

“十二五”国家重点图书出版规划项目
城市与建筑遗产保护实验研究

中国古代灰浆科学化研究

城市与建筑遗产保护实验研究系列 曹卫 陈震 主编

Scientific Study on Ancient Traditional Lime Mortar

张云升 著



东南大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
城市与建筑遗产保护实验研究

中国古代灰浆科学化研究

张云升 著



内 容 简 介

本书重点阐述我国古代普遍使用的传统灰浆和西方古代建筑常用的水硬性石灰灰浆。全书共分上、下两篇，上篇介绍传统气硬性灰浆，下篇介绍水硬性石灰灰浆，主要内容包括两种灰浆的概论、制备合成、物理力学性能、变形行为、耐久性能和微观结构与作用机理等。

本书可供从事遗产保护、文物修复、建筑工程、水利工程、道路地基处理等相关研究的工程师、科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国古代灰浆科学化研究/张云升著. — 南京:
东南大学出版社, 2015.12

(城市与建筑遗产保护实验研究)

ISBN 978-7-5641-6275-7

I. ①中… II. ①张… III. ①石灰砂浆—研究—中国—古代 IV. TQ177.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 313914 号

出版发行: 东南大学出版社

出 版 人: 江建中

社 址: 南京四牌楼 2 号

邮 编: 210096

网 址: <http://www.seupress.com>

电子邮箱: press@seupress.com

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 南京玉河印刷厂

开 本: 889mm×1194mm 1/16

印 张: 11

字 数: 203 千

版 次: 2015 年 12 月第 1 版

印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5641-6275-7

定 价: 40.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

丛书前言

文化遗产是社会发展的一种积累性产品。显而易见,每个人从诞生之日起所接触到的事物都是前人创造的,而每个人的一生都多多少少为后人留下了些许物品,而所有这些物品的社会性积累就构成了我们的文化遗产。这其中至少有两层含义:一,文化遗产是人类社会对前人所有创造发明的淘汰性结果,只有那些经过复杂的历史选择过程并留存至今的一部分前人的遗存,才有可能进入文化遗产的行列;二,文化遗产就存在于我们身边。文化遗产的存在强化了社会的凝聚力和亲和力,使每一座城市和乡村都有可能形成与众不同的特性。唐朝诗人刘禹锡“千淘万漉虽辛苦,吹尽狂沙始到金。”的诗句正可用来表达文化遗产的宝贵之处。在这个意义上,历史本身就是人类不断学习、思考和选择的过程。保护文化遗产不仅是为了保留人类过去的印记,更是为了学习和传承古代智慧,巩固现代社会发展的文化基础,为未来留下一个更加美好的生活环境。

在所有的文化遗产中,城市与建筑遗产是其中最为显著、庞大而又十分复杂和综合的一部分。这类文化遗产包括了各种历史景观、古老城镇与乡村、传统建筑、地下文物以及在历代城市与建筑发展过程中所形成的思想、技艺、方法与传统。对城市与建筑遗产的研究与保护需要跨学科、多部门的合作,需要长时间刻苦的探究与思考,才能找到顺应社会发展趋势、符合科学规律、适应历史环境的保护方法。

东南大学建筑学院素有重视城市与建筑历史和保护研究与实践的传统,自刘敦桢教授创系于1927年第四中山大学始,就与杨廷宝、童寓诸先生确立此研究方向,经第二代、第三代、第四代学者不懈努力,发扬光大。20世纪八九十年代,便为国家培养了四届建筑遗产保护的专业人才,目前在全国相关领域发挥着重要作用;21世纪,建筑学院招收建筑学遗产保护本科生,在建筑遗产和城市遗产保护两方面齐头并进,取得了突出成果,承担了近百项重要的城市 and 建筑遗产保护工程项目,出版了相关论著数十部,为我国的遗产

保护作出了重要贡献,产生了较大的国际影响。

2008年“城市与建筑遗产保护教育部重点实验室”成立,2009年进入建设期,实验室以东南大学建筑历史与理论和建筑设计理论与两个国家重点学科为主干,整合包括土木、环境、材料、化工等各相关学科,在全国许多知名学术机构和专家的支持下开展了跨学科的遗产保护研究与实践,目前已取得了丰硕的阶段性成果,成为我国城市和建筑遗产保护领域最大、最重要的教育、科研、实践和对外交流的基地之一。

