

文章编号: 1005-1538(2015)增刊-0077-07

· 工作简报 ·

几种商用保护材料对模拟秦俑陶胎的加固和防盐风化性能研究

韩向娜¹, 黄 晓¹, 罗宏杰^{1,2}

(1. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 古陶瓷科学研究国家文物局重点科研基地, 上海 200050;

2. 上海大学, 材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 目前对古代陶胎的研究多集中在加固材料的筛选及其保护效果评估上, 普遍缺乏深入的保护机理的研究, 尤其保护材料对陶胎盐风化的影响及其机理研究在国内更是罕见。因此, 本实验选用 TEOS (正硅酸乙酯)、Paraloid B72 和 WD10 对模拟古代秦俑陶胎进行了加固和防盐风化保护研究。重点观察了不同材料处理后陶胎样品表面盐结晶的形貌, 并对其形成机理进行了探讨。最后对 Paraloid B72 在耐盐实验中出现的保护性破坏现象给予关注。结果显示, TEOS 处理后陶胎的抗压强度得到提高, 但对陶胎的耐盐性能没有改善; Paraloid B72 处理后, 陶胎颜色加深, 耐盐实验中处理陶胎出现了严重的盐风化。WD10 处理后陶胎的耐盐性能显著增强。对盐结晶的微观形貌研究初步揭示, 保护材料能够对陶胎表面进行改性, 不同的憎水性和渗透性会显著影响盐结晶的微观形貌, 进而会带来不同类型的盐风化。本研究结果启示文物保护工作者必须深入了解各种保护材料的优缺点, 根据被保护文物的具体实际需求, 慎重开发和选择保护材料, 以避免保护性破坏现象的出现。

关键词: 模拟秦俑陶胎; 盐风化; 盐结晶机理**中图分类号:** G264.2 **文献标识码:** A

0 引言

陶器包括素陶、彩陶、彩绘陶, 是中华民族宝贵的历史文化遗产之一^[1]。陶器的烧结温度一般在 800 ~ 1000℃ 之间, 烧成后器物的孔隙率较高, 结构不致密, 强度较低, 吸水性强, 造成陶器先天不足, 自毁率极高。陶器胎体病害的主要表现有: 酥粉, 即陶胎呈粉状或者颗粒状松散的现象, 这是陶器最常见的病害; 裂缝, 陶胎中穿透其厚度的开裂现象; 剥落, 陶胎表面局部呈现片状开裂或者剥落, 但未造成器物的完全破坏。造成陶胎损坏的主要原因是可溶性盐的破坏。陶器常年埋藏于地下潮湿环境, 大量带有可溶性盐的地下水溶液浸入到疏松多孔的陶器内部, 当环境温湿度发生变化时, 盐类物质便随之发生结晶或溶解, 这种相变交替往复出现, 产生结晶膨胀; 或者部分可溶性盐遇水发生水合作用而膨胀。结

晶压力和水合压力都对陶器孔隙内壁产生膨胀压力, 造成陶器损坏。加之出土时文物的温湿度平衡被打破, 以及大气污染、霉菌等多种因素的影响, 出土的陶器胎体常常出现酥粉病害。因此, 选择合适的材料对脆弱陶器胎体进行加固和防盐风化保护是非常必要的。目前对陶器彩绘层的研究较多, 古陶的分析研究较多^[2], 对破损陶器碎片的修复也有少量研究, 但是对脆弱陶胎的保护关注相对较少。尤其是针对脆弱陶胎保护材料的基础研究较为薄弱, 文献报道过的保护材料有: 丙烯酸类或其改性^[3], 含氟聚合物^[4], 纳米氢氧化钙^[5], 白乳胶 (PVAc) 和聚乙烯醇缩丁醛 (PVB) 和硅溶胶共混体系^[6], 其中丙烯酸类材料具有较好的成膜性, 但关于其使用的安全性和有效性长期以来一直受到质疑。含氟聚合物具有优异的耐候性, 但存在制备成本较高, 耐水性过强易造成保护性破坏的问题。纳米氢氧化钙是近

