

doi: 10.3969/j.issn.1007-7545.2016.05.018

正阳闰楼墓地出土商代铜器的检测及相关问题研究

刘群¹,肖梦娅²,梅建军²,陈坤龙²,张华¹,陈建立³

(1. 河南省驻马店市文物考古管理所,河南驻马店 463000;

2. 北京科技大学 科技史与文化遗产研究院,北京 100083;3. 北京大学 考古文博学院,北京 100871)

摘要:河南驻马店正阳闰楼商代晚期墓地是商代南土的一处重要墓地,出土青铜器与殷墟铜器有着诸多相似特点。研究该批铜器的制作技术和矿料来源,对于探究商代晚期中原与周边地区青铜技术的关系、铜料的流通以及由此蕴含社会管理信息有着重要的学术意义。利用金相组织观察和扫描电镜能谱对闰楼墓地出土部分铜器进行了显微组织和成分分析,结果表明,闰楼出土铜器中容器的锡含量明显较高。另外,闰楼墓地铜器多为高放射性铅同位素,这一结果也与商代晚期多地的高放射性现象一致。

关键词:闰楼;商代晚期;青铜器;科学分析

中图分类号:K871.3 文献标志码:A 文章编号:1007-7545(2016)05-0066-07

Scientific Studies of Bronze Artifacts Unearthed from Runlou Cemetery

LIU Qun¹, XIAO Meng-ya², MEI Jian-jun², CHEN Kun-long², ZHANG Hua¹, CHEN Jian-li³

(1. Management office of Cultural Relics, Zhumadian 463000, Henan, China; 2. Research Institute of History of Science and Technology and Cultural Heritage, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. School of Archaeology and Museology, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Runlou cemetery, in Zhengyang County, Henan Province, of late Shang dynasty period is an important cemetery in Southern territory of Shang dynasty. Bronze artifacts unearthed here are similar with those unearthed from Yinxu site. It is significant to study spreading way of bronze technology and transforming path of raw material in Late Shang Dynasty through investigation on manufacture technology and raw material. The microstructure and composition of bronze artifacts unearthed from Runlou cemetery were investigated by SEM-EDS. The results indicate that bronze vessels of Runlou cemetery have high content of tin, moreover, the highly radioactive lead isotope shows that bronze artifacts of Runlou has the same characteristics with those unearthed from several sites in late Shang dynasty.

Key words: Runlou cemetery; Late Shang Dynasty; bronze artifacts; scientific study

闰楼商代古墓群位于河南省驻马店市正阳县境内文殊河南岸的二级台地之上的傅寨乡傅寨村,距驻马店市区约40 km。2008~2009年,河南省文物研究所、驻马店市文物考古管理所联合对其进行了抢救性发掘,共发掘商代墓葬160多座。墓葬以中

型墓葬和小型墓葬为主,墓葬成组排列,多设有二层台及腰坑,墓主头部置一陶器,或簋或鬲。殉狗之风盛行,一般2~6只,随葬器物组合为鼎、觚、爵、戈等。出土商代青铜器、玉器、骨器、石器、陶器等450余件。铜器有鼎、尊、觚、爵、钺、戈、矛、镞、刀、削、

收稿日期:2015-11-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAK08B03);教育部人文社会科学重点研究基地重大课题(14JJD78003);国家文物局文物保护科技优秀青年研究计划项目(2014226)

作者简介:刘群(1968-),男,河南驻马店人,助理馆员;通信作者:陈建立(1973-),男,河南虞城人,教授,博士生导师。

铸、凿等,其中3件铜器上发现有“亚禽”铭文^[1]。正阳闰楼墓地的发掘与出土文物为研究淮河流域上游商文化的发展以及当时当地的社会形态、生活、文化等提供了十分重要的实物资料。研究表明,此次闰楼商代墓葬出土的铜器形制多样、铸造水平高超,器型与殷墟三、四期铜器相仿。与此同时,驻马店市公安局、遂平县检察院也向驻马店市文物管理所移交了一批盗掘自本墓地的青铜器。为探究这一地区的青铜铸造技术水平及其矿料来源,并探索此区域在商代晚期南北之间的矿料运输及技术传播中的作用,我们对这批铜器进行金相观察、成分分析、铅同位素示踪等检测,本文是初步分析结果。

