

绛县横水西周 墓地青铜器的合金技术研究

□ 南普恒

一、前言

横水西周墓地位于山西省运城市绛县以西约 11 公里的横北村之北,南北约长 200 米,东西约宽 150 米,面积约 3 万平方米^[1]。2004~2006 年,山西省考古研究所等对其进行了考古发掘,出土西周鼎、簋、甗、盘、盃、鬲、觚、爵等铜礼乐器 180 余件。从铜器铭文、墓葬规模和随葬品级别可知,该墓地为西周时期偃国国君、夫人及其国人的墓地^[2]。

为探讨横水墓地青铜器的合金技术及其发展情况,采用 XRF 对部分青铜器的合金成分进行了检测分析,确定了其合金类型和元素特征,

并将分析结果与部分商周时期青铜器的合金技术进行了比较分析。

二、实验部分

2.1 研究方法

以切割面为测试面,首先将 59 件标本用砂纸打磨、超声波清洗,最后使用 EAGLE- μ XXL 型 EDXRF 对基体进行了成分检测。仪器参数为 40kV,100 μ A,Res 134.5,100s。

2.2 实验结果

2.2.1 青铜容器

由表 1 和图一至图三可知:青铜容器的合金以锡青铜^[3]为主,其次是低铅铅锡青铜,而类青铜

表 1 横水西周墓地青铜容器 XRF 分析结果

序号	器物编号	器物名称	采样部位	分析元素(wt%)					材质
				Cu	Sn	Pb	Fe	S	
01	JHM1013:34	鼎	底部	80.88	16.79	0.40	1.12	0.80	锡青铜
02	JHM1153:1	鼎	底部	87.03	10.22	0.74	0.50	1.50	锡青铜
03	JHM2021:7	鼎	底部	76.69	17.08	3.17	1.85	1.21	铅锡青铜
04	JHM2022:185	鼎	腹部	81.05	15.34	1.86	0.57	1.18	锡青铜
05	JHM2022:203	方鼎	底部	75.55	22.40	0.83	0.60	0.61	锡青铜
06	JHM2047:5	鼎	腹部	81.47	16.65	0.21	1.06	0.62	锡青铜
07	JHM2047:5	鼎	腹部垫片	90.36	6.81	0.21	1.45	1.17	锡青铜
08	JHM2056:35	鼎	底部	85.49	13.20	0.84	0.38	0.10	锡青铜
09	JHM3050:22	鼎	补铸处	88.42	1.86	7.26	0.87	1.58	铅青铜
10	JHM3207:6	鼎	足部	78.90	20.04	0.42	0.32	0.32	锡青铜
11	JHM3258:7	鼎	足部	72.92	23.09	3.08	0.22	0.70	铅锡青铜
12	JHM3280:1	鼎	底部	85.34	11.53	0.80	0.84	1.49	锡青铜
13	JHM1013:29	簋	耳部铸缝	97.15	1.24	1.09	0.12	0.39	类青铜或纯铜
14	JHM2034:6	簋	底部	74.24	23.59	0.26	1.24	0.68	锡青铜
15	JHM2047:18	簋	腹部	76.21	18.66	3.00	0.79	1.33	铅锡青铜
16	JHM2055:54	方座簋	方座	78.05	16.91	4.09	0.14	0.82	铅锡青铜
17	JHM2082:8	簋	底部	74.93	18.55	3.78	1.28	1.45	铅锡青铜
18	JHM2158:148	簋	耳部	74.00	19.77	4.07	0.74	1.42	铅锡青铜

