

# 中国古代铸造青铜器泥型烘焙温度的理论分析及浇注模拟试验

杨成达<sup>1</sup>, 徐来五<sup>1</sup>, 董子俊<sup>2</sup>, 董亚巍<sup>2</sup>, 秦颖<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学科技史与科技考古系, 安徽合肥 230026; 2. 陕西周原博物馆青铜范铸工艺研究所, 陕西宝鸡 722201)

**摘要:** 泥型焙烧是青铜器浇注前的重要环节, 关系到最后浇注的成败及铸件的质量。有关古代泥型的焙烧温度学术界一直有不同的观点。文中从泥料可能的矿物组成、焙烧的目的及青铜器模拟浇注实验等方面讨论了古代泥型焙烧的下限温度、上限温度等问题。分析结果表明, 泥型焙烧温度的下限应不低于所含有的粘土矿物脱去结构水的温度。而只要不变形, 或在合范时能经过处理校正, 泥型即使“陶化”了也可用来浇注。青铜浇注时的温度在1 100 ℃左右, 如果泥型中含有较多在此温度内分解产生气体的其它矿物(如碳酸盐类), 这些矿物的分解温度也是焙烧温度的重要考量。

**关键词:** 青铜器; 泥范; 焙烧温度; 矿物组成; 发气性

我国古代先民创造了辉煌灿烂的青铜文明, 在数以万计的商周时期青铜器中铸造成形的占绝大多数, 而这其中尤以泥型铸造为主<sup>[1-2]</sup>。浇注前泥型(包括泥范和泥芯)必须经过焙烧, 因此也就有了陶范铸造的称谓。长期以来, 对古代泥型的配料组成及处理工艺、烘焙温度的研究与探讨始终没有停止。通过对目前已发掘的青铜时代铸造遗址的研究, 可以得出这样的结论: 青铜器型范主要是由粘土、石英等碎屑颗粒或熟料混合构成, 往往是就地取材, 并经过高温长时间焙烧<sup>[3-5]</sup>。20世纪80年代, 谭德睿通过对安阳、洛阳、新郑和侯马等北方黄河流域重要的铸造遗址出土的陶范与当地原生土物质构成的比较研究, 发现这两者在物质构成上存在着高度的一致性, 只是粒度不同, 说明在就地取材的基础上还应用了一些筛选的工艺<sup>[6]</sup>。在对长江流域出土的商周到东周时期青铜器陶范、泥芯、陶器与本地原生土层土母质物质成分的比较研究, 也发现了这样的契合性, 并且不同的地区所出的陶范在矿物学组成上具有明显的地域差异<sup>[7]</sup>, 说明这种就地取材, 简单筛选, 并且经过阴干, 高温烘焙成型来制作陶范的技术体系, 贯穿我国古代青铜文明的大部分时间。

制作的泥范、泥芯必须经过焙烧, 防止在浇注过程中, 型范材料被高温的铜液灼烧, 其中的水分被蒸发, 形成发气, 同时型范中的某些矿物质(如方解石、白云母等)受热分解产生二氧化碳等气体, 这些气体会挤占型腔中的空间, 导致充型失败或者在青铜器的器壁上形成气孔。同时, 焙烧的过程也提高了泥型的力学强度。

关于青铜器型范焙烧温度, 有很多学者用不同方法做了研究和探讨, 主要测定出土陶范的热膨胀系数来逆推烘焙温度, 以及模拟浇注实验来还原烘焙温度。万家保推测河南安阳殷墟出土商代陶范的焙烧温度是600~700 ℃<sup>[8]</sup>; 刘煜等利用热膨胀资料推测陕西周原西周铸铜遗物出土的大部分陶范的焙烧温度在550~650 ℃之间<sup>[9]</sup>; 谭德睿认为泥型焙烧温度的下限不低于方解石的分解温度(850~900 ℃), 而上限不超过900~950 ℃<sup>[2]</sup>; 施继龙等对南京出土萧梁时期(502~557AD)铸钱陶范的热膨胀仪检测推测其烧成温度应在950 ℃以上<sup>[10]</sup>; 冯富根等复原浇注殷墟出土商代青铜觚时, 泥范的焙烧温度是900~950 ℃<sup>[11]</sup>。