现在,其中一部分研究内容纳入了东南大学出版社出版的“十二五”国家重点图书出版规划项目:“城市与建筑遗产保护实验研究”系列丛书,与实验室的研究方向相应分为“城市与建筑遗产的理论研究”、“建筑遗产及其退化机理的实验研究”、“城市与建筑遗产保护的绿色途径”、“城市与建筑遗产保护的数字化方法研究”共四卷十余册,将陆续与读者见面,希望得到专家学者和所有读者的指正。

我们相信,城市与建筑遗产保护的未來既依赖于整个社会文化水平的提高,也在于相关技术方法和理论水平的发展与创新,更得益于家国意识、环境观念和社会组织的强化与融合。唯有此,才能形成适应我国新型城镇化条件下建立遗产保护体系的需要,以满足21世纪城乡可持续发展的国家战略。

是为序。



东南大学建筑学院教授
城市与建筑遗产保护教育部重点实验室(东南大学)主任

前 言

中国古代建筑是中华文明的重要组成和载体,在世界建筑史上形成了独特的建筑体系,富于伦理精神,师法自然,内涵精深,体现了中国能工巧匠的智慧且具有重要的艺术价值。目前我国各类城镇中,已有 113 座国家级历史文化名城和近 200 座地方历史文化名城,另外还有数量更为众多的名镇名村和历史文化街区。这些历史名城镇中包含了数量众多、历史悠久的砖石类建筑物或构筑物。中国古代的砖石类建筑由于长期受到太阳辐射、温湿度变化、化学作用、风雨侵蚀、生物作用、战争、地震以及人为的破坏,材料和结构性能不可避免地遭到减弱和损伤,大量历史性建筑损毁严重,濒临毁灭,迫切需要合理的修复加固。

目前我国普遍采用现代硅酸盐水泥或有机高分子材料对古建筑进行修复加固,但其与古代砖石在理化性能上适应性不良,修复后出现了大面积的砖石破损。考虑到中国古代建筑使用的胶凝材料主要是传统气硬性石灰灰浆,而欧美国家砖石古迹目前主要采用水硬性石灰灰浆作为修复材料,本书作者针对两大类石灰——中国传统灰浆和欧美的水硬性石灰灰浆开展了近 10 年的系统研究。全书共分上、下两篇,上篇介绍传统气硬性石灰灰浆,下篇介绍水硬性石灰灰浆,主要内容包括两种灰浆的概论、制备合成、物理力学性能、变形行为、耐久性能和微观结构与作用机理等,以期为我国建筑遗产保护、文物修复、建筑工程、水利工程、道路地基工程提供科学支撑。

上篇:中国传统灰浆

首先对中国传统灰浆进行综述;然后对四处典型古建遗址传统灰浆进行取样和对比试验,获取传统灰浆的理化性能;基于相关文献和取样分析结果,在实验室内复原糯米灰浆、桐油灰浆、血料灰浆三种传统灰浆;系统研究了三种传统灰浆的物理力学性能、变形行为和耐久性能,包括材料的密度、吸水率和抗压、抗折强度,以及材

料的变形性能和碳化性能。最后,采用多种先进的测试方法,观测传统灰浆的凝结硬化过程,分析糯米浆、桐油和血料对硬化浆体的化学组成、微观结构、官能团种类和数量的影响规律,探讨有机组分与石灰之间的相互作用机理。

下篇:水硬性石灰灰浆

通过阅读国内外文献,掌握水硬性石灰的矿物组成,提出水硬性石灰组成配比的设计方法,探索水硬性石灰的制备工艺,合成水硬性石灰,在满足抗压强度 5~10 MPa(相当于欧洲 NHL5)的前提下,与传统气硬性石灰砂浆对比,研究物理性能、力学变形性能,测试水硬性石灰与砖石的拉伸粘结性能和界面剪切粘结强度;在此基础上,采用掺加纤维、麻刀、明矾石等方法解决灰浆干燥收缩、开裂的问题;通过加速实验,研究水硬性石灰砌筑的砖砌体在严酷环境下的长期耐久性能。最后利用多种微观分析手段对水硬性石灰的微观结构和形成机理进行研究。

