

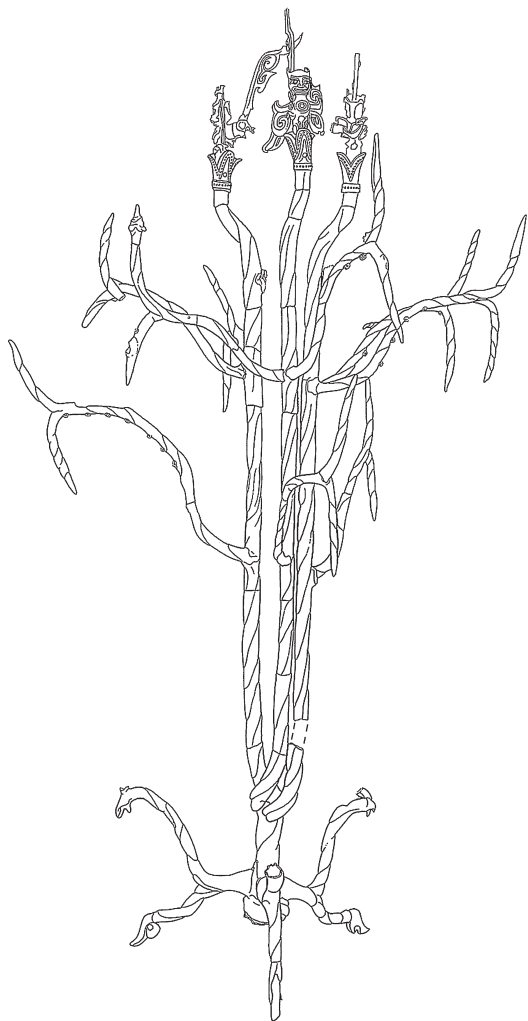
三星堆遗址出土三号青铜神树铸造工艺及相关问题研究^{*}

郭建波(四川大学考古文博学院 博士研究生)
陈坤龙(北京科技大学科技史与文化遗产研究院 教授)
李映福(四川大学考古文博学院 教授)
曲亮(故宫博物院 研究馆员)
张雪雁(故宫博物院 副研究馆员)
谢振斌(四川省文物考古研究院 研究馆员)
王冲(四川省文物考古研究院 副研究馆员)

1986年三星堆遗址一、二号坑的发掘引起了巨大轰动,三星堆出土青铜器尤其是非容器类器物因其独特的器形和鲜明的工艺特点而为学界所关注。学界采用科技手段对三星堆青铜器的基体成分、铸造工艺、产地和矿料来源等进行了研究。商周青铜器多为铸造成型,铸造工艺又分浑铸和分铸两种方式。三星堆青铜器铸造普遍使用了分铸法,这一点已为学界所公认,但对于分铸连接方法的认识并不统一,诸如学者提出的“爪铸法”和“邦铸法”^[1]、“铸接”和“焊接”^[2]、“铸铆”和“铸焊”^[3]等连接工艺。青铜器分铸连接工艺大体可分为铸接和焊接,铸接又可分为后铸法和先铸法^[4],焊接也可分为压焊、熔焊和钎焊^[5]。可以看出,学者对于三星堆青铜器铸造连接工艺有诸多解读和命名,

而其原因在于学者对焊接工艺理解各有不同,加之利用现代焊接概念去对照古代青铜器铸造连接技术,从学理上虽然可行,但接头构造形式的差异又导致不同学者有不同理解。现在看来,上述分铸连接方法实质上是研究者根据三星堆青铜器相同的分铸连接现象所给出的不同名称。由于技术手段的限制,先前只能通过肉眼观察对青铜器铸造工艺进行推断解读,这也容易导致不同研究者对同一现象形成不同理解。同时,若仅限于器物表面观察,则不能做出确切判断。有鉴于此,本文以三星堆遗址二号坑出土的三号青铜神树(K2③:272)为研究对象,运用X射线CT断层扫描技术获取青铜神树内部结构影像图,分析三号神树的铸造工艺及相关问题。

^{*} 本文得到国家重点研发计划项目“夏商时期金属产地调查及溯源方法研究”(项目编号:2022YFF0903703)、四川省重点研发项目“考古出土脆弱文物保护关键技术与应用示范”(项目编号:2022YFS0558)资助。



图一 三号青铜神树(K2③: 272)(约 1/6)

一 铸造技术与连接工艺

经 X-CT 检测和观察分析, 三号神树由人首鸟身像、树干(分上、中、下三段)、树枝、树座等构成(图一~三)。下文分部位对三号神树铸造工艺进行分析。

1. 人首鸟身像

三号神树共有 3 只人首鸟身像, 分别站立在神树树干顶端的花蕾上, 人首向外, 尾羽向内。人首鸟身像头顶平, 面部戴面罩, 头部戴颊, 方脸, 大眼, 高鼻, 大耳, 耳廓外展; 鸟身较短, 宽翼, 尾羽分叉分别向上、下卷曲, 上羽有云纹状饰物, 下羽尖有一环纽。从 X-CT 影像可

