

# 绍兴印山越国王陵木炭加固实验探究

范陶峰 万 俐 杨隽永 陈五六 金柏创

**摘要：**根据木炭具有多孔且易吸附水分的特点，利用水性环氧树脂对绍兴印山越国王陵的木炭加固进行了实验探究。实验结果表明，水性环氧树脂能较大程度地提高木炭的抗压强度，并增强木炭的耐水性能力，并对木炭的密度、外观及吸水性能影响极小。

**关键词：**木炭 加固 水性环氧树脂

## 一、前 言

木炭因具有吸水防腐的性能，在古代墓室，特别是大型墓葬中应用较为广泛。著名的绍兴印山的越国王陵，据考古测算，墓室内填筑木炭总量达 1 400m<sup>3</sup>。在墓室外围和墓坑底部的木炭吸收了有墓坑填土和岩壁渗出的水分，它们和墓坑内填筑的大量清膏泥共同构成墓室外围的严密防潮设施，是目前在国内考古发现的最为壮观的木炭防腐层。自 1998 年考古发掘以来，为了现场保护和展示开放的需要，印山越国王陵的木炭在中、后段保留了两段未予清除，墓室两侧的清膏泥和木炭也未全部挖除。但随着时间的推移，中、后段的木炭出现了严重开裂和坍塌现象，两侧的清膏泥和木炭不断下沉，对整个墓室的保护和展示都不利。因此对木炭重新进行加固保护势在必行。

## 二、木炭种类及特征<sup>[1]</sup>

由中国林业科学研究院木材工业研究所对印山越国王陵的木炭进行了树种鉴定，经鉴定，该木炭为栎木烧成。在古代，人们喜欢将栎木砍伐后烧成木炭，质量上乘，并且较为耐腐。木炭主要特征为：环孔材，生长轮明显。导管横切面卵圆形及圆形，单管孔，径列，侵填体丰富，螺纹加厚阙如，管间纹孔式互列，单穿孔。环管管胞量多。轴向薄壁组织较多，星散-聚合，离管弦向带状；具分室含晶细胞。木纤维壁厚。木射线非叠生，具宽窄两类射线，窄者通常单列（稀 2 列），宽者多个细胞，高许多细胞，常超出切片范围，射线组织同形单列及多列。射线-导管间纹孔式为刻痕状或大圆形。树脂道缺如图 1 所示。

从木炭的扫描电镜图片可得知，木炭是多孔性的物质。因此，它具有吸附的性能，对水分的吸收能力比较强。这为利用水性环氧树脂对其进行加固创造了极为有利的条件。

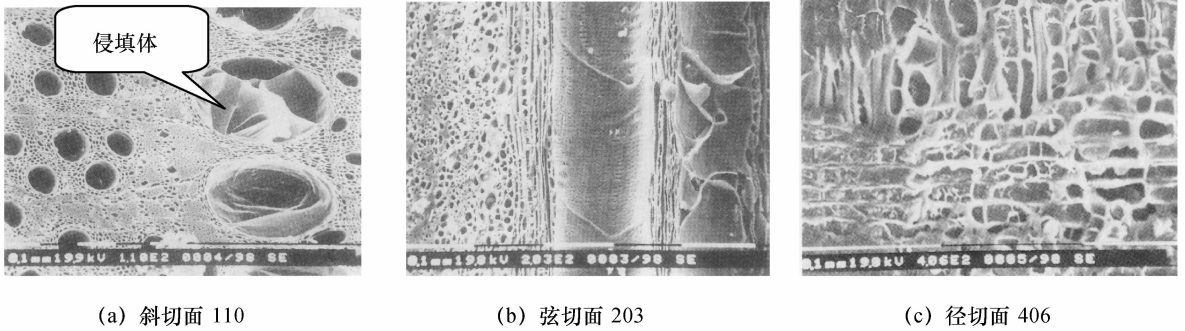


图1 木炭切片扫描电镜照片

### 三、木炭加固实验

#### (一) 实验材料

①木炭：随机取墓室中的木炭，木炭颗粒大小不一。②水性环氧树脂：由宜兴太湖防渗修缮加固有限公司生产的水性环氧树脂，环氧树脂固含量10%。③固化剂：由宜兴太湖防渗修缮加固有限公司生产的水性胺类固化剂。④水：普通自来水。

