

以糯米灰浆为代表的传统灰浆——中国古代的重大发明之一

杨富巍, 张秉坚*, 潘昌初, 曾余瑶

浙江大学化学系文物保护材料实验室, 杭州 310027

* E-mail: zbj@mail.hz.zj.cn

收稿日期: 2007-12-31; 接受日期: 2008-08-18

国家自然科学基金项目(批准号: 20671080)和国家科技支撑计划项目(批准号: 2006BAK30B02)资助

摘要 概述了古代石灰基胶凝材料的发展历程, 通过大量史料考证了糯米灰浆三合土(简称糯米灰浆)在中国古代建筑史上的重要作用和历史地位, 证明在无机材料中添加有机材料是中国古代建筑胶凝材料重要进展的鲜明特点. 由于在粘接强度、韧性和防渗性等方面的优良性能, 以糯米灰浆为代表的传统灰浆是当时世界的一项重要技术成果. 同时, 介绍了运用现代科技手段研究糯米灰浆的初步成果, 发现石灰浆中的糯米成分具有生物矿化过程中有机模板的类似作用, 影响了石灰浆固化时碳酸钙结晶体的微结构, 同时糯米浆和碳酸钙之间存在无机/有机物的相互填充和协同作用. 糯米灰浆是中国古代建筑史上的重大发明之一. 开展相关研究对于挖掘中国古代重大发明的价值, 以及科学利用传统技术为古建筑的修复和保护服务都具有重要意义.

关键词

古代发明
糯米浆
石灰
生物矿化

1 石灰基建筑胶凝材料的历史

在土木工程中, 把能将散粒状材料(如砂和石子)或块状材料(如砖块和石块)粘结成整体的材料, 统称为胶凝材料^[1], 包括石灰、石膏、橡胶和沥青等. 其中, 以石灰为主要胶结成分的胶凝材料——石灰基胶凝材料的应用最为广泛, 在人类建筑史上的作用也最为重要.

中国使用石灰及石灰基胶凝材料的历史很悠久. 考古学的证据表明, 史前时期我国就有石灰的烧制和使用^[2-4]. 西周(公元前 1046~771 年)中晚期的建筑遗址中, 发现石灰已经广泛用于柱基处理、增强地基、屋顶面处理等^[4]. 东周时期已经使用石灰修筑陵墓. 据《左传》记载: “成公二年(公元前 635 年)八月宋文公卒, 始厚葬用蜃灰”^[5]. 蜃灰就是用蛤壳烧制

而成的石灰. 秦汉以后, 石灰材料的使用更为广泛. 秦(公元前 221~206 年)咸阳宫殿遗址的地面是用猪血、石灰、料姜石拌合抹成, 呈暗红色, 表面光滑美观, 具有防潮装饰作用^[6]. 秦修驰(直)道时, 多是就地取材, 利用当地的黄粘土加石灰夯筑而成^[7]. 汉代(公元前 206~公元 8 年)以后的墓葬中也多有石灰使用. 石灰或用作壁画地仗层^[8-10], 或用作墓室四壁罩白^[11], 或用于墓门密封^[12], 或用作棺底的灰衬^[13]. 值得一提的是, 我国至少在西汉早期就已经使用类似于后世称为“三合土”(石灰、黄土和沙子)的石灰混合材料了^[8]. 东晋十六国时期(公元 317~420 年), 北燕用“三合土”构筑墓葬^[14], 大夏用“三合土”修筑其都城“统万城”^[15]. 北宋科学家沈括在亲自踏勘统万城之后, 在《梦溪笔谈》中写道: “赫连城紧密如石”^[16]. 《中国

