

李三孤堆楚墓青铜壶所见铸造工艺

董逸岩^{1, 2}, 苏荣誉², 张钟云³

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院自然科学史研究所, 北京 100190;

3. 湖北大学历史文化学院, 湖北武汉 430062)

摘要: 泥范块范法是中国古代所特有的青铜器铸造技术。战国晚期, 青铜器的分铸和装饰技术达到了一个巅峰, 但针对这一时期器物的科技分析仍较稀少。本文由李三孤堆楚王墓出土的一批铜器入手, 通过宏观观察、岩相分析、扫描电镜背散射分析和能谱分析, 对战国晚期楚国青铜器的铸造工艺进行了讨论。本文发现, 楚国青铜器所用的分铸技术虽未有创新, 但其应用与器类的对应关系要比以往研究所认为的更加多样, 这一现象或许与器物由多组不同区域的工匠制得相关。由此, 发现楚国青铜器的生产格局比以往所知的更为广阔。

关键词: 李三孤堆楚墓; 范铸法; 铸造工艺; 中国古代青铜器

作者简介:

董逸岩 (1998-), 男, 博士研究生, 研究方向为中国古代青铜器冶铸技术。
电话: 13801365910, E-mail: yy.dong.bronze@gmail.com

通信作者:

张钟云, 男, 教授。电话: 18919662750, E-mail: 657666681@qq.com

中图分类号: TG222

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)12-1620-07

基金项目:

国家社会科学基金一般项目 (19BKG003)。

收稿日期:

2025-06-30 收到初稿,
2025-08-01 收到修订稿。

泥范块范法是中国古代特有的青铜器铸造技术^[1]。该技术以黄土为主要原材料^[2], 经过淘洗、陈腐和麝合等处理^[3], 在刻、印等操作后成为泥范, 以作铸型使用。与砂型铸造不同, 这些以泥范块范铸成的青铜器, 器壁薄且密布细腻纹饰。充型能力较差的铅锡青铜何以成形, 尚不清楚。通过器物内残余的泥芯、跑火和披缝等缺陷, 可为还原当时的工艺技术提供线索, 并为解决青铜砂型铸造的问题提供帮助。

战国时, 楚国青铜器产量极大^[4], 一定程度上体现了南方青铜器的铸造技术。发现于20世纪30年代的李三孤堆楚王墓所出器物极为丰富^[5], 为高等级贵族墓, 可为楚器的代表。该墓年代属战国晚期^[6], 墓主属楚王室^[7]且很大可能为楚幽王^[8]。中国境内, 该墓器物主要收藏于安徽省博物馆和寿县博物馆, 器群不同器物的铸造技术已获简单梳理^[9]。本文将在此基础上, 以出自此墓的一件壶的圈足泥芯入手, 结合宏观观察、岩相观察和SEM检测, 深入分析该器群的铸造工艺细节。

1 试样制备与方法

受文物保护要求制约, 本文仅取壶2: 3311底脱落的泥芯块进行有损检测, 采集泥芯直径约1 cm, 位于壶底泥芯呈色较深部位。

针对所取泥芯, 以Araldite 2020环氧树脂真空浸渍封固, 切片后粘接于玻片上, 研磨至样品层厚约30 μm并抛光, 制成岩相薄片。在Leica DM 750P偏光显微镜下完成岩相分析与图像采集 (单偏光PPL, 正交偏光XPL), 岩相描述参考Whitbread标准^[10], 归纳显著特征。表述中, 称除麝和料外的样品整体为基体。

针对其中重点区域, 在喷金之后使用Thermo Scientific Quattro S扫描电镜进行背散射分析 (SEM-BSE), 考察粘土矿物及显微结构。使用Bruker QUANTAX X射线能谱仪测试成分, 将所得数据与已发表的同类数据比对, 采用PAST 4软件执行主成分分析 (PCA)^[11]。电镜加速电压为15 kV, 工作距离为15 mm。