1 检测方法与分析结果

本文对驻马店闰楼商代墓葬出土的29件残损

青铜器进行了取样分析。其中18件属墓葬发掘时出土,计容器10件、工具2件、兵器1件、铜器提梁1件、勾形器1件、铃1件,器物类型不明的1件及铜片1件;其余11件中6件为驻马店市公安局移交(简称移交)、1件为遂平县检察院查获(简称查获)、3件为自墓地采集而得、另有1件铜壶采集来源不详(尽管非正规考古发掘出土,但也能判定盗掘自闰楼墓地,均为容器)。

1.1 合金成分测定及金相组织观察结果

样品经标准金相样品制备程序制好后,使用北京科技大学材料学院测试中心 ZEISS EVO18 高分辨扫描电镜及其配备的 BRUKER XFlash Detector 5010 型能谱仪(SEM-EDS)进行合金成分分析。随后在徕卡 DM4000M 金相显微镜下进行金相组织观察,结果见表1。

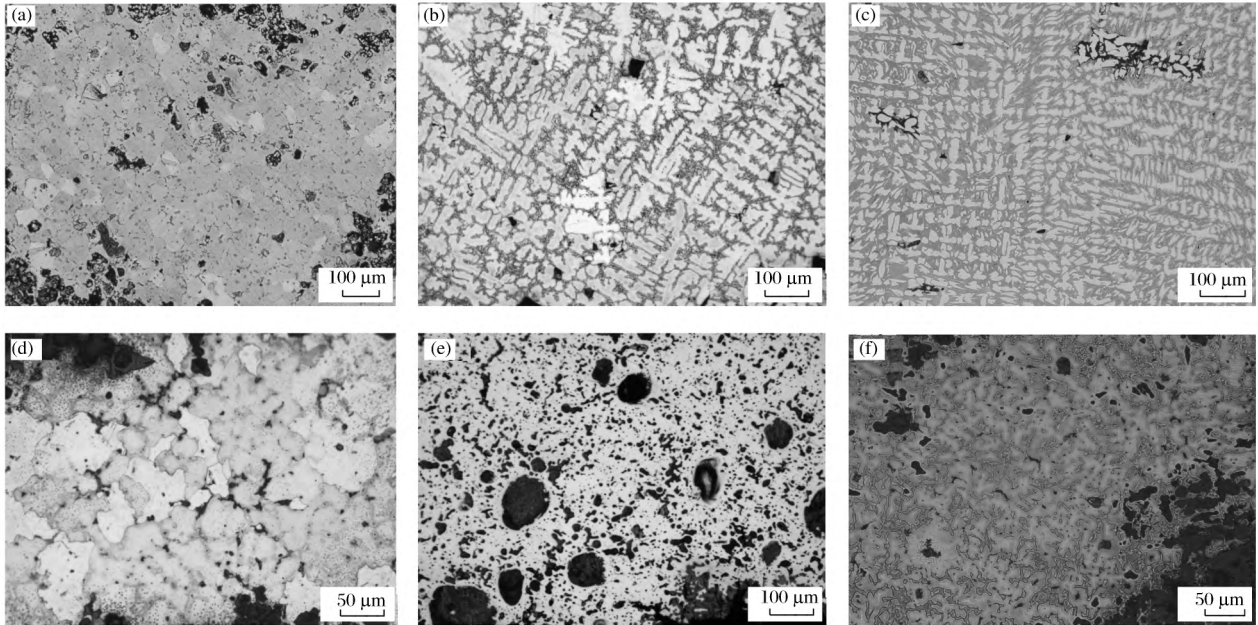
表1 闰楼出土铜器 SEM-EDS 成分分析及金相组织观察结果

Table 1 Results of composition analysis by SEM-EDS and metallographic structure of bronze artifacts unearthed from Runlou Cemetery

