



西汉地方铸铁作坊的技术选择 :以关中郃城作坊冶金陶瓷科技分析为例



林永昌
郑 婧
陈建立
种建荣
雷兴山

(香港中文大学人类学系)

(北京大学中国考古学研究中心)

(陕西省考古研究院)

(北京大学中国考古学研究中心)

摘要:本文通过岩相和扫描电镜能谱,对陕西杨凌区西汉早期郃城作坊出土的陶范、鼓风管和炉壁的制作工艺进行分析,研究其原料来源和配比,探讨这三类冶铸遗物制作过程的异同。分析表明,三类冶铸遗物的材料来源和备料过程存在一定的差异,可能与三类遗物的功能要求有关。郃城虽然为关中地区西汉时期规模较小的作坊,但是工匠在选料方面具有丰富的经验,分析所见分类选料和制作的模式,说明作坊内部有相对复杂的分工协作,有较高等度的专门化生产。因此,以往以为西汉早期的中小型铁工场多属于家庭式小作坊生产的观点,可能需要重新考虑。本文认为,对冶金陶瓷的研究除有助理解作坊使用的技术,更有益于了解西汉时期一般作坊内部的生产组织情况。

关键词:技术选择;西汉铸铁作坊;陶范;鼓风管;炉壁

Abstract: Abstract: This article employs petrographic and SEM-EDX method to analyze casting moulds, tuyeres, and furnace fragments from an Early Western Han ironwork named Taicheng in Yangling, Shaanxi. Through these approaches, this article tries to reconstruct the selection and preparation process of raw material, or the so-called chaîne-operaire of metallurgical ceramic. Results show that the selection and preparation of raw materials demonstrate variations, probably due to the consideration of their specific functions, between these three types of remains. Even though Taicheng was a medium-small scale ironwork in Guangzhong during the Western Han period, workers were knowledgeable in the selection of materials based on types and showed a relatively high degree of specialization and labor-division coordination. Therefore, the paper casts doubt on the conventional idea that iron foundries like Taicheng should belong to household, family-based small-scale iron production sites. In addition, this study also suggests the study on metallurgical ceramic can improve our understanding not only about iron techniques but also the internal organization of labor in medium-small scale in ironworks.

Key words: Technological choice; Western Han iron foundry; cast molds; tuyeres; furnace fragment

一、引言

西汉时期生铁技术得到大规模发展,目前已发现并公布的制铁作坊数量众多,对冶炼技术^①、产品种类^②及相关的铁官管理制度^③等问题也有较充分的

讨论。陶范、鼓风管和炉壁(或炉衬)等冶金陶瓷的原料选择和制作技术,是熔炼和浇铸成功与否的关键。这几类冶金陶瓷所涉及的原料较为接近,基本都是不同粒径的砂和黏土。废弃的炉壁和鼓风管常见于一般作坊,以往研究虽简略讨论过这几类常见遗物

材料的来源^④,并指出汉代制铁作坊出土的炉壁原料多取自当地的黏土并掺入一定比例的砂,且根据砂含量不同还可为泥质、泥砂质和砂质等多个种类。但这些研究较少从显微和量化分析角度,讨论工匠如何筛选和配比原料,以制作满足不同功能的生产设备或工具。以往分析样品数量也较少,因此无法对比同一地点或者同一作坊内不同种类的材料,未能完全反映与陶土烧制相关遗物的技术全貌,也间接影响对工匠技术选择和不同的工艺技术研究。

本文提出要认识过去冶铁作坊生产的技术细节,需结合科技分析,对各生产环节的“技术选择”,即选料、备料和应用技术进行复原和研究^⑤。古代工匠如何选择不同材料和应用不同的技术进行生产,也与工匠管理组织甚至是人群来源的背景相关^⑥。因此,手工业生产的技术选择,既与生产环节相关,也能反映生产组织层面的诸多问题,值得更深入讨论。此外,由于过去汉代冶铁作坊发掘对象多是集中于资源丰富地区的大型作坊,分布数量更广的小规模制铁作坊,对全面理解汉代冶铁工业便有不言而喻的重要意义,但以往该类作坊公布资料不多^⑦,中小型铸铁作坊反映的技术在文献方面一直阙如,更不用说不同规模作坊技术特点的对比。陕西杨凌区郃城作坊是近年发现较重要的一批材料,年代主要是在西汉早期,性质较为确定且出土资料经过系统整理,作坊据推测,目前范围小于1万平方米,原来范围由于受到大规模的破坏,已无法估算,但从现存遗物的数量和遗迹密集程度的估算来看,规模应该不会太大。因此,郃城这批资料是近年来了解战国到汉代生铁技术发展相对重要的材料,本文将以此郃城出土的冶金陶瓷为材料,讨论其反映汉代铸铁作坊的情况。

