

三星堆出土青铜器铸造工艺补议

- ◆ 郭建波 (四川省文物考古研究院)
- ◆ 田 灏 (北京科技大学科技史与文化遗产研究院)
- ◆ 余 健 (三星堆博物馆 四川大学考古文博学院)
- ◆ 谢振斌 (四川省文物考古研究院)
- ◆ 曲 亮 (故宫博物院)
- ◆ 刘思然 (北京科技大学科技史与文化遗产研究院)
- ◆ 陈坤龙

摘 要:关于三星堆出土青铜器的铸造工艺已开展了许多研究,但仍有部分技术问题有待进一步明晰。本文首次利用工业CT分析了部分三星堆青铜器残件标本,并结合表面痕迹观察对相关工艺问题进行了讨论。分铸和各种连接工艺在三星堆得到了广泛应用,通过多次浇注在各部件间形成稳固的机械连接,是青铜神树等形状复杂的器物得以成功铸造的技术保障。太阳形器上的后铸锅扣连接、神树枝在内壁设置销杆的榫接结构等,均是颇具特点的工艺措施。在铜树枝残件内发现了使用芯骨的证据,芯骨的材质以竹木质为主,是此类工艺目前所见最早的实物证据。部分容器的兽头装饰,采用了内置盲芯的复合范技术浑铸而成,显示了三星堆尊罍等容器不同的年代属性和技术传统。

关键词:三星堆;青铜器;铸造工艺;工业CT;分铸连接;芯骨

Abstract: A number of studies have been carried out on the casting process of bronzes unearthed from the Sanxingdui site, however, many technical details are left unknown. This paper, for the first time examines bronze objects of Sanxingdui using industrial Computerized Tomography (CT) and discusses relevant technique issues together with the evidence from the surface observation. It is pointed out that multiple pouring and various joining techniques had been widely practiced. Different parts were mechanically connected with each other by a sequence of pours, which had been the crucial technique for the casting complicated objects such as the bronzes trees. The cast on cramp device in the sun-like objects and the combination of tenon and dowel in the tree branches are typical practices of the Sanxingdui foundry. Core rods are identified in the inner cores of branches of bronze trees, most of which were likely to be made of wood or bamboo. This is the earliest evidence for the using of core rods in ancient Chinese bronzes. It is also revealed that the animal heads in some of vessels were cast in one pour together with the body by combining separate sets of molds assemblage with the main one, which left blind cores in the animal heads. This observation implies the possible variation of chronology and technical traditions of the Zun and Lei vessels unearthed from Sanxingdui.

Key Words: Sanxingdui; Bronzes; Casting process; Industrial computerized tomography; Multiple pouring and joining; Core rod

三星堆祭祀坑出土青铜器是中原以外最为重要的商代青铜器群之一,自20世纪80年代发现以来,在国内外学界得到了广泛关注。学者们围绕其年代、埋藏性质、文化因素、矿料与产地来源等诸多问题,开展了持续而深入的研究,取得了许多重要的研究成果。关于三星堆铜器群的铸造工艺已有多位学者发表过专论,对其技术面貌有了较为清晰的认识^①。但囿于技术条件所限,以往的研究多专注于器物表面痕迹的观察,而较少涉及内部结构的剖析。近期,我们对三星堆铜器残片进行了整理和工艺考察,并利用工业CT对部分青铜器残件进行了检测。现将工艺考察和CT分析的结果整理择要刊布,并就相关工艺问题进行初步探讨,以期为学界提供有益的信息。

一、关于分铸与连接工艺

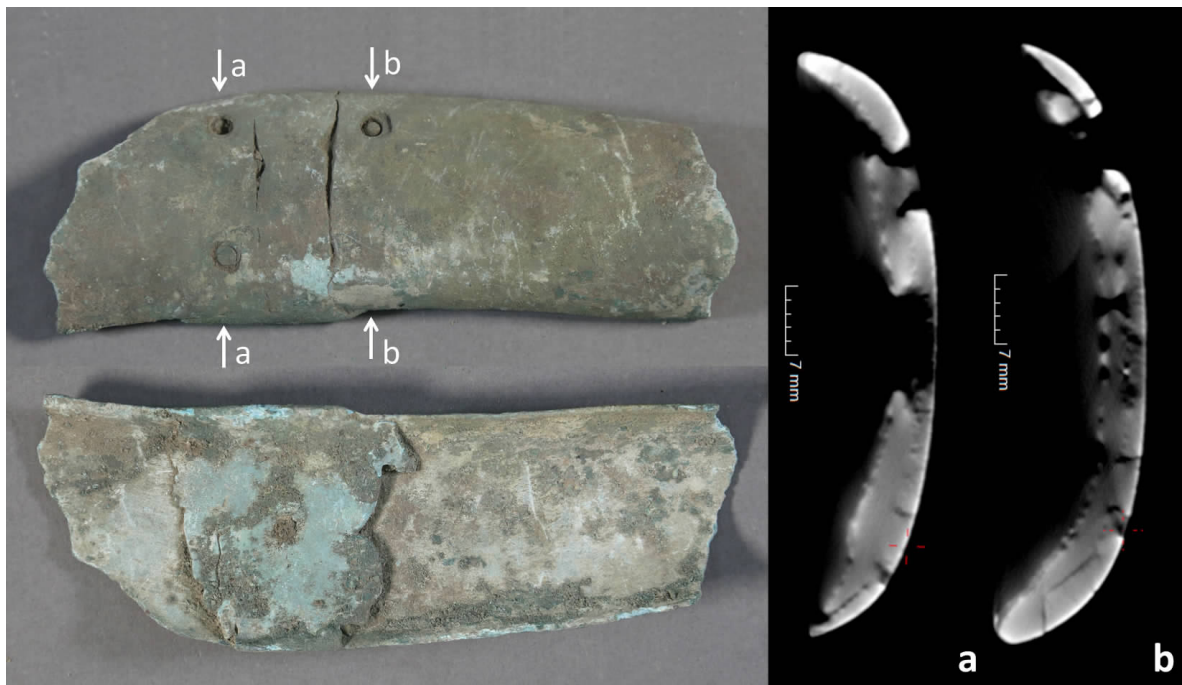
分铸和各种连接工艺在三星堆铜器群中较为常见。在神树、人面像等非容器类器物的制作中,使用更为频繁,工艺措施也多种多样,这与其不规则的形状和复杂的器物结构是密切相关的。曾中懋先生曾在先铸和后铸两种分铸法之外,还举出“套铸法”、“爪铸法”和“邦铸法”等工艺^②。据其文中描述,这三种工艺均是用于两个以上铸件连接,其浇注行为在三次以上,已属有些学者所讨论的焊接(钎焊)的范畴^③。苏荣誉先生则将其称为铸铆或铸焊^④。许杰先生认为,通过第三次浇注将已有铸件进行连接的操作,与先铸分铸法有着相同的技术原则。他根据浇注连接时是否需要制作外范,分别称为“铸接”(running on)和“焊接”(soldering)^⑤,并且正确地指出部件之间的连接并非通过熔接来实现,而主要是依靠凸榫等