通史参考资料》记载:“其坚可以砺刀斧”^[17], 足见“三合土”胶凝材料之坚固。

至少不晚于南北朝时期(公元 386~589 年)^[18], 以糯米灰浆为代表的中国传统灰浆已经成为比较成熟的技术。成书于明朝的《天工开物》对糯米灰浆的组成、制作方法和性能都有详细记载:“灰一分入河砂, 黄土二分, 用糯米、羊桃藤汁和匀, 经筑坚固, 永不隳坏, 名曰三合土”^[19]。这种加入糯米汁的三合土, 即糯米灰浆, 有强度大、韧性好、防渗性能好等优点^[20], 它的出现使建筑胶凝材料的粘结性有了质的飞跃, 代表了我国古代石灰基粘合剂的最高成就。后世对糯米灰浆的评价很高。宋代江修复在《邻几杂志》说它“其坚如石”^[21]。李绪生等认为糯米石灰浆的使用, “使建筑的稳固性有了历史性的突破”^[22]。经现代分析技术检测, 糯米灰浆粘结性能优良, 堪比现代水泥^[23,24]。除糯米浆外, 植物汁液, 如杨桃藤汁、蓼叶汁和白芨浆等, 蛋清和动物血等在建筑灰浆中也有使用^[19]; 另外用桐油或鱼油拌合石灰制作的油灰在建筑物、木结构和船舶等方面也有十分广泛的应用和悠久的历史^[19]。鉴于篇幅, 这些材料的特色和科学作用将另文探讨。

从世界范围看, 欧洲人使用石灰基胶凝材料的历史也很悠久。古希腊时期(公元前 330~公元 30 年)人们使用由石灰石煅烧制的石灰作为建筑灰浆。古罗马时期(公元前 27~公元 476 年)人们曾使用石灰与砂子的混合灰浆^[25]以及石灰和石膏的混合物^[26]砌筑建筑物。古罗马人还对“石灰-砂子”的二组分胶凝材料进行过工艺改进, 他们在石灰砂浆中掺入磨细的火山灰; 在没有火山灰的地区掺入磨细的碎砖、碎瓷片等^[27~29]。罗马人使用的三组分砂浆在强度和耐水性方面较石灰-砂子的二组分砂浆有很大改善, 用其砌筑的建筑物比较耐久。后世有人将“石灰-火山灰-砂子”三组分砂浆称为“罗马砂浆”^[30]。“罗马砂浆”的性能和我国的“三合土”大体相仿。在水泥出现以前, 罗马砂浆是欧洲石灰基灰浆的最高成就。

显然, 欧洲古代使用的建筑灰浆全是无机材料, 而添加了糯米汁、杨桃藤汁或桐油的中国传统灰浆则明显是一种有机/无机复合材料。以糯米灰浆为代表的中国传统灰浆在粘接性、韧性和防渗性等方面明显好于纯无机灰浆。在建筑胶凝材料的发展过程中, 中

国由于糯米灰浆等有机/无机复合胶凝材料的发明而比西方技高一筹。对于此类发明, 英国著名科学家史学家李约瑟给予了高度评价。他在《中国科学技术史》一书中写道:“在公元 3 世纪到 13 世纪之间, 中国保持着西方国家所望尘莫及的科学知识水平”; “中国的那些发明和发现远远超过同时代的欧洲, 特别是在 15 世纪之前更是如此”^[31]。在无机胶凝材料中添加有机材料是中国古代建筑胶凝材料发展中一个鲜明的特点, 具有里程碑的意义, 这应该是当时中国人的一项重大发明。

2 糯米灰浆在中国古代建筑史上的作用

糯米灰浆强度大, 韧性强, 防渗性能好^[20], 因而在我国古代建筑中有着广泛的使用, 在中国建筑史上发挥了重要的作用。从考古结果来看, 糯米灰浆在古代主要用于三个方面, 即: 墓葬、城建和水利工程等重要设施。用于墓葬最早可见于南北朝时期。河南省邓县有一座南北朝的砖墓^[18], 其胶结材料中就使用了糯米淀粉类物质。宋、元、明、清的墓葬也广泛采用了糯米灰浆等浇筑而成的墓室^[32~37], 这种墓室被称为“灰隔”结构, 其墓室材料粘性大, 不透气, 且“其坚如石”^[21]。如南京明代徐埔夫妇墓系用糯米灰浆浇筑, 坚固异常, 1978 年发掘时推土机也无可奈何, 还搞坏了不少钢钎、铁锹^[24]。糯米灰浆还用于修筑城墙和寺庙建筑等。始建于隋开皇年间, 重修于宋建炎二年的台州国清寺塔, 使用糯米灰浆为砌筑砂浆, 异常坚固^[38]。唐代开元寺石经幢的粘接材料也是糯米灰浆^[22]。建于唐宋的泉州古塔、寺、桥的抗震性能好, 能抵御 1604 年的 7.5 级大地震, 这和使用糯米灰浆做粘合剂是分不开的^[23]。湖北当阳玉泉铁塔, 北宋嘉佑 6 年(公元 1061 年)铸造, 塔基底部青石板之间用糯米灰浆封实^[39]。河南登封少林寺墓塔群中的几座宋塔、明塔, 对其砌筑的胶泥标本通过“碘-淀粉”试验, 也发现沉淀物中有糯米淀粉存在^[40]。始建于元代至大年间的上海嘉定法华塔, 其地基砖用糯米浆白灰泥勾缝^[41]。最让人称奇的是重庆荣昌县包河镇的一座清代石塔。该塔已有 300 余年, 高 10 m, 倾斜度达 45°, 却至今未倒塌。该塔也是采用了糯米灰浆为粘合材料, 这种糯米灰浆粘结材料的韧性竟比现代水泥还要好^[42]。20 世纪 20 年代和 80 年代, 考古专家在南昌市区