19	JHM2158:149	簋	腹部	73.60	24.49	0.75	0.36	0.80	锡青铜
20	JHM2165:63	簋	腹部	78.52	15.69	2.87	1.55	1.37	铅锡青铜
21	JHM3098:5	簋	耳部	76.61	16.85	4.78	0.30	1.46	铅锡青铜
22	JHM1011:64	甗		79.22	18.17	1.01	0.83	0.76	锡青铜
23	JHM2021:5	甗		87.45	11.79	0.58	0.14	0.04	锡青铜
24	JHM3250:48	甗		80.62	13.94	4.51	0.12	0.81	铅锡青铜
25	JHM1011:59	盘	腹部	77.25	19.89	1.19	0.99	0.68	锡青铜
26	JHM2165:58	盘	腹部	75.34	18.71	3.16	1.27	1.51	铅锡青铜
27	JHM3250:38	盘	腹部	86.41	9.52	3.39	0.08	0.61	铅锡青铜
28	JHM1013:20	尊	底部	89.18	7.28	2.47	0.10	0.98	铅锡青铜
29	JHM3250:47	尊	腹部	79.14	17.18	2.57	0.54	0.58	铅锡青铜
30	JHM2531:13	提梁卣	盖部	73.74	25.39	0.43	0.24	0.56	锡青铜
			腹部	74.95	24.18	0.44	0.31	0.13	锡青铜
			提梁兽头	72.30	26.68	0.51	0.25	0.26	锡青铜
31	JHM3250:54	提梁壶	盖部	74.61	21.25	2.92	0.09	1.13	铅锡青铜
32	JHM1011:62	觚	口沿	78.81	19.64	1.31	0.16	0.07	锡青铜
33	JHM3250:37	觶	腹部	84.94	13.00	1.70	0.10	0.27	锡青铜
34	JHM2021:27	盃	底部	82.81	16.35	0.26	0.26	0.31	锡青铜
35	JHM2606:1	鉴	底部	79.96	17.80	1.79	0.11	0.34	锡青铜
36	JHM2165:117	鬲	腹部	72.05	21.35	5.15	0.67	0.77	铅锡青铜

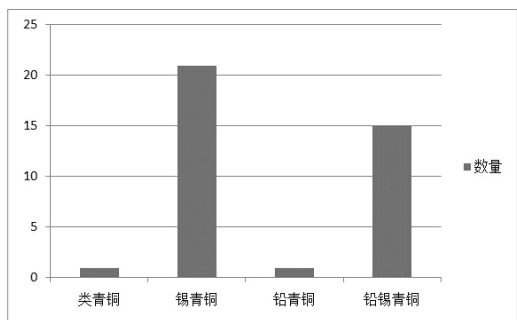
或纯铜及铅青铜则相对较少,基本不被使用;合金的锡含量多处于中高区域,特别是10%~20%的中等含量区域;此外,低铅是其最显著的合金特色。

2.2.2 青铜兵器

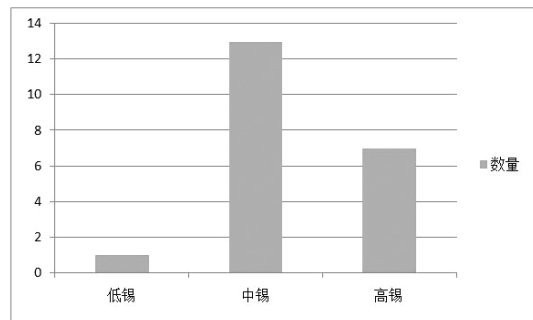
从表2及图四至图六可以看出,青铜兵器的合金特点是主要使用高锡锡青铜及低铅中锡的铅锡青铜,基本不使用类青铜或纯铜或铅青铜。