全书的主要研究和撰写工作由张云升负责完成,研究生李广燕参加了中国传统灰浆的研究,研究生肖建强参加了水硬性石灰灰浆的研究,研究生黄冉参与了本书的编排工作,研究生赵鹏、杨林、刘国建、杨永敢、刘诚、丁亚九、钱如胜、王晓辉、徐凯丽等参与了校对工作,在此表示衷心的感谢。另外,还要感谢东南大学建筑学院陈薇教授在研究中给予的指导。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

张云升

2015 年 12 月于南京

名词术语注释表

传统灰浆	以石灰为基料,将糯米汁、蛋清、猪血、羊桃藤汁或桐油等有机材料作为配料,拌制而成的灰浆,是中国古代建筑常用的气硬性胶凝材料
水硬性石灰	通过烧制和消化黏土含量不等的黏土质石灰岩或是二氧化硅含量不等的硅质石灰岩获取的消石灰,或是通过混合含有硅酸钙、铝酸钙和氢氧化钙的物质获取的石灰。与水接触后硬化,然后在空气中碳化发展强度,并能在水中保持和继续发展强度
水丹	桐油与石灰的混合物,作为一种传统的防水、防渗漏灰泥
糯米桥	建于清光绪年间,位于台湾南投,是由花岗岩砌筑,用糯米和红糖作为粘合剂的石桥
白灰面	主要原料是姜石,为原生碳酸钙,存在于天然岩石中,大部分以单独的碳酸钙晶体形式存在
姜石	一种二氧化硅含量较高的石灰质原料,是黄土中纯度高、硬度小的碳酸钙结石,常见于我国华北、中原地带
蟹灰	一种水生物大蛤的外壳(其成分主要为碳酸钙)烧制而成的石灰质材料,它不仅具有良好的胶凝性能,而且具有良好的吸湿防潮性能
三合土	用石灰、黏土和细砂相混夯实而成的土料,用于夯墙、地坪、地基土和渠道防渗等
罗马砂浆	“石灰—火山灰—砂子”三组分砂浆,欧洲石灰基灰浆的最高成就
糯米灰浆	糯米浆与石灰组成的复合胶凝材料
高丽城	又称“高丽边”,北齐旧长城在今青龙花场峪,抚宁板厂峪,绥中旧关村、永安堡,山海关三道关等地所特有的别称
卜作兰材料	一种硅酸质或硅酸质与矾土质的材料,具有火山灰活性
土子	又称无名异、土籽、黑石子,结核状的软锰矿石,主要含有氧化锰,以粒大、黑棕色、有光泽者为佳,在一定程度上具有抑制桐油聚合的作用
密陀僧	一种含氧化铅的固体催干剂,入油起促进干燥的作用,呈红色,属四方晶系,很重,也很软,有油脂光泽,产于铅矿床的氧化地带
血料	特指熟血料,生血料经过石灰作用凝固而成的,是一种呈碱性、色紫的粘稠液体,具有良好的干燥性和较强的粘结性

目 录

上篇 传统灰浆材料	1
1 概论	1
1.1 古代建筑用胶凝材料及其分类	1
1.2 中国传统石灰胶凝材料的发展	3
1.3 中国传统灰浆材料的研究现状	6
2 中国古代传统灰浆材料的对比试验研究	8
2.1 引言	8
2.2 古城墙遗址简介	8
2.3 试验部分	13
2.4 中国古代传统灰浆材料的微观结构	15
2.5 中国古代灰浆材料的机理分析	16
2.6 本章小结	19
3 中国古代传统灰浆材料的制备合成	20
3.1 引言	20
3.2 原材料	20
3.3 试验配比	26
3.4 合成工艺和养护	27
4 中国古代传统灰浆材料的物理力学性能	29
4.1 引言	29
4.2 试验部分	30
4.3 中国古代传统灰浆材料的物理力学性能	31
4.4 本章小结	33
5 中国古代传统灰浆材料的变形性能	35
5.1 引言	35
5.2 试验部分	35
5.3 中国古代灰浆材料的干燥收缩分析	36
5.4 本章小结	39