2 壶2: 3311的基本情况

壶2: 3311现藏安徽博物院, 属铺首衔环式, 无盖 (图1)。壶身整体呈流线

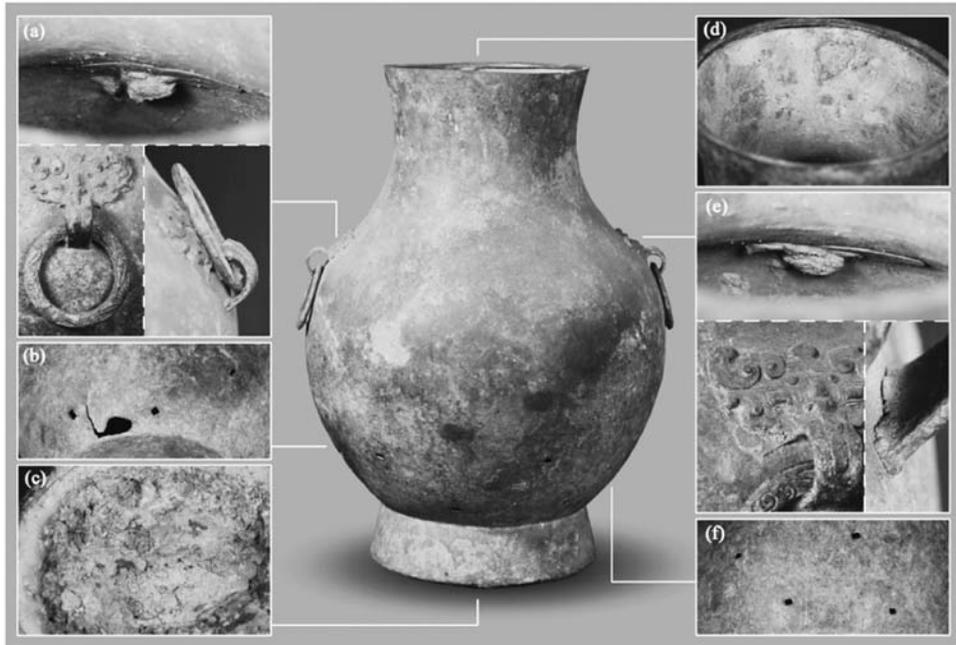


图1 李三孤堆壶2: 3311

Fig. 1 Hu 2: 3311 from Lisangudui

型，素面，未见彩绘或刻划痕迹，无铭文。壶口略厚于器壁，一侧较高且略有起伏，截面近似正圆。壶腹深且圆鼓，最大径近于肩部。圈足平直且微向外移，略大于口径。

2.1 宏观观察

壶2: 3311器身打磨彻底，通体未见披缝等铸造痕迹，分范方式无从辨识。仔细考察铺首处，可判定此壶经两次浇注成形，器身与环先铸而铺首后铸。圈足底虽经打磨，但仍有至少2处凸起，应为浇道残痕。结合口沿较平整的特点考虑，应为倒浇。壶身磨痕横向分布，壶颈至上腹打磨较为精细，并未见深刻的磨痕，下腹则磨石痕迹清晰，均未经抛光。铺首所衔环为二分范铸成，直立浇铸，环沿仅敲除浇道，披缝未作打磨处理，见图1(a)。壶下腹处有一块极大的浇不足，临近垫片未见显著漂移，推测为夹气所致。

壶身遍布垫片，存在明显的“垫片滥用”现象。由口向内观察，肩部铺首以上即设有六周，尺寸相对较大，见图1(d)。壶腹存在11处垫片脱落，所遗孔洞呈矩形，边缘有铜液渗入，见图1(b)，(f)。由此可见，垫片厚度应略薄于器壁。有2处垫片脱落孔边缘存在浅且规则的凹坑，推测系固定垫片所用泥浆过量所致，垫片或许原本贴于外范上。所有铸造缺陷均未补铸。

