

■科技保护

信息提取技术在风化碑刻石刻中的应用

中国文化遗产研究院石窟保护团队

碑刻石刻是我国文物的重要组成部分。面对数量巨大、亟待保护修复的碑刻石刻，无论是从技术、材料，还是专业力量上，都难以大面积开展保护，碑刻石刻的信息采集、留存和研究显得尤为紧迫。中国文化遗产研究院石窟保护团队开展了风化碑刻石刻的信息提取技术研发，并成功应用到多处碑刻石刻的信息提取与留存，为抢救濒危碑刻石刻的信息，以及碑刻石刻的数字化提供了重要技术支持。

我国碑刻石刻文物数量巨大，种类繁多，第一至八批碑刻石刻类全国重点文物保护单位有136处，近千件（套）馆藏碑刻石刻被评定为一级文物，还有大量碑刻石刻文物被纳入全国重点文物保护单位的古建筑和古遗址中。根据国家文物局2022年部署的碑刻石刻文物资源摸排、名碑名刻文物名录建立工作，我国碑刻石刻文物总量约15万通（方）。碑刻石刻的价值包罗万象，例如，先民的刻画，民族与宗教变迁的史迹，疆域的实证，历史人物的记载，文人墨客的题记，江河洪、枯水的标记，地震灾害的记载，传统工艺及医药的记录等。特别是石刻中的书法，体现了独特的艺术价值。将石刻列入文物古迹类型中，说明碑刻石刻是文物的重要组成部分，是更为直接的中华文化实证，它具有极为广泛和深厚的社会基础。

室外不可移动碑刻石刻文物因其赋存环境，劣化速度正在加快，其防风化保护是最迫切的工作。碑刻在长期环境作用下，极易产生粉化、剥落病害，如龙门石窟奉先寺的唐碑、乐山大佛侧面的天王造像群，多数字迹已经消失；安岳卧佛苑藏经阁摩崖题刻在几年的时间里就产生了大面积剥落；北京居庸关云台的元代汉白玉雕刻及六体文字，已经到了要抢救保护的阶段。过去很少将石刻的保护作为专题来研究，但目前碑刻石刻的保护已引起广泛的重视，国内众多团队对碑刻的防风化、清洗、渗透加固、物理防护等方面开展了研究和实践工作，并取得了较为广泛的关注。

实际上，我国有很多重要的石碑石刻，还没有真正意义上的数字化，碑刻石刻数字化技术水平仍然存在着较



四川安岳某题刻信息提取效果



望柱信息提取效果

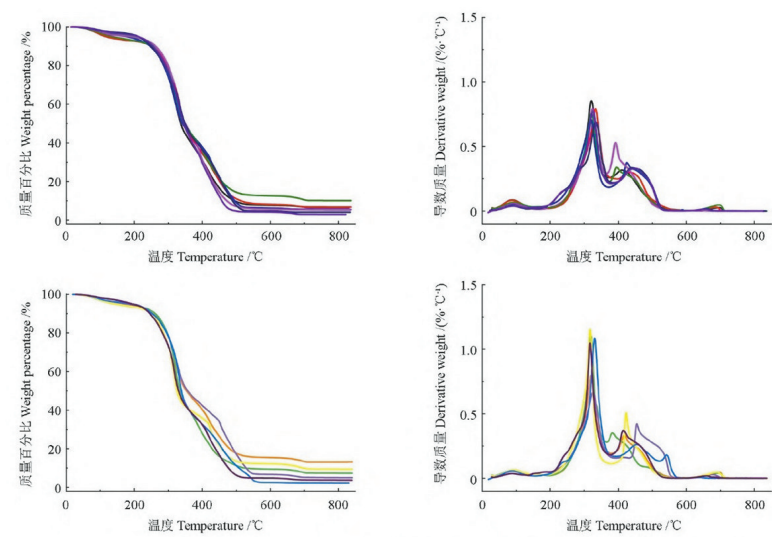
大的提升空间，风化碑刻石刻的信息留存、文字史料信息的研究更为迫切。当前，碑刻石刻信息留存主要有传统拓片、三维激光扫描数据、摄影测量建模、数据照片和正射影像等技术。但针对风化程度高、微观信息模糊、赋存环境干扰较大的碑刻，常规技术难以识别碑刻的精准信息。一方面，采集的数据大都需要专门的软件打开，数据的通用性较差，一些技术可对三维模型数据体量进行精简，但是模型一经减面则真实感顿失，成像表现降低；二是单一技术采集的数据难以满足同一处石碑石刻不同类型数据的精度要求。例如，石碑石刻类文物是明显的三维对象，在现场可以通过变换观察角度更清晰地辨识文字，但采集为二维数据之后，一个空间维度的信息直接丢失，特别是在光线过于平均柔和的条件下采集的数据对比度过低，成像效果较差，文字辨识困难；另外一些石碑类文物由于风化日久，通过肉眼难以辨识文字内容，而当前业内缺少加强成像的技术，无法提高这类文物的文字辨识度。

