

文章编号: 1005-1538(2018)01-0106-08

· 论 坛 ·

## 明《天工开物》之“风吹成粉”工法初步研究

戴仕炳<sup>1</sup>, 钟 燕<sup>1</sup>, 胡战勇<sup>2</sup>, 石登科<sup>2</sup>

(1. 同济大学建筑与城市规划学院历史建筑保护实验中心, 上海 200092; 2. 浙江德赛堡建筑材料科技有限公司, 浙江湖州 313008)

**摘要:** 1637年(明崇祯十年)出版的《天工开物》记录了我国古代建筑石灰的消解采用“置于风中,久自吹化成粉”的工艺。“用以砌墙石,则筛去石块,水调黏合”。为复配“风吹成粉”工法并研究采用这种工法得到的石灰性能,实验采用传统立窑对源自浙-皖交界处原材料“青石”烧制而成的生石灰使用“风吹法”消解,并参照现代标准BS-EN-459-2015等相关检测方法进行性能研究。结果发现“风吹法”消解的石灰含有水硬性组分如硅酸二钙等,并具有凝结时间短、强度适中等特点。研究表明,“风吹”20~30天左右得到的石灰性能相当于欧洲标准的天然水硬石灰NHL1或NHL2。研究还表明,“风吹成粉”的石灰可以用作砌筑、修复、注浆等粘合剂,其快凝等特性非常有利于湿冷环境下的施工。若对文献、明及以前的建筑进一步考证并采取系统全面的深化研究,有望考证出我国380年前的明朝对天然水硬石灰消解及应用技术的掌握程度,并开发出融合中华传统智慧的文物建筑保护材料。

**关键词:** 天工开物; 风吹成粉; 天然水硬石灰; 文物保护; 传统智慧

**中图分类号:** K879.1 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2018.01.016

### 0 引 言

石灰在几乎所有人类建造文明上,一直是一种非常重要的无机胶凝材料。正是这种逐渐淡出人们视野的传统建筑材料造就了众多今人称之为“历史性纪念物”的宝物,如北京的长城、南京的明城墙、安徽滁州的上关水桥(图1)、贵州海龙屯等等。采用传统石灰保护修复这些文物建筑是公认的准则之一。

石灰的分类方式有多种,有按原材料、消解或制作方式等划分。目前国际上通行的分类标准主要以欧洲的建筑石灰分类为准<sup>[1]</sup>。欧洲的建筑石灰标准基本整合了欧洲大陆历史上所用的所有石灰类别。首先是按硬化机理对石灰进行大类划分,再按原材料进行亚类划分,最后按强度进行细分(表1)。按硬化机理划分,分为气硬性石灰和水硬性石灰两大类,即分为必须要空气中的二氧化碳参与且在水中无法硬化的石灰,和在水中可以硬化、空气中二氧



图1 重修于明代的安徽滁州上关水桥(图片来源:王传喜)

Fig. 1 Chuzhou Shangguan Bridge in Anhui Province reconstructed in the Ming Dynasty (From Wang Chuan-xi)

化碳也可参与硬化的石灰。按原材料划分,石灰可以分为钙质石灰、镁质石灰、天然水硬石灰和人工水硬石灰等等。气硬性石灰是成分较纯(含泥质少)

收稿日期: 2017-04-23; 修回日期: 2017-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(5137835), “高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室”2016年种子基金项目资助 “浙江德赛堡建筑材料科技有限公司”南太湖精英计划2015资助

作者简介: 戴仕炳(1963—), 男, 教授, 同济大学建筑与城市规划学院, 研究方向为历史建筑保护技术与材料, E-mail: ds\_build@163.com

且主要成分为碳酸钙、碳酸镁的石灰岩烧制的石灰,天然水硬石灰则是含5%~25%泥质的天然石灰岩烧制的石灰。然而,这种对石灰类型划分的背后还包含着对石灰消解方式的划分,即湿法消解和干法消解。对含泥质少的石灰岩烧制出的生石灰,既可采用喷雾消解也可以用大量水消解得到石灰膏;而对含有杂质的天然石灰岩烧制出的生石灰,则需要干法或像欧洲采用的堆砂消解才能保留其中的水硬性组分(二钙硅石等)<sup>[2,3]</sup>。同样,欧洲所谓的罗马石灰(又称罗马水泥)也必须研磨成粉,用水消解会使其活性完全消失,因为水硬性石灰或罗马石灰中的水硬性组分在与水的长期接触中会失去胶凝作用。我国现行建筑石灰标准(表2)中对石灰的分类事实上仅相当于现行国际建筑石灰标准中的气硬性石灰部分,只不过是按石灰原材料的种类再做了未消解和消解的区分<sup>[4-5]</sup>。那么我国历史上对石灰的利用是否仅限于气硬性石灰,而没有对强度更高、适用范围更广的水硬性石灰的开发利用?

