

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.02.018

徐阳墓地出土青铜器焊料的检测分析

陈亮亮¹, 张宝霞¹, 李强², 吴业恒³, 马占山³, 魏国锋¹

(1. 安徽大学 历史学院, 合肥 230039;

2. 四川大学 考古文博学院, 成都 610065;

3. 洛阳市文物考古研究院, 河南 洛阳 471026)

摘要: 利用金相显微镜、扫描电镜能谱对洛阳徐阳村墓地西区出土的一件铜盘连接处的焊料进行检测分析, 并且与目前已经公布的西周晚期到战国晚期的焊料成分的研究成果进行比较。西周晚期至春秋晚期出土的焊料有铅焊料、锡焊料以及铅锡合金焊料, 而铅锡合金焊料以高铅低锡型合金较为常见。与春秋时期的铅锡合金焊料相比较, 战国时期的铅锡焊料中同样以高铅低锡型合金较为常见。研究表明, 徐阳墓地出土的铜盘连接处焊料为纯铅焊料, 与春秋时期铅焊料、锡焊料及铅锡合金焊料的特征相吻合, 因此认为徐阳墓地出土焊料为春秋时期的焊料。

关键词: 徐阳墓地; 春秋时期; 焊料; 成分

中图分类号: K876.41

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2023)02-0117-06

Analysis of a Bronze Solder Excavated from the Xuyang Cemetery

CHEN Liang-liang¹, ZHANG Bao-xia¹, LI Qiang², WU Ye-heng³,
MA Zhan-shan³, WEI Guo-feng¹

(1. School of History of Anhui University, Hefei 230039, China;

2. School of Archaeology, Culture and Museology, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. Luoyang City Research Institute of Cultural Relics and Archaeology, Luoyang 471026, Henan, China)

Abstract: Solder from a bronze plate joint excavated from western part of the Xuyang cemetery in Luoyang city was analyzed by metallurgical microscopy and scanning electron microscopy energy spectroscopy, and compared with published research on solder from the late Western Zhou to late Warring States periods. Solders unearthed from the late Western Zhou to late Spring and Autumn periods includes lead, tin and lead-tin alloy solder, with lead-tin alloy solder being the most prevalent, which is high lead and low tin alloy. Compared with lead-tin alloy solder from the Spring and Autumn period, the lead-tin alloy solder from the Warring States period is also more common in the high-lead, low-tin alloy type. The results show that the solder at the joint of the bronze plate excavated from the Xuyang cemetery is pure lead solder, which is consistent with the characteristics of solder from the Spring and Autumn period. Therefore, it is suggested that the solder excavated from the Xuyang cemetery could dated back to the Spring and Autumn period.

Key words: Xuyang cemetery; Spring and Autumn period; solder; composition

收稿日期: 2022-09-21

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(21BKG019)

作者简介: 陈亮亮(1995-), 女, 硕士研究生; 通信作者: 魏国锋(1975-), 男, 教授

焊接技术通常多用于我国青铜器铸造过程中器体与附件的连接,在青铜礼器、兵器、车马器及装饰器具等方面均有广泛应用。焊接技术的使用可早至晚商至西周早期^[1],主要出现过铸焊、钎焊、锻焊等技术^[2]。其中,锻焊技术不需要焊料,而铸焊、钎焊等均需要焊料^[3],钎焊中焊料以青铜高温熔点为主体的属于铜焊,技术难度较高;而以铅锡低温熔点材料为主体的属于钎焊,技术难度较低。焊料是对添加到焊缝、堆焊层和钎缝中金属合金材料的总称,常见的焊料有纯铅、纯锡及铅锡合金焊料等。张昌平^[1]认为中国古代青铜器的焊接技术是独立起源与发展的,逐步成为青铜礼器生产中最重要技术手段,对社会礼制产生了重要影响;俞杨阳^[4]对三星堆出土铜器的几种焊接技术与中原地区做了对比研究,发现三星堆青铜器使用的铸铆、铜液铆焊以及分段铆接工艺,相较而言领先于同时期的中原;陈立信^[5]对尉氏春秋青铜器的铸造工艺和焊接技术进行了研究;金普军等^[6]对湖北九连墩楚墓出土青铜器钎焊材料进行了分析,结果表明当时采用了浇注钎料熔液的钎焊方式;何堂坤等^[2]、黄鹰航^[7]、汪苏等^[8]、尹海洁等^[9]分别从不同的角度探讨了我国古代焊接技术的相关问题。

