

江西海昏侯墓主椁室出土青铜器 制作工艺初步分析



胡毅捷

(北京大学考古文博学院)



李文欢

(江西省文物考古研究院)



胡东波

(北京大学考古文博学院)

摘要:利用扫描电镜—能谱(SEM-EDS)及金相显微镜,对江西海昏侯墓主椁室内出土部分青铜器进行了合金成分及金相分析。结果表明,海昏侯墓主椁室内出土的铜器锡含量测量平均值为9.3%,铅含量测量平均值为2.9%,其中青铜容器锡含量测量平均值为10.5%,铅含量测量平均值为3.2%。不同器类器物具有不同的合金配比,反映工匠在制作器物时会考虑器物的使用功能及颜色等性质。铜器的制作工艺包括铸造、铸后受热退火以及铸后热锻。海昏侯墓出土的青铜器的科技分析,丰富了西汉时期铜器科技检测相关分析,对研究西汉铜器生产体系等问题具有重要的意义。

关键词:海昏侯墓;主椁室;青铜器;成分分析;金相分析

Abstract: The alloy compositions and metallographies of the bronzes unearthed from the main chamber of the tomb of Marquis of Haihun were analyzed by scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy and metallographic microscope. The results showed that the average value of tin contents of all of the bronze samples was 9.3%, and the average value of lead contents was 2.9%. The average value of tin contents of bronze vessels was 10.5% and the average value of lead contents was 3.2%. Different types of artifacts have different alloy compositions, reflecting that craftsmen would consider the function and color when making the artifacts. The manufacturing process of bronzes includes casting, thermal annealing after casting and thermal forging after casting. The scientific analysis of the bronzes excavated from the tomb of Marquis of Haihun is of great significance to the study on the technological characteristics and manufacture systems of bronzes in Western Han Dynasty.

Key Words: Tomb of Marquis of Haihun; Main chamber; Bronze Artifacts; Component Analysis; Metallography

一、引言

青铜器在汉代社会生活中仍然广泛使用,并完成了从礼器到生活用器的转变^①,但目前汉代铜器无论是传统考古还是科技考古的相关研究数量均不及先秦。通过汉代青铜器的研究对当时社会、技术文化变迁等相关研究具有重要意义。

海昏侯墓位于南昌市新建区大塘坪乡观西村老裘村民小组东北约500米的鄱墩山上。2011年起,江

西省文物考古研究院对被盗墓葬周围5平方千米区域进行全面系统的考古调查,发现了紫金城遗址、历代海昏侯墓园、贵族和平民墓等遗存,并对海昏侯墓进行重点钻探。2012至2013年开始发掘,至2014年完成主墓(M1)封土和墓室内填土的发掘,2015年对主椁室进行发掘并对遗物开始提取与保护,2016年完成了主墓的一期发掘工程,取得了许多令人瞩目的考古发现,确认墓主为第一代海昏侯刘贺^②。海昏侯墓共出土青铜器3000余件(套),其中主墓内共出

土铜器 500 余件(套),器类包括食器、酒器、水器、乐器、生活用器、度量衡器、兵器、车马器、工具、杂器配件,大致依功用相应放置于主椁室、车马库及回廊形藏椁的厨具库、酒具库、乐器库、武库、娱乐用器库等位置^③。海昏侯墓的发掘为研究汉代历史及相关考古研究提供了重要的依据。

目前,西汉帝陵及丛葬坑出土铜器的科技分析包括阳陵丛葬坑出土的一件铜铁复合器^④与茂陵陪葬坑出土的少量车马器^⑤;北京大葆台汉墓^⑥、河北满城汉墓^⑦、江苏徐州狮子山楚王陵^⑧与北洞山楚王墓^⑨、山东青州香山汉墓^⑩、河南永城梁王墓^⑪等诸侯王级大墓出土的部分铜器已经过合金成分分析;列侯级别墓葬出土铜器经过检测分析的较少,其中海昏侯墓椁室外回廊^⑫及车马坑^⑬出土的部分青铜器有部分数据发表;安徽巢湖汉墓^⑭、天长三角圩汉墓^⑮、陕西西安龙首原汉墓^⑯等高级官吏及中小贵族地主墓葬出土的部分铜器亦有相关分析报道;河南淅川葛家

沟墓地^⑰、湖北宜城跑马堤墓地^⑱出土战国至西汉时期铜器的科技分析检测也已报道,但这些墓群墓主人社会等级较低,可能为平民阶层。在边疆地区,如广东广州南越王墓^⑲、广西贵县罗泊湾汉墓^⑳、合浦汉墓^㉑以及非汉王朝势力控制范围内的诸如贵州赫章可乐^㉒、云南晋宁石寨山、江川李家山^㉓等墓地出土铜器也已开展相应的工作,旨在讨论中原与边疆、汉室与西南夷之间的关系。

以往研究中虽已积累了部分汉代铜器的科技分析数据,但仍存在一定的问题:例如部分遗址和墓葬数据样本量较少不能代表整体面貌;或是部分遗址分析样品以青铜货币或铜镜为主,对其余器类重视不够;或是由于样品锈蚀严重导致数据不能进行定量讨论;亦或是历时性的分析较为欠缺等。本文拟通过对海昏侯墓主椁室内出土青铜器的制作工艺、合金配比等问题进行探讨,以丰富汉代青铜器科技考古的相关研究。



图一 海昏侯墓主椁室出土部分青铜器应急保护处理后照片

二、样品制备及测试条件

本文对主椁室内 38 件铜器所取 44 件样品进行检测分析,取样时遵循最小干预原则,尽量从器物残缺处取样(图一)。

对采集的样品进行镶嵌、打磨、抛光至无划痕后,利用北京大学考古文博学院科技考古实验室的 Hitachi-TM3030 超景深台式电子显微镜及 EDS 能谱

仪进行背散射成像观察及化学成分测试。SEM 测试模式选择低真空条件,扫描电压为 15kV,测试时间以能谱成分显示稳定为依据,通常控制在 90~120 秒。考虑到样品组织结构的差异,部分样品选择不同区域进行多次扫描,扫描时应避开锈蚀区域,并尽量增大测试面积以使结果反映样品的平均成分。