表1 欧美等国际通行的石灰标准分类

Table 1 International standard classification of building lime

石灰属性	石灰类型	分类
2015 欧标 EN 459	气硬性石灰	CL90
		钙质石灰
		CL80
	水硬性石灰	CL70
		DL90
		DL85
		DL80
	天然水硬石灰	NHL2
		NHL3.5
		NHL5
调合石灰 (狭义)水硬石灰	FL2, FL3.5, FL5	
	HL2, HL3.5, HL5	

表2 我国现行的石灰标准分类

Table 2 Current classification of lime standard in China

石灰类型	分类
钙质生石灰	CL90
	CL85
	CL75
镁质生石灰	ML85
	ML80
钙质消石灰	HCL90
	HCL85
	HCL75
镁质消石灰	HML85
	HML80

目前有大量考古及相关的材料学研究表明,我国早期建筑遗址上所用石灰有一部分很可能为天然水硬石灰<sup>[6-7]</sup>,因为其强度高,甚至接近现代水泥。但由于分析技术的局限,目前无法完全确定当时使用的是原石灰中就有水硬性组分的天然水硬石灰(即表1的NHL)还是添加活性组分的气硬性石灰(即表1的调和石灰FL或狭义的水硬性石灰HL)。因为气硬性石灰与其混合在一起具有活性的组分如粘土、特殊砖石碎屑等在合适的湿度、隔绝空气的环境里也能发生水化反应,形成类似水泥的无机钙硅酸盐。目前化学、矿物学的检测技术上还无法区别这类钙硅酸盐是源自石灰本身还是后期反应所形成。因此,我国不少专业人士认为,除局部地区外,我国没有使用天然水硬石灰的传统,由于我国的石灰均以湿法消解为主,所以推断我国历史上使用的绝大多数石灰都是气硬性石灰。然而,这并非全部的历史事实。

## 1 《天工开物》中“石灰”的消解与应用解读

我国明末清初前或更久以前对石灰的消解,特别在南方潮湿地区,很可能广泛采用的是宋应星(1587~1666或1661)在《天工开物-燔石》<sup>[8]</sup>中所描述的“风吹成粉”的干法消解方式。虽然宋应星于其序中写道“随其孤陋见闻,藏诸方寸而写之,岂有但者?”。但考虑到宋应星出生于江西,并长期辗转于赣、徽、苏、浙、川等地,上述区域均为石灰的重要产地,他描述的工法应具有一定的可靠性和普遍性。关于石灰烧制及应用的工法,其记载描述的信息可以总结归纳为以下几个要点<sup>[9]</sup>:

1) 当时对石灰质量的划分主要按颜色,以青色最佳,黄白次之,同时表面风化的石灰石不采用。

2) 烧石灰的燃料以煤为主(占90%),然后才是柴火或者炭。

3) 烧成的生石灰按质量分为两类,质量好的叫做“矿灰”,差的叫做“窑滓灰”。“矿灰”应该是“块灰”的谐音,指块状的、没有杂质的生石灰。“矿灰”可追溯到宋代的《营造法式》。

4) “置于风中,久自吹化成粉”,即生石灰在空气中慢慢风吹化成粉末,是当时生石灰在使用之前的标准消解工法。这种工法简称为“风吹成粉”。只有在工程“急”用的时候才“水沃”。按冯蒸主编《古汉语常用字字典》解“沃”为动词,是浇、灌的意

思<sup>[9]</sup>。因而推断,明朝时石灰的标准消解方法应是“风吹”的干法,“浇水”的湿法消解只有在工程“急”的情况下采用。

5) 砖石砌筑的石灰是先筛去(未烧透的、过火的)石块,用过筛的石灰加水调和作为粘合剂,没有添加其他粘合材料。

6) 这样的工法制作的石灰非常耐久,“成质之后,入水永劫不坏”。“入水”似乎说明这类石灰能够水下硬化且耐久的特点。

## 2 “风吹成粉”的石灰性能研究方法

为了比较“风吹成粉”工法下的石灰与现代水消解的消石灰、欧洲标准生产的天然水硬石灰的性能,实验按“天工开物”所描述的方式进行了再现模拟与科学分析。实验的时间段为 2016 年 12 月到 2017 年 2 月,地点为浙江湖州市。根据湖州市的气象资料,实验期间的温度变化范围为  $-2^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ , 相对空气湿度为 50% ~ 90%。

