

汉长安城武库出土细晶钢兵刃与熟铁钉制作技术研究

张周瑜

梁宏刚

陈建立

潜伟

刘振东

(北京 100023) (河北 廊坊 065001) (北京 100871) (北京 100083) (北京 100101)

摘要:本文分析了汉长安城武库遗址出土的多件铁兵刃、铁钉和铁铤,并将内生夹杂物概念引入到古代材料工艺判定中来,基于不同钢铁技术产生的内外生夹杂物特征差异辅助判定武库各类器物的制作工艺。结果发现:铁兵刃和铁钉均为炒钢制品,铁兵刃材质为含碳量适中、力学性能优越、加工工艺复杂的细晶钢,铁钉是质地较软的“熟铁”;铁铤为铸铁固态脱碳制品。武库工匠应有意选择不同的钢铁材料制作不同用途的器物,其中铁兵刃制作水平最为优良。

关键词:汉长安城武库;铁兵刃;细晶钢;内外生夹杂物

中图分类号:K871.41

文献识别号:A

文章编号:1001-0327(2026)01-0164-09

西汉时期,冶铁业大规模发展,铁质军备技术也得到很大提升。《汉书·陈汤传》载:“汤曰:夫胡兵五而当汉兵一,何者?兵刃朴钝,弓弩不利。今闻颇得汉巧,然犹三而当一。”^[1]可视为先进铁兵刃制造技术的体现。汉长安城武库遗址为西汉时期中央武库所在,经系统发掘,出土了丰富的军械防具,包括多种形制的铜铁质刀、剑、矛、戟、镞、铠甲等^[2],丰富了我们对西汉兵器形制与种类的认识,亦是研究西汉兵刃加工技术的最佳实物资料。本文分析武库出土的铁兵刃、铁钉和铁铤等的金相组织结构与夹杂物特征,剖析其制作工艺,综合以往出土武库同类器物的分析结果,探索西汉中央武库军备先进性的具体体现,讨论汉长安城武库乃至西汉时期工匠对不同功能铁器的工艺、材质选择特点。

一、采样、分析与数据预处理

(一) 采样

作者:张周瑜,中国社会科学院科技考古与文化遗产保护重点实验室;梁宏刚,河北东方学院;陈建立,北京大学考古文博学院;潜伟(通讯作者),北京科技大学科技史与文化遗产研究院;刘振东,中国社会科学院考古研究所。

基于铁器保存状况,本文遵循最小破坏原则,选择4件铁兵刃、4件铁钉、4件残铁铤进行分析,具体采样信息见表一与图一。

(二) 分析手段与设备参数

取样品用环氧树脂冷镶,经打磨抛光后用3%的硝酸酒精溶液浸蚀,于北京科技大学冶金考古实验室LEICA DM4000M显微镜下进行金相学观察。

经再抛光与表面喷碳处理后,对样品非金属夹杂物开展扫描电镜能谱分析。仪器型号:捷克Tescan公司VEGA 3 XMU与德国Bruker Nano GmbH 610M。分析参数:高真空,加速电压20kV,能谱工作距离约15mm,激发时间 $\geq 60s$ 。

(三) 非金属夹杂物分析方法与数据预处理

非金属夹杂物信息采集内容包括成分、形貌、主要物相、数量、分布等。利用扫描电镜能谱仪测定非金属夹杂物平均成分与各组成

物相成分信息时,本文选择单质模式测定包括氧元素在内的所有元素,元素成分低于0.2wt%者不做考虑。通过夹杂物主要物相组成、背散射电子成像灰度、尺寸、形貌等特征初步分类,配合夹杂物截面分布情况,选择不同位置、不同大小的多个夹杂物进行成分测定。

由于包裹于铁基体内部,一些截面尺寸较小的非金属夹杂物成分测定结果受铁基体干扰严重,呈现出铁含量偏高的特征。因此,为检验、校正检测结果,需对夹杂物成分数据进行预处理。首先,通过实测铁含量计算其转化为FeO、FeS所需的氧含量(O_{FeO})与硫含量(S_{FeS})。其次,计算其他元素常见氧化物、硫化物形式所需的氧含量之和($O_{其他}$)与硫含量之和($S_{其他}$)。钢铁材料各元素常见氧化物与硫化物形式包括 Na_2O 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 K_2O 、 TiO_2 、 V_2O_5 、 Cr_2O_3 、 MnO 、 MnS 、 $MnS-FeS$ 等。然后,将 $O_{其他}$ 、 $S_{其他}$ 与氧、硫实测值($O_{实测}$ 、 $S_{实测}$)进行对比,计算具体差值。若 $O_{其他} \approx O_{实测}$ 、 $S_{其他} \approx S_{实测}$,而实测铁含量远大于零,则夹杂物数据受铁基体干扰,可通过实测氧含量校正夹杂物铁含量后,再进行配氧、归一化处理;若 $O_{其他} + O_{FeO} \approx O_{实测}$ 、 $S_{其他} + S_{FeS} \approx S_{实测}$,则FeO属于夹杂物组成成分之一;若 $O_{其他} + O_{FeO} < O_{实测}$,则夹杂物中Fe可能存在 Fe^{3+} 形式。预处理结束后,可基于校正数据开展夹杂物