随后使用 3%氯化铁—盐酸—酒精溶液对已抛光的金属样品进行浸蚀,并使用北京大学冶金考古实

表一 海昏侯墓主椁室出土青铜器的合金成分(wt%)

器物号	器物	实验室编号	取样位置	O	S	Fe	Cu	Sn	Pb
M1:1471	铜壶	1471-1	口沿处	1.2	0.5	0.2	83.2	11.6	3.3
M1:1476	铜壶	1476-1	口沿垫片	0.7	0.4	0.2	83.1	9.1	6.5
		1476-3	口沿	1.4	0.4	0.1	84.3	9.3	4.5
M1:1489	铜镜	1489-1	中心断裂残片	0.8	0.1	n.d.	70.1	27.7	1.3
M1:1548	铜壶	1548-1	上腹部垫片	1.3	0.5	0.2	78.0	12.5	7.6
		1548-2	近口沿	1.0	0.8	0.1	81.3	11.4	5.4
M1:1552	博山炉	1552-1	炉身下半部残片	1.7	0.5	0.2	90.7	2.4	4.5
		1552-2	托盘靠近边沿处	2.8	0.5	0.1	93.2	2.6	0.8
M1:1586	铜泡	1586-1	铜泡基体	1.4	0.3	0.1	85.3	9.4	3.4
M1:1595-1	铜镢	1595-1-2	残缺处	2.6	0.4	n.d.	88.5	5.9	2.6
M1:1596-1	铜镢	1596-1-3	底部残缺处	1.8	0.7	0.1	92.5	3.8	1.0
M1:1597-1	铜镢	1597-1-3	底部	1.4	0.4	0.5	87.1	8.5	2.2
M1:1640	铜灯	1640-1	灯底座残缺处	2.4	0.5	0.5	85.7	9.7	1.3
M1:1641	釭灯	1641-1	靠近足	0.7	0.3	0.1	87.7	7.2	4.0
M1:1642	博山炉	1642-5	炉身内部	1.2	0.7	0.3	96.3	1.6	n.d.
M1:1643	铜洗	1643-1	腹部	1.3	0.5	0.2	86.8	10.2	1.1
M1:1668	铜鼎	1668-3	底部	1.5	0.6	0.2	84.3	11.9	1.5
M1:1669	铜鼎	1669-3	上腹部	1.6	0.5	0.3	85.2	6.6	5.8
M1:1670	铜鼎	1670-4	靠近底部	1.6	1.2	0.4	82.6	9.5	4.6
M1:1681	雁足灯	1681-1	边沿疑似垫片	1.1	0.3	n.d.	85.1	10.7	2.7
M1:1712	雁足灯	1712-1	底座断裂处	1.6	0.7	0.2	80.3	9.6	7.6
M1:1714	铜洗	1714-4	靠近底部	1.1	0.3	n.d.	88.1	7.2	3.4
M1:1716	铜挂钩	1716-2	断茬处	1.3	0.1	0.1	90.4	7.6	0.5
M1:1737	秘帽	1737-1	管部	1.6	0.3	0.3	84.3	13.1	0.5
M1:1741	龙首匱	1741-4	匱身靠近边缘	1.8	0.5	0.2	80.0	13.1	4.5
M1:1747	铜熏炉	1747-4	顶部内层	1.5	0.7	0.6	82.7	9.8	4.7
M1:1748	铜底座	1748-3	中心座下层残片	0.9	0.2	0.1	87.3	8.9	2.6
M1:1750	铜洗	1750-1	底部残缺处	2.0	0.6	0.1	83.8	8.5	5.1

续表

M1:1753	鼎盖	1753-1	垫片	1.4	0.4	0.2	80.6	12.2	5.3
		1753-2	残片	2.1	0.3	0.7	82.7	11.4	2.8
M1:1755	鼎盖	1755-1	钮附近断裂处	1.7	0.6	0.1	82.3	10.7	4.5
		1755-4	靠近边缘垫片	1.3	0.5	0.2	84.0	11.7	2.4
M1:1756	铜鼎	1756-1	靠近口沿	0.8	0.5	0.3	84.9	11.3	2.3
M1:1758	铜鼎	1758-2	颈部断裂	1.9	0.3	0.2	82.8	13.6	1.2
M1:1760	铜鼎	1760-5	鼎足残缺	1.7	0.5	0.1	84.4	10.8	2.5
M1:1761	鼎盖	1761-2	靠近钮残缺处	2.4	0.6	0.3	77.7	16.2	2.9
M1:1763	铜鼎	1763-1	颈部近口沿	1.8	0.5	0.5	83.7	13.2	0.4
M1:1764	铜鼎	1764-2	口沿残缺处	1.4	1.1	0.6	85.5	9.7	1.8
M1:1787	器盖	1787-4	盖靠近边缘垫片	1.8	0.6	0.3	90.1	6.6	0.6
		1787-5	靠近边缘	2.5	0.4	0.4	83.3	10.0	3.4
M1:1792	铜铎	1792-1	底部有残缺处	1.2	0.1	0.2	94.7	2.6	1.3
M1:1806	龙形铜钩	1806-3	断裂处内部	1.2	0.2	0.1	93.2	4.7	0.7
M1:1817-1	铜帽	1817-1-2	中部残缺处	1.8	0.3	0.3	88.7	6.9	2.2

