

# 临澧县红砂岩崖壁文物本体渗透加固材料筛选研究

郭 宾 张恪轩 白春光 王亚彬  
北京国文琰文物保护发展有限公司

**摘 要:** 临澧县红砂岩崖壁作为文物本体表面风化严重, 需采用化学方法进行加固。对于加固剂的选择需进行严格筛选, 筛选过程需综合考虑各项物理指标在加固前后的变化。本文通过试验的方法, 将试验前后效果数据化, 最终得出筛选结果。

## 引言

青山崖墓群是目前湖南省唯一确认的规模较大、集中、年代较早且年代确定的崖墓群。经过 2014 年的考古调查与勘探、科学试掘, 研究表明青山崖墓群最早开凿的年代上限应该在汉晋时期, 青山崖墓群所在的山体为红砂岩, 红砂岩为富含氧化物的一类沉积岩, 在湿化或浸水后易发生膨胀、崩解, 归类于膨胀岩土中的一种, 属于易风化和软化的软弱岩石。

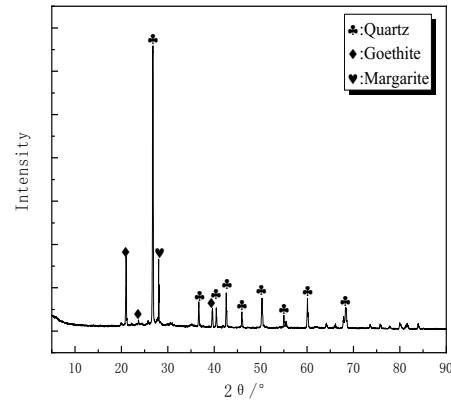
为防止雨水直接冲刷加剧崖壁的风化, 需采用渗透加固方法对岩体表面进行加固。

### 1 红砂岩组成分析

对红砂岩进行 XRD 及 XRF 检测, 红砂岩本体的主要成分有石英 Quartz (SiO<sub>2</sub>), 针铁矿 Goethite (FeO(OH)), 珍珠云母 Margarite (CaAl<sub>2</sub>[(OH)<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>10</sub>])。

红砂岩 XRF 检测结果

氧化物	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
Wt%	81.40	11.61	2.23	1.37	1.36	0.95	0.46	0.37	0.13	0.05



红砂岩 XRD 检测结果

### 2 加固材料筛选

为确定采用何种渗透加固材料, 选定了五种符合文物保护要求的材料进行比选。

五种渗透加固材料的基本信息如下表所示。

编号	1	2	3	4	5
材料名称	WD-26M-1	WD-26M-2	WD-932	正硅酸乙酯	PS 试剂
主要成分	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> Si <sub>2</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> Si <sub>2</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> Si	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
外观	无色透明液体, 有特殊气味	无色透明液体, 有特殊气味	无色透明液体, 有特殊气味	无色透明液体, 有酯香	透明质粘稠状液体

现场取样获取样品后, 将其切割成实验要求的规格, 采用不同渗透加固剂对红砂岩样品进行加固处理, 对加固剂的渗透深度, 加固前后红砂岩的基本物理化学指标, 以及五种加固材料用于红砂岩后的耐可溶盐、耐酸雨、耐冻融老化性能指标进行评估, 获得适合红砂岩渗透加固保护的材料及工艺。

### 3 试验对比

渗透前后砂岩样品色差值变化

渗透剂编号	渗透前			渗透后			色差值 ΔE
	L	a	b	L	a	b	
WD-26M-1	47.5	10	13.5	37.9	6.7	8.3	11.4
WD-26M-2	48	13.1	15.9	35.2	13.6	11.3	13.6
WD-932	46.4	15.9	17.4	32.3	14	12.1	15.2
正硅酸乙酯	49.1	10.5	14.6	41	11.4	13.8	8.2
PS 试剂	53.2	13.5	16.9	44.4	14.1	15	9.0
空白组	49.9	7.5	11.4	37.2	20.4	17.4	19.1

渗透前后砂岩样品光泽度 (单位/Gu)

实验组	光泽度 G (平均值)		光泽度变化 ΔG
	渗透前	渗透后	
空白组	0.56	0.42	-0.14
WD-26M-1	0.66	0.7	0.04
WD-26M-2	0.56	0.56	0
WD-932	0.44	0.38	-0.06
正硅酸乙酯	0.64	0.68	0.04
PS 试剂	0.76	1.48	0.72

渗透前后砂岩样品吸水率、体积密度、表观密度、显气孔率

渗透剂编号	E 吸水率 /%	B 体积密度 /g·cm <sup>-3</sup>	P 显气孔率 /%	T 表观密度 /g·cm <sup>-3</sup>
空白组	9.401	2.334	17.094	2.193
WD-26M-1	0.540	1.823	1.202	2.251

