

# 虢国墓地出土铁刃铜器的科学分析及相关问题\*

魏强兵(北京科技大学科技史与文化遗产研究院 博士研究生)  
李秀辉(北京科技大学科技史与文化遗产研究院 副教授)  
王鑫光(河南省文物考古研究院 馆员)  
陈建立(北京大学考古文博学院 教授)

DOI:10.13619/j.cnki.cn11-1532/k.2022.08.002

河南三门峡虢国墓地是一处保存完整的西周晚期到春秋早期的大型邦国公墓。两次考古发掘出土了大量的青铜器、玉器、金器等,其中虢季墓(M2001)和虢仲墓(M2009)两座国君墓均出土数件铁刃铜器。韩汝玢<sup>[1]</sup>和陈坤龙等<sup>[2]</sup>的检测结果表明,这批铁刃铜器是迄今为止中原地区发现较早使用人工冶铁的实物例证之一。

中原地区商周时期发达的青铜冶铸业是其他地方无法替代的。在这样的背景下,在商代中晚期的藁城台西和平谷刘家河出现了陨铁制品。西周晚期的虢国墓地,在延续使用陨铁制品的同时,出现了块炼铁和块炼铁渗碳钢制品,随后在春秋早期的曲沃天马一曲村出现了液态的生铁过共晶白口铸铁残片,表明中原地区的冶铁技术发展脉络是陨铁到块炼铁,再到生铁和块炼铁并存。白云翔认为,中原冶铁技术的起源应该在豫西、晋南、关中一带,这一

地区处于西周王朝的中心统治区,并且西周晚期和春秋早期的铁器集中在这一带,铁器的花纹及形制与当时的青铜器相同,没有发现外来因素,说明这些铁器为本地制作<sup>[3]</sup>。

而中原地区的虢国墓地发现陨铁和人工冶铁制品同时并存,可能处于该地区发明或者掌握冶铁技术的初级阶段,人工冶铁制品尚未完全取代陨铁制品,对该墓地出土铁制品形制和制作技术的综合考察,对于研究中原地区冶铁技术的起源和发展意义重大。

## 一 样品描述及分析方法

铁刃铜矛(M2009:733)锈蚀严重,铜骹部分保存较为完整(图一),上嵌绿松石,铁刃部分完全锈蚀,以至于在出土后未被确认为铁刃铜器,在该墓地铜器取样分析时,发现此器物为铁刃铜器,根据器件残存部分推测,可能为铁

\* 本研究得到国家社会科学基金重大项目“先秦时期中原与边疆地区冶金手工业考古资料整理与研究”(项目编号:17ZDA219)、国家重点研发计划项目“馆藏脆弱青铜器保护关键技术研究”(2020YFC1522002)及河南省文物考古研究院“三门峡虢国墓地 M2009 虢仲墓出土铜礼器制作技术研究”课题的支持。

刃铜矛。样品取自墓葬 M2009,从已发表的资料来看,墓主人为西周晚期到春秋早期的虢国国君虢石父(虢公鼓)<sup>[4]</sup>。为全面了解铁刃铜矛的材质及制作工艺,将取自骹刃结合处的三个样品全部进行镶样分析,以便获得较全面的信息。

由于保存环境的影响,古代铁刃铜器绝大多数铁质部分锈蚀无残留金属,造成分析和鉴定困难。铁器在土壤埋藏环境中,锈蚀过程比较复杂,微观组织中不同的相由于电位差的不同而引起锈蚀速率的不同,其中一些相优先腐蚀,而另一些相腐蚀速度相对较慢,从而可能形成与原组织相对应的锈蚀产物,并在锈蚀中保留有原组织痕迹。另外铁器中的夹杂物一般不会因铁器的锈蚀而发生改变,从而可以根据锈蚀中残留的夹杂物形貌并结合其元素组成分析推断其材质与制作工艺<sup>[5]</sup>。

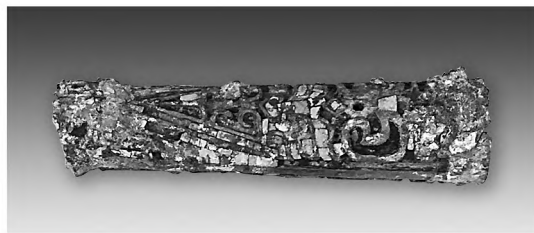
对于年代较早的铁刃铜器,判断铁质部分是陨铁还是人工冶铁尤为重要。20世纪70年代,经过分析发现藁城铁刃铜钺中没有人工冶铁所含的大量夹杂物,尽管经过锻造和长期风化,铁刃中保留有镍、钴的层状分布,分层的高镍偏聚,这种特点只能发生在冷却极为缓慢的铁镍天体中,从而推定其为陨铁。这一经典案例为判别古代铁制品是陨铁还是人工冶铁提供了思路与方法<sup>[6]</sup>。