二、研究方法

本文拟通过陶范、鼓风管、炉壁的矿物原料和矿物、黏土的比例的测定,探讨不同类别遗物的人为筛选与制作过程,以此了解不同种类的冶铸工具选料方式,以及同一大类之下不同类别遗物的选料程序。本次分析的62件样品是郃城铸铁作坊出土的陶范、鼓风管、炉壁(表一)。在取样时,首先进行形制分析,将陶范、鼓风管和炉壁(或炉衬)分成若干大类,之后再进行分析样品的挑选,以保证样品的代表性。陶范主要包括锄范、铎范和铎芯三类。鼓风管和炉壁包括泥质和砂质两大类。根据质地和表面情况,可将泥质鼓风管进一步细分。

表一 分析样品列表

种类	样品号	单位号	
铎范	71411	T1①Y40	
	71413	T1①Y39	
	71414	H1Y17	
	71222	H36①Y34	
	71225	H31①Y145	
	71229	H3⑤Y242	
	71231	T1①Y40	
铎芯	71223	H36①Y52	
	71226	H31②Y202	
	71230	H3⑨Y427	
	71423	T1①Y50	
锄范	71410	H1Y11	
	71412	H1Y12	
	71416	T1①Y54	
	71417	H1Y36	
	71418	T1①Y4	
	71419	H1Y19	
	71420	T1北Y19	
	71421	T1北Y18	
	71422	T1北Y14	
	71224	H36②Y15	
	71227	H3④Y98	
	71228	H3⑨Y200	
	71232	H31②Y22	
	草拌泥质鼓风管	71370	H19Y61
		71371	H16Y98
71372		H27Y27	
71373		H34Y92	
71374		H1Y62	
71375		H3①Y457	
71376		H1Y63	
71377		H36①Y141	
71378	H24Y38		
草拌泥拍印加工鼓风管	71379	H3⑨Y475	
	71380	H36Y128	
夹砂鼓风管	71381	H31①Y290	
	71382	H3④Y465	
	71383	H36Y132	
	71384	H7Y5	
	71385	H31①Y292	
	71389	H36①Y137	
薄胎夹细砂鼓风管	71386	H34①Y118	
	71387	H34①Y117	
	71388	H36Y133	
	71389	H36①Y137	
夹砂炉壁	71390	H34①Y122	
	71391	H3Y498	
	71392	H31Y338	

	71393	H36②Y162
	71394	H36②Y166
草拌泥炉壁	71395	H34①Y98
	71396	H28Y69
	71397	H1Y19
	71398	T1①Y21
泥质炉壁	71399	H27Y34
	71400	H27Y41
	71401	H34①Y125
	71402	H7Y67
	71403	H27Y33

通过统计和测量 62 个样品中的矿物及有机物种类,以及以数点计算样品中黏土、砂粒、属合料和空隙的比例,并选择部分样品进行成分分析,以确定其原料来源和配比方式的异同。研究方法是:1)对陶范和鼓风管样品制成薄切片进行矿相分析;2)根据 James Stoltman 建立的方法进行数点与砂粒测量分析,判断和量化不同种类遗物的材料选择;3)点算切片中砂粒、黏土和孔洞,复原原料的配比方式;4)利用扫描电镜能谱对样品成分进行分析。本次样品制备和矿相观察实验完成于香港中文大学人类学系考古实验室,成分分析在香港中文大学物理学系 JE-OLJSM7800F 电子显微镜下进行,能谱为 Oxford-NanoanalysisX-MAX50,分析条件为加速电压 10kv,部分样品成分分析结果见表二。

