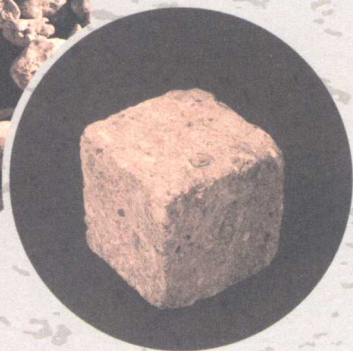


中国文化遗产研究院·文物保护科技系列·2015年

李黎
赵林毅
著

中国古代石灰类材料研究



文物出版社

中国文化遗产研究院·文物保护科技系列·2015年

中国古代石灰类材料研究

李 黎 赵林毅 著

 文物出版社

封面设计 程星涛

责任印制 陈 杰

责任编辑 陈 峰

图书在版编目 (CIP) 数据

中国古代石灰类材料研究 / 李黎, 赵林毅著. —北京: 文物出版社, 2015. 7

ISBN 978 - 7 - 5010 - 4292 - 0

I. ①中… II. ①李… ②赵… III. ①石灰 - 研究
IV. ①TQ177. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 109110 号

中国古代石灰类材料研究

李 黎 赵林毅 著

*

文 物 出 版 社 出 版 发 行

(北京市东直门内北小街2号楼)

[http: //www. wenwu. com](http://www.wenwu.com)

E-mail: [web@wenwu. com](mailto:web@wenwu.com)

北 京 君 升 印 刷 有 限 公 司 印 刷

新 华 书 店 经 销

787 × 1092 1/16 印张: 26. 75

2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5010 - 4292 - 0 定价: 270. 00 元

本书版权独家所有, 非经授权, 不得复制翻印

序 一

中国文化遗产研究院院长 刘曙光

我国是世界上使用无机胶凝材料历史最悠久的国家之一，在距今 6000 多年前的新石器时代早期，我们的先民就已经用红烧土铺窝巢式住房地面以防潮保暖，土中的硅钙质矿物经过焙烧之后，会产生少量水硬性胶凝材料，后来又发展到用烧石灰做地面（白灰地面）。最典型的发现，是甘肃秦安大地湾遗址的“F901”，在这座面积达 130 平方米的“宫殿式建筑主室”，发现了中国最早的“混凝土”地面——全部为烧料礞石和砂石混凝而成的类似现代水泥的地面。考古发现证明，我国古代的先民很早就已经发现烧料礞石材料具有较好的加固作用，在耐久性、强度、与建筑本体的和谐等方面都具有突出的优点。但受到当时科学技术条件的制约，以及天然材料混合物本身的复杂性，这些传统材料的加固机理一直未被人们充分认识；直至今日，有些具有优势的传统建筑材料逐渐被新型合成材料所取代。这本是一种无可厚非的科学技术进步，但是对于文物古迹的修复来说，这种进步似乎又是问题所在。

众所周知，我国许多地方还保存着以“四大石窟”为代表的石窟寺，西北地区的长城、古城等土建筑遗址，也都是反映中华文明的重要实物遗存。由于受风蚀、雨蚀、温湿度变化等自然环境和人为因素的影响，这些被统称为“岩土文物”的古迹本体逐渐劣化，大多损毁严重，有的甚至濒临消失。因此，抢救保护珍贵的岩土质文物，一直是迫在眉睫的艰难之事。而“艰难”的所在，主要来自修复材料。现代文物修复理念不支持在保护工作中主要和大量使用新型复合材料的观念和做法；而寻找与岩土文物本体相适宜、相兼容的保护材料，又需要文献调研、室内实验、工程实践以及资金保障等等，谈何容易！所以，长期以来岩土文物保护中的材料研发一直是个大难题，而岩土文物保护中的种种危局、险象，也就长期存在，惊心动魄。

岩土文物保护是中国文化遗产研究院的传统优势领域。以黄克忠先生为代表的老一辈，以詹长法、王金华、李宏松研究员为代表的中坚力量，都曾经在岩土文物保护领域做出了积极努力和重要贡献。相比之下，李黎是后起之秀，但她却有着超越前人或好于前人的工作环境、条件和自身优势，因而她能够在包括其父亲李最雄先生在内

