

# 中国近现代砖石建筑保护修复的前沿技术

戴仕炳 陈彦 钟燕 (同济大学建筑与城市规划学院 上海 200092)

**摘要:** 无论在欧美还是在中国, 已有大量高科技成果应用或将应用到建筑遗产的勘察与病害诊断、保护修复及后评估等领域。不同于经典意义上的文物保护, 对我国近现代砖石建筑的保护必须兼顾功能使用, 因而其保护修复技术手段既与文物保护一脉相承, 亦独具特色。文章重点介绍了应用于砖石建筑保护修复的三大领域的前沿技术: 病害勘察无损检测技术、清洁技术及保护修复效果评估技术。从砖石建筑保护实践提升出的牺牲性保护、功能导向的修复技术组合等理念将丰富我国文化遗产保护理论。

**关键词:** 砖石建筑; 保护前沿技术; 可持续保护; 牺牲性保护; 功能导向

表皮是建筑和建筑的外部空间直接接触的界面, 承载了各保护宪章所要求保护的绝大部分的真实性, 也是建筑本身的历史所在, 更直观反映砖石质建筑的病害及需要修复的内容和程度等。因此, 表皮的保护与修复是建筑保护中除结构以外的研究及修缮工作的重点。

近二十年来, 随着我国在文化遗产保护与利用方面意识的提高, 各种科技手段也在我国近现代砖石建筑的保护与修复获得应用。本文重点总结近年来同济大学历史建筑保护实验中心及相关合作单位在砖石建筑表皮的勘察、保护修复及效果评估方面的部分前沿科技成果(具体见表一)。

需要说明的是, 保护的前沿技术并非与所谓的“高科技”并置, 而是与可持续保护的观念并行发展, 因而经济高效的低技术保护也被囊括进保护的前沿技术中。

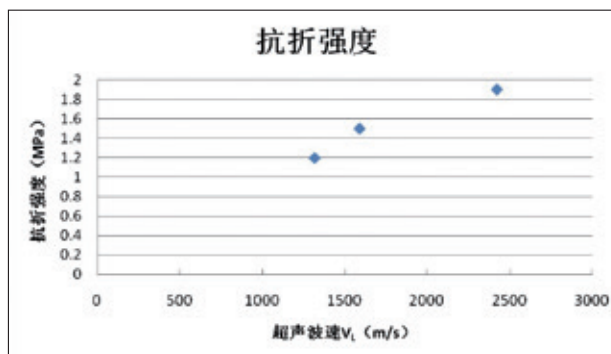
## 一、应用于砖石瓦等现状及病害勘察的前沿技术

现代科学技术突飞猛进, 砖石建筑病害勘察、现状评估等方面亦受益取得重大进展, 特别是无损检测技术, 代表性的砖石病害勘察成熟技术有: 超声波法、红外成像法、微波测湿法等。

近二十年超声波检测方法在天然石材、混凝土等无机材料方面取得重要进展。2005年颁布的欧洲工业标准14579 (DIN EN 14579) 《石质文化遗产检测方



原之江大学旧址钟楼修复前



香港19世纪某历史建筑不同劣化程度的砖的抗折强度与砖长度方向超声波速度的关系 (最左侧的砖为严重劣化的砖, 而最右侧的砖为完整表面无任何劣化的)

表1 中国近现代砖石建筑保护修复的部分前沿技术

	部分前沿技术类型	保护原理或技术特点	应用范围
现状勘察	超声波法	通过接收端测得的时间,可以得出超声波在砖石中的传播速度。在原材料相同的前提下,波速穿过带有孔隙的砖石要小于完整的砖。超声波具有很强的穿透力,可以检测到砖石等材料深部;并具备高敏感性,可探测到极小的瑕疵,且操作安全、携带便捷。	天然石材、黏土砖等
	微波法	无损检测含水率。通过微波频率与水份含量函数关系,测得水份含量。微波法可测试不同深度处的湿度,最大深度达80cm;测试迅速,1秒钟就可得到结果。智能手持式数据采集系统,可配合软件将采集数据阵列分布,成像水份分布图。	砖石砌体立体潮湿程度
	热红外成像法	热红外成像法是通过非接触探测红外热量,并将其转换成热图像和温度值,进而显示在显示器上,并可以对温度值进行计算的一种检测方法。	结构缺陷、潮湿等定性判断
保护修复	清洗技术: 无损排盐	将清洁糊状剂(预制或现场配制)敷贴在砖石等多孔无机材料表面,将污垢及水溶盐等吸附出来,达到墙面清洁的一种方法,属于牺牲性保护方法的一种。	重要历史材料无损清洁的方法
	清洗技术: 新型脱漆膏	中性、无溶剂、高效、可降解、无腐蚀的水性脱漆剂	砖石木等表面的有机涂层的去除
	高科技微米-纳米石灰	分散于醇类溶剂的颗粒大小在1~3微米的氢氧化钙。	用于对水敏感的面层固化或壁画修复
	基于石灰的修复材料	采用天然水硬石灰、消石灰等配置的修补、粘结、填缝等系列材料	面层修复与非结构性加固
	牺牲性保护	在不改变重要历史材料机械、化学等任何性能前提下,牺牲添加的新材料或设置的非永久面层而保护本体。	砖石建筑修复
效果评估	表面粉化定量测定	以单位面积粘结的表面粉状材料的量来确定表面粉化程度	砖石灰等表面牢固程度的定量对比
	其他方法	图像记录对比、热红外成像法、微波法等	