三、陶范的分析结果

本次分析了 7 件铍范、4 件铍芯和 13 件锄范。

铍范和锄范两类陶范的矿物组成较为接近。铍范矿物主要为石英,其次为长石和云母,还包括少量砂岩碎屑和磁铁矿,其中云母的数量较多,晶体的粒度较大,多为单晶晶体,部分菱角不明显。锄范矿物

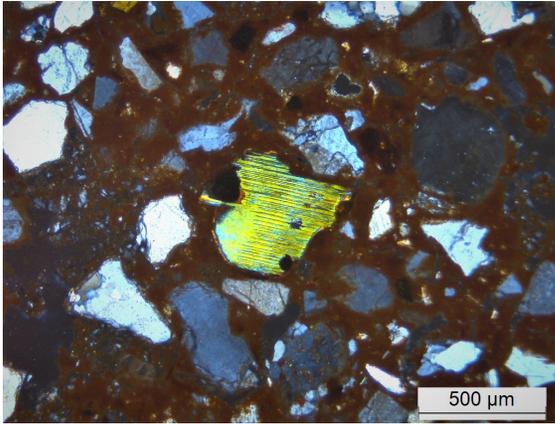
主要为石英,其次为长石、云母(图一),另有少量有机属合料(植物纤维)(图二)。这两类范中,石英砂粒为材料的主体,且分选度较好,铍范砂含量 64.2%,锄范为 71.4%。陶范材料中砂粒分布平均,黏土堆积紧密,未见大面积空隙和较大颗粒的属合料。由于砂粒粒径较大,分选度高,推测陶范制作原料很可能是河滩砂粒而非黄土中的砂粒或粉砂,在制作陶范时再将经分选的砂粒加入黏土混合而成坯料。如果这一推测可靠,汉代铸铁陶范主要制作方式便与商周时期铸铜陶范的“洗土去泥”有所不同。从包含物的情况来看,所有陶范均未见大颗粒方解石晶体,而且植物纤维或残骸也不多见,这一点也有别于铸铜陶范中加入石灰石或含钙原料的技术和做法^⑩。由于晶体和黏土间仍有较明显的边界,说明范身烧成的温度本身不会太高,商周时期陶范烧成温度过去有较多争论,但最近的证据则显示较低温度(低于 800 度)的看法较为合理^⑪,从岩相观察结果来看,铸铁陶范和常见铸铜陶范的烧成温度可能相差不大。

铍范和锄范两类陶范砂粒大小有别。铍范中砂粒最大径平均为 328 微米(图三),锄范则为 259 微米(图四)。总体而言,锄范与铍范的砂粒基本以中砂为主,并混有少量细砂及粗砂。但在制作时工匠对砂粒的粒目似乎进行过筛选,以制作不同类别陶范;铍范的原料明显含较大粒径砂粒,而锄范材料中砂粒的粒径明显小于铍范,应是再经筛选的材料。

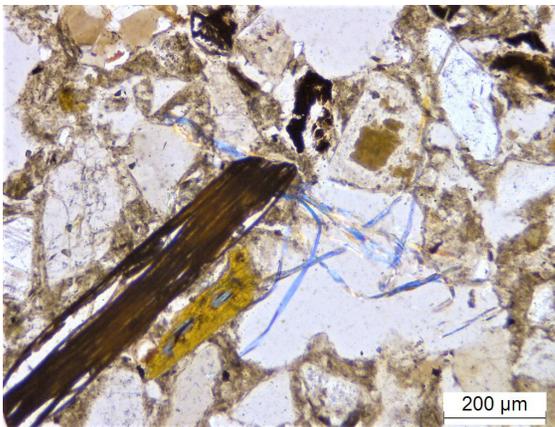
根据以往铸铜陶范分析的经验,芯和范原料一般差异较大,原因在于范要求较好的退让性能,芯则要求有较高的透气性能^⑫。邠城作坊出土的铍芯,原料的选择和配料和铍、锄范相比较,肉眼已能看出有明显不同。铍芯材料中 73.3%为砂粒,砂粒分选度也比较高,最大径平均为 51.8 微米(表三),砂粒明显细小,以粉砂为主,只混有少量细砂,从砂粒的尺寸

表二 部分陶范、鼓风管、炉壁的化学成分 (wt %)