铺首极薄，与壶身相连紧密，外部观测似为浑铸成形，见图1(a)。但其衔环处下方与壶身有间隙，且兽首边缘轻微跑火，见图1(e)。由内部观测，壶

身内壁有凸起且严重跑火，铜液凝片与器壁不相连，见图1(a)，(e)，说明此壶肩部两铺首分铸。细化观察发现，此凸起表面粗糙，结合其四周跑火薄且均匀的特点，推测应为壶体铸成后，通过壶身上预留的孔洞挖去了一部分壶芯。铺首与壶身为后铸铸接而成，凸起处作为铆块存在。铺首范应当以模制好铺首范后，包上先铸的环并贴于壶壁，制成套接结构^[12]。其结构设置与侯马铸范近似，惟浇道布局存在差异^[13]。为保证铺首与壶壁结合紧密，铸壶身时即预留了孔洞，此孔也可起芯撑的作用，但究竟芯撑设于芯还是外范上，目前尚难确证。范-壶接合面可能采用了某种材料（如：细泥浆），起到粘结剂的功能，使铺首与壶身间少见跑火痕迹。浇道存于衔环处，结合壶内跑火并无明显方向性的特点，推断应当为将壶放平后浇注，先做一侧后做另一侧。若进行CT扫描，剖面结构当如图2(a)所示，有待进一步分析。值得注意的是，此壶衔环处的打磨粗糙，一侧铺首纹饰甚至因打磨操作受损。

壶腹芯几乎已掏取殆尽，仅口内侧有少量残余，质地较为细腻，同底芯面层接近。观察内壁，可见，有凸起的刮削修整痕迹，为处理泥芯时所留，见图1(d)。结合器壁所见泥范破裂痕迹考虑，泥芯处理应相对较粗糙。口沿虽打磨细致，但部分区域内侧隐约可见凸起，触感起伏不匀，与披缝类似。由此推测，铸型设置为外范夹芯，参考图2(b)。

壶底泥芯残余较多，近铜器处呈黄褐色，中心区域呈深灰色，见图1(c)。以颜色判断，似曾进行过

一定程度的清理，但未清完。芯部材质可分为两种，其中靠近铜器的部分较为细腻，未见明显的掺合料，深灰色部分则有大量植物孳杂。宏观判断，深灰色区域泥芯质地不均匀，应由不少于三种泥料粗混而成。孳料为粗细不一的植物茎杆，仅轻微烧失，但多数已碳化。底芯固定方式与腹芯相反，器成于芯上，浇道或浇口的设置也如此，参考图2(c)。

2.2 泥芯的显微结构与成分

2.2.1 岩相检测

所取泥芯主要为富钙的深棕色粉砂质基质，粉砂微粒分选性中等，次圆至次棱状，见图3(a)，有熟料碎屑，见图3(b)。其中，约含石英30%（粒径多数小于0.1 mm，少数有0.2~0.3 mm），长石10%（与石英情况类似，稀见条纹长石），钙质矿物约8%（以灰岩为主，并有少量方解岩和隐晶钙质物团块，0.08~0.2 mm），云母1%~3%（以杆状黑云母为主，白云母含量极少，无定向排布），变质岩3%和一处生物碎屑，见图3(c)，重矿物较少，以电气石为主，