机械锁紧装置^⑥。

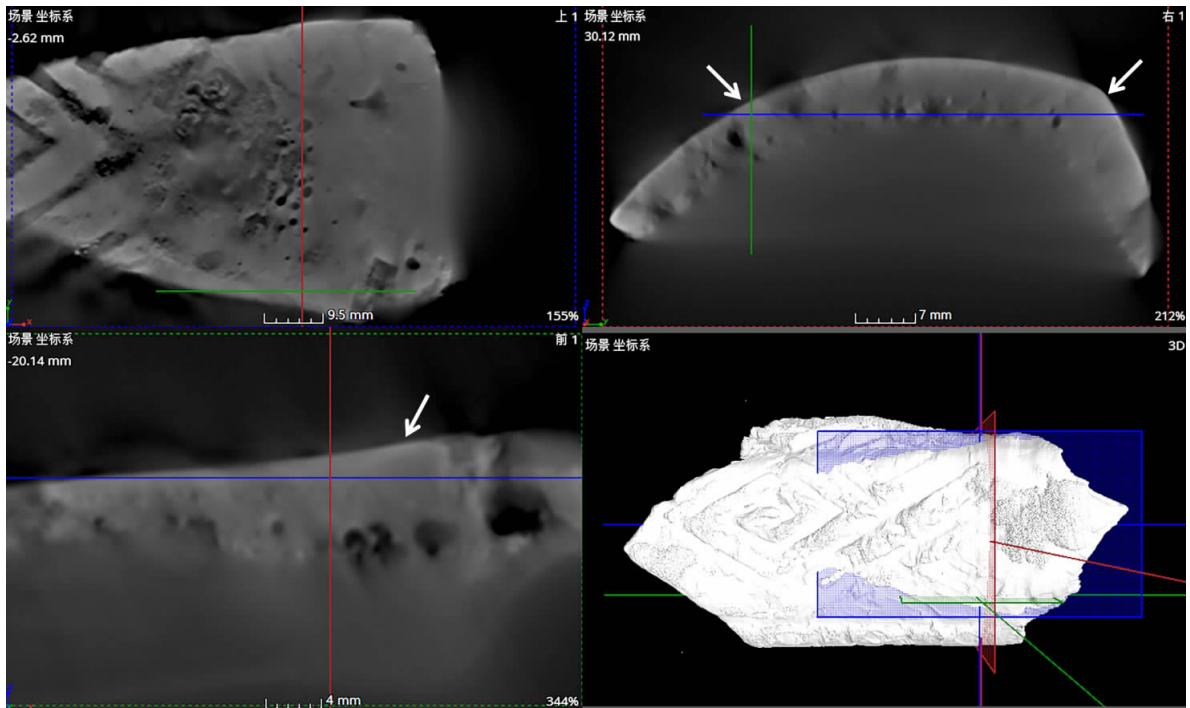
我们本次分析的器物残片中,有许多具有明显的连接结构。标本19SXD-K:037(原号缺)为太阳形器晕圈残片,器物残长17.5cm。根据各部件的位置和相互叠压关系可知,两侧的晕圈先分别浇注成型,并在拼接处设置铆孔,孔径约0.5~1cm,且正面的孔径均稍大,可能是有意为之。然后将两片晕圈正面向下置于弧形的面范之上,在背面进行浇注。铜液填充接缝并流入铆孔,形成类似铜扣的结构将部件连接起来(图一)。曾中懋先生将这种连接方式称为“爪铸法”是非常形象的^⑦,其各部件之间显然是机械连接的关系。本次分析的其他太阳形器和19SXD-K:115(原号缺)蛇形器残片(图二),也具有相同的连接结构。

标本19SXD-K:049(原号缺)疑为神树树枝残件,残长23.3cm,截面呈不规则圆形,直径约3cm。沿长径有相对的两条范线痕迹,推测为双合范铸造。树枝原来应与另一节树枝相连,现已脱落,保留有多次铸造的叠压痕迹。CT分析显示(图三),树枝一端加粗的凸起与内部榫接部件实为一体,且树枝内部设置有销杆。根据各部件的现存结构可以推测,待连接的树枝为单独铸造,并在接口处附近的泥芯上钻眼,浇注后形成销杆。然后分别掏去接口处附近的泥芯,固定相对位置后在外施范,进行第三次浇注。铜液流入树枝内部包裹销杆形成机械连接,并包裹树枝外壁形成看似圆箍的凸起。