表一

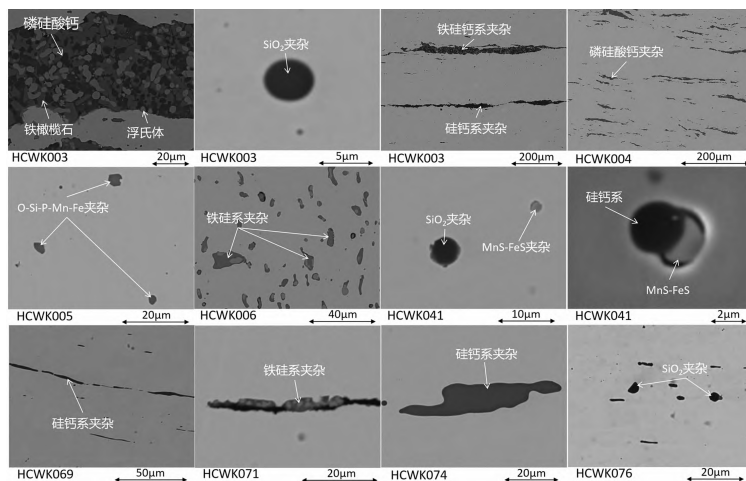
实验室编号	考古编号	器类	取样部位	备注
HCWK003	/	铁钉	钉身	
HCWK004	/	铁钉	钉身	
HCWK005	/	铁钉	钉身	
HCWK006	/	铁钉	钉身	
HCWK041	/	铁铤	铤	圆柱形,径粗0.44cm
HCWK042	/	铜铤之铤	铤	圆柱形,径粗0.6cm
HCWK049-1	/	铁铤之铤	铤	圆柱形,径粗0.6cm
HCWK049-2	/	铁铤之铤	铤	圆柱形,径粗0.6cm
HCWK069	78CHW(五)T2③	环首铁刀	刃部	II型长刀,原报告标本 5:T2③:52
HCWK071	88CHW5T1③	铁矛	柄部	I型铁矛头,竖圆釜柳叶刃
HCWK072			刃部	
HCWK074	77CHW7T5③	残铁刀	刃部	II型长刀,(原报告标本 7:T5③:12)
HCWK076	75CHW7T4③	铁刀	刃部	I型长刀,方釜空首直刃

采样信息表



图一 器物照片(1~7为左标尺,8~11为右标尺)

- 1.HCWK003 2.HCWK004 3.HCWK005 4.HCWK006 5.HCWK041
6.HCWK042 7.粘连的HCWK049-1与HCWK049-2 8.HCWK069
9.HCWK071与HCWK072 10.HCWK074 11.HCWK076



图二 武库铁器典型夹杂物背散射照片

表二 汉长安城武库铁兵器、铁钉、铁镞典型夹杂物成分数据

样本编号	夹杂编号	夹杂形貌与长径(μm)信息	扫描信息	wt%														夹杂/物相判断
				MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	FeO	MnS	FeS	
HCWK003	1	非均质长条, 100	平均	2.8	5.3	23.6	18.7	1.1	0.7	25.6		0.3	1.3		20.6		铁硅钙系	
			浅灰相		3.3	5.2	0.3	0.5	0.3	3.4		1.3			85.7		铁氧化物	
			深色相	1.4	6.7	13.7	32.6	2.1	1.6	41.9								磷硅酸钙
			灰色相	8.0	0.5	37.5	3.0			4.5			1.9		44.7			铁橄榄石
HCWK004	2	均质长条	平均	3.6	7.0	35.5	5.5	0.9	0.9	43.2	0.7	1.0	1.7				硅钙系	
			1	均质长条, >50	平均	1.9	0.4	2.2	42.5			45.8				7.3		磷酸钙
HCWK005	1	均质球形, <5	平均			21.4	32.3	3.3					1.2		41.8		O-Si-P-Mn-Fe	
			2	均质球形, <5	平均	0.9	0.7	14.8	24.4			1.2			57.9		O-Si-P-Fe	
			3	均质球形, <5	平均		2.8	8.5	55	2.7					30.9		O-P-Fe	
			4	非均质长条, >100	深色相	0.8			32.7		0.7	49.6				15.7		磷酸钙
HCWK041	2	均质球形, <5	浅灰相														铁氧化物	
			平均	1.0	5.7	65.1				28.2							硅钙系	
			平均			81.1							1.1			1.4	16.4	MnS-FeS·SiO ₂
			平均			52.7						3.8	12.8	6.2	15.0	9.4		O-Si-V-S-Mn-Cr
HCWK049-2	5	非均质近球形, <5	浅色相		5.2	14.9				8.7		0.9			28.8	41.5	MnS-FeS	
			深色相	1.4	56.9	21.8				5.3						17.3		硅钙系
HCWK069	1	均质长条, 40	平均	11.1	4.2	36.5	0.1		0.2	47.3	0.5						硅钙系	
HCWK076	1	均质球形, 7	平均			100											SiO ₂	