2.2.3 青铜工具

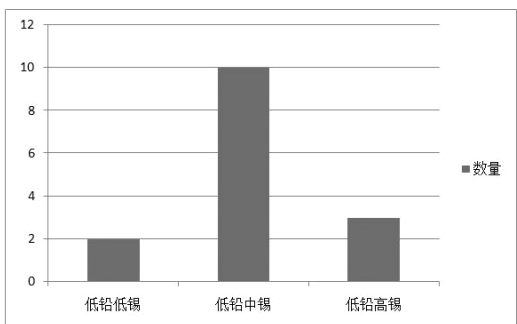
青铜工具样品仅有3件,其合金数据很难反



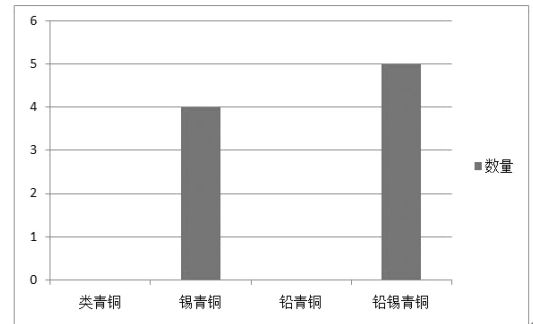
图一 容器合金成分分类统计直方图



图二 容器锡青铜合金分类统计直方图



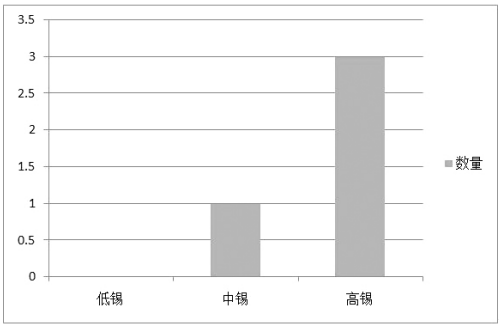
图三 容器铅锡青铜合金分类统计直方图



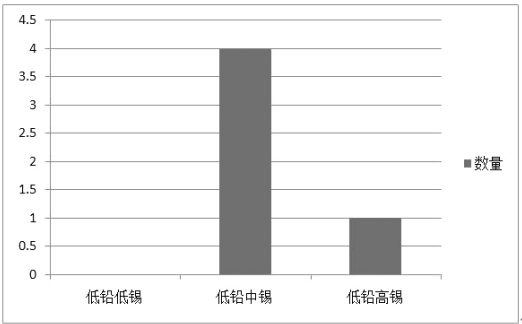
图四 兵器合金分类统计直方图

表 2 横水西周墓地青铜兵器 XRF 分析结果

序号	器物编号	器物名称	采样部位	分析元素(wt%)					材质
				Cu	Sn	Pb	Fe	S	
37	JHM1008:67	铜戈	刃部	74.81	19.47	4.28	0.24	1.20	铅锡青铜
38	JHM1016:34	铜戈	尖部	72.79	25.73	0.95	0.15	0.38	锡青铜
39	JHM1106:2	铜戈	刃部	72.71	22.65	3.16	0.22	1.27	铅锡青铜
40	JHM2001:17	铜戈	刃部	76.03	20.55	0.50	1.56	1.36	锡青铜
41	JHM2061:7	铜戈	刃部	84.36	10.76	4.59	0.16	0.13	铅锡青铜
42	JHM2167:7	铜戈	刃部	72.03	18.26	7.88	0.06	1.77	铅锡青铜
43	JHM2049:10	铜刀	刃部	81.64	15.54	1.42	0.55	0.85	锡青铜
44	JHM2064:35	铜刀	刃部	78.66	20.60	0.34	0.23	0.16	锡青铜
45	JHM2058:2	铜矛	刃部	76.73	17.85	4.15	0.39	0.88	铅锡青铜



图五 兵器锡青铜合金成分分类统计直方图



图六 兵器铅锡青铜合金成分分类统计直方图

表 3 横水西周墓地青铜工具 XRF 分析结果

序号	器物编号	器物名称	采样部位	分析元素(wt%)					材质
				Cu	Sn	Pb	Fe	S	
46	JHM1006:155	铜凿	刃部	76.61	19.01	2.71	0.55	1.11	铅锡青铜
47	JHM1011:178	工具柄	残断处	74.53	23.31	0.34	1.15	0.67	锡青铜
48	JHM2058:24	铜斧	刃部	81.37	17.7	0.27	0.46	0.2	锡青铜

表 4 横水西周墓地青铜车马器 XRF 分析结果

序号	器物编号	器物名称	分析元素(wt%)					材质
			Cu	Sn	Pb	Fe	S	
49	JHM1006:158	铜马面	76.81	20.37	0.54	1.43	0.85	锡青铜
50	JHM1008:31	铜饰件	90.16	6.66	2.24	0.37	0.56	铅锡青铜
51	JHM1011:15	车饰件	83.82	15.14	0.52	0.25	0.27	锡青铜
52	JHM1013:53	铜马镳	94.03	4.53	1.14	0.10	0.20	锡青铜
53	JHM1016:98	铜銮铃	75.76	22.94	0.66	0.24	0.40	锡青铜
54	JHM1016:133	铜兽面	77.54	18.44	2.04	1.08	0.90	铅锡青铜
55	JHM2022:130	铜泡	84.06	15.52	0.21	0.15	0.08	锡青铜
56	JHM2022:150	方形铜泡	80.96	17.80	0.69	0.34	0.22	锡青铜
57	JHM2022:152	马冠	78.64	20.02	0.68	0.21	0.45	锡青铜