### 2.1 原材料

浙-皖交界处产出石灰岩(图 2), 烧制石灰已经有悠久的历史。生产氢氧化钙的石灰石原料有三种,块状石灰岩(红褐色,新鲜面为青色)、条带状石灰岩及片状石灰岩(后二者新鲜面也为青灰色)(图 3),三者均属于“天工开物”分类中的“质优”原料。同时,这些石灰以煤为燃料,以立窑方式煅烧。由于块状石灰石原料目前接近枯竭,现有浙北-皖南的所谓“钙业”企业(生产不同纯度  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的石灰厂)的主要原材料为片状、条带状石灰石掺和块状石灰石。本次实验采用的生石灰采自某“钙业”企业(图 4)。



图 2 浙-皖交界处石灰石矿山、石材特点及破碎好的入炉前石灰石

Fig. 2 Limestone mine, limestone macro features and broken limestone before being fed into the kiln near the border between Zhejiang and Anhui



图 3 三种用于烧制石灰的石灰岩

Fig. 3 Three kinds of limestone used for lime production

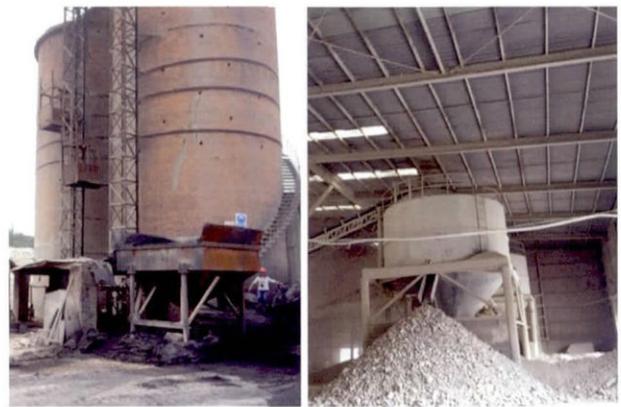


图 4 石灰烧制方式(左)及烧好用于研究的生石灰(右)

Fig. 4 Lime kiln(left) and quick lime(right) for wind slaking test

### 2.2 消解方式

将煅烧好的生石灰以三种不同的方式消解,分别为“风吹消解”(即把烧制好的生石灰放于室外空旷场地,并搭建简易棚防止雨水打淋)(图 5);“水沃消解”(即把生石灰置于桶内,放入过量的清水,过筛后静置 15d);“喷雾消解”(即推测生石灰中全部为氧化钙而计算出的理论用水量的 1.3 倍喷雾消解,并放置 15d)。为了获得更全面的比对数据,研究还采用了德国 Hessler 公司的按照最新欧洲工业标准生产的 NHL2 及按照中国工业标准生产的工业消石灰 CL90 作为对比材料。

### 2.3 检测方法或标准

1) 酸不溶物含量。一种检测碳酸岩中除碳酸盐外粘土、石英等含量的快速方法。将石灰石破碎成粒径 5mm 左右的块状或者研磨成粉,取 50g 石灰石样品放入 500mL 烧杯中,按一定的比例(50g 样品 + 500g 稀盐酸)加入稀释的稀盐酸,直至石灰石和盐酸充分反应,无气泡放出。24h 后,用滤纸过滤,

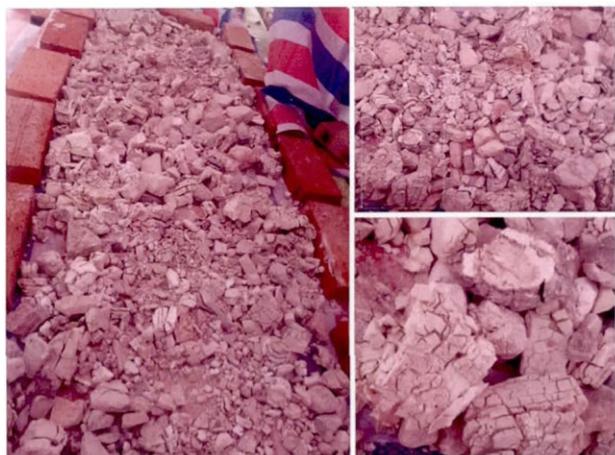


图5 简易遮雨棚下石灰的经受风吹及变化

Fig. 5 Slaking under wind and texture change of quicklime under temporary shelter during wind slaking

