

提高古砖耐磨和抗冻性能的试验报告

高念祖 贾瑞广

在甘肃省西部，离敦煌县城东南 20 公里，便是国内、外闻名的中国文化艺术宝库——莫高窟。它自前秦建元二年开窟以来，历经北魏、西魏、隋、唐、五代到宋、元各代，是中国最大的石窟群之一，塑像、壁画又为全国石窟之冠。

在开掘的洞窟中，有些唐、宋洞窟采用花砖铺地（尺寸长、宽为 27~30 厘米、厚 5~6 厘米），其花纹有云头莲花纹、卷瓣莲花纹、减地蔓草纹、蔓草卷云纹等，部分花砖地面保存尚好。目前在洞窟内外约有 20000 余块，但其中部分因长期遭受佛教徒、旅游者的践踏以致造成各种轻重程度不同的磨损，其中极少数磨损最严重的其花纹已接近磨平。

如何保护这批精美的历史文物——花砖，目前已被提到议事日程上来，保护的方法以不动原物就地加固保护最为理想。

我们受敦煌文物研究所的委托，开展在砖块表面涂刷各种涂料，使它渗入砖体表层内部（1~2 毫米），以提高其抗磨能力的研究。根据文物保护的原则，要求保持花砖的原貌原状，不发亮，不反光。经过两个阶段的试验，采用聚氨基甲酸酯涂料加固花砖和传统的桐油渗透加固花砖的方法，是能够达到这个目的的。

本试验承北京市油漆厂涂料研究所、铁道部铁道科学研究所、北京市大理石厂、中国人民解放军 7421 厂、北京市水利科学研究所等单位大力协助、予以支持，谨在此向上述单位和有关人员表示感谢。

一、加固用材料

对加固材料的要求是：抗磨性能好、透明度高、黏度适中便于渗入砖中。

1. 合成树脂材料

主要从抗磨性能好方面考虑，选用了聚氨基甲酸酯树脂清漆，具有弹性高、耐久性好

和优异的抗磨能力, 因此我们选它作为试验对象, 北京市油漆厂为此提供了八种试验样品。

为了进行比较, 也选用了环氧树脂。

2. 生桐油

桐油是桐子榨出的油, 主要成分是桐酸的甘油酯, 黄棕色, 凝固点 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$, 是一种干性油, 油膜干燥迅速, 坚固不粘, 耐水、耐碱、耐光和耐大气腐蚀。

二、试验用仪器设备

1. 道路材料磨耗试验机

该机构造为, 在试件表面上方有一口向下的轴碗, 在其中放入五个直径 1.2 厘米的钢球, 轴碗在 30 ~ 50 公斤的荷载压力下产生高速旋转, 同时试件在轴碗偏心 4 厘米的地方以低速自转, 因此造成钢球对试件表面的磨损作用。该机模拟车轮在路面上的磨损情况和我们的要求比较接近。

2. 高压喷砂设备

该设备使砂粒在 6 公斤/平方厘米压缩空气的压力下由喷射口喷出, 每秒 20 ~ 30 米高速坚硬的石英砂粒对喷射口下面的物体产生极大的冲击摩擦作用使物体表现受到磨损。

3. 冻融试验设备

该设备为国内采用较多, 箱内氯化钙盐水的温度可自动保持在零下 20°C 左右, 融化槽中的水温在 16°C 左右。试验时, 试件放在 16 厘米 $\times$ 16 厘米 $\times$ 20 厘米的试验盒中, 然后放入氯化钙盐水箱内 (盐水不得进入试验盒中), 经过一定时间冻结后移入融化槽中融化, 如此反复循环观测试件重要损失和外观变化。

三、试验砖体材料

试验使用的砖除注明“敦煌花砖”者外, 均为北京故宫博物院修缮午门时拆下的望板砖。此砖系明代烧制质地坚固密实, 尺寸为 29 厘米 $\times$ 21 厘米 $\times$ 5 厘米左右。从大量试验结果中可以看出这批砖均匀性好, 试验结果数据比较稳定, 用它来试验比较不同

的加固材料提高砖体抗磨和抗冻融能力的效果还是非常适宜的。

敦煌文物研究所送来一批莫高窟唐、宋铺地花砖，我们把它也加工成尺寸为 15 厘米 × 15 厘米 × 4 厘米的试件，用来进行涂料加固提高砖体抗磨能力的试验。

四、试件制备与涂刷加固材料

砖块预先加工成 15 厘米 × 15 厘米 × 4 厘米的方板形试件，加工尺寸精确、表面平整、各面相互垂直。试验时钢球与砖面接触良好。

涂刷加固材料之前，预先将砖烘干、称重，以便使涂料易于渗入砖中。

第一部分试验（1#~8#），使用北京市油漆厂提供的八种聚氨基甲酸酯清漆。在试验面涂刷 50 克聚氨基甲酸酯清漆（其中固体物含量为 42%），反面为空白面不刷涂料，以备进行对比试验使用。

