

“灰作六艺”

——中国传统建筑石灰研究框架初探

‘Six Aspects of Lime Work’: A Research Framework of Building Lime in Traditional Chinese Architecture

李晓 Li Xiao
戴仕炳 Dai Shibing
朱晓敏 Zhu Xiaomin

摘要: 中国古代建筑石灰生产的历史悠久、应用领域广泛,其技艺理应得到完整、全面、科学的解译与传承,并避免断章取义,片面照搬。在整理和研究学术界对古代建筑石灰已有研究成果的基础上,在现代科学研究成果的支撑下,文章从对历史文献的考证分析入手,尝试建立历史文献与考古实证之间的联系。提出对中国古代建筑石灰的研究可以从烧制石灰的原材料(石)、煅烧手段与方法(锻)、消解工艺(解)、配方设计(方)、施工工艺(工)及固化特点(固)等六个方面,全面完整地分析传统灰作技艺及其存在的问题。“灰作六艺”作为古代建筑石灰研究课题的框架,其所得成果,可以使建筑遗产保护实践在“原材料”层面获得坚实的基础。

关键词: 古建筑修缮;中国传统建筑材料;传统石灰;“灰作六艺”

Abstract: Traditional building lime has a long history and a wide range of applications in ancient China. Its art should be completely, comprehensively and scientifically interpreted and inherited, so as to avoid the misinterpretation and partial copy. Based on the existing research results of traditional building lime and supported by modern scientific research results, this paper attempts to establish the connection between historical documents and archaeological evidence by textual research and analysis of historical documents. It proposes that the research of traditional building lime should be based on the following six aspects, including raw materials (stone, or *shi*), calcine methods (*duan*), slaking processes (*jie*), formula design (*fang*), construction process (*gong*) and curing characteristics (*gu*), and the traditional building lime and its existing problems could be analysed comprehensively. As a research framework of traditional building lime, the results of the ‘six aspects of lime work’ can lay a solid foundation for architectural heritage conservation practice in the aspect of ‘raw materials’.

Keywords: conservation of ancient buildings; Chinese traditional building materials; traditional building lime; six aspects of lime work

中图分类号: TU-87; TU52
文献标志码: A
文章编号: 2095-7289(2019)03-0047-07
DOI: 10.19673/j.cnki.ha.2019.03.006

石灰是重要的传统建筑材料,历史上长期作为胶凝材料应用于地基、基础、墙体、屋面、饰面等部位。在硅酸盐水泥引入中国并规范使用后,石灰已不再作为主要粘结材料,至20世纪70年代基本只用作掺合料。但近年来,随着建筑遗产保护理论的不断发展和实践的深入,各种类型的纲领性文件都强调传统材料在保护中的应用,尤其是水泥在建筑遗产保护和修缮中的负面作用逐渐显现,石灰因本身就是传统建筑材料,且其强度特征等性能与建筑遗产保护要求相适应,开始成为保护修缮工程的重要功能性材料。

目前中国学术界对古代建筑石灰应用的研究主要集中在历史探源、传统灰浆科学化研究和保护工程应用等几个方面。如容志毅^[1]、杨丙雨^[2]等对宋元之前建筑石灰的应用历史做了系统梳理,裴学松^[3]根据考古资料研究了史前时期“白灰面”的发展历程。传统灰浆科学化是研究的热点,曾余瑶^[4]、杨华山^[5]、魏国峰^[6]、张坤^[7-8]、方世强^[9]等人在以现代检测技术研究灰浆凝结机理方面做了大量工作。借鉴传统灰浆工艺,李振^[10]、杨海军^[11]、戴仕炳^[12]、王逢睿^[13]、王赞^[14]等在保护工程中应用石灰取得了良好的效果。

尽管如此,但从整体看,对传统建筑石灰的研究仍然存在研究割裂、缺乏框架

的不足。特别是通过史料文献研究石灰的应用还有很大空白。现有研究已经从部分古籍中初步了解到古代建筑石灰的生产和施工技艺,但对其科学意义尚缺乏充分的解译。甚至还有部分研究对史料断章取义的分析误导了传承的方向。

不能完整地理解传统灰作,就无法在建筑遗产保护的实践中科学地利用石灰,实现保护的目,反而会因此对遗产造成更大的伤害。如墙面粉刷后出现疱疹,修复后的明长城发生局部坍塌,很大程度上就是对传统灰作研究不到位造成的。文章在现代科学研究成果的支撑下,基于对传统文献的考证、分析和归纳,以固化应用为核心和目标,尝试从烧制石灰的原材料(石)、煅烧燃料及方法(锻)、消解工艺(解)、配方设计(方)、施工工艺(工)及固化特点(固)等六个方面(合称“灰作六艺”,图1)分析传统灰作技艺及其存在的问题,以期建立一个完整的研究框架,对未来传承进行展望。

1 石——烧制石灰的原材料

从古籍的记载来看,中国古代烧制石灰的原材料有两种:石灰岩与牡蛎壳。



图1

图1 灰作技术体系关系示意图(图片来源:李晓绘制)



图2

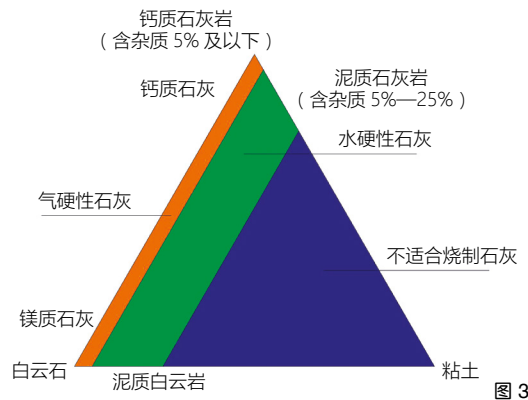


图3

- 图2 烧蛎房法制石灰（图片来源：宋应星《天工开物》，上海商务印书馆 1933 年版，第 203 页）
- 图3 原材料与石灰种类的关系（图片来源：李晓绘制）
- 图4 陕西旬邑下魏洛出土的石灰窑（图片来源：《陕西旬邑夏魏洛》，科学出版社 2006 年版，第 25 页彩版五）
- 图5 河南巩义唐代石灰窑遗址（图片来源：李辉《河南巩义窑址发现古代石灰窑和各类瓷器遗物》，《中国文物报》2016 年 8 月 26 日第 8 版）
- 图6 广东省河源市龙川县麻布岗镇大古村的石灰窑（图片来源：陈桂林摄影）
- 图7 英国 Clints Wood 古石灰窑（图片来源：Matthew Hatton, <http://www.geograph.org.uk/photo/4493765>）