选取合适的分析截面进行切割取样,经过镶样、打磨、抛光后,采用中国国家博物馆文物保护中心的 Zeiss LSM700 型激光共聚焦显微镜进行金相组织观察并拍照。考虑到样品锈蚀严重,采用北京科技大学科技史与文化遗产研究院的基恩士 VHX-900 超景深三维视频显微镜对样品进行锈层观察。采用北京科技大学科技史与文化遗产研究院 VEGA3XMU 型号扫描电子显微镜,配置德国 Bruker NanoGmbh 610M 型号 X 射线能谱仪对样品有关物相成分进行分析,分析设定电压为 20kV,工作距离 15 毫米。

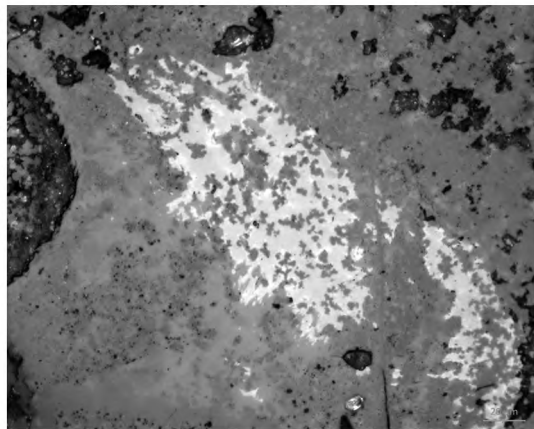
## 二 实验结果与分析

### (1) 显微组织结构观察及判定

通过金相显微组织观察,样品 TT-1 铁质



图一 虢国墓地出土铁刃铜矛(M2009:733)



图二 TT-1 金相组织图(x500)



图三 TT-1 三维视频显微图

部分锈蚀严重,较亮区域为含铁较高的铁锈氧化物(图二),浸蚀前后都未能观察到夹杂物及铁的相关组织。TT-1 样品从三维视频显微图上可以看出明显的分层锈蚀现象(图三),具体成因待考。从 TT-2 样品的金相组织(图四)和背散射电子图(图五)中能明显看到铜质部分与铁质部分的分界线,此处应是铁刃与铜柄的结合处。从样品 TT-2、TT-3 未完全锈蚀的铜质部分能看到局部  $\alpha$  相优先腐蚀,残留( $\alpha+\delta$ )

表一 铁刃铜矛 SEM-EDS 分析结果

	扫描方式	成分分析结果 (wt%)												
		Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ti	Fe	Cu	Sn	Pb	
TT-2 铁质成分	锈层 基体 面扫	面扫 1	0.1	0.1	0.3	1.7			0.1	78.5	17.7		1.4	
		面扫 2	0.3	0.5	0.5	0.4				75.4	19.0		3.9	
		面扫 3			0.7	0.5	0.4			0.1	72.6	15.6		10.1
	夹杂物 分析	扫描 1	2.4		9.8	0.6	1.3	0.5		0.2	85.2			
		扫描 2			9.9	0.9	2.0		1.7	0.5	85.0			
		扫描 3	3.1	0.2	13.9	1.3	1.5	0.1		0.7	79.2			
		扫描 4	11.3	0.1	10.1	0.2	1.8	0.1			76.3			
		扫描 5	3.4		13.4	0.6	2.7				79.9			
		扫描 6	3.0		9.5	1.8	1.3	0.2	1.8		82.4			
		扫描 7			6.1	1.0	2.2		1.8		88.8			
TT-3 铜质部分 成分	基体 扫描	面扫 1					2.2				75.9	19.3	4.8	
		面扫 2					2.7				78.3	18.4	3.3	
		面扫 3					2.4				77.4	18.4	4.1	
		平均					2.4				77.2	18.7	4.1	