发现大段唐代城墙和一段唐代城墙墙基,经考证发现该遗址建于唐太宗贞观十四年(公元640年),城墙用青砖垒砌,以糯米石灰勾缝^[43]。宋代海洲(今连云港)的城墙用加了铁渣的糯米灰浆勾缝,至今依然坚固^[44]。明南京城用糯米汁石灰浆砌筑墙身^[45]。明代商丘归德府古城城门也是用糯米灰浆砌筑,至今基本完好^[46]。湖北明代荆州糯米浆城墙已有500年历史,城池构筑十分坚固,易守难攻,至今仍然如“混凝土般坚不可摧”,因而有“铁打荆州”之说^[47]。此外,由于有防水作用,糯米三合土还用于兴修水利。明祖陵邵公堤和城墙系用糯米灰浆砌筑,虽在水下浸泡300多年仍然牢固,一点没疏松,要十几个小伙子动用几种工具才能撬开^[48]。修筑于清代的浙江余杭鱼鳞大石塘,抵御海浪侵蚀,至今300余年,依然坚固^[49]。北京卢沟桥南北两岸,用糯米灰浆建筑河堤数里,使北京南郊从此免去水患之害^[50]。糯米灰浆还被用来砌筑石桥,此类现存的古石桥有江苏的南宋本善桥^[51]、武汉元代南桥^[52]、陕西三元古龙桥^[53]、云南护国桥^[54]等。直到近代,糯米灰浆还有使用,如开平碉楼^[55]、闽西南部土围楼等^[56]。

以糯米灰浆为代表的传统灰浆是中国乃至世界古代石灰基建筑胶凝材料史上的杰作,它的出现,成就了中国古代建筑的辉煌,显示了古代中国人高超的智慧和技艺。从这个意义上来讲,它完全可以称得上是中国古代的重大发明之一。但是,可惜得很,糯米灰浆这一古代重要发明远没有得到应有的重视。谈到古代建筑,我们津津乐道的往往是秦砖汉瓦、榫卯结构,雕梁画栋等等,而对糯米灰浆这一重要发明却很少提及。很难想象,没有性能良好的建筑胶凝材料,我们引以为荣的许多砖石结构的古建筑是否能存留到今天。漠视这一重要发明,偏信现代化学胶凝材料对于古建筑和历史街区的保护和修复也是不利的。

3 糯米灰浆科学性的现代科学研究

糯米灰浆,这一发明于至少1500年前(从南北朝算起)的建筑胶凝材料,因其优异的性能——耐久性好、自身强度和粘接强度高、韧性强、防渗性好等,而在中国古代广为使用。作为建筑胶凝材料,它的优良性能也引起了国内科学工作者的注意,先后有台湾“国立成功大学”和浙江大学等科研单位对糯米灰浆

进行了分析和研究。

台湾省“国立成功大学”陈俊良对河南登封少林寺墓塔群中的几座宋塔、明塔砌筑的胶泥标本进行“碘-淀粉”试验,发现沉淀物中有糯米淀粉存在^[40]。浙江大学文物保护材料实验室用热重和红外光谱等方法分析了西安明代城墙、南京明代城墙、绍兴清代牌坊等处砌缝中的灰浆样品,发现其中都有糯米成分^[57,58]。这些分析结果和古代营造典籍的记载一致。