因此，针对以上关键问题，中国文化遗产研究院石窟保护团队在碑刻石刻文物的数字化保护工作中，构建了三维激光扫描技术、影像采集技术、深度测绘技术、信息成像技术叠加形成的碑刻石刻信息提取技术，并在典型碑刻中开展应用。研究团队运用本项技术对多处碑刻文物开展信息提取，获取了碑刻全息技术数据、数字拓片数据及光影纹理，发现了肉眼难以识别的人为刻痕、书法笔锋、纹样造型、印章等细节信息。通过该项技术可以在无损条件下提取出清晰的碑刻石刻的原始图像、纹饰以及文字信息，通过对采集数据的分析、处理、应用，可将清晰度提高40%至90%，为研究人员提供准确、清晰的研究资料，在此项技术的支持下，有大批即将消失的文物信息资料被抢救被追回。

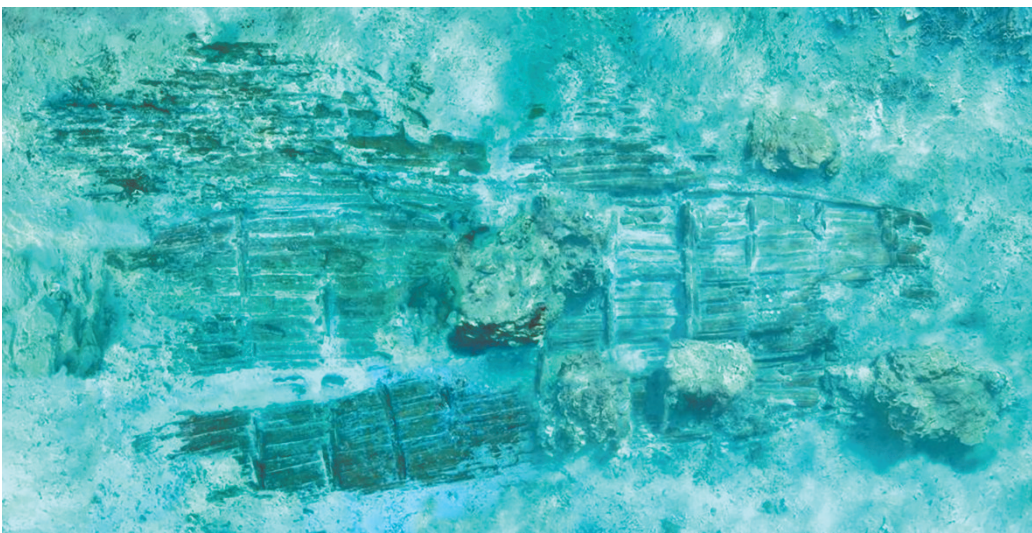
研究团队将在该项技术的支持下，持续开展重要碑刻石刻的全息提取与展示利用，并推动形成标准化的碑刻石刻文物信息留存技术规范。同时，依托本技术，还可为开展碑刻文物风化状态的准动态监测提供新的技术方案。