收稿日期: 2013-10-24; 修回日期: 2014-05-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助 (2012CB720904), 中科院百人计划资助, 中国博士后科学基金资助 (2014M561748)

作者简介: 韩向娜 (1984—), 女, 2013 年毕业于中国科学院上海硅酸盐研究所, 材料物理与化学专业, 博士, E-mail: jayna422@126.com

通讯作者: 黄晓, 研究员, E-mail: xiaohuang@mail.sic.ac.cn

年来较为成功的新型无机保护材料,对台湾交趾陶胎的孔隙率、吸水率和弯曲强度都有正面保护效应^[5]。聚乙烯醇缩丁醛具有较好的粘结强度,但渗透有限,只能对陶质文物的表面起到加固作用。目前陶胎的保护材料研究工作多集中在对材料的实验室筛选以及效果评估上,且较为零散,缺乏系统性、针对性的研发和推广。

秦始皇陵出土的兵马俑(以下简称秦俑)属于彩绘陶。目前关于秦俑彩绘层的病害分析和保护研究报道较多^[7],但是关于秦俑陶胎的病害和保护研究相对较少。雷勇^[8]等人经过多次实地观察,注意到大多数陶俑表面没有明显的风化现象,但在一号坑北部部分陶俑出现了表面剥离状况,剥离层之下的颗粒结构疏松。秦俑没有发生大规模的、可觉察的内部风化现象,但表面出现了轻度风化,并有少量陶俑表面发生了明显的酥解现象。表层防风化问题应当是重点。容波^[9]等对秦兵马俑残片中的一些矿物质颗粒的分布形态和含量来分析陶土的成分结构、制作工艺、烧成气氛及原料来源等信息。结果表明,秦俑陶片主要成分为少量砂屑及大量粘土,而粘土为岩土矿风化的产物,秦俑残片裂痕较多的部位风化、酥粉痕迹明显。陶片中的孔隙促使盐分易随着水分渗入内部,若温度和湿度反复变化,可溶性盐结晶析出,导致可溶盐损害。同时发现秦俑手指边缘等残损严重且裂痕较多的部位,有风化、酥粉损害陶片的痕迹。胡红岩^[10]等在对取自兵马俑一号坑的土样进行成盐元素和成盐类型分析时,发现可溶盐的主要类型是 NaCl、Na₂SO₄ 等。可知,盐风化是秦俑陶胎损坏的原因之一。目前国内在保护材料对陶胎盐风化的影响及其机理研究方面还鲜有报道。

本实验以模拟古代秦俑脆弱陶胎为保护对象,选择在文物保护领域具有一定代表性的 TEOS、Paraloid B72 和 WD10 作为陶胎加固和防盐风化保护材料。正硅酸乙酯在文物保护中具有较长的使用历史,目前国外商品化的有机硅类加固剂也多是正硅酸乙酯为主体的改进材料;Paraloid B72 是文物保护领域使用非常普遍的丙烯酸类材料;WD10 在石质文物保护中曾经风靡一时,在本研究中将其作为正硅酸乙酯的对照材料,以期分析不同分子结构的官能基团对保护效果的影响,进而对保护材料的构效关系进行初步探讨。这三类材料均属于已用的典型文物保护材料。实验中通过测试处理模拟陶胎样品的吸水率、体积密度、显气孔率、颜色变化、抗压强度和耐盐性来

评估材料对脆弱陶胎的保护效果,并重点对不同材料处理陶胎样品表面盐结晶的形貌进行了观察,对盐结晶形成机理进行了初步探讨。

1 实验样品、器材和方法

1.1 模拟陶胎样品的制备

实验中采用自制的模拟陶胎样品来代替文物样品。将取自于秦始皇陵园北侧附近的黄土,过 40 目筛子,压成 20cm × 5cm 的砖块。在 110℃ 烘箱中干燥 5h,再在干燥器中冷至室温,最后在 700℃ 下烧制,得到模拟陶胎样品(以下简称陶胎样品)。陶胎样品的矿物成分主要有绢云母、石英、钾长石、斜长石、角闪石、方解石、高岭石和伊利石等,平均孔隙率为 32% 左右。将陶胎样品切割成 10mm × 10mm × 10mm 小块试样用来测试抗压强度,40mm × 40mm × 15mm 小块试样用来测试耐盐性。