共析体(图六),从样品 TT-3 的金相照片中可看出铜质部分 α 树枝晶组织偏析明显(图七),故铜质部分为铸造组织。

由于铁质样品锈蚀严重,金相显微镜无法观察到铁的金相组织。铁锈蚀后微观组织中不

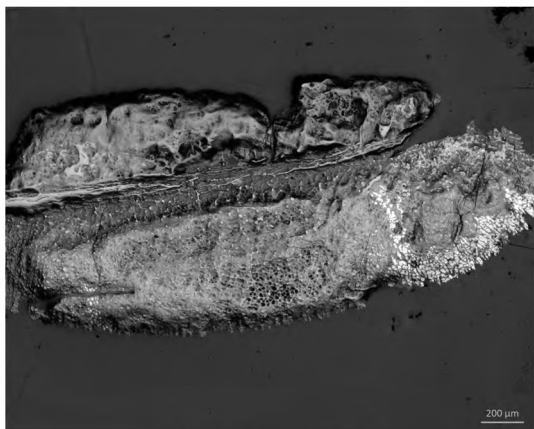
同的相由于电位差的不同而引起锈蚀速率的不同,其中一些相优先腐蚀,而另一些相腐蚀速度相对较慢,从而可能形成与原组织相对应的锈蚀产物,并在锈蚀中保留有原组织痕迹<sup>[7]</sup>,用扫描电子显微镜可看到疑似珠光体锈蚀后留下的组织(图八)。

(2)成分及材质分析

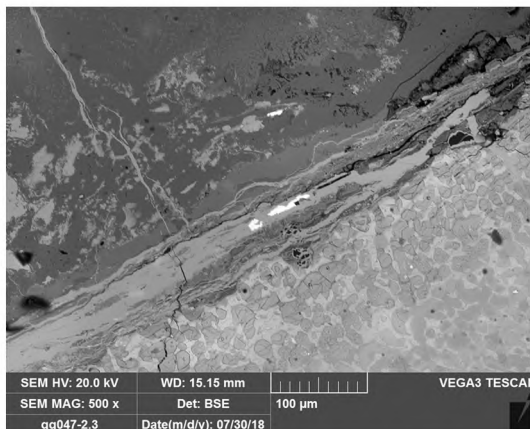
铁刃铜矛材质及夹杂物扫描电子显微镜能谱分析结果如表一所示。对样品 TT-1、TT-2 铁质部分锈层进行面扫描成分分析,未发现镍和钴元素的分布。通过 TT-1 铁质样品背散射图(图九)可以发现,在凹陷处局部存在球状物,部分被一层壳包裹住,通过成分分析发现,球状物主要成分为铁的锈蚀产物,含有少量的铜,壳状物主要成分为铜的锈蚀产物,含少量的铁。在长期的埋葬过程中,发生了

铁与铜的化学腐蚀,铁和铜有良好的导电性,由于铁比铜活泼,从而形成原电池,加速了铁的腐蚀,本来铁在地下埋藏的过程中容易发生腐蚀,铜铁复合器的铁质部分锈蚀得更严重。

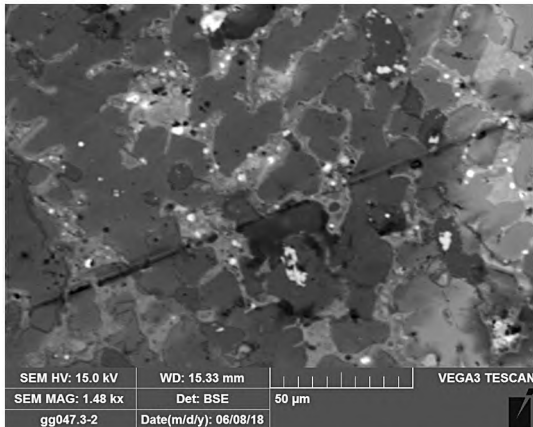
在古代铁制品中铝、镁、钾、钙元素应是在



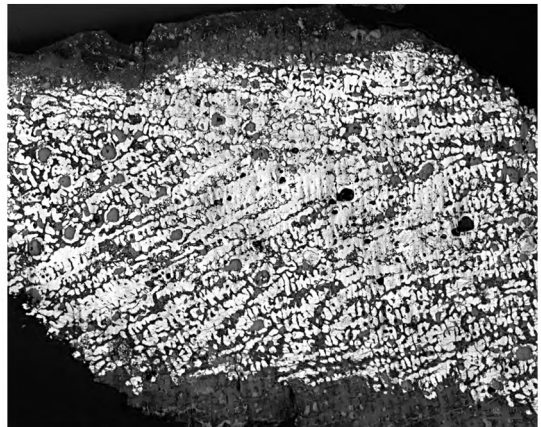
图四 TT-2 金相组织图(x50)  
(上部分为锈蚀的铁质部分,下部分为铜质部分)