浅析热重法检测“华光礁1号”沉船木材PEG浸透效果

李晶晶



热分析谱图对比



“华光礁1号”沉船

南海是海上丝绸之路的必经地，据古籍记载，早在秦汉时期，环南海沿海居民已经航行于南海之上，穿越南海诸岛，有了大规模的远洋航海通商和渔业生产活动，他们滨海而居，因海而生，创造出了内涵丰富的南海海洋文明。船舶是世界上一切海洋文化的主要载体，自古以来，通过航运的物品几乎涉及人类生活的所有领域，他们因消失于海底而不能反映人类多方面的历史。而在南海“华光礁1号”遗址中沉船和遗物的发现，展示了古代海上交通繁忙的景象，是我国南宋时期海外贸易的重要史迹，再现了古代海上丝绸之路的航海之光。

然而作为海洋出水的古代木质沉船，“华光礁1号”在海水中浸泡了几百年，长期受到埋藏环境中酸、碱、盐的腐蚀，木材中的主要成分——纤维素、半纤维素、木质素已大为下降，其纤维素平均含量在20%左右，木质素平均含量在50%左右，伴随而来的是木材密度变小，孔隙率增大，水分不断渗入木材细胞组织中，使得船板处于高饱水状态。这些结构和性能的劣变对“华光礁1号”沉船的保存极其不利，需及时进行脱水定型以延长文物的保存寿命。

目前，饱水木质文物的脱水定型大多采取化学置换填充法，其原理是：利用含有极性官能团与木材纤维素形成氢键结合、化学性能稳定的物质，在室温或较高温度下以溶解或熔融的状态，使其由稀到浓逐步渗透到木材的细胞腔和细胞壁中，把水分从木材中置换出来。当温度降到常温时，这些物质就吸着或固结在木材的空隙中，从而有效地阻止了木材的收缩，对器物起到加固作用。根据沉船打捞方式的不同，填充加固采用的方式也有所不同。对于“华光礁1号”这一类拆解出水的船体，采取的是溶液浸泡的方式，随时间阶段性逐渐提高浓度，在保护过程中通过维持较高温度促进聚乙二醇(PEG)向木材渗透。但无论采取的是喷淋还是浸泡方式，沉船在保护期间都存在由于初始微生物降解程度不均、硫化物等因素影响，很难准确估算木材实际上到底吸收了多少PEG的问题。为了评估渗透效果，国内外学者对古木处理过程中PEG的分布开展了研究，以使该过程更加科学有效。

热重分析法是一种在程序控制温度下，测量物质质量与温度或时间关系的技术，用来研究材料的热稳定性和组分。Donato等学者采取热重分析法分析了木材内PEG3000、PEG4000的含量，验证了这种热分析方案的可靠性；Cavallaro等学者用DSC和热重分析法检测木块中PEG浸透量取得不错的效果。鉴于热重分析相对简便、低成本、微损的特点，本文拟对海南省博物馆“华光礁1号”沉船进行取样，利用高效液相色谱仪、热重分析仪对PEG及木材热解特性等进行表征，为应用热重法检测出水木材聚乙二醇浸透效果进行一些探索。

“华光礁1号”沉船残体总长17、宽7.54米，舷深3~4

米。龙骨残长16.7米，龙骨两侧除南端西侧约1米长的部位外均覆盖有一层宽约0.13、厚约0.02米的薄板。拆解后的船板大部分长5~6米，最长达14.4米；平均宽度在30厘米以上，最宽达48厘米，总体积约21立方米。除龙骨旁的侧板保存稍好外，其余均腐蚀较为严重。经过五年脱盐、两年脱除硫酸盐物处理后，开始以10%PEG4000溶液浸泡船板，定期开启加热装置保持40℃左右温度，同时维持较高湿度以促进PEG填充速率。为评估沉船木材浸透程度，从中选取了24件不同船体部位的沉船样块和浸泡液水样，样块树种经鉴定为硬木松、杉木、樟木。

凝胶渗透色谱分析

“华光礁1号”沉船在浸泡加固过程中，船板木材内部以及浸泡液中的聚乙二醇，在加热、酸碱度、浸泡时长等因素的影响下可能会发生降解，进而影响沉船加固以及浸透效果评估。因此，分批采集浸泡液水样及木材内部溶液进行凝胶渗透色谱分析。