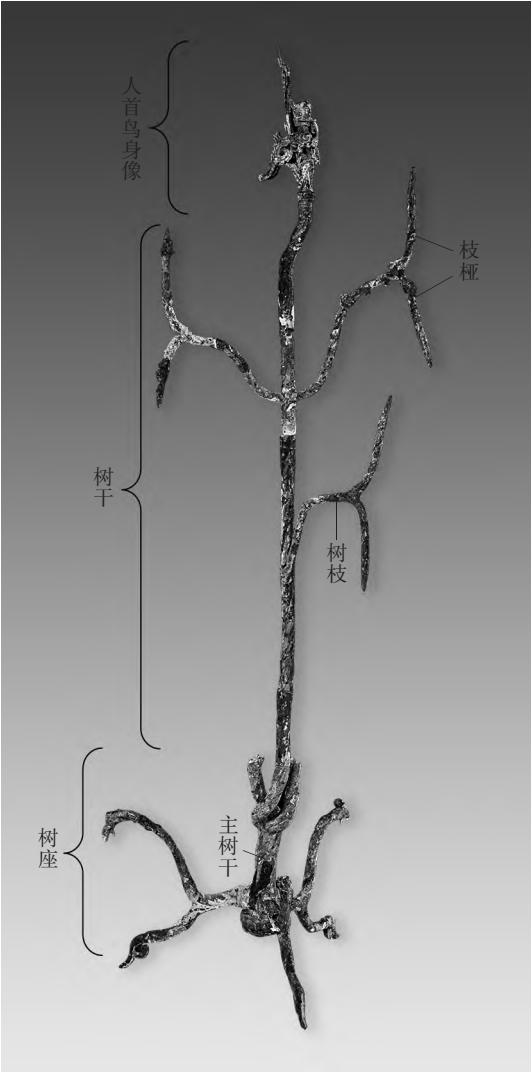


图二 三号青铜神树(K2③: 272)复原

以看出, 单只人首鸟身像由颊部、头身部和尾羽三部分铸接组成(图四: 1)。铸造头身部时, 在头部前额和后额设预留孔(图四: 3), 后额预留孔处有浇铸痕迹(图四: 4), 前额预留孔处无铜液残留, 再结合铜液由后向前将颊部前端包裹的现象判断, 后额预留孔为浇口。连接工序是, 先将颊部插入头部前额预留孔中, 在外施范, 从浇口将铜液注入, 待冷却后即可将颊部与头身部连接为一体。尾羽与身体(图四: 2)、鸟爪与花蕾、花蕾与树干同样采用这种铸接方式连接成一体。

2. 树干

神树共有 3 支树干, 每支树干呈三股绞绳状, 笔直向上延伸, 至人首鸟身像下端再向外略微弯曲向上。分析 B2771-2、B2772-2 等 4 支树干残件的 CT 影像, 发现树干泥芯中有芯骨。以 B2771-2 为例(图五), 芯骨呈笔直长条形, 其密度比泥芯的密度低, 因此可以肯定芯骨材



图三 三号青铜神树各部位名称图解

质属有机质类,这与其他神树中发现的芯骨类似^⑨。但因芯骨包裹在树干中间,无法进一步确认其种属。树干中还发现有横向穿过泥芯和树干外壁的条状物,其长度与树干直径相当,密度与神树壁密度一致,应为铜质。从所处位置、形状、大小推断,该条状物与芯撑作用相当,因呈长条形,遂称为条形芯撑。神树芯撑与其他青铜器上发现的芯撑有所不同。芯撑在青铜器铸造中是用来固定内外范位置以确保浇铸成功,一般呈片状或块状,多以其他小块残破器物作为芯撑材料,具有很大随意性。

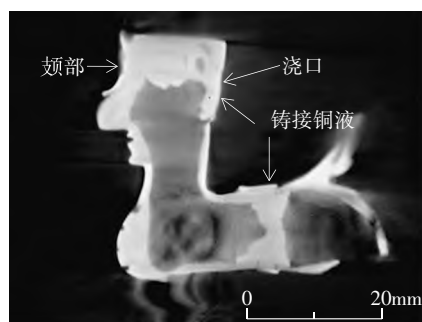
通过归类比较分析,不同树干中条形芯撑的数量、位置基本一致。芯骨、条形芯撑数量及分布情况见表一。