作者简介:

杨成达(1994-), 男, 硕士, 研究方向为陶瓷考古。

E-mail: yangcd@mail.ustc.edu.cn

通信作者:

秦颖, 男, 硕士, 副教授。

E-mail: yingqin@ustc.edu.cn

中图分类号: K85

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

06-0648-04

收稿日期:

2019-03-04 收到初稿,

2019-04-16 收到修订稿。

## 1 泥型焙烧下限温度

浇注的成败及铸件质量的好坏很大程度上与浇注时陶范的发气有关, 要保障浇注出质量合格的铸件, 消除高温浇注时泥型中可能产生气体的各种潜在因素是对焙烧的最基本要求, 所需要的温度也是下限温度。这些潜在的因素包括泥料中各种含水的粘土矿物、碳酸盐类矿物及有机质。泥范和泥芯的主要组成是各种含水的粘土矿物, 中国幅员辽阔, 土壤类型多样, 而铸造用泥料往往都是就地取材。

粘土矿物中的水包括吸附水、层间水、沸石水、结晶水和结构水等。不进入晶格的吸附水等是渗入在矿物集合体中的普通水, 来源主要是空气中的水蒸气, 它呈水分子状态。吸附水在矿物中的含量是不固定的, 当温度达到100~110℃, 即超过水的沸点, 吸附水就会从矿物中逸出。晶格中的水主要是结晶水和结构水, 由于结晶水(以H<sub>2</sub>O的形式)进入到晶体结构中, 作为结构单元存在, 故只有加热到一定温度后才会全部或部分地失去, 随着失水作用的发生, 矿物的晶格开始破坏。结晶水从矿物晶格中逸出的温度一般在200~500℃。结构水(主要是以(OH)<sup>-</sup>等形式存在)与结构联系紧密, 将它从矿物中逸出需要较高的温度, 且不同矿物差别较大。高岭石在550~650℃脱(OH)<sup>-</sup>、地开石在650~700℃、蒙脱石在650~760℃、水云母在600~700℃、伊利石在550~750℃、绿泥石500~660℃、蛭石在500~700℃(图1)。碳酸钙在850~900℃分解, 因此, 对于含碳酸钙较高的泥型, 分解释放CO<sub>2</sub>气体也是焙烧必须达到的目标。比较而言, 黄土中碳酸钙含量普遍较高, 故北方地区古代泥型的焙烧温度不能低于粘土矿物的脱水及碳酸盐矿物的热分解温度。

## 2 泥型高温焙烧的模拟实验

许多文献中提及泥范要焙烧, 但又不能温度太高

使其“陶化”, 认为“陶化”了的泥范孔隙率降低, 浇注时铸型腔里产生的气体无法排放, 使铸件产生气孔乃至报废<sup>[12, 21]</sup>。商代陶器的烧成温度均在1 000℃以下, 一般为950℃<sup>[13]</sup>。因此, 泥范焙烧温度的上限普遍认为不超过900~950℃<sup>[2]</sup>。本研究把泥范在“陶化”温度以上进行焙烧, 看是否能浇注出合格的青铜器。

中国古代制作青铜器泥型的原料有粘土、砂及草木灰<sup>[2]</sup>。模拟实验在鄂州市博物馆进行, 选用了当地的原生土和长江边的石英砂, 按照原生土: 砂: 草木灰=4: 4: 2的体积配比来制作泥料。XRD分析表明, 原生土中主要粘土矿物是高岭石和少量水云母, 还有不少石英颗粒。原料经过混合、练泥和陈腐等处理好即可用来制作泥型。制作好的泥范和泥芯经阴干后, 即可装窑炉焙烧(图2上排)。