将青木PEG4000样品的凝胶渗透色谱图、第一次采集水样的凝胶渗透色谱图和第二次采集水样的凝胶渗透色谱图相对比，可以发现：两次采集水样的凝胶渗透色谱图在峰高、峰形状、峰面积，以及保留时间上几乎一致，表明在间隔两个月内，PEG没有发生降解；同时，这两次水样的凝胶渗透色谱图与PEG4000样品的凝胶渗透色谱图在峰高、峰形状、峰面积，以及保留时间上也几乎没有变化，表明自浸泡以来，水池中的PEG也未发生降解。

同时通过对木材浸出PEG的GPC检测，可以看到其凝胶渗透色谱图与PEG4000样品的凝胶渗透色谱图在峰高、峰形状、峰面积，以及保留时间上也几乎没有变化，这表明渗透进入木材的PEG也未发生降解。从而说明所选用的PEG材料在质量和性能上是合格的；然而在进行酸度检测时发现溶液出现了酸化现象，后续需对浸泡液PH值加以监测、控制，避免PEG发生降解。

热解分析

木材的热解一般会经历四个阶段：第一阶段为110℃以前，为木材干燥阶段，试样吸热升温失去自由水；第二阶段为110℃~220℃，为木材热解前预热阶段，试样吸收少量热量；第三阶段为220℃~370℃，为木材快速失重阶段，该阶段是综综热解的主要阶段；第四阶段为370℃~700℃，为木材热解阶段，该阶段主要是木质素和少量纤维素的缓慢热解。

木材热解过程本质上为木材中主要化学组分分解，与纤维素和半纤维素相比，木质素热解过程中更倾向于形成焦炭，与现代健康木材相比，考古木材的残炭率高于现

代材，表明考古木材中木质素含量较高。由样品的TGA曲线可知，在100℃附近开始，大量的质量损失是由于水分的散失，木材细胞壁成分的分解发生于更高温度。作为木材的主要化学组成之一，木质素是苯丙烷单体通过醚键等连接键连接形成的具有三维网状结构的大分子，在较低温度下即开始热解，但由于复杂的空间结构会阻碍热解的进一步发生，使得木质素热解速率减缓，木质素热解范围最广，几乎贯穿木材的整个热解过程。经检索文献，半纤维素发生剧烈降解的温度范围是225℃~325℃，木质素的分解温度在250℃~500℃，纤维素的分解温度在325℃~375℃逐渐分解，PEG的最大分解温度约为416℃，说明经高分子量的PEG处理后，考古木材的最大分解温度会更高。因此，最大分解温度或许可作为评判加固效果的一项指标，接近或大于400℃表明可能已经渗透进了一定量的PEG。

从上述检测结果可以看到，在所有失重速率-温度图中，在300~350℃和450~500℃两处均出现有明显的热解峰，只是峰的高度、面积、位置有所变化。根据前面的讨论可知，450~500℃处的峰值越高，峰面积越大，向右的位移越多，表明分解了越多分解温度大于400℃的物质。就这批样品而言，从理论上可以将分解温度大于400℃的物质视为PEG。从理论上可以得出若450~500℃处的峰值越高，峰面积越大，向右的位移越多，则该木材中填充的PEG越多。

从24个样品中，分2组、每组随机挑选6个数据进行对比分析，可以发现不同样品均在400℃左右存在明显的失重，其中低于400℃的失重应主要是木材中的纤维素和木质素，高于400℃的失重则主要是木材中的木质素和渗透进入木材中的加固剂。由此可以推测：这批木材样品中纤维素留存率比较高，反映保存状况相对较好，经过加固剂浸泡，样品中存在有最大热分解温度大于400℃的加固剂；选取同一船板编号样品的两次检测谱图进行对比，450~500℃处的峰值、峰面积等有所增加，但变化基本不大，可以推测在该浸泡液浓度下沉船填充达到平衡。

基于PEG及木材热解特性，热重分析结果确定了在经过近一年时间的浸泡下，聚乙二醇渗透进木材内部增强了木材的机械性能，聚乙二醇检测未出现明显降解并趋于填充平衡，初步验证了该方法检测评估PEG浸透效果的潜力。然而木材本身含水率较高，总纤维含量较低，木材的主要成分木质素结构特别复杂，分解区间很大；样本中均不同程度还残留有S、Fe等元素，木材中灰成分不一……在上述因素影响下利用热分析对加固效果进行评价和表征存在较大误差的可能性和不确定性，在后续的保护监测中，需进一步提高热重分析评估沉船聚乙二醇浸透加固效果的准确性。