从三号神树树干上下端 CT 影像可以看出,三支树干均为分段浇铸后再铸接成一支完整的树干。现以其中一支树干为例进行说明,树干从上至下的顺序是:人首鸟身像(OA)→上段(AB+BC)→中段(CD)→下段(DE)→底座(EF)。上段树干有两处断裂,A 点断裂但未完全脱落,B 点已完全断开,从 A、B 两点的 CT 影像可以看出,B 点断裂处没有铜液铸接的痕迹,因此推断 B 点不是铸接位置,而树干其他断裂处(A、C、D、E 点)基本是铸造单元之间的连接处,其两端茬口处都有明显的二次浇铸痕迹(图六)。以上几段树干上下两端断裂处茬口有的比较整齐,是连接上下构件所留下的连接痕迹。根据以上分析,可推断神树每支树干均分

表一 芯骨、条形芯撑数量及位置统计表

藏品编号	条形芯撑数量(条)	位置	芯骨数量(条)	位置
B2771-2	3	树干弯折处上方1条、下方2条	1	树干下方末端
B2772-2	2	以树枝为分界,上下各1条,截面呈方形	1	树枝节点下方与条形芯撑之间
B2773-2	2	树干弯折处下方2条	2	树干弯折处上下末端各1条
B2773-3	3	以树枝为分界,上2条,下1条,截面呈方形	无	
494(人首鸟身像下部树干部分)	1	树干弯折处上方	无	
B2772-4	1	树干弯折处下方	1	树枝节点上方与条形芯撑之间
B2771-3	2	以树枝为分界,上下各1条,截面呈方形	3	以树枝为分界,上2条,下1条

注:以纯数字编号的标本为三星堆博物馆藏,以字母“B”开头加数字编号的标本为四川省文物考古研究院藏。



1



2



3



4

图四 人首鸟身像(650)
连接工艺图解

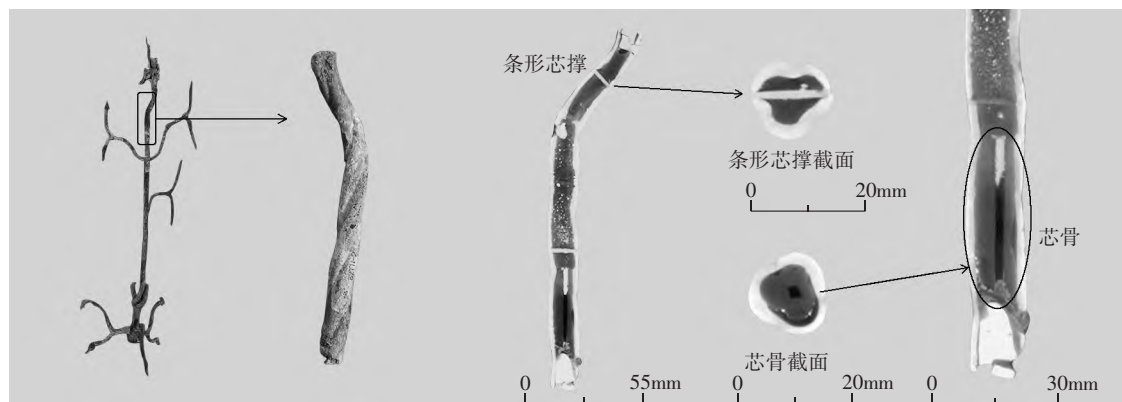
1. 人首鸟身像 X-CT 影像
2. 尾羽与身体铸接痕
3. 头部前额预留孔
4. 头部后额铸接痕

为上(AC)、中(CD)、下(DE)三段,最后铸接成一支完整树干。每支树干与底座部分的主树干分别铸好后,将连接处的树干、主树干中的泥芯掏出,然后施范浇铸铜液连接。

3. 树枝

树枝分上下两层,下层为单树枝,上层为

双树枝,共9支。每支树枝前端又分成两个小枝桠,一小枝上翘,一小枝下垂。树枝与枝桠是浑铸成型,外形呈绞绳状。B2785 树枝一侧有4个环纽(图七),可能用于悬挂饰件,现只留有环纽,不见挂饰。环纽与树枝的连接采取的方法是先铸成U形环纽,将其包埋在树枝泥范中,



