	—	劣
T28	小缺角，深孔	粗裂纹，溃散	良
T14	深孔	深孔，缺大角	优
F	深孔	粗裂纹，溃散	良

#### 4.12 耐二氧化硫试验

本实验项目用于测试经保护材料处理过的试块抵挡大气中二氧化硫等酸性气体侵蚀的能力而设置。将亚硫酸氢钠饱和溶液放在干燥器下层，试块放在干燥器上层，亚硫酸氢钠分解产生二氧化硫气体，试块在这样的氛围里放置300~500h，观察破坏情况，本次试验每组2块，试验时间为500h。结果见表13。

表13 耐二氧化硫试验结果 (500h)

材料编号	400h外观	500h外观	结果评定
B	4面裂纹, 试块微膨胀	六面裂纹, 最长约10mm, 明显膨胀	劣
M	1块试块六面粗裂纹, 膨胀明显。 另1块无明显变化	1块裂纹, 最长约10mm, 掉角起皮, 微膨胀	差
D	4面微裂纹	5面数条裂纹, 最长约10mm, 1块掉 角, 微膨胀	中
S	2面微裂纹	2面微裂纹, 最长约5mm	良
P	3面微裂纹	3面微裂纹, 最长约5mm	良
T28	3面明显裂纹	4面裂纹, 最长约20mm, 试块微膨胀	差
T14	3面明显裂纹	6面裂纹, 最长约20mm明显膨胀	劣
F	1条微裂纹	1条微裂纹	优

#### 4.13 耐酸性能

参照GB/T 9966.6—2001《天然饰面石材试验方法 第6部分:耐酸性试验方法》,将试块浸入0.1M醋酸溶液中,保持50℃恒温,24h后更换酸液,再浸泡24h,随后烘干测定重量损失和表面润湿角。结果见表14。

表14 耐酸性试验结果

材料编号	试验前润湿角	试验后润湿角	润湿角变化率/%	重量变化率/%	结果评定
B	0	53	—	-0.75	劣
M	40.3	49.5	22.83	-0.3	良
D	80.3	80	0.00	-0.21	优
S	138	129	-6.52	-0.25	优
P	152.3	50.5	-66.84	-0.46	差
T28	56.8	69	21.47	-0.25	良
T14	42	76	80.95	-0.36	中
F	125.8	45.5	-63.83	-0.33	中

#### 4.14 耐碱性能

将试块浸入到0.1M NaOH溶液中,保持50℃恒温,24h后更换碱液,再浸泡24h,随后观察表面,烘干测定重量损失和润湿角,结果见表15。

表15 耐碱性试验结果

材料编号	试验前润湿角	试验后润湿角	润湿角变化率/%	重量变化率/%	结果评定
B	0	59.5	—	-0.53	劣
M	40.3	99.5	147.90	-0.37	差
D	80.3	60	-25.28	-0.47	中
S	138	100.5	-27.17	-0.28	优
P	152.3	129.5	-14.97	-0.25	优

续表

材料编号	试验前润湿角	试验后润湿角	润湿角变化率 / %	重量变化率 / %	结果评定
T28	56.8	83	46.13	-0.40	良
T14	42	68	61.90	-0.42	良
F	125.8	59.5	-52.70	-0.50	中

从结果可知：用碱浸泡后，原先憎水性好的变差，而憎水性差的却变好，试块有一定的重量损失率，推测碱和试块发生了反应。原先表面封护效果好的受到一定破坏，表面封护效果差的由于生成某种产物而有一定憎水性。在石质文物存放环境中，多数是受到酸性气体的侵入，因此应重点考虑耐酸性，如使用水泥石灰等修复材料则必须考虑文物的耐碱性能。

#### 4.15 热膨胀试验

将封护处理后的样块在100~110℃下加热4h，室温冷却4h后再加热，记录样块尺寸变化情况，反复30个循环后，测试样块的重量、润湿角、热膨胀系数等性能。试验结果见表16。

表16 热膨胀试验结果

材料编号	试验前润湿角	试验后润湿角	润湿角变化率 / %	重量变化 / %	热膨胀系数 / %	结果评定
B	0	0	—	-0.47	0.20	良
M	40.3	45	11.67	-0.78	0.38	差
D	80.3	69.5	-13.45	-0.47	0.78	劣
S	138	124.5	-9.78	-0.40	0.30	优
P	152.3	141	-7.42	-0.43	0.00	优
T28	56.8	109	91.9	-0.37	0.41	差
T14	42	54	28.57	-0.72	0.51	差
F	125.8	97	-22.89	-0.30	0.48	中

#### 4.16 耐冻融试验

将样块在水中浸泡4h，在-10℃冷冻4h，再于20~25℃水中溶化4h，记录样块外观变化情况，反复进行50个循环后，取出测试润湿角和抗压强度，本次试验后外观均无明显变化，试验结果见表17。

表17 耐冻融试验结果

材料编号	试验前润湿角	试验后润湿角	润湿角变化 / %	结果评定
B	0	37.66	—	—
M	40.3	53.5	32.75	中
D	80.3	71	-10.83	优
S	138	98.5	-28.62	良
P	152.3	129	-15.10	优
T28	56.8	44.5	-21.65	良
T14	42	57.5	36.90	中
F	125.8	98.5	-21.70	良