(作者单位：海南省博物馆)



石雕石刻扫描保护

立柱、梁架修缮安装

科研贯穿文物保护全程

以荆门白云楼修缮为例

杜文成

文物的既有特性决定了文物保护工程的特殊性，它不同于一般建设项目，无法套用固定的技术标准。受文物结构、勘察条件和设计水平的限制，文物保护项目实施过程存在诸多不确定因素和不可预见性，因此需要针对性地对保护对象开展持续性的分析、探讨与研究，并将研究工作贯穿于文物保护工程的始终。白云楼修缮项目于2021年9月动工，年底竣工，次年7月通过验收。在项目实施的各个阶段，始终将科学研究放在突出位置，取得了较好的效果。

白云楼位于湖北荆门青龙山西麓，初名三皇庙，始建于年代不详，据州志记载，原为吕祖庙，始有太平洞，亦名吕仙洞、白云洞。文物本体由卧云洞、云台、白云楼组成。卧云洞坐东向西偏南10度，由正洞和斜月洞组成，洞壁系石砌筑。云台通高8.45米，台顶面东西长21.50米，南北宽13.90米。白云楼筑于云台中东部，石木结构，二层，通高16.3米，基座平面八角，边长5.20米，高1米，正面设五级踏跺上下，踏跺中央浮雕云水纹饰。白云楼外檐每角立柱一根，下石上木，通高4.80米。白云楼正身平面为正方形，边长5.30米。室内四角立石柱四根，上木下石，直通顶层。基座八方，楼身四边，暗喻四象八卦。楼后墙边设阶梯上二楼，内木板覆面，西侧开门外设龙头，可登高眺远。层顶层檐歇山，覆灰筒瓦。正脊两端安龙头鱼尾正吻，正中压葫芦形宝顶。垂脊、战脊前前置螭兽。一层垂脊立陶兽7只，二层垂脊立陶兽5只，此种布局在湖北地区较为少见。楼八角挂铜铃摇曳，声彻云霄。白云楼建筑风格独特，构筑精巧，石雕工艺精湛，极富地域特色。1992年被公布为湖北省级文物保护单位。

白云楼既是文物保护单位，也是宗教活动场所，目前采取的保护管理措施如下：一是实行分区保护，根据实际情况分别划定文物保护单位核心区域和宗教活动区域，核心区域设置保护界桩，以文物展示利用为主，不开展任何形式的宗教活动。宗教活动集中于宗教活动区域，并在宗教部门的指导下依法合规开展，同时划定专门的焚香点并由专人看管，每年开展两次消防培训与演练，确保安全。二是加强巡查和监测，建立健全文物灾害的综合风险监测和评估制度，做好监测记录，建立动态的文物管理档案，对文物的残损状况、形成原因和拟采取的措施做到“先知”。三是做好日常维护，实行岁修制度，每年定期清理文物本体周边树枝和屋面的枯枝落叶，清除台身杂草，疏通排水，清扫蛛网尘土，使建筑处于一个健康的环境。四是根据残损现状及时排除安全隐患，如对破损脱落的瓦头清理加固，对槽枋的梁架增加支撑，确保在文物修缮前不出现大的险情。白云楼距上一次维修已近三十年，各部分都存在不同程度的残损，部分立柱、梁枋槽枋导致文物主体存在较大的安全隐患。2020年4月编制修缮立项报告，2020年6月湖北省文化和旅游厅批准立项。

根据省厅立项批复意见，一是选择优秀的勘察设计单位和高水平的设计人员，确保设计文本的质量；二是向设计单位提供日常管理档案、监测数据和研究成果，供设计参考；三是共同参与项目勘察研究并提出设计建议，多次研究探讨形成文本上报。2020年12月省厅批准该方案并提出修改建议，经完善并报市局核准。