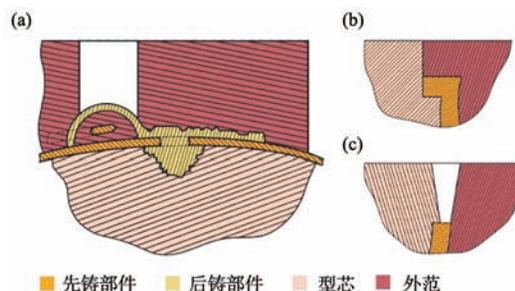
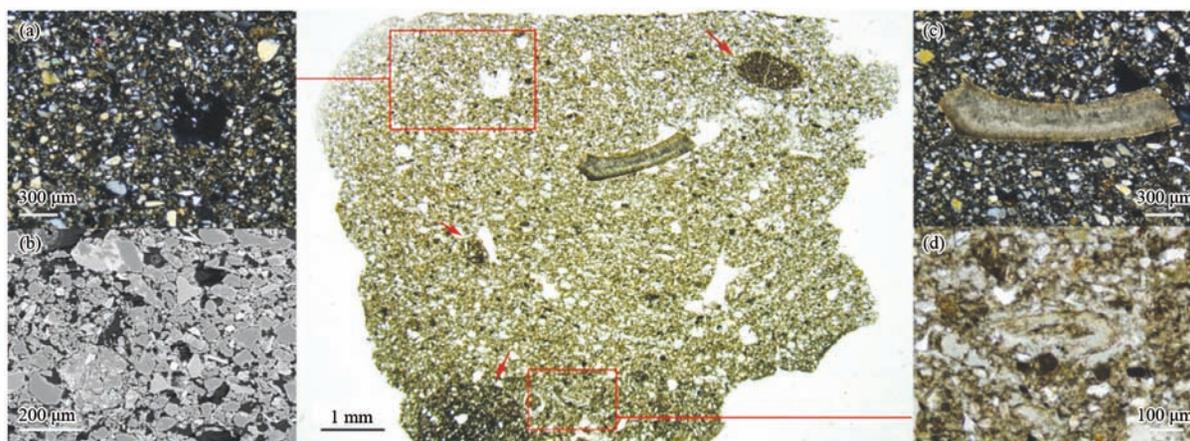


图2 铸型设置

Fig. 2 Mold setting

亦有少量绿帘石和角闪石。样品内部分区域含有深褐色泥质团块和不透明碎屑，分布不均。生物碎屑的显微结构尚未矿化，不是微化石，结合其结构和厚度推断，有一定可能为瓣鳃纲的壳，或许指向了水源原料的可能。样品中有2处植物碎屑，一处直径约0.4 mm，位于基体上，另一处位于熟料内。这两处植物未碳化，说明并非以草木灰形式孳入，见图3(d)。



(a) 基体, XPL; (b) 细小熟料, SEM-BSE; (c) 生物碎屑, XPL; (d) 植物碎屑, PPL

图3 泥芯显微图像

Fig. 3 Microscopic images of the core

2.2.2 成分分析

经统计，样品孔隙-粘土-粉砂比约为2:1:3，圆度平均约0.5，与岩相观察结果相符合。由此判断，所分析的底范在原料制备阶段应当进行了简单的淘洗，去掉了部分粘土成分。但是，该原料的处理并不细致，粒度分布较为分散，且仍有约1.5%的砂未去除。

成分上，可通过主成分分析进行大致分类（表1）^[14]。如图4所示，李三孤堆壶底芯与前人所采安徽地区样品的成分并不相同，反而与九连墩外来风格器物的泥芯较为接近^[15]。数据上，李三孤堆样品的Fe含

量相对较高，而Ca元素相对较低。与基体成分相比，熟料成分相对分散，位置上部分接近蚌埠双墩和襄樊，但仍需更多生土样品标定。就本文所测部位看，这些熟料可能与制芯所采原料的来源不同。

