

《天工开物》石灰“风吹成粉”作法考

——发现我国古代天然水硬石灰的制备方式

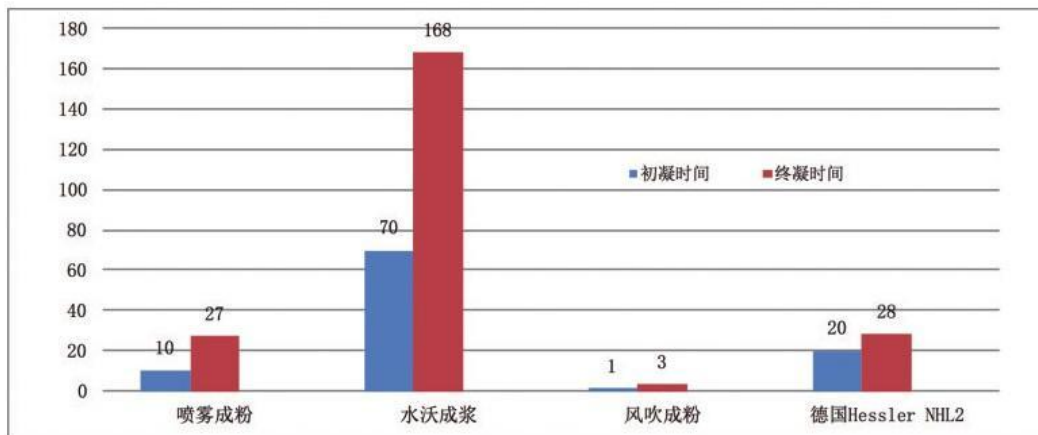
戴仕炳 钟燕 石登科 胡战勇

石灰在人类文明史上，一直是一种非常重要的无机胶凝材料。正是这种不起眼的材料，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、南京的明长城、安徽滁州的上关水桥等等。

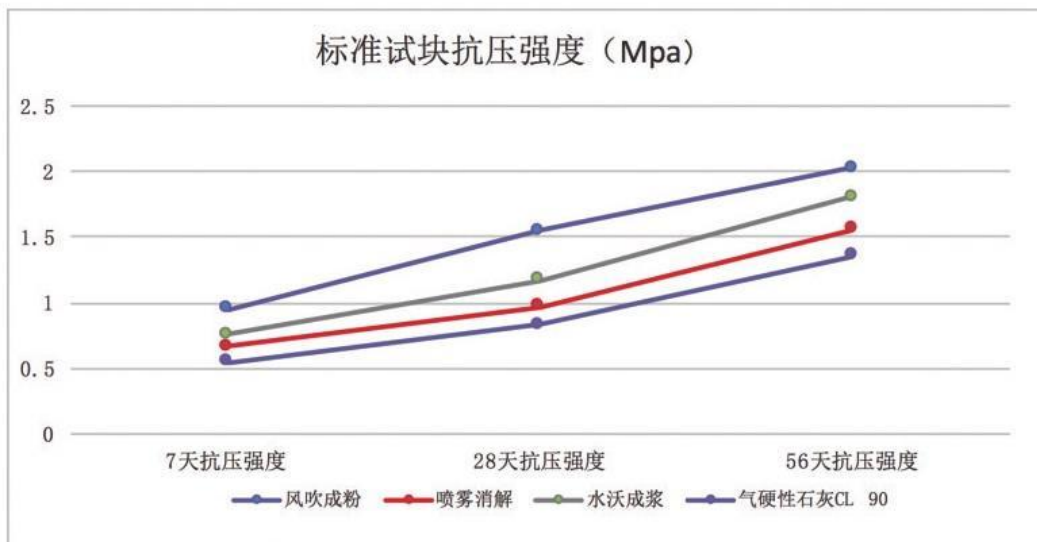
石灰的分类方式有多种，目前国际上通行的石灰分类标准以欧洲的建筑石灰分类为主。欧洲的建筑石灰标准基本整合了欧洲大陆历史上所用的各类石灰，先按硬化机理对石灰进行大类划分，再按原材料进行亚类划分，最后按强度进行细分。按硬化机理划分，石灰可以分为气硬性石灰和水硬性石灰两大类，即分为必须要空气中的二氧化碳参与且在水中无法硬化的石灰和在水中可以硬化、空气中二氧化碳参与硬化的石灰。按原材料划分，石灰可以分为钙质石灰、镁质石灰、天然水硬石灰和人工水硬石灰等等。气硬石灰是成分较纯（含泥质少）且主要成分为氧化钙、氧化镁的石灰岩烧质的石灰。天然水硬石灰则是含5%~25%泥质的天然石灰岩烧制的石灰。然而，这种对石灰类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，既可以喷雾消解也可以采用很多水消解得到石灰膏；对含有杂质的天然石灰岩烧制出的生石灰，则需要干法消解才能保留其中的水硬性组分（二钙硅石等），因为该种水硬性组分在与水的长期接触中会失去胶凝作用。因而，我国现行建筑石灰标准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。那么我国历史上对石灰的利用是否仅限于气硬石灰，而没有对强度更高的水硬性石灰利用的案例？

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采用的石灰有一部分很可能为天然水硬石灰，因为其强度与现代水泥非常接近。由于技术的局限，目前无法完全确定当时使用的是天然水硬石灰（即原石灰中就有水硬性组分）还是气硬石灰，因为气硬石灰与其混合在一起的具有活性的泥土等在合适的湿度、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。目前在化学、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形成。因此，我国不少专业人士都认为，除局部地区外我国没有使用天然水硬石灰的传统，因为我国的石灰均以湿法消解为主，所以我国历史上使用的绝大多数石灰都是气硬石灰。然而，这并非全部的历史事实。