1#、2#两种样品因黏度较大，不易渗入，涂后表面有一层漆膜，看上去有反光现象，3#~8#六种样品，刷后涂料全部渗入砖中，表现均匀，无光泽、不反光、只是色泽略深，后来我们在涂层断口处，试用荧光钠溶液在紫外线照射下检查，发现涂料渗入砖中约 1~2 毫米。

固化一段时间（14 天以上）进行抗磨试验。

第二部分试验（9#、10#）用生桐油加固砖材，按照我国“铺地金砖”传统的做法，采用涂刷和浸渍两种工艺，固化一年后进行抗磨试验。

涂刷法为了使生桐油易于渗入砖中，在第 100 份生桐油中掺入 20 份煤油，每个试验面涂刷约 50 克生桐油与煤油的混合物。

浸渍法在试验面四周用石蜡黏结硬纸板做成一个框子，然后将生桐油倒在试块上面，使它慢慢地渗入砖中，每个试验面渗入约 50 克生桐油。

上述两种工艺，涂后涂料全部渗入砖中，表面均匀、无光泽、不反光、色泽有极轻微的变黄。

第三部分试验（11#~15#）试件为莫高窟唐、宋铺地花砖。涂料采用前面第一部分试验八种聚氨基甲酸酯清漆中抗磨效果最好的 6#热塑性黏合剂。

莫高窟唐、宋铺地花砖，由于敦煌土料中砂质较多、黏土含量少以及燃烧温度低等原因，这些砖的强度和密实性远远不及明代的砖。

此外还试验了环氧树脂清漆，我们选用黏度较小的 618#环氧树脂和黏度极低的 600#聚酰胺固化剂，外加一倍的醋酸乙酯稀释剂，但配成的环氧树脂清漆黏度仍然较大，多数试件涂后有一薄层漆膜，试验面仅渗入约 20 克涂料（其中固体含量为 54%），固化一年后进行抗磨试验。

五、磨损试验情况和结果

通过道路材料磨耗试验机试验，故宫午门明代望板砖，钢球上部加压荷载采用 40 公斤，试件自转 80 转（此时磨损量适中，对我们的试验最为适宜）。

敦煌花砖质地较差，钢球上部加压荷载采用 20 千克，试件自转 40 转（此时磨损量适中，对我们的试验最为适宜）。

试验结果见表 1。

表 1 抗磨试验结果

编号	涂料名称	表面情况	磨耗试验机		高压喷砂		涂后外观情况	备注
			磨损量（克）	提高抗磨能力（倍）	磨损量 /厘米 ³	提高抗磨能力（倍）		
1 [#]	聚氨酯地面漆	涂刷面未加固面	0				局部有反光现象	
2 [#]	聚氨酯地面清漆	同上	极微					
3 [#]	湿固性清漆	同上	3.2 63.2	19.8			无光泽	
4 [#]	湿固性清漆 加环氧	同上	3.3 77.7	23.5			无光泽 不反光色泽略深	
5 [#]	故宫地面清漆	同上	1.0 74.7	74.7				
6 [#]	热塑性黏合剂	同上	0.1 88.4	884.0				
7 [#]	热塑性黏合剂 加固化剂	同上	0.5 99.9	200.0				
8 [#]	SO—3 加成物	同上	1.7 74.9	43.8			无光泽不反光有微变	
9 [#]	涂刷生桐油	同上	0.9 67.7	75.2	1.66 10.00	3.96 * *		
10 [#]	浸渍生桐油	同上	0 109.9	∞			无光泽不反光色泽变化不大	
11 [#]	热塑性黏合剂	同上	0 94.8	∞				
12 [#]	同上	同上	0.3 119.7	399.0				
13 [#]	同上	同上	1.3 118.9	91.5				
14 [#]	同上	同上	0 42.1	∞				
15 [#]	同上	同上	1.6 116.3	72.7				

砖块未加固而磨损量绝大多数在 60 ~ 100 克之间（对砖来讲这个离差数值即波动范围应该说是很小），但对计算提高抗磨损能力来讲，出入就非常大，因此认为分析涂料加固效果直接以磨损量评定比较合理一些。

第一部分 5[#]、6[#]、7[#]和 8[#]四种涂料都有令人满意的结果，特别是 6[#]和 7[#]热塑性黏合剂效果更为显著。

为了探讨是否有降低造价的可能，我们将每面使用的涂料由 50 克减少到 15 克和 10 克（其中固体物含量也由 42% 降低到 30 ~ 33%）。从大多数试验结果来看磨损量增至 20 ~ 30 克，看来随着涂料用量的减少，抗磨能力也逐步降低，因此一定要保持一个相当渗入量。

