

波特兰水泥化学

上册

R. H. 鲍 格 著

楊德驥 朱祖培 黃大能合译

中国工业出版社

波特兰水泥化学

上册

熟料形成的化学

熟料组份的相平衡

R
楊德麟

江苏工业学院图书馆
藏书章
H·格著
朱祖培 黄天能合译

中国工业出版社

本书根据1955年紐約出版的“波特兰水泥化学”修訂本譯出。全书分为熟料形成的化学、熟料組份的相平衡和水泥应用的化学三个部分。中譯本分上下两册出版。上册包括熟料形成的化学和熟料組份的相平衡两个部分，叙述波特兰水泥熟料的生产技术与基本原理；下册为“水泥应用的化学”部分，叙述波特兰水泥的水化、硬化的理論。全书蒐集了較为丰富的資料。对近代新技术新发现，特别是X-射綫、电子光学、光譜分析以及差热分析等，在熟料无水化合物与水化水泥的晶体构造等方面的研究与应用，都作了闡述。

本书可供从事水泥生产、研究、設計、教学、使用等方面的技术人員参考。

Robert Herman Bogue

THE CHEMISTRY OF PORTLAND CEMENT

Reinhold Publishing Corporation

New York—1955

* * *

波特兰水泥化学

上册

楊德驥 朱祖培 黃大能合譯

*

建筑工程部編輯部編輯（北京西便門外大街）

中国工业出版社出版（北京修門外大街10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第10号）

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本850×1168 $\frac{1}{32}$ ·印張15 $\frac{1}{4}$ ·字數388,000

1963年10月北京第一版·1963年10月北京第一次印刷

印數0001—1,410·定价（10-6）2.35元

*

統一書号：15165·2122（建工-288）

譯 者 序

在快硬、高強、輕質以及其他，例如耐高溫、耐高壓、抗震、抗爆破、防輻射綫等等一系列的要求下，現代水泥混凝土工藝正進入一個新的歷史時期。為了適應這個新形勢，幾年來我國水泥工業也正朝着這個方向努力。前進道路上的重要環節是依靠自力更生，但也需要不斷吸取世界各國先進經驗，特別是各國在水泥科學理論上的成就。

比較完整而有系統的水泥理論書籍，在國際上原不很多。這本“波特蘭水泥化學”是其中較著名的一本。作者羅勃脫·赫門·鮑格 (Robert Herman Bogue) 曾經是美國波特蘭水泥協會研究會的創始人與負責人。他又曾是1938年在瑞典斯德哥爾摩舉行的第二屆波特蘭水泥化學國際會議和1952年在英國倫敦舉行的第三屆波特蘭水泥化學國際會議的組織者之一，在國際水泥科學界享有一定聲譽。

本書原文初版於1947年，而這個譯本則是從1955年經增訂後的第二版譯出的。全書分為三個部分，第一部分熟料形成的化學，第二部分熟料組份的相平衡，第三部分水泥應用的化學。這三個部分系統地概括了水泥化學的各個方面。在第二版增訂中，作者還補充了一些水泥化學近代的新技術和新發現，如近代單晶X-射綫技術用於研究水泥熟料化合物的原子結構，電子顯微鏡和電子衍射儀器用於觀察物質形態，差熱分析與光譜分析的应用等，使人們對於水泥熟料無水化合物和水泥水化物的微觀結構等方面有了進一步的認識，而這些新技術的应用也標誌着近代水泥科學的發展水平。

作者所搜集的有關技術文獻較為豐富，然而社會主義國家的文獻引用得較少。書中對於一些重要的學術問題，一般都引用了

不同学者的实验结果和结论。对于至今尚存在着的分歧意见，则一般地做到兼容并蓄，虽然有时作者也提出了本人的看法。因此，总的说来，作为一本理论参考用书，对于需要比较全面地了解有关理论的发展过程，以及对于了解各个学者对某些理论的不同见解是有一定价值的。

主要感到不足的是本书仅限于介绍波特兰水泥化学理论，对于仍属波特兰水泥范畴的其他品种水泥，特别是在我国已被广泛利用的掺入水泥中的矿渣和火山灰质混合材料对水泥质量的影响，叙述太少。