1.1 石灰岩

中国古人开采山石烧制石灰，至晚在仰韶文化中期就已经出现，其时原材料以料姜石为主^[15]。到龙山文化时期，发展为以石灰石烧制石灰。如 2004 年陕西旬邑下魏洛遗址出土的窑内（公元前 2900—公元前 2100 年）残存有块状石灰、石灰粉、破碎的青灰石块和烧过的硅质灰岩石块^[16]，说明以石灰岩烧制石灰在龙山文化时期已经有了相对成熟的工艺。从那时起，含有较多方解石或白云石的天然石材和生物体开始成为烧制石灰的主要原材料。

使用石灰岩烧制石灰的明确文献记载最早见于西晋《博物志》：“烧白石作白灰，既讫，积著地，经日都冷，遇雨及水浇即更燃，烟焰起。”^[17]指明白灰（石灰）是由白石烧制而成，并且遇雨水即消解，放出大量热气，如蒸如蔚。其后，南梁陶弘景也有过类似说法：“今近山生石，青白色，作灶烧竟，以水沃之，即热蒸而解未矣。……世名石堊。古今多以构冢，用捍水而辟虫。”^[18]对石灰烧制和消解的描述与《博物志》基本相同。“捍水”，即防水防潮之谓；“辟虫”，杀菌灭虫之意。《周礼·秋官·司寇》记“壶涿氏”职掌，称其“掌除水虫……以焚石投水”^[19]。清吴浩《十三经义疑》解释说：“焚石，即今石灰也。故疏云：‘石燔烧，得水作声，使水虫惊去。’不曰‘石灰’而曰‘焚石’，取其热也。”^[20]据此，至南北朝时期，营坟时使用石灰，收防水驱虫之效，已是其时的通行做法。

值得注意的是，《博物志》和《本草经

集注》都提及的石灰岩的色彩——“白”或“青白色”，可视为选矿依据。《天工开物》则认为可燔的石材“以青色为上，黄白次之”^[21]。石灰岩矿物组成以方解石为主，化学成分主要是碳酸钙，通常为灰白色，如含有杂质也会呈现深灰、浅红、浅黄等颜色。古人不明矿物的化学成分，仅依经验加以总结，这种描述的差异应与作者的生活背景有关。今天的科学研究表明，“青色”或“黄白色”石材均可烧制出质量好的石灰。

1.2 牡蛎壳

自先秦时期起，沿海地区即以牡蛎壳烧制石灰的传统。先秦文献中将这种由生物体烧制而成的石灰称之为“蜃炭”^①^{[19]593}，在房屋营造和修建坟墓时将其用于粉刷墙壁和杀菌除虫^②^{[19]862}。蜃炭的产地应是齐国沿海（今山东半岛），此地夏商时被称为东夷，周武王分封诸侯，姜太公于此封国建邦。因其地偏处东部，农业不如中原腹地发达，姜太公发挥沿海资源优势，煮盐垦田、兴工商，齐国很快成为春秋时期实力强盛的诸侯国之一。周王朝营造宫室所用的蜃炭从齐国运输而来，应是合理之猜测。

以蛎壳为原料生产石灰的传统工法延续千载，至 20 世纪方消失。宋应星记载：“凡温、台、闽、广海滨，石不堪灰者，则天生蛎蚝以代之。”^{[21]203} 其书中烧制石灰的插图（图 2），原材料“蛎房”就是蛎壳。

1.3 原材料不同导致的产品区别

现行国家石灰标准根据石灰中钙质和镁质含量的不同，分为钙质石灰和镁质石灰（MgO 含量大于 5%），均为气硬性石灰（即

可在空气中硬化）。前述《天工开物》中提到的青色石灰石，经现代生产实践证实是以钙质为主的石灰石，适合烧制钙质石灰或具有弱水硬性的石灰；黄白色的石灰石大多数为含有镁的白云岩或石灰岩，其烧制成的石灰为镁质石灰或含镁石灰。

生产气硬性石灰要求原材料中粘土含量一般不超过 5%。当灰岩中掺杂的粘土含量在 5%—25% 之间时，烧制的石灰因含有能在水中硬化的硅酸二钙（C2S）成分而具有水硬性，被称为水硬性石灰。不同原材料成分与所得石灰产品种类的关系，如图 3 所示。

因缺乏相关文献记载，尚难以判断我国古代是否有水硬性建筑石灰存在。但蛎壳中含有少量的硅质、泥质成分，以蛎壳烧制的石灰应该具有一定的水硬特征。

2 煅——煅烧石灰的手段与方法

煅是烧制石灰的必要手段和过程，立窑堆烧是古人很早发现并掌握的煅烧石灰方法。普通石灰的煅烧温度不超过 900℃，这在中国古代是较易达到的煅烧温度。

2.1 煅烧容器

前述陕西旬邑下魏洛新石器时代的石灰窑，系竖直式窑，窑室平面近圆形，弧壁，火膛在窑体正下方（图 4），窑室上部应有开口以投放原料。以竖窑形式烧制石

① 《周礼·地官·司徒》：“掌蜃：掌敛互物、蜃物以共鬲圻之蜃。”注曰：“‘互物’，蚌蛤之属；‘鬲’，犹塞也，将井榨先塞下，以蜃御湿也。郑司农说，以《春秋传》曰始用蜃炭，言僭天子也。”