法—声波传播速度的测定》使超声波成为石质文化遗产保护监测的常规方法。然而,超声波法在历史烧结黏土砖的研究却是空白的,同济大学历史建筑保护实验中心所做的开拓性初步研究表明,古建筑烧结黏土砖的超声波速度与古建筑砖的质量之间存在相关关系,因而通过砖波速的研究可以划分砖的种类、同一类型砖的劣化程度等。

另一种发展迅猛且日趋平民化的高科技技术是热红外成像,可作为智能手机配件的热红外成像镜头使初步判断墙体潮湿状况、开裂、空鼓等病害易于指间。尽管其精度无法匹敌专业的热红外成像设备,但其便捷高效,对于定性判断分析并验证其他勘察结果非常有效。

对砖石砌体潮湿程度的准确判断历来是保护方案成败的关键,与有损的取样后在现场或实验室测试相比,手持式微波湿度检测系统可以对历史砌体的含水率进行无损诊断,测定不同深度的含水率,根据墙体湿度的大小,确定是否需要防潮处理或采取其他手段。手持式微波湿度检测系统的精度在±2%左右,但是已经满足勘察要求。



与智能手机配套的热红外成像技术



微波法无损测定砖石砌体含水率

## 二、保护修复技术与材料

能够满足保护与利用要求的保护修复技术首先需要不违背科学常识，特别是保护干预后砖石材料建筑物理学基本性能的改变原理及其利弊必须得到阐释，再需经过实验室验证、本体实验，得到时间的检验后才可以应用，但更为重要的是需满足文化遗产保护基本准则，如少干预(less interruption)等。另外对保护技术其他方面的要求还有可靠性(reliability)、操作简单(simplicity)、价格可承受(economic cheapness)。由于我国大多数的现场施工人员对遗产保护工程经验不足且教育水平所限，难以掌握复杂的操作技术，因而适宜中国当代的保护科技水平，也需适宜从业人员的受教育程度及管理机制。我国在近现代砖石建筑保护修复发展多年后，在保护修复方面具有突出保护技术、保护材料的有：无腐蚀清洗、无损排盐清洁、石灰修复材料等。

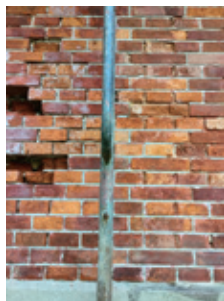
1.清洗技术：历史建筑的清洗指清除影响历史砖石美学与历史价值的污染物或人工添加物，完全有别于既有建筑的翻新！历史建筑的清洗是一种重要的干预类型，错误的清洗对历史建筑表皮的破坏常常是毁灭性的，必须小心谨慎。近年来，一种革命性的脱漆膏问世，可以脱除几乎所有历史上存在的涂料等。该脱漆剂的优点在于缓释高效、零VOC、绝对中性、对砖石木等无腐蚀性、且100%可降解。现已在上海等地的砖石建筑保护中得到很好应用。

### 2.无损排盐

无损排盐指将清洁糊状剂（预制或现场配制）贴在砖石等多孔无机材料表面，将污垢及水溶盐等吸附出



上海市广东路102号喷涂的真石漆采用新型脱漆膏去除后的效果（右侧为喷涂真石漆）



传统高压水清洗（左侧）与无损排盐灰浆清洁（右侧）的区别，前者有损，清洗后表面泛碱。



采用合成树脂配置的修补剂在不到3年时间内对天然石材造成的二次破坏（摄影：戴仕炳）

来，达到墙面清洁的一种方法。无损排盐的最大优点是有害的水溶盐和没有保存价值的污垢等清除掉，而不影响砖石表面的古锈，避免高压水清洗导致的泛碱、损伤等。

### 3.石灰基保护材料

大量的研究已经证明，水泥、合成树脂等材料不适合砖石修复，替代材料宜为天然水硬石灰（NHL）或传统消石灰等配制的修复剂、粘合剂等。

## 三、保护修复评估技术

文物保护专家黄克忠指出“我国的保护工作忽视了对石质文物实施保护后的后续跟踪与评估，缺少总结，如哪些监测方法是实用、可靠的？哪些保护措施是有效性、持久的？从这些后续工作所获得的宝贵经验与教训是指导我们今后的保护的重要依据。”当然，此类状