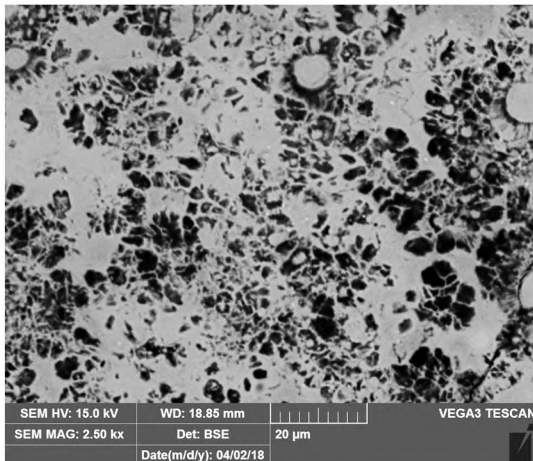
图五 TT-2 背散射电子图  
(上部分为锈蚀的铁质部分,下部分为铜质部分)



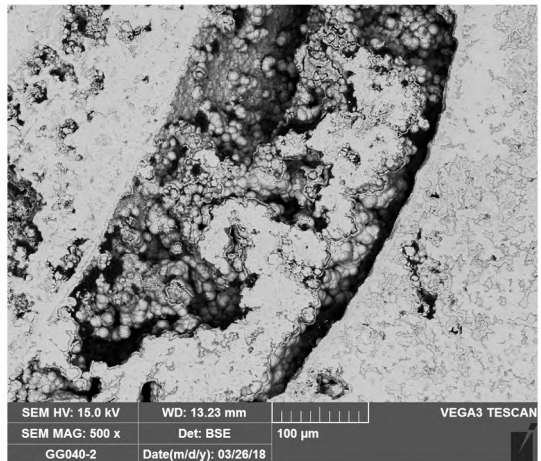
图六 TT-2 铜质背散射图片(共析体)



图七 TT-3 铜质部分金相组织图(x50)(未浸蚀)



图八 TT-1 背散射电子图像



图九 TT-1 背散射图像(铁的颗粒状锈蚀产物)

人工冶铁工艺中因接触炉壁等带入的元素, 钛、锰等元素是由矿石带入的<sup>[9]</sup>。对样品 TT-2 铁质部分夹杂物成分分析发现(图一〇;表一), 含有硅、钙、钾、铝等杂质元素, 铝相对于其他杂质元素含量较高, 这些杂质元素可能是人工冶铁过程中带入的。经过对该件铁刃铜矛的铁质部分成分分析, 锈层及夹杂物中不含镍和钴。陨铁一般含镍<sup>[9]</sup>, 从这些分析来看, 排除陨铁的可能。经过显微组织的观察及判定, 存在着疑似锈蚀后的珠光体组织, 据此判定该件铁刃铜矛的铁质部分应为人工冶铁, 不是陨铁。铜质部分成分分析结果表明其为铅锡青铜, 含较多的硫化物夹杂。

### 三 实验结果与讨论

通过分析可知, 虢国墓地出土的铁刃铜矛

(M2009: 733)铁质部分为人工冶铁, 而铜质部分为铅锡青铜的铸造组织, 推测其制作工艺是先将铁刃锻打成型, 镶嵌在铸矛的范内, 然后浇注铜液, 使铜包裹铁刃铸成铜铁复合器。

判定虢国墓地发现的铁器是人工冶铁还是陨铁, 对于研究中原地区冶铁技术的起源及中国冶铁技术的发展具有重要意义。韩汝玢曾对虢国墓地出土的 6 件铜铁复合器进行了分析, 发现铁制部分 3 件为陨铁, 3 件为人工冶铁制品<sup>[10]</sup>。人工冶铁制品中 2 件为块炼渗碳钢, 1 件为块炼铁。陈坤龙再次对虢国墓地的 2 件铜刃铁器进行了分析, 其中 1 件铜内铁援(M2009: 703)为再次取样分析, 和之前分析结果一致, 为陨铁, 另外 1 件铁刃铜削(M2009: 710-2)也为陨铁<sup>[11]</sup>。通过这 8 件虢国

墓地出土铜铁复合器的检测结果可以看出,其特点是人工冶铁制品与陨铁制品共存,各为4件;其中2件来自国君虢季墓(M2001),6件来自国君虢仲墓(M2009),明显虢仲墓出土数量较多;铁刃是陨铁的全部出自于M2009墓。