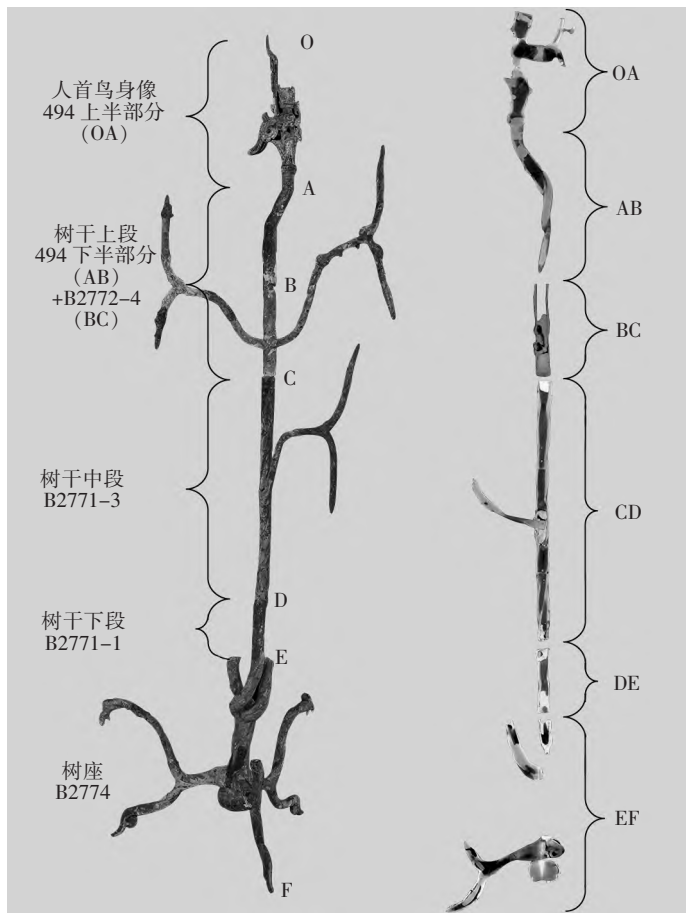
图五 三号青铜神树树干残件(B2771-2)内部结构图

再与树枝进行二次浇铸成型,即分铸法中的先铸法。环纽嵌入树枝深度较浅,且两脚嵌入树枝部分深浅不一。从范线痕迹推测,环纽恰处于范缝处(图八)。这样的设计,便于施范和确定环纽位置。

树枝与树干的连接也是通过铸接工艺完成。如 B2773-1 树枝与树干的连接孔,是在树干铸造时就已经设定好的预留孔(图九~一一)。连接树枝时,先从预留孔中掏出部分内芯形成浅凹槽,再将树枝插入凹槽,在外部施范浇铸使其连接固定。这种连接方式,与人首鸟身像头部的连接方式一致。另外,在 B2771-2、B2771-3 残枝的连接上也可以明显看到此类情况。

4. 树座

树座(B2774)残缺,由三只脚与主树干构成,每只脚从树座中心向外伸出上下两只三股绞绳状触角,上部触角前端开出小叉,下部触角呈尖状触地(图一二:1)。主树干主体呈三股绞绳状,下端呈花蕾状,已残。树座底部呈花蕾状的铜疙瘩由三部分构成(图一二:2~4),树座中心是神树主干(a),外侧是铸接块(b),再外侧是一层带有花纹的外壳(c)。外壳不仅具有包裹内层铜构件使之成为一体的作用,还具有一定的装饰效果。这部分的浇铸工序应该是,先掏出主树干中的部分泥芯,将主树干倒置,施外范;然后浇铸主树干空腔及周边形成铸接块,这样可使铸接块与主树干连接;最后,在铸接块外面再施范铸造外壳。三只脚与主树干同样采用铸接的方

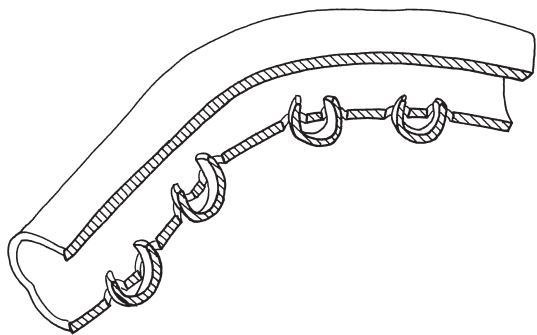


图六 三号青铜神树单支树干复原图

式连接(图一三)。主树干壁上设置浅凹槽,将脚的末端置于凹槽内,连接处施范浇铸,使两者连接。两者是点对点的连接,接触面较小。该连接方式使得树座牢固程度较低,很难支撑神树体量。从现有情况分析,树座底部花蕾状结构



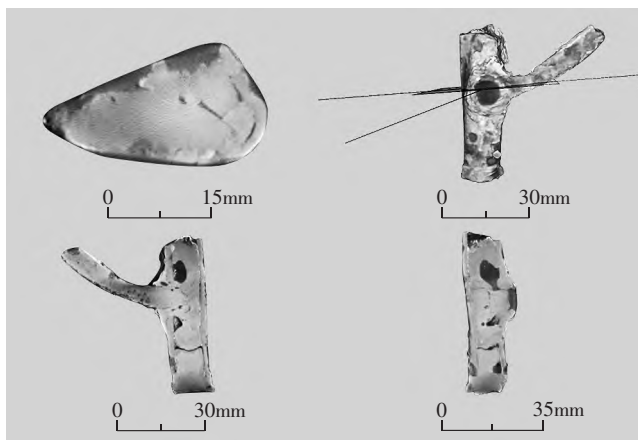
图七 树枝(B2785)