除了对焊接工艺的研究,还有不少学者对焊接工艺中的焊料也进行了研究。孙淑云、梅建军分别对江苏淮阴高庄战国墓葬出土铜器中的焊料和四川绵阳石塘乡东汉墓出土的一件青铜摇钱树上的焊料进行了分析^[10];王贺等^[11]采用金相显微镜、扫描电子显微镜及X射线能谱分析仪对北周武帝孝陵出土铜器的焊料进行了检测分析,并做了相关的焊接模拟试验,证实了孝陵发现的焊料为铜锡合金焊料。胡飞等^[12]分析了湖北大冶蟹子地遗址出土的西周早期金属丝的化学成分和金相组织,并与已有古代青铜器上所附着的锡铅焊料及现代锡铅共晶焊料的研究成果进行比较,认为该金属丝为锡铅合金,与现代铅锡共晶焊料相近,极有可能与当时青铜器的焊接相关。

综上所述,对焊接工艺及焊料的研究已经取得了一定的进展,但焊料的科技分析成果仍然较少。因此,本文利用金相观察和扫描电镜能谱分析等手段对洛阳徐阳村陆浑戎贵族墓地西区出土的一件铜盘连接处的焊料进行科技分析,为进一步了解春秋时期的焊接工艺和焊料提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品

本次采集进行焊料检测的样品 XY-1 来自洛阳徐阳村墓葬中 M2 出土铜盘器耳与器身的连接处。如图 1 所示,样品表面的孔隙度较大,并且表面有浅绿色和灰黑色的腐蚀产物。

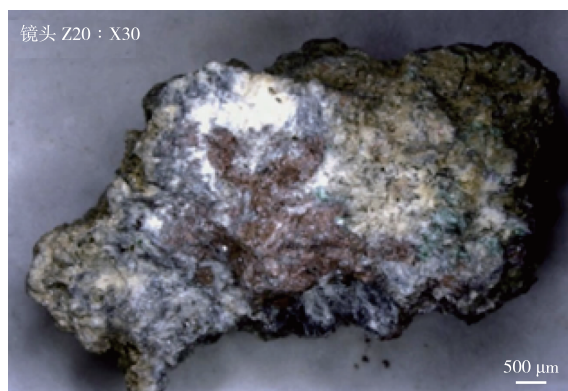


图 1 焊料

Fig. 1 Solder

1.2 试验方法

焊料样品依次经过镶嵌、打磨、抛光及腐蚀等过程。

金相分析采用 VHX-2000C 超景深显微镜进行观察。扫描电镜能谱分析采用中国科学技术大学物理与化学实验中心的扫描电镜能谱分析(SEM-EDS),所用仪器为 Sirion200 型场发射扫描电子显微镜和 INCA 型能谱仪,加速电压 15 kV,时间 50 s。在后向散射成像模式下,将光点分析和表面扫描相结合,对金属离子、夹杂物、基质和特殊相位进行光点或扫描检测。