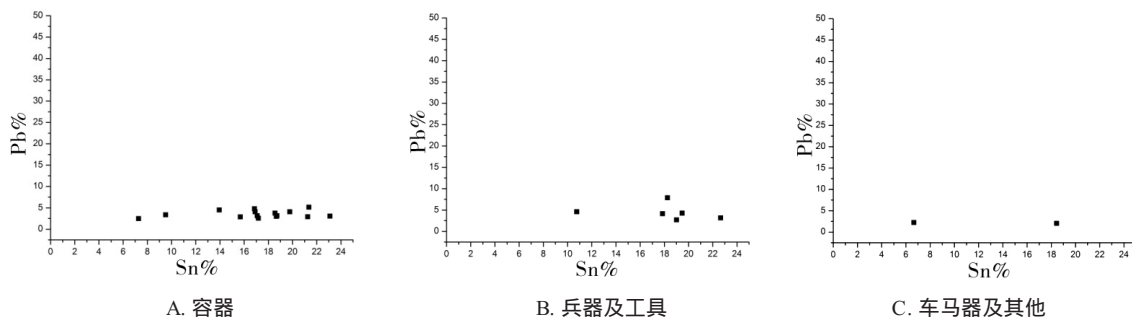
映此类器物合金类型全貌,仅就以上数据,可以看出,此类器物主要使用含锡中等的锡青铜和低铅中锡的铅锡青铜,不见铅青铜和类青铜或纯铜制品(见表 3)。

2.2.4 车马器

从表 4 可以看出,车马器的合金大多使用含锡量中等的锡青铜,较少使用低铅铅锡青铜,基本不使用铅青铜。因而,低铅,含锡中等是其主要

表5 锡青铜合金锡含量范围及器物数量统计表

类别	含锡量				器物数量
	最小值	最大值	集中区域	平均值	
容器	6.81%	26.8%	10~25%	17.80%	21
兵器及工具	15.54%	25.73%	17~23%	20.57%	6
车马器及其他	4.53%	22.94%	15~20%	16.62%	7



图七 横水西周墓地青铜器铅锡青铜锡、铅元素含量散点图

合金特色。

三、横水墓地青铜器合金技术

3.1 合金类型

综合以上分析,可将横水墓地青铜器的合金类型及特点概括如下:

(1) 锡青铜,34件,占总样品量58%。锡含量范围4.53~26.68%,多集中于11~26%之间,平均18.05%。兵器、工具则多集中于20%以上,容器及车马器则多集中于20%以下。整体来看,兵器和工具含锡量略高于容器及车马器。

(2) 铅锡青铜,23件,占总样品量40%。锡含量范围6.66~23.09%,多集中于10~20%之间,少量容器和1件兵器在20%以上,平均16.91%,铅含量范围2.47~7.88%,集中于2~5%之间,平均3.65%,均属低铅铅锡青铜。

(3) 铅青铜,1件,占总样品量1%,含铅7.26%。

(4) 类青铜或纯铜,1件,占总样品量1%,含铜97.15%、锡1.24%、铅1.09%。

(5) 如图八所示,容器类,主要为锡青铜,其次是占有一定比例的铅锡青铜;兵器及工具类,主要为锡青铜及铅锡青铜;车马器,主要为锡青铜,铅锡青铜较少,不见铅青铜。

可见,此批青铜器的合金以含锡量中等的锡

青铜为主,同时低铅铅锡青铜也占有相当大的比例,两者是青铜合金的主流。仅就以上材料而言,二者中锡青铜略多一些。此外,还存在少量的铅青铜和类青铜或纯铜器。

3.2 合金性能

如前所述,横水墓地青铜器合金类型以锡青铜和低铅铅锡青铜为主,类青铜或纯铜和铅青铜制品较少。现仅就锡青铜和铅锡青铜合金性能分析如下:

3.2.1 锡青铜

锡青铜样品共34件,容器21件,兵器及工具6件,车马器及其他7件,含锡量详见表5。

随着锡含量增加,锡青铜硬度和强度会逐渐提高。相对容器和车马器,兵器和工具由于使用功能的需要,要求具备较好的机械性能,而较高含锡量比较符合其功能需求。这说明,此时期已能够根据器类的需要配置不同的合金原料。

3.2.2 铅锡青铜

铅锡青铜样品共23件,容器15件,兵器及工具6件,车马器及其他2件,其铅、锡含量范围详见图七。

由铅锡青铜合金的抗拉强度、布氏硬度及延伸率曲线^[4]可知,随着铅含量增加,合金强度、硬度等机械性能均大为降低。现代金属学研究也表明,铅可降低锡青铜摩擦系数,改善耐磨性能,提