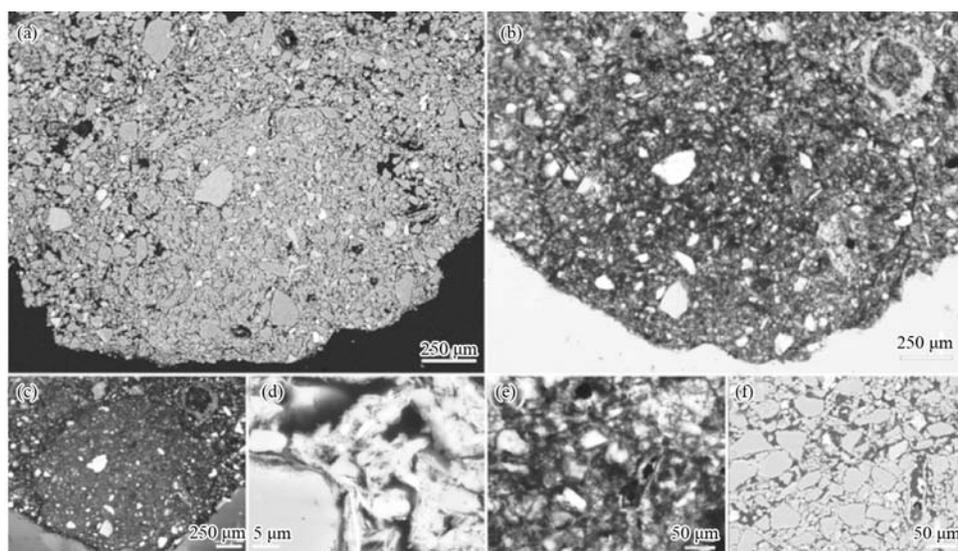
2.2.3 熟料

泥范芯中的熟料来源可能为已有的陶器或有意烧制的泥，这一现象与陶器的制作相似。扫描电镜观察到有相当数量与基体分界明确的碎屑。这些碎屑几乎不含孔隙，通常烧结温度较高且部分粘土熔化，应当

为熟料，见图3(b)。这些碎屑粒度多小于500 μm，显然经过充分破碎。下面仅针对较大的几处碎屑(见图3，红色箭头)重点讨论。

最大的一块熟料位于样品边缘，具浅红棕色粉砂质基质，粘土含量稍高于基体，见图5(a)。其单偏光下明显区别于基体，见图5(b)，以一周颜色略深的粘土为界，反射光下呈现浅黄棕色，见图5(c)。

此外，该碎屑内含一碳化的植物茎秆(0.13 mm)，见图5(e)，(f)。由此可知，此处碎屑应不是沉积岩而是熟料，或许为宏观所见泥芯原料的一种，见图1(c)。此熟料内基质主要为0.05 mm的长英质碎屑，少见有变质岩。大颗粒岩屑以石英为主，仅一处长石岩屑可达0.25 mm。此区域烧结温度高于基体，粘土略有熔化的现象，见图5(d)。



(a) SEM-BSE; (b) a同位置, PPL; (c) a同位置, XPL; (d) 粘土显微结构; (e) 植物碎屑, PPL; (f) e同位置, SEM-BSE

图5 最大熟料碎屑显微图像

Fig. 5 Microscopic images of the largest grog

另几处熟料受烧结影响，岩相下几乎不透光，表现为深棕色粘土质基质。这些碎屑与周围样品基体分界清晰，并无融合现象。从成分上看，第一处熟料同泥芯基体的相似度较高，可能来源较为接近。而针对较小的碎屑考虑，它们一部分与基体差异不大，原料应当与基体相近，但未经淘洗去除的粘土矿物影响了检测结果。另一部分不仅烧结温度较高，成分差异也较大，来源很有可能与基体不同。

3 李三孤堆所见的工艺现象

战国时期，青铜器铸造格局发生结构性变迁，各封国均有呈鲜明地域风格的铜器出产。就楚国而言，除都城外还有多处疑似铸铜作坊的遗址，器物类型与装饰亦呈现较显著的差异，存在外来器物的流通。就铭文来看，李三孤堆器中所涉铸客/客、冶师/冶和佐，学界已展开充分讨论，可确证为楚时铸工的名称。但关于铸工的种类、地位和分工等信息，尚未形成共识^[16-18]。

自青铜器铸造传统于战国早期变革以来，两极

化的发展趋势日益显著。李三孤堆青铜器群属战国晚期，即充分体现了这一点。就所见器物的铸作精美程度而言，可归纳为三类。铸造精美的器物如部分鼎、簋等，虽以模块法简化了制范技术，但仍铸有精美且清晰的纹饰。装饰相对简化的，如部分簋、尊缶和壶等，纹饰较少或清晰度欠佳。本文所考察的壶2:3311属最后一类，铸造简单化且素面，其通过分铸铸接等技术降低了铸造难度，经简单修整便用于随葬。