1.2 材料和仪器

1.2.1 材料 正硅酸乙酯(TEOS,分析纯,上海凌峰);Paraloid B72(主要成分为丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸乙酯,德国产,以下简称 B72);WD10(主要成分为十二烷基三甲氧基硅烷,武大有机硅公司提供)。

1.2.2 仪器 CM-700d 分光测色计(日本 Konica Minolta);Instron-5500R 万能材料试验机(德国);G12 数码相机(日本 Cannon);S-4800 扫描电镜(日本 HITACHI);JC2000C 静态接触角测量仪(上海中晨)。

1.3 保护方法

考虑到环保以及文物保护工作者的安全问题,尽量使用毒性最小的溶剂,同时避免引入外来酸或者碱进入文物中造成酸碱侵蚀,尽量采用中性条件固化。综合考虑后,使用分析纯乙醇作溶剂,将 TEOS 和 WD10 分别配制成 10% (w/w) 溶液,使用乙酸乙酯将 B72 配制成 10% (w/w) 溶液。将陶胎样品在保护材料溶液中浸泡 24h 后,放置于恒温恒湿箱中潮气固化,湿度设定为 85%,温度为 25℃,固化时间为 2 周。

1.4 材料保护效果评价方法

1.4.1 颜色变化测定 使用 CM-700d 分光测色计,选择陶胎试样的同一个测试点分别在材料处理前后测试,每个试样选择 3 个不同的测试点测量,取平均值。采用 CIE $L^* a^* b^*$ 色空间,色差值用 ΔE^* 表示,计算公式为: $\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ 。 $\Delta E^* = 1$ 的时候称为 1 个 NBS 色差单位,表 1 列出 NBS 单位的感受值。

表 1 NBS 单位的色感值^[11]Table 1 Sensation value of NBS units^[11]

NBS 单位	0~0.5	0.5~1.5	1.5~3	3.0~6.0	6.0~12.0	12. 以上
色差的感值	痕迹	轻微	可觉察	可识别	大	非常大

1.4.2 抗压强度测定 根据国家标准 GB/T8489—2006 精细陶瓷压缩强度试验方法测试。使用 Instron-5500R 万能材料试验机测试,加载速度为 0.5mm/min。

1.4.3 耐盐性测试 记录陶胎试样干重,将试样浸泡在 10% (w/w) 的氯化钠溶液中 2h,然后放置在 105℃ 烘箱中干燥 16h,取出后在 2h 内冷却至室温,称其质量。如此反复循环,记录试样外观变化,包括病害类型和程度,称重时不要去掉风化产物和碎片。

2 结果与讨论

2.1 颜色变化

文物保护领域对保护材料的要求是尽量不改变文物外观,根据 NBS 单位的色感值(表 1), $\Delta E^* > 3$ 时肉眼即可识别颜色变化。由图 1 不同材料处理后陶胎样品的色差值 ΔE^* 可以看出,TEOS 和 WD10 处理陶胎样品的外观颜色变化 $\Delta E^* \leq 2.5$,是在人眼无法分辨以及文物保护材料可接受范围内。B72 处理后的色差值 $\Delta E^* > 5$,属于改变了陶胎样品颜色。有报道显示,B72 会明显改变土块试样的颜色,尤其会在局部出现深色色斑,但是通过覆盖薄膜和减缓溶剂挥发的方法,可以有效地减轻颜色加深的现象^[12]。