焊料样品的金相照片如图 2 所示,电镜扫描结果如图 3、表 1 所示。



图 2 焊料金相照片

Fig. 2 Solder metallographic photos

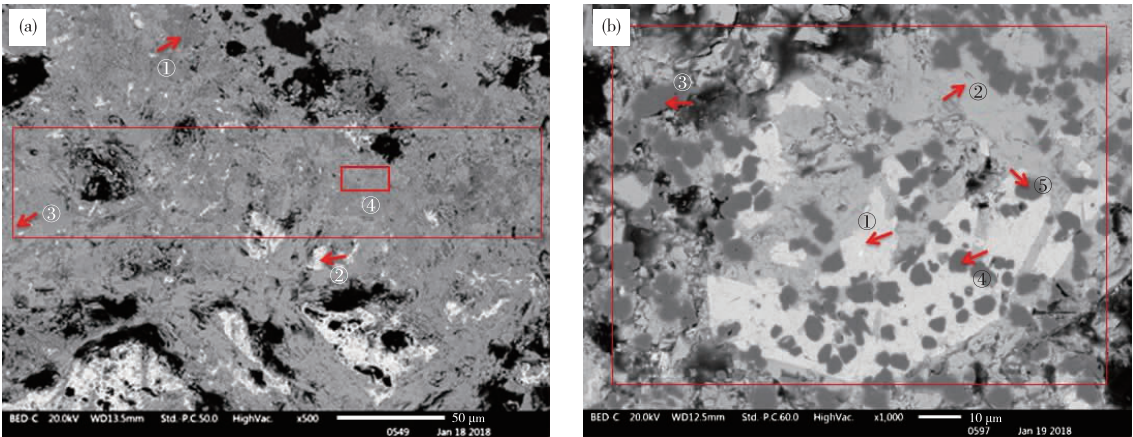


图3 焊料(a)及与焊料接触的青铜本体(b)的扫描电镜背散射电子像

Fig. 3 SEM backscattered electron image of solder (a) and bronze body contact with solder (b)

表1 焊料样品XY-1的SEM-EDS分析结果

Table 1 SEM-EDS analysis results of solder samples XY-1						/%
检测部位	扫描方式	Cu	Sn	Pb	O	其他
焊料	面扫(图3a)	-	-	62.55	23.01	C 14.44
	点扫(图3a点①)	-	-	60.14	24.21	C 15.57
	点扫(图3a点②)	-	-	74.21	12.12	C 13.67
	点扫(图3a点③)	-	-	65.04	21.22	C 13.74
	面扫(图3a区域④)	-	-	61.13	24.90	C 13.97
焊料所附 青铜基体	面扫(图3b)	39.37	0.27	45.63	7.57	As 7.16
	点扫(图3b点①)	1.36	0.87	82.40	8.82	Si 1.39, As 5.15
	点扫(图3b点②)	2.24	0.49	73.31	14.59	Si 1.55, As 7.82
	点扫(图3b点③)	95.98	0.48	0.86	-	Si 1.18, As 0.63, S 0.88
	点扫(图3b点④)	95.54	0.30	1.00	0.24	Cl 0.04, As 0.76, S 0.87, Zn 1.24
	点扫(图3b点⑤)	96.97	0.31	0.99	0.11	S 0.78, As 0.76

注:合金成分为质量分数,并且未做归一化处理;“-”表示未检测出该元素,下同

2 结果分析与讨论

2.1 结果分析

金相研究能为文物的生产提供技术线索,或帮助解决在保护古代文物时遇到的问题。如人工制品的生产过程、文物的热处理历史和腐蚀产物的性质^[13]。图2显示的是焊料样品的微观结构。图中左侧灰色夹杂黑色块状区域为焊料,右侧与之接触的为青铜器本体。焊料样品整体腐蚀比较严重,可观察到焊料中铅元素向与之接触的青铜本体扩散的现象。

电镜能谱结果(表1)和背散射电子图(图3)显示,样品不是一块纯净的焊料,而是与铜盘基体黏接到一起的焊料。焊料面扫(图3a)和点扫结果中均没有检测到锡元素,表明该焊料为纯铅焊料。

图3b中的大面积亮色区域(点①)以及浅灰色区域点②)的主要成分为铅。亮色区域上面的黑色斑点(点③、④、⑤)主要成分为铜,应为红铜颗粒,是

青铜合金晶间腐蚀的一种产物。在合适的条件下,晶间为阳极,晶粒为阴极,形成原电池。其中铜离子得到电子,形成单质铜,即红铜颗粒^[14]。对与焊料接触的青铜本体面扫结果显示,其主要元素成分为Cu 39.37%、Sn 0.27%、Pb 45.63%。值得注意的是,As为7.16%,含量较高。图3b的成分数据与铜盘相比,Cu含量较低,Pb含量较高,可能是在焊接时,高温使得焊料中的铅元素扩散至与之接触的青铜本体组织中造成的。