表6 铅锡青铜锡、铅含量范围及器物数量统计表

类别	锡含量				铅含量				器物数量
	最小值	最大值	集中区域	平均值	最小值	最大值	集中区域	平均值	
容器	7.28%	23.29%	10%-21%	17.05%	2.47%	5.15%	2%-5%	3.53%	15
兵器及工具	10.76%	22.65%	17%-20%	18%	2.71%	7.88%	2%-5%	4.46%	6
车马器	6.66%	18.44%		12.55%	2.24%	2.05%		2.14%	2

高可切削性能,但使合金力学性能下降,对合金性能影响较大^[5]。如果仅就机械性能而言,高铅含量合金,使用性能较差,实用价值较低。但由于古代铅矿资源相对丰富,相对较易获取,因而也常用于代替锡料以降低成本,此类器物也大部分当做明器使用。

此外,由于铅一般不溶于铜或铜的化合物,在合金中呈游离态存在,因而在器物的浇铸过程中,会强烈割裂铜的组织结构,从而提高了铜液的流动性和充型性能,有助于纹饰细腻复杂的容器成功浇铸^[6]。再者,铅的熔点较低,一般在青铜熔液中最后凝固,有利于在合金凝固的最后阶段填补枝晶间的空隙,这些都有利于大件及厚薄不均的容器成功浇铸。所以部分中低锡含量的铅锡青铜中所添加的低含量的铅,大多是处于此种考虑。

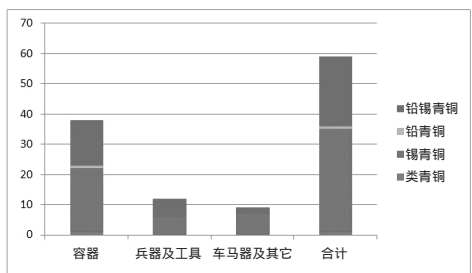
从表6可以看出,其锡含量多处于中等范

围,机械性能均较好,兵器及工具锡含量略高于容器,基本符合不同器类功能的需要。相对而言,铅含量则均在5%以内,属低铅范围。可见,此种低铅中锡的合金配比,并非是处于节省锡料降低成分的考虑,更主要是为了保证机械性能前提下增加合金熔液的流动性,以提高其充型能力,进而使器物纹饰更加清晰,外形更加规整。

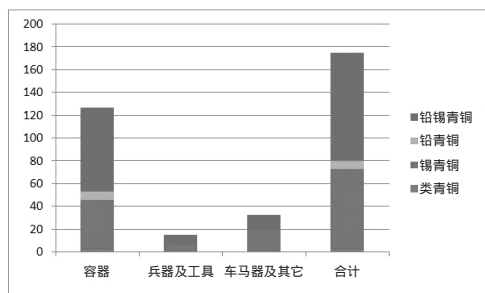
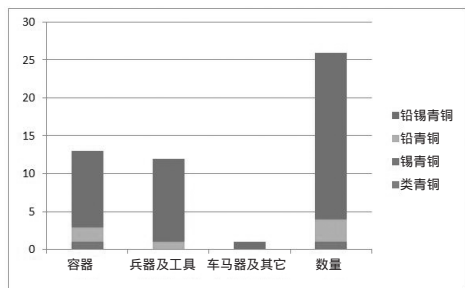
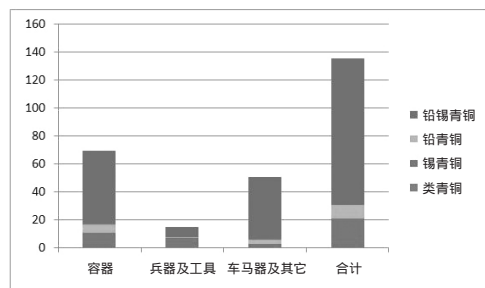
四、讨论

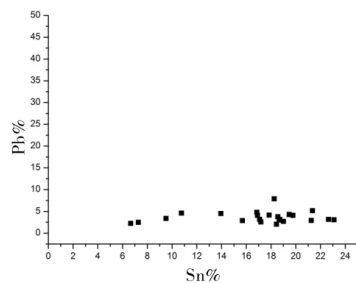
4.1 西周青铜器合金技术

目前,关于西周青铜器合金技术较系统的研究成果主要有晋侯墓地、陈家坡墓地及强国墓地的数据。但由于样品腐蚀,发表的数据很多总量偏低,不到90%,这显然影响了对其合金类型的整体认识。为尽可能客观的认识其合金面貌,仅对总量超过90%的数据进行了统计,结果详见图九至图一一。