可以看出,这种连接方式与以往理解的套铸法有较大区别,后铸的铜液与原铸件上的销杆形成机械锁紧结构的做法,与学者们所称的“铸铆接”具有类似的结构^⑧。根据本次对6件神树树枝的CT分析结果,树枝之间的连接均是通过内部的榫接部件来实



图一 K:037 太阳形器晕圈铸接痕迹与CT切片图

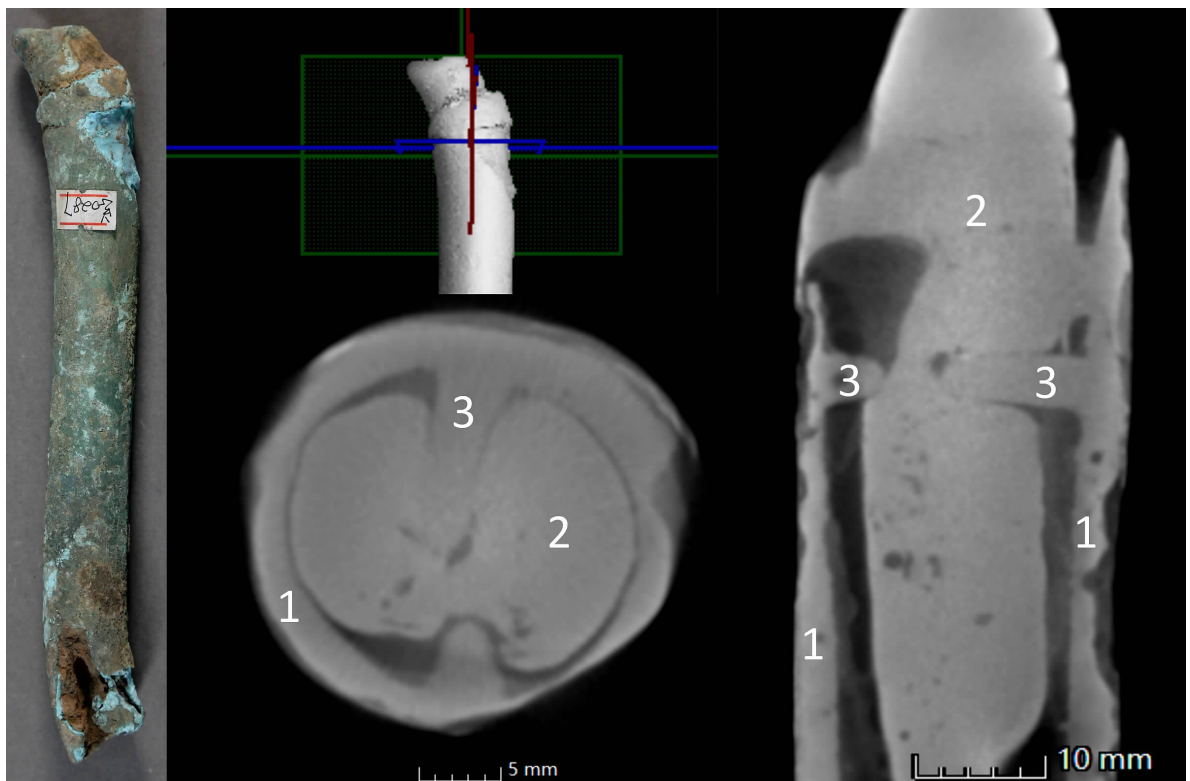


图二 蛇形器残片 CT 切片图(箭头所指为铆接处)

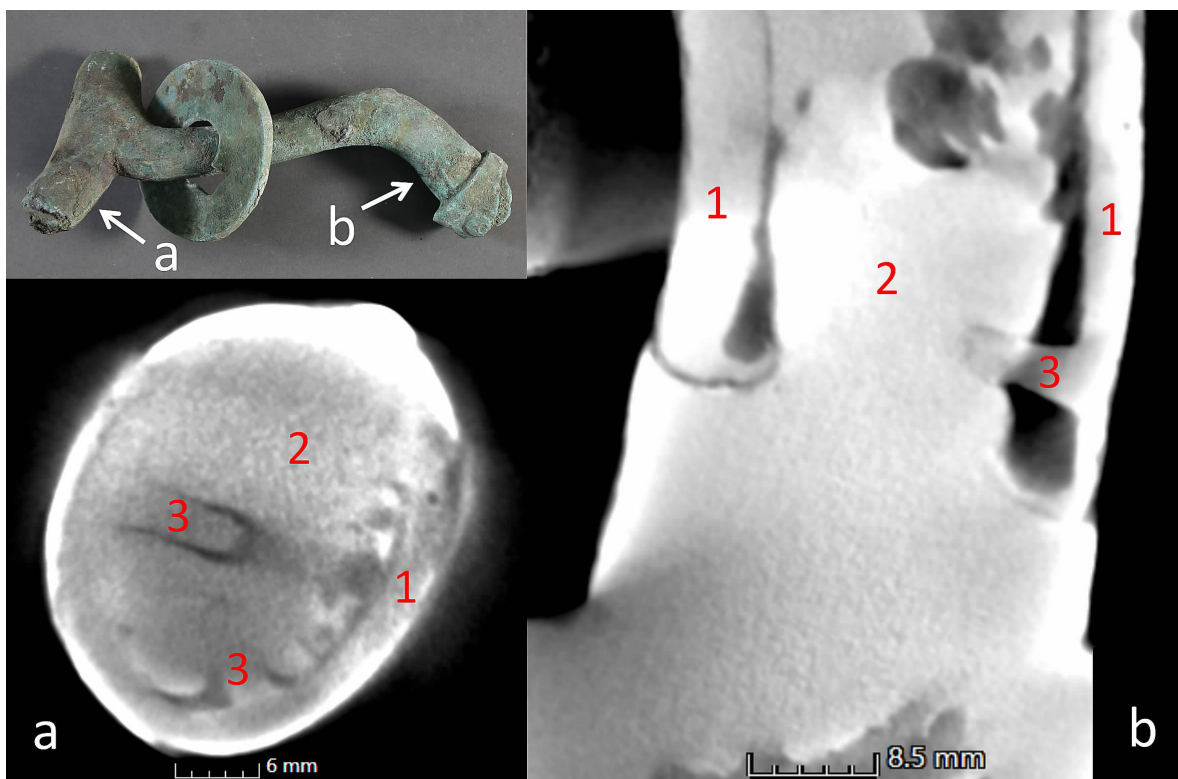
现的,却并未发现套铸的直接证据。套铸和铸铆接等不同连接方式的辨别,及其相互关系是值得关注的问题。除标本 K:049 外,在树枝内壁设置销杆的现象还见于标本 19SXD-K2:051(原编号 K2②:194),且后者的两个销杆并非沿直线分布,而是相互之间形成