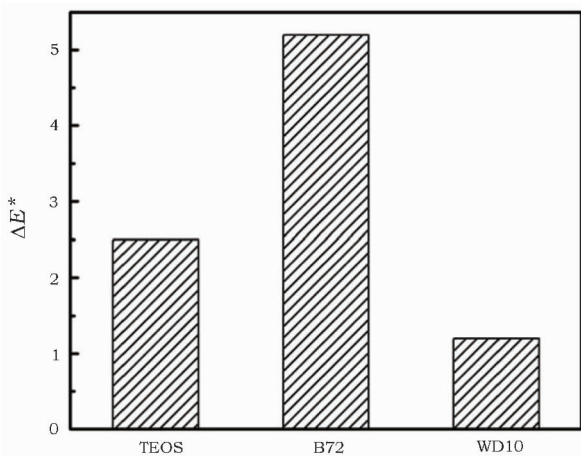


图 1 不同材料处理后陶胎样品的色差值

Fig. 1 Color change (ΔE^*) of treated terracotta samples

2.2 抗压强度

陶胎样品的抗压强度测试结果见图 2。可以

看出,不同材料在加固陶胎的能力上各有不同。TEOS 处理陶胎样品的抗压强度提高了 23%, B72 处理陶胎样品提高了 7%,而 WD10 处理陶胎样品的抗压强度相比空白陶胎样品反而下降,下降值达 19%。WD10 分子中的十二烷基长碳链,具有超强的疏水效果,可以有效降低陶胎样品的吸水率,但是硅氧烷基团 $\text{Si}(\text{OCH}_3)$ 的加固效果远远不如 TEOS。这也是 WD10 常用来作为石质文物的表面的封护剂^[13]、防水剂^[14],而不常用来作为加固剂的原因。

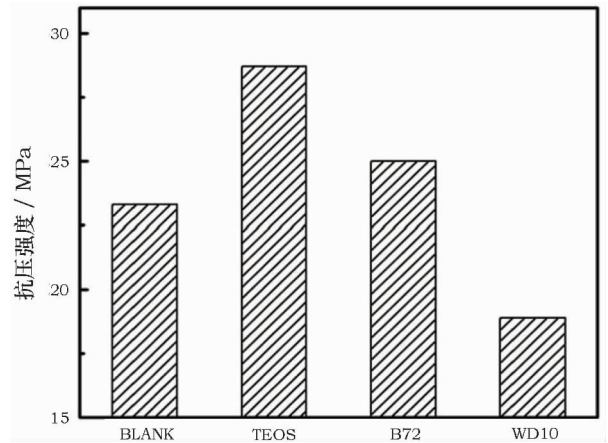


图 2 空白陶胎样品以及不同材料处理后陶胎样品的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of blank and treated terracotta samples

2.3 耐盐性

空白陶胎样品和不同材料处理后陶胎样品经过耐盐性实验后的外观如图 3 所示。图 3 照片显示,经过 10 次盐老化循环后,所有陶胎样品均出现了损坏,但损坏的类型和程度各不相同。空白样品表面出现颗粒状的酥粉病害,局部覆盖有稀松的盐霜,侧面出现絮状的颗粒状堆积物;TEOS 处理样品出现和空白样品类似的颗粒状酥粉病害,有盐斑镶嵌在酥粉颗粒之间;B72 处理样品表面几乎全部被氯化钠盐霜覆盖,边缘地带出现了严重的裂隙和层状剥离现象;WD10 处理样品表面局部覆盖有薄薄的盐霜,没有出现其他病害。图 4 是耐盐性实验过程中各个陶胎样品的质量变化百分比曲线。图 4 中空白样品、TEOS 和 B72 处理样品的质量开始时的上升