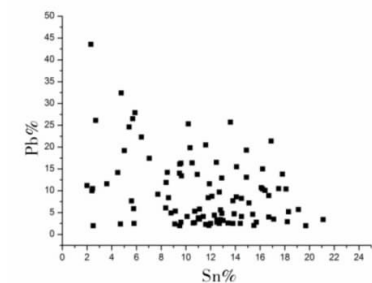


图八 横水墓地青铜器合金类型直方图

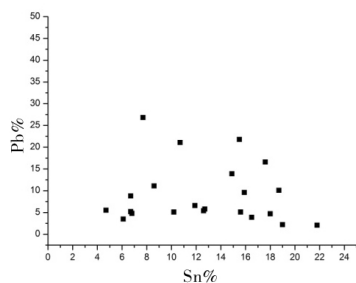
图九 晋侯墓地青铜器合金类型直方图^[7]图一〇 张家坡墓地青铜器合金类型直方图^[8]图一一 强国墓地青铜器合金分类直方图^[9]



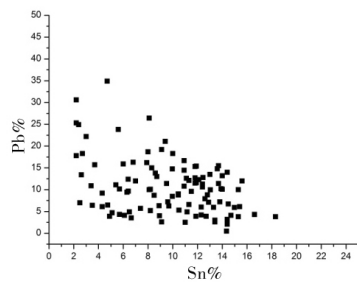
A. 横水墓地



B. 晋侯墓地



C. 张家坡墓地



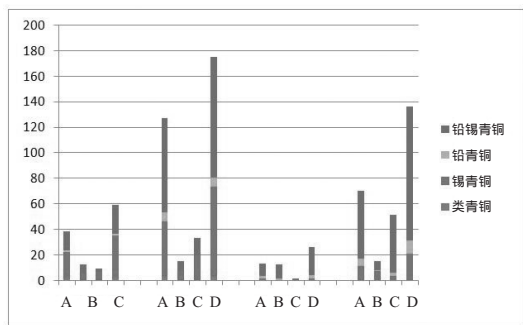
D. 强国墓地

图一二 西周青铜器铅锡青铜铅锡元素含量散点图

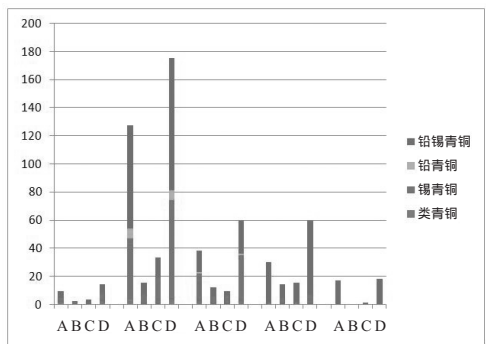
从图八至图九可知,虽然晋侯墓地、强国墓地、张家坡墓地及横水墓地青铜器合金类型均以锡青铜和铅锡青铜为主,但其各类合金的比例差异仍然十分明显。相对而言,横水墓地青铜器中锡青铜比例高于铅锡青铜,铅青铜则较少,其低铅特征十分显著。晋侯墓地青铜器中,铅锡青铜占主体地位,比例高于锡青铜,铅青铜数量则多于横水墓地青铜器。而张家坡墓地青铜器,铅锡青铜比例远远高于锡青铜,锡青铜数量则相对较少。

此外,从铅锡青铜含铅量的范围(图一二)也可以看出,横水墓地与其他三处墓地青铜器含铅量差异明显。横水墓地铅锡青铜含铅量主要集中于5%以下,最大值7.88%,平均值仅为3.65%,远低于其他三处墓地青铜器。

值得注意的是,晋侯墓地个别铅锡青铜含铅高达43.54%,而其含锡却仅2.31%。如此高铅含量的铅锡合金,基本不具备使用性能,因而其可能作为明器使用,高含量的铅是为减少锡料消耗而添加的。可见,晋侯墓地中铅的使用已经非常



A. 容器 B. 兵器及工具 C. 车马器及其它 D. 总样品数量

图一三 西周青铜器合金类型直方图
(四处墓地依次为横水、晋侯、张家坡、强国)

A. 容器 B. 兵器及工具 C. 车马器及其它 D. 总器物数

图一四 山西西周青铜器合金类型直方图^[10]
(五处墓地名称依次为灵石、晋侯、横水、分水岭、崔家河)