钝角,分布在树枝椭圆截面的一侧(图四)。由此可知,内部销杆的设置似乎有一定的随意性,在不同部位、不同尺寸的部件之间是否有规律可循,尚有待更为系统的工艺分析结果。

标本 19SXD-K2:120(原编号 K2③:204)也应为



图三 标本 K:049 连接处 CT 切片图
(1.树枝外壁;2.榫接部件;3.销杆)

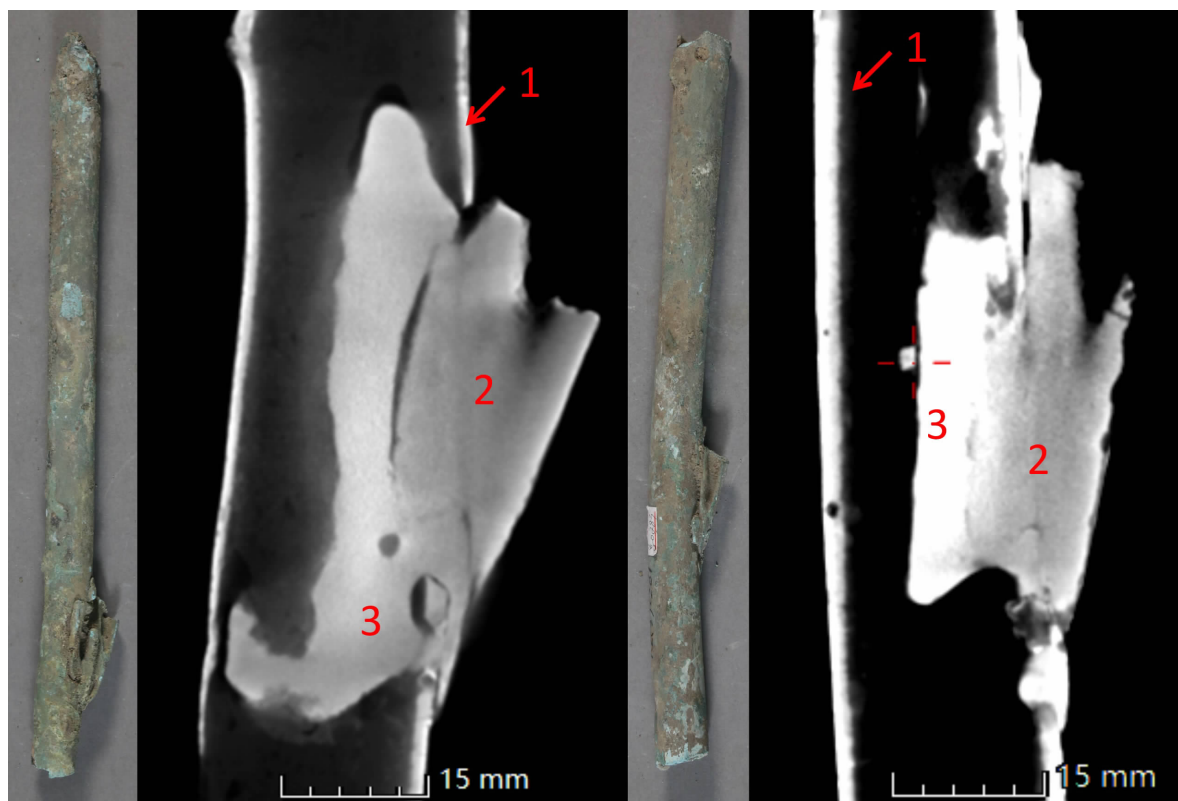


图四 标本 K2:051 连接处 CT 切片图

(1.树枝外壁;2.榫接部件;3.销杆)

神树树枝残件，残长 35.5cm，截面近圆形，直径约 2.4cm，树枝一侧保留铸铆接的榫杆，另一侧近接口

处侧向连接枝杈状附件，现已残损。CT 结果显示，枝杈附件与树枝为多次浇注连接而成。树枝先铸并在



图五 标本 K2:120(左)与 K2:121(右)枝杈连接处 CT 切片图

(1.树枝外壁;2.分铸枝杈;3.后铸连接部位)