验室 LEICA DM4500M 金相显微镜进行金相观察, 照相。

三、结果分析

1. 海昏侯墓主椁室出土青铜器的合金成分

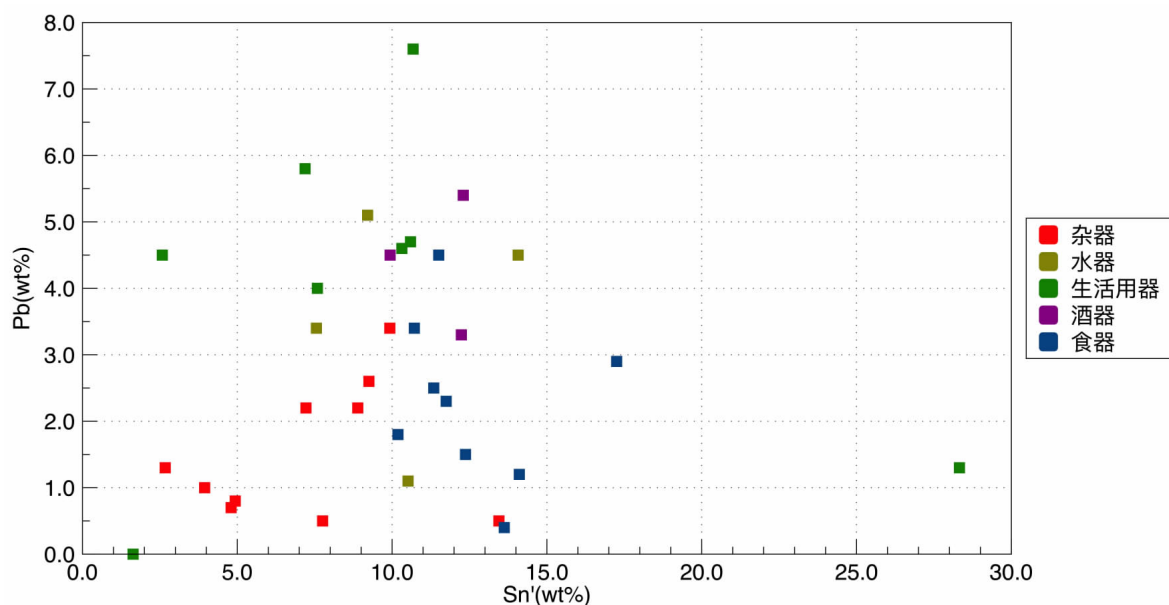
海昏侯墓主椁室中出土青铜器的合金成分见表一。

根据 EDS 的结果, 剔除垫片以及氧含量高于 2% 的数据后, 青铜器基体的锡含量测量值在 1.6%~27.6% 之间, 平均值为 9.3%, 铅含量测量平均值为

2.9%, 最高值为 7.6%。根据海昏侯墓器物分类情况^②, 食器(主要为铜鼎及其配套鼎盖)锡含量大多高于 10%, 日用器类(主要为灯、博山炉)、杂器(如铜铎、挂钩等)锡含量大多低于 10%, 酒器(铜壶)与水器(铜匜、铜洗)的锡含量均在 10% 左右, 而铜镜的含锡量则接近 28%(图二)。铜器中的含有一定量的夹杂物, 经 EDS 分析, 夹杂物成分中以铜、硫为主, 为硫化亚铜夹杂, 系冶炼时使用的矿石带入。