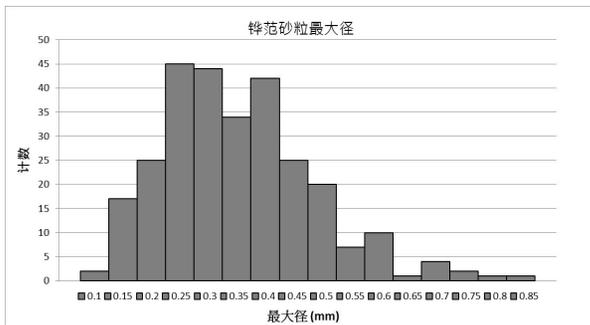
		Si	Al	K	Na	Fe	Ca	Mg	Cr	Ti
71223	铍芯	62.12	16.67	5.3	5.3	3.03	5.3	--	0.76	1.52
71230	铍芯	65.41	15.79	5.26	3.76	3.01	3.01	2.26	1.5	--
71410	锄范	66.26	12.51	5.71	2.67	8.07	3.13	1.66	--	--
71423	铍芯	62.61	12.51	4.82	2.94	6.72	8.28	2.13	--	--
71376	泥质鼓风管	55.94	20.12	12.13	1.84	6.16	1.86	1.95	--	--
71380	泥质鼓风管(有拍印痕迹)	39.92	20.22	5.29	--	25.79	1.52	6.87	--	--
71386	薄胎鼓风管	47.49	26.21	13.81	--	8.96	--	2.37	--	--
71396	泥质炉壁(含较多草拌泥像)	49.6	16.23	4.91	--	22.05	1.17	5.22	--	--
71399	泥质炉壁	61.1	16.9	17.87	3.48	0.25	0.31	0.08	--	--



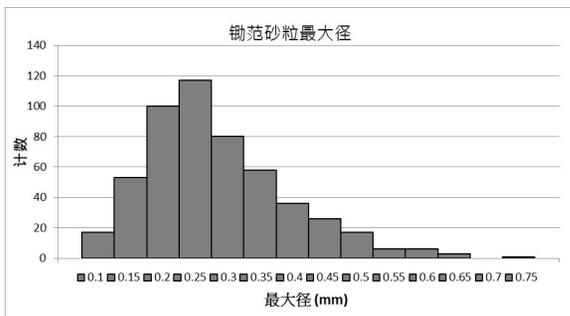
图一 铍范的长石与石英砂粒
71222(单偏光)



图二 铍范的植物纤维
71412(单偏光)



图三 铍范砂粒最大径直方图



图四 铍范砂粒最大径直方图

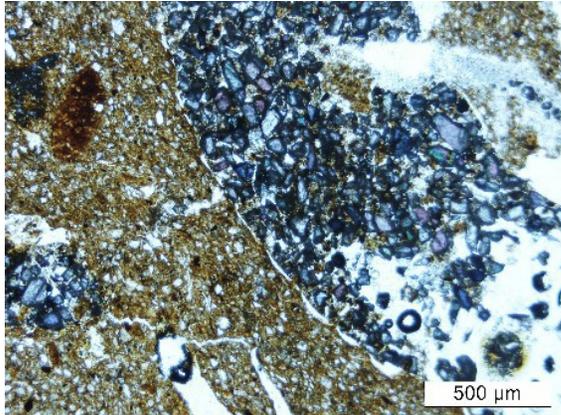
来看和晚商和西周时期的原料更为接近。由此可见，西汉时期范和芯所选用的砂粒大小和来源有明显分别。铍芯的原料主要是粒径在 40-50 微米的粉砂，如果把当地的黄土洗土去泥，得到的细粉砂便能满足制范的需要。由于原料的差异，当时工匠应从不同原料来源获取资源制作范和芯。不过，不论是那一种陶范，目前尚未见西周时期陶范范料分层制作的工艺现象。

郃城作坊铍芯的矿物组成同样也是石英、长石和云母，且长石的比例目测略高于铍范和铍范，但材料中不常见有机质属合料。从成分分析的角度来看，部分样品中钙的成分相对地高于铍范(表二)，不排除黏土中可能加入了含钙较高的材料，如蚌壳粉之类材料。由于芯的原料为粉砂，且砂的比例要高于铍范和铍范，因此范材料中小孔隙空间所占面积比例更大，且分布更为平均，这样的材料选择保证了铍芯的透气性，满足铸型中芯的技术要求。在西汉时期铸铁陶范和芯虽然都是砂质，但原料来源和分选方式不同：铍范和铍范可能以河道或河滩的砂粒为主要原料；铍芯则以经过淘洗以后的粉砂为主要原料。而且，铍和铍范原料砂粒的分选程度也有一定的区别，铍范整体上体积较大，使用较大的砂粒，可能和陶范需要较高的强度有关。