实验组	1.725	1.814	3.882	2.341
WD-26M-2	1.725	1.814	3.882	2.341
WD-932	0.435	1.841	0.954	2.216
正硅酸乙酯	11.276	2.439	20.241	2.251
PS 试剂	10.054	2.368	18.319	2.231

试样渗透深度及表面硬度

实验组	表面硬度		渗透深度 cm
	渗透前	渗透后	
空白组	408.4	388.4	2.32
WD-26M-1	427.8	441.0	5.7
WD-26M-2	475.4	417.0	1.72
WD-932	441.6	449.0	1.33
正硅酸乙酯	427.4	572.2	5.31
PS 试剂	451.0	505.0	0.31

试样抗压强度数据

实验组	平均最大载荷 N	抗压强度 MPa
空白组	3969.2	2.32
WD-26M-1	22510	14.30
WD-26M-2	11730	7.40
WD-932	1802	1.14
正硅酸乙酯	8800	5.72
PS 试剂	20172	12.02

试样抗折强度

实验组	平均最大载荷 N	抗折强度 MPa
空白组	164.0	0.37
WD-26M-1	1741.6	4.00
WD-26M-2	1534.0	3.54
WD-932	551.2	1.35
正硅酸乙酯	1023.0	2.13
PS 试剂	610.2	1.35

透气性试验数据

渗透剂编号	测试组件初始质量/g	5天后测试组件/g	质量变化/g	平均质量变化/g	下降率/%
1-1	40.95	38.01	-2.94	-1.87	71.97
1-2	44.23	42.87	-1.36		
1-3	42.93	41.54	-1.39		
1-4	41.14	39.27	-1.87		
1-5	43.51	41.72	-1.79		
2-1	41.49	39.36	-2.13	-1.67	74.94
2-2	43.88	42.63	-1.25		
2-3	42.76	41.38	-1.38		
2-4	41.58	39.87	-1.71		
2-5	39.62	37.73	-1.89		
3-1	42.77	40.80	-1.97	-1.63	75.54
3-2	41.23	39.77	-1.46		
3-3	40.12	38.67	-1.45		
3-4	42.30	40.50	-1.80		
3-5	43.23	41.75	-1.48		
4-1	42.78	38.41	-4.37	-4.03	39.54
4-2	43.55	39.16	-4.39		
4-3	41.58	37.12	-4.46		
4-4	41.46	38.03	-3.43		
4-5	41.92	38.40	-3.52		
5-1	41.60	37.26	-4.34	-4.21	36.87
5-2	42.72	38.63	-4.09		
5-3	41.19	37.35	-3.84		
5-4	41.43	36.79	-4.64		
5-5	42.17	38.02	-4.15		
0-1	41.33	33.15	-8.18	-6.67	
0-2	43.77	36.78	-6.99		
0-3	42.37	36.53	-5.84		
0-4	41.64	36.19	-5.45		
0-5	41.90	35.00	-6.90		

耐盐实验试样抗折强度抗压强度数据

实验组	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
WD-26M-1	5.43	1.05
WD-26M-2	3.00	1.54
WD-932	4.31	1.12
正硅酸乙酯	2.27	0.20
PS 试剂	失去强度	失去强度
空白组	失去强度	失去强度

耐酸实验试样抗折强度、抗压强度数据

实验组	抗压强度 MPa	抗折强度 MPa
WD-26M-1	4.35	0.63
WD-26M-2	3.86	0.7
WD-932	1.82	0.46
正硅酸乙酯	2.26	0.35
PS 试剂	1.24	0.24
空白组	1.33	0.15

冻融循环实验试样抗折强度、抗压强度数据

实验组	抗压强度 MPa	抗折强度 MPa
WD-26M-1	14.08	2.98
WD-26M-2	13.22	3.14
WD-932	9.46	1.32
正硅酸乙酯	6.59	0.76
PS 试剂	6.78	0.97
空白组	2.18	0.44

4 数据分析

(1) 红砂岩样品表面颜色在渗透实验后均会较大程度上改变 ( $\Delta E > 4$ ), 其中 WD-932 影响最大, 正硅酸乙酯及 PS 试剂对红砂岩色度的影响相对较小。砂岩表面属于“无光表面”, 渗透剂的使用对砂岩表面光泽度影响较小 ( $\Delta G < 1$ )。