序号	器名	试验号	出土单位	取样部位	主要元素含量/%	材质判断	金相组织观察结果
1	觚	45600	M26	残片	Cu 79.2, Sn 18.8, P 0.8	Cu-Sn	样品为高锡青铜,基体为 α 固溶体树枝晶。枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体,共析体优先锈蚀。
2	觚	45601	M37	残片	Cu 71.0, Sn 25.0, Pb 4.0	Cu-Sn-Pb	α 固溶体树枝晶粗大,晶界间分布有 $(\alpha+\delta)$ 共析组织,共析体优先腐蚀,少量不规则状铅颗粒,与铜硫化物共存,分布于晶间。大部锈蚀,分析的锡含量偏高。
3	戈	45602	M37	残片	Cu 46.7, Sn 45.1, Pb 8.2	Cu-Sn-Pb	全部锈蚀,分析的锡含量偏高。
4	提梁	45603	M37	残片	Cu 91.4, Sn 8.5	Cu-Sn	α 固溶体树枝晶偏析明显, $(\alpha+\delta)$ 共析组织数量多、形态细小,沿枝晶均匀分布,几乎不存在铸造缺陷。
5	铸	45604	M56:1	刃部	Cu 94.0, Sn 6.0	Cu-Sn	锡青铜铸造后受热,成分均匀化,铸造枝晶偏析基本消失,铜锡 α 固溶体大晶粒状,晶间有残存的细小共析体,晶内存在少量锈蚀。图1a。
6	圆鼎	45606	M70	残片	Cu 79.0, Sn 19.5, Pb 1.5	Cu-Sn-Pb	基体为 α 固溶体树枝晶组织,枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体,细小铅颗粒与共析体共生分布。有少量铸造孔洞及含铁的的铜硫化物夹杂。图1b。
7	铜片	45607	M70	残片	Cu 77.8, Sn 19.7, Pb 2.5	Cu-Sn-Pb	基体为 α 固溶体树枝晶,枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体,共析体优先腐蚀,有少量自由铜析出。铅呈小颗粒状与共析体共生分布。有少量铜硫化物夹杂。
8	爵	45608	M80	足部残片	Cu 77.8, Sn 22.2	Cu-Sn	基体为 α 固溶体树枝晶,大量粗大多角花斑状 $(\alpha+\delta)$ 共析体互连成网状。有少量自由铜析出,且析出铜周围均有锈蚀。另有一处析出铜及锈蚀部分呈裂纹状。图1c。
9	铸	45609	M81:D1	残片	Cu 42.4, Sn 48.6, Pb 9.0	Cu-Sn-Pb	全部锈蚀,分析的锡含量偏高。
10	勾形器	45610	M119:4	残片	Cu 95.1, Sn 3.9, Pb 1.0	Cu-Sn-Pb	铜锡单相 α 固溶体晶粒状,存在明显偏析,浅色为富锡部位,且富锡部位优先腐蚀。图1d。
11	爵	45611	M120	足部残片	Cu 56.8, Sn 36.3, Pb 6.9	Cu-Sn-Pb	基体为 α 固溶体树枝晶,枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体。有大量铜析出,部分连成网状, $(\alpha+\delta)$ 共析体几乎全部锈蚀。有铜硫化物夹杂与铅颗粒共生分布。部分锈蚀,分析的锡含量偏高。