经过缓慢的增温, 最后炉内温度维持在1 100℃左右, 30 h后停火打开窑盖, 由于降温速度很快, 此时所测窑内温度为1 022℃(图2左下)。窑温冷却但还有余热时即可取出陶型(图2右下)、合范(图3)和浇注(图4)。本次实验浇注了圆底簋和方座簋(如图5, 图6)。实验表明, 泥型的焙烧是成功的, 浇注出的圆底簋和方座簋几乎没有气孔、砂眼等铸造缺陷。

## 3 讨论

北方黄土中的粘土矿物成分比较复杂, 有伊利石、绿泥石、高岭石、蒙脱石、蛭石等, 其中伊利石、绿泥石和蒙脱石最为常见。此外, 北方黄土中都含有一定量的碳酸盐(CaO在3.52%~19.92%<sup>[14]</sup>)。长江流域及以南区域表生土壤中以高岭石、多水高岭石、水云母、蛭石及蒙脱石等粘土矿物为主<sup>[15]</sup>。因此, 综合来看, 中国古代铸造青铜器工艺中, 以黄土为原料的泥型的焙烧温度下限在850~900℃, 南方的泥料中碳酸钙含量很低<sup>[7]</sup>, 主要考虑的是粘土矿物的失水, 泥型焙烧温度下限在700~750℃。当然, 除温度

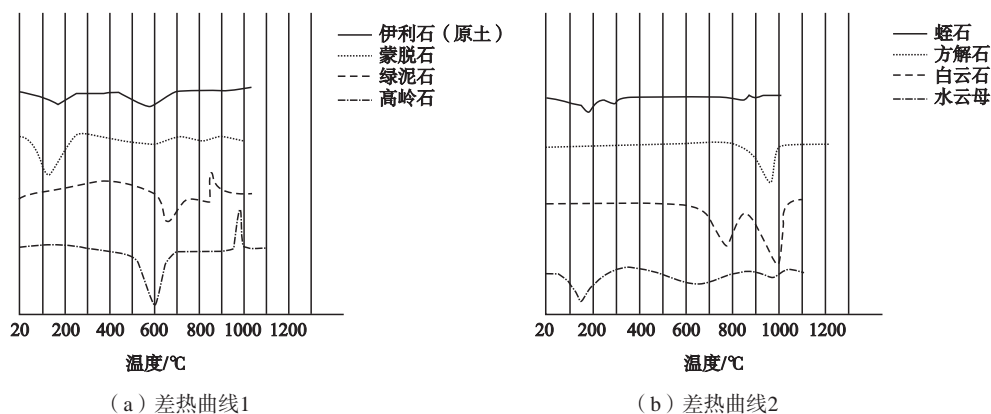


图1 古代泥型材料中易热分解产生气体的常见的矿物的差热曲线(根据相关资料综合)

Fig. 1 Differential thermal curves of common minerals prone to thermal decomposition and gas generation in ancient clay mold materials (based on relevant data)