2. 金相分析

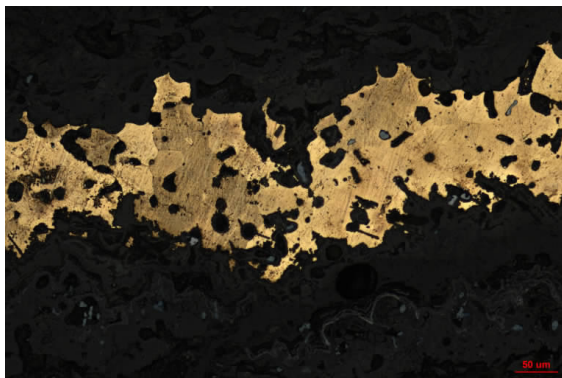
本次共对海昏侯主椁室内 19 件器物的 19 个样



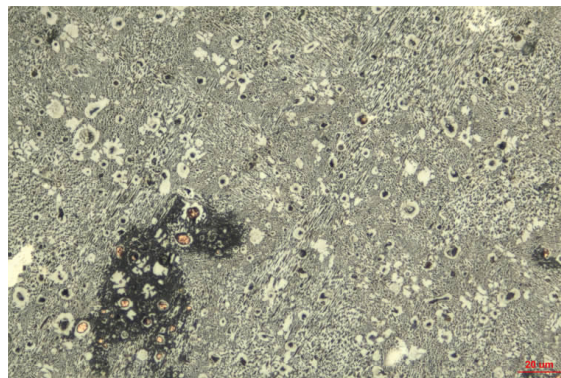
图二 海昏侯墓主椁室出土铜器铅锡含量关系图^②

表二 海昏侯墓主椁室出土青铜器的金相组织

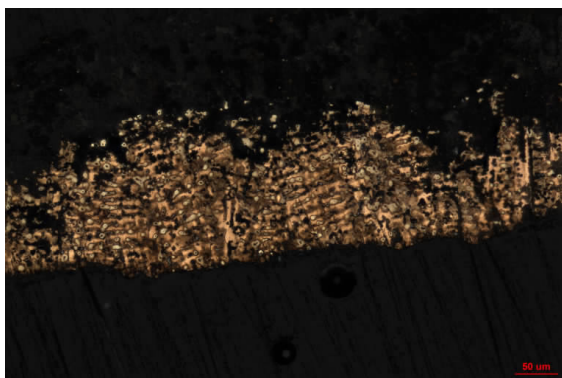
实验室编号	器物	取样位置	金相组织	铸造工艺
1471-1	铜壶	口沿处	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶,有少量铅颗粒及夹杂物分布(图三)。	铸后受热
1489-1	铜镜	残缺处	基体为 $\alpha+\delta$ 共析体, α 相较少,呈针状和两端尖锐的条状分布在成片的 $\alpha+\delta$ 共析体基体之中,在器物内另存在有黑色而的铅颗粒及红色的纯铜颗粒(图四)。	铸造
1548-2	铜壶	近口沿	基体为 α 树枝晶组织,偏析不明显,有铅颗粒及大量硫化物夹杂	铸造
1552-2	博山炉	托盘靠近边沿处	基体为 α 树枝晶组织,枝晶间存在偏析,有少量铅颗粒分布(图五)。	铸造
1595-1-2	铜铎	残缺处	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶,有少量铅颗粒及夹杂物分布。	铸后受热
1642-1	博山炉	盖	基体为 α 树枝晶组织,枝晶间存在偏析,有少量铅颗粒分布。	铸造
1643-1	铜洗	腹部	基体为 α 树枝晶组织,枝晶间存在偏析,有少量铅颗粒分布(图六)。	铸造
1669-3	铜鼎	上腹部	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶,有少量铅颗粒及夹杂物。	铸后受热
1716-2	铜挂钩	断茬处	基体为 α 树枝晶组织,枝晶间存在偏析,有少量 $\alpha+\delta$ 共析体,另有零星铅颗粒分布。	铸造
1737-1	秘帽	管部	基体为 α 树枝晶组织,枝晶间分布有 $\alpha+\delta$ 共析体,有少量铅颗粒分布。	铸造
1741-4	龙首匱	靠近边缘	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶及孪晶,晶界有黑色铅颗粒与少量硫化物的夹杂(图七)。	铸后热加工
1748-3	铜底座	下层残片	基体为 α 树枝晶组织,枝晶间分布有 $\alpha+\delta$ 共析体,有少量铅颗粒及夹杂物分布(图八)。	铸造
1753-2	鼎盖	残片	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶,部分区域分布有 $\alpha+\delta$ 共析体,有少量夹杂物及铅颗粒分布。基体内有部分腐蚀产物(图九)。	铸后受热
1755-1	鼎盖	钮附近断裂处	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶,有少量夹杂物分布及铅颗粒分布。	铸后受热
1756-1	铜鼎	靠近口沿	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶,并有少量共析体分布。另有少量夹杂物及铅颗粒分布,部分区域可见自由铜沉积。	铸后受热
1760-5	铜鼎	鼎足残缺	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶,有少量夹杂物(图一〇)。	铸后受热
1761-2	鼎盖	靠近钮残缺处	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶,并有一定量共析体分布,另有少量夹杂物及铅颗粒分布。	铸后受热
1787-4	器盖	靠近边缘垫片	基体为 α 固溶体再结晶的等轴晶,有少量晶粒为孪晶结构,晶界有黑色铅颗粒与少量硫化物的夹杂。	铸后热加工
1806-3	龙形铜钩	断裂处	基体为 α 树枝晶组织,枝晶间存在偏析,有少量铅颗粒分布。	铸造



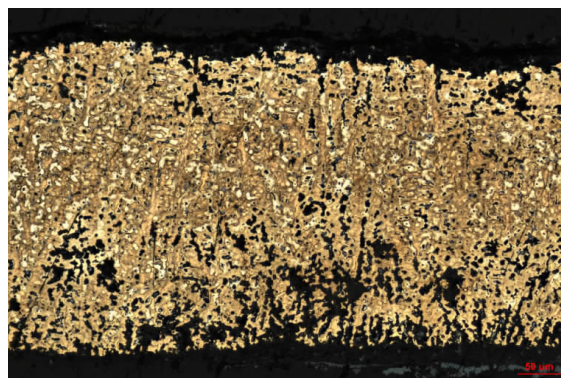
图三 1471-1 铜壶 口沿处金相照片



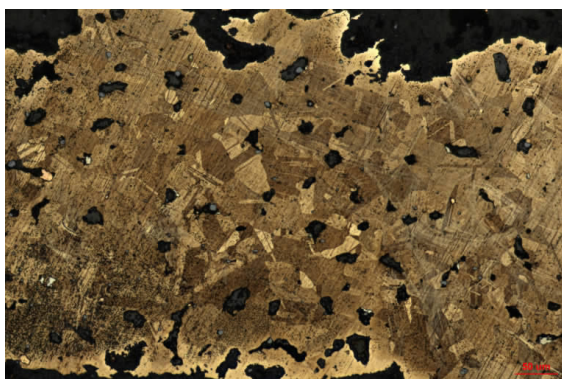
图四 1489-1 铜镜 残缺处金相照片



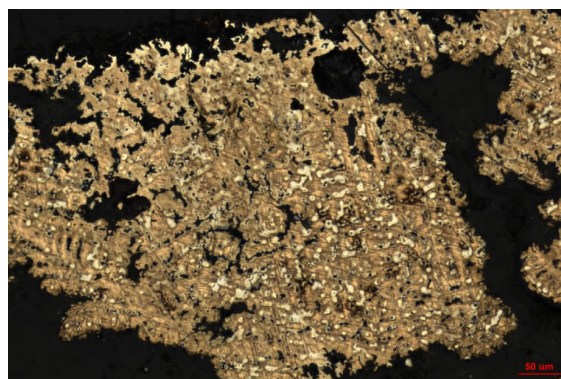
图五 1552-2 博山炉 托盘靠边沿处金相照片



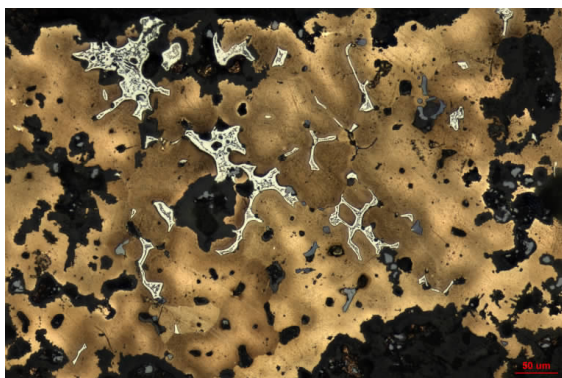
图六 1643-1 铜洗 腹部金相照片



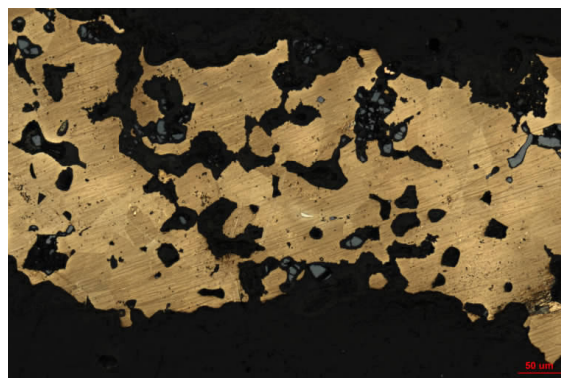
图七 1741-4 龙首匜 器身靠近边缘金相照片



图八 1748-3 铜底座 下层残片金相照片



图九 1753-2 鼎盖 残片金相照片



图一〇 1760-5 铜鼎 鼎足金相照片

品进行了金相分析,器类涵盖食器、酒器、水器、生活用器及杂器五类。各样品金相组织描述见表2。

海昏侯墓主椁室出土的青铜器制作工艺多样,包括铸造、铸后受热退火、铸后热加工(热锻)等多种。不同器类有不同的制作方式,其中食器(鼎及鼎盖)多经过受热,可能均为实用器;日用器具,如博山炉、铜灯,则多为直接铸造成型,制作工艺较为简单;水器(如匜、洗)则使用直接铸造以及铸后热加工的不同制作工艺。