续表 1

序号	器名	试验号	出土单位	取样部位	主要元素含量/%	材质判断	金相组织观察结果
12	铃	45612	M190:3	残片	Cu 91.0、Pb 9.0	Cu-Pb	全部锈蚀。 α 固溶体树枝晶粗大,晶界间分布有 $(\alpha+\delta)$ 共析组织,数量不多,形态较小。大量铅颗粒呈球状弥散分布,有少量自由铜析出。图 1e。
13	鼎	45613	M194:D	耳部	Cu 72.1、Sn 8.0、Pb 18.9	Cu-Sn-Pb	样品为高锡青铜。基体为 α 固溶体树枝晶组织,大量粗大多角花斑状 $(\alpha+\delta)$ 共析体互连成网状。有少量黑色孔洞及硫化物夹杂。表面锈蚀,分析的锡含量偏高。
14	罍	45614	M194	足部	Cu 76.0、Sn 24.0	Cu-Sn	铜锡 α 固溶体树枝晶偏析明显,大量 $(\alpha+\delta)$ 共析组织互连成网络状。有少量铸造孔洞及含铁的铜硫化物夹杂。表面锈蚀,分析的锡含量偏高。
15	罍	45615	M194	口沿	Cu 77.7、Sn 22.3	Cu-Sn	大部分已锈蚀,基体为 α 固溶体,晶间分布 $(\alpha+\delta)$ 共析组织,有较多球状铅颗粒弥散分布。基体中有少量 $(\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O})$ 共晶组织。
16	铜器	45616	M194	残片	Cu 44.0、Sn 12.9、Pb 43.1	Cu-Sn-Pb	样品锈蚀严重,基体为 α 固溶体树枝晶组织,有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体分布于晶间,铅颗粒呈不规则状,均匀分布,有少量铜硫化物夹杂与铅颗粒共生分布。
17	觚	45617	M248:D	残片	Cu 83.9、Sn 12.6、Pb 3.5	Cu-Sn-Pb	基体为 α 固溶体树枝晶组织。枝晶间分布有 $(\alpha+\delta)$ 共析体,部分锈蚀且属于 α 相优先腐蚀,图 1f。因锈蚀严重,分析的锡含量偏高。
18	觚	45618	M261:1	残片	Cu 63.7、Sn 36.3	Cu-Sn	基体为 α 固溶体树枝晶组织,枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体。部分共析体锈蚀,属于 $(\alpha+\delta)$ 优先腐蚀。另有不少铅颗粒弥散分布,并有极少铜析出现象。因锈蚀严重,分析的锡含量偏高。
19	鼎	45619	移交	下腹部残片	Cu 54.1、Sn 33.1、Pb 12.8	Cu-Sn-Pb	α 固溶体树枝晶偏析明显,枝晶间均匀分布大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体。有少量硫化物夹杂,与共析体共生。
20	罍	45620	移交	残片	Cu 81.5、Sn 18.5	Cu-Sn	α 固溶体树枝晶偏析明显,枝晶间均匀分布大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体。部分共析体锈蚀,属于 $(\alpha+\delta)$ 优先腐蚀
21	罍	45621	移交	底部残片	Cu 81.5、Sn 18.5	Cu-Sn	基体为 α 固溶体树枝晶组织,枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体。有少量铸造孔洞及含铁的铜硫化物夹杂。
22	觚	45622	移交	残片	Cu 79.0、Sn 21.0	Cu-Sn	α 固溶体树枝晶偏析明显, $(\alpha+\delta)$ 共析组织数量多、形态细小,沿枝晶均匀分布。少量共析体内或共析体周围锈蚀,属 $(\alpha+\delta)$ 优先腐蚀。
23	觚	45623	移交	残片	Cu 82.8、Sn 11.8、Pb 5.4	Cu-Sn-Pb	基体为 α 固溶体树枝晶,枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体。存在铸造缺陷,并有硫化物夹杂。大部锈蚀,分析的锡含量偏高
24	爵	45624	移交	残片	Cu 50.3、Sn 29.3、Pb 20.4	Cu-Sn-Pb	基体为 α 固溶体树枝晶,枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体。存在铸造缺陷,并有硫化物夹杂。表面锈蚀,分析的锡含量偏高
25	觚	45625	查获	残片	Cu 79.8、Sn 20.2	Cu-Sn	基体为 α 固溶体树枝晶,枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体。部分共析体锈蚀,属于 $(\alpha+\delta)$ 优先腐蚀。铅颗粒主要分布于共析体内,还有部分自由铜析出。部分锈蚀,分析的锡含量偏高。
26	鼎	45626	采集	足部残片	Cu 43.8、Sn 28.0、Pb 28.2	Cu-Sn-Pb	锈蚀严重,分析的锡含量偏高
27	觚	45627	采集	口沿	Cu 64.9、Sn 31.8、Pb 3.3	Cu-Sn-Pb	α 固溶体树枝晶偏析明显,枝晶间均匀分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体。只有一处铜析出,无铸造缺陷。表面锈蚀,分析的锡含量偏高
28	爵	45628	采集	鋈部	Cu 82.1、Sn 17.9	Cu-Sn	样品锈蚀严重,基体为 α 固溶体树枝晶,枝晶间分布有大量 $(\alpha+\delta)$ 共析体,少量铅颗粒分布于晶间,少量铜硫化物夹杂,与铅颗粒共生分布。表面锈蚀,分析的锡含量偏高
29	壶	45629	采集	腹部残片	Cu 18.7、Sn 65.8、Pb 7.4、Fe 5.0、S 0.4、P 1.3、Si 1.4	Cu-Sn-Pb	