发表的资料表明,M2009墓是虢国墓地已发掘墓葬中形制最大的一座。墓穴四壁从上到下以淡绿色颜料进行了特殊涂抹。墓主人使用的葬具为重棺单椁,外加大型棺罩。从众多的出土青铜器铭文来看,墓主人虢仲是虢国的一代国君,其入葬年代在西周晚期历、宣之际。青铜礼器随葬的多少,反映墓主人身份的等级。M2009号墓出土的青铜器仅礼乐器就达120余件,其中用以标志墓主人身份的鼎达29件。有44件的铭文均言明为墓主人虢仲的自作用器。出土的两套编钟,一套为8件甬钟;一套为8件钮钟,铭文最长的60多字,从其内容可知此套钮钟为虢仲自作用器。且自铭“宝铃钟”。从铭文可知,墓主人虢仲生前曾辅佐周天子治理天下,管理臣民,并“受天子禄”,其地位、权势与富有程度明显高于1990年发掘的M2001号墓主人虢季。M2009的规格较M2001更大,虢仲与虢季可能是前后继任的仲、季兄弟二人,前后两位虢国国君陪葬的铜铁复合器会在种类、数量上有如此明显差异的原因,可能与这两位国君的地位有关。虢仲为周初受封,辅佐周天子执政,国力尚强,而M2001墓主人虢季可能生前已去国君和王朝卿士之职<sup>[12]</sup>,且下葬年代晚于虢季墓的年代接近春秋早期,处于社会大变革及大动荡,国力会有所下降,其陪葬品的数量及墓葬的规模可能会受到一定的影响。

从虢国墓地铜铁复合器的制作工艺来看,有学者认为M2001出土的M2001:393玉柄铁剑的剑身、玉质剑柄和铜质柄芯为分别制成,然后把各自铆合套接,用漆粘在一起<sup>[13]</sup>,但是否使用漆作为粘接剂,没有经过科学分析,待检测商榷。陈坤龙对M2009墓的M2009:710-2铸造工艺分析<sup>[14]</sup>,与本次分析的M2009:733相同,是采用铸接方法将铜铁二者结合,而M2001:526铜内铁援戈和M2009墓的其他4

件的铜柄铁刃据发表的资料来看认为是锻接而成,但是从目前分析的先秦时期的河北藁城铁刃铜钺<sup>[15]</sup>、梁带村遗址M27的铁刃铜削刀和铁刃铜戈<sup>[16]</sup>、北京延庆军都山玉皇庙的铁柄铜刀<sup>[17]</sup>、南阳春秋彭射墓的铁援铜戈<sup>[18]</sup>、上海博物馆馆藏的2件铁刃铜戈和1件铜柄铁剑<sup>[19]</sup>,这些复合器的铜和铁结合的方式都是铸接而成,而M2001:526铜内铁援戈和M2009墓的其他4件铜柄铁刃据由于出土的铁刃铜器都锈蚀比较严重,尤其铁质部分,凭宏观的观察不易辨别其制作工艺,铜和铁是否为锻接而成,还需更微观的分析。

出土的8件复合器中4件镶嵌有绿松石,其中M2001、M2009各两件,李书谦认为玉柄铁剑上的绿松石先是刻槽,再镶嵌,为了达到牢固的效果,可能使用了漆作为粘接剂<sup>[20]</sup>。对这些复合器上绿松石的镶嵌工艺科学的分析,产源的判别待展开。从虢国墓地铜铁复合器的工艺来看,采用了套接、铆合、锻造、镶嵌、合铸等工艺,充分体现当时高超的技术水平。

虢国墓地的铜铁复合器可以从该墓地中找到器形与之相同的铜器,如虢国墓地出土的M2009:703铜内铁援戈与长胡五穿铜戈M2001:477等形制上相同,M2001:526铜内铁援戈与M2001:476、518、473、525等形制上均为中胡三穿戈,M2009:730铜铍铁叶矛虽然残缺,但可看出器身为柳叶形,中脊隆起,与M2001出土的铜矛也相似。M2009:720铜釜铁铎也与M2001:176铜铎形制相似,并且这2件铎釜口处有数周凸弦纹,釜身正背两面铸有曲体龙首纹,两侧面为变体龙纹,纹饰亦同。说明这些复合器是仿照铜器制作,最有可能是本土生产的。

在铁器较为珍贵的时期,虢国墓地为什么会陪葬如此多的铁制品值得关注。虢国墓地所处的年代是西周后期向东周过渡的时期,从陪葬的青铜器礼器来看,礼制等级森严,铜铁复合器全部来自于高等级墓葬,说明铜铁复合器的珍贵性远超过实用器,更多的是尊贵身份的代表。虢国国君在周朝最高统