的定性研究。

(四) 非金属夹杂物的定性判断

本文测得非金属夹杂物或物相的有效成分数据有230余组, 经预处理后显示, 12件样品的非金属夹杂物类型多样, 根据其主成分特征可概括为硅钙系夹杂(Si-Ca系)、铁硅钙夹杂(Fe-Si-Ca系)、铁硅系夹杂(Fe-Si系)、磷酸钙或磷硅酸钙夹杂(CaO·nP₂O₅类)、氧化亚铁夹杂(FeO)、二氧化硅夹杂(SiO₂)、硫化铁锰夹杂(MnS-FeS)以及上述不同组分通过碰撞、混合、吸附析出等方式复合产生的均质或非均质夹杂。复合组成的夹杂类型有MnS-FeS+SiO₂夹杂、Si-Ca系+SiO₂夹杂、Si-Ca系+MnS-FeS夹杂、CaO·nP₂O₅类+Fe-Si系夹杂, 以及由Si、P、Mn、Fe、V、Cr、Ti等可还原元素的氧化物

复合组成的系列夹杂(O-Si-P-Mn-Fe系)。

现将一些典型夹杂物显微照片与成分数据列于图二与表二。

(五) 分析结果

汇总金相显微组织与非金属夹杂物观察结果以及夹杂物成分检测结果得到表三(图三~八)。

二、加工工艺判定

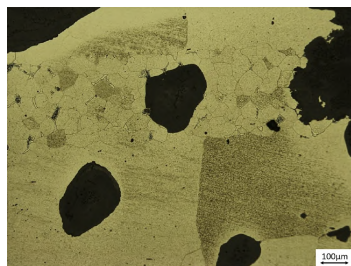
(一) 基于夹杂物的判定

在前述夹杂物定性判定的基础上, 还需按照成分来源将夹杂物进一步分类。成分来源不同, 夹杂物成分类型不同, 对应的加工工艺存在区别。

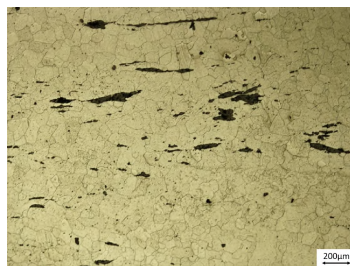
非金属夹杂物的成分主要来自两个方

表三 金相组织与非金属夹杂物分析结果描述

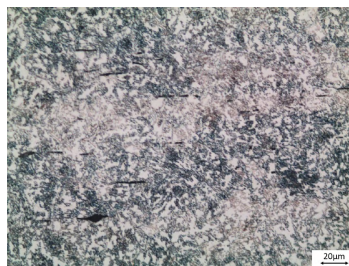
实验室编号	金相组织描述	非金属夹杂物特征描述	工艺判断
HCWK003	以铁素体为主,依据晶粒度可分五层,依次为:细粒铁素体、粗粒铁素体、细粒铁素体与少量珠光体的魏氏组织、粗粒铁素体、细粒铁素体与少量珠光体的魏氏组织。细粒铁素体粒径约25 μm ,粗粒铁素体粒径普遍大于500 μm 。	纵截面夹杂物数量多,尺寸大,主要分布于晶粒分层处与细粒铁素体层内,沿着加工方向拉长变形,长径普遍超过100 μm ,大者达2mm。夹杂物种类包括均质Si-Ca系或Fe-Si-Ca系夹杂、Fe-Si系夹杂、球形SiO ₂ 夹杂。	炒炼低碳钢,折叠锻打。
HCWK004	以铁素体为主,平均含碳量低于0.1%。依据晶粒度可分至少五层,依次为:粗粒铁素体、细粒铁素体与少量珠光体、粗粒铁素体、细粒铁素体与少量珠光体。细粒铁素体粒径约25 μm ,粗粒铁素体粒径普遍大于500 μm 。	纵截面夹杂物数量多,尺寸大,主要分布于细晶粒层内,沿着加工方向拉长变形,长径普遍超过100 μm ,大者达300 μm 以上。存在较多磷酸钙夹杂以及磷酸钙与Si-Ca系或Fe-Si-Ca系复合形成的夹杂。	炒炼低碳钢,折叠锻打。
HCWK005	铁素体组织均匀,粒径集中于50~200 μm 。	纵截面夹杂物数量多,尺寸大,分布相对均匀,沿着加工方向拉长变形,长径普遍超过100 μm ,大者可达500 μm 以上,有Fe-Si系夹杂、磷酸钙夹杂、磷酸钙+Fe-Si夹杂、O-Si-P-Mn-Fe系夹杂。	炒炼熟铁,锻打。