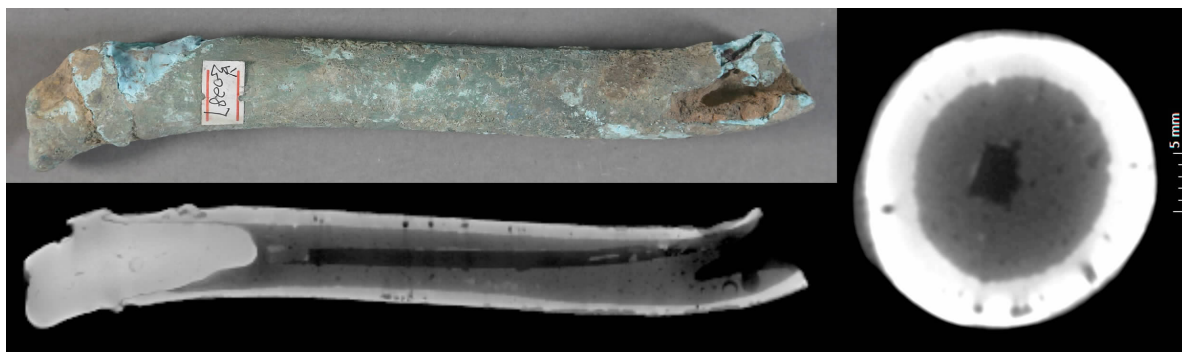
连接处设置连接孔,其后掏去部分泥芯在外测施范,二次浇注形成与树枝相连的枝杈附件,部分铜液流出叠压树枝外壁。之后再掏去部分泥芯,在连接部位再次浇注铜液包裹枝杈的根部。标本 19SXD-K2:121(原编号 K2③:261)树枝与枝杈的连接,也具有类似的结构(图五)。但其枝杈似应为单独铸造成型后再插入树枝的连接孔,因而与树枝外壁未形成铜液流淌叠压的痕迹。这种操作即是许杰先生所指的铸接或焊接工艺,通过后浇注的铜液的包裹,在各部件之间形成机械的连接结构。

二、关于芯骨的使用

所谓芯骨是指在型芯内设置的支撑骨架,起到提高型芯强度和刚度的作用。本次分析的标本中有 6 件为疑似树枝残件,除前文已提及的 19SXD-K:049、K2:051、K2:120、K2:121 以外,还包括标本 K2:050(原

编号)和 K2:122(原编号,已断为两节)。除标本 K2:051 外,在其余 5 件标本中均发现有使用芯骨的迹象(图六)。其中 K2:122 芯骨为铜质片状,且在两端铸成十字交叉结构,可知同时还可起到芯撑的作用(图七)。其余 4 件标本的芯骨推测材质应为竹木等有机质,现已腐朽降解,在泥芯内形成空腔保留原芯骨的形状,截面多呈不规则圆形。

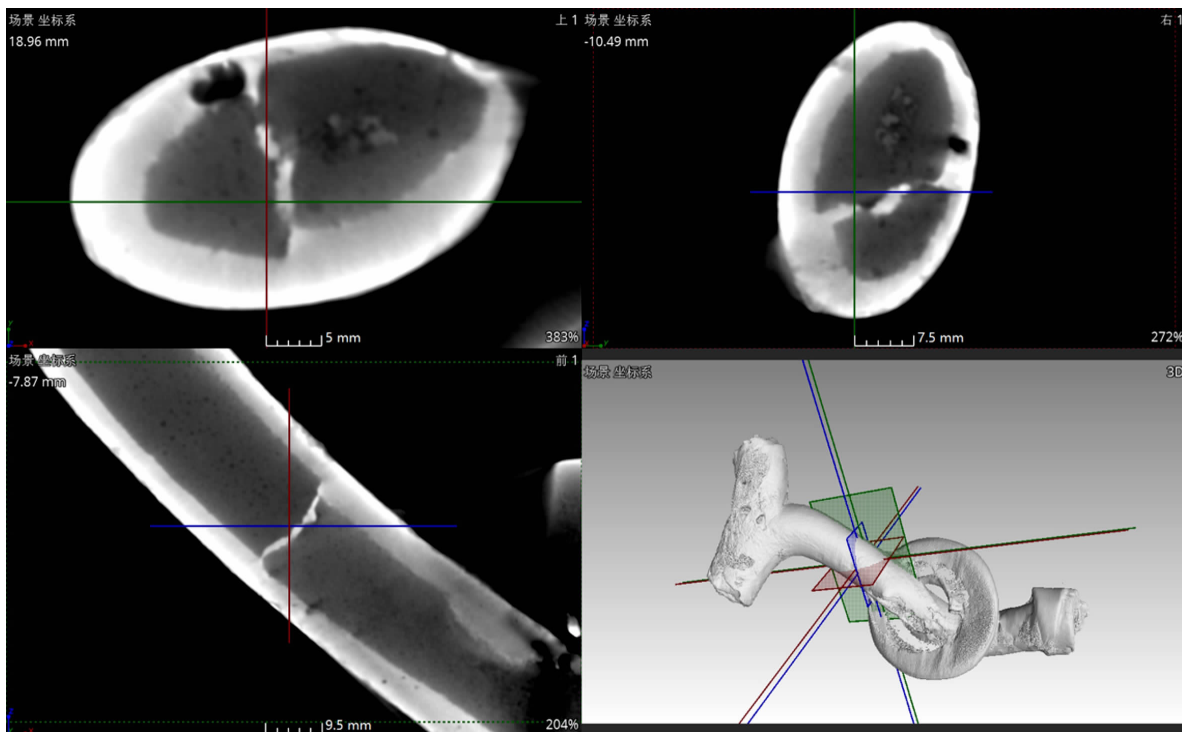
三星堆铜器中的芯骨目前仅发现于树枝残件标本,这与其形状和铸型结构是密切相关的。树枝的内芯直径基本在 2cm 以下,而长度则可能超过数十厘米,在制作泥芯和组合范型等操作中,非常有可能因强度不足而导致泥质内芯的断裂。所以,在神树树枝的泥芯中设置芯骨是非常合理的技术措施。有意思的是,本次分析的样品中仅标本 K2:051 未发现使用芯骨的迹象,但在其中部位置则观察到一层铜液,且局部壁厚差异明显(图八)。这显然是范型组合或浇注过程中,内芯沿其短径断裂所致。这也从反面证实