2.2 东周时期焊料的组成

焊料根据熔点的不同,可分为硬焊料和软焊料;根据组成成分不同,可分为锡铅焊料、铅焊料、锡焊料等。其中,锡铅焊料又称焊锡,是常用的锡铅合金焊料。主要由锡和铅组成,还含有铈等微量金属成分^[15]。为了更直观地展示西周晚期到战国时期的焊料组成规律,本文收集整理了目前已公布的焊料成分数据^[2],铅锡含量如表2所示。

表 2 东周时期出土焊料的铅锡含量及比值

Table 2 Content and ratio of lead and tin in solder unearthed in the Eastern Zhou Dynasty

年代	样品编号	Sn/%	Pb/%	杂质元素/%	Sn/Pb
西周晚期	M2012:16	1.5	97.0	Fe 0.1	64.67
	M2012:25	1.1	91.7	Fe<0.1	83.37
春秋时期	M2:34	98.33	-	-	-
	-	3.23	88.78	Zn 2.4, Ag 0.26	27.45
	YYM2:1	-	100	-	100
	YYM18:1-1	89.33	-	Cu 10.67	-
	YYM18:1-2	83.43	-	Cu 11.56, Fe 5.01	-
	YYM250:1-1	6.14	91.77	Fe 1.64, Al 0.45	14.91
	YYM250:1-2	5.63	91.92	Fe 1.8, Al 0.45	16.33
	M4:9	17.26	72.74	Cu 1.23, S 1.38, Al 1.44, Si 2.32	4.21
	M5:1	82.46	9.81	Cu 1.17, Al 0.55, Si 1.22	0.12
	M6:4	81.97	16.05	Cu 0.47	0.20
	M4:12	15.96	80.68	Cu 0.64, Fe 0.46	5.10
	-	36.88	58.48	Cu 0.23, Zn 0.19	1.59
	-	39.12	60.05	杂质光谱定性: Cu, Fe, As, Ag, Bi 等	1.54
	-	93.36	5.88	Cu 0.38, Fe<0.01	0.06
	-	53.41	41.40	Cu 0.03, Fe<1	0.78
	-	90.92	0.48	杂质光谱定性: Cu, Fe, As, Ag, Bi 等	0.01
	7:344.3	52.10	46.30	Cu 1.6	0.89
	7:344.1	23.40	64.70	O 7.0, Al 4.6, Si 0.3	2.76
	7:343	61.70	12.20	O 16.6, Cl 19.5	0.20
	M124	29.33	70.60	Cu 0.02, Si 0.01	2.40
战国时期	M126	29.28	70.70	Cu 0.02	2.40
	M141	38.19	61.72	Cu 0.02, Al 0.01	1.60
	M146	17.76	76.07	Cu 0.44, Si 1.58, Al 0.58	4.30
	M148	17.95	81.92	Cu 0.02, Si 0.02, Al 0.01	4.60
	M155	24.78	72.40	Al 0.89	2.90
	M181	18.23	81.75	Cu 0.01, Al 0.01	4.50
	M1106	65.66	33.94	Cu 0.01, Al 0.02	0.52
	M1106	57.80	41.99	Al 0.04	0.72
	M1114	11.87	87.88	Cu 0.08, Si 0.15	7.40
	M1114	10.16	89.67	Si 0.10	8.80
	M1114	15.50	84.41	-	5.40
	M1134	22.84	68.89	Si 2, Al 0.67	3.00
	M1130	19.72	79.27	Cu 0.01, Si 0.03, Al 0.01	4.10
	M1130	6.41	92.27	Cu 0.50, Si 0.30, Al 0.13	14.40
	M1130	47.56	52.25	Cu 0.08, Si 0.06, Al 0.02	1.10