(2) WD-26M-1、WD-26M-2 及 WD-932 渗透剂可明显降低红砂岩样品的吸水率、显气孔率和体积密度, 对红砂岩的表观密度影响不大; 正硅酸乙酯及 PS 试剂对红砂岩的吸水率、体积密度、真密度、显气孔率的影响均不大。检测结果表明 WD-26M-1

和 WD-26M-2 渗透剂及 WD-932 渗透剂可以改变砂岩内部孔隙结构, 减少了细微孔隙, 从而提高砂岩样品物理强度并降低了透气性。

(3) WD-26M-1 渗透剂及 WD-26M-2 渗透剂对红砂岩的抗折强度、抗压强度提升效果明显, 其中 WD-26M-1 提高强度更为明显, WD-932 会降低红砂岩的抗压强度, 正硅酸乙酯及 PS 试剂对红砂岩的抗折强度和抗压强度有提升, 但不显著。五种渗透剂对加固试样抗折强度、抗压强度的影响表明 WD-26M-1 和 WD-26M-2 渗透剂可有效提高砂岩物理强度, 起到了渗透加固的保护目的。

(4) 渗透剂的使用会降低红砂岩试样含水率及透气性, 其中 WD-26M-1、WD-26M-2 及 WD-932 渗透剂的作用会较大程度降低砂岩透气性, 分别为 71.97%、74.94%、75.54%。综合检测结果得出, 渗透剂会降低砂岩的亲水性从而提高疏水性, 并降低砂岩的透气性。

(5) 耐盐性试验中, 空白组实验一天试样已碎裂, PS 加固组实验一天试样出现明显裂缝, 浸泡四天时试样已断裂, 正硅酸乙酯加固组在浸泡 10 天时试样断裂, 至浸泡 30 天时, WD-26M-1、WD-26M-2 有明显裂纹, WD-932 有细微裂纹。进行抗压强度和抗折强度实验后, 综合比较得出 WD-26M-1、WD-26M-2 和 WD-932 三种加固剂的耐盐性相对较好。

(6) 耐酸雨试验中, 空白组实验随实验进行表面颗粒脱落, 正硅酸乙酯组试样随实验进行, 表面“起皮”并脱落, WD-26M-2 出现小裂缝, 其余实验组在实验中无明显变化。进行抗压强度和抗折强度实验后, 综合比较得出 WD-26M-1 及 WD-26M-2 两种加固剂的耐酸性相对较好。

(7) 耐冻融循环实验中, 六组试样均无明显变化, 进行抗压强度和抗折强度实验后, 综合比较得出 WD-26M-1 及 WD-26M-2 两种加固剂的耐冻融性相对较好。

5 结论

本次筛选研究对湖南临澧青山崖墓群红砂岩渗透加固待选用的 5 种渗透剂对砂岩的物理化学及力学性能的影响进行实验和数据分析, 并对使用后的耐久性能进行了评估, 获得材料的各项指标见表。

渗透剂各项指标对比

材料名称	WD-26M-1	WD-26M-2	WD-932	正硅酸乙酯	PS 试剂
光泽度 $\Delta G$	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
色差 $\Delta E$	> 4	> 4	> 4	> 4	> 4
渗透深度	++	-	-	++	--
体积密度	≈	≈	≈	≈	≈
气孔率	-	-	-	≈	≈
抗折强度	++	++	+	+	+
抗压强度	++	+	-	+	++
表面硬度	+	-	+	++	+
含水率	--	--	-	-	--
透气性	--	--	--	-	-
耐盐性	++	++	++	+	-
耐酸雨性	++	++	+	-	-
耐冻融性	++	++	+	+	+

注: 用“+”“-”“≈”表示渗透剂对砂岩影响与空白组的对比, “+”表示相较于空白组数值大, “-”表示相较于空白组数值小, “≈”表示接近空白组, 符号多少表示程度。

据以上性能综合分析, 选取 WD-26M-1 作为青山崖墓群红砂岩渗透加固材料。

参考文献:

[1]赵强. 石质文物氟硅类封护材料试验研究[D]. 南京航空航天大学, 2007.  
 [2]刘斌. 石质文物保护用有机硅材料的制备及应用研究[D]. 2011.  
 [3]苏伯民, 李最雄, 胡之德. PS 与土遗址作用机理的初步探讨[J]. 敦煌研究, 2000 (01): 33-38.  
 [4]GB/T 9966.4-2020 天然石材试验方法[S]. 中国建筑材料联合会, 2020.  
 [5]GB/T 17146-2015 建筑材料及其制品水蒸气透过性能试验方法[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会, 2015  
 [6]WW/T 0028-2010 砂岩质文物防风化材料保护效果评估方法[S]. 国家文物局, 2010