本书第一章所介绍的水泥工业发展历史及其演变，当然是代表着西方国家的一般看法，不能作为定论。关于水泥发展的历史问题，还须好好做一番考证工作。

本书技术名词的翻译，引用的是1954年中国科学院的化学化工术语，1957年科学出版社的矿物学名词和1956年科学出版社的岩石学名词。对于上述各书未曾包括的技术名词以及至今尚未统一的技术译名，例如托勃莫来脱（Tobermorite）、A-岩（Alite，阿里特）、胶滞体（Gel，凝胶）等则系由译者斟酌后确定的。为便于读者查对，在书尾附有全部译名的中英文对照表以供参考。同样地，书中涉及的外国人名也附有人名对照表。

本书由杨德驥译第一部分，朱祖培译第二部分，黄大能译第三部分，并相互进行了校对。

限于译者的技术和翻译能力，差错必然不少，尚希读者多作指正。

1962年8月北京

第 二 版 序

在本书第一版問世的七年中，波特兰水泥領域內研究工作的情况，发生了根本的变化。本世紀以前，水泥研究的最終目的是掌握各种原料配方的燒結特性，探討熔剂数量在最大或最小时的影响，或者帮助工程师們制造一种质量优于水硬石灰的新型水泥。其后，本世紀第一个二十五年期間，进入一个試驗、制定标准、积累大量与混凝土設計有关的統計資料、以及改进水泥生产設備的时期。而在第二个二十五年中，又进入了一个實驗室化学和物理研究人員，将科学定律用于水泥生产和使用的技术方面的时期。他們的目的是企图发现在一定組成和細度的原料配合下，有控制地加热或冷却，以及水泥产品加水和摻外加物后所必然产生的影响。这些研究报告所启发和指引的途徑，使水泥工业获得巨大的发展，这足以証明他們的努力所获得的成就。

最近几年，水泥化学这一領域，又有了迅速的进展。这些进展是如此重要，因而标志着进入了一个科学地解决水泥工业中存在的問題的新时期。新的探索，大部分針对着构成水泥及它的水化物的相的最終分子結構和晶体結構的研究。这些結構的測得主要是采用了X-射綫、电子射綫、光譜分析和差热分析等方法。而这些結構的重要性，可以从它們的获得解决和积累起来的知識来証明。应用这些知識，使水泥工作者可以采用新的方法来控制生产和产品质量，以滿足建筑业进一步的要求。同时，这些知識也可以使建筑工程师采用新的控制方法，来設計和使用混凝土，以滿足各种工程的要求。

在增訂第二版中，我曾尽可能地收集了近几年来文献資料中的大量有用的材料，以使这本书能赶上时代。但最有意义的事，无过于来自全世界各个研究中心的上述的新发现，即关于水泥无

水化合物和水化物的結構特征的发现。至于这些发现，将如何应用到熟料的生产和混凝土的配制方面，那是今后十年的事情。然而毫无疑问，那样重要的应用，必然是会实现的：

“时光飞逝，事物推移，
前辈的典则，曾最优异；
然而，无疑地，后人更有高见，
理论发展，更高的智慧随着出现。”

（ J · R · 劳威尔：“幕后一瞥” ）

为了表达我的衷心谢意，我还必须补充下列给我帮助的波特兰水泥协会研究会的同事们：

F · 奥德威 M · 斯威德罗

T · F · 纽克尔克 F · 海克曼

M · 格拉梭

我还应该特别感谢 M · 格拉梭，因为他帮助了我仔细阅读校样和编排索引。

R · H · 鲍格

1954年10月1日

于华盛顿

第 一 版 序

波特兰水泥的生产和使用，涉及各种不同的科学技术领域。假如全部问题都要详尽讨论，则需要一系列的论著。其中之一可能只讨论水泥生产的工艺学，另外一册讨论混凝土的设计和配制，也可能有一册专门讨论混凝土和钢筋混凝土结构的设计和制造，此外，还可能专门研究从岩石制成水泥的化学过程和从水泥又再制成人造石，即我们称之为混凝土的化学过程。

但是，在对任何一个问题进行充分研究时，不能忽视它们作为最后成品的组成部分的相互联系。不可能有一个专家或工作者能够全面精通上述任何一个领域、除非他对每一个领域均具有明确的理解，因而能在他的思考中，怀有广博的观点。因此这本书是为水泥化学工作者写的，并且是从研究工作者的观点来探讨这门工业的化学问题的。然而，作者也不忘记使这本书能有益于企业领导者、工程师以及非本行的读者。