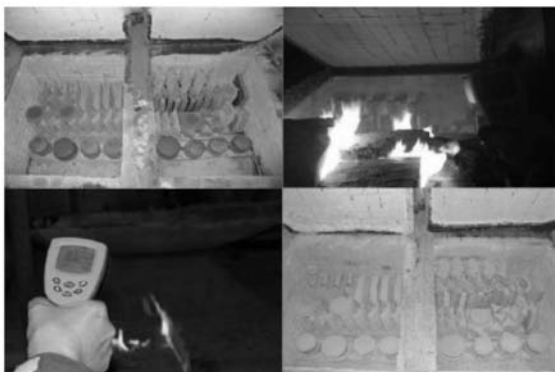


图2 泥型入炉焙烧  
Fig. 2 Clay mold roasting in furnace

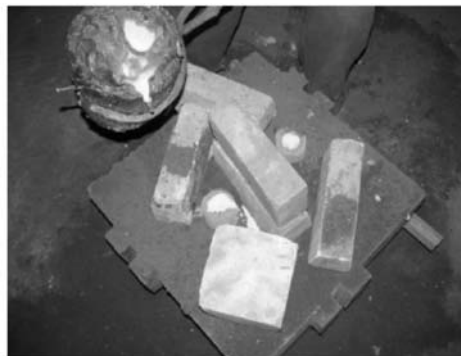


图4 浇注  
Fig. 4 Pouring

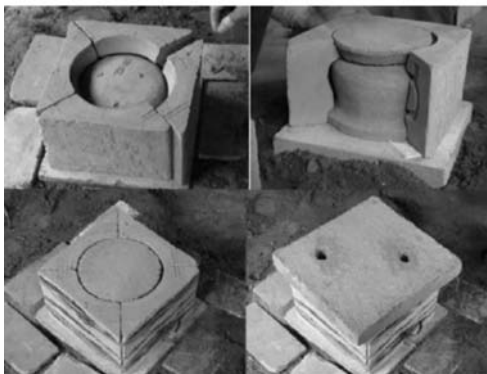


图3 组装焙烧好的陶型  
Fig. 3 Assembling roasted pottery mold



图5 经过打磨处理后的圆底簋  
Fig. 5 Polished round bottom gui

外，焙烧还要足够的时间，以使泥型完全脱气。

中国古代除陶范铸造青铜器外，还出土有石范和金属范，且模拟实验也表明用石范和金属范是可以铸造青铜器或金属币的<sup>[16-17]</sup>。各地出土的石范的材质主要是一些砂岩、粉砂岩和变质岩类<sup>[11]</sup>。中国新石器时期出土陶器的孔隙率大部分都在20%~30%<sup>[14]</sup>，砂岩的孔隙率在1.6%~28.0%，粉砂岩百分之几到十几，片麻岩0.7%~2.2%，绿泥石片岩0.8%~2.1%，侵入岩在百分之零点几到几<sup>[18]</sup>，而金属型几乎不透气。因此，仅从透气的角度考虑，即使“陶化”了，也完全可以浇注。

上述模拟浇注青铜器的实验也充分表明，所谓的“陶化”不能作为中国古代青铜铸造工艺中泥型焙烧的上限温度。如果各种发气因素在焙烧过程中被消除，且浇注温度控制合适，对铸型的透气性是不需要过多考虑的。而且，是否陶化，温度是一个方面，另一个方面就是原料里面有没有相对低熔点的物质，因为温度高不一定意味着“陶化”。当然，需要考虑的一个问题是，在粘土含量比较高的情况下，经过高温



图6 浇注出的方座簋  
Fig. 6 Cast square base gui

焙烧后陶范、陶芯就会比较硬，这会给浇注后器物的清理，尤其是各种容器芯土的清除带来困难<sup>[19-20]</sup>。所以与泥范相比，古代泥芯材料的粘土含量较低，砂含量较多，颗粒也比较粗<sup>[6]</sup>，或在陶型表面做涂层处理<sup>[21]</sup>，原因也是为了后期容易清理。

## 4 结论

(1) 浇注前, 阴干后的陶范、陶芯要进行焙烧, 以消除高温浇注时可能产生气体的各种潜在因素, 焙烧的下限温度是泥料中各种粘土矿物的完全脱水、碳酸盐类矿物及有机质的分解。具体说, 以黄土为原料的泥型的焙烧温度下限应在850~900℃, 南方的泥料在700~750℃。