② 《周礼·秋官·司寇》：“赤发氏：掌除墙屋，以蜃炭攻之，以灰洒毒之，凡隙屋，除其狸虫。”



灰在我国古代社会基本没有变化，如河南巩义发现的唐代石灰窑遗址^[22]（图5），呈现出同样的竖直圆形窑室，以及火膛在窑室下部的特征。新中国成立后，广大乡村仍然主要使用这种形式的石灰窑烧制石灰，如广东省河源市龙川县麻布岗镇大古村的石灰窑（图6）。20世纪90年代后，因其粗犷的生产方式和环境污染等问题才逐步为机械式立窑所取代。其实不仅在中国，西方烧制石灰采用的也是同样的立窑形式，如图7所示英国19世纪的石灰窑。

由于缺乏确凿的文献证据和材料检验，目前我们只能推测这种简单的立窑所烧制的石灰，原材料既可能是优质洁净的石灰岩，也有可能是掺杂粘土等杂质的石灰岩，所产石灰的质量取决于原材料的质量以及煅烧温度和时间，波动很大。

2.2 煅烧温度

一般而言，烧钙质石灰石的温度需要在900—1000℃，烧具有水硬性的生石灰除原材料含有泥质、硅质外，煅烧的理想温度在950—1150℃。过低或过高的温度、过短的时间均不能烧制出高质量的石灰。如“黄白”或“白色”的白云石石灰岩或白云岩的分解温度为730—900℃，或更低。烧白云石温度高于900℃时烧出的生石灰不能用作建筑材料^[23]。在缺乏测温手段的古代，“煅”的过程控制往往由有经验的工匠负责，通过对“温度-炉火颜色”和“时间”的调控保证石灰质量。如清代《陈墓镇志》记：“吾镇石灰其来已久，为独行生理。……然宜兴灰比之陈墓灰善恶大不同。

宜兴烧以山柴，五、六週[昼]夜而熟。柴硬，火烈；火烈，灰暴。故用以砌墙不坚，用以粉壁而壁不细。陈墓灰则不然，用稻、柴或菜萁，速者十五週[昼]夜，迟者二十余週[昼]夜。日久热退透缓，则性和。故用水化时灰细如面，用去无不得法。”^[24]由此可知，宜兴烧灰因为用山中硬柴，烧结温度高、速度快，石灰过烧情况可能较严重；而陈墓石灰因所用燃料为稻秸等，烧结温度相对低、速度慢，能有效降低过烧率，故而所出石灰品质更佳。

其他形式的石灰生产工艺，如前述《天工开物》中插图（图2）所示，还有堆烧法，因蛎壳较薄，这种堆烧法对燃料数量需求应该较以石灰石作原料为少。在温州，至今还有乡民以这种方式生产蛎壳石灰。

2.3 煅烧燃料

我国历史上长期以柴草作为烧制石灰的主要燃料。明清鼎革至清初，因人口增加导致华北地区的柴草供应缺口加大，促使煤炭逐渐成为主要燃料。但在草木丰盛的南方地区，柴草作为烧制石灰的主要燃料一直延续到20世纪70年代。

《天工开物》描述的立窑烧制工艺，是中国古代仅有的对石灰生产工艺的详细记录：“先取煤炭、泥，和做成饼。每煤饼一层，垒石一层。铺薪其底，灼火燔之。最佳者曰矿灰，最恶者曰窑滓灰。火力到后，烧酥石性……”^{[21][97]}如果烧制过程不用煤饼纯用柴薪，则需不断向炉膛内填塞柴草，使得整个烧制过程需用的柴草数量颇巨。据《明会典》记载：“每窑一座，

该正附石灰一万六千斤，合烧五尺围芦柴一百七十八束。”^[25]

3 解——石灰的消解工艺

作为基本的建筑材料，石灰未经消解不能用于营造，古代即有用“新灰”营坟失败的案例：“今中人家葬者，用石灰于砖椁内四旁。其灰须筛过，使去火气，方可纳之，久则萦结坚固。向闻一家用新灰实棺外，本以防湿，不知灰近木，兼土气蒸逼内中，遂自焚毁，椁封随堕陷。”^[26]文中“火气”“灰近木”为臆说，不能用新石灰的原因应在新石灰与渗入墓穴的地下水反应后放热并体积膨胀，腐蚀木质棺椁、挤压墓室砖墙和上部封土，造成封土塌陷。

从前引陶弘景的记述可知，“水沃”消解是南北朝时期常见的石灰消解方式。在此过程中，氧化钙（CaO）与水反应生成氢氧化钙〔Ca(OH)₂〕并释放大量的热。至晚到唐代，石灰增加了“风化”的消解方式，即烧成后的石灰在空气中静置一段时间后再使用。唐《龙虎还丹诀》^[27]在“出红银砂子晕方”中有记：“右取煮洗了砂子，作小挺子，以风化石灰纳铁甬中散安，将挺子插於灰中，固济，不固亦得。”^[28]说明古人其时已经注意到了风化消解的石灰与其他石灰有性能差异，因此专门提出“风化石灰”以示区别。此后，许多中医药方中均直接注明“风

① 据考证，此书撰于唐武后垂拱二年至玄宗开元末年间（686—741年），或唐肃宗乾元元年三年间（758—760年）。详见陈国符《道藏经中外丹黄白术材料的整理》，《化学通报》1979年第6期，第78—87页。

化石灰”。至宋《本草图经》，总结了石灰作为中药材因不同消解方式导致的药性差异：

“石灰，生中山川谷，今所在近山处皆有之。此烧青石为灰也，又名石锻。有两种：风化、水化。风化者，取锻了石，置风中自解，此为有力；水化者，以水沃之，则热蒸而解，力差劣。”^[29]显然，中医认为风化石灰更为“有力”，药效比“水沃”石灰要好。