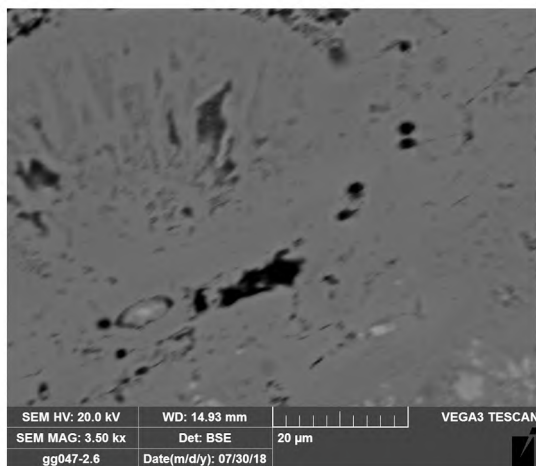
治集团中地位颇高,历代多为王朝卿士,辅佐周天子执政,为周王室东征西讨,自立国之初就频繁地参与战事,战功显赫。这些铁刃铜器除 2 件削刀外,其他为剑、戈、矛等兵器,出土的青铜兵器数量更多,这都表明了虢国的经济、军事实力。铁作为刃部相比于铜的优良性不言而喻,虢国军事实力的强大与铸造刃部兵器的强大技术密不可分。虽然认识到铁作为刃部的优良性,但无法大规模获取或者冶炼铁,所以与铜复合在一起,以最小的消耗获取最优良的特性。作为常年参与战争的虢国,可想而知对这种更加具有锋利度复合器的重视,只在国君墓陪葬。

#### 四 关于铁铜复合器的相关问题探讨

根据发表的资料,对战国早期之前(公元前 5 世纪前)出土的铁刃铜器进行统计,经过鉴定的见表二。发现这类金属器具有一定的数量,但经过鉴定的较少。通过对公元前 5 世纪前中国出土的铁刃铜器的统计,发现有以下特点。

从出土的数量及分布的地点来看,河南 12 件、甘肃 11 件、宁夏 6 件、湖北 6 件、陕西 3 件、北京 2 件,河北、山东、湖南、云南各 1 件,上海博物馆的 3 件出土地不详。商代和西周时期主要以河南、河北、湖北分布。春秋到战国早期以甘宁地区为最多,在陕西、山东、湖北、河南等地也有出土。商代和西周时期,河南是当时的经济、文化、政治中心区域。春秋战国时期,诸侯国之间纷争不断,也加快了各地区和民族之间的交流与融合,促进了生产力的发展,缓和了生产力发展不平衡的矛盾,金属冶铸工艺得到了前所未有的提高,复合器不仅种类和数量明显增加,分布的地域也更加广阔。战国早期之后,出土了大量的铁铤铜镞<sup>[21]</sup>,在西南夷地区也发现了 96 件三叉格铜柄铁剑<sup>[22]</sup>,战国中晚期中山王墓出土了铁足大铜鼎<sup>[23]</sup>,还有在湖南长沙识字岭<sup>[24]</sup>、湖北擂鼓墩吴家湾墓出土的战国时期的铁足铜鼎,说明战国时期的铜铁复合器在数量上增多,也出现了铁足铜鼎新型器物。

形制及出土数量方面,在商代较为单一,



图一〇 TT-2 背散射图像(夹杂物)

目前发现的 3 件铁刃铜器为铁刃铜钺,1 件为戈。河北藁城发现的钺与北京平谷山的钺器形相似,与河南浚县的器形上稍有不同。而西周时期其类型有铜内铁援戈、铁刃铜削、铜骹铁叶矛、铜釜铁簪、玉柄铁剑,数量上有所增加,种类已经较为多样化,并且出现玉、铜、铁三者的复合器。春秋到战国早期在西周形制的基础上出现了鍍金镂空铜柄铁剑及铁铤铜镞的新型器件等,数量上也较前期多。

纹饰上,商代的河北藁城的钺阑两面均饰乳丁纹两排,而平谷山的钺没有相关资料显示有纹饰,河南浚县辛村的钺和叶家山的戈已出现较为复杂的纹饰。到西周时期出现了以绿松石片镶嵌形成的纹饰,种类更加丰富。春秋到战国早期,纹饰较以上两个时期有更多样式出现,如在陇山地区出土的铜柄铁剑上出现了兽面纹、双鸟纹牌饰、螺旋纹、绕绳纹、乳突纹等较为复杂且精美的纹饰。