四、讨论

1.海昏侯墓主椁室出土青铜容器的合金配比

青铜器的合金成分与其物理性能有一定的关联:对于有力学性能需求的兵器或需要保证加工性能的饰片,制作时往往加入足量的锡以保证器物的机械性能;而对力学性能要求不高的青铜容器,合金配比可一定程度上反映墓主人生活时代以及身份等级特征。海昏侯墓主椁室出土的青铜容器锡含量测量平均值为10.5%,铅含量测量平均值为3.2%,总体偏低。对比西汉中期其余高等级贵族墓出土青铜器的情况:如满城汉墓出土青铜容器锡含量测量平均值为9.6%,南越王墓出土青铜容器锡含量测量平均值为9.4%,与海昏侯墓主椁室出土青铜容器的锡含量配比基本一致,均在10%左右,一定程度上反映了西汉中期铜器的生产面貌。

与锡含量不同,青铜器中铅含量的测量值数据波动较大,无明显的规律。这可能是由于铅本身不溶于铜锡固溶体,以铅颗粒的形式存在于基体中,且铅存在比重偏析,同一件器物不同区域铅含量也会存在差异,均一性不如锡。

西汉中期,由于生产管控方式的转变,诸侯王的势力被压制,私人工商业的根基亦被削弱,铜矿的开采及铜器的生产均由中央政府及郡县工官控制^⑤。在这一时代背景下,铜器生产技术体系在西汉早期各地区独立生产的基础上得到了进一步的规范,使得这一时期青铜容器合金配比情况基本趋同。

2.海昏侯墓主椁室出土的红铜器与高锡青铜器

战国以来,青铜器的合金配比趋于标准稳定化,西汉时期青铜容器锡含量已基本稳定在10%左右的区间。不过,海昏侯墓主椁室中出土了多件博山炉(M1:1552、M1:1642),铅、锡含量均较低,接近红铜材质,此外还有两件铜镢(M1:1791、M1:1792)也为红铜材质。与青铜相比,红铜熔点高、硬度低、质软,实用性能相对较差。因此,制作者在青铜生产已稳定成熟的时代,选择以红铜材质作器应有其他方面的考量。

青铜器锡含量高低,除了与力学性能相关外,还会影响铜器基体的颜色:锡含量越低,青铜基体越接近红铜的红色,随着锡含量的上升,青铜基体的颜色逐渐变为金黄色,锡含量至20%时金属基体呈银白色。铜器表面的装饰工艺,诸如铸镶红铜、错金银、鎏金等至战国时已趋于成熟,从设计角度考虑,由于装饰工艺中所使用的金、银、铜、锡以及矿石均有一定的特征颜色,若铜合金基体的颜色与表面装饰材料一致,从视觉效果上两者便没有明显的差异,无法凸显出装饰材料。因此,类似于铜器主纹与地纹,铜合金基体需要衬托出装饰材料的颜色,在锡资源充足的情况下,选用低锡青铜,可能是基于选择了低锡青铜颜色接近红铜,能与金、银等贵金属进行区分,以起到衬色功能(表3)。

海昏侯墓主椁室内出土部分博山炉与铜镢在应急处理后发现表面部分区域有鎏金现象^⑥,而在车马坑内出土青铜器表面鎏金、鎏金银、错金银等装饰工艺更为普遍。表面装饰工艺又可分为两类:第一类为对表面局部区域进行装饰,包括局部区域鎏金、错金银等,如主墓北回廊乐器库内出土的鎏金编钟(M1:164-1A等)、车马坑中出土的鎏金马镢(K1:167)、错金银当卢(K1:286)等^⑦。汪森分析了海昏侯墓出土的3件鎏金甬钟的制作工艺,结果表明其锡含量在17.2%~20.6%区间内^⑧。叶学贤先生等通过研究认为编钟理想的含锡量在14%左右,铅含量应低于3%^⑨,此时金属基体多呈金黄色,而海昏侯墓出土甬钟基体选择较高的锡含量,可能是为了与器表局部鎏金区域颜色产生反差而特意提高了锡含量有关。杨小林等在研究错金银当卢时发现基体已完全矿化,仅可确认其为铜锡铅三元合金^⑩,蔡毓真等在

表3 常见表面装饰铜器基体合理衬色情况表

装饰工艺	装饰色彩	合理衬托色	锡含量合理区间
铸镶红铜、嵌红铜	铜红	金黄、银白	Sn>6%
错金、局部鎏金	金黄	铜红、银白	Sn<6%或 Sn>18%
错银、镀锡	银白	铜红、金黄	Sn<16%
错金银	金黄、银白	铜红	Sn<6%
嵌绿松石	绿	铜红、金黄、银白	—

分析海昏侯墓部分当卢时确认当卢大多为锡含量7%左右的低锡青铜^⑧,此时青铜基体颜色偏橙色,仍与金层存在有一定的颜色差异形成视觉反差。因此,表面局部装饰器物选择高锡或低锡青铜(甚至红铜)基体可能与通过鎏金、错金银等纹饰区域与器物基体颜色形成反差相关。第二类为通体鎏金,如车马坑出土当卢(K1:400)、軎饰(K1:401)等^⑨,在主墓中部分器物亦存在部分器物通体鎏金,如铜铎(M1:397, M1:425)^⑩。此时,鎏金层下的青铜基体虽可调控合金配比以选择一定的基体底色,但鎏金层的金黄色将大面积掩盖基体颜色,底色是否合理可能并不重要,此时鎏金青铜器更多是墓主人生前身份等级的象征。