那么，水沃和风吹成粉哪种是古代较多采用的消解方式呢？《天工开物》记：“（石灰）置于风中，久自吹化成粉。急用者以水沃之，亦自解散。”^{[21][97]}据此可知，在空气中静置并逐渐风吹成粉，是石灰当时常规的消解方式，而水沃只是“急用”时才采取的做法。据研究，风吹成粉的石灰虽然短期强度低，但凝结速度快，有利于缩短工期，且后期强度较高^[30]。明时用于营造已经是石灰的主要用途，据此可以推测，风吹成粉就是当时建筑石灰的主要消解工艺（图9）。

清代以后，随着制备抹墙用石灰膏，人们发现用水陈化能极大增强石灰浆的流动性和细腻程度，且石灰膏的保存和使用也极为方便，以水陈化逐渐成为石灰消解的主流工艺，风吹成粉工艺接近失传。

4 方——建筑石灰的配方

在追求“原材料、原工艺”的遗产保护原则下，石灰的配方优化是近年来遗产保护领域研究的热点。建筑石灰在古代的营造活动中，因施用部位和掺和料的变化形成了丰富的配比方案，在历代特别是明清的古籍中可以检出很多配方，其分类可以总结归纳为砌筑、粉刷抹灰、地面铺装和防水防渗勾缝等。古人通常以掺加骨料（砂和粘土等）、加强筋（麻丝、秸秆、稻草、棉花等）、有机质（糯米、桐油等）等获得性能各异的灰土/灰浆。

4.1 砌筑用配方

用于砌筑的石灰，使用时筛去石灰中的石块，与粘土混合形成灰土，或加水形成灰浆。灰土最早用于建筑基础的夯筑，其历史可上溯至商周时期^[31]。到晚到元代，建筑基础已普遍使用三合土夯筑，这得益于石灰、粘土和砂加水混合而成的三合土固化后坚实而不易渗水，且极易就地取材，成本低廉。一项对圆明园大宫门河道遗址

和如园遗址土样的分析表明，其土样化学成分以 SiO_2 和 CaO 为主，含量比例基本符合三合土的规制^[32]。

掺加以糯米为主的有机质是常见的三合土砌筑灰浆形式，如《天工开物》中对三合土的配比记录为：“用以襄墓及贮水池，则灰一分，入河沙、黄土三分，用糯粳米、杨桃藤汁和匀，轻筑坚固，永不隳坏，名曰三和土。”^{[21][97]}这种掺加糯米的灰浆最早见于南北朝时期，对河南邓州发掘的一座南北朝时期砖墓的分析表明，其胶结材料中有淀粉类物质，可能是糯米浆^[33]。唐宋时期一直有以糯米灰土修筑城墙的做法，如南昌发现的唐代城墙和墙基，系贞观十四年（640年）以青砖垒砌、糯米灰浆勾缝^[34]。掺加糯米的三合土配方在清代有官式做法定例，如《大清会典则例》记：“三合土每灰一石，用汁米六升，每米一石，用熬汁柴二十束。”^[35]具体的加工工艺可参见清代李绂的《与兄弟论葬事书》：“开穴后即另着人开锅煮糯粥。每锅俱要米少水多，以便久熬，务令米粒极烂、米汤极稠。其石灰、黄土、石子预先掺好，每五分石灰加三分黄土、二分石子，入糯粥和之，以四齿钉钯钯令极熟。粥汤不可过多，但取调和恰好，坚可成团，是谓三合土。”^[36]直至清晚期为巩固海防，沿海修筑要塞，糯米拌和的三合土仍是重要修筑材料^[37]。

4.2 粉刷用配方

石灰加水经沉淀过滤添加纸筋形成抹灰灰浆，配方繁复，具体可参见刘大可对古建筑抹灰做的系统总结^[38]。

4.3 地面铺装用配方

以石灰、砂、土混合的三合土可夯筑后作为地坪，对地面防潮有更高要求的，则通常采用油灰，即桐油、鱼油调制的石灰。石灰引入所构成的胶结体系能有效防止地下水和地气上涌，同时阻止地面水下渗，这层稳定坚固的灰土所起的隔水和加固作用，确保了古代建筑能够长时间地抵御自然侵蚀。

4.4 防水防渗勾缝用配方

掺加桐油主要用以提升灰浆的防水防渗性能，多用于水利工程和其他需要防水防渗的场所，如墓葬等。北宋《河防通义》^②介绍了修筑堤坝时桐油石灰的配比：“油八十斤，石灰二百四十斤，三斤和油一斤，

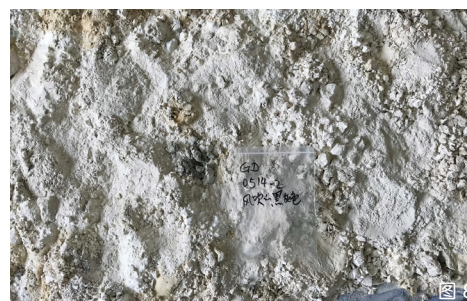


图8 风化石灰表面（图片来源：胡占勇摄影）

为剂固缝使用。”^[39]清代修筑永定河堤坝的记录，也记载了桐油灰浆的配料比例：“拘抿大石堤，每缝宽五分，长一丈，白灰一觔，桐油四两。”^[40]据此可知，清代作为填缝材料时桐油与石灰的比例为1:4，与《河防通义》中所记1:3相差不多。

5 工——建筑石灰的施工工艺

古代营造工程的质量，与材料本身的性能息息相关，也与施工工艺的合理性密不可分。建筑石灰亦不例外，其原材料质量、煅烧时间和温度、消解方式，以及施工工艺，都影响工程的成败。古代建筑石灰的施工工艺种类很多，下文仅就灰土、抹灰和捶灰略做阐发。