HCWK006	以铁素体为主,晶粒大小不均匀,明显分为粗晶粒层(以25 μm 粒径者为主)与细晶粒层(以200 μm 粒径者为主)。	横截面夹杂物数量多,集中分布于一角,沿加工方向挤压变形,长径尺寸集中于10~50 μm ,有Fe-Si系夹杂、磷酸钙夹杂、O-Si-Mn-Fe系夹杂。	炒炼熟铁,折叠锻打。
HCWK041	铁素体组织均匀,粒径集中于200 μm 左右。	横纵截面夹杂物数量极少,均为粒径小于5 μm 的球形夹杂,有Si-Ca系夹杂、SiO ₂ 夹杂、MnS-FeS·SiO ₂ 复合夹杂、O-Si-V-S-Mn-Cr夹杂、MnS-FeS夹杂,以及Si-Ca系+SiO ₂ +MnS-FeS复合形成的夹杂。	铸铁固态退火脱碳熟铁。
HCWK042	铁素体与少量珠光体组成的亚共析钢组织,平均含碳量低于0.1%,铁素体晶粒粗大,粒径多超过400 μm 。	纵截面夹杂物极少,测得1个夹杂Si-Ca系+MnS-FeS。	铸铁固态退火脱碳低碳钢。
HCWK049-1	铁素体组织均匀,粒径集中于200 μm 左右。	纵截面夹杂物数量极少,均为粒径小于5 μm 的球形MnS-FeS夹杂。	铸铁固态退火脱碳熟铁。
HCWK049-2	铁素体组织均匀,粒径集中于200 μm 左右。	纵截面夹杂物数量极少,均为粒径小于5 μm 的球形夹杂。多数为MnS-FeS夹杂,存在FeO夹杂、Si-Ca系夹杂、Si-Ca系+MnS-FeS夹杂。	铸铁固态退火脱碳熟铁。
HCWK069	组织均匀,由粒径小于10 μm 的细晶粒铁素体与球粒状渗碳体或碳化物组成。	夹杂物较多,均匀分布,尺寸中等,形变量大,呈细长条,沿着加工方向拉长,长径普遍小于60 μm (短径在3 μm 左右),个别达100 μm 。多为均质Si-Ca系夹杂,少量细小球形SiO ₂ 夹杂。	炒钢锻造成型,刃部热锻快冷处理。
HCWK071	组织均匀,含碳量略高于刃部,铁素体晶粒略大于刃部,粒径小于20 μm 。	柄部与刃部的夹杂物类别、分布、相貌相似,但刃部数量、尺寸略低于柄部。夹杂物数量较多,均匀分布,多数沿加工方向拉长、挤压变形,多数边部有破裂。刃部夹杂长径普遍小于65 μm ,柄部部分夹杂长径达110 μm 。有Si-Ca系或Fe-Si-Ca系夹杂,存在Fe-Si夹杂、球形SiO ₂ 夹杂。	炒钢锻造成型,刃部热锻快冷处理。
HCWK072	组织均匀,由粒径小于10 μm 的细晶粒铁素体与球粒状渗碳体或碳化物组成。		
HCWK074	组织均匀,由粒径小于10 μm 的细晶粒铁素体与球粒状渗碳体或碳化物组成。	夹杂物数量较多,均匀分布,尺寸中等,形变量大,沿加工方向拉长变形,长径普遍小于40 μm (短径小于3 μm),少数达200 μm 以上,主要为均质Si-Ca系夹杂。	炒钢锻造成型,刃部热锻快冷处理。
HCWK076	组织均匀,由粒径小于10 μm 的铁素体与细晶粒渗碳体或碳化物组成。渗碳体呈破碎的条、粒状。	夹杂物数量较多,均匀分布,多数沿加工方向拉长或挤压变形,边部有脆裂特征,长径集中在5~50 μm 之间,个别可达320 μm 。少数夹杂呈圆形或不规则形,粒径小于5 μm ,形变量小或基本不变形,主要为均质Si-Ca系夹杂,存在SiO ₂ 夹杂、Fe-Si系夹杂、磷硅酸钙夹杂。	炒钢锻造成型,刃部热锻快冷处理。