西安明城墙灰浆样品的FT-IR分析结果见图1。作为参照,同时也对纯糯米和纯碳酸钙粉末进行了分析。曲线图上,波数为1000~1100 cm⁻¹的吸收带应为糯米存在证据;波数在712, 876, 1429, 1794以及2513 cm⁻¹的吸收峰归结为方解石的特征峰吸收峰。通过谱图对比可知,西安明城墙灰浆样品中的无机物为方解石,有机物为糯米成分。

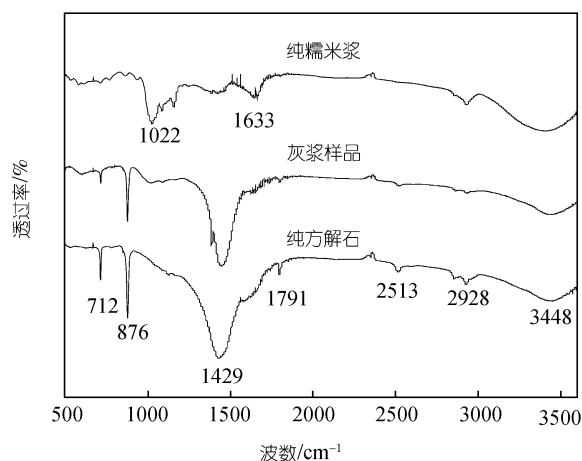


图1 西安明代城墙遗址灰浆样品傅立叶红外(FT-IR)曲线^[58]

西安明城墙灰浆样品的TGA-DSC分析结果见图2。从图中TGA线可以看出,样品在200~600℃失重10%左右,在630~800℃失重30%左右。同时,DSC线在380℃有一个放热峰,在760℃有一个吸热峰。760℃的吸热峰为碳酸钙的分解峰,结合FT-IR分析,380℃的放热峰应该是有机物氧化分解的放热峰,据此可认定灰浆样品中确实含有有机物。

糯米的主要成分为支链淀粉。碘与淀粉的显色反应非常灵敏,直链淀粉遇碘形成蓝色的络合物,而支链淀粉遇碘呈紫红色。西安明城墙灰浆样品的碘-淀粉实验结果显紫红色(见图3),因此可以确认西安

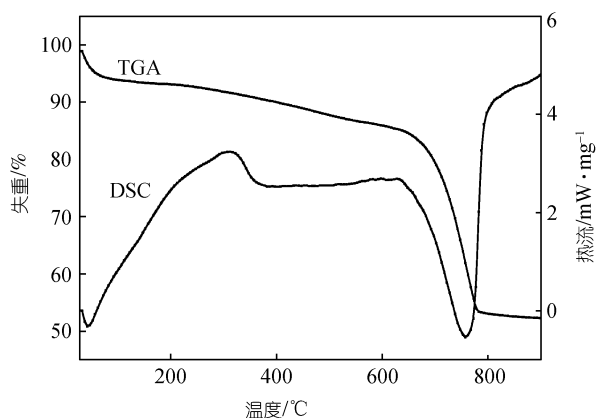


图2 西安明代城墙灰浆样品热失重(DSC-TGA)曲线^[58]

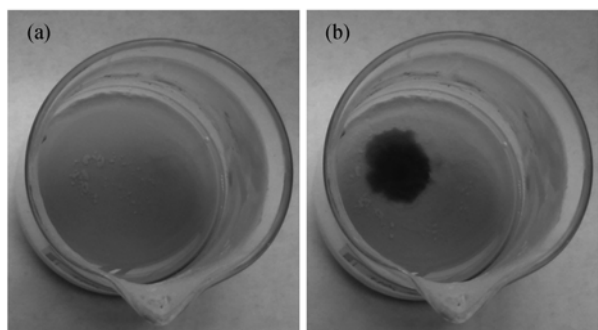


图3 西安明代城墙灰浆样品碘-淀粉实验^[58]

(a) 实验前; (b) 实验后

明城墙灰浆中的有机物是还没有完全降解的糯米支链淀粉成分。类似地, 南京明代城墙、绍兴清代牌坊等处的灰浆样品的检测结果也大体相同。

但是, 灰浆中掺入的糯米浆——这种易于腐败的天然多糖类物质为什么历经千百年而不腐呢? 研究表明, 这和糯米灰浆的制造和固化过程有关。在糯米灰浆的制作过程中, 石灰发生了下述化学变化:



反应(1)是生石灰与水的消解反应, 生成消石灰, 即 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 同时放出大量的热。研究表明, 生石灰消解过程会产生活性氧, 而活性氧对细菌有极强的杀灭作用^[59]。

反应(2)是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的电离反应。该反应产生了两种离子: Ca^{2+} 和 OH^- 。研究已经证实, 强的碱性环境能抑制和杀灭细菌, 其作用机理在于强碱能溶蚀细菌的细胞膜^[60]。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液的pH值在 12.4 左右,

几乎没有细菌能在如此强的碱性环境下生存。

在糯米灰浆的固化过程中, 消石灰发生了下述化学变化:



在该反应中, 消石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$)和空气中的二氧化碳(CO_2)反应生成方解石晶型的碳酸钙(CaCO_3)。随着反应(3)的进行, 生成的碳酸钙越来越多, 糯米灰浆逐渐固化, 强度也越来越大, 直到 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 完全转化为碳酸钙为止。在糯米灰浆内部, CO_2 的渗入量受到限制, 完全固化是一个长期过程, 在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 全部转化为 CaCO_3 之前, 反应(2)一直存在, 它维持了抑制细菌滋生所需的强碱性环境。腐生细菌难以滋生是糯米灰浆中的糯米成分得以保存的主要原因。由此看来, 糯米灰浆巧妙地利用了石灰的防腐作用。

进一步的研究表明, 糯米等有机成分和石灰是传统灰浆中的关键组分, 它们对于灰浆粘接强度的提高起到了主要作用; 而对于糯米成分来讲, 土和砂子是惰性组分, 它们基本上只起填料的作用^[61]。

那么, 糯米浆加入石灰浆中有什么科学意义呢? 比较一下糯米浆加入石灰浆之后形成的糯米灰浆的性能或许就可以找到答案。浙江大学文物保护材料实验室在研究石质文物的生物矿化保护材料时发现^[61-63]。石灰中加入3%的糯米浆以后, 它的抗压强度提高了30倍, 表面硬度提高了2.5倍, 耐水浸泡性大于68天以上。进一步的研究发现, 糯米浆加入之后灰浆的性能之所以提高, 是因为糯米浆至少有如下两个科学作用。

1) 糯米浆对石灰的碳酸化反应, 即反应(3)有调控作用^[61]。前面已经提到, 糯米是一种多糖, 现代科学研究表明, 生物多糖类物质往往可以作为生物矿化过程的模板剂, 约束和调控无机物离子在结晶过程中形成的结晶颗粒的大小、形貌和结构。例如: 杨林等发现^[64], 在葡聚糖作为模板参与的碳酸钙矿化过程中生成了菜叶状的文石型碳酸钙晶体, 而没有葡聚糖参与时生成的则是多层重叠的块状方解石晶体; 张秀英等^[65]研究了 β -环糊精作为模板剂的矿化体系, 发现生成的碳酸钙也是文石型的晶体, 不过形貌为奇特的鹿角状; 丁唯嘉等^[66]研究了以羧甲基淀粉、醚化淀粉、磷酸酯淀粉作为模板剂的碳酸钙晶体的矿化过程, 发现羧甲基淀粉使生成的碳酸钙呈多

孔蜂窝状的文石型晶体, 醚化淀粉和磷酸酯淀粉则使生成的碳酸钙呈球形的球霏石晶体. 浙江大学文物保护材料实验室^[57]直接研究了糯米浆作为碳酸钙矿化过程的模板剂的调控作用, 发现在糯米浆的参与下, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 矿化反应生成的碳酸钙是纳米尺度的方解石晶型的细小颗粒, 比不加糯米浆的结果要细小和致密得多(见图 4), 这种细密结构正是前面所述的糯米灰浆抗压强度和表面硬度会大大提高的微观解释.