5.1 灰土/灰浆

无论灰土还是灰浆，其性能都与施工工艺密切相关，如工艺不合理，材料性能便无从发挥。清代徐瑞对掺加糯米浆的三合土施工工艺评价道：“灰土例不粘米汁，有用汁者，未始不佳，然拍打不匀，工夫不到，虽用米汁无益，且易拆裂。”^[41]

上述引文中强调的“拍打”，应为“打夯”之意。灰土经正确的夯打才能坚固，特别是用于建筑基础时。在清代陵寝工程中，多采用“小夯灰土”作为建筑基础，光绪初年《惠陵工程记略》中载录有《看小夯作法规矩》，对其施工工艺做了详细的记录。仅“早活”（加水浸润之前），就有打墙底、

① 李鸿章《津郡新城竣工折》：“拟参用泰西新法，并以石灰、沙、土三项，加糯米掺和为三合土，锤练夯碾，打成一片，俾可坚固耐久。”见《李鸿章全集》，时代文艺出版社1998年版，第1147页。

② 北宋沈立著有《河防通义》，记述庆历八年（1048年）前河工实施及当时议论，原书早佚。经元沙克什搜检考订，将所得与金都水监的《河防通义》合二为一，成为流传至今的版本。凡北宋事，注明为“汴本”。详见姚汉源《京杭运河史》，中国水利水电出版社1998年版，第643页。

上底半步灰土、纳虚、板口密打拐眼、满打流星拐眼于虚土上、再上底半步灰土、扎需等诸多工序^[42]。

除官式做法外，民间对三合土的施工工艺因地域不同也有不同的做法。以福州为例，在对传统民居中三合土地面调研、检测后总结其施工方法，是先把黄土加入水里搅拌，成黄土膏后渗入熟石灰中，再加入桐油，用锄头反复拍打，直到可以结块为止。室内地面预先挖槽，槽深8—10 cm，放入成块的三合土夯筑平实，根据厚度铺筑二到三次，然后用硬木包铁夯筑至平，最后用木质拍子拍平地面至出油^[43]。

5.2 抹灰

对于不同的抹灰工艺，从基层处理到面层收光，所用到的靠骨灰、麻刀灰、罩面灰等，处理方式各有不同。以靠骨灰为例，分为底层处理（浇水、基层处理、钉麻或压麻）、打底、罩面、赶轧刷浆四道工序^[44]。

古籍中细致的记录可见《园冶》。其《白粉墙》一节记录了一种抹灰改良做法：“历来粉墙，用纸筋石灰，有好事取其光腻，用白蜡磨打者。今用江湖中黄沙，并上好石灰少许打底，再加少许石灰盖面，以麻帚轻擦，自然明亮鉴人。倘有污积，遂可洗去，斯名‘镜面墙’也。”^[45]从材料性能看，这种改良的做法以河砂作为细骨料，比粘土具有更高的强度和更少的干缩性能，所得砂浆粘结性能好，用作墙壁找平和粉刷更优。

5.3 捶灰

“捶灰”是一种传统的灰浆加工工艺，指将熟石灰、细炭灰、麻刀等原材料按配方比例，以传统的人工搅拌、臼窝舂捶等方式制作出石灰改性材料（图9）。

现有研究发现，我国很多古建筑都存在使用捶灰的情况^[46-47]。如乐山大佛就广



图9 工人以传统方法制备捶灰（来源：胡占勇摄影）

泛使用了捶灰：大佛头顶的螺状发髻外层为黑灰色捶灰（由煤炭渣灰、石灰和剥细的麻筋和成），厚度约为5—15 mm；佛耳也不是原岩凿就，而是用木柱作结构，再抹以捶灰装饰；隆起的鼻梁是内以木衬、外饰捶灰而成；大佛头部的横向排水沟以捶灰垒砌修饰^[48]；佛身有些砖块的外表面上也附有捶灰。对样品检测后推测，工匠们首先将石灰、炭灰、麻刀和水按一定比例混合，捶打均匀后分团浸泡在水中待用，然后将捶灰置于佛体表面，用敲打的方式将其捶抹于岩石上，使捶灰紧贴岩石，增加捶灰与岩石的粘结力^[49]。

石灰经过捶打，可以降低其中的空气含量和水分含量，同时减小消石灰的颗粒大小，使其更宜碳化。据李黎等研究，经传统捶灰之后的灰浆，孔隙率较大、收缩变形小、强度适中、水稳定性和抗冻融性较好^[50]。这些特性使捶灰拥有了更好的耐久性，得到大范围的应用。

6 固——石灰的固化特点

无论是作为夯筑材料还是砌筑灰浆，建筑石灰的存在都使建筑更加稳固长久，遮风避雨的功效也得以加强。《天工开物》中即有“成质之后，入水永劫不坏”，以及“轻筑坚固，永不隳坏”^{[21][97]}等略为夸张的描写。

古人虽未能认知石灰的固化机理，但并不妨碍对掺加石灰后所营造的坚固构筑物的感性认知，历代都有记载，下文仅列举数例加以说明。

南宋朱熹在《家礼》中介绍的墓室和棺槨防腐防潮措施“作灰隔”，就是对石灰坚固特性的记录：“穿圻即卑，先布炭末于圻底筑实，厚二三寸，然后布石灰、细沙、黄土拌匀者于其上。灰三分，二者各一可也。筑实厚二三寸，别用薄板为灰隔，如椁之状。……石灰得沙而实，得土而粘，岁久结为金石，蝼蚁盗贼皆不能进也。”^[51]“灰隔”又称“灰椁”，系以三合土或者石灰糯米汁灌注而成，将整个棺槨和墓室包裹成一个坚固密实的整体。“石灰得沙而实，得土而粘”的描述，是工匠的经验积累。明代戚继光在《止止堂集》中也记载了其观察到的前人之修筑：“池际咸甃以砖，又以桐油和灰，坚尚如石。”^[52]清乾隆时期徐州加固