一次蒸馏水清洗酸不溶物 2~3 次,然后烘干称量,计算不溶物的含量百分比。

2) 石灰石化学组分。检测石灰石中主要氧化物的含量,判别石灰岩的类型及水硬性指数,方法为 X 射线荧光光谱分析仪分析(X Ray Fluorescence,简称 XRF)。

3) 矿物相。不同石灰的取样方法如下,生石灰:先将约 5kg 生石灰破碎过 40 目筛,混合均匀后取 50g 石灰,研磨到粒径 45 $\mu\text{m}$  左右的粉末状“风吹”、“喷雾”法的熟石灰取约 5kg,同样过 40 目筛,混合均匀后取 50g 石灰,研磨到粒径 45 $\mu\text{m}$  左右的粉末状“水沃”石灰直接随机取样 500g,45 $^{\circ}\text{C}$  左右烘干,混合均匀后取 50g 石灰,研磨到粒径 45 $\mu\text{m}$  左右的粉末状。石灰粉末采用 X 射线衍射仪(XRD-X Ray Diffraction)分析,根据 X 射线衍射谱定性-半定量分析主要矿物组分。

4) 凝结时间。不同类型石灰的初凝、终凝时间参照 GB/T 1346—2011 测定。

5) 抗压强度。试块参照欧洲标准 EN459-2 (2015) 根据石灰的密度、强度的范围进行加水、混合、制模,在空气(温度大约为 5~15 $^{\circ}\text{C}$ ,相对空气湿度为 50%~90%)中养护,并参照该标准检测抗压、抗折强度。

### 3 检测结果

#### 3.1 石灰石原始组分

皖-浙一带烧制石灰用石灰石均含有一定量的泥质-硅质成份,酸不溶物的含量介于 2.17%~8.46% 之间(表 3)。块状石灰石的酸不溶物的含量低,片状、条带状石灰石的含量高,达 7%~8%。

由化学全分析结果可知,片状、条带状石灰石中的硅、铝、铁的氧化物含量均比较高,其中片状-条带状的石材的水硬性指数 CI 为 0.37~0.54,已满足天然水硬性石灰的原料组分及水硬性指数要求(表 4)。

表 3 皖-浙一带烧制石灰用石灰石的酸不溶物含量

Table 3 Acid insoluble content of limestone for lime production near the border between

Anhui and Zhejiang		(%)
矿山术语	描述	含量
片状青石	新鲜面为灰色厚度为数毫米的泥质灰岩,夹灰质泥岩	7.72
条带状青石	厚度为数厘米的泥质灰岩	8.46
红石	风化面为褐色,新鲜面为深-浅灰色的块状石灰岩	2.17

表 4 某石灰厂烧制生石灰用石灰石的氧化物含量

Table 4 Oxide contents of limestone used in a quicklime kiln

	片状青石	条带状青石	红石	天然水硬性石灰原料要求
CaO	45.26	46.88	48.04	
SiO <sub>2</sub>	7.38	4.96	2.99	4~16
Na <sub>2</sub> O	5.69	7.02	8.32	
K <sub>2</sub> O	0.36	0.22	0.14	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.25	2.76	1.89	1~8
SO <sub>3</sub>	0.86	0.63	0.52	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	0.39	0.14	0.3~6
MgO	0.49	0.14	0.09	
烧失量	36.22	37.00	37.87	
CI(水硬性指数)	0.54	0.37	0.22	0.3~1.1

#### 3.2 生石灰的“风吹”粉化过程

烧制的生石灰块放置在自然通风的条件下,发生不同程度的缓慢崩解、粉化(图 6),且不明显放热。部分生石灰快速变成白色粉末,另一些生石灰则以开裂、崩解为主,也发现几乎不发生任何变化的“生石灰”块。Oates<sup>[2]</sup> 的研究说明,不同速度、不同程度的粉化和生石灰中氧化钙、水硬性组分、烧制的温度等因数复杂相关。含氧化钙多的生石灰(高钙气硬性石灰)粉化速度快,而可能含较多水硬性组分的生石灰粉化缓慢,但是这需要进一步研究。粉化方式及速度是否与自然风的速度、温度、相对空气湿度等有关也尚需进一步明确。