因疫情影响，项目动工一再延后。2021年9月，在经过招投标程序并向省厅报备后，项目正式进入施工阶段。随着脚手架的搭建、各项安全防护设施的完善和文物本体的结构暴露，施工阶段成为深入勘察与研究的黄金阶段。通过对文物本体进一步的详细勘察与研究发现，白云楼的主要病害集中于屋面和梁架。白云楼梁架采用抬梁式构架，室内四根金柱直通顶层，柱上架梁，梁上立柱，柱上再架梁，梁上立脊瓜柱，形成十字坡屋顶。金柱与金柱用穿枋、楼枋板连接，上层四周采用挑枋来承托檐口。下层檐八角形石柱上置圆形木柱，直接承受托檐椽。四周用枋、梁连接。由于楼内平面方形，围廊八角形，围廊双步梁后尾无法与楼身金柱连接。为了解决这一矛盾，古代匠师加厚四周墙体至75厘米将双步梁后尾砌在墙体内，前端伸出柱外挑着挑檐椽。双步梁上立童柱，童柱与墙体用穿枋连接，形成围廊梁架。受渗水影响，西南角木立柱与梁枋相接处槽枋下沉，导致相邻屋面下坠位移。由于渗水位置较高无法在明处水渍，症状表现不足，在日常巡查过程中未能及时发现。通过揭取屋面瓦件后发现，屋面灰背层大量使用水泥砂浆，荷载较重，梁枋用料规格较小并经拼接而成，承载力不足导致屋面变形，灰浆开裂，瓦件裂缝，同时原有的油毡刚性有余而韧性不足导致皴裂残损，雨水长久浸入造成木构件槽枋、北边的挑梁残损也是如此。

由于大木构件的叠压关系较为复杂，不仅涉及外檐的柱、梁、枋的穿插，还涉及墙体和室内的梁架穿插，传统的“偷梁换柱”法不适用，必须拆除灰浆后方可逐一拆卸更换安装修复。在拆除水泥面层的施工过程中，不可避免会造成相邻屋面的残损，这是水泥面层的通病。再加上新修屋面采用传统做法荷载相对较轻，易造成整个屋面荷载的不均衡，经过综合考量，决定拆除一层的全部水泥层面，按传统材料和做法重新恢复。为了减轻屋面荷载和长久保护，一是对大木构架和木基层仔细甄别，根据残损情况的不同采取修缮、加固、更换等措施实行针对性的保护，排除潜在的安全隐患；二是防水层采用涤纶防水布替代原有的三油二毡，涤纶布韧性强、质量轻、有效性佳，具有油毡无法比拟的优越性，且施工更为简单，防水效果更好；三是灰背层采用水洗灰、河沙、煤灰混合灰浆，既保证结构有力，又能有效减少屋面荷载，减轻屋面压力；四是白云楼屋面较陡，为了防止屋面整体下滑，在灰背层内置入一层钢丝网并与防水卷材一起伸入墙内，以形成统一整体。二层屋面木结构基本完好，仅对开裂的瓦顶用细钻轻揭慢取，清理干净后用灰浆灌缝，再用新瓦复原，不做其他干预。一层和二层屋面的修缮是根据残损实际所采取的不同手段，既排除了安全隐患，又可对这二种修缮方式作一个对比，孰优孰劣留待今后的监测检验。其他诸如吻兽、翘角修复后安装，既保证完整展示，又防止雨雪水顺残损面渗入影响屋面安全。残损的油饰和墙面先做小样测试，达到要求后再行修补。

2022年7月项目通过验收。为做好持续研究，一是收集整理修缮资料并归档，并和以前的修缮进行对比研究和实施效果的预判；二是对所采取的措施进行持续观察与监测，对今后的推广利用积累基础数据；三是加强日常检修和维护。今年春节期间，受极端冰雪天气影响，局部裂缝的瓦头受冻后松动脱落，存在较大的安全隐患，为此逐一排查并修复。同时根据结合其他文物保护单位冻害病害情况，研究出台《极端冻害天气下的文物病害与保护对策研究》。白云楼竣工两年来的实践检验初步证明所采取的措施是基本合理的，效果也较好，但推广利用还有很长的路要走。

(作者单位：湖北省荆门市古建筑保护中心)