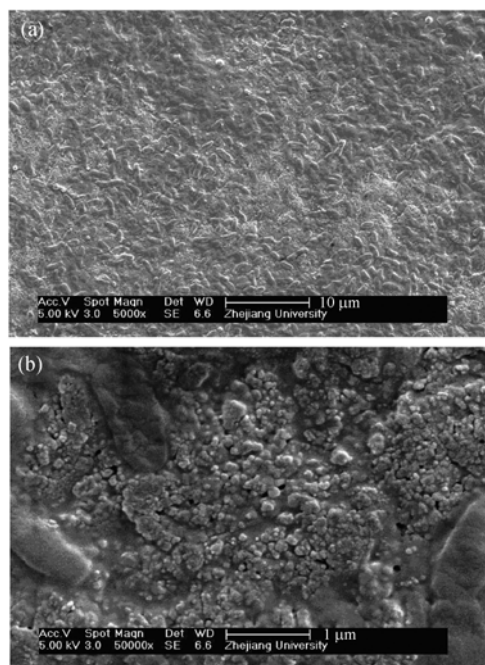


图 4 糯米灰浆样品的SEM照片
(3%糯米浆溶液: 0.01 M氢氧化钙=1:1)^[61]
(a) 放大 5000 倍; (b) 放大 50000 倍

2) 糯米浆和生成的碳酸钙颗粒之间有协同作用. 浙江大学在对灰浆取样和仿制灰浆分析后发现^[57,61], 在固化的糯米灰浆中, 糯米浆成分和碳酸钙颗粒分布均匀, 它们之间互相包裹, 填充密实(见图 4), 形成了有机/无机协同作用的复合结构, 这种结构使得糯

米灰浆具有较好韧性和强度. 类似的, 更典型的有机/无机复合结构常见于骨骼、牙齿和贝壳等生物矿化物之中^[67]. 在人和动物的骨骼和牙齿中, 胶原蛋白和羟基磷灰石就是以复合结构方式结合的^[68]; 软体动物的贝壳也是由多糖、蛋白质等有机物和碳酸钙组成的复合物构成^[69], 并由此表现出优异的力学强度和韧性.

综上所述, 我们有理由相信, 在一定程度上, 糯米浆参与的生石灰灰浆的硬化过程实际上就是天然生物多糖(糯米浆)参与的碳酸钙的生物矿化过程. 在此过程中, 糯米浆既起到了调控碳酸钙结晶过程和微结构的作用, 同时还与生成的碳酸钙紧密结合, 形成了有机物/无机物相互搭配、密实填充的复合结构, 这应该就是糯米灰浆强度大、韧性强等优良力学性能的微观基础.

4 结论

从历史文献和考古证据来看, 出现于至少 1500 年以前(从南北朝算起)的以糯米灰浆为代表的中国传统灰浆确实是我国古代的一项重大发明, 它具有耐久性好, 自身强度和粘接强度高, 韧性强, 防渗性好等优良性能. 糯米灰浆耐久性好的原因在于石灰成分的防腐作用; 糯米灰浆强度高, 韧性强等性能则和灰浆固化过程形成的类似生物矿化物的微结构有关; 韧性与防渗性则与生成的纳米级碳酸钙和包裹的糯米浆膜之间的无机/有机物的协同作用有关. 糯米灰浆的发明和使用使当时建筑物的牢固程度和持久性有了历史性的突破. 我国诸多的古代建筑得以存留至今, 糯米灰浆功不可没. 从科技史角度, 中国是最早利用生物矿化原理和有机/无机物协同作用制作建筑材料的国家, 中国古人的聪明才智令人叹服. 今天, 挖掘糯米灰浆的科学价值不仅是弘扬中华文化的需要, 它对于传统技术的科学利用, 特别是为古建筑的维修和修复服务也具有重要意义.

参考文献

- 1 柳俊哲. 土木工程材料. 北京: 科学出版社, 2005. 37
- 2 卢连成. 关于我国新石器时代“白灰面”建筑性质的探讨. 见: 自然科学史研究所主编. 科技史文集(第14辑). 上海: 上海科技出版社, 1985. 107
- 3 仇士华. 人工烧制石灰始于何时? ^{14}C 方法可以判定. 考古与文物, 1980, 5(1): 126—130