图三 HCWK004钉金相组织照片



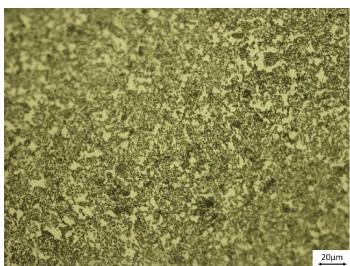
图四 HCWK005钉金相组织照片



图五 HCWK069刀刃部金相组织照片



图六 HCWK076刀刃部金相组织照片



图七 HCWK071矛柄部金相组织照片



图八 HCWK072矛刃部金相组织照片

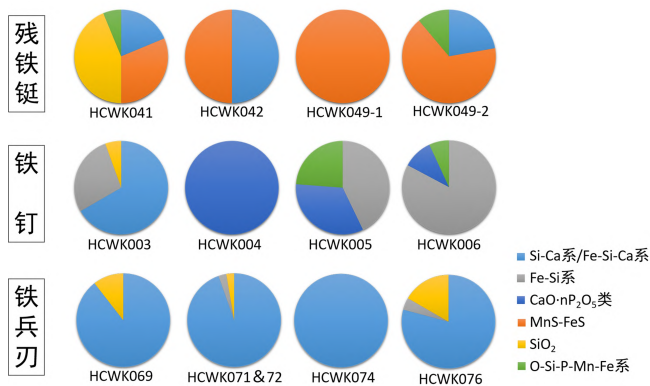
面,一是以炉渣、炉衬、矿石、燃料、灰分以及助熔剂等为主的外源因素,二是以铁料Fe、Si、Mn、P、S、Cr、V、Ti等为主的内源因素。在中国古代钢铁冶金生产中,外源因素通常以物理混入的方式进入铁料内部,由其主导形成的夹杂还可被称为外生夹杂;内源因素则是在铁器冷却、再加工过程中析出、氧化、碰撞聚合、二次反应等行为导致夹杂形成,可称为内生夹杂;两种不同来源的组分亦可在生产中

相互反应,形成多源因素的复合夹杂物。

两类夹杂成分特征区别显著。冶炼过程中不能被还原的化合物(Na₂O、MgO、Al₂O₃、CaO、K₂O等)的出现即为外生夹杂物的典型成分特征,而内生夹杂物则仅由可还原元素的硫化物或氧化物组成,已有研究人员对汉晋时期铸铁及铸铁固态脱碳制品的典型内生夹杂物类型进行总结^[9]。因此,将复合夹杂物进行拆解后,武库三类器物的外生夹杂物主要类型为Si-Ca系、Fe-Si-Ca系、Fe-Si系、Fe-Ca系、CaO·nP₂O₅类,内生夹杂物主要类型为FeO、SiO₂、MnS-FeS、O-Si-P-Mn-Fe系。将Si-Ca系与Fe-Si-Ca系、FeO与O-Si-P-Mn-Fe系分别合并后作图九。

显然,铁器器类相同,夹杂物成分类别、数量、尺寸基本一致,对应其加工工艺基本相近,且各类器物普遍为内、外生夹杂物并存。

三类器物内生夹杂物均为细小球形或近球形,或仅出现SiO₂,或出现



图九 武库铁器夹杂物主要类型占比示意图

SiO₂与O-Si-P-Mn-Fe系,或出现SiO₂、MnS-FeS、O-Si-P-Mn-Fe系。这表明Si、Mn、P、Ti、V、Cr等元素曾以固溶体、共晶体、化合物等形式存在于器物的加工原料内。通常,地炉块炼铁冶炼还原气氛较弱,炉温较低,可部分还原P,但难以还原Si、Mn、Ti等元素;高炉冶炼则不仅可还原P,还可部分还原Si、Mn、Ti等元素。因此,初步判断三类器物的加工原料可能为铸铁或高炉块炼铁冶炼的高碳钢产物。内生夹杂物类型与生铁原料杂质元素含量及其氧化脱碳程度等因素有关,通常脱碳程度越高,内生夹杂物氧化程度也越高,越容易出现O-Si-P-Mn-Fe系夹杂,且形成的O-Si-P-Mn-Fe系夹杂难以在二次固态渗碳处理时被还原。

三类器物外生夹杂物存在一定区别。结合表三可知,铁铤外生夹杂物仅为Si-Ca系,数量少,尺寸小,均为球形或近球形,应属于高炉冶炼、熔炼、铸造阶段卷入的炉渣液滴,则4件残铁铤属于铸铁固态退火脱碳产物。相比之下,铁钉、铁兵刃外生夹杂物尺寸普遍较大,数量较多,引入途径应区别于铁铤,对应加工工艺也不同。

4件铁兵刃大型外生夹杂物铁含量普遍较低,呈均质玻璃相,无浮氏体、铁橄榄石等含铁物相。即便是高炉块炼铁冶炼生产,其高碳钢积铁表面附着渣料仍存在大量铁橄榄石^[4]。而炒钢生产时,渣料的FeO主要源自于生铁的氧化产物,当脱碳程度较低时,炒炼产物为含碳钢,引入渣料的铁氧化物总量有限,将形成Si-Ca系或Fe-Si-Ca系炉渣,此类炉渣卷入炒钢内部将形成对应的夹杂物类型,并伴随后续锻打加工发生形变。因此,判断4件铁兵刃均是利用炒钢产物锻打成型的。