海昏侯墓主椁室出土铜镜的锡含量为27.7%,属于高锡青铜。从春秋晚期至汉唐时期的铜镜含锡量在20%~26%之间^⑪,海昏侯墓出土铜镜合金配比与大量统计值基本一致。早年对铜镜制作中是否经过淬火过程存在争议,但根据海昏侯墓出土铜镜及其他战国秦汉时期出土的铜镜^⑫的金相组织来看,铜镜应为直接铸造成型。铜镜通常使用高锡青铜制作,何堂坤先生认为高锡青铜颜色白亮,比较美观,且高锡青铜强度和硬度都比较高,易于磨拭^⑬。

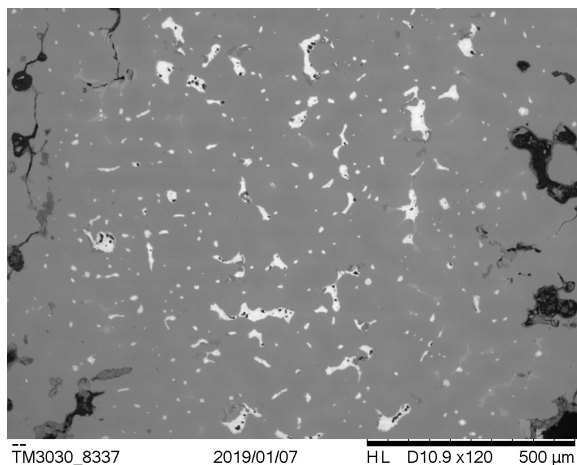
3. 薄壁青铜器的制作工艺

海昏侯墓主椁室中出土的青铜器壁厚不一:厚壁的铜器,如铜壶、铜灯、铜熏炉、铜镜等,器壁厚度可达1至2毫米(图一一),而薄壁的铜器,如铜鼎及其鼎盖、铜铎、铜钩、铜洗、铜环等,厚度在0.5毫米左右(图一二)。

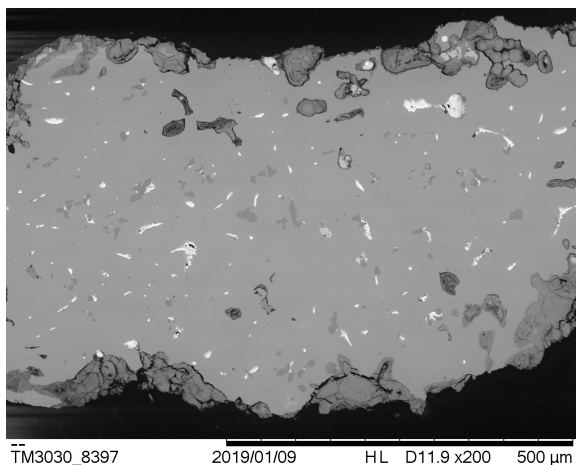
金属器物减薄处理除了可以在铸形设计时减少铜液流动的空间外,也可以利用金属具有的延展性,通过锻打的方式将器壁厚度减薄,以获得薄壁的金

属器。通过金相分析,可以发现海昏侯墓主椁室出土的薄壁青铜器有不同的制作工艺。铜鼎及其鼎盖(如M1:1756、M1:1760等)等大部分薄壁青铜器,金相组织中多以 α 固溶体再结晶等轴晶组织为主,反映其经过热处理,但几乎未见铸后热加工所形成的孪晶组织或是冷加工后形成的滑移线及晶粒变形现象,据此可判断这批铜鼎及鼎盖未经过锻打加工处理,为直接铸造成型,体现了较为高超的设计理念与制作工艺;而龙首匜(M1:1741)^⑭的金相组织中出现了 α 再结晶等轴晶及孪晶,反映了其制作过程中使用了铸后热锻的工艺。李洋统计了先秦两汉时期的热锻薄壁青铜器,总结了热锻薄壁青铜器包括低锡热锻(锡含量低于17%,热锻温度在200~300℃)与高锡热锻(锡含量高于17%,热锻温度在500~700℃)两大类,其中绝大多数器物均为低锡热锻成型^⑮。张吉通过模拟实验发现易于加工的锡青铜锡含量不超过15%,含15%~18%的锡青铜在较高温度下仍可进行一定程度的加工,而锡含量高于18%以上的锡青铜基本没有锻打价值^⑯。海昏侯墓主椁室龙首匜的锡含量为13.1%,介于9%~15.8%(固溶上限)之间,坯材软硬适中,铅含量为4.1%,脆性适宜,这一合金配比符合可锻性条件。

锻造技术自晚商时就已应用于各类薄壁饰物的制作,如殷墟花园庄东地M54所出圆形器^⑰,崇信于家湾出土的铜铎等^⑱。自春秋中晚期以来,锻制容器开始流行,多个墓地出土了锻制而成的青铜容器,其中以盘、匜居多,如蚌埠双墩钟离君柏墓^⑲、郧县乔家院M5、M6^⑳等。锻制铜容器在春秋中晚期的流行与范铸工艺的简化、铸后装饰的流行、以及锡资源的充裕密切相关^㉑。至战国时期,锻制匜分布范围已从汉淮及至全国各地,如定襄中霍^㉒、建昌东大杖子^㉓、淮



图一一 海昏侯墓主椁室出土厚壁器物背散射电子像
(铜灯 M1:1712)



图一二 海昏侯墓主椁室出土薄壁器物背散射电子像
(铜鼎 M1:1764)

阴高庄^⑧、荆门左冢^⑨等墓地均有出土；西汉时期，天长三角圩汉墓中出土的洗、釜以及匜仍为锻制品^⑩，延庆西屯墓地出土的盆、洗亦经过锻制加工^⑪，可见西汉时期锻制工艺在制作洗、匜等薄壁水器时仍为主流的技术选择。

五、结论

海昏侯墓主椁室出土青铜器的合金成分不一，锡含量测量值在 1.6%~27.6% 之间，平均值为 9.3%，铅含量测量值在 0.4%~7.6% 之间，平均值为 2.9%，其中青铜容器锡含量测量平均值为 10.5%，铅含量测量平均值为 3.2%。锡含量与西汉中期早年发掘的高等级墓出土青铜容器相接近。部分器物有不同的合金配比，反映工匠在制作器物时会根据器物的使用功能及颜色等性质配制合金原料。铜器的加工制作工艺包括铸造、铸后受热退火以及铸后热加工（热锻）。海昏侯墓出土青铜器壁厚不同，其中薄壁青铜器有着不同的制作工艺，铜鼎及鼎盖多为直接铸成，而部分水器则使用了铸后热锻技术制成。