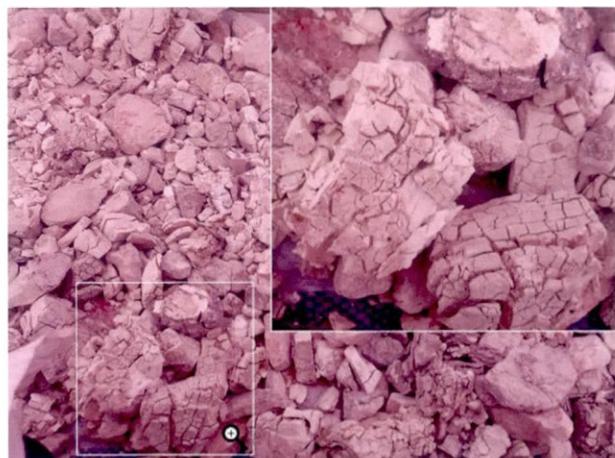


图6 风吹后生石灰状态变化  
Fig.6 The state of quick lime slaked by wind

### 3.3 不同消解方式石灰中矿物组分的变化

初步的 XRD 分析表明,混合石灰石烧制的生石灰中除含有氧化钙、氢氧化钙外,还含有硅酸二钙 ( $\beta - Ca_2SiO_4$ )、碳酸钙、石英、硅酸三钙等,其中水硬性组分硅酸二钙的相对含量可高达 10%(图 7)。

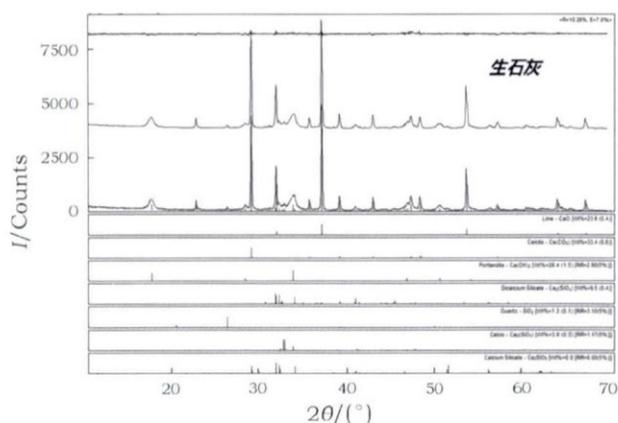


图7 用于实验的生石灰主要组分  
Fig.7 XRD analysis of quicklime

经风吹消解筛去“石块”后得到的石灰矿物组分相对复杂。除氢氧化钙、碳酸钙等外,风吹 15d, 仍然能够检测到氧化钙。而 21d 后已经检测不到氧化钙(图 8~9)。其中风吹 15d、21d 的石灰粉中均检测到了一种钙硅酸盐或疑似斜硅钙石(Larnite)的硅酸盐,在 21d 的石灰粉中还发现硅酸钙氧化物或硅酸三钙。

经喷雾消解得到的石灰中,除氢氧化钙、碳酸钙等外,也检测到了一种钙硅酸盐或疑似斜硅钙石(Larnite)的硅酸盐、硅酸三钙等(图 10)。石灰风吹、喷雾消解后所得的疑似斜硅钙石的硅酸盐形成原因,尚待查明。

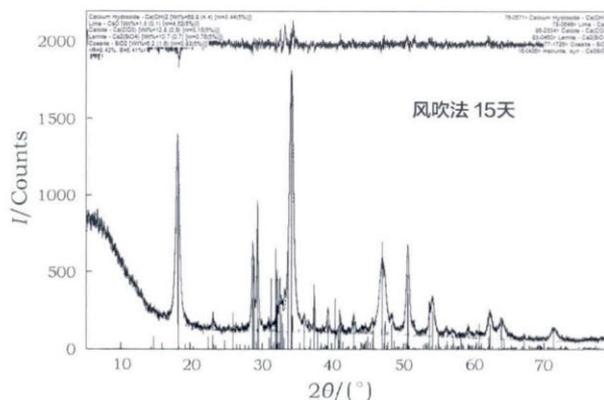


图8 风吹 15d 石灰中的主要组分状况  
Fig.8 XRD analysis of hydrated lime slaked by wind after 15 days