是由于陶胎样品吸收盐溶液后,盐溶液析出的盐分吸附在陶胎样品表面造成的。图 4 显示,空白样品

和 TEOS 处理样品在 10 次盐老化循环结束后,质量损失率接近 20%。

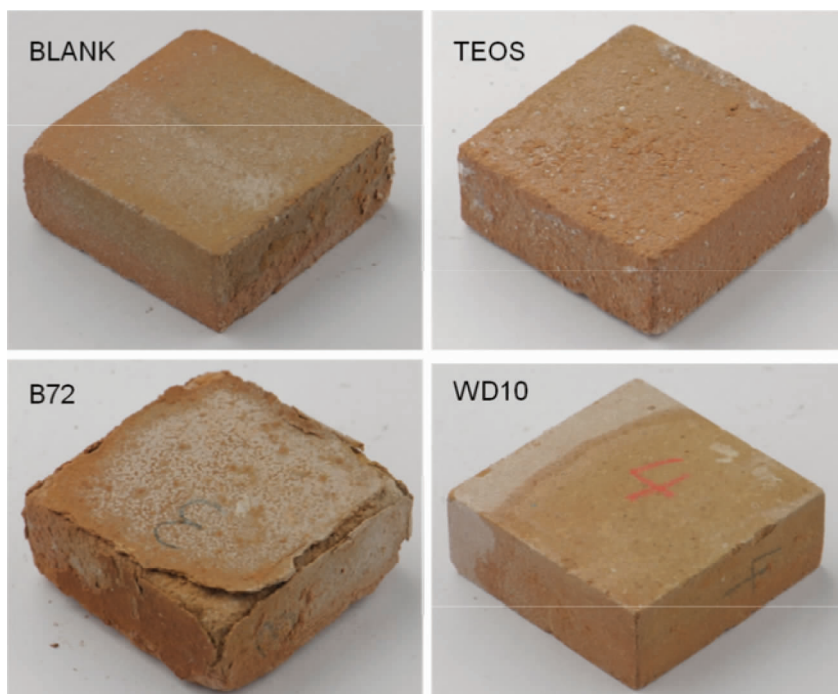


图 3 10 次氯化钠盐老化实验后陶胎样品外观

Fig. 3 The damage phenomenon of terracotta samples after 10 cycles of sodium chloride artificial ageing tests

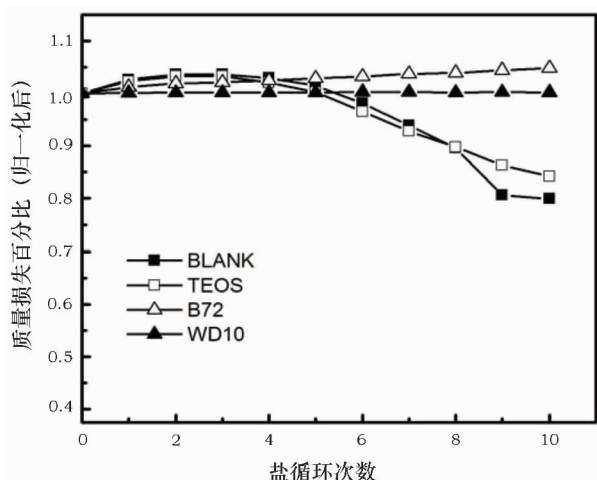


图 4 盐老化实验中陶胎样品质量损失百分比图

Fig. 4 Normalized mass loss of terracotta samples during artificial ageing tests in sodium chloride solution

2.4 盐结晶形貌及其机理探讨

图 5 是不同陶胎样品表面析出氯化钠晶体的扫描电镜照片。空白样品和 TEOS 处理样品表面均形成不规则粒状结晶的堆积;B72 处理样品表面形成厚厚的晶壳和从晶壳延伸出来的纤维状晶簇;WD10 处理样品表面形成完整的氯化钠立方晶体。在多孔基底上,盐结晶形貌的形成是一

个非常复杂的过程,影响因素有:多孔基底的材料性质、盐溶液的供应、蒸发速度以及基底的湿度等等^[15]。根据 Zehnder 和 Arnold 盐风化的晶体生长理论^[16],盐晶体的形貌主要有 4 种:1)巨大的独立完整晶体;2)粒状的晶壳;3)纤维状的晶簇;4)晶须。这四种形貌依次对应着多孔基底从湿润到干燥的过程。因此多孔基底的湿度,即基底对盐溶液的浸润程度是形成各异晶形的关键。表 2 是不同材料处理前后陶胎样品的接触角数据,由表 2 可知,强憎水性材料(例如 WD10)处理后,陶胎样品表面由亲水性变为憎水性。在盐浸实验中,盐溶液很难进入 WD10 处理陶胎样品内部,只能停留在样品表面难以铺展,在样品表面坑洞低洼处聚集;在干燥过程中,这些独立的岛状盐溶液池仅能提供非常低的过饱和度,晶体生长很快就停止,形成独立的巨大完整的氯化钠立方晶体。具有一定憎水性的材料(例如 B72)处理后陶胎样品,盐溶液在样品表面成为薄薄的连续相液膜。在干燥时,形成连续相的晶壳,但晶壳继续生长,得不到足够的盐溶液补给,只能形成纤维状的晶簇。空白样品表面和 TEOS 处理陶胎样品表面都具有亲水性,陶胎表面吸附的盐溶液可以浸润成为连续的液