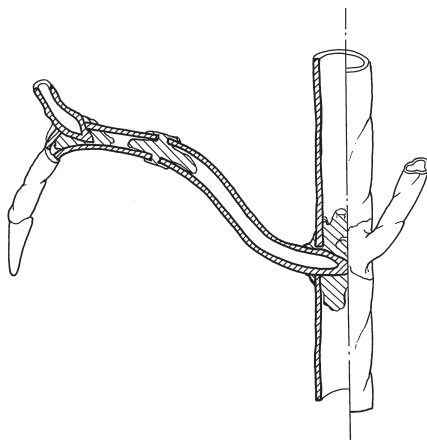
图八 树枝与环组结构示意图



图九 树枝与树干残件(B2773-1)



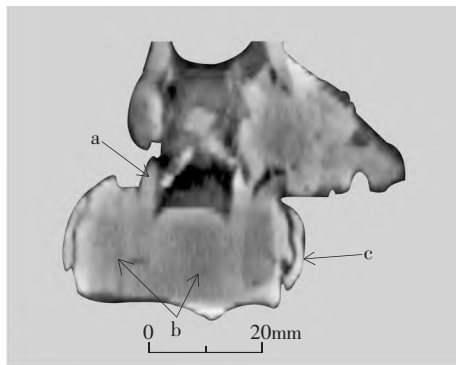
图一〇 树枝与树干残件(B2773-1)CT 影像



图一一 树枝与树干连接结构示意图



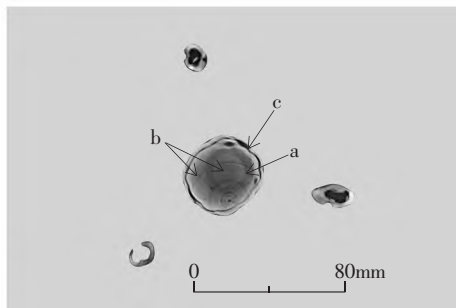
1



2



3



4

图一二 三号
青铜神树树座
1. 正视
2. 正视 CT 影像
3. 仰视
4. 仰视 CT 影像

应该是残缺不全的,铸接块下端应该还有能够支撑整个神树重量的其他构件,这样才能分担三只脚所承受的重量。

根据上文分析,可得出神树单支树干形貌及结构解剖示意图(图一四)。三号神树整体系分铸成型,人首鸟身像、树干、树枝、树座等均以铸接的方式进行连接。树干也是分段铸造后进行铸接,并应用了条形芯撑和芯骨技术。

二 关于神树铸造细节的几点认识

1. 铸造技术因素分析

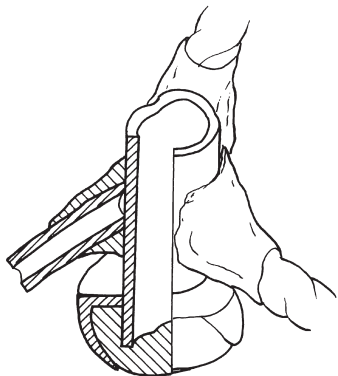
据前文分析,三号神树铸造仍采用双合范的模范法,各构件先分铸再铸接,包括人首鸟身像、人首鸟身像与树干、树干与树枝、树干与底座、底座、树枝与环纽等的连接均是如此。此外,铸造中还使用了芯骨和条形芯撑技术。三号神树的铸造以分铸法为基础,以铸接技术、芯骨技术和条形芯撑技术为核心特征,这些技术因素共同构成了三号神树铸造的工艺系统。三号神树树干铸型工艺(图一五)显示,这种铸造方法不仅需要精湛的技艺,还需要对材料特性和工艺流程有深入的理解,如此才能完成神树的铸造。

三号神树铸造中使用的芯骨和条形芯撑技术,是商周青铜器铸造中十分罕见的技术现象。国内的研究表明,秦代的青铜水禽和青铜马车中出现了铁质、铜质和木质三类芯骨,研究者将芯骨视为失蜡法铸造的一个重要特征^[7]。此外,资阳兰家坡汉墓出土的青铜马腿中也发现有芯骨^[8]。国外的学者在美国大都会博物馆的藏品中也发现了铁质芯骨,其中包括希腊发现的青铜马(前480~前470年)^[9]和意大利发现的青铜人像(前5世纪中期)^[10]。值得注意的是,青铜人像中的芯骨呈空心状,这与三星堆三号神树中的实心芯骨存在明显区别。三号神树中的条形芯撑仅见于三星堆青铜器,其在形式上呈长条形,截面近方形,垂直贯穿内芯以固定泥芯的位置,同时也有固定内外范间距的作用,从而保证器物浇铸的成功率。条形芯撑除功能上类似于普通芯撑或垫片外,在形式、材质、使用方法上两者都有所差异。