(a)铜铸刃部 45604(M56:1);(b)圆鼎残片 45606(M70);(c)爵足部残片 45608(M80);
(d)铜勾形器残片 45610(M119:4);(e)鼎耳部 45613(M194:D);(f)铜觚残片 45618(M261:1)

图 1 不同器物的金相组织

Fig 1 Metallographic structure of different bronze artifacts

1.2 铅同位素比值测定结果

针对用于金相观察和成分检测而镶样后的部分剩余样品,在去除锈蚀部分,称量后置于王水中加热将其溶解,并定容至 100 mL,使用 ICP-MS 进行微量元素检测后,根据其中的铅含量用去离子水稀释溶液使其铅含量为 0.1%(1 000 ppm),之后加入铊的标准溶液,使用北京大学地空学院

VG Elemental 型 MC-ICP-MS 测试样品的铅同位素比值。仪器分析精度²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 和²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 的相对误差分别小于 0.01%,0.01% 和 0.1%;测试时使用国际铅同位素标准溶液-SRM981 校正仪器,每测试 6~8 个样品即测试一次标准溶液-SRM981。经过铅同位素分析的样品有 20 件,其比值结果见表 2,分布见图 2。

表 2 闽楼出土铜器铅同位素比值检测结果

Table 2 Lead isotopes' ratio of bronze artifacts unearthed from Runlou Cemetery

序号	器物	试验号	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb
1	觚	45600	0.835 2	2.088 1	18.805	15.707	39.267
2	觚	45601	0.735 5	1.934 0	21.811	16.042	42.182
3	戈	45602	0.733 0	1.922 0	21.919	16.068	42.127
4	铜器提梁	45603	0.741 7	1.943 2	21.662	16.067	42.094
5	铜器残片	45605	0.726 4	1.813 7	22.092	16.047	40.069
6	圆鼎	45606	0.723 2	1.915 9	22.480	16.257	43.070
7	铎	45609	0.738 2	1.924 6	21.873	16.146	42.099
8	勾形器	45610	0.789 1	2.007 3	20.052	15.822	40.246
9	铃	45612	0.727 4	1.913 2	22.090	16.070	42.261
10	斝足部	45614	0.773 4	1.985 3	20.537	15.884	40.771
11	铜器	45616	0.715 7	1.895 4	22.810	16.323	43.234
12	觚	45617	0.887 5	2.163 6	17.496	15.528	37.854
13	鼎	45619	0.716 2	1.898 9	22.569	16.164	42.861
14	斝	45620	0.849 7	2.085 6	18.313	15.562	38.194
15	斝	45621	0.850 2	2.086 3	18.293	15.553	38.168
16	觚	45623	0.713 6	1.910 7	22.845	16.303	43.650
17	爵	45624	0.706 2	1.925 3	23.203	16.388	44.673
18	鼎	45626	0.713 7	1.889 4	22.885	16.333	43.239
19	觚	45627	0.887 2	2.163 3	17.508	15.533	37.875
20	壶	45629	0.731 3	1.916 0	21.922	16.031	42.001