6 中国古代传统灰浆材料的碳化	40
6.1 引言	40
6.2 试验部分	40
6.3 中国古代传统灰浆材料的碳化分析	41
6.4 本章小结	44
7 中国古代传统灰浆的微观结构与机理	45
7.1 引言	45
7.2 试验部分	46
7.3 结果与讨论	48
7.4 本章小结	68
上篇结语	70
参考文献	71
下篇 水硬性石灰浆	75
1 概论	75
1.1 引言	75
1.2 水硬性石灰胶凝材料的发展史	75
1.3 水硬性石灰浆材料的定义及应用	76
1.4 水硬性石灰浆材料的现状	80
2 水硬性石灰浆材料的制备合成	82
2.1 原材料	82
2.2 试验配比	84
2.3 合成工艺和养护	86
3 水硬性石灰浆材料的物理力学性能	87
3.1 引言	87
3.2 试验方法	87
3.3 水硬性石灰浆的物理力学性能	90
3.4 水硬性石灰材料的粘结强度	112
3.5 本章小结	115
4 水硬性石灰浆材料的变形性能	117
4.1 引言	117
4.2 试验部分	118
4.3 水硬性石灰浆材料的干燥收缩	119
4.4 水泥砂浆的干燥收缩	123

4.5 本章小结	123
5 水硬性石灰浆材料的碳化	125
5.1 引言	125
5.2 试验部分	125
5.3 水硬性石灰浆材料的碳化分析	126
5.4 本章小结	128
6 水硬性石灰浆材料的耐久性能	129
6.1 引言	129
6.2 试验部分	129
6.3 水硬性石灰浆材料的耐久性能	133
6.4 本章小结	141
7 水硬性石灰浆材料的微观结构及机理	143
7.1 引言	143
7.2 试验部分	143
7.3 水硬性石灰浆材料的微观结构表征与机理分析	145
下篇结语	159
参考文献	160

1 概论

1.1 古代建筑用胶凝材料及其分类

胶凝材料,是指在自身的物理、化学作用下,能够从液态或半固态变成坚硬的固体,并能胶结其他物料而具有一定机械强度的物质。胶凝材料按其化学成分可分为有机胶凝材料和无机胶凝材料两大类。有机胶凝材料主要包括沥青和各种树脂,无机胶凝材料按其硬化时的条件可分为气硬性胶凝材料与水硬性胶凝材料。气硬性胶凝材料在空气中硬化,也只能在空气中保持或继续提高其强度,如石灰、石膏、水玻璃等。水硬性胶凝材料不仅能在空气中硬化,而且能更好地在水中硬化,保持并继续提高其强度,如各种类型的水泥。

目前古建修缮所用的胶凝材料主要分为两大类——无机材料和有机材料。无机材料包括石灰、水玻璃、水泥等,有机材料包括环氧树脂、丙烯酸树脂、有机硅树脂、有机氟树脂等合成高分子材料。

1.1.1 无机材料

一、传统石灰

建筑行业所使用的石灰胶凝材料一般指的是熟石灰,其主要成分是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,属于气硬性胶凝材料。通常作为石灰砂浆,用作砖石的砌筑粘结。其硬化机理是氢氧化钙与空气中的二氧化碳在水的作用下反应生成碳酸钙,并释放出水分,反应方程式如下:



碳化所生成的碳酸钙晶体相互交叉连生或与氢氧化钙共生,形成紧密交织的结晶网,产生强度。作为建筑材料,传统石灰砂浆具有很多的优点,如塑性好,粘性好,附着力强,不容易龟裂,防火性能好,对水蒸气的透过性好,吸湿性强,有利于保持干燥和较好的后期强度。它的缺点是初期强度低,凝结硬化速度慢,硬化时体积变化率大和耐水性差,在潮湿或水下环境中易分解溃散^[1]。