普遍,张家坡墓地铅锡青铜占有绝对优势,远高于横水墓地和晋侯墓地,略高于虢国墓地,铅锡合金也高于其他墓地。综合多种因素,较之晋侯墓地和虢国墓地,其铅的使用更加广泛。

从图一三不难看出,西周时期,各地区青铜器合金成分的差异是非常明显的,这种差异集中体现在铅青铜和铅锡青铜的比例,特别是铅锡青铜在各自青铜合金中的比例及含铅器物铅含量的高低之上。

4.2 山西商周青铜器合金技术

由图一四可以看出,旌介商墓青铜器的合金类型与横水墓地较为接近,皆以锡青铜和铅锡青铜为主,锡青铜比例略高于铅锡青铜,且均发现有少量类青铜或纯铜器。但横水墓地青铜器中有少量铅青铜器物,与旌介商墓略有不同,晋侯墓地青铜器合金类型也是以锡青铜和铅锡青铜为主,不同的是,其铅锡青铜的比例要高于锡青铜,与横水墓地差异明显。此外,晋侯墓地青铜器中有较多的铅青铜器物,其比例略高于横水墓地,分水岭东周墓地和崔家河春秋晚期墓地青铜器中铅锡青铜占有绝对的数量,与横水墓地青铜器差异极为显著。

综上所述,不难看出:商时期,旌介商墓青铜器的合金元素值较低,表现出低锡、低铅的特点,三元铅锡青铜占有一定的比例;西周时期,横水墓地青铜器用铅量变化不大,合金也表现出低铅的特点,但锡含量却明显增加。晋侯墓地青铜器,锡含量变化不大,但铅锡青铜和铅青铜比例却有所增加,铅含量也随之增加。如前所述,青铜合金的强度、硬度和使用性能会随着锡含量的增加而提高。因而,中等锡含量的合金中加入较低或中等含量的铅,不仅是为了降低熔点,更主要是为了在保持使用性能的前提下增加合金熔液的流动性,增加铸液的充型性能,以便纹饰繁缛器物的成功铸造。至于少量高铅低锡合金,高含量铅则主要是为了节省锡料,降低成本,部分器物甚至可能作为明器使用。这一现象说明此时期已掌握了青铜合金配比的规律,技术上已臻于成熟;到了东周时期,分水岭墓地和崔家河墓地青铜器铅锡青铜的使用比例大量增加,占到绝对的数量。较之西周时期,其铅、锡量变化不大,

锡含量仍多集中于10~20%的中等范围,而铅含量范围则相对较大,低铅、中铅及高铅含量均有。这一现象说明,铅的各种用途均有使用,技术上更加成熟和完善。

五、小结

1. 锡青铜和低铅铅锡青铜是横水墓地青铜器的主流合金,锡青铜比例略高于铅锡青铜,两者在青铜合金中占主要地位,起主导作用。此外,低铅是其青铜合金最显著的特色。

2. 西周时期,不同区域墓葬的青铜器合金面貌均不相同,差异主要体现在铅锡青铜和铅青铜的比例及其含铅量高低之上,即使地理位置接近的晋侯墓地与横水墓地,其青铜合金技术也相去甚远,此差异与其各自不同的区域文化有关。

3. 从旌介商墓、晋侯墓地、横水墓地、分水岭墓地及崔家河墓地青铜器的合金类型结构上,可以清晰的看到一条自商代至东周,青铜合金由锡青铜为主逐渐发展至铅锡青铜为主,含铅器物使用逐渐增多,技术逐渐成熟的发展路线。

致谢:本研究受到山西省科技攻关计划项目(农业与社会发展)20100312040专项资助,特致谢忱。

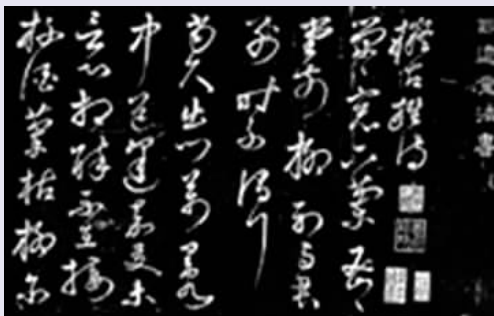
[1] a. 山西省考古所、运城文物工作站、绛县文化局《山西绛县横水西周墓地》,《考古》2006年第7期18页; b. 国家文物局《2005中国重要考古发现》,北京:文物出版社,2006年,72页。