4件铁钉大型外生夹杂物成分类别相似,但不同器物各类外生夹杂占比略有区别。HCWK003以Si-Ca系或Fe-Si-Ca系夹杂为主,存在一定量铁橄榄石、浮氏体、磷酸钙或磷酸钙组成的Fe-Si系夹杂,应属于炒钢制品。在炒钢生产中,不同阶段产生的炉渣均有可能卷入铁料内部形成夹杂物。炒炼前中期,铁料

含碳量相对较高,引入渣料的铁氧化物有限,此时卷入铁料的炉渣往往FeO含量较低,会形成Si-Ca系或Fe-Si-Ca系夹杂;炒炼继续进行,铁料开始氧化,引入渣料的铁氧化物总量不断累积,炒炼后期引入铁料的炉渣将形成Fe-Si系夹杂。因此,其余3件铁钉虽鲜见Si-Ca系夹杂,但存在较多Fe-Si系夹杂,金相组织结构相近,内生夹杂物特征相近,故推测其与HCWK003制作工艺相似,也为炒钢制品。

3件铁钉内CaO·nP₂O₅类夹杂或物相的出现则反映了该项成渣组分均化程度较差的特点,推测这类夹杂或物相可能源自于木炭灰分或骨灰等物质。同时,铁兵刃Si-Ca系夹杂也普遍存在高钙特征,由于磷酸钙可发生高温分解,故其CaO来源亦不可排除木炭灰分与骨灰的可能。

(二) 细晶钢组织的解析

工业上常将晶粒度低于7~8级的铁素体组织判定为细晶粒组织,要获得更细晶粒的钢则需要进行晶粒细化处理。目前,对于界定古代材料晶粒细化处理的尺寸界线仍需进一步的研究总结,但可以确定的是:晶粒普遍小于10μm的铁素体组织与晶粒小于10μm的铁素体上分布球粒化渗碳体的复相组织,需经细晶化处理来获得。

武库4件铁兵刃含碳量水平接近,属于中高碳钢制品,金相组织均匀,均呈微米级铁素体基体和球粒化渗碳体组成的(α+θ)复相结构,属于细晶钢组织。这种相位组织具有优异的高温超塑性和室温力学性能,直到现在仍属于细晶钢、超细晶钢研究的目标金相结构之一。

相较于现代钢铁细晶化处理技术的多样性,古代工匠仅可通过形变热处理完成,且铁料含碳量不同,其细晶化处理的难易程度有所区别,其中又以中高碳钢的细晶钢加工更为困难。熟铁与低碳钢细晶处理主要涉及铁素体的细晶化,得益于塑性形变能力,材料单次变形尺度较高,可在650~1000℃之间的多个温度区间开展^[5],但最终组织的常温性能不

及中高碳细晶钢。相比之下,中高碳钢细晶处理涉及铁素体细晶化与渗碳体球粒化两个过程。由于含碳量较高,材料塑性形变能力差,单次变形尺度小,为保证渗碳体球粒化发育,温度通常需控制在450~700℃之间,导致所需形变次数多,相应加工难度高^[6]。武库4件铁兵刃珠光体破碎程度高,铁素体晶粒细小,外生夹杂物尺寸普遍不大,存在明显破碎痕迹,单个夹杂形变量大,推测器物是通过反复低温热锻快冷加工而成。

三、铁器材料、功能与工艺

各类铁器实用功能不同,对钢铁材料强度、塑性、韧性、弹性、切削、硬度、抗疲劳性、耐磨性等性能的需求也有不同。这些性能受显微组织、含碳量、杂质元素、组织均匀度、夹杂物等因素的影响,而这些影响因素又与铁器加工工艺直接相关。

(一) 武库铁器的材料选择

武库4件铁兵刃与4件铁钉均属于炒钢制品,但两类产品夹杂物尺寸与数量、铁基体含碳量与金相组织结构存在显著差异,结合以往汉长安城武库不同铁器的分析结果^[7],本文发现武库工匠可能有意对不同功能的铁器采用了不同的加工工艺与钢铁材料。

在已分析的8件武库铁兵刃中,除铁戟外,其余7件铁兵刃均为锻打成型的中高碳细晶钢组织,夹杂物尺寸不大,分布均匀,材料综合性能远高于同出其他类器物,同时加工

难度与成本最高,这反映了工匠对刀、矛类铁兵刃高性能的追求。

本文分析的多件残铁铤均属于铠甲片的加工原料,可辅助了解器物的制作工艺,但其显微组织结构不能反映实用铁铤的材料选择。结合杜弗运等人分析的7件完整铁铤头可知,铁铤为铸铁脱碳钢制品,夹杂物数量少,尺寸小,铤头经锻打处理,为中高碳钢组织,表现出较好的强度与硬度,但受铸铁脱碳工艺的影响,不同器物含碳量水平波动范围大。这体现了工匠制作铁铤时,既关注铤头的使用性能,也关注铁铤整体的形制规范与批量化生产。