膜,晶体生长成为堆积的晶壳。R. P. J. Van Hees 的研究表明,盐沉积和分布位置正是材料的渗透位置,TEOS 的渗透深度仅有几个毫米,因此盐结晶出现在样品的表面^[17]。B72 可以渗透进入陶胎样品几十个毫米,观察到可溶盐集中在距离 B72 处理样品表面一定深度的地方沉积,析出后造成了陶胎样品的裂隙和层状剥离

现象,这个剥离的界面可能就是 B72 的渗透界面。憎水性的表面封护剂在渗透界面处造成的盐风化,已有学者开展了初步的研究^[18]。由以上机理探讨可知,保护材料能够对陶胎样品表面进行化学改性,不同的憎水性和渗透性会影响盐结晶的微观形貌,进而会带来不同类型的盐风化。

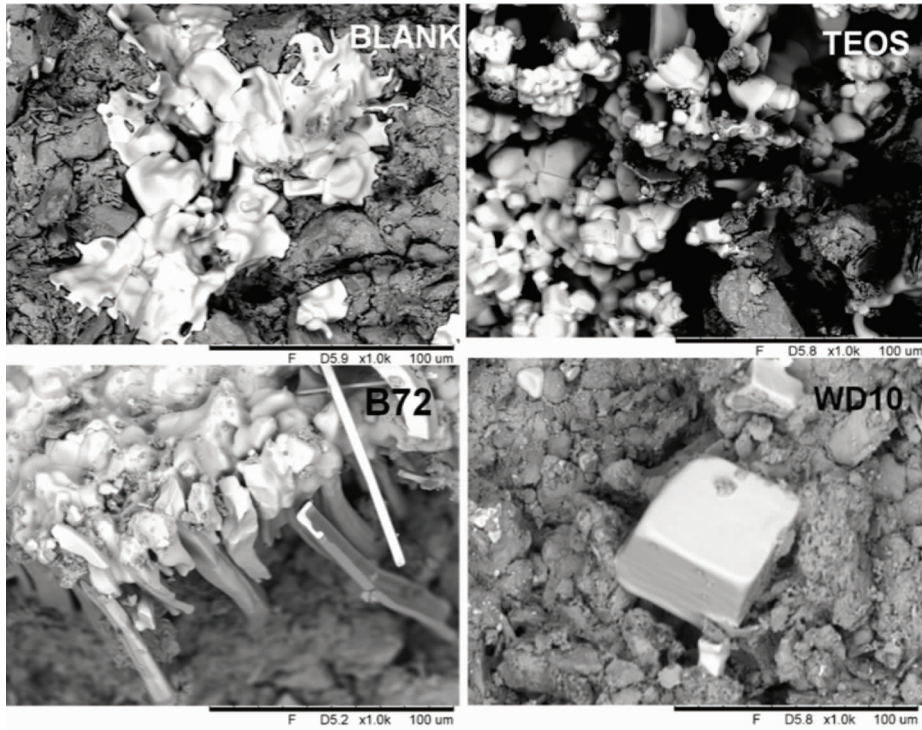


图5 陶胎样品表面氯化钠结晶的扫描电镜照片

Fig. 5 Scanning electron microscopy images of sodium chloride crystals on the surface of terracotta samples

表2 空白陶胎样品和 TESO、B72 和 WD10 处理陶胎样品的接触角

Table 2 Contact angle of blank and terracotta samples treated with TESO, B72 and WD10