第二部分 9[#]和 10[#]涂刷和浸渍生桐油的试件，在道路材料磨耗试验机上进行试验，都获得了令人满意的结果，特别是浸渍生桐油的试件效果更是突出。这些试件又在高压喷砂除锈设备上进行了磨损试验，试验时风压 6 千克/厘米²，试件在喷射口下面 20 厘米处试验 15 秒，同样可以明显地看到生桐油提高砖对抗磨能力的优异效果。

第三部分 11[#] ~ 15[#]涂刷 6[#]热塑性黏合剂的敦煌花砖试件，在道路材料磨耗试验机上进行试验，同样也都获得了令人满意的结果。

环氧树脂虽然具有良好的抗磨性能，但由于掺了溶剂固体物少，黏度高涂刷量低，所以抗磨效果仅仅一般偏差，特别是外观效果不好，砖材颜色变深、反光，因此放弃了使用。

六、冻融试验情况和结果

砖块中吸收的水分在冬季结冻时，体积膨胀可达 1/10 左右（到达零下 20℃ 时）。这对砖块中的空隙（毛细管）器壁将产生巨大的破坏压力（人们常用抗冻融循环试验，作为评定一种建筑材料耐久性优劣的标准）。

试件采用明代望板砖（尺寸为 15 厘米 × 15 厘米 × 4 厘米），涂料采用聚氨基甲酸酯清漆（6[#]热塑性黏合剂）。

试件分成三组：

- 1) 未经加固处理。
- 2) 一面和四周一半涂刷涂料加固。
- 3) 全部涂刷涂料加固。

称取涂刷涂料后试件的干量，再放入水中浸泡五昼夜后称出吸水后的重量。计算出每块试件的吸水率。

由于砖材没有标准的冻融试验方法，我们根据混凝土冻融试验方法，并参照实际动

用条件，拟定了一个试验方法。

先将试件放在盒中下面用垫条垫起，再向盒内加水没过试件顶部 1 ~ 2 厘米，然后放入 - 20℃ 的氯化钙盐水中冻结三小时，再移至水温 16℃ 的融化槽内融化三小时。在盒内放一电阻温度计，测得冻结时最低温度为 - 15.95℃，最高温度为 - 1.35℃，平均为 - 6.9℃。融化时最高温度为 + 17.7℃，最低温度为 + 12.5℃，平均此 + 16.6℃。此时试验盒中装水较多，冻结三小时后尚未完全结冰。

由于上述原因经过 40 次冻融循环以后改为，每个试验盒内由原装四块试件减为三块试件，加水仅没过试件底面 1 ~ 2 厘米，以减少盒中盛水量提高对试件的冻结效果，冻融时间每次仍为三小时。测得冻结时最低温度为 - 11.3℃，最高温度为 3.3℃，平均为 - 7.5℃。融化时最高温度为 + 17.5℃，最低温度为 + 13.4℃。平均为 + 16.5℃。试验一直进行到 163 次冻融循环后停止。

未经加固处理的试件，经过 60 ~ 70 次冻融循环后砖皮开始剥落，经过 163 次冻融循环后，砖皮全部剥落、棱角均剥蚀，重量损失达 10% 以上。涂刷聚氨基甲酸酯清漆加固的试件，经过 163 次冻融循环后，外观和重量均无破坏现象，遗憾的是限于条件未能进行强度试验。从上述结果可以明显地看出，涂刷聚氨基甲酸酯清漆能够提高砖材的抗冻融性能。

试验结果见表 2。

表 2 冻融试验结果

编号	表面情况	吸水率（%）	开始时重量（克）	冻融后重量损失变化									外观描述
				40 次循环后			100 次循环后			163 次循环后			
				重量（克）	损失重量（克）	失重率（%）	重量（克）	损失重量（克）	失重率（%）	重量（克）	损失重量（克）	失重率（%）	
1 [#]	未经加固处理	13. 8	1675	1672	－5	0. 30	1560	－11. 5	6. 87	1380	－295	17. 61	70 循环后砖皮全部剥落，深 1～3 毫米
2 [#]	同上	14. 3	1715	1720	+ 5		1710	+ 5	0. 29	1690	－25	1. 46	70 循环后砖皮开始剥落，深 1 毫米
3 [#]	同上	13. 2	1890	1900	+ 10		1760	－125	6. 61	1655	－245	12. 96	60 循环后砖皮开始剥落，深 1～2 毫米
4 [#]	一面涂刷加固	14. 8	1680	1685	+ 5		1660	－20	1. 2	1620	－60	3. 57	70 循环后未刷一面砖皮开始剥落
5 [#]	同上	14. 5	1700	1710	+ 10		1710	+ 10		1690	－10	0. 59	140 循环后未刷一面砖皮开始剥落
6 [#]	全部涂刷加固	15. 8	1650	1680	+ 30		1670	+ 20		1680	+ 30		无破坏现象
7 [#]	同上	13. 7	1705	1725	+ 20		1720	+ 15		1720	+ 15		无破坏现象