- 4 姚远. 汉代长安词典——科学技术. 西安: 陕西人民出版社, 1993. 477—478
- 5 左丘明[春秋]. 左传. 长沙: 岳麓出版社, 2001. 289
- 6 邢景文. 陕西古代科学技术. 北京: 中国科学技术出版社, 1995. 161—163
- 7 王开. 陕西古代道路交通史. 北京: 人民交通出版社, 1989. 10
- 8 铁付德. 西汉早期柿园墓四神云气图壁画保护研究(一). 文物保护与考古科学, 2004, 16(1): 47—51
- 9 黄雅峰. 河南汉墓壁画艺术. 南都学刊, 1998, 18(2): 17—20
- 10 马新宇. 打虎亭汉墓壁画别论. 史学月刊, 1995, (5): 32—65
- 11 陕西省考古研究所. 西安北郊北朝墓清理简报. 考古与文物, 2005, (1): 7—16
- 12 山东邹城市文物局. 山东邹城西晋刘宝墓文物. 文物, 2005, (1): 4—26
- 13 山西省考古研究所. 灵石旌介发现商周及汉代遗迹. 文物, 2004, (8): 29—37
- 14 璞石. 辽宁朝阳袁台子北燕墓. 文物, 1994, (11): 43—47
- 15 姚勤镇, 吕达. 统万城的历史演变及其建筑特点探析. 延安大学学报(社会科学版), 2004, 26(2): 126—128
- 16 沈括[宋]. 梦溪笔谈(卷十二). 长春: 时代文艺出版社, 2001. 110
- 17 唐长孺. 中国通史参考资料——古代部分, 第三册. 北京: 中华书局, 1983
- 18 河南省文化局文物工作队. 邓县彩色画像砖墓. 北京: 文物出版社, 1958
- 19 宋应星[明]. 天工开物. 上海: 商务印书馆, 1958. 197
- 20 吴庆洲. 中国古城防洪的历史经验与借鉴(续). 历史研究, 2002, 26(5): 76—84
- 21 江修复[宋]. 邻几杂志, 说郭, 卷 30. 上海: 上海古籍出版社, 1988
- 22 李绪洪, 邓其生. 石经幢的艺术鉴赏. 古建园林技术, 2005, (3): 32—34
- 23 林建生, 林子健, 陈俊峰. 历史大震与泉州古建筑塔寺桥类的结构抗震. 世界地震工程, 2005, 21(2): 159—166
- 24 季士家. 明都南京城垣略论. 故宫博物院院刊, 1984, (2): 70—81
- 25 Riccardia M P, Duminucob P, Tomasic C, et al. Thermal, microscopic and X-ray diffraction studies on some ancient mortars. Thermochim Acta, 1998, 321(1-2): 207—214 [\[DOI\]](#)
- 26 Paulo M d S, Veiga M d R, de Brito j. Gypsum coatings in ancient buildings. Constr Build Mater, 2007, 21(1): 126—131 [\[DOI\]](#)
- 27 Hasan B, Sedat A, Baş ak I, et al. Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. Cement Concrete Res, 2006, 36(6): 1115—1122 [\[DOI\]](#)
- 28 Moropoulou A, Bakolas A, Anagnostopoulou S. Composite materials in ancient structures. Cem Concr Compos, 2005, 27: 295—300 [\[DOI\]](#)
- 29 Bakolas A, Biscontin G, Contardi V, et al. Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice, Thermochim Acta, 1995, 269-270: 817—828 [\[DOI\]](#)
- 30 Güleş A, Tulun T. Physico-chemical and petrographical studies of old mortars and plasters of Anatolia. Cement Concrete Res, 1997, 27(2): 227—234 [\[DOI\]](#)
- 31 李约瑟. 中华科学文明史. 上海: 上海人民出版社, 2001. 2
- 32 江苏省文管会. 江苏淮安宋代壁画墓. 文物参考资料, 1960, 8(9): 43
- 33 河北省文物研究所. 石家庄后太保村史氏家族墓发掘报告. 见: 河北省考古文集. 北京: 东方出版社, 1998. 344—369
- 34 刘晓东. 金代土坑石椁墓及相关问题. 见: 青果集-吉林大学考古专业成立二十周年考古论文集. 北京: 知识出版社, 1993. 397—401
- 35 杨根来. 从古代墓葬文化看遗体的防腐技术. 长沙民政职业技术学院学报, 2004, (4): 11—15
- 36 马健. 华东交大惊现王妃墓. 文物世界, 2002, (4): 3—6
- 37 得安县博物馆. 江西德安代熊氏墓清理简报. 南方文物, 1994, (4): 5—9
- 38 郑琦. 台州古塔的建筑特色与人文价值. 华中建筑, 2003, (21): 83—86
- 39 湖北省玉泉铁塔考古队. 湖北当阳玉泉铁塔塔基及地宫清理发掘简报. 文物, 1996, (10): 43—57
- 40 陈俊良. 古迹灰浆材料之配比与强度关系之研究. 硕士学位论文. 台南: “国立成功大学”, 2004
- 41 上海市文物管理委员会. 上海嘉定法华塔明代地宫清理简报. 文物, 1999, (2): 4—15
- 42 邱志坚. 重庆“比萨斜塔”倾斜 45 度 300 年不倒. 建筑工人, 2006, (7): 55—55
- 43 彭适凡. 再论古代南昌城的变迁与发展. 南方文物, 1995, (4): 86—98
- 44 张驭寰. 中国古代建筑技术史. 北京: 科学出版社, 1985. 173