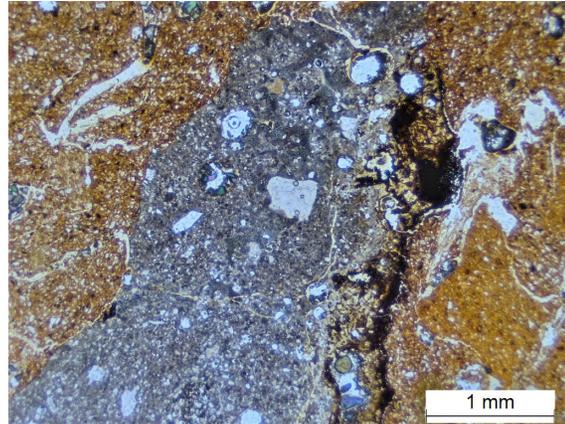
四、鼓风管的分析结果

本次分析的鼓风管样品包括泥质鼓风管 9 件、泥质鼓风管(外侧有拍印加工)鼓风管 2 件、夹砂类鼓风管 5 件及薄胎细砂鼓风管 4 件。因高温导致显微组织变化，取样时避开高温熔融部位。在郃城发现的砂质鼓风管经鉴定和对比，应是侧进式鼓风管，即从熔炉侧边向炉内送风，而泥质管可能是连接送风口砂质管以上的构件，但不排除为顶吹式管的残块。

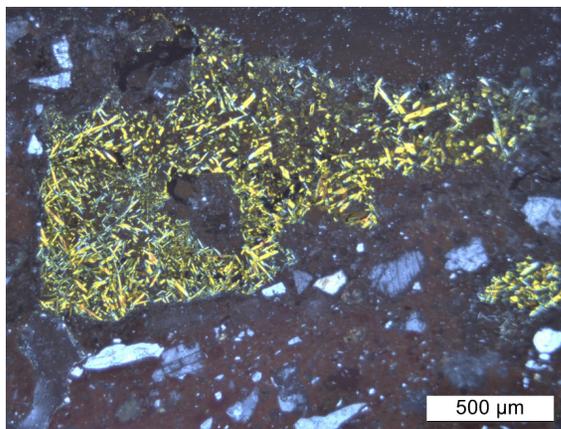
根据初步分析，泥质鼓风管和砂质鼓风管材料中多有石英、长石、云母、泥砂岩屑(图五)和有机质属合料，但薄胎细砂鼓风管则未发现长石或云母，只有颗粒较小的石英、泥砂岩屑和磁铁矿。和陶范不同的是，鼓风管中长石和云母含量相对较多，且有体积较大泥砂岩的碎屑残块。此外，在部分样品中还见到玄武岩一类的岩石碎屑(图六)，泥质鼓风管中则包含有植物属合料(图七)和熟料(grog)(图八)。熟料的加入有利提高透气性和材料强度，但这些熟料大小不一，边长由 0.5 毫米到 4 毫米皆有，熟料内的砂粒较草拌泥鼓风管小，大部分为粉砂，可能并非同类遗物。



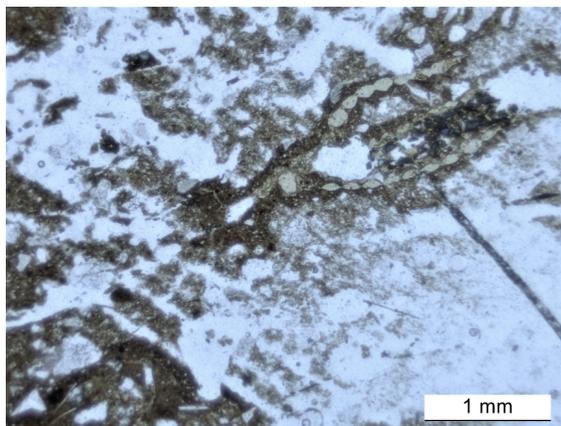
图五 泥质鼓风管的泥砂岩岩屑
71374(单偏光)