图六 标本 K:049 芯骨痕迹 CT 切片图(右侧为横剖面)



图七 标本 K2:122 芯骨 CT 切片图



图八 标本 K2:051 内芯断裂位置 CT 切片图

了在铸造操作过程中，使用芯骨对泥芯进行加强的必要性。

中国先秦青铜器上芯骨的使用并不多见，目前见诸报道的，仅有新干大洋洲出土的铜甗（编号为 13907）。X 光片显示其耳部的兽身内盲芯中有一金属丝，可能为制作泥芯时使用的芯骨^⑩。秦始皇帝陵园出土铜车马一号车的车辵、车軫、伞撑以及马腿，二号车的车辵和马腿等长条形部件，曾发现有芯骨，均为铁质^⑪。邵安定在对秦始皇陵陪葬坑出土青铜水禽的研究中，在 7 件青铜水禽的头颈部发现有使用芯骨现象，其中 6 件器物的芯骨为铜制，而 10 号天鹅颈部的木质芯骨为首次发现。他还指出，由于木质芯骨在 X 光透射照片上难以显示，尚不能明确了解木质芯骨的整体使用情况^⑫。除新干铜甗耳部的兽形附件以外，其余使用了芯骨的器物均为长条状。根据其形状及芯骨的位置，可知其作用与三星堆神树枝上的芯骨相同，均为提高泥芯的强度，防止制芯、合范或浇注过程中断裂。

与中国先秦时期铜器的情况不同，芯骨在古代西方铸件，尤其是青铜雕像上的使用却非常广泛。古埃及、古希腊和古罗马青铜雕像的内芯中，常见金属条制作的框架，是芯骨最为典型的形态^⑬。玛秋希 (C. Mattusch) 在内芯中设置芯骨，是西方古代失蜡法铸造的重要特征^⑭。邵安定通过对比范铸法和失蜡法的工艺流程，指出失蜡铸造的泥芯在制作完成后需经历施蜡、雕塑、制外范等一系列操作，从而对其强度有较高要求，设置芯撑则成为必要的技术措施，且其作用主要是提高泥芯在焙烧前的强度，从工艺的角度

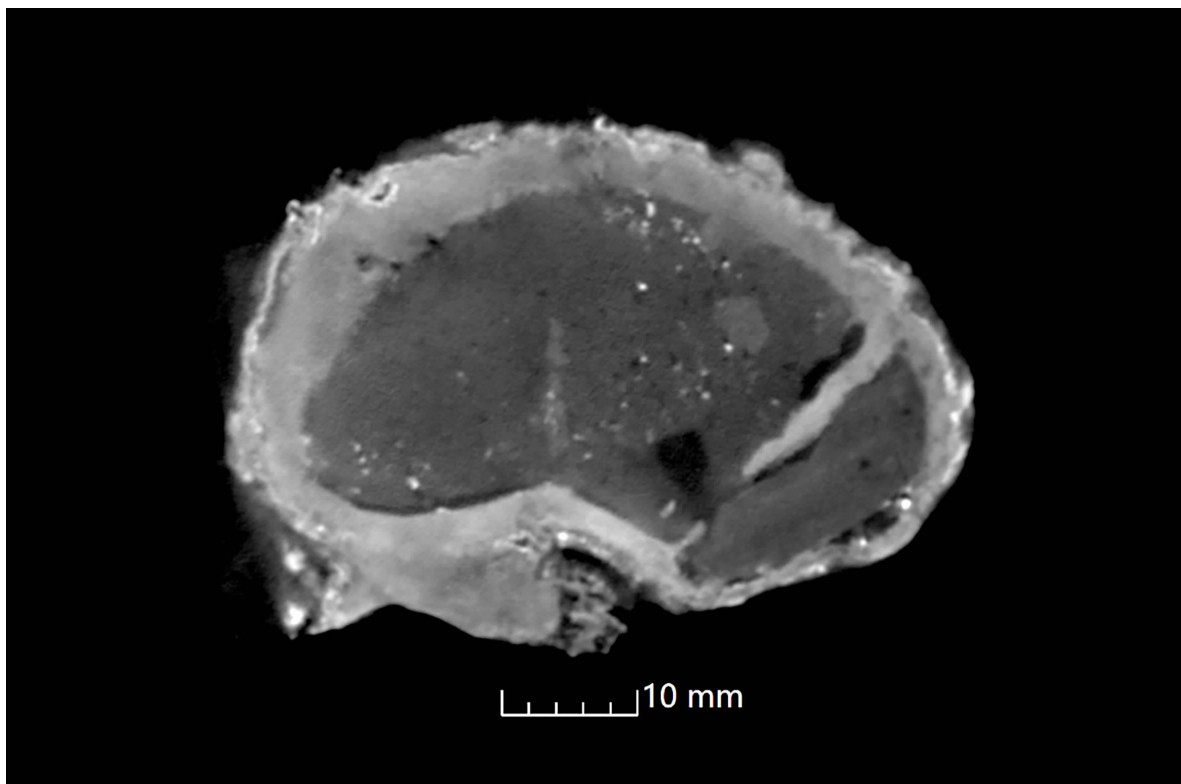
对芯骨与失蜡法的联系进行了论证。并结合镶嵌补缀等西方青铜雕塑上常见的工艺措施，指出秦始皇陵出土青铜水禽为失蜡法铸造^⑮。杨欢近期对秦始皇陵出土铜车马铸造工艺的讨论中，也采用了类似的工艺判别标准^⑯。