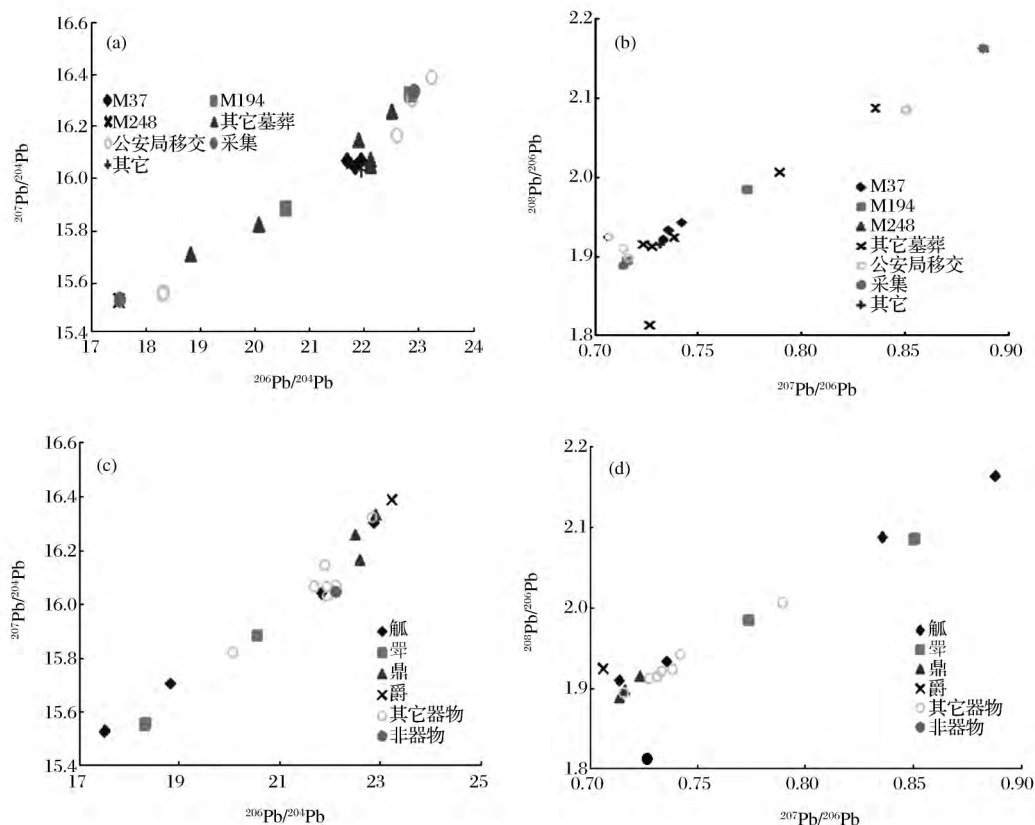


图2 闰楼出土铜器铅同位素比值散点图

Fig 2 Scatter diagram of lead isotope ratio of bronze artifacts unearthed from Runlou Cemetery

2 相关问题讨论

2.1 铜器的制作工艺

经成分分析的29件样品,21件容器中,10件为铜锡铅三元合金,11件为铜锡二元合金;2件工具铍,其中1件与兵器戈情况相同,为铜锡铅三元合金,但基体均已全部锈蚀,另1件为铜锡二元合金,并有不完全热锻的现象。另外,提梁、勾形器均为铜锡二元合金,而其锡含量不高;铜铃是本次检测样品中唯一一件铅青铜。总之,这批青铜器的合金种类包括铅锡青铜(14件)、锡青铜(14件)和铅青铜(1件铜铃)。闰楼铜器锡含量明显偏高,其原因在于样品多锈蚀严重,锈蚀过程中青铜金属基体中的铜会流失到土壤中,从而导致检测的锡含量高于其未锈蚀时的含量,因此表1列出的分析结果仅有参考意义,但并不影响本文关于合金种类的判断。

闰楼铜器铅含量高低不均,但与铜器种类有一定关系。金相组织观察发现多数样品中的铅是以小颗粒状存在的,只有1件器型不明的铜器(45616)其基体由大球状、不规则条状的铅构成,另有1件鼎(45613)的耳部可见大球状、椭球状、颗粒状的铅弥

散分布。尽管铜容器的含铅量高低不均,如有不含铅的,有含铅10%以下的,还有含铅量高达28.2%的,但有规律可循,如罍均不含铅,鼎均含铅,而觚中含铅者的铅含量比较集中,均属高锡低铅类型。这一现象也存在于安阳出土的礼器当中,其目的有可能是既可节省一部分锡料,而又不会改变器物的硬度与色泽^[2]。至于4件鼎和4件爵,含铅量不等且跨度极大这一现象,可能也是为了节省锡料,到铸造过程中铅的添加随意性较大。值得注意的是,铜铃采用铅青铜铸造而成,不能得到较好的声音效果,也说明了闰楼铜器生产的地方性特征。