天然水硬石灰修补剂及石灰嵌缝在天安门金水桥桥面修复中的应用

况不仅在中国如此，在德国等发达国家也颇为普遍。2008年，经过全面的准备，德国萨克森、萨安州文物诊断和保护研究所（IDK）、石材保护研究所（IFS）、巴伐利亚文物保护局（BLFD）等十余个机构成功结盟，实施文物保护后监测评估课题，并于2011年出版了《石质文化遗产监测技术导则》。书中规范了各种用于监测测试方法，既包括毛刷等简单工具，也包括钻入阻力等复杂的设备仪器，记录了单个文物建筑本体修复后监测的细节，分析了不同材料在文物保护使用上的可能性与局限性。这一专著的中文版即将在中国面世，对指导我国的建筑遗产砖石材料本体的检测及保护效果评估具有重要参考意义。

近年来，同济大学历史建筑保护实验中心开发了简单易操作的测试方法，用于直观评价保护修复效果，这些仪器包括粉化测定方法、透水率测定瓶等等。

#### 四、讨论与展望

建筑遗产保护的前沿技术既源自现代先进科学技术的发展，也有赖于传统材料、传统技术的挖掘，例如石灰技术。代表先进的高科技不应排斥所谓的低科技，在很多情况下，低科技从长远看反而能有效地保护砖石历史建筑。历史证明，某些20年前被认为是高科技的材料技术于今日看来对建筑遗产本身却是破坏大于保护。所以，在保护事件中，我们对高科技宜采取不排斥、不迷信的态度。

在评估、监测、预防性保护等领域也出现大量的高科技技术手段。同样的，带有灰度卡、标准色卡的摄影等没有多少高科技成分的技术仍然是非常有效、直观



同济大学历史建筑保护实验中心自主研发的半定量测定砖石灰等材料表面粉化的仪器

的。当然，在评估保护修复效果方面，自信与勇气比技术、管理更重要，只有勇敢面对我们的失败及成功，才能为未来指明方向。

在对我国砖石建筑保护多年的实践经验下也发展出了一种重要的保护理念，即牺牲性保护：指在不改变重要历史材料机械、化学等任何性能前提下添加的可牺牲新材料或设置非永久面层，一方面起到保护砖石本体，另一方面满足砖石建筑新使用功能的技术方法。

另外，在实际工作中，我们也常常面临回答“为什么要修？修到什么程度？采用什么技术修？”等具体问题，针对这些问题，目前没有具体的国家标准，国际上也没有可参照的导则。一种可以参考的思路是“功能导向的保护修复技术组合”：最小干预前提下，将高科技与传统技术结合满足新功能需求的技术系统，这既避免少干预导致的不作为，又可避免过度保护。在上海、杭州、天津等地的历史建筑保护修复中，采用“功能导向”理论设计施工的保护修复技术组合，达到了保护与利用的平衡，值得在未来近现代历史建筑保护工作中不断总结提升。[本文为国家文物局文物保护科技优秀青年研究计划课题“干旱地区古建筑墙体水、盐破坏机理及其综合治理研究”（编号2014223）、国家自然科学基金“我国砖石建筑遗产的古锈（Patina）保护研究”（批准号E080102）及浙江省自然科学基金“温州永嘉古建筑的微观保护与修复技术研究”（编号：Y1110804）等课题部分研究成果。研究过程得到了杭州市历史建筑保护管理中心、上海建筑装饰（集团）设计有限公司陈中伟、香港大学格桑Gesa Schwantes小姐、陕西省文物保护研究院周伟强以及上海德赛堡建筑材料有限公司等单位及美国耶鲁大学Prof. Dr. Stefan Simon的大量支持，在此表示感谢。]

（责任编辑：张双敏）

#### 参考文献：

- [1] BS EN 459-1: Building Lime. Definitions, specifications and conformity criteria, UK; British-Adopted European Standard, 2011.
- [2] 陈祥、孙进忠、祁小博：《石质文物风化程度的超声波CT检测》，《岩石力学与工程报》2005年总第24期，第4970~4976页。
- [3] 戴仕炳、张鹏：《历史建筑材料修复技术导则》，同济大学出版社，2014年。
- [4] 戴仕炳、陆地、张鹏主编：《历史建筑保护及其技术》，同济大学出版社，2014年。
- [5] DAI S. Restoration of historic natural stones in the past decade in China case study, in International Conference Human Resources Development for transmission of Traditional skills national approaches