- 45 吴庆洲. 明南京城的军事防御体系研究. 建筑师, 2005, (2): 96—101
- 46 赵彤梅. 商丘归德府古城城门建筑特点. 山西建筑, 2007, 33(6): 63—65
- 47 王新生. 古城墙修缮及应用技术初探. 古建筑园林技术, 2004, 6(1): 20—22
- 48 王致诚. 水下古市——泗州城. 百科知识, 2005, (11): 54—56
- 49 余焕阳, 陈单. 钱塘江明清古海塘旅游资源的保护与开发. 浙江水利科技, 2004, (4): 9—10
- 50 王燕谋. 中国水泥发展史. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. 4—5
- 51 蔡树传. 江苏古桥概述. 古建筑园林技术, 2001, 3(3): 48—54
- 52 武汉市博物馆. 武汉地区的古代桥梁. 武汉文史资料, 2001, (9): 45—48
- 53 陆翔. 龙桥古今. 文博, 2007, (2): 56—57
- 54 王文鹏. 昆明市护国桥的检测、评定及修复加固设计. 昆明市云南交通科技, 2001, (2): 44—48
- 55 申秀英, 刘沛林, Liu A. 开平碉楼景观的类型、价值及其遗产管理模式. 湖南文理学院学报(社会科学版), 2006, 1(4): 95—99
- 56 蔡济世. 资源型生态土楼. 建筑学报, 1995, (5): 42—44
- 57 Zeng Y Y, Zhang B J, Liang X L. A case study and mechanism investigation of typical mortars used on ancient architecture in China. *Thermochimica Acta*, 2008, 473(1-2): 1—6[DOI]
- 58 杨富巍, 张秉坚, 曾余瑶, 等. 传统糯米灰浆科学原理及其现代应用的探索性研究. 故宫博物院院刊, 2008, (5): 105—114
- 59 Sawai J, Shiga H, Kojima H, et al. Kinetic analysis of the bactericidal action of heated scallop-shell powder. *Int J Food Microbiol*, 2001, 71(2-3): 211—218[DOI]
- 60 Catalano V R, Knabel S J. Incidence of Salmonella in Pennsylvania egg processing plants and destruction by high pH. *J Food Prot*, 1994, 57(7): 587—591
- 61 刘强, 张秉坚. 石质文物表面生物矿化保护材料的仿生制备. 化学学报, 2006, 64(15): 1601—1605
- 62 Liu Q, Zhang B J. Syntheses of a novel nanomaterial for conservation of historic stones inspired by nature. *Mater Lett*, 2007, 61(28): 4976—4979[DOI]
- 63 Zeng Y Y, Zhang B J, Liang X L. A study on the characteristics and consolidating mechanism of Chinese traditional mortars used on his-torical architecture. *Sci Conserv Archaeol*, 2008, 20(2): 1—7
- 64 Yang L, Ding W J, An Y G, et al. Control synthesis of aragonite calcium carbonate with glucan as the template. *Chem J Chin Univ*, 2004, 8: 1403—1406
- 65 张秀英. β -环糊精与碳酸钙结晶的相互作用. 化学学报, 2003, 61(1): 69—73
- 66 丁唯嘉, 安英格, 杨林, 等. 3 种变性淀粉与 CaCO_3 相互作用的红外光谱研究. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(5): 701—704
- 67 王立铎, 孙文珍. 仿生材料的研究现状. 材料工程, 1996, (2): 3—5
- 68 谢福兰. 用 EDGE 法制备羟基磷灰石/明胶交联纳米复合材料. 明胶科学与技术, 2007, 27(1): 24—28
- 69 李秀华, 侯文涛. 贝壳结构及陶瓷的仿生研究. 硅酸盐学报, 2003, 22(2): 53—55