的前辈的基础上，把更多的时间和精力用于对传统材料及相关的工艺技术进行科学研究，揭示其科学内涵，以利用和发展传统材料的优势并在岩土建筑文物的保护与修复中发挥更大作用。李黎和赵林毅的这本著作，是在近几年课题研究的基础上整理、提升而成的。我还依稀记得几年前她在课题立项评审时回答质询的一些细节。几年来，我不断通过各种渠道听到、看到，她通过大量文献整理、室内实验、现场调研、工程实践，采用现代科技所提供的分析、检测和模拟试验研究等方法，对我国传统石灰类材料料礓石、阿嘎土、蛎灰、糯米灰浆、捶灰等硅酸盐材料开展了一系列物理力学性能、加固性能及实施修复加固工艺方法研究。作为院里的业务骨干（青年学科带头人）和修复中心的副主任，李黎承担着繁重的行政管理事务和工程实施任务，科研工作就显得十分辛苦。好在她还有个不慎摔伤的“坎儿”，把骨折的不幸，变为了集中时间深入思考的良辰吉时，保证了课题研究的质量。

本书的实验和研究证明，我国传统硅酸盐石灰类材料经过改性之后，是一种适宜于岩土文物保护加固的材料。作者对中国古代传统石灰类材料的系统研究和科学认知，为我国岩土文物保护、加固提出了新的思路，对我国传统水硬石灰材料在岩土文物保护中的应用，起到了积极的推动作用，是一项理论和实践都非常科学、令人信服的成果。更重要的是，李黎本人通过这些研究工作，积累起更多的以解决文物保护实际困难和问题为目标的应用性研究的理论功底和实践基础，学风、作风更加朴实、扎实、踏实。我为以李黎为代表的文研院年轻人的成长与进步而高兴，从中也看到了文研院的希望。

2015 年 4 月

序 二

中国工程院院士 王思敬

古老文明的中国历史悠久，拥有大量数千年的古文化遗址和文物，它们承载着我们先祖的智慧和创造力，反映出中华文明历史的演化轨迹，支持着民族的自豪，值得我们倾情崇重和珍惜。对它们保护并使其永世长存、让中华文明持续演绎，是我中华民族世代代义不容辞的神圣职责。

同时，通过遗址文物对华夏文明历史的追溯，可以认识自己的历史和创造力量，揭示人类社会发展的客观规律，认识并促进当代和未来文明社会的发展轨迹。在举国上下、万众一心为实施振兴中华实现“中国梦”的历史时期，具有划时代的意义。

岩土遗址、文物由于其自身材质和建筑形制的特殊性，在其赋存的地质环境、水文环境和气象环境中，会表现出多种形式的变形、破裂、损伤和破坏，即产生病害。而解决文物与自然环境之间相适应过程中对文物所产生的危害，又不改变其面貌和性能，保护材料的开发研究及其工程应用成为突出的技术关键。

李黎、赵林毅及其团队多年来致力于我国传统材料的“再发现、再研究、再应用”这个新的发展方向。水硬石灰作为传统的硅酸盐建筑材料，自20世纪70年代开始就被广泛应用于欧美历史建筑物的修复中。在我国，这类材料在几千年前的人居房屋或寺院建筑中就已经使用，但后来的研究和应用与国外相比却相对滞后。

20世纪80年代初，曾任敦煌研究院副院长的李最雄研究员首先对甘肃秦安大地湾仰韶时期人类居住房屋地面遗址材料进行了科学研究，提出此材料为我国最早使用的水硬性石灰，并命名为“仰韶水泥”，实为重要发现。在此研究基础之上，2004年马清林研究员采用此类材料对我国潮湿环境下的甘肃酒泉丁家沟五号墓壁画地仗层进行了加固试验研究。之后，在李最雄研究员的指导下，该研究团队及李黎等以中国水硬性石灰烧料礞石及烧阿嘎土作为岩土文物的修复加固材料，进行了系统的研究，并在南京报恩寺、内蒙古元上都、承德避暑山庄和高句丽壁画墓等遗址的保护中得到实际应用，取得了甚好的效果。近年，又继续对中国传统硅酸盐石灰材料蛎灰、糯米灰浆、捶灰等进行改性研究，并将研究成果应用于多个岩土文物的保护加固中。本书作者李