从铁刃的材质上来看,经过鉴定的商代的 4 件均为陨铁制品,而两周之际陨铁与人工冶铁制品同时使用,到春秋战国时期,经过鉴定的均为人工冶铁。陨石通常含 10% 的镍,它质地坚硬,更难加工,且数量极少。不难看出,随着冶铁技术的发展,人们对铁的性能越来越了解,陨铁制品在春秋战国时期淡出历史舞台是必然的。

由于铁刃铜器的器形及陪葬的墓葬等级的不同,其承载的意义也会不同,这种变化也

表二 已鉴定的公元前5世纪前出土的铁刃铜器统计表

出土地点	名称及件数	铁质材质	时代	来源
河北藁城台西商代遗址	铁刃铜钺 1	陨铁	商代中期	[6]
北京平谷刘家河商墓地	铁刃铜钺 1	陨铁	商代中期	[28]
湖北叶家山 M111	铁援铜戈	陨铁	商代晚期	[27]
河南浚县辛村	铁刃铜钺 1	陨铁	商代晚期	[29]
	铁刃铜戈 1	陨铁	西周晚期	
河南三门峡虢国墓地	铜内铁援戈 2	陨铁 1、块炼铁 1	西周晚期	[1] [2]
	铁刃铜削 2	陨铁 2		
	铜钺铁叶矛 1	块炼渗碳钢		
	铜盃铁铤 1	陨铁		
	玉柄铁剑 1	块炼渗碳钢		
	铁刃铜矛 1	块炼铁渗碳钢		
甘肃灵台景家庄	铜柄铁剑 2	1 件锈蚀无法鉴定 1 件为块炼铁渗钢	春秋早期	[30]
陕西梁带村遗址	铁刃铜削 1	块炼铁渗钢	春秋早期	[5]
	铁刃铜戈 1	块炼铁渗钢		
陕西澄城刘家洼	铜柄铁剑 1	块炼铁	春秋早期	
上海博物馆馆藏	铁刃铜戈 2	块炼铁	春秋早期	[19]
	铜柄铁剑 1			
北京延庆玉皇庙墓地	铜柄铁刀 1	块炼铁	春秋中期早段	[17]
湖南长沙杨家山 M65	铜格铁剑	钢	春秋末期	[31]
宁夏固原余家庄马庄墓	铜柄铁剑 2	块炼渗碳钢	春秋战国之交	[32]
宁夏彭阳官台村	铜柄铁剑 1	块炼渗碳钢	春秋战国之交	[33]
宁夏西吉陈阳川村	铜柄铁剑 1	块炼渗碳钢	春秋战国之际	[34]

是在当时社会背景及社会生产技术的发展影响之下。林沅推断甲骨文的“王”字本像斧钺之形,而斧钺则为军事统帅权的象征<sup>[29]</sup>。近年来很多学者从各个角度论证了钺的起源、形制特点及演变、作用与意义等,大部分学者也认同商周时期钺为军权的象征<sup>[26]</sup>。故铁刃铜钺在商代时期是弥足珍贵,代表着至上的权力。商代藁城台西村出土铁刃铜钺的这座墓,随葬大型礼器和乐器,说明当时地位较高。两周之际的三门峡虢国墓地出土的铁刃铜器全部来自于国君墓,且部分器柄有绿松石片镶嵌成长鼻龙首纹,表明当时铜铁复合器只有较高身份或较高等级的人才能拥有。

## 五 结 语

对虢国墓地 M2009 墓出土的一件铁刃铜矛的分析,可知铁质部分为人工冶铁。虢国墓地发现的 8 件铜铁复合器的特点是人工冶铁制品与陨铁制品共存,处于人工冶铁技术的初级阶段。这些铜铁复合器均来自于高等级的墓葬中,也反映出当时铁的珍贵,其制作工艺使用了套接、铆合、镶嵌、合铸等,从纹饰及形制上看可能为本地制作。对公元前 5 世纪前出土的铜铁复合器的梳理发现,铜铁复合器在春秋早期之前一般作为权力地位的象征。从出土地点来看,商和西周时期在河南、河北、北京、湖北