图八 泥质鼓风管中熟料
71373(单偏光)

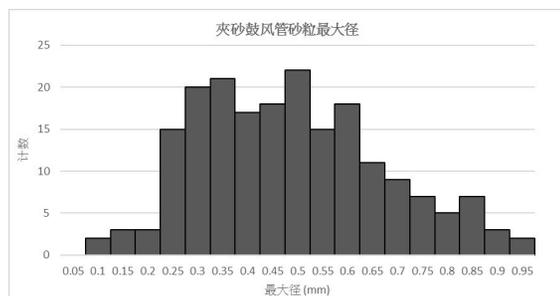


图六 泥质鼓风管的玄武岩岩屑
71371(正交光)



图七 植物纤维所做成的孔洞
71371(单偏光)

泥质鼓风管和砂质鼓风管的矿物成份大致相同,包含的岩屑个别最大径多大于1毫米(图五),砂粒周边也有较大的裂缝,孔隙主要是因受高温胎体收缩所致。但两类鼓风管不同之处在于,所有砂质类鼓风管均含大量的长石颗粒,而草拌泥鼓风管较少见长石。泥质鼓风管的砂粒主要为粉砂并混集有少量细砂,砂粒最大径平均为92微米,外侧有拍印加



图九 砂质鼓风管砂粒最大径直方图
(为方便对比,粒径大于1mm的颗粒不予显示)

工的鼓风管最大径平均为29微米,而砂质鼓风管平均高达468微米(图九,表三)。不同种类鼓风管不仅砂比例不同,砂粒也是大小各异。泥质外侧有加工痕迹的鼓风管及薄胎细砂鼓风管的砂粒最细小,基本上全为粉砂,且粉砂颗粒的比例很低。因此,泥质鼓风管原料基本可以确定为当地的黄土;相反,砂质鼓风管中砂粒径大且砂比例很高,主要原料则应是河砂。以往研究指出,黏土材料具有易成型但易熔融的特点,原料中加入砂粒和岩屑则可提高材料的耐热性、透气性和强度,加入有机属合料也能提高材料的气孔率^⑩。泥质鼓风管中有较多的植物属合料,同时也发现有较大粒径的砂粒和岩屑,由于砂、特别是粉砂的比例也高于北方地区黄土中粉砂的含量^⑪,因此泥质鼓风管应以黄土为原料,在备料时加入其他属合料以提高材料的耐热性和透气性。而带拍印痕迹的鼓风管类遗物砂粒的尺寸更小,基本上看不到大颗粒的岩屑,主要是以当地黄土为原料,没有加入砂粒的工序。

总结而言,泥质和砂质鼓风管的原料选择和加工工序,和陶范的制作应该存在很大区别。首先,陶范基本上是砂质,原料可能分别是砂粒和黄土,由严格分选的砂粒混合少量黏土制作而成。鼓风管的主

要原料虽然也是黄土和砂粒，但原料的分选似乎不如陶范般严格，黏土所占比例较高。其次，在其他包含的原料中，泥质鼓风管有较多的植物纤维，大小从0.1毫米到1毫米不等，除呈黑色长丝状，个别为大小均等与并列的孔洞，孔洞约长0.1毫米，部份孔洞被黏土填满。估计这些孔洞原来被某种植物纤维所填满，但因有机物腐化而消失，留下明显的孔洞。但陶范则甚少见到有机属合料。鼓风管的材料也多见粒径甚大的岩屑碎块，很可能在与黏土混合备料时适当加入了较大块的属合料以增加胎体的强度。最后，泥质鼓风管基体的铝含量较高，普遍高于20%（表二），有可能在备料时也加入了高铝材料；相反，陶范原料中铝含量一般较低。