黎、赵林毅进一步将中国水硬石灰与欧美水硬性石灰进行对比剖析，对中国几千年传统的胶凝材料进行改性，使国产水硬性石灰应用于岩土、砖、陶等类文物的保护修复。这一系列研究成果对中国文物保护领域中保护材料的研究，特别是岩土文物的加固材料研究开辟了一个新的途径。

本研究历时较长，在研究与实践应用的过程中克服了多种困难，值得庆幸的是，此研究团队依然坚持，最终成果也为同类材料的开发提供科技支撑，有利于推动我国传统石灰类材料的进一步发展。

李黎曾是我合作的博士后研究员，我深感她的研究素质和能力优秀。作为新一代的文物保护工作者，能有如此成就，难能可贵。在本书出版之际，我欣然为其撰序，并希望年轻一代继续努力，并预祝他们在遗址、文物保护领域做出更杰出的贡献。

2015 年 4 月

序 三

文物是历史遗留下来的在文化发展史上有价值的东西，如建筑、碑刻、工具、武器、生活器皿和各种艺术品。各类文物从不同的侧面反映了各个历史时期人类的社会活动、社会关系、意识形态和当时的生态环境以及利用自然、改造自然的状况，是人类宝贵的历史文化遗产。本体的劣化和不利环境因素的影响，使得文物不同程度地发生着量或质的变化，其保护工作迫在眉睫。目前，作为岩土类文物，保护材料研发仍然是其保护的关键问题。水硬石灰作为传统的硅酸盐建筑材料，自 20 世纪 70 年代就开始广泛应用于欧美历史建筑物的修复中。在我国，这类材料在几千年前的古代房屋或寺院就已经使用，但后来的研究和应用与国外相比还相对滞后。

20 世纪 70 年代，我国学者李最雄研究员初次对仰韶时期人类居住遗址地面材料进行研究，发现此材料为我国最早使用的水硬性石灰，被称为“仰韶水泥”，并对料礓石材料的性能做了初步研究，2004 年，在前人对“仰韶水泥”研究的基础之上，马清林研究员等使用烧料礓石对潮湿环境的壁画进行了保护修复实验，并取得很好的效果。2010 年始，我们研究团队以国产水硬性石灰烧料礓石及烧阿嘎土为岩土文物的修复加固材料，对其进行了研发及物理力学性能、标准性能的测试。研究表明，水硬石灰中有两种主要的化学组分，一类是气硬性胶凝材料氧化钙，另一类是水硬性胶凝材料 β 型硅酸钙和铝硅酸二钙。气硬性胶凝材料氧化钙在大气中的水和二氧化碳作用下缓慢碳化形成多孔隙的碳酸钙，这种碳酸钙有很好的透水、透气性、适宜的强度，也有与石质文物本体很好的兼容性及良好的耐候性。近年，又继续对传统硅酸盐石灰材料进行研究，对蛎灰、糯米灰浆、传统捶灰等进行改性，并将研究成果应用于多个岩土文物的加固工程。

本书首先对我国几种传统文物修复材料水硬性石灰的发展历史、生产工艺及基本物理力学性质和耐候性能进行了概述，在此基础上，根据文物修复的原则和文物修复工作的需要，对我国传统水硬石灰进行了改性研究，并与已成功应用于文物修复的欧洲水硬性石灰进行对比，揭示了我国的几种传统水硬性石灰在改性后可良好地契合文物修复需要的特点。通过室内配比筛选试验，对我国几种传统水硬性石灰改性后的砂