为便于比较和确定涂料对提高砖材抗冻融作用的效果起见，我们同时平行的做了一组涂刷丙烯酸清漆的试件进行对比试验，试验基本上获得了相同的结果。

七、敦煌莫高窟现场中型试验施工简况

今年九月间我们会同北京市油漆厂的同志在莫高窟进行试验，目的是：①发现和研究在大面积涂刷时会遇到的问题以及解决的方法；②直接观测涂料在提高花砖抗磨能力和改善花砖耐久性方面的效果。

敦煌文物研究所为我们选定了两个具有代表性的试验地点。①第45#窟（唐代）窟中泥塑精美、临摹者长年不断，50年代重铺的花砖地面已有很明显的磨损，目前还在继续发展中。②第130#窟即二大佛（唐代）其前殿已毁，铺地花砖被埋入沙中，去年才发掘出来，花砖非常完整，纹理清晰。但该处地势较低，附近又有一水渠，因此地下水位较高，花砖暴露大气之中极易受到冻融和碱蚀破坏。

我们试验了两种涂料：①生桐油。②聚氨基甲酸酯清漆（6#热塑性黏合剂）。

涂刷之前先将涂刷的部位清扫干净，再用吸尘器将残余的尘土吸去，然后进行涂刷工作。

我们希望能够保持原貌，涂后能达到无光泽、不反光的要求，看上去像用水洗过一样，颜色略深一些，将来落上灰尘后就看不出差别了。桐油渗透快、吸入较易，一昼夜后全部都能渗入砖中，很容易地就达到了室内试验用的渗入量。聚氨基甲酸酯清漆涂后由于稀释剂的挥发渗入逐渐困难，这次只达到室内试验渗入量的一半左右。

花砖涂刷两种涂料后的抗磨性和耐久性，等经过一段时间后与涂刷后所拍摄的照片及其四周未加固处理的花砖进行比较，可以得出进一步的结论。

八、小 结

1) 由于聚氨基甲酸酯本身具有很高的抗磨性能，在砖上涂刷聚氨基甲酸酯之后形成一种复合材料，较原来的砖的抗磨能力提高很多。

如选用的涂料黏度适宜，涂后涂料能够全部渗入砖中（深度2毫米左右），表面均匀、无光泽、不反光，只是颜色略深，在外观形象上无明显的改变，能够达到文物保护“整旧如旧”的要求。

其中6#和7#热塑性黏合剂效果最为显著。

2) 生桐油是我国传统的保护铺地砖材使用的材料，过去缺乏科学试验资料，为了发掘古建筑的传统工艺，我们对“金砖”进行对比试验，取得了科学数据。通过试验，

我们发现它在加固提高砖材抗磨能力方面,与称为合成树脂中王牌抗磨材料的聚氨基甲酸酯相比并不逊色,甚至还要超过它。我们分析原因是生桐油使用时不用溶剂或用的很少(涂刷时),渗入砖材内部的固体物约为聚氨基甲酸酯的一倍,所以有此优良的效果。

生桐油以非常慢的速度吸收空气中的氧缓慢地聚合,因此固化速度很慢,这次我们试验采用了一年的固化时间,但这对于修复和加固古建筑固化时间长也不是很大的问题。生桐油渗入砖中很快,三、五天后就能走人,对于开放参观影响不大。

3) 敦煌花砖质地较差,从抗磨性能上也能看出不如故宫明代望板砖,但涂刷涂料加固后,其抗磨性能也得到显著的提高。

4) 敦煌现场试验指出,大面积涂刷工艺也很简便,特别是采用桐油只要刷上慢慢地让它渗入就行,两种涂料外观上都能达到“保持原貌、整旧如旧”的要求,施工时与开放参观基本上也没有什么干扰。

5) 砖样本身系多孔性材料,涂刷聚氨基甲酸酯清漆之后,吸水率未见降低,就是在这种情况下,涂刷涂料之后改变了表面破坏受力的条件,因此提高了砖样抗冻融能力,这种效用对保护受冻融破坏作用的砖砌古建筑是很有实际意义的。

(原刊于《文物保护技术》辑刊 1982 年第二辑第 32 ~ 44 页)