分布,春秋早期到战国早期以甘宁地区为中心散点分布,并且这些铜铁复合器的器形大多都以兵器为主。形制及出土数量方面,在商代较为单一,春秋到战国早期在西周形制的基础上出现了鎏金镂空铜柄铁剑及铁铤铜镞的新型器件等,数量上也较前期多。纹饰上,商代铜铁复合器纹饰较为简单,到了西周时期出现了以绿松石片镶嵌形成的纹饰,种类更加丰富。春秋到战国早期,纹饰较以上两个时期有更多样式出现。到目前为止,公元前5世纪前的虢国墓地出土的铜铁复合器时代较早,数量最多,值得进一步关注和探讨。

附记:陕西澄城刘家洼铜柄铁剑材质由北京大学考古文博学院陈建立教授告知。

- [1] 韩汝玢等《虢国墓出土铁刃铜器的鉴定与研究》,《三门峡虢国墓》,文物出版社,1999年。
- [2] Kunlong Chen, Yingchen Wang, Yaxiong Liu, et al. Meteoritic origin and manufacturing process of iron blades in two Bronze Age bimetallic objects from China. *Journal of Cultural Heritage*, 2018 (30): 45-50; 王颖琛等《三门峡虢国墓地 M2009 出土铁刃铜器的科学分析及其相关问题》,《光谱学与光谱分析》2019年第10期。
- [3] 白云翔《先秦两汉铁器的考古学研究》,第42~44页,科学出版社,2005年。
- [4] 贾洪波《关于虢国墓地的年代和 M2001、M2009的墓主问题》,《中原文物》2014年第6期。
- [5] 陈建立等《梁带村遗址 M27 出土铜铁复合器的制作技术》,《中国科学》(E辑:技术科学)2009年第9期。
- [6] 李众《关于藁城商代铜钺铁刃的分析》,《考古学报》1976年第2期。
- [7] 同[5],第1578页。
- [8] 同[1],第568页。
- [9] H. H. Coghlan. Notes on Prehistoric and Early Iron in the Old World, *The South African Archaeological Bulletin*, 1956: pp. 27-36. J. P. Lopering, W. Niehiporuk, A. Chodos, H. Brown. The distribution of gallium, germanium, cobalt, chromium and copper in iron and stony-iron meteorites in relation to nickel content and structure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1957(11): 263-278.
- [10] 同[1],第559~573页。
- [11] 同[2],第45~50页。
- [12] 同[4],第24页。
- [13] 李书谦《虢季墓出土的玉柄铁剑和铜内铁援戈》,《中原文物》2006年第6期。
- [14] 同[2],第45~50页。
- [15] 同[6],第17~34页。
- [16] 同[5],第1580页。
- [17] 何堂坤等《延庆山戎文化铜柄铁刀及其科学分析》,《中原文物》2004年第2期。
- [18] 朱华东《南阳春秋彭射墓出土青铜兵器初探》,《中原文物》2012年第3期。
- [19] 廉海萍、熊樱菲《铜—铁复合兵器铁刃的分析》,《文物保护与考古科学》1995年第2期。
- [20] 同[13],第92、93页。
- [21] 段红梅《三晋地区出土战国铁器的调查与研究》,第160~189页,北京科技大学,2001年。
- [22] 宋治民《三叉格铜柄铁剑及相关问题的探讨》,《考古》1997年第12期。
- [23] 李耀光《战国中山国王墓出土刻铭铁足大铜鼎保护研究初探》,《文物修复与研究》2014年。
- [24] 单先进、熊传新《长沙识字岭战国墓》,《考古》1977年第1期。
- [25] 林沄《说王》,《考古》1965年第6期。
- [26] 许鹏飞《钺代表的军权意义的起源与发展》,《考古》2018年第1期。
- [27] 张先得、张先禄《北京平谷刘家河商代铜钺铁刃的分析鉴定》,《文物》1990年第7期。
- [28] 张天宇等《叶家山 M111 出土的商代铁援铜戈》,《江汉考古》2020年第2期。
- [29] 韩汝玢、柯俊《中国科学技术史·矿冶卷》,第357、358页,科学出版社,2007年。
- [30] 韩汝玢《中国早期铁器(公元前5世纪以前)的金相学研究》,《文物》1998年第2期。
- [31] 长沙铁路车站建设工程文物发掘队《长沙新发现春秋晚期的钢剑和铁器》,《文物》1978年第10期。
- [32] 许成等《宁夏固原杨郎青铜文化墓地》,《考古学报》1993年第1期。
- [33] 罗丰《以陇山为中心甘宁地区春秋战国时期北方青铜文化的发现与研究》,《内蒙古文物与考古》1993年第1、2期。
- [34] 罗丰、韩孔乐《宁夏固原近年发现的北方系青铜器》,《考古》1990年第5期。

(责任编辑:杨冠华)