

灰作十问

建成遗产保护石灰技术

BUILDING LIME AND ITS APPLICATION FOR
THE RESTORATION OF BUILT HERITAGE

戴仕炳 钟 燕 胡战勇 著

by Dai Shibing, Zhong Yan & Hu Zhanyong



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

灰作十问

建成遗产保护石灰技术

BUILDING LIME AND ITS APPLICATION FOR
THE RESTORATION OF BUILT HERITAGE

戴仕炳 钟 燕 胡战勇 著

by Dai Shibing, Zhong Yan & Hu Zhanyong



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

灰作十问：建成遗产保护石灰技术 / 戴仕炳, 钟燕,
胡战勇著. -- 上海: 同济大学出版社, 2016.12
ISBN 978-7-5608-6668-0

I. ①灰… II. ①戴… ②钟… ③胡… III. ①古建筑
- 文化遗产 - 保护 - 中国 IV. ① TU-87

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 291964 号

灰作十问：建成遗产保护石灰技术

BUILDING LIME AND

ITS APPLICATION FOR THE RESTORATION OF BUILT HERITAGE

戴仕炳 钟 燕 胡战勇 著

Dai Shibing, Zhong Yan & Hu Zhanyong

责任编辑 荆 华 责任校对 徐春莲 封面设计 张 微

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址: 上海四平路 1239 号 邮编: 200092 电话: 021 - 65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 上海安兴汇东纸业有限公司

开 本 787mm × 960mm 1/16

印 张 11

印 数 1—2 100

字 数 220 000

版 次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6668-0

定 价 98.00 元

本书若有印装问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

目 录

序
前言

上篇 类型及原理

1 为什么石灰成为人类文明史上的重要材料	017
1.1 石灰：传统社会的重要建材	017
1.2 我国古建遗产中石灰的应用	019
1.3 石灰的复兴之修复材料的宠儿	023
1.4 石灰的复兴之生态意义	025
1.5 我国石灰发展现状	028
本章小结	030
2 建筑石灰有几类	031
2.1 我国现行石灰分类	032
2.2 欧洲石灰分类	033
2.3 本书采用的石灰及定义	037
2.4 石灰的颜色	043
本章小结	044
3 气硬性石灰应用需要注意的问题	045
3.1 气硬性石灰的原材料及其烧制、消解	045
3.2 气硬性石灰的固化与自愈——碳化	047
3.3 气硬性石灰的“伴侣”——传统方法	050

3.4	热石灰	053
3.5	气硬性石灰物理改性——分散石灰	055
3.6	高科技石灰：无水纳米—微米石灰	057
3.7	石灰调色	059
3.8	石灰砌筑与抹面砂浆基础配合比	060
	本章小结	062
4	天然水硬石灰的“天然”在何处	063
4.1	天然水硬石灰怎么生产出来的	064
4.2	天然水硬石灰的特点	065
4.3	天然水硬石灰与水泥的区别	067
4.4	天然水硬石灰的固化机理	068
4.5	天然水硬石灰的应用问题	070
4.6	调合石灰的问题	073
	本章小结	074
5	石灰为什么能永久固化土	075
5.1	土的特点及其改性	076
5.2	石灰固化土的原理	078
5.3	水泥可以加固土吗	081
5.4	灰土配比优化	082

5.5 无水灰土灌浆料	084
本章小结	088
6 如何定性——定量恢复古代灰浆配方	089
6.1 定性方法	089
6.2 半定量—定量方法	092
6.3 复配实验	096
本章小结	099

下篇 应用与实践

7 传统屋顶苫背：灰好还是泥好	103
7.1 历史屋面防水构造	104
7.2 古代苫背材料分析	105
7.3 不同类型苫背植物生长实验	107
7.4 石灰对砖瓦等的二次固化	108
7.5 灰、泥苫背湿热交替仿真模拟	110
本章小结	112
8 广西左江花山岩画抢险加固为什么选择天然水硬石灰	113
8.1 花山岩画的病害特点	115
8.2 抢救加固材料的选择	115