二、硅酸钠

硅酸钠俗称钠水玻璃,分子式为 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$,具有成本低廉、

操作工艺简便、绿色环保、对人体健康无害、有较强的耐候性和耐老化性的优点,胶结性能良好,硬化时析出的硅酸凝胶有堵塞毛细孔隙而防止水渗透的作用。当前修补砖墙裂缝时,通常将水玻璃、粒化高炉活性微粉、砂及氟硅酸钠按适当比例拌和后,直接压入砖墙裂缝,起到粘结和补强作用。它的优点是粘结力高,耐酸性好,耐热度高达 1 000 ℃,可提高材料的抗风化能力。但是水玻璃凝结固化机理与石灰碳化机理相似,故速度慢,同时体积收缩大,强度低,耐碱性和耐水性差,不能在碱性环境、潮湿环境下使用^[2]。

三、水泥

水泥作为水硬性胶凝材料,加水搅拌后反应生成 C—S—H 凝胶,能在空气中或者水中硬化,把砂、石等材料牢固地胶结在一起。在现代的城墙保护工程中经常用水泥进行修复处理,主要是因为水泥凝结硬化快、早期粘结强度高(早强)、有优异的抗潮湿能力、操作简单、工艺方便、成本低廉等。但是,水泥的使用存在着诸多的缺陷。现在,大量的科学研究与工程实例证明,现代水泥基材料在砖石历史建筑修缮中,其寿命很短,物理化学上与古代砖石材料存在排斥性^[3-4]。申秀英等在对开平碉楼的景观研究时强烈认同英国文物建筑与历史地段保护协会主席费尔顿(B. M. Feilden)力主在文物建筑维修工作中不使用水泥的观点,原因有以下五点^[5]:

(1) 水泥的使用是不可逆的,一旦使用之后再要去除就会损坏古城墙原有材料,这损伤是无法补偿的。

(2) 由于水泥砂浆的抗压、抗拉强度太大,缺乏弹性和塑性,无法与古城墙或传统建筑中较弱材料匹配,水泥砂浆会施加较大的机械力于相邻的材料而促使古城墙灰浆破坏。

(3) 在凝固过程中水泥会收缩,产生裂缝,外界的水分会从裂缝中渗透进来,但水泥孔隙率低且不可渗透,进来的水出不去,阻碍蒸发,因此由于潮湿而产生的破坏就更加严重了。

(4) 在硬化过程中,水泥会释放出碳酸钠、碳酸钾及硫酸盐等水溶性盐,溶解并破坏多孔性材料和具有价值的建筑装饰表面。

(5) 水泥的颜色是冷灰的,而且很暗,表面又往往很光滑,像铁皮,这种特点与古城墙的传统材料在审美上是格格不入的。

1.1.2 有机材料

一、环氧树脂

环氧树脂分子结构中含有羟基、醚键、氨基等极性基因,故具有优良的粘结性能,一般用作砖石文物粘结材料。尽管环氧树脂的加固性能好,但它的缺点也很明显,如渗透性较差,只能用于本身多孔的岩石;固化后会堵塞石质文物水蒸气的流通孔道;在户外会因为光老化而变黄;由于具有较强的抗化学溶剂性能,老化失效后难以去除,给将来的修复加固工作带来更大的困难。

二、丙烯酸树脂

作为石质文物保护材料,丙烯酸树脂一度在北美和欧洲广为使用。不过,经过近年来的使用和研究,人们发现,丙烯酸类树脂并不是一种合适的砖石文物保护材料^[6]。它容易阻塞砖石的孔隙,耐候性差。Lazzari M. 等的研究表明,丙烯酸树脂的热稳定性也不理想,通过氟化或与其他有机材料复合可以改善丙烯酸树脂的化学稳定性。