表 2 显示,在 13 件西周晚期-春秋晚期的焊料样品中,有 3 件为铅焊料,3 件为锡焊料,7 件为铅锡合金焊料(包括 5 件高铅低锡型合金焊料、2 件高锡低铅型合金焊料)。整体来看,西周晚期至春秋晚期出土的焊料有铅焊料、锡焊料及铅锡合金焊料,其中,铅锡合金焊料以高铅低锡型合金较为常见。

而 24 件战国时期的焊料样品中,曾侯乙墓出土的 1 件焊料可能为纯锡焊料,其余 23 件均为铅锡合金焊料,其中仅有 8 件锡含量超过 40%。与春秋时期的铅锡合金焊料相比较,战国时期的铅锡焊料中同样以高铅低锡型合金较为常见,只有 4 件铅锡合金焊料的成分接近于共晶组织铅锡焊料。

焊料中的铅一般不与铜或铜合金互溶。在焊接时,铅也不能与铜或铜合金形成牢固的焊接层,它起到填充和固定的作用。因此在焊接部位受到外力作用时,被焊附件很容易脱落。然而,焊料中的锡可以与铜或铜合金反应形成稳定的金属间化合物 η 相(Cu_6Sn_5)或 ϵ 相(Cu_3Sn)^[16],从而形成更强的焊料层。

由表 2 可以看出,西周晚期以锡含量极低的铅焊料为主;春秋时期主要有纯锡焊料、高铅低锡及高锡低铅焊料;战国时期亦有纯锡焊料、高锡低铅及高铅低锡焊料。然而西周晚期到战国时期,铅锡合金类焊料仍大多以铅为基体。战国时期出现了 4 件合

金配比最接近现代焊料(Sn 63%, Pb 37%)的铅锡焊料(Sn 约 60%, Pb 约 40%)。铅锡焊料的优点是熔点较低,便于在低温下补铸或者焊接,而且固化后的组织也非常均匀,外表光亮,强度和硬度也较佳,其焊接性能远优于纯锡或纯铅焊料。这 4 件焊料的出现象征着战国时期工匠就已发现合金性能最佳的焊料配比,是我国焊接工艺史的重要里程碑。

陈光辉等^[3]认为,从制作工艺上讲,西周早中期还没有有意识地普遍使用焊接,而在器物发生断裂时才用焊接的方法把脱落的附件重新焊接上去,对器物进行修补。黄鹰航^[7]从社会影响因素的角度探讨了中国古代焊接技术的演进过程,认为商代中期到西周早期,焊接工艺大都是以青铜溶液或铜基合金作为焊料的铸焊;到了西周晚期,工匠们首次对更适合作为青铜焊料的铅和锡分别实施了钎焊的尝试,如 1956-1957 年,河南省三门峡上村岭虢国墓出土了 7 枚带有焊接痕迹的匜,该墓群是一处属于西周晚期、且有焊料成分分析证据的钎焊青铜器墓葬群;到了春秋时期,周天子大权旁落,礼崩乐坏,一些强大起来的诸侯王不再听命于周天子,趁机发动兼并战争,并大量僭越使用青铜器,产生了快速加工青铜器的需求,使得以铅或锡为焊料的钎焊青铜器逐渐增多^[17]。比如延庆军都山春秋早期山戎文化墓地 YYM18:1 罍耳部两块焊料分别含锡 83.43% 和 89.33%,YYM2:1 罍耳部焊料含铅 100%。下寺 M2:34 升鼎腹部与足之间的焊料是纯度为 98% 的锡^[18];山西晋国赵卿墓焊料,已趋近铅锡各半的取值^[17],说明至春秋晚期在焊料成分上发现了采用铅锡合金的情况。到了战国时期,锡铅合金焊料比例不断优化。比如曾侯乙墓中出土的曾侯乙尊焊料含锡 53.41%、铅 41.4%,接近最佳铅锡比例的焊料。这些焊料成分中铜含量都远不足人工有意识添加的 2%。这些数据均证明了春秋战国前后流行以锡、铅或铅锡合金为焊料的低温钎焊技术^[7],这也在后来多次发现的楚系、晋系等不同文化区域青铜器中得到了确证,并为考古界所接受^[1,19]。从资源角度来考虑,主要是由于金属锡在自然界存在较少,而当时铸造青铜器需要大量锡,因而造成锡料匮乏。相反,俗称“贱金属”的铅在自然界中储存丰富。因此,当时工匠在焊接器身与附件时会退而求其次,选择以铅为基体的铅锡焊料,放弃配比合理的锡基合金焊料(Sn 约 60%, Pb 约 40%)。