如果要全面叙述，不可避免会发生重复，本书的命题是波特兰水泥化学，但也涉及到一些其他方面，我认为只有对过去的知识有所了解，才能对现在的进行评价，因而我相当详细地叙述了现代观点的概念的历史和发展的背景。我仅仅简单叙述了水泥的生产过程，但对其中化学过程的操作，叙述得较为详细。对于水泥浆的物理性质和混凝土设计，只有当化学过程影响到时，才偶而提到它们。我避免涉及混凝土，除非当混凝土的各个组分——水泥浆、集料、水或外加物——参与化学反应，因而影响到混凝土结构的耐久性 or 质量时，才谈到它。为了不过分增加书的篇幅，我严格地限制只讨论波特兰水泥，同时也不包括一般的化学或物理试验方法，因为这些很容易在其他书内找到。

论题可以很自然地分成两大类：熟料形成的化学和水泥应用的化学。前者主要研究固态下的高温反应，后者是水泥与水或其

他溶液之間的反应。这两部分的研究构成了第一篇和第三篇。但是，这两部分都与一定条件下形成的相的种类和稳定性有密切关系。这方面的技术知識以及循此途徑研究水泥的許多問題所获得的結果是这样重要，所以必須成立单独一部分，即第二篇，对水泥各体系的相平衡作專門的討論。

水泥化学工作者早就采用了一种化学符号的縮写法，这种縮写法的目的有二：节省地位和使化学式易于閱讀。我交替地采用了这种方法和旧的符号。

不准备提供整套书目，只在每一章后面附有参考文献，作为該章所討論問題的有关文献的索引。

书中所述見解或对研究工作的說明，都只作为我个人的观点提出的，在任何情况下，都不反映波特兰水泥协会或国家标准局的意見。

承蒙許多作者和出版社允許我翻印显微照相和图表；許多与水泥工业有关的单位提供了特殊的資料；波特兰水泥协会和国家标准局允許我采用許多尚未发表的参考文献，我謹对他們表示感謝。同时，还要特別感謝和我一起在波特兰水泥协会研究会工作的同事們：

F. W. 阿司頓

G. W. 华德

W. C. 汉森

I. C. 勃奇脫尔德

Wm. 勒奇

H. O. 森克尔森

L. T. 勃明密勒

A. C. 波納諾

E. A. 哈林頓

K. T. 格陵

Wm. C. 泰勒

A. W. 海尔茲

R. C. 勃拉恩特

C. 平克尔頓

A. 阿丹

Wm. R. 尤班克

E. G. 席格尔斯

L. A. 达尔

R. H. 鮑格

1947年1月15日

于华盛顿国家标准局

目 录

譯者序	3
第二版序	5
第一版序	7

第一篇 熟料形成的化学

第一章 水泥工业的历史 ...	1
古代的水泥	1
波特兰水泥的发明	4
約翰·司梅頓	4
伯扬·黑京士	6
柏格曼	7
約瑟夫·派克	7
L·J·維卡	8
J·F·約翰	9
詹姆斯·弗劳斯特	10
約瑟夫·阿斯普丁	10
I·C·約翰森	11
水泥工业的发展	12
大維·賽勒	14
水泥产量的增长	14
第二章 水泥的分类	22
第三章 波特兰水泥的	
制造	37
操作概述	38
原料的来源	39
原料的配合	41
窑料的制备	43

干法	44
湿法	45
浮选	49
煅烧操作	52
美国的操作情况	53
欧洲的革新	55
熟料的处理	58
水泥的性质	60
水泥制造中的联合	
生产方法	62
第四章 波特兰水泥结构的	
早期試驗	64
假想时期	65
科学方法的应用	66
显微研究	69
亨利·雷·霞特利	69
A·E·脫奈波姆	70
研究工作的比較	71
同时代的其它理論	72
固溶体的假說	75
克立福得·里查逊	75
威尔汉姆·米契阿里斯	78
E·D·坎貝尔和	
A·H·怀特	79
水泥化合物的結構式	81
W·阿許和D·阿許	81
欧納斯特·馬丁	83
F·W·克拉基	85