两汉时期铁钉主要用于棺槨、木构建筑的钉合与连接。除武库外,汉长安城未央宫、桂宫、长乐宫等其他遗址内也出土大量同类型铁钉。但与其他遗址同出的铁兵器防具相比,武库4件铁钉加工成本相对较低,材料性能最差。粗晶粒熟铁塑性形变能力强,便于铁钉折叠锻打成型,但夹杂物数量多,尺寸大,沿加工方向拉长、排列,甚至贯穿整个器物截面,这使得材料抗腐蚀性、抗疲劳性降低,在反复冷加工变形时,由于局部脆性增加、内部抗应力能力降低,易发生断裂。这或可反映西汉木构建筑用钉对材料性能上限的依赖程度相对较低。

(二) 西汉铁器材质的初步比较

除武库外,西汉时期已出土了大量铁器,覆盖农具、工具、炊具、兵器、防具、构件等多种门类。其中,诸侯王陵与一些城址性质特殊,多数铁器经分析检测。早年分析以金相组织观察为主,故以样本平均含碳量的典型区间为考察对象,复查其工具、兵器、防具、构件等器类的分析结果,并与武库材料一同

表四 部分西汉时期铁器类别与含碳量水平总结

遗址	数量/件	含碳量/wt%		建筑构件		防具		铤		兵刃		工具	
		<0.1	≥0.1	<0.1	≥0.1	<0.3	≥0.3	<0.3	≥0.3	<0.3	≥0.3		
江苏徐州狮子山楚王陵 ^[8]	5			6	1					1	2	2	4
河南永城梁孝王寝园 ^[9]	1							2		1	1		2
江苏徐州北洞山楚王陵 ^[10]										1		1	2
广东广州南越王墓 ^[11]				1				1		2			2
福建武夷山城村汉城 ^[12]	2									2	4	2	
河北保定满城汉墓 ^[13]				1				2	7		5	1	1
北京大葆台一号墓 ^[14]									1	1		1	
陕西西安武库	4								7	1	7		

统计如表四。

虽经分析的铁器数量有限，但铁器材料选择仍可见一定规律性，且这种规律性与武库有相似之处：1.建筑构件均为熟铁或低碳钢；2.防具为铠甲片，以熟铁或低碳钢为主；3.铁兵器多见中高碳钢制品，但仍存在一定量的低碳钢或熟铁制品；4.铁工具含碳量分布范围较广，可能与工具功能有关。

显然，西汉工匠对兵刃与工具的加工相对精细。在河北保定满城汉墓、江苏徐州狮子山楚王陵、广东广州南越王墓、福建武夷山城村汉城出土的中高碳钢兵刃，多数存在高低碳薄层相间分布的百炼钢组织，亦或还存在淬火、刃口渗碳等优化处理。而类似特征还见于一些铁工具上，如南越王墓的铁方镞C121-12、铁镞D25-1以及狮子山楚王陵的多件铁镞。但是，与武库细晶钢兵刃相比，这些器物的加工水平略显不足。

相比之下，武库多件兵刃组织结构与含碳量水平接近，晶粒细化程度高，组织均匀，材料性能优越，反映了武库生产工匠对中高碳钢制品热处理技术的先进性与熟练性，造成这种技术优越性的原因则可能与技术演变、进步有关。

四、结论

本研究将现代内生夹杂物概念引入到古代钢铁材料的加工工艺判定中来，简要叙述了多种钢铁加工工艺产生的内外生夹杂物在成分、形貌、尺寸、数量、分布等方面的差异，并基于此对武库出土的多件铁器进行工艺判定。结果显示，武库遗址出土铁兵刃、铁钉为炒钢制品，铁钺为铸铁脱碳钢制品。其中，铁兵刃为性能优异的中高碳细晶钢制品，可能是钢料经反复低温锻打、快冷处理制成，且组织细晶程度高，鲜见于以往的同时期或更早铁器中，显示了武库铁兵刃的加工技术的先进性。

武库及其他汉代铁器种类丰富，材质多样，但铁器种类与材质、工艺有对应之处：1.铁

兵刃常用中高碳钢经精细加工；2.铠甲片多以熟铁或低碳钢锻打制成，更侧重于快速塑形与防护效能；3.铁镞常见铸造成形，便于批量生产，又经固态退火脱碳，镞头锻打加工，满足其穿透性能需求；4.铁工具中既存在中高碳钢制品，也存在熟铁或低碳钢制品，满足了工具使用性能的多样化需求；5.铁钉作为建筑构件，材质相对较差。这些结果反映了当时工匠对钢铁材料性能和加工工艺已有深入认识。