三星堆树枝残件的芯骨，是目前这一技术措施在商代青铜铸造中得以使用的最为明确的证据。但据以往研究以及本次工艺考察的结果，部分三星堆树枝残件上仍可见铸造披缝存在，当是合范铸造的痕迹。由此，芯骨的使用与铸造方法之间是否存在必然联系，显然成为今后研究中需要重新考虑的问题。当然，在现有的证据下，我们也无意重提巴纳先生 (N. Barnard) 关于三星堆部分器物为失蜡法铸件之说^⑰，但希望相关技术细节的揭示，能有助于我们对此问题的理解。

三、关于几类兽头的制法

尊、罍等圈足器是三星堆出土青铜容器的主要类型，苏荣誉等先生就其铸造工艺已有详细分析^⑱。这些尊罍上多有兽头，铸造方法有一定区别，而学者们关注较多的是兽头的分铸。本次对铜器残件的整理过程中，发现了两件卷角羊形兽头残件，根据兽头的形制和腐蚀特点，可推测原来应同属一件器物。器物的内壁平整，兽头与器壁无叠压痕迹，其内保留泥芯。由此可知此器物的兽头系采用复合范的方法与器身浑铸 (图九)。

容器的肩部装饰兽头，从二里岗上层时期开始出现。整个商代时期，可以见到四种主要的做法 (图一

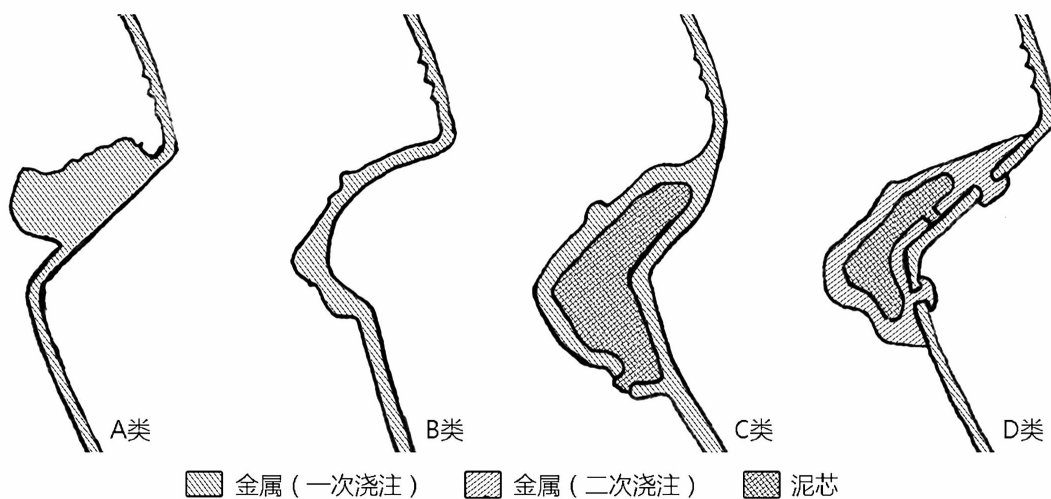


图九 兽头标本 CT 切片图显示与器身浑铸及内芯破裂

○)。A类兽头较矮,为实心,与器身浑铸成形,兽头型腔带于器身外范之上。B类兽头中空,亦较矮,对应位置的内壁凹入。这种兽头也是浑铸成形,型腔带于外范之上,并在腹芯的对应位置设有凸起,即采用了所谓“凸凹范”铸法。C类兽头内有泥芯,上下皆可见有明显的芯撑孔,对应的内壁封闭。由于兽头的分型面与器身的分型面并不重合,故推测此类兽头采用对开分型的方式单独制范,合范后与器身外范装配组合(即前述“复合范技术”),并在兽头范内设置盲芯,与器身浑铸成形。D类兽头与器身分别铸成,

通过铸铆等方式与器身主体结合,又分先铸和后铸两种。

上述四种不同的兽头制法,从一个侧面反映了范铸技术的发展演进过程。从铸型组合的技术难度来看,A类兽头最为简单,许多铜器上的扁平兽头,既是采用这种方法制成。根据金属铸造理论,在相同的铸造条件下,铸件的冷却时间通常与其断面面积成正比。如果兽头过高,会导致兽头与器身结合处的壁厚变化过大,容易导致开裂等铸造缺陷。A类兽头实心的做法,限制了兽头的突出高度,立体感难以充分