- and their application to stone and brick. ACCU Nara 2011, 2012,171-176.
- [6] DIN EN 14579 Natural stone test methods Determination of sound speed propagation, October 2004.
- [7] P.Daponte, F.Maceri, R.S.Olivito. Frequency Domain Analysis of Ultrasonic Pulses for the Measure of Damage Growth in Structural Materials. IEEE Ultrasonic Symposium 1990,1113-1118.
- [8] GB/T 2542-2012, 砌墙砖试验方法, testing method of wall bricks.
- [9] GB5101-2003, 普通烧结砖, sintered common bricks.
- [10] JC 466-92, 砌墙砖检验规则, inspection rule of wall bricks.
- [11] L Franke & I Schumann, Indoor Brick damage, investigation of the roles of pore size and salts, in N.S.Baer, S.Fitz and R.A. Livingstone (ed.). Conservation of historic brick structure. England: Donhead Publishing Ltd, 2009,45.
- [12] Glenn Washer, Paul Fuchs, Benjamin A. Graybeal, Joseph Lawrence Hartmann. Ultrasonic Testing of Reactive Powder Concrete. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2004, vol. 51(2): 193-201.
- [13] L.M.del Rio, A.Jimenez, F.Lopez, F.J.Rosa, M.M.Rufo, J.M.Panagua, Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing. Ultrasonics, 2004,42: 527-530.
- [14] Simon Kunz, Marisa Pamplona, Kiraz Goze Akoglu, Hanna Dierks, Stefan Simon, Frank Tiefense. Detection of Structural Layers of a Cored Marble Column from the Market Gate of Miletus with Traditional Ultrasonic Tomography and Innovative Phased Array Sonography. Proceedings of the International Conference on Conservation of Stone and Earthen Architectural Heritage, ISBN 979-11-953029-0-1, 2014: 11-17.
- [15] Ma Hong-lin, Ma Tao, Qi Yang, Yang Jun-chang. Research on Ultrasonic Detection Stone Sculptures of Qian Mausoleum-Tang dynasty. in Chan Hee Lee, Jiyoung Kim and Ran Hee Kim (ed.) Proceedings of the International Conference on Conservation of Stone and Earthen Architectural Heritage, ISBN 979-11-953029-0-1, 2014: 25-30.
- [16] Tadashi Kojima. Ultrasonic Velocity Measurement for Analysis of Brick Structure. IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2008,398-401.
- [17] Michael Auras, Jeannine Meinhardt & Rolf Snethlage (Hrsg) LeitfadenNaturstein-Monitoring: Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien, Fraunhofer IRB Verlag, 2011: 47-54.
- [18] P.Daponte, F.Maceri, R.S.Olivito. Frequency Domain Analysis of Ultrasonic Pulses for the Measure of Damage Growth in Structural Materials. IEEE Ultrasonic Symposium 1990,1113-1118.
- [19] Rolf S,Leitfaden Steinkonservierung. Germany, 1997,94-95.
- [20] 汤永净, 邵振东:《气候对中国古代塔砖材料性能劣化影响的研究》,《文物保护与考古科学》2012年第3期,第33-40页; TANG Yong-jing, SHAO Zhen-dong. The effect of climate on the deterioration of ancient tower bricks. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012,(3): 33-40.
- [21] 王威:《超声波检测混凝土强度分析》,《科技创新与应用》2014年第8期,第187页; Wang Wei. Analysis of ultrasonic testing concrete strength. Technology Innovation and Application, 2014(8),187.
- [22] WTA Merkblatt 3-4-90/D, Natursteinrestaurierung nach WTA X: Kenndatenermittlung und Qualitätssicherung bei der Restaurierung von Natursteinbauwerken. Hrsg.: Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. WTA. Fraunhofer IRB Verlag, 1990.
- [23] WTA Merkblatt4-5-99/D Beurteilung von Mauerwerk Mauerwerksdiagnostik,Hrsg. Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. WTA, Fraunhofer IRB Verlag, 1999.
- [24] WTA Merkblatt 1-7-01/D: Kalkputze in der Denkmalpflege,Hrsg. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.WTA, Fraunhofer IRB Verlag,2001.
- [25] WTA Merkblatt3-13-01/D, Zerströrungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen Hrsg. Wissenschaftlich- Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. WTA, Fraunhofer IRB Verlag, 2001.
- [26] WTA Merkblatt Opferputze, sacrificial plasters, 2-10-06D, 2006
- [27] WW/T 0002-2007, 石质文物病害分类与图示, 2008-02-29.
- [28] WW/T 0007-2007, 石质文物保护修复方案编写规范, 2008-02-29.
- [29] WW/T 0012-2008, 石质文物保护修复档案记录规范, 2009-02-16.
- [30] WW/T 0028-2008, 砂岩质文物防风化材料保护效果评估办法, 2009-02-16.
- [31] WW/T0049-2014, 文物建筑维修基本材料-青砖。