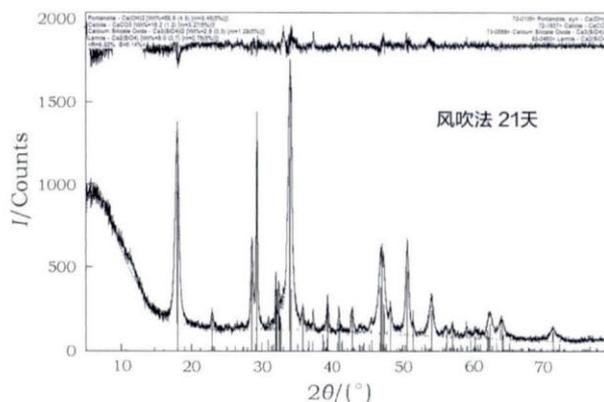


图9 风吹 21d 石灰中的主要组分状况  
Fig.9 XRD analysis of hydrated lime slaked by wind after 21 days

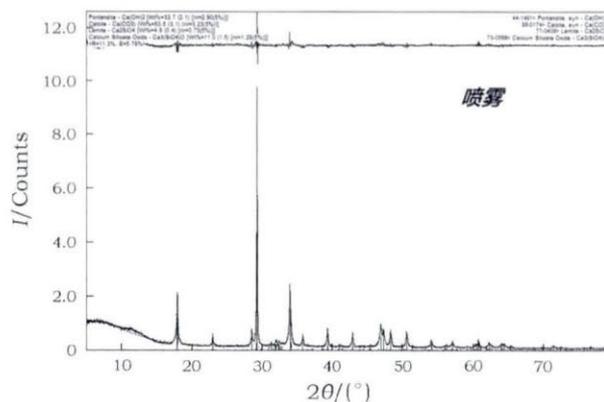


图10 喷雾法消解的石灰主要组分  
Fig.10 XRD analysis of hydrated lime slaked by mist spray

在“水沃”的石灰中,未检测到硅酸二钙、斜硅钙石(Larnite)、硅酸钙氧化物或硅酸三钙等水硬性组分,主要物相组成为氢氧化钙及少量碳酸钙(图 11)。

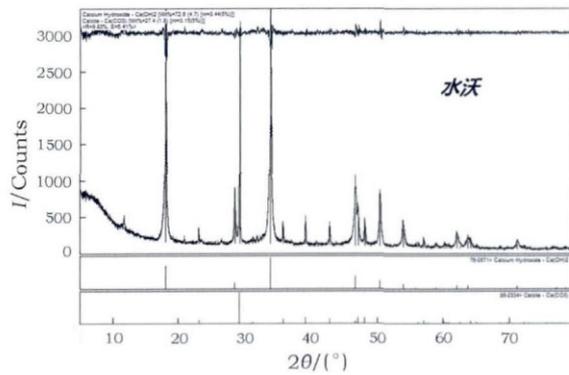


图 11 “水沃法”消解的熟石灰各组分状况

Fig. 11 XRD analysis of hydrated lime slaked under water

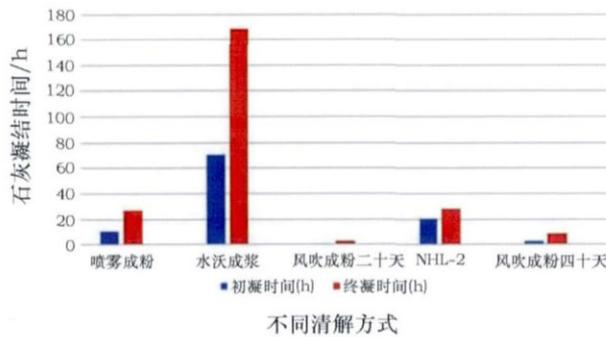


图 12 不同消解方式石灰的凝结时间及与标准工业建筑石灰的比较

Fig. 12 Setting time of lime using different slaking methods in comparison with industrial commercial building lime

### 3.4 “风吹成粉”方法消解的石灰性能

“风吹成粉”法消解 21d 的石灰初凝时间为 1h, 终凝时间为 3h, 凝结时间短(图 12)。相比之下,“水沃”的石灰初凝则需要 70h。在强度方面,“风吹成粉”具有较高的抗压强度,特别是在空气中养护的试块,7d 的抗压强度已达 1MPa,28d 抗压强度达到 1.55MPa,与欧洲标准的天然水硬石灰 NHL2 在空气中养护的强度接近,远高于“水沃”的石灰浆,更高于现代的工业消石灰 CL90(图 13)的强度。此外“风吹成粉”石灰还具有微膨胀(表 5),其他性能正在研究中。