第五章 研究方法87

岩相技术88

粉末載片和薄片88

磨光薄片89

侵蝕技术90

X-射綫粉末衍射95

电子显微术和衍射99

化学方法101

游离CaO102

凝結水泥中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 105

水泥中的游离

CaO 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 107

未化合的氧化鎂的測定 108

光譜分析110

火焰光度計112

极譜分析113

溶解热114

試驗步骤114

玻璃体含量的計算115

第六章 制造中的热处理 125

煅烧过程125

碱的揮发130

熟料形成的热反应134

冷却过程145

第七章 熟料的主要成分 151

显微結構151

硅酸三鈣154

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的穩定性154

A-岩問題159

硅酸二鈣167

$\alpha - \beta$ 轉化167

$\alpha - \text{C}_2\text{S}$ 固溶体170

$\beta - \gamma$ 轉化177

游离 CaO 和 MgO 178

間充物质181

矩形黑色間充物质181

柱形黑色間充物质184

非晶体黑色間充物质189

淡色間充物质192

晶体結構194

鋁酸三鈣194

勃朗密勒的“亚穩相”196

硅酸二鈣199

硅酸三鈣204

第八章 水泥組份的

化合作用209

固态反应210

顆粒大小的影响213

組成的影响215

液相生成的溫度216

液相生成的数量223

矿化剂的加入225

化合物飽和的影响227

第九章 水泥組成的

設計和控制233

配比公式的发展234

化学控制的原理244

不同方法制得的熟料

組成的比較248

第十章 相組成的計算252

平衡結晶253

含有液相的平衡

混合物256

体系的分类258

不平衡冷却	263
结晶区域的分类	263
液相的单独结晶	265
一般方程式	272

第二篇 熟料組份的 相平衡

第十一章 高温相研究的

原理	277
相律	277
相律的用途	277
相律的演算	278
二元系	281
多元系	285
无化合物生成	286
结晶过程	286
計算組成的达尔法	288
在熔点下稳定化合物的 生成	290
在熔点下不稳定化 合物的生成	292
加热后的阶段	294
含有固溶体的三元系的 结晶过程	295
多元系的分析处理法	299

第十二章 高温相研究的

技术	304
一般方法	305
准备工作	305
淬冷法	305
緩冷法	306
差热分析法	307

炉子裝置	308
馬弗电炉	308
盛放試样的容器	309
淬冷炉	310
离心炉	312
鉑片炉	313
鉍炉	314
鉍鉍炉	314
电阻炉	314
太阳炉	316
感应炉	316
溫度控制	316
热电偶的校正	318
差热分析法的設備	319
試驗車間	326

第十三章 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

体系	329
氧化物	329
氧化鈣(石灰, CaO)	329
二氧化硅(硅石, SiO_2)	330
三氧化二鋁(矾土, Al_2O_3)	331
$\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 体系	332
相的关系	332
硅酸鈣的光学性能	335
硅酸鈣的制备	338
$\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 体系	341
相的关系	341
鋁酸鈣的組成	343
鋁酸鈣的光学性能	345
鋁酸鈣的制备	346
$\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 体系	347

CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ 体系	348
稳定区	348
结晶区	352
结晶过程	354
波特兰水泥的区域	358

第十四章 含有MgO与CaO、 Al₂O₃、SiO₂的 体系

MgO	362
CaO-MgO	363
MgO-Al ₂ O ₃	363
MgO-SiO ₂	364
CaO-MgO-Al ₂ O ₃	364
CaO-MgO-SiO ₂	365
C ₂ S-MgO-C ₅ A ₃	367
CaO-MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	369

第十五章 含有FeO、TiO₂及 P₂O₅的体系

氧化亚铁体系	373
Fe ₃ O ₄ -Fe ₂ O ₃	374
CaO-FeO	375
SiO ₂ -FeO	375
CaO-FeO-SiO ₂	377
MgO-FeO-SiO ₂	378
FeO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	378
CaO-FeO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	379
氧化钛体系	381
TiO ₂	381
TiO ₂ -SiO ₂	381
TiO ₂ -Al ₂ O ₃	381
Na ₂ O-TiO ₂	382
CaO-TiO ₂ -SiO ₂	382

含P₂O₅的体系

第十六章 含有Fe₂O₃与CaO及 SiO₂的体系

Fe ₂ O ₃	386
CaO-Fe ₂ O ₃	386
CaO-C ₂ S-CF	388
CaO-C ₂ S-C ₂ F	389
CaO-Fe ₂ O ₃ -CaCl ₂	392

第十七章 含有MgO及Fe₂O₃ 与CaO及Al₂O₃的体 系

Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	393
MgO-Fe ₂ O ₃	393
CaO-C ₅ A ₃ -CF	394
C ₄ AF-MgO	399
CaO-CA-C ₄ AF	400
CaO-C ₅ A ₃ -C ₂ F	403