在三号神树浇铸时,条形芯撑位于外范范

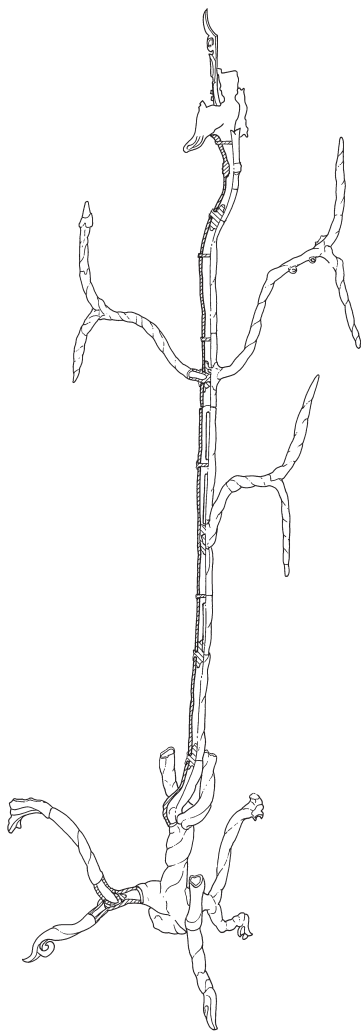
图一三

树座结构示意图

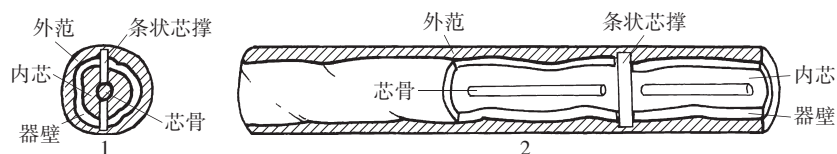


图一四

单支树干形貌及结构解剖示意图



缝处,这种放置方式决定了三号神树的浇铸方式应为平躺式,这样就可以避免泥芯在重力方向上的滑移。当然,浇铸时倾斜放置会使铜液



图一五 树干铸造设计示意图

1. 截面 2. 剖面



图一六 1号树干下段(B2771-1)

上下两端茬口



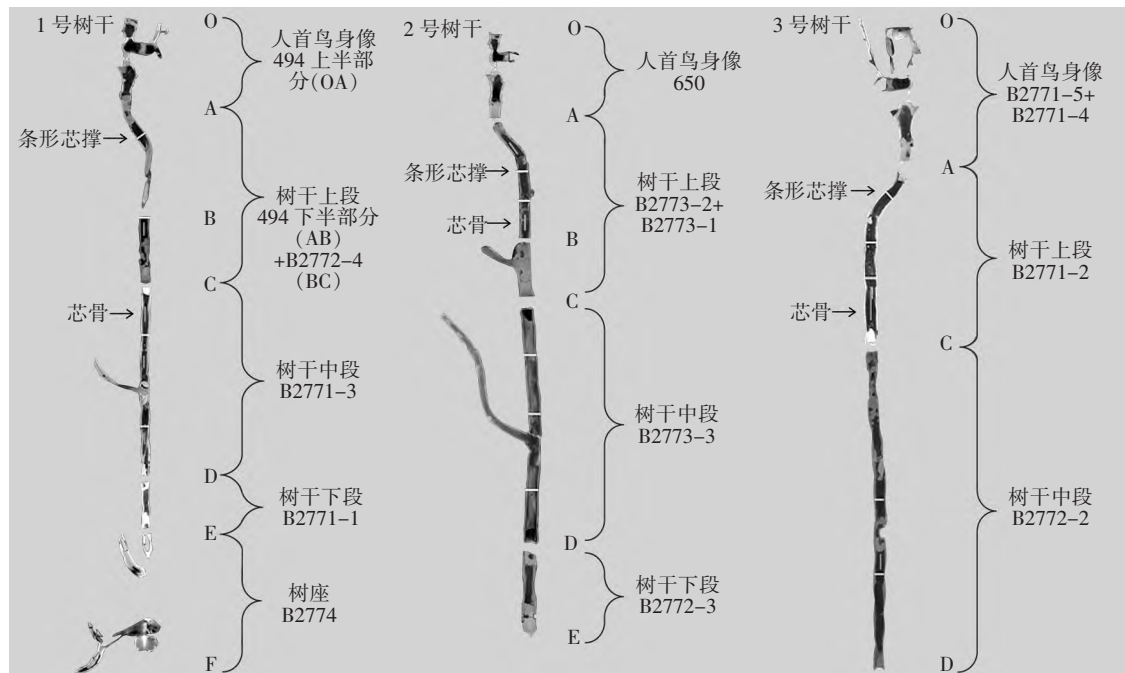
图一七 2号树干下段(B2772-3)