三、有机硅树脂

由于渗透性强、稳定性好,有机硅类聚合物在石质文物保护中得到广泛应用。SP-3 硅酮防水剂和有机硅接枝聚合物曾成功用于杭州部分风景点石雕的保护处理^[7]。以甲基三乙氧基硅烷、正硅酸乙酯为单体合成的聚合硅氧烷曾用于故宫博物院风化汉白玉的加固^[8]。一般地,有机硅主要用于含硅石质文物的保护,对碳酸盐文物效果不佳^[9]。

四、有机氟树脂

有机氟聚合物具有防水、化学稳定性好、不改变文物外观等优良性能。Allisandrini 等研究了一系列含氟丙烯酸共聚物的性能,并将其用于意大利 Candoglia 大理石及 Noto 石灰石的保护;氟聚氨酯对意大利拉古萨 St. Giorgio 大教堂的保护也很成功。不过,对于氟化聚合物在石质文物保护中的使用也有不同的意见,有人甚至认为是无效和有害的。

但是由于高分子聚合物保护材料最长也只有数十年的使用寿命,在微生物、大气污染物、光、热等的作用下,聚合物老化、降解的速度更快,保护功能很快就会丧失^[10]。因此,人们认为聚合物只能提供暂时的保护,甚至还会加速文物的破坏,不适合作为古建修复的粘结材料。

因此,古建维修上应尽量使用传统材料和工艺,以减小新旧材料的强度差异,避免造成结构行为的改变而破坏原有建筑物的安全,不宜完全采用现代粘结材料来修缮。我国大多数古建筑使用的胶凝材料是石灰,几千年的应用实践表明其强度和耐候性能均能满足建筑的使用^[11-12]。因此,在古建维护、修缮工程中,石灰胶凝材料这一方向值得我们去传承和研究。

1.2 中国传统石灰胶凝材料的发展

远在四五千年到一万年以前的新石器时代,由于石器工具的进步,人类劳动生产力的提高,挖穴建室的建筑活动已经兴起,当时的建筑材料主要以“木”“土”“石”等天然材料为主^[7]。我国一些考古工作者已经发现在许多新石器时代遗址中,如山东大汶口文化遗址、河南安阳的后岗、陕西宝鸡的斗鸡台、郑州的二里岗、西安半坡及南殿村仰韶文化遗址中,在摩擦较多的地面及四壁常有光滑而坚

硬的“白灰面”，有的甚至还经过烧烤处理；有的先用草筋泥、红烧土铺平，而后再用“白灰面”埽平，从而使地面平整、坚固，同时在采光、防潮等功能方面也相应有了改善^[7]。为了证实遗址中发现的“白灰面”是何种物质，我国考古工作者还曾对新石器时代的仰韶文化、大汶口文化、龙山文化等遗址中发现的“白灰面”地面取样做化学分析、X射线分析与岩相鉴定，结果表明“白灰面”的主要原料是姜石（又名料姜石）。此外，还有人曾将河南郑州二里岗陇海马路处的天然姜石磨成细粉，加水调匀，仿照古代传统工艺将其涂于洞穴的四壁，干燥后竟和龙山时期洞穴遗址中所发现的“白灰面”完全一样^[7]，这进一步说明“白灰面”的主要原料是姜石。

遗址中发现的“白灰面”与现代石灰虽然都是以碳酸钙为主，然而通过显微镜观察到的这两种碳酸钙是不同的。前者多为单个大晶体，大部分以单独的碳酸钙晶体形式存在，后者没有明显的晶体轮廓，晶体尺寸很小，呈隐晶分布，多是些细小晶体的集合体。一般认为前者为原生碳酸钙，存在于天然岩石中，后者为次生碳酸钙，即石灰浆体中的氢氧化钙通过吸收空气中的 CO_2 碳化而成。从化学成分和形状来看，“白灰面”的二氧化硅的含量高达 13.60%，而石灰中的二氧化硅仅有 3.49%；“白灰面”中的氧化钙含量仅为 42.80%，而石灰的氧化钙含量却达 51.98%^[8]。“白灰面”明显有别于石灰，但与姜石相似。