8.3 花山岩画抢救性加固材料的研发	117
本章小结	120
9 如何采用石灰牺牲性保护清水砖墙	121
9.1 清水砖墙主要材料特点	121
9.2 清水砖墙病害特点	125
9.3 既有的保护修缮措施评估	128
9.4 什么是牺牲性保护	131
9.5 应用于清水墙的牺牲性保护方式及其材料性能指标	132
本章小结	139
10 石灰岩类文物保护技术上为什么难	141
10.1 石灰岩特点	141
10.2 石灰岩劣化特点及机理	142
10.3 石灰岩文物保护的对策	146
10.4 石灰岩保护的现代关键技术与未来展望	148
本章小结	155
附录：石灰及其工法术语	157
参考文献	160
后记	172

Contents

Preface

Introduction

Part I: Different limes and their principles

Chapter 1 Why lime matters 017

1.1 Lime as a traditional building material017

1.2 The application of lime in the history of China019

1.3 The revival of lime for heritage conservation023

1.4 Lime is an ecology material025

1.5 Status quo in China028

Summary.....030

Chapter 2 Building lime family 031

2.1 Classification of building lime in China032

2.2 Classification of building lime in Europe033

2.3 Proposed classification and defination of building lime in China.....037

2.4 Colour of building lime043

Summary044

Chapter 3 Application of air lime 045

3.1 Raw materials, calcination and slaking045

3.2 Hardening process and autogenous healing of air lime through carbonation...047

3.3 Mortar mix design of air lime–traditonal methods.....050

3.4 Hot lime053

3.5	Dispersed air lime	055
3.6	Hi-tech: Nano lime –micro lime	057
3.7	Blend lime	059
3.8	Recipe of lime mortar mix for masonry and plastering	060
	Summary	062
Chapter 4 The nature of natural hydraulic lime (NHL)		063
4.1	Production of NHL	064
4.2	Properties of NHL	065
4.3	The difference between NHL and cement	067
4.4	The hardening process of NHL	068
4.5	Craftsman's practice guide	070
4.6	Application of formulated lime	073
	Summary	074
Chapter 5 Why lime can stabilize soil - lime for earth heritage		075
5.1	Soil and its stablization	076
5.2	Mechanisms of lime stabilization	078
5.3	Can cement stabilize earth	081
5.4	Optimize lime–earth formulation	082
5.5	Water–free lime–mud grouts for plaster reattachment	084
	Summary	088

Chapter 6	How to analyze historic lime mortar	089
6.1	Qualitive methods	089
6.2	Semiquantive–quantitive methods	092
6.3	Formulation matching and further research	096
	Summary	099

Part II: Practical lime–applied conservation projects

Chapter 7	Mortars for traditional Chinese architecture roofs: what the difference among lime, earth and lime with earth	103
7.1	Historic roof profile in northern China	104
7.2	Analysis results of historic roof mortars	105
7.3	Results of plant growth of different roof mortars	107
7.4	Subsequent consolidation of lime in traditional roof tiles and bricks	108
7.5	Hygrothermal simulation of traditional roof construction	110
	Summary	112

Chapter 8	Why Natural Hydraulic Lime has been chosen for emergency retrofitting of Huashan pictographs in Guang Xi, China	113
8.1	Deterioration of lime stone in Huashan	115
8.2	Research works to optimize consolidation materials	115
8.3	Formulation and application	117

Summary	120
Chapter 9 How to use lime as sacrificial material for the conservation of fairfaced brick facade	121
9.1 Materials of fairfaced brick facade	121
9.2 Deterioration of bricks and pointing	125
9.3 Evaluation of conventional restoration measurements	128
9.4 What is sacrificial conservation	131
9.5 Defination of sacrificial measures and material specifications to sacrificially preserve fairfaced brickwork	132
Summary	139
Chapter 10 Why is it difficult to preserve limestone	141
10.1 Properties of limestone as heritage materials	141
10.2 Deterioration of limestone	142
10.3 Strategical options for limestone conservation	146
10.4 Comments on current and future-oriented conservation methods	148
Summary	155
Appendix: Lime and related terminology	157
Bibliography	160
Postscript	172