浆物化特性进行了分析，得出了适合砂岩石窟裂隙灌浆材料的最佳配比，并将改性传统石灰材料应用于南京报恩寺遗址、内蒙古元上都遗址和高句丽壁画墓地，取得了良好的效果。

作者基于多年的理论基础研究和工作经验，将前辈的研究成果与近年取得的进展与实践经验汇总成书，对中国特色的传统石灰材料烧料礞石、烧阿嘎土、蛎灰、糯米灰浆和传统捶灰等开展了系统的试验研究；针对文物保护工作的需要对烧料礞石和烧阿嘎土、烧蛎灰进行了高温焙烧改性，从材料的微观结构和物化性质的角度综合分析了改性材料的加固岩土文物的作用机理；通过室内试验结合现代科技手段对欧洲水硬石灰和中国传统水硬石灰材料的基本物理性质和环境适应性进行了对比及分析；通过控制客观条件的方法，针对不同类型文物保护的需求，筛选出了加固材料的最佳配比，并对石灰砂浆的物化特性进行了系统的评价，在实际文物修复工作中具有指导性的价值。

由于作者能力有限，书中难免有错误和不足之处，有待今后研究工作的逐步推进和深入，缺点和瑕疵还请前辈和同行们批评指正！

作者

2015年4月30日于北京

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 岩土文物保护的历史沿革	1
1.1.2 岩土文物保护材料发展历史	3
1.2 岩土文物保护材料研究现状	5
1.2.1 无机材料	6
1.2.2 有机材料	7
1.2.3 有机—无机复合材料	7
1.2.4 水硬石灰	9
1.3 传统建筑材料的发展及应用	12
1.3.1 土质建筑材料	13
1.3.2 石质建筑材料	14
1.3.3 砖瓦类建筑材料	15
1.3.4 灰泥类建筑材料	17
1.3.5 传统建筑材料——料礓石和阿嘎土	18
第二章 中国传统石灰材料	29
2.1 中国古代的两种石灰材料	29
2.1.1 烧料礓石	30
2.1.2 蛎灰	31
2.2 石灰的主要种类及生产工艺	35
2.2.1 石灰的分类	35
2.2.2 石灰的生产工艺	36
2.3 中国传统的几种石灰类材料	38
2.3.1 石灰	39

2.3.2	蛭灰	39
2.3.3	糯米灰浆	39
2.3.4	捶灰	40
2.4	中国几种石灰材料的化学成分	40
2.5	不同气候条件下几种石灰材料的碳化特性	42
2.5.1	碳化后的 X-射线衍射分析	42
2.5.2	不同气候条件下石灰碳化后的岩相分析	46
2.5.3	不同气候条件下石灰碳化后的扫描电镜分析	52
2.6	中国几种传统石灰材料的物理力学性质	58
2.6.1	试样制备	58
2.6.2	物理力学性质	59
2.7	环境因素对中国几种传统石灰类材料结石体的影响试验	65
2.8	本章小结	74
第三章 古遗址建筑材料的科学认知		77
3.1	大地湾遗址概况	77
3.2	地面材料的化学组成及矿物成分	80
3.2.1	化学组成分析	80
3.2.2	偏光显微镜岩相鉴定	82
3.2.3	扫描电镜分析	82
3.2.4	X-射线衍射分析	84
3.3	地面材料的物理力学性质	86
3.3.1	容重和孔隙率	86
3.3.2	力学性能试验	86
3.4	碳十四年代测定	88
3.5	温度测定	89
3.6	模拟烧制试验	91
3.6.1	料礓石的烧制	91
3.6.2	烧料礓石和烧钙结核特性分析	95
3.7	本章小结	98
第四章 传统石灰原材料的改性研究		100
4.1	料礓石和阿嘎土的物理化学特性	101