3.1 泥范芯的制作

战国晚期，楚国器物芯的制作工艺相对粗率。与长江流域其他战国时期青铜壶相似，李三孤堆铜器芯亦分双层，其内层承担抗热冲击和维持形态的作用，原料较为混杂，包括多种泥料、植物屑和熟料等。这些原料主要用以增加机械强度。表面虽未取样，但可观察到，其质地较细。配合壶内形态观察，浇注前应已干燥、平整。前文所及熟料中，有三处粘土含量较高，应当并非废弃的泥范芯碎屑，而是有意处理的泥料或碎陶片。这些熟料碎屑的成分不尽相同，其原料

来源应较为多样。处理技术上,熟料边缘圆钝,因此其粉碎手段难确定。

产地方面,就泥芯来看,李三孤堆器物应当为南方生产。同多数长江中下游地区所见的青铜壶相似,该壶底芯亦为多种不同材料孱杂而成。但因该器物群尚未开展系统的泥芯成分检测,一件壶底芯难以形成整体性结论。参考魏国锋等^[15]对九连墩器物的分析,推测李三孤堆器物并非全部产自安徽地区。有学者认为,楚国内除都城外亦有独立的青铜器铸造业^[19],仍需扩大样本量,以深化讨论,亦需要对目前疑似铸铜作坊的遗迹进行深入分析。

3.2 分铸技术

李三孤堆器物中,分铸技术的应用较为广泛,先铸、后铸和铸焊(焊接)技术均有发现^[20],但本文观察所得与前人研究略有不同。吴长青文章中论及“腹壁外的铺首衔环也是先铸并带凸榫”,但如本文考察所见壶2:3311和壶2:641,铺首实为后铸。结合吴文所议壶LDMb:16铺首先铸的特点,可见,李三孤堆仅壶这一类就呈现出截然不同的技术路径。若统计海外藏器,则情况可能更加复杂。

另外,尽管本文未予深究,但以李三孤堆器为主,同类型器物的铸造与装饰工艺已呈显著差异:附件铸接既可先铸亦可后铸,且连接方式涵盖销钉式、铸铆式及大焊。进一步而言,先铸附件时,铸型的范

芯设置与温度把控都要比后铸困难^[21]。同一时期同一作坊内,技术通常应当集中于同一体系内^[22],出现这种差异的概率较低。由此,进一步支持了“有不同地点、不同组别或传统的铸工制器”的假说。这些都有待对李三孤堆器开展更综合的技术研究。

4 结束语

李三孤堆壶不论是形态还是泥芯制作方式,均与战国中晚期的整体情况相一致,前文已作讨论。铸造技术上,李三孤堆器分类较多,涉及了多种铸接方式。若考虑吴长青讨论中提到可能的锻造与焊接,则情况更加复杂。由此考虑,或许李三孤堆器确实原由不同区域、不同技术传统的工匠所做。

另外,李三孤堆所出器物存在较普遍的整器打磨现象,素面器的器表面多存在短且粗的打磨线。奇怪之处在于,虽经过全面打磨,但许多披缝、浇道残余和铸造缺陷却未去除,因此打磨的目的仍存在疑问,或许与彩绘有关,粗糙表面可与涂料更好结合。

最后,受限于现有楚器及南方青铜器铸造作坊的发掘,尚难以通过铸造技术对李三孤堆器物的产地和所属进行讨论。但是,对该组器物目前已有的泥芯、彩绘等材料进行系统的分析还是有必要的。另外,亦可以期待更多如武王墩这样新材料,与已有的如“夔前”诸器对比,相信可以有更多的发现。

参考文献:

- [1] 陈建立. 冶金技术与中华文明发展 [J]. 南方文物, 2015 (1): 45-47.
- [2] 苏荣誉. 商周青铜铸造泥模范的七个问题 [C]// 对照実験を主軸とした: 東アジア铸造技術史解明のための実験考古学的研究. 奈良: 奈良文化財研究所, 2020: 40-59.
- [3] 刘煜, 岳占伟. 复杂化生产晚商青铜器的陶范铸造工艺流程 [C]// 陈建立, 刘煜. 商周青铜器的陶范铸造技术研究. 北京: 文物出版社, 2011: 81-94.
- [4] 刘彬徽. 楚系青铜器研究 [M]. 武汉: 湖北教育出版社, 1995.
- [5] 郭德维. 对寿县李三孤堆楚王墓的推测 [C]// 安徽省考古学会会刊 (第一至第八辑合订本). 合肥: 安徽省考古学会, 1979: 4.
- [6] 吴长青. 寿县李三孤堆楚器的研究与探索 [J]. 故宫博物院院刊, 2006 (6): 117-127.
- [7] 刘和惠. 寿县朱家集李三古堆大墓墓主的再认识 [J]. 东南文化, 1991 (2): 262-265.
- [8] 刘和惠. 楚文化的东渐 [M]. 武汉: 湖北教育出版社, 1995: 199.
- [9] 吴长青. 寿县李三孤堆楚国大墓出土铜器的初步研究——以安徽省博物馆藏该墓青铜器为中心 [D]. 北京: 北京大学, 2005.
- [10] WHITBREAD I K. The characterisation of argillaceous inclusions in ceramic thin sections [J]. Archaeometry, 1986, 28 (1): 79-88.
- [11] HAMMER Ø, HARPER D A T, RYAN P D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis [J]. Palaeontologia Electronica. 2001, 4 (1): 1-9.
- [12] 蔡秋彤, 董子俊. 东周青铜马衔的套接工艺及范铸模拟实验 [J]. 铸造, 2018, 67 (8): 703-706.
- [13] 山西省考古研究所. 侯马白店铸铜遗址 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 159-165.
- [14] 黄凰. 安徽、湖北近年来出土青铜器的铸造地研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.

- [15] 魏国锋, 秦颖, 姚政权, 等. 利用泥芯示踪九连墩楚墓青铜器的产地 [J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30 (4): 701-725.
- [16] 郝本性. 试论楚国器铭中所见的府和铸造组织 [C]// 楚文化研究会. 楚文化研究论集: 第一集. 武汉: 荆楚书社, 1987: 313-326.
- [17] 黄盛璋. 新发现之战国铜器与国别 [J]. 文博, 1989 (2): 29-34.
- [18] 孟倩. 李三孤堆楚王墓铸客类铜器新论 [J]. 文物春秋, 2023 (4): 19-26.
- [19] 袁艳玲, 张闻捷. 楚系青铜器的分期与年代 [J]. 考古学报, 2015 (4): 475-504.
- [20] 吴长青. 寿县李三孤堆楚国青铜容器铸造工艺浅析 [J]. 华夏考古, 2023 (3): 81-89.
- [21] 张少昫, 秦颖, 李涛, 等. 泥范分铸铸接工艺实验分析 [J]. 铸造, 2018, 67 (9): 818-822.
- [22] 郭建波, 蔡秋彤, 肖庆, 等. 三星堆青铜器分铸连接工艺辨析 [J]. 铸造, 2025, 74 (2): 166-174.

Casting Techniques of a Hu Vessel Excavated from Lisangudui Chu Tombs

DONG Yi-yan^{1,2}, SU Rong-yu², ZHANG Zhong-yun³

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Institute for the History of Nature Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. School of History and Culture, Hubei University, Wuhan 430062, Hubei, China)

Abstract:

The piece-mold casting technique was a unique bronze casting technology in ancient China. By the late Warring States period, the technology of separate casting and decoration of bronze wares had reached a peak, yet the scientific analysis of artifacts from this period remains relatively limited. This paper focuses on a batch of bronzes unearthed from the Chu tombs discovered at Lisangudui, Anhui. By combining macroscopic observation, petrographic analysis, SEM-BSE, and SEM-EDX, this paper discusses the casting techniques of bronze vessels from the late Warring States period by craftsmen from the Chu state. This study reveals that, although no innovations were introduced to the separate casting techniques used for Chu bronzes, the correspondence between these techniques and specific vessel types is more diverse than previously understood. This phenomenon may be a result of artifacts being made by craftsmen from different regions. Consequently, it is discovered that the bronze production landscape of Chu was broader than previously known.

Key words:

Lisangudui chu tombs; piece-mold casting; casting technique; ancient Chinese bronzes