附记：本文为中国社会科学院“青启计划”中国冶铁史的百年学术史研究(项目编号2025QQJH32)、“国家重点研发计划”课题1：金属文物价值认知及关键技术研究(项目编号2019YFC1520201)、“国家社科基金重大项目”中国冶金史(项目编号17ZDA178)、中国社会科学院“实验室重大问题联合攻关项目”中国古代手工业生产体系的科技考古研究(项目编号S20250205)的阶段性成果。

注释：

[1](汉)班固撰，(唐)颜师古注：《汉书》卷七〇《傅常郑甘陈段传》，中华书局，2012年，第2613页。

[2]中国社会科学院考古研究所编著：《汉长安城武库》，文物出版社，2005年。

[3]Zhang Z Y, Chen J L, Qian W, et al. Characteristics of various non-metallic inclusions in ancient cast iron and solid-state decarburized iron products from a government-run iron workshop during the Han Dynasty in Dongpingling Ruins, Shandong Province. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2022(46):103663.

[4]北京大学考古文博学院、泉州市文化广电和旅游局、安溪县人民政府：《安溪下草埔遗址2019~2020年度考古发掘报告》，文物出版社，2021年，第349~386页。

[5]韩宝军、徐洲：《钢铁晶粒超细化方法及其研究进展》，《材料导报》2010年第1期；牧正志：《细化钢铁材料晶粒的原理与方法》，《热处理》2006年第1期；张西锋、袁守谦、魏颖娟：《超细晶粒钢的制备原理及技术》，《钢铁研究学报》2008年第4期；伍来智：《低碳结构钢热塑性成形过程的组织细化研究》，上海交通大学博士学位论文，2010年6月。

[6]熊毅等：《温压缩变形过程中渗碳体的球化行为》，《材料热处理学报》2008年第1期；胡晓等：《共析钢形变诱导珠光体相变及渗碳体动态球化》，《钢铁研究学报》2018年第8期；杨洪波等：《GCr15轴承钢渗碳体球化的长大机制》，《材料热处理学报》2012年第8期。

[7]杜弗运、韩汝玢：《汉长安城武库遗址出土部分铁器的鉴定》，载《汉长安城武库》附录一，文物出版社，2005年，第132、133页。

[8]北京科技大学冶金与材料史研究所、徐州汉兵马

俑博物馆:《徐州狮子山西汉楚王陵出土铁器的金相实验研究》,《文物》1999年第7期。

[9]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》,载《永城西汉梁国王陵与寝园》附录一,中州古籍出版社,1996年,第276~285页。

[10]韩汝玢、姚建芳、刘建华:《北洞山西汉楚王墓出土铁器的鉴定》,载《徐州北洞山西汉楚王墓》附录二,文物出版社,2003年,第194~203页。

[11]北京科技大学冶金史研究室:《西汉南越王墓出土铁器鉴定报告》,载《西汉南越王墓》附录四,文物出版社,

1991年,第389~396页。

[12]陈建立等:《福建武夷山城村汉城出土铁器的金相实验研究》,《文物》2008年第3期。

[13]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》,文物出版社,1980年,第370~374、388、389页;中国社会科学院考古研究所实验室:《满城汉墓出土铁器的金相鉴定》,《考古》1981年第1期。

[14]大葆台汉墓发掘组:《北京大葆台汉墓》,文物出版社,1989年,第125~127页。

Manufacturing Techniques of Fine-Crystalline Steel Weapons and Wrought Iron Nails Unearthed from the Imperial Armory of Han Dynasty Chang'an City

ZHANG Zhouyu (Beijing 100023) LIANG Honggang (Langfang, Hebei 065001)

CHEN Jianli (Beijing 100871) QIAN Wei (Beijing 100083) LIU Zhendong (Beijing 100101)

Abstract: This paper analyzes several iron weapons, iron nails, and iron billets excavated from the site of the Imperial Armory in Han Dynasty Chang'an City. It introduces the concept of endogenous and exogenous inclusions into the determination of ancient material craftsmanship, based on the characteristic differences in endogenous and exogenous inclusions generated by various iron and steel production methods to assist in identifying the manufacturing techniques of different artifacts from the armory. The findings reveal that both the iron weapons and nails are products of the puddling process. The weapons were made of fine-crystalline steel with moderate carbon content, excellent mechanical properties, and complex processing techniques, while the nails were composed of softer wrought iron. The iron billets were products of solid-state decarburization of cast iron. It is evident that the armory artisans deliberately selected different iron and steel materials for crafting items with distinct functions, among which the production of iron weapons demonstrating the highest level of craftsmanship.

Keywords: Imperial Armory of Han Dynasty Chang'an City; iron weapons, fine-crystalline steel; endogenous and exogenous inclusions

(责任编辑、校对:马志亮)