3 结论

1) 洛阳徐阳村陆浑戎贵族墓地西区出土的一件

铜盘连接处的焊料为春秋时期的纯铅焊料,与之接触的青铜基体的腐蚀情况较严重,与焊料连接的青铜基体成分数据与整体青铜器相比,铅含量较高,铜含量较低,这可能是在高温焊接情况下,焊料中的铅元素扩散青铜器本体组织中形成的。

2) 13 件出土的西周晚期至春秋晚期焊料有铅焊料、锡焊料及铅锡合金焊料,其中,铅锡合金焊料以高铅低锡型合金较为常见。

3) 24 件战国时期的铅锡焊料中同样以高铅低锡型合金较为常见,其中有 4 件铅锡合金焊料的成分接近于共晶组织铅锡焊料。这 4 件焊料的出现象征着战国时期工匠已发现合金性能最佳的焊料配比,是我国焊接工艺史的一次伟大飞跃。

参考文献

- [1] 张昌平. 商周青铜礼器铸造中焊接技术传统的形成[J]. 考古, 2018(2): 88-98.
ZHANG C P. The formation of welding technology in Shang and Zhou bronze ritual casting[J]. Archaeology, 2018(2): 88-98.
- [2] 何堂坤, 靳枫毅. 中国古代焊接技术初步研究[J]. 华夏考古, 2000(1): 61-65.
HE T K, JIN F Y. Preliminary study on welding technology in ancient China[J]. Huaxia Archaeology, 2000(1): 61-65.
- [3] 陈光辉, 李晓辉, 汪苏. 从中国古代焊接到现代焊接发展过程研究[C]//第四届中日机械技术史及机械设计国际学术会议. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 183-188.
CHEN G H, LI X H, WANG S. Research on the development process of welding from ancient China to modern welding[C]//Proceedings of the Fourth China-Japan International Conference on History of Mechanical Technology and Mechanical Design. Beijing: Beihang University Press, 2004: 183-188.
- [4] 俞杨阳. 三星堆青铜器焊接技术比较研究[J]. 哈尔滨学院学报, 2014, 35(1): 122-124.
YU Y Y. Comparative study on welding technology of Sanxingdui bronze ware[J]. Journal of Harbin University, 2014, 35(1): 122-124.
- [5] 陈立信. 谈谈尉氏春秋青铜器的铸造工艺和焊接技术[J]. 中原文物, 1988(1): 97-102, 73.
CHEN L X. Talking about the casting technology and welding technology of Weishi Spring and Autumn bronze[J]. Cultural Relics of Central China, 1988(1): 97-102, 73.
- [6] 金普军, 秦颖, 胡雅丽, 等. 湖北九连墩楚墓出土青铜器钎