海昏侯墓出土的青铜器的科技分析，丰富了西汉时期铜器科技检测的分析，在研究西汉铜器生产规模、技术特征等方面具有重要的意义。

附记：北京科技大学科技史与文化遗产研究院博士研究生韩化蕊在取样时提供了帮助；北京大学考古文博学院陈建立教授与张吉博士后在本文写作与修改中提供了宝贵的意见，在此致以诚挚的感谢。

注释：

① 中国社会科学院考古研究所：《中国考古学 秦汉卷》，第 640 页，中国社会科学出版社，2010 年。

② 江西省文物考古研究所、南昌市博物馆、南昌市新建区博物馆：《南昌市西汉海昏侯墓》，《考古》2016 年第 7 期。

③② 江西省文物考古研究院、中国人民大学历史学院考古文博系：《江西南昌西汉海昏侯刘贺墓出土铜器》，《文物》2018 年第 11 期。

④ 刘薇、赵西晨、马清林：《陕西咸阳汉阳陵出土铜铁复合器分析研究》，《中国文物科学研究》2018 年第 4 期。

⑤ 杨忙忙：《汉武帝茂陵陪葬坑出土车马器的金相分析和光谱分析》，《考古与文物》2003 年第 1 期。

⑥ 冶金工业部有色金属研究院：《大葆台汉墓部分铜器化学成分分析报告》，大葆台汉墓发掘组、中国社会科学院考古研究所：《北京大葆台汉墓》，第 124 页，文物出版社，1989 年。

⑦a 中国社会科学院考古研究所：《满城汉墓部分铜、银器的化学成分》，中国社会科学院考古研究所、河北省文物管理处：《满城汉墓发掘报告》，第 376~383 页，文物出版社，1980 年；b 戴志强、周卫荣、樊祥禧：《满城汉墓出土五

铢钱的成分检测及有关问题的思索》，《中国钱币》1991 年第 2 期。

⑧ 迟鹏、李秀辉、陈建立等：《徐州狮子山楚王陵出土青铜器的科学分析》，《中国文物科学研究》2016 年第 4 期。

⑨ 周卫荣：《北洞山西汉楚王墓出土钱币等器物分析》，徐州博物馆、南京大学历史系考古专业：《徐州北洞山西汉楚王墓》，第 208~214 页，文物出版社，2003 年。

⑩ 李延祥、崔春鹏、张然等：《山东青州香山汉墓出土青铜簠的成分与金相分析》，《有色金属工程》2016 年第 6 卷第 3 期。

⑪ 李秀辉、韩汝玢：《永城梁孝王寝园及保安山二号墓出土金属器物的鉴定》，河南省文物考古研究所：《永城西汉梁国王陵与寝园》，第 276~285 页，中州古籍出版社，1996 年。

⑫a 张吉、刘晟宇、胡东波等：《新建海昏侯墓北藏椁内青铜器及其埋藏环境的初步分析》，《南方文物》2018 年第 2 期；b 汪淼：《海昏侯墓出土鎏金青铜器工艺与腐蚀相关性研究》，北京大学硕士学位论文，2018 年。

⑬a 杨小林、王浩天：《西汉废帝海昏侯刘贺墓外藏椁出土部分当卢制作工艺研究》，《南方文物》2017 年第 1 期；b 蔡毓真、胡东波、管理：《海昏侯外藏椁鎏金银青铜车马器装饰工艺研究》，《南方文物》2019 年第 6 期；c 蔡毓真：《海昏侯墓车马坑青铜器的腐蚀研究》，北京大学博士学位论文，2019 年。

⑭ 毛振伟、左健、王世忠等：《巢湖市汉墓出土文物部分残片的 X 射线荧光光谱分析》，安徽省文物考古研究所、巢湖市文物管理所：《巢湖汉墓》，第 172~176 页，文物出版社，2007 年。

⑮ 晏德付、秦颖、陈茜等：《天长西汉墓出土部分金属器的研究》，《有色金属（冶炼部分）》2011 年第 9 期。

⑯ 刘成：《龙首原西汉早期墓出土金属期间的能谱及金相显微组织分析》，西安市文物保护考古所：《西安龙首原汉墓》，第 262~270 页，西北大学出版社，1999 年。

⑰a 曾庆硕、陈典、崔本信等：《南阳淅川葛家沟出土青铜器的初步科学分析研究》，《博物院》2020 年第 2 期；b Chen D, Luo W, Zeng Q, et al. 《The lead ores circulation in Central China during the early Western Han Dynasty: A case study with bronze vessels from the Gejiagou site》，PLOS ONE, 2018, 13(11): 1-12.

⑱ 刘建宇、肖梦娅、王璐等：《湖北宜城跑马堤出土铜器的科学分析研究》，《文物保护与考古科学》2018 年第 30 卷第 3 期。

⑲ 北京科技大学冶金史研究室：《西汉南越王墓出土铜器、银器及铅器鉴定报告》，广州市文物管理委员会、中国社科院考古研究所、广东省博物馆：《西汉南越王墓》，第 276~285 页，文物出版社，1996 年。

⑳ 北京钢铁学院冶金史研究室：《贵县罗泊湾一号墓出土的物件铜器鉴定报告》，广西壮族自治区博物馆：《广西贵县罗泊湾汉墓》，第 142 页，文物出版社，1988 年。

㉑a 赵春燕：《合浦县风门岭汉墓出土铜器的化学组成

分析报告》，广西壮族自治区文物工作队、合浦县博物馆：《合浦风门岭汉墓——2003~2005 年发掘报告》，第 179~181 页，科学出版社，2006 年；b 闵晨、李永春、陈坤龙等：《广西合浦地区出土汉代铜器的初步科学分析研究》，中国社会科学院考古研究所文化遗产保护研究中心：《文化遗产研究（第 3 辑）》，第 337~347 页，科学出版社，2017 年。