灰作十问

建成遗产保护石灰技术

BUILDING LIME AND ITS APPLICATION FOR
THE RESTORATION OF BUILT HERITAGE

戴仕炳 钟 燕 胡战勇 著

by Dai Shibing, Zhong Yan & Hu Zhanyong



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

灰作十问：建成遗产保护石灰技术 / 戴仕炳, 钟燕,
胡战勇著. -- 上海: 同济大学出版社, 2016.12
ISBN 978-7-5608-6668-0

I. ①灰… II. ①戴… ②钟… ③胡… III. ①古建筑
- 文化遗产 - 保护 - 中国 IV. ① TU-87

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 291964 号

灰作十问：建成遗产保护石灰技术

BUILDING LIME AND

ITS APPLICATION FOR THE RESTORATION OF BUILT HERITAGE

戴仕炳 钟 燕 胡战勇 著
Dai Shibing, Zhong Yan & Hu Zhanyong

责任编辑 荆 华 责任校对 徐春莲 封面设计 张 微

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址: 上海四平路 1239 号 邮编: 200092 电话: 021 - 65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 上海安兴汇东纸业有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 11

印 数 1—2 100

字 数 220 000

版 次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6668-0

定 价 98.00 元

本书若有印装问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

序

Preface

传统建筑营造中的灰作，包括了灰土、灰浆、灰泥、灰塑等材料配比技术及其施工工艺。其中，石灰以其强度和韧性上的天然特性，在灰作材料合成中起着举足轻重的作用。从地基处理、基础构成、构件砌筑、面层制作，直到装饰效果，没有一样离得开灰作的关键性参与。因而自古以来，灰作就是土木工程的基本工种、工序和匠技之一，并通过工匠的代代口传（口风）和手传（手风）延续下来。

如今，灰作作为建成遗产保护工程技术的重要组成部分，在实际运用中也面临着提升性能、优化机理、改良配比、新旧工艺兼容以及环境适应等技术难题。一言以蔽之，灰作作为传统“低技术”的一种，需要在传承中获得现代意义上的再生。同济大学建筑与城市规划学院历史建筑保护实验中心主任戴仕炳教授，以20余年的研究和实践经历，一直承担着这一历史的重任。

戴教授作为材料工程的学术和实践的双重精英，在国内建成遗产保护工程领域是首屈一指的材料病理诊断和修复专家。他长期坚持术业专攻，对灰作，特别是石灰材料及其工艺，用功甚勤，探研尤深，经他参与主持的北京、上海、平遥、澳门等地著名的建成遗产修复工程已享誉海内外。《灰作十问》这部力作就是他对多年来在灰作技术研究和实践方面取得成果的总结，对建成遗产保存和修复工程有着难得的启发价值和借鉴意义。作为同事和朋友，特以此短文向他致敬和致贺。

是为序。

中国科学院院士
同济大学城乡历史环境再生研究中心主任



丙申冬月于同济校园

前言

Introduction

在石灰的开发与使用方面,19世纪以前,中国与欧洲有非常相似的发展轨迹。中国人与欧洲人均认为,越纯的石灰石烧制出的石灰质量越好(宋《营造法式》及《天工开物》中提到的“矿灰”,也可能是“块灰”的谐音)。在我国,这种观念一直延续至今。但在欧洲,得益于实验科学、矿物学等自然科学的发展,发现含有杂质的石灰石烧制的石灰,干法消解后使用,具有更高的强度、更优的耐水和耐冻性能等。这一发现直接导致1818年“水硬性石灰”概念的提出,以及之后水硬性石灰的规模化生产,还有水泥等的发明。整个欧洲在20世纪30年代就提出了较为完整的建筑石灰标准,为欧洲统一后欧盟标准委员制定的欧盟石灰标准奠定了基础。

我国建成遗产保护专业领域对石灰理解存在两个极端:一种认为石灰在很多性能方面达不到要求,为追求强度及所谓耐久性而放弃石灰;另一种观点认为石灰是万能的,可以解决建成遗产保护的所有问题,排斥其他无机材料。其实,石灰是性能优异的材料,石灰类型很多,而且有不同的工法,甚至可