第十八章 含有MgO及Fe₂O₃ 与CaO、Al₂O₃及 SiO₂的体系

CaO-C ₂ S-C ₅ A ₃ -C ₄ AF	409
CaO-C ₂ S-C ₅ A ₃ -C ₂ F	417
CaO-C ₂ S-C ₅ A ₃ -C ₂ F 体系, 按 5 % MgO 修正	422

在多组份体系中的
结晶作用

第十九章 含有K₂O的 体系

碱性化合物	428
K ₂ O-CaO	428
K ₂ O-SiO ₂	429

$K_2O-Al_2O_3$	429
$K_2O-CaO-Al_2O_3$	430
$KA-C_4AF-C_2F$	433
$K_2O-CaO-SiO_2$	435
C_2S-KCS	435
C_3S-KA	437
C_2S-KA	437
C_3S-C_2S-KA	438
$C_3S-C_2S-KA-Fe_2O_3$	438
$KC_{23}S_{12}-CaO-C_5A_3$	439
$KC_{23}S_{12}-MgO$	441

第二十章 含有 Na_2O 、 Li_2O

及碱性化合物

与 SO_3 的体系

Na_2O-CaO	442
Na_2O-SiO_2	442
Li_2O-SiO_2	443

$Na_2O-Al_2O_3$	443
$KS-NS-SiO_2$	445
$NS-LS-SiO_2$	445
$NS-Fe_2O_3-SiO_2$	445
$Na_2O-CaO-Al_2O_3$	446
$Na_2O-CaO-SiO_2$	450
$Na_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2$	451
$CaO-C_4AF-(Na_2O)$	456
$Na_2O-CaO-C_5A_3-C_2F$	458
$Na_2O-CaO-C_2S-CF$	459
$Na_2O-CaO-Al_2O_3-Fe_2O_3-SiO_2$	461
$KC_{23}S_{12}-CaSO_4$	463
在熟料中的 K_2SO_4 与 Na_2SO_4	464
SO_3 对熟料的碱性化合物 的影响	466

第一篇 熟料形成的化学

第一章 水泥工业的历史

古代的水泥

埃及的紀念性建築物留傳很久了。就人們的技藝來說，還沒有能和尼羅河畔的金字塔可以媲美的。按照紀元前五世紀侯羅多特斯（Herodotus）的意見，這些金字塔對他比他對我們更要古老些。其實，就在那樣古老的時代，人類已經懂得用膠結物作灰泥去砌築石塊了。我們當然無從知道人類在什麼時候第一次創造膠凝材料，但一定是在人類天才地利用了火以後，就緊接着發現了它。我們可以想象得到，原始人用石灰石塊或石膏塊圍砌成一個簡單的灶洞，在里面生起了火，熱就使得一部分石塊發生分解和脫水作用，變成粉末落在石塊之間，而夜間的細雨浸濕了粉末，就使這些石塊互相膠結，成為有史以來的第一個石塊砌築工程。

古埃及人所用的膠結物是經過煅燒的不純石膏。至於經過煅燒的石灰石，則到古希臘和羅馬時代方才使用¹⁰。有時，這樣制成的生石灰，與水拌合時，不加其他東西即付諸使用，但一般都是摻入細砂、卵石、碎石、碎瓦片或磚塊的。最早的混合物可能是由砂、石灰和水混合而成，並且只是作為砂漿來砌築磚石結構。可是在某一時期，將碎磚瓦加到這種砂漿里的方法逐漸流行起來，於是第一塊混凝土就誕生了。這種混凝土起先用以鋪路，隨後用以筑牆。此後不久，卵石和碎石也逐漸被採用起來。

經過相當的時間以後，開始注意到有些細砂較其他物料具有更大的價值，特別是在製造具有長期抵抗水侵蝕性能的砂漿的時候。我們可以假想，曾經用各種集料摻入到水泥中，並且很早就發現某些火山灰，無論在淡水或鹽水中，都能產生很好的強度和

耐久性。希腊人所用的圣多倫島 (Island of Santorin) 的火山凝灰岩, 普通称为圣多倫土 (Santorin earth), 在现在的建筑者中, 仍然有很好的评价。罗马人使用一种类似的东西, 但颜色較黑, 在那不勒斯湾 (Bay of Naples) 附近蕴藏很丰富, 因为它第一次被发现是在維苏維斯山 (Mt. Vesuvius) 附近的普泽里 (Pozzuoli) 地方, 所以称它为普泽兰那 (Pozzolana)*。維特罗維斯¹⁸ (Vitruvius) 认为它是砂的一种, 而且“如果与石灰、碎石拌和在一起, 就和在普通建筑物中一样, 可以在水中結硬。”就是用这种混合物, 建造了有名的罗马圣庙, 圆形劇場, 君士坦丁古刹, 法国南部里姆斯附近的加德桥 (参看图 1-1) 以及其他建筑物。这些建筑物仍然保存到現在, 而且抵抗住了长时期的侵蚀破坏。