样品	接触角/°
BLANK	0
TEOS	0
B72	110
WD10	142

3 结论

本研究采用 TEOS、Paraloid B72 和 WD10 作为古代陶胎的保护材料,重点考察了保护材料对模拟秦俑陶胎样品的加固和防盐风化的保护性能。结果显示:处理后,TEOS 和 WD10 都没有改变陶胎样品的外观,Paraloid B72 使陶胎样品颜色加深;TEOS 提

高了陶胎样品的抗压强度,Paraloid B72 稍有提高,而 WD10 反而降低;WD10 具有优良的防盐风化性能,TEOS 基本上没有防盐功能,Paraloid B72 加剧了陶胎样品的盐风化。

对盐结晶的微观形貌研究结果显示,保护材料能够对陶胎表面进行改性,不同的憎水性和渗透性会显著影响盐结晶的微观形貌,进而会带来不同类型的盐风化。WD10 具有优良的防盐风化性能但降低了陶胎的抗压强度,Paraloid B72 虽然提高了陶胎的强度,但在盐老化实验中出现的加速破坏现象。

本研究结果启示文物保护工作者必须深入了解各种保护材料的优缺点,根据被保护文物的具体实际需求,慎重开发和选择保护材料,以避免保护性破坏现象的出现。

参考文献:

- [1] 容波, 周铁. 陶质文物科技保护研究现状[J]. 文物保护与考古科学, 2011, **23**(2):79-86.
RONG Bo, ZHOU Tie. Current science conservation and research of ancient pottery [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2011, **23**(2):79-86.
- [2] Cogswell J, Neff H, Glascock M. The effect of firing temperature on the elemental characterization of pottery[J]. *J Archaeol Sci*, 1996, **23**(2):283-287.
- [3] 李晓溪, 王丽琴, 李伟东, 等. 脆弱硅酸盐质文物保护用纳米级 SiO₂-丙烯酸酯复合材料的性能[J]. 精细化工, 2011, **28**(10):945-949.
LI Xiao-xi, WANG Li-qin, LI Wei-dong, *et al.* Properties of nano SiO₂-polyacrylate composite materials for the protection of seriously damaged silicate cultural relics[J]. *Fine Chem*, 2011, **28**(10):945-949.
- [4] 和玲, 姜宝莲, 梁国正. 含氟聚合物用于陕西户县出土新石器彩陶的保护研究[J]. 文物保护与考古科学, 2003, **15**(3):35-39.
HE Ling, JIANG Bao-lian, LIANG Guo-zheng. Fluorinated polymers for the conservation of painted pottery in Neolithic Age [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2003, **15**(3):35-39.
- [5] LAI Wen-jin. Synthesis and tests of Calcium Hydroxide nanoparticles for consolidation of the ancient Koji pottery [D]. Yunlin University, 2011.
- [6] 袁传勋, PVAc 和 PVB 改性硅溶胶加固保护陶质文物的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2003, **15**(1):12-21.
YUAN Chuan-xun. Study on PVAc and PVB modified silica sols used as reinforcing materials for the culture relic of pottery [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2003, **15**(1):12-21.
- [7] Langhals H, Bathelt D. The restoration of the largest archaeological discovery—a chemical problem: conservation of the polychromy of the Chinese Terracotta Army in Lintong[J]. *Angew Chem Int Edit*, 2003, **42**(46):5676-5681.
- [8] 雷勇, 原思训, 郭宝发. 秦兵马俑表层风化状况的研究[J]. 文物保护与考古科学, 2004, **16**(4):36-42.
LEI Yong, YUAN Si-xun, GUO Bao-fa. Study on the weathering of the Emperor Qin's terracotta [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2004, **16**(4):36-42.
- [9] 容波, 兰德省. 秦俑陶片的偏光显微分析研究. 文物保护与考古科学[J]. 2005, **17**(3):35-39.
RONG Bo, LAN De-sheng. Polarize light microscopy on the fragments of Qin terracotta [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2005, **17**(3):35-39.
- [10] 胡红岩, 夏寅, 靳治良, 等. 秦始皇帝陵及汉阳陵遗址成盐元素及类型研究[J]. 中国材料进展, 2012, **31**(11):37-47.
HU Hong-yan, XIA Yin, JIN Zhi-liang, *et al.* Study on the salt species and types in the Emperor Qin's Mausoleum and Hanyangling Mausoleum Earthen Sites [J]. *Mat China*, 2012, **31**(11):37-47.
- [11] 金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006.
JIN Wei-qi, HU Wei-jie. Colorimetric measurement of radiometric and photometric [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [12] 周双林, 原思训, 杨宪伟, 等. 丙烯酸非水分散体等几种土遗址防风化加固剂的效果比较[J]. 文物保护与考古科学, 2003, **15**(2):40-48.
ZHOU Shuang-lin, YUAN Si-xun, YANG Xian-wei, *et al.* Comparison of consolidation effectiveness of acrylic non aqueous dispersion and other anti weathering consolidants for earthen architectures and monuments [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2003, **15**(2):40-48.
- [13] 甄广全. WD-10 在石质文物表面封护中的应用[J]. 化工新型材料, 2001, **29**(9):48-50.
ZHEN Guang-quan. Application of WD-10 in the surface protection of the lithoid cultural relic [J]. *New Chem Mat*, 2001, **29**(9):48-50.
- [14] 周双林, 杨琴, 梁举. 防水材料在木材保护中的尝试[J]. 文物保护与考古科学, 2009, **21**(1):22-26.
ZHOU Shuang-lin, YANG Qin, LIANG Ju. Attempt of introducing water proof materials in conservation for wooden culture relics [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2009, **21**(1):22-26.
- [15] Barbara Lubelli, Mario R. de Rooij. NaCl crystallization in restoration plasters [J]. *Constr Build Mat*, 2009, **23**(5):1736-1742.
- [16] Konrad Zehnder, Andreas Arnold. Crystal growth in salt efflorescence [J]. *J Cryst Grow*, 1989, **97**(2):513-521.
- [17] Van Hees R P J, Brocken H J P. Damage development to treated brick masonry in a long-term salt crystallisation test [J]. *Constr Build Mat*, 2004, **18**(5):331-338.
- [18] 刘强, 张秉坚, 龙梅. 石质文物表面憎水性化学保护的副作用研究[J]. 文物保护与考古科学, 2006, **18**(2):1-7.
LIU Qiang, ZHANG Bing-jian, LONG Mei. Study on application of biomimetic materials to the consolidation of weathering carved stone [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2006, **18**(2):1-7.