闰楼铜器的合金种类及组成与殷墟出土铜器相似。殷墟二期铜容器以锡青铜为主,且锡含量普遍较高,主要集中于15%~20%,铅含量多在10%以下;殷墟三期,青铜容器以锡铅青铜为主,且铅含量不断增加,最高达25%左右;殷墟四期,高铅青铜成为殷墟青铜容器的一大特点,铅含量在15%以上的器物数量大幅增加,而锡含量却明显减少,有不少都在10%以下^[3]。闰楼铜器的合金组成整体上与之类似,但因数据有限,尚不能对闰楼墓地出土铜器合金组成的规律做更深的讨论。

经金相组织观察的 29 件样品, 24 件为铸造成形, 其中部分样品经过受热和热锻处理, 其他 5 件因锈蚀严重而无法判定其组织。铸造铜器中, 大部分铜容器的 $\alpha+\delta$ 共析体连接成网状, 而其它器型样品的 $\alpha+\delta$ 共析体组织细小, 这说明锡含量的高低可能与器物种类有关。受热样品包括觚(45601)和勾形器(45610), 这两件器物可能在使用过程中受过加热; 铸(45604)的金相组织包括 α 固溶体晶粒、部分再结晶晶粒和孪晶, 但 α 固溶体再结晶温度不高或加热时间短, 故再结晶不完全, 这也说明此件器物并非有意热锻制成。这点也与以往殷墟铜器的检测结果一致。总之, 从制作技术方面来看, 闰楼铜器的生产与殷墟有较大的相似性。

2.2 矿料来源分析

铅同位素比值分析结果显示, 20 件样品 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的值在 0.706~0.888 之间; $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的值在 1.814~2.164 之间; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的值在 17.496~23.203 之间; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的值在 15.528~16.388 之间; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的值在 37.854~44.673 之间。20 件样品中有 15 件属于高放射性成因铅, 其中来自 M37 的 3 件器物铅同位素比值较接近, M194 的 2 件器物也都属于高放射性成因铅, 说明同一墓葬中器物的矿料来源应该是相同的。5 件为普通铅的样品包括 3 件觚和 2 件罍, 其中来自 M248 和公安局移交的 2 件觚, 以及公安局移交的 2 件罍分别两两聚合度较高, 矿料来源可能相同。

闰楼出土器物的铅同位素大部分属于高放射性成因铅, 这与商代晚期多处遗址呈现高放射性成因铅^[4-7]的现象一致。在 5 件检测结果为普通铅的样品中, M26 和墓 248 出土的 2 件觚微量元素的含量较为相当(因篇幅所限, 本文未公布该批铜器的微量元素检测数据, 将另文发表), 且这两件器物的含铁量明显高于其它所有铜器, 钴、镍、砷、锌、锑等的含量也略高于大部分器物; 驻马店市公安局移交的 2 件罍和采集而得的觚微量元素含量的聚合度较高。因此, 5 件普通铅中墓葬出土的 2 件器物 and 公安局移交及采集的 3 件器物矿料来源可能不同。而有着高放射性成因铅的器物, 其微量元素的含量从器型、出土单位等不同方面来看, 都没有明显的规律或特点, 只能说其产地不同于 5 件普通铅的产地。

高放射性成因铅在盘龙城遗址和安阳殷墟中也有所发现^[6-7]。驻马店闰楼位于殷墟与长江中下游铜矿带之间, 如果从南到北存在一条矿料运输的路线, 闰楼则很可能与两地有着紧密的联系。将闰楼

出土铜器与殷墟妇好墓和商王朝获取南方资源的据点湖北黄陂盘龙城商早期遗址的铅同位素数据作对比, 结果见图 3。可以看出, 三处遗址均既有普通铅又有高放射性成因铅, 在 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值为 0.7~0.75 的区间内, 闰楼铜器主要聚集于此, 盘龙城只有少量、而妇好墓没有铜器; 在 0.75~0.8 的区间内, 闰楼铜器只有 2 件, 盘龙城和妇好墓的铜器则较多; 而在大于 0.8, 即普通铅的区间内, 盘龙城铜器的铅同位素比值分列于两端, 要么接近 0.8 要么接近 0.9, 而闰楼和妇好墓铜器的铅同位素比值则主要集中于 0.85~0.89 之间。总体看来, 盘龙城、闰楼、妇好墓这 3 处遗址出土铜器的铅同位素比值在总体特征上是比较接近的, 但其拟合度又并非很高, 其矿料是否来自同一矿区, 还需要进一步的研究。