姜石是一种二氧化硅含量较高的石灰质原料，是黄土中纯度高、硬度小的碳酸钙结石，常见于我国华北、中原地带。这种原料如经适当温度煅烧会形成具有水硬性的硅酸钙矿物。但我国考古人员对所取到的烧烤样品进行研究，结果却未发现已发生了化学变化的姜石变体，这可能是由于当时烧烤的温度不高的缘故。不过，应当指出，早在我国新石器时期，人们在以大地为源的建筑活动中，能有意识地把黄土中的姜石挑选出来，捣碎成粉铺埽地面，甚至有的部位用火烧烤，不能不说是当时“地穴”建筑的一大进步^[7]。

到了大约公元前 16 世纪的商朝，人类出现以木结构为主的结构建筑，逐渐取代了“地穴”建筑。这些建筑大都构筑在夯土台上。以郑州商代遗址为例，从房基遗址可以明显看出，它的夯土台高出地面约 1 m，并在台上再埽一层“白灰面”。位于渭河之南、举世闻名的秦王朝的阿房宫也是建筑在长 1 320 m、宽 402 m 的夯土台上。其实以夯土台作房基以及板筑围墙的建筑技术和同一时期出现的土坯制作与砌筑土坯用的黄泥浆至今还有沿用。总之，在我国战国之前（公元前 4 世纪）的一段时期内，人们在建筑活动中，天然胶凝材料是主要的采用对象^[7]。

到了周代已开始使用石灰胶凝材料。《左传》中曾有“成公二年（即公元前 589 年）八月，宋文公卒，始厚葬，用蜃灰”的记载。古时大蛤称蜃，而蜃灰则是一种水生物大蛤的外壳（其成分主要为碳酸钙）烧制而成的石灰质材料，它不仅具有良好的胶凝性能，而且具有良

好的吸湿防潮性能,因而在崇尚厚葬的古代,封建帝王常选用蜃灰来修筑陵墓。明代《天工开物》一书^[9]中便有“烧砺房法的图示”。依据目前考古发掘的材料可以发现,最迟在我国的汉朝(公元2世纪)人工烧制石灰已经达到比较高的水平。例如,建于东汉灵帝光和五年(公元182年)的河北省望都二号墓,其砖墓是以石灰为胶凝材料胶结砌筑,墓的各室顶部均砌作双层圆拱券,在双层拱券之间,约有10 cm间距空隙,两侧往下,间距逐渐缩小,下至与墓壁相接处,双层拱券完全贴拢。在每层券顶上,均灌注石灰浆,其作用是使券顶结构更加牢固。同时,墓室内壁及券的内表面均抹有石灰一层,厚约1 mm^[10]。中国建筑材料科学研究所的考古工作者还对北京顺义县北小营公社东府大队的汉墓砌砖所用的胶结材料进行了对比鉴定,研究结果表明这种胶结材料不同于西安南殿村遗址的“白灰面”,颜色洁白,呈膏状,尚有些粘性,手捻有滑腻感,其化学成分中氧化钙的含量高达51.98%,说明了这种胶结材料是煅烧过的石灰,而且石灰的纯度较高^[7]。

胶凝材料是伴随着砌筑技术的不断提高而发展的,考古发现我国西周时期就已有陶瓦,北魏时期已有琉璃瓦,至于青砖的制作到了秦王朝时期已达相当高的水平。秦、汉时期砖石结构的建筑增多,汉代已有多层楼阁出现,所以那时选取石灰石来烧制石灰便应运而生了。不过文献记载则见于明代《天工开物》一书,该书对烧制石灰已有详细的记载:“燔灰火料,煤炭居十九,薪炭居十一。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,置于风中,久自吹化成粉。”