石堤的工程纪闻曰：“原无石工之处，一律增筑，加用米汁石灰，周遭固筑，更无不到之处，徐州安如磐石。”^[53]清徐乾在《洋防说略》中写道：“三合土者，五成石灰、三成泥、二成沙，加糯米汁拌匀，以八寸捣至二寸为度，干坚逾铁，钢弹可抵。”^[54]

据考，建筑遗迹中体现三合土和灰浆坚固特征的实例也很多。前述圆明园储水池即是一例。又如，史书对于五胡乱华时期赫赫连勃勃修建的统万城多有记载，言其城墙“色白而牢固”^[55]，“其坚可以砺刀斧”^[56]；“紧密如石，斲之，皆火出”^[57]；“基如铁石，攻凿不能入”^[58]；等等。统万的白色城墙在毛乌素沙漠中矗立近1600年不倒，证明史书所言非虚。经检测分析，统万城墙夯土的主要成分是石英、粘土和碳酸钙，即沙粒、粘土和石灰所形成的三合土。同类工程又如明代南京城垣，据《凤凰台记事》所载：“筑京城用石灰秫粥锢其外，上时出阅视，监掌者以丈尺分治。上任意指一处视皆纯白色，或稍杂泥壤即筑，筑者于垣中斯金汤之固也。”^[59]朱元璋对工程质量多次进行检查，所见夯土皆呈纯白色固然夸张，但夯土内掺加石灰应确凿无疑。同时期修建的明中都，也采用了类似的糯米灰浆，虽历经数百年，仍坚硬如铁（图10）。

7 结论

7.1 结论

综上所述，“石、煅、解、方、工、固”六艺构成了中国古代建筑石灰研究的主体框架。坚“固”与耐久是所有研究工作及传承的目的，其前提是科学地诠释石灰“固”化的机理。石灰的类型首先取决于母岩“石”，“煅”烧采用的燃料、时间、温度等决定了烧制的石灰是否能为建造所用。古代采用的风化、水沃等消“解”方法决定了石灰的硬化过程及最终强度，消解得到的消石灰可以通过配“方”优化满足不同的性能要求。“工”法为了达到耐久坚固的目标常常需要经验及科学的对比实验。

建筑石灰的六艺，或称“灰作六艺”，可以系统地总结建筑石灰在中国古代的应用，也可以在学界日益重视传统工艺和材料的大环境下，为建筑石灰在遗产保护领域的“复兴”提供史鉴和思路。

7.2 建议

传统材料→传统工艺→传统形制→文化艺术历史价值, 建筑材料在这个传导链条上居于基础位置, 如果传统材料不可复得, 即使抛开工程质量不论, 建立于其上的营造逻辑的原真性也会受到质疑。对传统建筑石灰进行系统研究的现实意义正基于此。

然而在强调环境保护的当今, 采用传统工法生产传统材料所造成的污染, 是材料产地的属地政府最不愿看到的。这事实上构成了传统材料生产最大的政策性难题。破局的思路, 来自管理部门对保护技术和保护原则的深刻认识, 能否突破政策和管理限制, 实现传统材料生产技术的复原和小批量的生产。从实施途径上, 沿重点文保区域设立传统石灰源产地保护区和将灰作列入非物质文化遗产, 是值得努力的尝试。

7.3 展望

“灰作六艺”仅仅是古代建筑石灰应用研究的阶段性总结, 仍有大量的研究工作有待开展。如不同历史地域石灰石产出石灰的差异, 蛎壳石灰水硬特征, 传统灰浆配比和制备工艺对复合体性能的影响, 等等。原始石灰窑的煅烧工艺、风吹成粉工艺的复原和风吹石灰的性能亦需继续考察和深入探讨。建筑石灰在古代营造中的应用, 以及对当下建筑遗产保护的适应性研究都还处于起步阶段, 但随着研究的深入, 石灰必将能在传统建筑文化与技艺的传承中发挥越来越重要的作用。

参考文献

[1] 容志毅. 中国古代石灰的煅烧及应用论略[J]. 自然科学史研究, 2011(1): 45-54.
[2] 杨丙雨, 冯玉怀. 石灰史料初探[J]. 化工矿产地质, 1998(1): 55-60.
[3] 裴学松. 史前白灰面初步研究[J]. 文物春秋, 2017(3): 3-11.
[4] 曾余瑶, 张秉坚, 梁晓林等. 中国古代建筑泥灰中天然生物大分子的作用机理探讨[C]. 中国文物保护技术协会第五次学术年会论文集, 2007: 250.
[5] 杨华山, 车玉君, 马小满. 中国传统糯米-石灰砂浆的原材和结构[J]. 混凝土, 2015(1): 131-135, 139.
[6] 魏国峰, 方世强, 李祖光. 桐油灰浆材料的物理性能与显微结构[J]. 建筑材料学报, 2013(3): 469-474.
[7] 张坤, 张秉坚, 方世强. 中国传统血料灰浆的应用历史和科学性[J]. 文物保护与考古科学, 2013(2): 94-102.