(2) 温度上限以不产生明显玻璃化、导致铸型变形为准, 只要铸型没有变形, 即使“陶化”了也是可以用来浇注的。

### 参考文献:

- [1] 华觉明. 中国古代金属技术 [M]. 河南: 大象出版社, 1999: 87-88.
- [2] 谭德睿. 中国青铜时代陶范铸造技术研究 [J]. 考古学报, 1999 (2): 211-250.
- [3] 谭德睿. 商周青铜器陶范处理技术的研究 [J]. 自然科学史研究, 1986 (4): 346-360.
- [4] ROBERT W B. Shang Ritual Bronze in the Arthur M. Sackler Collections [M]. Massachusetts: Harvard University Press.1987.
- [5] 董亚巍, 施继龙, 周卫荣, 等. 萧梁钱币铸造工艺模拟实验 [J]. 文物保护与考古科学, 2006, 18 (2): 46-50.
- [6] 谭德睿, 侯马. 东周陶范的材料及其处理技术的研究 [J]. 考古, 1986 (4): 355-362.
- [7] 南普恒, 秦颖, 李桃元, 等. 湖北盘龙城出土部分商代青铜器铸造地的分析 [J]. 文物, 2008 (8): 77-82.
- [8] 万家保. 殷墟发掘所见商代青铜工业 [J]. 大陆杂志, 1972: 1-38.
- [9] 刘煜, 宋江宁, 刘歆益. 周原出土铸铜遗物的分析检测 [J]. 考古与文物, 2007 (4): 94-100.
- [10] 施继龙, 董亚巍, 周卫荣, 等. 萧梁钱范烧成温度的测试分析 [J]. 文物保护与考古科学, 2005, 17 (3): 7-11.
- [11] 冯富根, 王振江, 华觉明, 等. 殷墟出土商代青铜抓铸造工艺的复原研究 [J]. 考古, 1982 (4): 532-537.
- [12] 苏荣誉, 华觉明, 李克敏, 等. 中国上古金属技术 [M]. 山东: 山东科学技术出版社, 1995.
- [13] 李家治, 陈显求, 张福康, 等. 中国古代陶瓷科学技术成就 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 8-20.
- [14] 刘东生. 中国的黄土堆积 [M]. 北京: 科学出版社, 1965: 228-230.
- [15] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社: 2010: 26-27.
- [16] 李迎华, 董亚巍, 周卫荣, 等. 汉代铜范铸钱工艺及其模拟实验 [J]. 中国钱币, 2005 (2): 18-23.
- [17] 王楚栋, 董亚巍, 王金华, 等. 中国古代石范铸钱模拟实验研究 [J]. 中国钱币, 2003 (1): 32-36.
- [18] 唐大雄. 工程岩土学 [M]. 北京: 地质出版社, 1999: 213.
- [19] 田建花, 王静艺. 先秦青铜器的铸后加工 [J]. 铸造, 2018 (10): 906-909.
- [20] 高守雷, 范金辉. 试论中国商周时期青铜器的铸造技术 [J]. 铸造, 2016 (11): 111-114.
- [21] 孙升, 秦颖, 张少昀, 等. 侯马陶范表层处理技术初探 [J]. 铸造, 2008 (10): 1037-1040.

## Calcination Temperature of Clay Mold for Casting Chinese Ancient Bronze: Theoretical Analysis and Simulation Experiments

YANG Cheng-da<sup>1</sup>, XU Lai-wu<sup>1</sup>, DONG Zi-jun<sup>2</sup>, DONG Ya-wei<sup>2</sup>, QIN Ying<sup>1</sup>

(1. Department for the History of Science and Scientific Archaeology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 2. Shaanxi Zhouyuan Museum Bronze Mold Casting Technology Research Institute, Baoji 722201, Shaanxi, China)

### Abstract:

Clay mold roasting is an important part of the bronze casting because it is critical to the success of the final casting and the quality of the casting. There are different opinions in academia on the calcination temperature of ancient clay mold. The paper analyzes the lower and upper limit temperatures of ancient clay mold roasting from the possible mineral composition of the clay, the purpose of roasting and the simulation experiment of bronze. As a result of the analysis, the lower limit temperature of clay mold roasting should not be less than the temperature at which the clay mineral contained is removed from the structural water. As long as it is not deformed, or can be corrected after treatment, the clay mold can be used for casting even if it is "ceramicized". The pouring temperature of bronze casting is about 1 100 °C. If the clay mold contains more minerals (such as carbonates) which decompose to generate gas at this temperature, decomposition temperature of these minerals is also an important consideration for the calcination temperature.

### Key words:

bronze; clay mold; calcination temperature; mineral composition; gas evolution