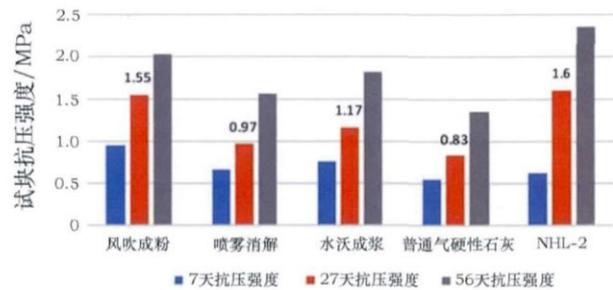


图 13 不同消解方式石灰的抗压强度及与标准工业建筑石灰的比较

Fig. 13 The compressive strength of lime using different slaking methods in comparison with industrial commercial building lime

表 5 采用 40 天风吹石灰制备的砂浆的线性收缩

Table 5 Linear shrinkage of mortars made from lime slaked by wind for 40d

	砂浆 1 号	砂浆 2 号
40 天风吹成粉的石灰	23	20
砂	75.4	77.1
纤维素醚等	1.6	1.4
氧化铁颜料	0	1.5
可施工时间/d	5	1
7 天线收缩/‰	+9.2	+10.6
28 天线收缩/‰	+17.6	+15.5

### 3.5 讨论

采自浙江北部 - 安徽南部某“钙业”企业规模化生产用于不同品级氢氧化钙的生石灰,经“风吹”、“水沃”及“喷雾”三种不同方式消解后得到的熟石灰,其组分不同,凝结时间各异,强度差异较大。按照《天工开物》描述的“风吹成粉”法消解的石灰,为一种快凝、微膨胀、强度适中、具有水硬性的特殊石灰。对比欧洲标准的天然水硬石灰 NHL2 及现代

的工业消石灰 CL90,经过研究发现,其性能接近欧洲标准的天然水硬石灰 NHL1 或 NHL2。

更特别的发现是,含有水硬性组分的生石灰“水沃”后其强度却高于按照现代工业标准“喷雾”熟化的石灰;而 21d 风吹成粉的石灰其安定性按照欧盟标准 EN 459 - 3(2015) 的指标是不合格的,原因待解。这一发现可能解释了该技术失传的缘由,或更确切地说,解释了石灰“风吹”被“水沃”所取代

的重要技术原因,至于是否还存在其他原因,尚需要进一步探索。

#### 4 结论与展望

虽然“风吹”的工法耗费了大量的时间,但“风吹成粉”大大提高了之后石灰的凝结速度,可以缩短建设工期。进一步的研究还发现,“风吹成粉”的石灰经水下养护强度性能更优,说明“风吹”工法下的石灰非常适合在湿冷环境下的施工,并且其56d后的强度接近欧标 NHL2 的强度标准。

本研究考证这种低能耗下提高石灰强度的作法的科学性,并不是仅仅为了证明我国古代对石灰利用曾经有这样一种智慧的工法,更重要的目的是为我国遗产的保护提供更多的可能性。出于科学目的,对于遗产的修复,一直提倡使用原材料、原工艺,因为这对遗产的修复而言往往是最安全的。而这就需要对这些传统材料、工艺进行科学的研究与评估,并实施修复。

本次复配实验及“风吹”石灰性能的研究仅仅初步验证了《天工开物》记载的石灰消解方式的可行性,对比测试了这类石灰的特点,特别是与现代化生产的天然水硬石灰、文物保护工地使用的消石灰等性能上的差异。若要重配这种石灰并大量使用到我国文物建筑保护实践,还有很多问题需要回答。建议未来的研究集中在三个方面:一方面加强考证,包括文献考证及对明代及以前的建筑遗址灰浆的考证,以验证或否认“风吹成粉”工法;另一方面是加强研究“风吹成粉”石灰的宏观-微观性能,特别是风吹消化过程的矿物相的变化及影响因数(温度、相对空气湿度、风速等等)，“风吹成粉”石灰在不同环境下的固化原理、各项性能参数及变化规律、耐久性、兼容性等等,为复活这种“传统智慧”扫清技术障碍;第三个方面是在砖石遗产、岩土遗址等方面的小规模尝试性的应用研究,优先考虑应用到气硬性石灰无法满足性能、工期等要求的工程项目中。因为目前深入的研究已经发现,“风吹成粉”的石灰除了如“天工开物”所描述的用于砖石砌筑外,其微膨胀性能特别适合作为注浆料使用,同时“风吹成粉”的石灰经水下养护具有更优异的强度性能与韧性。