4.1.1 料礓石和阿嘎土物理特性	101
4.1.2 料礓石和阿嘎土的化学组成	101
4.1.3 料礓石和阿嘎土的矿物组成	102
4.2 改性料礓石和阿嘎土的物理化学性质	106
4.2.1 料礓石和阿嘎土的改性方法	106
4.2.2 改性料礓石和阿嘎土的矿物成分	106
4.2.3 与欧洲水硬石灰的比较	118
4.2.4 改性料礓石和阿嘎土的化学特性	118
4.3 本章小结	126
第五章 改性传统材料结石体的力学性质及耐老化性能研究	130
5.1 改性料礓石和阿嘎土结石体的基本物理力学性质	130
5.1.1 试样制备	130
5.1.2 基本物理力学性质测试	131
5.2 改性料礓石和阿嘎土结石体的耐候性试验	135
5.2.1 固化温度对改性材料强度的影响	136
5.2.2 改性材料的水稳定性	137
5.2.3 改性材料的安定性	140
5.2.4 改性材料的耐碱性能	141
5.2.5 改性材料的抗冻融性能	142
5.2.6 改性材料的耐温湿性能	144
5.2.7 改性材料的耐风蚀性能	145
5.3 本章小结	146
第六章 水硬性石灰	150
6.1 水硬性石灰的历史	150
6.2 水硬性石灰的分类	152
6.3 中国的水硬性石灰	154
6.3.1 水硬性石灰的化学组成	154
6.3.2 水硬性石灰的矿物成分	155
6.4 欧洲的水硬性石灰	162
6.4.1 欧洲水硬性石灰的化学组成	162
6.4.2 欧洲水硬性石灰的矿物成分	163

6.5 烧料礅石、烧阿嘎土及水硬性蛎灰的基本物理力学性质对比研究	169
6.5.1 试样制备	169
6.5.2 物理力学性质	169
6.6 环境因素对烧料礅石、烧阿嘎土及水硬性蛎灰结石体的影响	174
6.6.1 固化温度对结石体强度的影响	174
6.6.2 结石体的水稳定性	176
6.6.3 结石体的安定性	177
6.6.4 结石体的耐碱性	178
6.6.5 结石体的耐冻融性	180
6.6.6 温湿度循环变化对结石体强度的影响	181
6.6.7 结论	183
6.7 欧洲水硬性石灰 NHL2、NHL5 结石体的基本物理力学试验	183
6.7.1 试样制备	183
6.7.2 物理力学性质	184
6.8 环境因素对欧洲水硬性石灰 NHL2 和 NHL5 结石体影响试验	188
6.8.1 固化温度对结石体强度的影响	188
6.8.2 结石体的水稳定性	189
6.8.3 结石体的安定性	191
6.8.4 结石体的耐碱性	192
6.8.5 结石体的耐冻融性	194
6.8.6 温湿度循环变化对结石体力学强度影响性	196
6.8.7 耐风蚀的风洞模拟试验	197
6.9 本章小结	198
 第七章 中国改性石灰类材料和欧洲水硬性石灰性能比较研究	200
7.1 前言	200
7.2 中国硅酸盐石灰材料与水硬性石灰化学组成及矿物成分比较	202
7.2.1 化学组成	202
7.2.2 矿物成分	203
7.3 中国传统硅酸盐石灰材料与水硬性石灰基本物理力学性质比较试验	204
7.3.1 试样制备	204
7.3.2 物理力学性质	205
7.4 环境因素对传统石灰类材料与水硬性石灰结石体影响的比较试验	212

7.4.1 固化温度对结石体强度的影响	212
7.4.2 结石体的水稳定性	214
7.4.3 结石体的安定性	218
7.4.4 结石体耐碱性	220
7.4.5 结石体的耐冻融性	222
7.4.6 温湿度循环变化对结石体影响试验	224
7.4.7 结论	226
7.5 黏结加固试验	226
7.5.1 试验方法	227
7.5.2 黏结浆液配制	227
7.5.3 黏结试样制备	227
7.5.4 抗拉强度测试	228
7.5.5 结论与分析	229
第八章 水硬性石灰砂浆的物化特性分析	232
8.1 试验原材料与方法	232
8.1.1 试验原材料	232
8.1.2 试验方法	232
8.2 水硬性石灰的物化特征及砂浆性能测试结果与分析	234
8.2.1 水硬性石灰的物化特征	234
8.2.2 新拌浆体性能	238
8.2.3 硬化浆体基本性能	243
8.3 本章小结	249
第九章 基于水硬石灰的砂岩石窟裂隙灌浆材料研究	251
9.1 砂岩石窟裂隙灌浆材料	251
9.1.1 注浆材料主剂选择	251
9.1.2 注浆材料添加剂选择	252
9.1.3 注浆材料膨胀剂选择	253
9.2 最佳配比注浆浆材筛选实验	253
9.2.1 主剂和添加剂最佳配比试验	254
9.2.2 最佳水灰比筛选试验	257
9.2.3 膨胀剂的掺入量对浆液结石体的影响	260