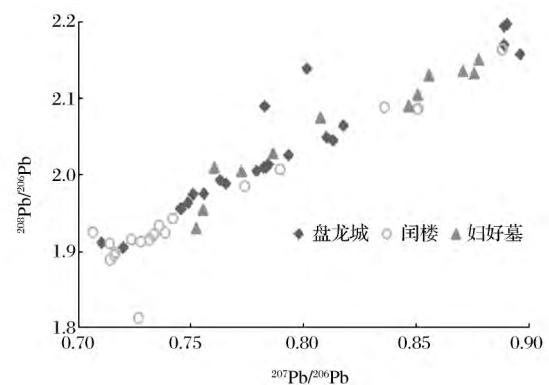


图 3 闰楼与盘龙城、妇好墓出土铜器铅同位素比值对比图

Fig 3 Comparison of lead isotope ratio of bronze artifacts unearthed from Runlou, Panlongcheng, and Fuhao Cemetery

3 结论

1) 闰楼出土铜器的制作技术与同时期的殷墟出土青铜器基本相同。

2) 闰楼铜器既含普通铅也含高放射性成因铅, 这与殷墟妇好墓和盘龙城出土铜器的铅同位素检测结果一致, 但不同的是, 闰楼铜器的铅同位素比值大部分聚集于低于妇好墓和盘龙城铜器铅同位素比值的区间。这为推测闰楼出土的部分器物的矿料来源提供了科学数据, 至于与殷墟或其它地区的关系如何还有待进一步研究和阐释。

3) 本文的研究结果, 进一步揭示了闰楼铜器与殷墟铜器之间的密切联系, 对于认识商文化晚期在南土的影响及与之相伴的文化、技术交流具有重要意义。

参考文献

[1] 国家文物局. 2009 中国重要考古发现[M]. 北京: 文物出版社, 2010: 44-48.

[2] 季连琪. 河南安阳郭家庄 160 号墓出土铜器的成分分析研究[J]. 考古, 1997(2): 80-84.

[3] 赵春燕. 安阳殷墟出土青铜器的化学成分分析与研究: 考古学集刊(15) [M]. 北京: 文物出版社, 2004: 243-268.

[4] 金正耀, CHASE W T, 平尾良光, 等. 江西新干大洋洲

商墓青铜器的铅同位素比值研究[J]. 考古, 1994(8): 744-747.

[5] 彭子成, 刘永刚, 刘诗中, 等. 赣鄂豫地区商代青铜器和部分铜铅矿料来源的初探[J]. 自然科学史研究, 1999, 18(3): 241-249.

[6] 孙淑云, 韩汝玢. 盘龙城出土青铜器的铅同位素比测定报告[R]//盘龙城: 1963-1994 年考古发掘报告(上). 北京: 文物出版社, 2001: 545-551.

[7] 金正耀. 晚商中原青铜的锡料问题[J]. 自然辩证法通讯, 1987, 9(4): 47-55.

(上接第 52 页)

2) Jmatpro 对强度计算有所优化, 根据晶粒度的不同, 采用不同的修正参数, 但是与实际生产差别较大。

3) 本文得出的下列纯钛板强度计算公式可用于生产, 在实际应用时, 需针对纯钛材料不同厚度、牌号、退火制定来定义相应的强度修正参数 c 和 d。

$$[\sigma_{0.2}] = [O] \times 1304 + c$$

$$[\sigma] = [O] \times 1428 + d$$

参考文献

[1] 《稀有金属材料加工手册》编写组. 稀有金属材料加工手

册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 49-54.

[2] 莫畏. 钛[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 290-327.

[3] 王小朝, 郭佳林. 纯钛板杂质元素含量与强度关系的数学模型构建[C]//第十四届中国有色金属学会材料科学与工程合金加工学术研讨会文集, 海南三亚: 中国有色金属学会轻金属冶金学术委员会, 2011: 281-284.

[4] 陈战乾, 王晓君, 乔璐, 等. 纯钛轧制板材抗拉强度与其铸锭杂质含量的函数关系研究[J]. 稀有金属快报, 2004, 23(8): 24-28.