致谢: 石灰石的化学组分、石灰的 XRD 等分析研究由河南理工大学协助完成,参与研究的还有张德兵、居发玲、伍洋、何政、周月娥、刘斐等,在此一并表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] British Standards Institution. BS EN 459: 2015, Building Lime [S]. UK: European Committee for Standardization, 2015.
- [2] Oates, J A H. Lime and limestone: chemistry and technology, production and use [M]. Weinheim: Wiley - VCH Verlag GmbH, 1998: 117 - 248.
- [3] John A. Conservation of ruins [M]. London: Butterworth - Heinemann, 2007: 93.
- [4] 中华人民共和国建材行业标准. JC/T 479—2013 建筑生石灰 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2013.  
The Building Materials Industry Standard of the People's Republic of China. JC/T 619—1996 quick lime [S]. Beijing: China Building Material Industry Press, 2013.
- [5] 中华人民共和国建材行业标准. JC/T 481—2013 建筑消石灰 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2013.  
The Building Materials Industry Standard of the People's Republic of China. JC/T 481—2013 hydrated lime [S]. Beijing: China Building Material Industry Press, 2013.
- [6] 李黎, 赵林毅. 中国古代石灰类材料研究 [M]. 北京: 文物出版社, 2015.  
LI Li, ZHAO Lin - yi. Research of traditional lime in China [M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 2015.
- [7] 张云升. 中国古代灰浆科学化研究 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2015.  
ZHANG Yun - sheng. The scientific study of plasters in China [M]. Nanjing: North - east University Press, 2015.
- [8] 宋应星 [明]. 天工开物 [M]. 上海: 商务印书馆, 1958: 197.  
SONG Ying - xing (Ming). Heavenly creations [M]. Shanghai: Commercial Press, 1958: 197.
- [9] 冯蒸. 学生实用古汉语常用字字典 [M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 2009.  
FENG Zheng. Practical student ancient Chinese dictionary [M]. Huhehaote: Inner - Mongolian University Press, 2009.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1346—2011 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the portland cement, GB/T 1346—2011 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2013.

## Preliminary study of lime slaked by wind according to the book, Heavenly Creations ( Chinese Technology in the Seventeenth Century)

DAI Shi - bing<sup>1</sup>, ZHONG Yan<sup>1</sup>, HU Zhan - yong<sup>2</sup>, SHI Deng - ke<sup>2</sup>

(1. *Architecture Conservation Laboratory, College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

2. *Zhejiang Desaibao Materials Technology, Huzhou 313008, China*)

**Abstract:** Heavenly Creations ( Chinese Technology in the Seventeenth Century) , by SONG Ying - xing, was published in 1637 during the Ming Dynasty. The book recorded the ancient slaking technique, i. e., “quicklime was exposed to wind and became a powder after long blowing; the lime was sieved and mixed with water to make mortar for masonry”. In order to understand the properties of the lime slaked by wind or air, we studied quicklime with three types of slaking methods. The quicklime was supplied by a conventional high calcium lime production company, which mines the limestone near the border between Zhejiang and Anhui. The limestone was calcined in classical shaft kiln using coal. The quicklime was slaked by three methods: wind, mist spray and water bath. Mineralogical studies show the calcium silicate minerals, such as belite, have been found in both quicklime and limes slaked by wind and mist. The lime slaked by wind has a higher strength but shorter setting time. Its compressive strength can reach 1.5 Mpa in 28 days. The preliminary results show that the performance of lime blown by wind is equivalent to NHL1 or NHL2 of EN 459 - 3( 2015) but has faster setting characteristics. Fast setting can not only shorten construction time but also be very conducive to the applications in humid and cold climates. Both literature and remains/ruins of the Ming Dynasty and earlier constructions should be further studied in order to revitalize the use of this traditional ecological and inorganic material fused with ancient Chinese wisdom for conservation of cultural relics.

**Key words:** Heavenly Creations; Wind slaking; Natural hydraulic lime; Conservation of cultural relics; Traditional wisdom

(责任编辑 谢 燕)