[8] 张坤, 方世强, 张秉坚. 中国传统蛋清灰浆的应用历史和科学性[J]. 中国科学, 2015(6): 635-642.
[9] 方世强, 杨涛, 张秉坚. 中国传统糖水灰浆和蛋清灰浆科学性研究[J]. 中国科学, 2015(8): 865-873.
[10] 李振. 石灰加固黄土水分与击实性的研究[J]. 甘肃科技, 2017(11): 55-57.
[11] 杨海军, 刘平, 孙博, 等. 晋阳古城遗址加固材料筛选及配比试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017(19): 24-34.
[12] 戴仕炳, 李宏松. 平遥城墙夯土面层病害及其保护实验研究[J]. 建筑遗产, 2016(1): 122-129.
[13] 王逢春, 王捷, 何真. 古代岩土质砌筑文物胶凝材料劣化分析[J]. 四川文物, 2017(4): 90-97.
[14] 王贇, 张波, 张科强, 等. 陕南地区农村传统民居生土墙体材料改性研究[J]. 中国胶黏剂, 2014(1): 27-29.
[15] 王伟林, 张鹏程, 袁明. 陕西白水水下河遗址大型房址的几个问题[J]. 考古, 2012(1): 54-62. 1.
[16] 西北大学文化遗产与考古学研究中心, 陕西省考古研究所. 旬邑下魏洛[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 473, 477, 496.
[17] 张华. 博物志[M]. 王根林. 等, 校点. 上海: 上海古籍出版社, 2012: 23.
[18] 陶弘景. 本草经集注: 辑校本[M]. 尚志钧, 尚元胜, 辑校. 北京: 人民卫生出版社, 1994: 180.
[19] 郑玄, 贾公彦. 周礼注疏: 卷16[M]. 上海: 上海古籍出版社, 1990: 863.
[20] 吴浩. 十三经义疑[M]// 纪昀, 等. 景印文渊阁四库全书: 191册. 台湾: 台湾商务印书馆, 1986: 57.
[21] 宋应星. 天工开物[M]. 上海: 商务印书馆, 1933: 197.
[22] 李辉. 河南巩义窑址发现古代石灰窑和各类瓷器遗物[N]. 中国文物报, 2016-08-26(8).
[23] 戴仕炳, 钟燕, 胡占勇. 灰作十问: 建筑遗产保护石灰技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2016: 26.
[24] 陈尚隆, 陈树谷. 陈墓镇志[M]// 中国地方志集成·乡镇志专辑6. 南京: 江苏古籍出版社, 1992: 298.
[25] 李东阳, 等. 大明会典: 第5册[M]. 扬州: 广陵书社, 2007: 2591.
[26] 叶权, 王临亨, 李中馥. 贤博编 粤剑编 原李耳载[M]. 北京: 中华书局, 1987: 23.
[27] 陈国符. 道藏经中外丹黄白术材料的整理[J]. 化学通报, 1979(6): 78-87.
[28] 金陵子. 龙虎还丹诀[M]. 影印. 上海: 涵芬楼, 1924: 90.
[29] 苏頌. 本草图经[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1984: 58.
[30] 戴仕炳, 钟燕, 胡占勇, 等. 明《天工开物》之“风吹成粉”工法初步研究[J]. 文物保护与考古科学, 2018(1): 106-113.
[31] 刘效彬, 杨树刚, 张秉坚. 郑州商城遗址出土夯土材料的分析研究[J]. 文物保护与考古科学, 2016(4): 106-112.
[32] 杨菊, 刘乃涛. 圆明园大宫门河道遗址和如园遗址土样初步分析[J]. 文博, 2015(3): 104-109.
[33] 河南省文化局文物工作队. 邓县彩色画像砖墓[M]. 北京: 文物出版社, 1958.
[34] 彭凡适, 唐昌林. 再论古代南昌城的变迁与发展[J]. 南方文物, 1995(4): 86-98.
[35] 大清会典则例: 卷132[M]. 纪昀, 等. 文渊阁四库全书内府写本. 京都: 内府[1781] (清乾隆四十六年)



图10 明中都城墙双缝(图片来源:戴仕炳摄影)

[36] 李绂. 穆堂类稿: 别稿卷35[M]. 刻本, 奉国堂: 1831(清道光十一年).
[37] 李鸿章. 李鸿章全集[M]. 时代文艺出版社. 1998(7): 1147.
[38] 刘大可. 古建筑抹灰[J]. 古建园林技术, 1988(2): 7-14.
[39] 姚汉源. 京杭运河史[M]. 北京: 中国水利水电出版社. 1998(12): 643.
[40] 陈琮. 永定河志: 卷5[M]// 内府抄本. 京都: 内府, 1789(清乾隆五十四年).
[41] 徐瑞. 安澜纪要: 卷上[M]. 刻本. 德清: 诒安堂, 1829(清道光乙丑年).
[42] 王其亨. 清代陵寝建筑工程小夯灰土做法[J]. 故宫博物院院刊, 1993(10): 48-51.
[43] 罗景烈. 福州传统民居地面工程做法研究[J]. 福建建材, 2017(1): 78-80.
[44] 刘大可. 古建筑抹灰[J]. 古建园林技术, 1988(2): 7-14.
[45] 陈植. 园冶注释[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 186.
[46] 任祥道. 七曲山风景区大庙古建筑保护研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006: 71-80.
[47] 黄石林. 四川江油窦圉山云岩寺飞天藏[J]. 文物, 1991(4): 20-33, 100-101.
[48] 魏奕雄. 乐山大佛探微[N]. 中国民族报, 2004-11-23(3).
[49] 袁金泉. 乐山大佛的研究与保护[J]. 四川文物, 2005(1): 90-95.
[50] 李黎, 赵林毅, 李最雄. 中国古建筑中几种石灰类材料的物理力学特性研究[J]. 文物保护与考古科学, 2014(3): 74-84.
[51] 朱熹. 家礼[M]// 纪昀, 等. 影印文渊阁四库全书: 142册. 台北: 台湾商务印书馆, 1983: 557.
[52] 远文如. 遵化文史资料大全: 下[M]. [出版地不详]: [出版者不详], 2013: 296.
[53] 康基田. 河渠纪闻: 卷23[M]. 刻本. 霞荫堂: 1804(清嘉庆九年).
[54] 徐家干. 洋防说略[M]. 刻本. 1887(清光绪十三年).
[55] 李吉甫. 元和郡县图志: 第1册[M]. 北京: 中华书局, 1983: 100.
[56] 李延寿. 北史: 第10册[M]. 上海: 上海古籍出版社, 1974: 3066.
[57] 沈括. 新校正梦溪笔谈[M]. 胡道静, 校注. 北京: 中华书局, 1957: 121.
[58] 王钦若, 等. 册府元龟: 第6册[M]. 北京: 中华书局, 1960: 5200.
[59] 马生龙. 凤凰台记事[M]. 北京: 中华书局, 1985: 2.