#### (二) 材料配合比

该实验中，水性环氧树脂与固化剂的比例为3:1，该比值保持不变，该混合液简称YX。通过调整水的量来调整水性环氧加固材料的浓度，共配了8种浓度，体积分数( $V_{YX}/V_{总}$ ) (%)分别为10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%。

#### (三) 制备试样

将木炭和配制后的试剂进行混合，搅拌均匀，将混合后的木炭装入相同模具中（模具为底面直径10.5cm，高度7cm的圆形管）。待木炭稍干后，将模具脱去。每种浓度各制6块试样。将木炭放在室温下干燥。

#### (四) 实验方法及结果

待做好的试样干燥2个月后，观察试样外观，测其密度和强度，并进行耐水性实验。

##### 1. 密度及外观

从表1可以看出，加入水性环氧试剂后，基本可以保证试样的形状不发生改变，同时密度改变较小。

表1 密度及外观

体积分数/%	密度/( $g/cm^3$ )	外观
空白	0.66	显得酥松，触摸易散
10	0.74	保持形状，触摸掉粉
20	0.73	保持形状

续表

体积分数/%	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	外观
30	0.71	保持形状
40	0.69	保持形状
50	0.72	保持形状
60	0.76	保持形状
70	0.70	保持形状, 表面有裂纹
80	0.68	保持形状, 表面有裂纹

## 2. 抗压强度

利用小型回弹仪检测木炭试样的抗压强度。实验结果见表2。

表2 木炭加固后强度 (单位: MPa)

样品 体积分数/%	1	2	3	4	5	平均值
10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
20	11	11	12	11	10	11
30	16	15	16	16	17	16
40	18	17	18	17	18	17.6
50	20	19	19	18	19	19
60	20	20	19	18	19	19.2
70	19	19	20	22	20	20
80	22	22	20	20	22	21.2
空白试样	无强度					