9.3 物理力学性质试验	263
9.3.1 浆液及试块制备	263
9.3.2 流动度测试	263
9.3.3 标准稠度及凝结时间的测定	264
9.3.4 物理力学性质实验	264
9.4 本章小结	272
 第十章 改性传统石灰材料加固岩土质文物的应用研究	274
10.1 南京报恩寺地宫遗址的保护加固试验	274
10.1.1 遗址概况	274
10.1.2 价值评估	275
10.1.3 遗址区环境	278
10.1.4 南京报恩寺地宫遗址现状及病害特征	278
10.1.5 加固试验	281
10.1.6 结果及讨论	285
10.2 内蒙古元上都遗址的保护加固试验	286
10.2.1 元上都遗址概况	286
10.2.2 价值评估	288
10.2.3 元上都遗址现状及病害特征	289
10.2.4 元上都遗址加固材料的室内试验	291
10.2.5 结果及讨论	296
10.3 高句丽壁画墓地仗加固材料试验	297
10.3.1 遗址概况	297
10.3.2 麻线一号墓壁画病害现状与成因分析	301
10.3.3 地仗加固材料的室内试验研究	304
10.3.4 地仗加固材料的现场试验	307
10.3.5 结论	312
10.4 承德安远庙及溥仁寺石质文物的保护加固试验	312
10.4.1 承德避暑山庄及周围寺庙凝灰岩石质文物概况	312
10.4.2 承德避暑山庄凝灰岩文物主要劣化形态	316
10.4.3 承德避暑山庄凝灰岩的基本性质	318
10.4.4 承德避暑山庄凝灰岩的劣化机理	336
10.4.5 承德避暑山庄凝灰岩加固室内试验研究	343

10.4.6 承德避暑山庄凝灰岩现场试验 351

10.4.7 结果及讨论 354

10.5 本章小结 356

后 记 358

第一章 绪论

1.1 引言

1.1.1 岩土文物保护的历史沿革

文物保护是指为保存文物古迹实物遗存及其历史环境进行的全部活动。其目的是真实、全面地保存并延续其历史信息及全部价值；其任务是通过技术和管理的措施，修缮因自然和人为造成的损伤，制止新的破坏。岩土质文物的保护是我国现阶段文化遗产保护中最重要的研究领域之一。在我国，岩土质文物分布广泛，种类丰富，如不可移动文物中的石窟寺、摩崖造像、岩画、古壁画等；长城、烽燧、关隘、古城等土建筑遗址等；石雕、砖及陶等可移动文物。我国遗存有大量的岩土质文物，作为极其脆弱的一类文物实体，承载着大量珍贵的历史信息，蕴藏着我国历代政治、经济、艺术、建筑、科技诸方面极为重要的形象资料，是我国古代文明的实物标本，是民族文化遗产的物质载体，具有民族团结和文化认同的感召力和凝聚力，也是我国优质国有资产和当代极其珍贵的文化旅游资源。岩土质文物近年来成为文物保护工作者重点关注的对象之一，其保护需求也日益强烈，而保护工作成败的关键在于所用保护材料和工艺是否得当，因此保护材料与工艺的研发一直是文物保护工作者攻关的技术难点。

现代意义上的文物保护始于 17 世纪。以法国、英国及美国等西方资本主义国家为代表，主要是通过成立文物保护机构或国家立法的形式对文物进行国家层面的保护。国际上最具影响的国际性非政府组织国际古迹遗址理事会（ICOMOS, International Council on Monuments and Sites），自 1913 年成立至今，颁布了一系列与文物保护相关的国际宪章、宣言和公约，这些文件及相关工作反映着人们对文物保护原则及方式进行不懈探索和完善的历程。我国的文物保护工作起步于上个世纪 20 年代，开始相对较晚。随着当时考古工作得到重大进展，文物保护工作才逐渐得到人们的重视。从 1929