Synopsis

Lime is an important traditional building material which has been used in foundation, ground, wall, roofing and decoration for a long time. After Portland cement was introduced into China and widely used, lime was no longer used as the main binder and was basically used as admixture, and finally lost the leading role as a major building material in the 1970s. However, in recent years, with the continuous development of architectural heritage conservation theory and the deepening of practice, various types of programmatic documents are emphasising the application of traditional materials in protection, especially with the gradually appearing negative effects of cement in the protection and repair of architectural heritage. As a result, the application of traditional materials gains attention again. Lime is a traditional building material, and its strength characteristics and other properties meet the requirements of architectural heritage protection. Lime began to become an important functional material for the protection of heritage buildings.

The existing research on the application of traditional building lime in China has been mainly focused on history, the scientific improvement of traditional mortar, and its application to conservation engineering. Although a number of achievements have been made in the research on traditional building lime, there are still some deficiencies, such as the fragmentation of research and the lack of a framework. In particular, there is still a big gap in the study of the application of lime through historical documents. Although a preliminary knowledge of the production and construction techniques of traditional building lime can be gained from some ancient books, there is still a lack of adequate interpretation of its scientific significance. Some studies even mislead the direction of inheritance by taking historical data out of context. Under the support of modern scientific research achievements, based on textual research, analysis and induction of historical documents, targeted on curing application, this paper tries to analyse traditional lime work and its existing problems. The paper selected six aspects of traditional lime work: raw materials of lime (stone or *shi*), calcine methods (*duan*), slaking processes (*jie*), formula design (*fang*), construction process (*gong*) and curing characteristics (*gu*). Then a research framework entitled 'six aspects of lime work' could be established based on these six aspects.

Historically, there were two kinds of raw materials used for calcining lime: limestone and oyster shells. It is speculated from the treatment

of raw materials by ancient people that civil lime fired with limestone may have certain characteristics of hydraulicity due to the absence of selection and cleaning for raw materials. The production of lime organised by the government, especially lime fired during the Ming and Qing dynasties for the construction of imperial mausoleums, may be pure air lime due to the selection of raw materials. The calcining process of lime is a technology that the ancient Chinese had mastered in prehistoric times, but this technology did not undergo significant upgrading in more than 3,000 years, only the fuel changed from firewood to coal in the Ming and Qing dynasties. In ancient China, there were two ways to slake lime, namely 'wind-blowing' and 'water-immersing', for a long time. By the Qing Dynasty, water-immersing became the main way to prepare limestone paste, and the wind-blowing technology was almost lost. Many formulas have been discovered in ancient documents especially in those written in the Ming and Qing dynasties. These formulas can be classified into masonry, stuccoing, paving and waterproofing. Ancient people usually mixed aggregates (sand and clay, etc.), reinforcement bars (hemp silk, straw, cotton, etc.) and organic matters (glutinous rice, tung oil, etc.) to obtain lime/mortar of different properties. The quality of ancient construction projects is closely related to the performance of materials and the rationality of construction techniques. There is no exception for building lime. The quality of raw materials, calcination time and temperature, slaking method and construction process all affect the success or failure of a project. The 'solid' of lime is the endpoint of a series of processes starting from the collection of raw materials, which is also the mission of lime mortar. Current research on the curing mechanism of lime materials should not be limited to the curing process itself. It should be recognised that the rigidity of mortar comes from the correct treatment of all processes, and it is the cooperation of all elements that leads to the result.

'six aspects of lime work' can systematically summarise the application of building lime in ancient China, and provide historical reference and ideas for the 'revival' of building lime in the field of heritage conservation in the circumstance that gradually more attention are paid to traditional techniques and materials.

In the chain of traditional materials, traditional crafts, traditional forms, and cultural and artistic historical values, construction materials occupy a fundamental position. If traditional materials cannot be recovered, even without regard to engineering quality, the 'authenticity' of the construction logic based on them will be questioned. The

practical significance of systematic research on traditional building lime is also based on this.

Nowadays, environmental protection is emphasised, the pollution caused by traditional production methods is the last thing the local government of the material producing area wants to see. This actually constitutes the biggest policy problem in the production of traditional materials. The idea of breaking the situation comes from the deep understanding of protection technology and protection principles by the administration, the breaking of restrictions in policy and management, so that the recovery of traditional material production technology and production in small amounts can be realised. As to the way of implementation, it is worth trying to establish 'traditional lime source protection area' along the key cultural relics protection area and to list 'lime work' as intangible cultural heritage.

The 'six aspects of lime work' is only an interim summary of the application research of traditional building lime, and there are still a lot of research work needs to be carried out, such as the difference of limestone outputs in different historical areas, the hydraulicity of limestone made from oyster shells, the influence of traditional mortar proportion and preparation technology on the properties of the complex, etc. The calcining process of the primitive lime kiln, the recovery of the 'wind-blowing' process and the performance of wind-blowing lime also need further investigation and in-depth discussion. The application of building lime in ancient constructions and its adaptability to the protection of architectural heritage are still in the starting stage. Nevertheless with the deepening of research, lime will play an increasingly important role in the inheritance of traditional architectural culture and skills.

作者简介: 李晓, 同济大学建筑与城市规划学院(上海200092)博士研究生
戴仕炳, 同济大学建筑与城市规划学院(上海200092)教授
朱晓敏, 同济大学建筑与城市规划学院(上海200092)博士研究生

收稿日期: 2018-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(51738008)

Biography: Li Xiao, PhD Candidate at the College of Architecture and Urban Planning, Tongji University (Shanghai 200092)
Dai Shibing, Professor at the College of Architecture and Urban Planning, Tongji University (Shanghai 200092)
Zhu Xiaomin, PhD Candidate at the College of Architecture and Urban Planning, Tongji University (Shanghai 200092)

Received date: 20 May, 2018

Fund supported by: National Natural Science Foundation (51738008)