上下两端茬口

流动性更好,易于成型,不过倾斜角度应较小。

2. 树干断裂与器物损毁方式

从三号神树残损情况分析,人首鸟身像的尾羽、鸟翅等属于易折损部位,且发生了不同程度的损伤。其他断裂处基本上是铸造单元之间的连接点,即从铸接缝处断裂,通过CT影像和实物均可观察到铸接处断裂情况。如树座主树干顶端三支树干断裂处(见图一二:1)及B2771-1(图一六)、B2771-3、B2772-3(图一七)、B2773-3、B2771-2、B2772-2等树干两



图一八 三号青铜神树树干连接顺序及芯骨、条形芯撑分布示意图

端茬口处都有明显的二次浇铸痕迹。以上几段树干上下两端断裂处茬口有的比较整齐,是连接上下树干所留下的铸接痕迹。每支树干残枝的CT影像从上至下可大致拼接完整,并可标注出芯骨和条形芯撑的大致位置(图一八)。

1号树干:人首鸟身像(494 上半部分)→上段(494 下半部分+B2772-4)→中段(B2771-3)→下段(B2771-1)→树座。

2号树干:人首鸟身像(650)→上段(B2773-2+B2773-1)→中段(B2773-3)→下段(B2772-3)→树座。

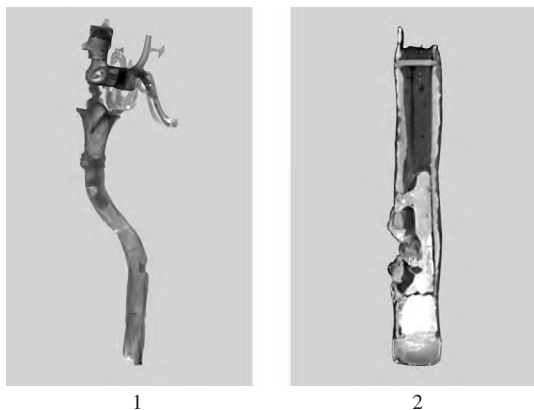
3号树干:人首鸟身像(B2771-5+B2771-4)→上段(B2771-2)→中段(B2772-2)→下段(不存)→树座。

值得注意的是,1、2号树干断裂点B位于树干上段,断裂痕迹明显且茬口不齐,未见浇铸铸接痕迹(图一九)。3号树干上段相同位置未断裂,也不见浇铸铸接痕迹。由此推断,1、2号树干上段与3号树干上段一样,在铸造时为一整体,后在外力作用下受损,断裂点B并非铸接点。

同时,对神树进行显微观察,未见明显打砸痕迹和严重弯曲变形迹象,除1、2号树干B断裂点外,其他断裂处均在铸造单元连接处。连接处力学性能差、易被折断、易脱落,稍微施加外力就会断裂,可能人为掰折就能够使其断裂。由此看来,在祭祀毁器时,并非用重器野蛮地打砸。这为三星堆青铜器的损毁方式提供了新的证据。

三 结 语

本研究通过X-CT影像获取了三号神树内部结构信息,直观地反映了神树的铸造工艺,为解读三星堆青铜文明的技术成就提供了科学依据。分析结果显示,三号神树不仅整体系分铸成型,而且各部件也均为分部铸造,再通过铸接法连接成一棵完整的神树;树干泥芯的制作使用了芯骨和条形芯撑技术。三号神树的铸造工艺显现出三星堆青铜器铸造具有完善的技术系统和独特的技术特征,从铸造工艺的角度而言,表



图一九 1号树干断裂处(B点)茬口

1. 494 下端 2. B2772-4 上端

现最为明显的是分铸法的使用,这与同时期其他青铜器群的铸造工艺是一致的,只不过分铸法的应用在三星堆青铜器铸造中更为广泛。本研究首次发现了殷商时期使用条形芯撑的实例,明确了条形芯撑的制作方法、连接方式及作用机理。三号神树芯骨的功用与其他神树中发现的芯骨是一致的。三星堆三号神树的铸造工艺流程,显然是经过精心规划和设计的,反映出三星堆青铜冶铸生产已经达到相当高的水平。另外,根据三号神树断裂的结构特点,判明了各断裂处构件的连接关系,为解读三星堆青铜器的损毁方式提供了科学依据。

附记:本文在写作过程中得到四川省文物考古研究院陈德安研究馆员和英国剑桥大学李约瑟研究所梅建军教授的指导,三星堆博物馆余健副研究馆员、郭汉中副研究馆员为本研究提供了帮助,特此致谢。