从表2可以看出, 木炭的强度基本随着水性环氧浓度的增加而增强。

## 3. 耐水实验

将试样分别放在水中, 每24h对木炭进行一次称重并做好记录。浸泡1200h后分析它们的抗渗能力、耐水性及吸水率。实验照片见图2~图4。

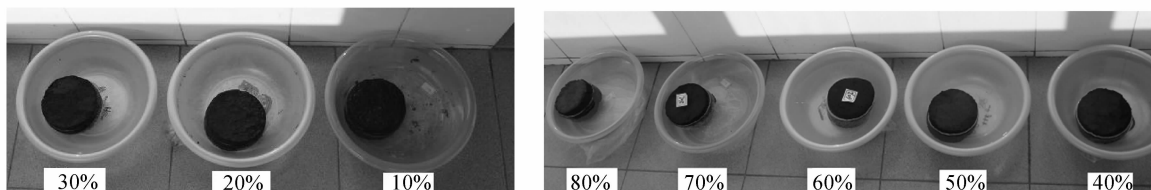


图2 刚放入水中的木炭试样

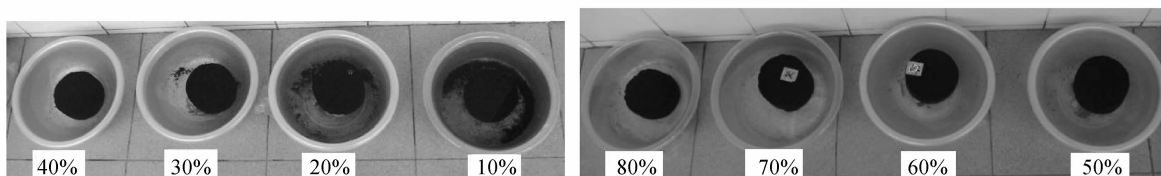


图3 在水中浸泡720h后的木炭试样

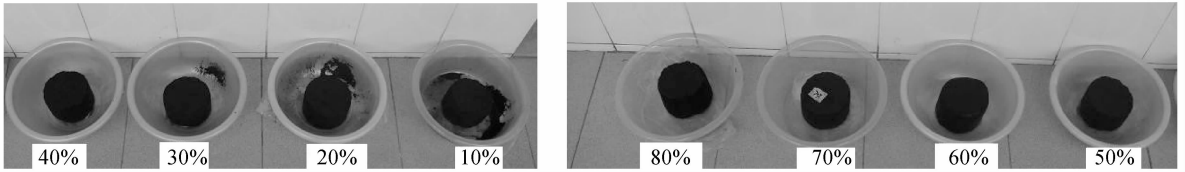


图4 浸泡1 200h后的木炭试样

## (1) 抗渗能力。

根据木炭放入水中至木炭完全沉入水底的时间，判断木炭的抗渗能力。

从表3可以看出，随着水性环氧浓度的增大，木炭试样抗渗能力不断增强。

表3 木炭试样完全沉入水中的时间

体积分数 ( $V_{YX}/V_{总}$ ) /%	空白	10	20	30	40	50	60	70	80
时间	15min	1d	1d	3d	8d	10d	12d	15d	18d

## (2) 耐水性能力。

从表4可以看出，木炭试样经过水性环氧加固之后，耐水性能力大大增强。

表4 木炭试样浸泡1 200h后的外观

体积分数/%	外观
空白	完全分散
10	形状基本保持，但掉下较多的木炭
20	形状基本保持，有少量木炭颗粒脱落
30	形状基本保持，有少量木炭颗粒脱落
40	形状完全保持，无木炭颗粒脱落
50	形状完全保持，无木炭颗粒脱落
60	形状完全保持，无木炭颗粒脱落
70	形状完全保持，无木炭颗粒脱落
80	形状完全保持，无木炭颗粒脱落

## (3) 吸水率。

木炭的吸水率表示木炭最大限度吸收水分的能力，因此，在所有浓度的木炭恒重后，即可进行吸水率的对比。

$$\text{木炭吸水率} = (m_{\text{水}}/m_{\text{木炭}}) \times 100\%$$

式中， $m_{\text{水}}$ 是木炭浸泡至恒重后，吸收的水分的重量， $m_{\text{木炭}}$ 是木炭浸泡前的重量。

从表5可以看出，除了浓度为80%的木炭吸水率超过空白试样外，其他试样的吸水率都相对降低。在印山王陵墓室保护工程中，为了减轻木炭层对椁木的压力，加固后的木炭应该吸收水分越少越理想。但从总体看，吸水率的变化程度不大。

表5 木炭试样的吸水率

体积分数 ( $V_{YX}/V_{总}$ ) /%	空白	10	20	30	40	50	60	70	80
吸水率/%	77.1	68.3	69.7	70.8	68.2	66.7	65.3	66.0	78.3

## 四、水性环氧树脂增强木炭力学性能机理分析

水性环氧树脂是把环氧树脂以微粒或液滴的形式分散在以水为连续相的分散介质中而配得的稳定树脂材料，它对木炭的加固主要是通过木炭吸水和水性环氧树脂成膜来控制的。在整个过程中，还原出来的环氧树脂是一种具有高强度、高黏结力、高弹性模量的高分子聚合物，使得木炭内部形成一个密实的网状结构，因此能够提高木炭的力学性能。

## 五、结 论

试验结果表明，在木炭中加入水性环氧试剂能很好地增强木炭的强度，提高木炭的抗渗能力和耐水能力。在现场的应用中，无论是从保护效果还是从经济的角度考虑，在恢复和保护椁木上的木炭层时，配置的水性环氧浓度在 40%~60% 即可满足要求。

### 参 考 文 献

- [1] 张立非, 姜笑梅. 印山越王陵木炭树种鉴定报告. 载: 浙江省文物考古研究所, 绍兴县文物保护管理局编著. 印山越王陵考古报告. 北京: 文物出版社, 2002

---

作者单位: 范陶峰、万俐、杨隽永, 南京博物院

陈五六、金柏创, 绍兴县文化发展中心

联系方式: 江苏省南京市中山东路 321 号, 邮编 210016

浙江省绍兴县柯桥明珠路 398 号, 邮编 312030