- 焊材料的分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(11): 37-40, 115.
- JIN P J, QIN Y, HU Y L, et al. Analysis of brazing materials for bronze ware unearthed in Chumu, Jiuliandun, Hubei [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(11): 37-40, 115.
- [7] 黄鹰航. 中国古代焊接技术的演进及社会影响因素分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- HUANG Y H. Evolution of ancient Chinese welding technology and analysis of social influencing factors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [8] 汪苏, 李晓辉, 白小梅, 等. 中国古代青铜器中焊接技术研究[C]//第五届中日机械技术史及机械设计国际学术会议. 日本 千葉, 2005: 28-33.
- WANG S, LI X H, BAI X M, et al. Research on welding technology in ancient Chinese bronzes [C]// Proceedings of the Fifth China-Japan International Conference on History of Mechanical Technology and Mechanical Design. Chiba-ken, Japan, 2005: 28-33.
- [9] 尹海洁, 黄鹰航. 中国古代青铜器铸焊技术探源[J]. 自然辩证法研究, 2018, 34(12): 106-113.
- YIN H J, HUANG Y H. A probe into the origin of ancient Chinese bronze casting and welding technology[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2018, 34(12): 106-113.
- [10] 尹海洁, 黄鹰航. 中国古代金银细金工艺钎焊技术的应用及影响[J]. 自然辩证法研究, 2019, 35(6): 78-83.
- YIN H J, HUANG Y H. Application and influence of ancient Chinese gold-silver fine-gold process brazing technology[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2019, 35(6): 78-83.
- [11] 王贺, 梅建军, 潘路, 等. 北周武帝孝陵铜锡焊料的科学发现与研究[J]. 文物, 2015(4): 76-86.
- WANG H, MEI J J, PAN L, et al. Scientific discovery and research on copper-tin solder in Xiaoling, Emperor Wu of the Northern Zhou Dynasty[J]. Cultural Relics, 2015(4): 76-86.
- [12] 胡飞, 秦颖, 曲毅, 等. 湖北大冶蟹子地遗址出土西周早期金属丝的初步科学分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(12): 76-79.
- HU F, QIN Y, QU Y, et al. Preliminary scientific analysis of early Western Zhou metal wires unearthed from the Xizidi site in Daye, Hubei [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(12): 76-79.
- [13] SCOTT D A. Metallography and microstructure of ancient and historic metals [M]. Los Angeles: Getty Publications, 1991.
- [14] 孙淑云, 梅建军. 中国古代铅锡焊料的分析[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 54-61.
- SUN S Y, MEI J J. Analysis of ancient lead-tin solder in China [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(1): 54-61.
- [15] 刘平, 龙郑易, 顾小龙, 等. 低温无铅焊料[J]. 电子工艺技术, 2014, 35(4): 198-200.
- LIU P, LONG Z Y, GU X L, et al. Low temperature lead-free solder [J]. Electronic Process Technology, 2014, 35(4): 198-200.
- [16] 周浩, 祝泓范, 蔡兰坤. 青铜器锈蚀结构组成及形态的比较研究[J]. 文物保护与考古科学, 2005(3): 22-27.
- ZHOU H, ZHU H F, CAI L K. Comparative study on the composition and morphology of corrosion in bronze [J]. Heritage Conservation and Archaeological Science, 2005(3): 22-27.
- [17] 宴德付, 秦颖, 孙升, 等. 湖北襄阳余岗、沈岗楚墓出土青铜器的检测分析[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2022(9): 101-105.
- YAN D F, QIN Y, SUN S, et al. Detection and analysis of bronzes unearthed from Chu tombs in Yugang and Shengang, Xiangyang, Hubei province [J]. Cultural Relic Identification and Appreciation, 2022 (9): 101-105.
- [18] 何堂坤, 王继红, 张宏礼. 军都山山戎墓地青铜铸造技术初步考察[C]//第六届中国少数民族科技史暨西夏科技史国际会议文集. 银川: 宁夏人民出版社, 2002: 48-60.
- HE T K, WANG J H, ZHANG H L. A preliminary investigation on the bronze casting technology of the Shanrong Cemetery in Jundu Mountain [C]// Proceedings of the 6th International Conference on the History of Science and Technology of Chinese Minorities and the History of Science and Technology in Xixia. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 2002: 48-60.
- [19] 苏荣誉, 华觉明, 李克敏, 等. 中国上古金属技术[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995: 321-324.
- SU R Y, HUA J M, LI K M, et al. Chinese ancient metal technology [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1995: 321-324.