图一〇 尊罍肩部兽头的四类制法示意图

表现。为解决这一矛盾,二里岗上层时期开始在腹芯相应的位置塑出稍小的凸起,即形成B类兽头的形态。这种外凸内凹的做法,实际上是铜器铸造“等壁厚原则”的一种体现,可以避免因兽头与器身壁厚不同而可能导致的开裂现象^⑧。但是采用这种方法铸造的器物,会在容器的腔体内产生相对凹孔。而C类兽头的制法,将兽头的内芯从腹芯上脱离,通过设置芯撑的办法与外范组合,并与腹芯保持一定的间隙。在浇注过程中,铜液可以流入兽头芯和腹芯之间的空隙,形成连续的内壁表面,避免了容器腔体内的凹孔。而兽头芯会包裹在铸成的兽头之内无法取出,形成所谓的盲芯^⑨。

就铸造方法而言,C类兽头仍属于浑铸的范畴。内置盲芯和复合范工艺的应用虽然在一定程度上解决了A类和B类兽头制作中存在的问题,但设置盲芯的技术难度较大,与器身铸型的组合也使得兽头的形状不可能太复杂。可能是出于对兽头形状立体化的追求或者是降低铸型组合难度的需要,殷墟后期包括三星堆出土的尊罍等器物上形象立体、结构复杂的兽头造型,多是分铸法铸成。

四、结语

包括铸造工艺在内的生产技术,是观察古代青铜器的重要视角。本文从分铸连接、芯骨的使用、盲芯与组合范技术等几个方面,对本次资料整理和工艺考察的主要发现进行了简要介绍,为以往的工艺推断提供了影像学的证据,同时也补充修正了部分观点。三星堆灵活多变的分铸和连接技术,是青铜神树这样造型复杂的器物得以成功铸造的关键。树枝内芯中的芯骨是首次发现,它可以有效提高内芯的强度,从而保证型芯组合和浇注的成功率。目前为止,芯骨在其他地区同时期的青铜器中很少发现,可视作三星堆铜器铸造中颇具特点的工艺措施。而采用复合范技术浑铸兽头的发现,则为认识三星堆铜器群中部分容器的年代,提供了新的参考。

后记:陈坤龙为本文通讯作者。研究过程中,得到了陈德安先生的指导,朱亚蓉、宋艳、任俊锋、肖庆、郭汉中等同仁给予了诸多帮助。CT分析完成于故宫博物院,得到了刘建宇和张雪雁等同仁的大力支持。国家社会科学基金(17ZDA178)、国家“万人计划”青年拔尖人才项目、四川省文物考古研究院提供了资金支持。在此一并谨致谢忱。

注释:

①a. 曾中懋:《三星堆出土铜器的铸造技术》,《四川文物》1994年第6期;b. 苏荣誉:《三星堆祭祀坑青铜器铸造工艺的初步考察》,孙华、苏荣誉:《神秘的王国:对三星堆文明的初步理解和解释》,第55~89页,巴蜀书社,2003年;c. Xu, Jay Jie. The Sanxingdui site: art and archaeology.

Princeton: Princeton University, 2008, pp. 156-183. d. 三船温尚:《三星堆的青铜铸技术》,西江清高编:《扶桑与若木:日本学者对三星堆文明的新认识》,第55~89页,巴蜀书社,2002年。

②⑦曾中懋:《三星堆出土铜器的铸造技术》,《四川文物》1994年第6期。

③张昌平:《商周青铜礼器铸造中焊接技术传统的形成》,《考古》2018年第2期。

④苏荣誉:《三星堆祭祀坑青铜器铸造工艺的初步考察》,孙华、苏荣誉:《神秘的王国:对三星堆文明的初步理解和解释》,第55~89页,巴蜀书社,2003年。

⑤Xu, Jay Jie. The Sanxingdui site: art and archaeology. Princeton: Princeton University, 2008, p. 158.

⑥Xu, Jay Jie. The Sanxingdui site: art and archaeology. Princeton: Princeton University, 2008, p. 175.

⑧苏荣誉:《安阳殷墟青铜技术渊源的商代南方要素》,泉屋博古馆、九州国立博物馆编(黄荣光)译:《泉屋透赏——泉屋博古馆青铜器投射扫描解析》,第352~386页,科学出版社,2015年。

⑨胡东波:《青铜文物X光成像研究》,陈建立、刘煜编:《商周青铜器的范铸技术研究》,第306~319页,文物出版社,2011年。

⑩秦始皇兵马俑博物馆、陕西省考古研究所编:《秦始皇陵铜车马发掘报告》,第244~322页,文物出版社,1998年。

⑪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》,第23~65、109~111页,科学出版社,2019年。

⑫Henrichs, J. The Riace bronzes: a comparative study in the style and technique. Master thesis for University of West Florida—Pensacola. 2005, pp. 11-32.

⑬Mattusch, C. Greek Bronze Statuary: from the Beginning to the Fifth Century B.C. New York: Cornell University Press, 1988, pp. 219-240.

⑭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》,第122~130页,科学出版社,2019年。

⑮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。

⑯巴纳:《对于广汉埋葬坑青铜器及其他器物意义的初步认识》,罗泰编:《奇异的凸目:西方学者看三星堆》,第155~217页,巴蜀书社,2003年。

⑰a. 苏荣誉:《三星堆祭祀坑青铜器铸造工艺的初步考察》,孙华、苏荣誉:《神秘的王国:对三星堆文明的初步理解和解释》,第55~89页,巴蜀书社,2003年;b. 苏荣誉:《中国青铜技术与艺术(丁酉集)》,第50~74页,上海古籍出版社,2019年。

⑱李济、万家保:《殷墟出土青铜器形器之研究》,第26~30页,(台北)“中研院”历史语言研究所,1968年。

⑲刘煜:《圈足上的镂孔:试论商代青铜器的泥芯撑技术》,《南方文物》2014年第3期。

(责任编辑:周广明)