- [1] 曾中懋《三星堆出土铜器的铸造技术》,《四川文物》1994年第6期。
- [2] Xu Jie, *The Sanxingdui Site: Art and Archaeology*, PhD's Thesis, Princeton University, 2008.
- [3] 苏荣誉《三星堆祭祀坑青铜器铸造工艺的初步考察》,《神秘的王国——对三星堆文明的初步理解和解释》,巴蜀书社,2003年。
- [4] 华觉明《中国古代金属技术——铜和铁造就的文明》(下转第96页)

探讨。研究表明,最迟在北宋早期,定窑已出现了支圈烧工艺,从仰烧发展至覆烧,对景德镇覆烧工艺产生了影响。科技检测结果显示,晚唐五代时期,定窑细白瓷的胎料氧化钙含量很高,应是掺入了原本用作釉助熔剂的石灰石或草木灰,以促使胎体烧结。北宋中期,白瓷釉色从白中泛青逐渐变为白中泛黄,这既与烧瓷燃料从柴到煤的转变相合,又与釉料中添加了富含蒙脱石、长石的岩石类原料有关。改进釉料配方,形成所谓“二元配方”是人工改变原料性状的尝试。南北方配制原料的努力方向不同,南方窑场倾向于提高铝含量,北方反之。另外北宋中期以后,定窑白瓷釉料中氧化钾的含量逐渐增高,这也是定窑白瓷釉色白中泛黄的原因之一。

北京师范大学物理与天文学院程琳等对定窑出土的北宋时期化妆白瓷和细白瓷样品的胎料和化妆土进行了科技检测,认为细白瓷和化妆白瓷的胎料来源相同,在制作工艺上存在差别。化妆土是一种高钾钙低铁的黏土,其铁含量与细白瓷胎料近似,钙含量则约为胎料的 3 倍。化妆土钾钙含量高,使其能够在高温下仍与胎釉紧密结合,同时又不生成玻璃相。

河北曲阳陈氏定窑瓷业有限公司庞永辉从定窑非遗传承人的视角分析了定窑传统生产工艺,尤其关注到了定瓷在制作过程中形成的各种器表工艺留痕,如芒口、泪痕、竹丝刷痕、底施半釉、底足手掐痕等。汇报从烧成瓷器的实践经验及实验考古学的角度探讨了以上

工艺特征的成因、展现形式等问题,还原了宋代定瓷制作的工艺流程,是从生产实操角度进行的有益探索。

四 定窑遗址保护与展示

曲阳县文化广电和旅游局刘斌介绍了定窑遗址保护现状及国家考古遗址公园的建设进程,深度思考了如何当好城市文脉的“守护者”这一重要课题。目前曲阳县正通过建设遗址博物馆、定窑展示利用体验及服务设施,开展定瓷大道环境整治项目,整合周边村落定瓷生产作坊,规划建设周边文化古村落等举措,带动定窑遗址的保护和定瓷产业发展。

研讨会由故宫博物院王光尧进行学术总结。他首先高度评价了此次研讨会取得的学术成果,同时指出定窑研究仍然存在较多亟待解决的问题,并提出三点期待。第一,明代《大明会典》记载,从宣德时期开始,真定府每年为内府供应库和光禄寺烧造瓷瓶坛,但目前尚难在考古发掘出土的遗物中识别出文献记载的真定府生产的瓶坛类产品,希望能在未来的窑址考古调查发掘中获得证据。第二,应进一步研究定窑产品的流布问题,特别是定瓷在辽、金以及蒙古统治区域内的使用比例,以及不同区域间瓷器面貌的差异性。定量统计仅为开端,之后应深入发掘其背后的历史成因。第三,应扩大定窑生产技艺的影响力,让传统工艺更好融入现代社会,焕发时代光彩。

(实习编辑:崔 焱)

(上接第 93 页)

- 明》,第 136 页,大象出版社,1999 年。
- [5] 中国冶金百科全书《金属材料》卷编辑委员会《中国冶金百科全书·金属材料卷》,第 659、688、689、868 页,冶金工业出版社,2001 年。
- [6] 郭建波等《三星堆出土青铜器铸造工艺补议》,《南方文物》2021 年第 3 期。
- [7] 邵安定《秦始皇帝陵园出土彩绘青铜水禽制作工艺及相关问题研究》,科学出版社,2019 年;杨欢《秦始皇帝陵出土青铜马车铸造工艺新探》,《文物》2019 年第 4 期。

- [8] 冯陆一等《资阳青铜车马的修复》,《文物修复研究》(第 5 辑),民族出版社,2009 年。
- [9] Joseph V. Noble, The Forgery of Our Greek Bronze Horse, *The Metropolitan Museum of Art Bulletin*, New Series, vol.26, No.6, 1968.
- [10] Jennifer A. Henrichs, *The Riace Bronzes: A Comparative Study in the Style and Technique*, Master Thesis for University of West Florida—Pensacola, 2005.

(责任编辑:周艳明)