以通过添加物来实现其特殊功用。但如使用不当,也会导致某些石灰强度过高,或过于致密,一样会产生次生病害。因此,必须知其道,才能用其妙。

现今我国和欧洲在20世纪三四十年前出现的问题相似,在建成遗产保护实践中,大量使用水泥,导致本体出现无法恢复的损害。替代水泥是目前实际工作中保护修缮工程普遍的诉求。

本书是研究者过去二十余年研究成果的总结,分上、下两篇:上篇六章,侧重原理,包括石灰种类及划分依据、固化机理等,同时还为如何科学考证古代石灰配比提供一条思路;下篇以四个案例来分析石灰在不同方面应用的可能性和未来的发展方向。

目前国内对石灰及其相关的概念表述各异,本书的石灰命名分类参照欧洲标准体系,希望能够通过本书,在我国对石灰的术语和概念方面达成共识有所贡献。采用不同的石灰类型可以通过配合比优化,配制出完整的强度系列砂浆。另外,书中还提供了不同强度、不同应用领域的石灰配比,供具体

工程设计参考。同时附有案例分析，试图说明石灰家族中总有一款，或者通过优化可以替代水泥及有机材料，保护我们稀有的建成遗产。

本书中提到的“牺牲性”保护，是指牺牲“新”的修复材料达到保护遗产本体的技术手段，其重要意义在于强调对历史材料的重视，明确修复材料的本质目的在于为文物本体提供防护，而不在于展示新材料本身的耐久性。牺牲保护的理念提出是为了在对病害机理不明确、病因无法根除，或新、旧材料兼容性不确定等情况下，又必须对文物本体进行干预的“缓冲”，为找到更科学化的方案赢得时间，避免采取所谓的“高科技”保护措施而带来无法挽回的损害。本书以清水砖墙为例，分析了牺牲性保护的技术可能性并给出了相对应的修复用石灰材料。

石灰的应用不仅局限于建筑与文物保护，它更是一个生态材料。人类最早、最容易获得的天然强碱性材料就是石灰，它可以杀菌、消毒，并不容易导致过敏。另外，石灰在机械性能及环保方面存有众多优势。

希望本书能够以专业水准介绍有关建筑石灰的具体知识，使石灰能够重新为我们认识和重视。

本书由戴仕炳教授负责策划并完成大部分章节的撰写工作，钟燕负责第一章及附录石灰及其工法术语并参与第二、四、五、九章的撰写，并绘制大部分示意图；胡战勇负责第四章并参与第二、五、六、八、十章的撰写。此外，王金华、周伟强、刘忠、周月娥、张德兵、刘斐、居发玲及研究生格桑 Gesa Schwantes、王冰心等参与部分章节撰写工作，吕世杰帮助校对文稿。在此特对团队紧密合作表示感谢。

衷心感谢中国科学院院士、同济大学教授常青先生为本书作序，更要感谢同济大学出版社在出版过程中给予的支持。

由于作者水平有限，时间仓促，书中难免存在疏漏及不足之处，恳请读者批判指正，以期再版完善。

戴仕炳 钟 燕 胡战勇
2016年10月于上海

目 录

序

前言

上篇 类型及原理

1 为什么石灰成为人类文明史上的重要材料	017
1.1 石灰：传统社会的重要建材	017
1.2 我国古建遗产中石灰的应用	019
1.3 石灰的复兴之修复材料的宠儿	023
1.4 石灰的复兴之生态意义	025
1.5 我国石灰发展现状	028
本章小结	030
2 建筑石灰有几类	031
2.1 我国现行石灰分类	032
2.2 欧洲石灰分类	033
2.3 本书采用的石灰及定义	037
2.4 石灰的颜色	043
本章小结	044
3 气硬性石灰应用需要注意的问题	045
3.1 气硬性石灰的原材料及其烧制、消解	045
3.2 气硬性石灰的固化与自愈——碳化	047
3.3 气硬性石灰的“伴侣”——传统方法	050