②刘煜、贾莹：《赫章可乐墓地出土青铜器检测分析》，贵州省文物考古研究所：《赫章可乐二〇〇〇年发掘报告》，第 195~206 页，文物出版社，2008 年。

③李晓岑、韩汝汾：《古滇国金属技术研究》，科学出版社，2011 年。

④ $w(Sn') = w(Sn) / (w(Cu) + w(Sn)) \times 100\%$ 。

⑤吴小平：《汉代青铜容器的考古学研究》，第 295 页，岳麓书社，2005 年。

⑥a 江西省文物考古研究所、首都博物馆：《五色炫曜：南昌汉代海昏侯国考古成果》，第 82~83 页，江西人民出版社，2016 年；b 李伯谦主编：《中国出土青铜器全集 19 江西·浙江·福建·广东·广西》，第 131 页，科学出版社，龙门书局，2018 年。

⑦a 江西省文物考古研究所、南昌市博物馆、南昌市新建区博物馆：《南昌市西汉海昏侯墓》，《考古》2016 年第 7 期；b 李伯谦主编：《中国出土青铜器全集 19 江西·浙江·福建·广东·广西》，第 116 页，科学出版社，龙门书局，2018 年。

⑧汪森：《海昏侯墓出土鎏金青铜器工艺与腐蚀相关性研究》，第 37~40 页，北京大学硕士学位论文，2018 年。

⑨叶学贤、贾云福、周孙录等：《化学成分、组织、热处理对编钟声学特性的影响》，《江汉考古》1981 年第 S1 期。

⑩杨小林、王浩天：《西汉废帝海昏侯刘贺墓外藏椁出土部分当卢制作工艺研究》，《南方文物》2017 年第 1 期。

⑪蔡毓真：《海昏侯墓车马坑青铜器的腐蚀研究》，第 72~73 页，北京大学博士学位论文，2019 年。

⑫李伯谦主编：《中国出土青铜器全集 19 江西·浙江·福建·广东·广西》，第 115、117 页，科学出版社、龙门书局，2018 年。

⑬简报中将 M1:425 定名为提梁樽，铜器整理简报中则将 M1:397 定名为甗，两者系同一类器物。见：江西省文物考古研究所、南昌市博物馆、南昌市新建区博物馆：《南昌市西汉海昏侯墓》，《考古》2016 年第 7 期；江西省文物考古研究所、中国人民大学历史学院考古文博系：《江西南昌西汉海昏侯刘贺墓出土铜器》，《文物》2018 年第 11 期；曹斌：《西汉海昏侯刘贺墓铜器定名和器用问题初论》，《文物》2018 年第 11 期。

⑭何堂坤：《中国古代铜镜的技术研究》，第 46 页，紫禁城出版社，1999 年。

⑮a 刘亚雄、陈坤龙、梅建军等：《陕西临潼新丰秦墓出土铜镜的科学分析》，《中原文物》2015 年第 4 期；b 卢轩、长孙樱子、韩建武：《一批长安汉镜的金属技术研究》，《有色金属（冶炼部分）》2018 年第 12 期。

⑯何堂坤：《中国古代铜镜的技术研究》，第 51 页，紫禁

城出版社，1999 年。

⑰海昏侯墓出土的这件“龙首匱”有断裂、残缺等病害，其器形与西汉中期的匱（包括已发表的海昏侯 M1:406 匱）并不相似，标签中后改为“龙首合”。但在发表的铜器整理的文章中，仅见铜匱而未见合，故暂时按原名。见：江西省文物考古研究院、中国人民大学历史学院考古文博系：《江西南昌西汉海昏侯刘贺墓出土铜器》，《文物》2018 年第 11 期。

⑱李洋：《炉锤之间 先秦两汉时期热锻薄壁青铜器研究》，第 155~160 页，上海古籍出版社，2017 年。

⑲a：张吉：《随州文峰塔墓地青铜器工艺与腐蚀性研究》，第 37~39 页，北京大学硕士学位论文，2015 年；b 张吉、梁超、王志刚等：《襄阳余岗墓地出土青铜容器的金相及成分分析》，《江汉考古》2019 年第 3 期。

⑳刘煜、贾莹、成小林等：《M54 出土青铜器的金相分析》，中国社会科学院考古研究所：《安阳殷墟花园庄东地商代墓葬》，第 297~301 页，科学出版社，2007 年。

㉑张治国、马清林：《甘肃崇信于家湾西周墓出土青铜器的金相与成分分析》，《文物保护与考古科学》2008 年第 20 卷第 1 期。

㉒胡飞、秦颖：《蚌埠双墩春秋一号墓部分青铜器成分及金相分析》，《有色金属》2011 年第 63 卷第 1 期。

㉓罗武干：《古麋地出土青铜器初步研究》，第 58 页，中国科学技术大学博士学位论文，2008 年。

㉔张吉、梁超、王志刚等：《襄阳余岗墓地出土青铜容器的金相及成分分析》，《江汉考古》2019 年第 3 期。

㉕张登毅、李延祥、郭银堂：《山西定襄中霍墓地出土铜器的初步科学分析》，《文物保护与考古科学》2016 年第 28 卷第 1 期。

㉖王贺、柏艺萌、肖俊涛：《辽宁建昌东大杖子墓地出土薄壁铜容器的检测与分析》，吉林大学边疆考古研究中心：《边疆考古研究（第 18 辑）》，第 381~387 页，科学出版社，2015 年。

㉗孙淑云、王金潮、田建花等：《淮阴高庄战国墓出土铜器的分析研究》，《考古》2009 年第 2 期。

㉘罗武干、秦颖、黄凤春等：《湖北荆门左塚楚墓群出土金属器研究》，《江汉考古》2006 年第 4 期。

㉙a 秦颖、李世彩、晏德付等：《湖北及安徽出土东周至秦汉时期热锻青铜容器的科学分析》，《文物》2016 年第 7 期；b 同㉙。

㉚杨菊、李延祥：《北京延庆西屯墓地出土汉代铜器的科学分析》，《中国文物科学研究》2012 年第 3 期。

（责任编辑：周广明）