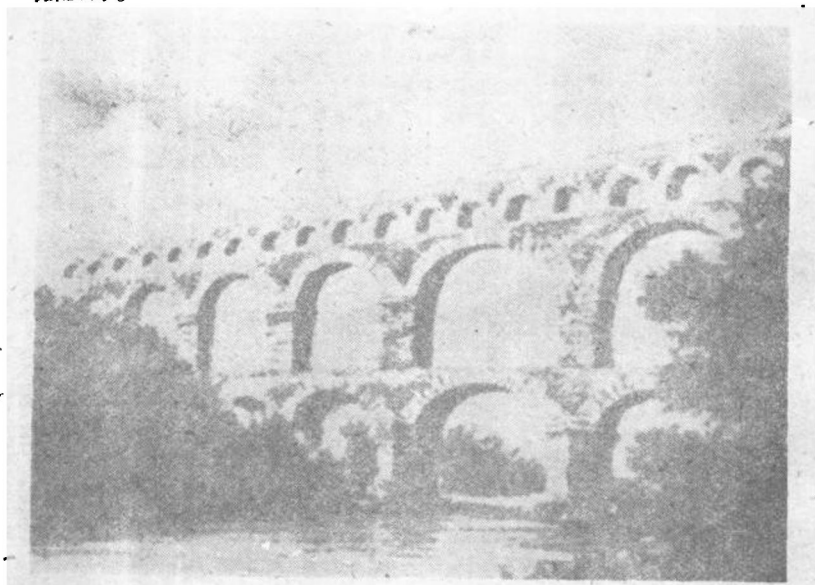


图 1-1 法国南部里姆斯附近的加德桥和水道是罗马人在一世紀时建筑的。它用石头砌成, 并以水泥为胶合剂。上层的水槽涂抹了水泥, 直到現在仍然非常坚固

* 即一般所說的火山灰。——譯者

这些建筑物的不寻常的耐久性，使得后来許多学者相信羅馬人在配料和施工上，一定有失傳的秘方。因为在中世紀时，一般工程的质量和寿命都要低劣得多。但是假如我們从 維特罗維斯¹⁸ 或阿尔伯梯¹（Alberti）的著作中，或者用現代方法分析遺留的建筑物¹⁰ 来研究当时原料的性能时，就可以知道并不尽然。必須看到，当时和現在一样，已經注意到施工中充分搗实的必要性了。所以普林尼¹⁴（Pliny）在叙述建筑蓄水池时說：“池底和四周側壁必須用鉄錘很好地錘打。”同时，隆德萊特¹⁵（Rondelet）断定：“羅馬砂浆之所以良好，并不在于石灰的消化或成分上有什么秘密，其关键在于充分地拌合和錘击。”

另一方面，中世紀砂浆质量之所以低劣，似乎是由于石灰煅燒得不完全，使用不当以及缺少火山凝灰岩的緣故。在十二世紀到十四世紀以后，由于石灰煅燒完全，并且采用了在性质上类似火山凝灰岩的物质，使质量得到了改进。在萊茵河上靠近柯不棱茲（Koblenz）的安德那赫（Andernach）所发现的粗面凝灰岩（trass）就是这类物质。近年来采用矿渣和經過煅燒的頁岩，也是为了这个目的。

也許最早企图解釋岩石經過煅燒后具有胶凝性质的人，是紀元前一世紀的維特罗維斯¹⁸：

石块，和其他物质一样，是由元素化合而成的。那些含气体最多的，性质就較軟；那些含水分最多的，由于湿度的关系，性质就較坚韧；那些受热最多的，性质則較脆。假如只是将这些岩石碎成細块，不經煅燒就和砂子拌合起来，它們并不会結硬或化合。当将这些岩石，放在炉內煅燒后，由于受到强烈的加热，就失去了原有的坚固性而降低了强度，成为干燥和多孔的状态，这时，石块中所含的水分和气体便被排出来，而只有潛热存在其中。但当重新加入水分时，又将火驅除出来，水重新占領其中的孔穴而恢复其原有的坚固性，此时石灰本身則被冷却，并放出大量的热。