Study of the consolidation and anti – salt efflorescence performance of several commercial protective materials on simulated Qin terracotta

HAN Xiang – na¹, HUANG Xiao¹, LUO Hong – jie^{1, 2}

1. Key Scientific Research Base of Ancient Ceramics, State Administration for Cultural Heritage, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract: At present, most of the research work of ancient pottery protection is related to the selection and evaluation of consolidation materials. Research on the protection mechanism, especially in the field of salt weathering, is very limited. In this paper, TEOS, Paraloid B72 and WD10 were selected to be used for consolidation and mitigation of salt efflorescence on the simulated ancient Qin terracotta samples. The morphologies of salt crystals on surface of untreated and treated terracotta samples were investigated; the related salt crystallization mechanism is discussed in a preliminary way. Water absorption, color change, compressive strength and salt artificial ageing tests were conducted on the simulated terracotta samples after treatment with these materials. The results show that the terracotta samples treated with TEOS gain better compressive strength, but that TEOS had no positive effect on mitigating salt efflorescence; WD10 greatly reduced water absorption and is able to mitigate salt crystallization damage; Paraloid B72 deepened the treated terracotta sample color and enhanced salt efflorescence. It shows that surface modifications produce different types of salt efflorescence, which relates to the hydrophobicity and permeability generated from protective material. The harmful effect of Paraloid B72 is also captured attention.

Key words: Simulated ancient Qin terracotta samples; Salt efflorescence; Salt crystallization mechanism

(责任编辑 谢 燕)