在我国古代建筑遗址中,石灰除用于粉饰墙壁和作为胶结材料外,还大量以“三合土”形式用于居室的地面、屋面、房基及地面垫层。据青海都兰县诺木洪塔里他里哈遗址的发掘报告称,该遗址的土坯之间采用了炭灰加少量石灰作粘合材料。此外在上述遗址居住面处还发现有“黄土加细砂再加白灰”打成的地面。经考古学家断定,认为那是战国或汉代之前的遗址。另如南京西善桥的南北朝(公元5世纪)的大墓中,封门前的地面即由石灰、砂及黏土混合筑成。到了清代,三合土的应用则更加广泛,配比也有了明确的规定。清代《宫式石桥做法》一书中对三合土的配比作了说明:“灰土即石灰与黄土之混合,或谓三合土。”实践证明,三合土不仅比单一的石灰具有较高的强度,而且还具有较好的抗水性能。古代许多陵墓还用三合土加糯米浆来建造,它不仅具有较高的强度,而且还有一定的韧性,在挖掘时,铁镐刨下去会迸发出火星,有的甚至要用炸药才能把它炸开^[7]。因此,就出现了掺糯米汁、桐油等天然有机物的复合胶凝材料。

秦朝修筑万里长城时人们就已经使用了糯米汁与石灰组成的复合胶凝材料,后来在许多重要的砖石结构工程中广泛应用了掺糯

米浆的复合胶凝材料。糯米浆与石灰组成的复合胶凝材料在文献中亦有确切的记载。我国考古工作者曾对在北京、河北、河南、湖北、陕西、湖南、广东等省市实地调查所取得的样品进行化学分析,研究结果表明在我国南北朝时期,已有在石灰中掺入含淀粉之类的复合材料,大概就是文献中记载的糯米之类。例如,从河南邓县采集到的南北朝时期的画像砖的粘结材料,化验证实是掺有淀粉的石灰材料^[7]。《宋会要》方域九之八载有乾道六年(公元1170年)修和州城,“其城壁表里各用砖灰五层包砌,糯米粥调灰铺砌城面兼楼橹,委皆雄壮,经久坚固”。目前世界上规模最大的砖石城垣是建于明朝的南京城墙(其底宽10~18 m,顶宽7~12 m,高15~18 m,长达48 km),便是以条石为基,上筑夯土,外砌巨砖,以石灰作为胶结材料,而在重要部位就是以石灰加糯米汁灌浆,上部用桐油和土拌和结顶以防雨水,整个工程“坚固特殊”^[11]。《天工开物》一书关于糯米石灰的记载甚详,在第十一卷“燔石”条下有“用以裹墓及贮水池则灰一分入河砂、黄土二分。用糯米、羊桃藤汁和匀,轻筑坚固,永不旱坏,名曰三合土”。清康熙、乾隆年间,曾在北京卢沟桥下南北两岸,用糯米汁拌三合土建筑河堤数里,北京南郊从此免泛滥之灾。有些巨大石条使用糯米和牛血拌三合土,凝固后与花岗岩一样坚固^[12]。至于在糯米—石灰复合胶凝材料中再添加明矾、油灰、桐油等则多用于修补假山石,这种材料不仅具有较好的粘结力,而且比单独的石灰有更小的收缩性。可以说,中国许多古代建筑历经千百年风吹雨淋日晒至今存留,传统灰浆功不可没。因此,有机—无机复合胶凝材料,即以石灰等无机材料为基料,以糯米汁、蛋清、猪血、羊桃藤汁或桐油等天然有机材料为配料的中国传统灰浆是中国古代建筑史上的一项重要科技发明,成就了具有独特魅力的中国古代建筑风格。

综上所述,我国古代建筑用胶凝材料的发展可以概括为以下两点:

(1) 在我国古代的建筑活动中,人们采用的胶凝材料是多种多样的,有取源于大地的天然材料(如黏土与姜石),也有人工烧制的材料(如石灰),既有无机材料,也有有机—无机复合材料(如草筋泥、糯米—石灰、桐油—石灰、血料—石灰等)。

(2) 我国古代劳动人民在开展建筑活动的过程中,通过长期实践,对胶凝材料的品种和性能有了很大的发展和改进,如黏土—红烧土—砖瓦、姜石—白灰面—石灰三合土、石灰—糯米、石灰—桐油、石灰—血料等,以适应人类社会发展的需要。

1.3 中国传统灰浆材料的研究现状

石灰类胶凝材料作为中国古代广为使用的传统灰浆材料,它的优良性能目前也引起了国内科学工作者的注意,先后有台湾成功大学、浙江大学和同济大学等单位对糯米灰浆进行了分析和研究。国外科