[2] 国家文物局《2006中国重要考古发现》,北京:文物出版社,2007年4月,56-59页。

[3] 为便于对比,以2%为标准对合金种类进行划分,具体为:类青铜或纯铜,合金元素主要是铜,其他均<2%;锡青铜,合金元素主要是铜和锡,含量均≥2%;其他均<2%;铅青铜,合金元素主要是铜和铅,含量均≥2%;其它均<2%;铅锡青铜,合金元素主要是铜、锡和铅,元素含量均≥2%。合金中锡、铅元素含量的高低采用以下标准:10%>含量≥2%,视为低含量;20%>含量≥10%视为中等含量;含量≥20%,则视为高含量。以下同。

[4] W.T.Chase.Ternary Representation of Ancient Chinese Bronze Compositions[J].American Chemical Society,Advances in Chemistry Series,1978:171.

(下转7页)



图一〇。千字文

石刻馆在收藏南涅水石刻的同时,还珍藏着东晋学者陶渊明手书“拟古杂诗”十二首玉石石刻。清乾隆六年,沁州人张孝捏任监察御史巡视江南时,欣得陶渊明亲笔撰写的《拟古杂诗》12首,遍访名工以“致远堂法书”为题镌刻于玉石之上。后广为拓印,远销英、美、法等国。另两块是阅者的题跋,有沈约、狄仁杰的题字。尤为吸引人的是武则天的题词共82字,一气呵成,还加盖了她“凤阁之宝”、“凤阁审定真迹”印玺,还有名士常熟人钱谦益观后加盖的“虞山老樵”印章。

石刻馆中还陈列着康熙御书石刻。清康熙四十二年前后,康熙帝把自己临摹的宋朝书法家米

芾的《千字文》,连同他本人撰写的前言等,赐予了当时的保和殿大学士兼刑部尚书吴琬。吴亲自选购汉白玉,访名工将其镌刻后珍藏。吴去世后其子吴时谦在沁县城吴氏祠堂后建“宸翰楼”一座,将全部石刻嵌在楼内墙壁上,后来又改名为御书楼。石刻馆中院大殿陈列的是从御书楼的墙壁上拓下来的拓片。康熙皇帝的手书碑刻48通,每通高35厘米,宽100厘米,大小均等。共存有康熙皇帝字迹1246个,笔势深得米芾“风墙阵马,沉着痛快”的书法真传(图一〇)。这些题刻使用了五方特备印章,其间分别附有康熙的自用“康熙宸翰”、“敕几清晏”、“稽古右文”、“龙天主人”和“康熙御笔之宝”等五方特备印章。字数之多,为全国所罕见。

总之,沁县南涅水石刻馆馆藏丰富,文物价值颇高,在开馆二十多年来,许多专家学者、佛教信徒,不远千里前来欣赏。石刻馆以它独有的魅力,展现于世人面前。

(作者工作单位:山西省沁县文物馆)

(上接14页)

[5] 郭凯旋《铜和铜合金牌号与金相图谱速用速查及金相技术创新应用指导手册》,北京:中国知识出版社,2005年,913页。

[6] 苏荣誉等《中国上古金属技术》,济南:山东科学技术出版社,1995年,282页。

[7] 共统计了175件铜器数据,数据详见:赵国华等《天马曲村遗址青铜器样品检测报告》,《天马·曲村(1980-1988)》附录四,北京:科学出版社,2000年,1172-1173页;刘煜等《天马·曲村周代晋国墓地出土青铜器锈蚀研究》,《文物保护与考古科学》2000年第2期,9-17页;杨颖亮《晋侯墓地出土青铜器的合金成分、显微结构和铅同位素比值研究》,北京大学,2005年,20-22页。

[8] 共统计了26件铜器数据,数据详见:杨军昌《陕西关中地区先周和西周早期铜器的技术分析与比较研究》,北京科技大学,2002年,160-161页。

[9] 共统计了136件铜器数据,数据详见:苏荣誉等《国墓地青铜器铸造工艺考察和金属器物检测》,《宝鸡国墓地》,北京:文物出版社,1988年,630-636页。

[10] 数据详见:海金乐等《灵石旌介商墓》,北京:科学出版社,2006年,209-228页;韩炳华等《山西长治分水岭东周墓地出土青铜器的科学分析》,《考古》2009年第7期,80-88页;柴建国《崔家河墓地出土青铜分析》,山西大学,2007年,26-27页。

(作者工作单位:山西省考古研究所)