#### 4.17 耐水侵蚀试验

耐水侵蚀循环是将样块在水中浸泡24h，于110℃烘箱中烘干后，再浸泡在水中，如此循环，观察裂缝产生和情况，本次试验每组2块试块，循环次数为30次，结果见表18。

表18 耐水侵蚀试验结果

材料编号	试验前润湿角	试验后润湿角	润湿角变化率 / %	试验前吸水率 / %	试验后吸水率 / %	结果评定
B	0	65.5	—	3.31	3.47	差
M	40.3	95.5	136.97	2.59	2.69	差
D	80.3	91	13.33	2.79	2.93	优
S	138	115	-16.67	2.95	2.95	优
P	152.3	121	-20.55	2.85	2.95	良
T28	56.8	69.5	22.36	3.11	3.24	良
T14	42	92.5	120.23	3.14	3.4	差
F	125.8	106.5	15.34	3.04	2.73	优

#### 4.18 湿热试验

在一定的温度和湿度下进行不定期时间后，观察外观和润湿角的变化，试验结果见表19。

表19 湿热试验结果

材料编号	试验前润湿角	试验后润湿角	润湿角变化率 / %	结果评定
B	0	0	—	—
M	40.3	14	-65.26	劣
D	80.3	37.5	-53.30	差
S	138	79	-42.75	中
P	152.3	112.5	-26.13	良
T28	56.8	31.5	-44.54	中
T14	42	30	-28.57	良
F	125.8	104	-17.33	优

#### 4.19 耐光老化

耐光老化试验在自制紫外老化箱内进行，紫外灯功率100W，连续照射15天，测量光泽度和润湿角变化情况，试验结果见表20。

表20 耐紫外光试验结果

材料编号	试验前润湿角	试验后润湿角	润湿角变化率 / %	结果评定
B	0	0	—	—
M	40.3	10	-75.19	差
D	80.3	15	-81.32	差
S	138	20	-85.51	差

续表

材料编号	试验前润湿角	试验后润湿角	润湿角变化率 / %	结果评定
P	152.3	109	-28.43	良
T28	56.8	25	-55.99	中
T14	42	20	-52.38	中
F	125.8	128	1.75	优

从结果可知：除F、P外，其余样品经紫外光老化后憎水性大幅下降。

## 5. 结果与讨论

全部材料的加固封护性能和耐候性能试验结果列于表21。

表21 防风化材料性能测试结果

材料	B	M	D	S	P	T28	T14	F
外观	—	优	优	优	优	优	优	差
憎水	劣	差	中	优	优	差	差	良
吸湿性	劣	中	中	良	优	中	差	良
持水量	劣	优	优	良	优	中	中	良
空隙率	劣	劣	差	中	优	差	良	优
强度	劣	劣	劣	优	良	良	中	良
水膨胀	优	优	优	优	优	优	优	优
渗透率	—	中	优	中	差	优	良	良
耐盐	差	劣	差	优	劣	良	优	良
耐SO <sub>2</sub>	劣	差	中	良	良	差	劣	优
耐酸	劣	良	优	优	差	良	中	中
耐碱	劣	差	中	优	优	良	良	中
热膨胀	良	差	劣	优	优	差	差	中
耐冻融	—	中	优	良	优	良	中	良
耐水	差	差	优	优	良	良	差	优
耐湿热	—	劣	差	中	良	中	良	优
耐紫外	—	差	差	差	良	中	中	优
合计	1优1良 2差8劣	3优1良 3中6差4劣	7优4中 4差2劣	9优4良 3中1差	9优5良 2差1劣	3优6良 4中4差	3优4良 5中4差1劣	6优7良 3中1差

(1) 综合以上结果，可以看出材料的加固封护和耐候综合性能从好到差的顺序为：P、S、F、D、T28、T14、M、B。其中P、S性能接近，P稍好；F、D性能接近，F稍好；而不加任何封护的空白B性能最差，因此，使用上述材料对石质文物都有不同程度的保护作用。

(2) 上述结论是将不同性能放在同等权重上进行比较而得出的，实际上由于文物风化状况和所处外部环境的不同，各项性能的重要程度并不一样，因此，应根据实际状况，综合考虑多种因素决定保护用材料。

(3) 未对材料的使用浓度和用量及其他性能进行进一步试验。

(4) 耐候性能结果多使用表面憎水性、重量变化、外观等评价，由于材质的不均匀和试验用材的高强度，强度结果有一定的离散性，因而不能作为结果表明评价的依据。

(5) 各项性能对材料综合性能的影响重要性不同，应根据文物的具体状况和材料的特点进行综合分析和考虑，选择加固用材料。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 张秉坚. 古建筑与石质文物的保护处理技术. 石材, 2002, (8): 32-36.
- [ 2 ] 王丽琴, 党高潮, 梁国正. 露天石质文物的风化和加固保护探讨. 文物保护与考古科学, 2004, 16(4): 58-63.
- [ 3 ] Borgia G C, Camaiti M, Cerri F. Study of water penetration in rock materials by Nuclear Magnetic Resonance Tomography : hydrophobic treatment effects . J Cult Herit , 2000, (1) : 127.
- [ 4 ] 张秉坚. 古建筑与石质文物的保护处理技术. 石材, 2002, (8): 32-36.
- [ 5 ] Contardi V , Franceschi E , Bosio S. On the conservation of architectural artistic handwork of the ‘Pietra di Finale’ . J Cult Herit , 2000 , (1) : 83-90.
- [ 6 ] 王丽琴, 党高潮, 梁国正. 露天石质文物的风化和加固保护探讨. 文物保护与考古科学, 2004, 16(4): 58-63.