我国明末清初前对石灰的消解非常可能采用的是宋应星（1587-1666 或 1661）在《天工开物·燔石》中所描述的“风吹成粉”的干法消解方式，特别是在南方潮湿地区。虽然宋于其序中写道：“随其孤陋见闻，藏诸方寸而写之，岂有但者？”但考虑其出生地并长期生活辗转于江西，赣、徽、苏、浙、川等地均为石灰的重要产地，他描述的工法应具有一定的普遍性和可靠性。关于石灰烧制及应用的工法，其描述道：



不同消解方式所制石灰的凝结时间



同一生石灰原材料三种不同消解方式所制石灰的强度及与工业化消石灰CL90的强度比较

凡石灰经火焚炼为用。成质之后，入水永劫不坏。亿万舟楫，亿万垣墙，窒隙防淫，是必由之。百里内外，土中必生可燔石，石以青色为上，黄白次之。石必掩土内二三尺，掘取受燔，土面见风者不用。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。急用者以水沃之，亦自解散。凡灰用以固舟缝，则桐油、鱼油调，厚绢、细罗和油杵干下塞舱。用以砌墙、石，则筛去石块，水调黏合。髹墁则仍用油、灰。用以垂墙壁，则澄过，入纸筋涂墁。用以裹墓及贮水池，则灰一分，入河沙、黄土三分，用糯粳米、杨桃藤汁和匀，轻筑坚固，永不隳坏，名曰三和土。其余造靛造纸。功用难以枚述。凡温、台、闽、广海滨，石不堪灰者，则天生蛎蚝以代之。

上述记载可以明确以下几条信息：

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.放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工法。我们把这种工法简称为“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。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（未消解、未烧透的）石块，用过筛的石灰加水调和作为黏合剂，没有添加其他材料。

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”。

为了验证“风吹成粉”作法下的石灰是否真的如宋应星所形容的那样具有“永劫不坏”的特性，笔者按其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-2017年2月，地点为浙江湖州市。首先选取的是浙皖交界处生产氢氧化钙的工厂所煅烧好的生石灰。该厂所烧制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（后者均为青灰色），三者均属于“天工开物”分类中的“质优”原料，然后，以煤为燃料，以立窑的方式煅烧石灰。本次实验采用的为后两种原料烧制的生石灰。将煅烧好的生石灰以三种不同的方式消解，分别为“风吹”（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，时间为20天），“水沃”（即把生石灰置于桶内，放入过量的清水，静置15天），“喷雾”（即推测生石灰中全部氢氧化钙而计算出的理论用水量的1.3倍喷雾消解，并放置5天）。为了获得更全面的对比数据，研究还采用了德国Hessler公司的按照最新工业标准生产的成品NHL2及工业消石灰CL90作为对比材料。

初步研究发现，《天工开物》里“风吹成粉”的方法消解石灰具有凝结时间短、安定性好、强度高且增长速度快、容易施工等特点。经过20天的风吹，筛粉后的石灰初凝时间为1小时，终凝时间为3小时。相比之下“水沃”的石灰初凝则需要70小时。也就是说虽然“风吹”的工法耗费了大量的时间，但这大大提高了之后石灰的凝结速度，这非常有利于湿冷环境下的施工。在强度方面，“风吹成粉”具有最高的抗压强度，远高于“水沃”的石灰浆和现代的工业石灰。综合初步获得的各项指标，“风吹成粉”的石灰属于欧洲标准的天然水硬石灰NHL1-2，但凝结时间更快。更特别的发现是，含有水硬性组分的生石灰“水沃”后其强度甚至高于按照现代工业标准“喷雾”熟化的石灰，更高于工业化生产的消石灰的强度。由此可见，宋应星的“永劫不坏”完全不是虚张声势。

研究发现，至少源自浙皖一带的条带状石灰岩及片状石灰岩采用普通石灰烧制方法烧制出来的生石灰按照《天工开物》描述的“风吹成粉”法消解得到的熟石灰为一种快凝的天然水硬石灰，现代科学研究验证这类石灰具有很多优点，但是这种工法为何失传了，以至于我们如今对这种可能盛行于380年前《天工开物》发表时及之前的石灰消解方式完全不知呢？宋应星给出的答案是，这种作法的弊端在于其耗时，如果工程急，“急用者以水沃之”。但更可能是由于这种作法没有收入清代官方的出版物中。因为宋应星的哥哥宋应升的《方玉堂全集》及友人陈弘绪等人的一些著作有反清思想，因此《四库全书》没有收录宋应星的《天工开物》。乾隆以后，此书停止刊印，自然其中所述很多作法也就失传了。当然，也可能有其他诸如技术方面的原因，需要进一步探索。

今天我们考证这种绿色低能耗而且还能提高石灰强度的作法的科学性，并不仅仅是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，更是为我国文化遗产的保护提供更多的可能性。我们一直提倡使用原材料、原工艺，因为这对文化遗产的保护修复来说最安全。而这需要对这些传统工法进行科学的研究与评估，并实施再生复兴。我们在对“风吹成粉”石灰工法的初步研究中还发现，“风吹成粉”的石灰具有一定的微膨胀性，特别适合作为注浆料使用，最终的研究成果或将为我国的文化遗产保护提供一种实用的生态无机材料。

注：该研究工作得到了国家自然科学基金项目《我国砖石建筑遗产的古锈（patina）保护研究》及浙江省湖州市南太湖精英计划的支持。