五、炉壁的分析结果

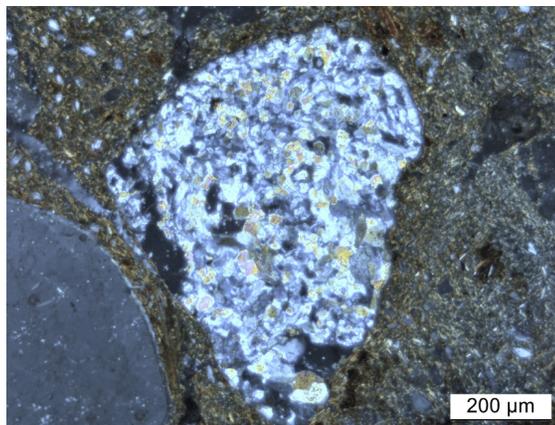
作坊出土炉壁主要为泥质和砂质两大类。本次分析的样品包括夹砂炉壁5件、草拌泥炉壁4件及泥质炉壁5件。取样原则与鼓风管相同。

夹砂炉壁包含的矿物除常见的石英砂粒外，还发现有长石、角闪石和云母，以及粒径较大的泥砂岩、砂岩（图一〇）和玄武岩的岩屑。夹砂炉壁的泥砂岩岩屑面积较小，部分颗粒边界并不明显，周边形成较大的空隙。较完整的砂岩岩屑，最大边长平均可达530微米。与砂质鼓风管相比，砂质炉壁虽有少量植物纤维痕迹，但在样品中并不常见，其有机物属合料的比例较鼓风管低。

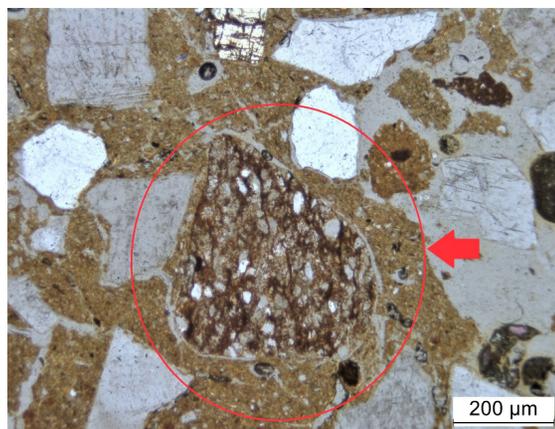
泥质炉壁中的矿物主要为石英、泥砂岩岩屑及少量有机物属合料，但矿物都较砂质炉壁细小。另外，泥质炉壁（草拌泥质）亦发现有少量磁铁矿及钛白粉，部分泥质炉壁中也发现有熟料（图一一）。

根据砂粒的尺寸来看，砂质炉壁的原料主要为中砂，但泥质炉壁主要为细粉砂，最大径在15-23微米左右（表三），这一类鼓风管砂粒周边的黏土因为热膨胀，出现较大空隙，薄片上可见大量呈条带状分布，空隙或孔洞一般平均占样品面积的10.9%左右（表三）。除去特大型的岩屑，夹砂炉壁砂粒边长平均为434微米（图一二，表三），属合料边长平均达1.18毫米，所用砂粒要粗于陶范材料，说明对于砂料而言，分选程度不及陶范。另外，砂质炉壁中包括有42.7%砂粒和5.4%的属合料（表三），即使两者相加起来，和陶范相比砂粒的比例仍然较低。

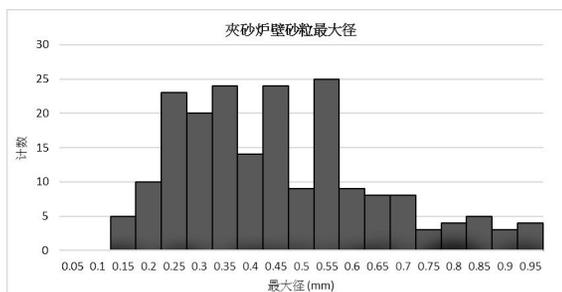
值得注意的是，成分分析显示炉壁材料中铝含量似乎也较高，占16%以上（表二），也高于比一般黄土^④，可能在备料时工匠刻意加入了高铝材料，以提



图一〇 夹砂炉壁的砂岩岩屑
71390(单偏光)



图一一 夹砂炉壁的熟料(黏土颜色与周围的有明显分别，留下一个因湿黏土烧干而出现的空隙环)
71390(单偏光)



图一二 砂质炉壁砂粒最大径直方图

高炉壁耐火度。因此，作坊出土的炉壁，从原料的来源到制作的配比，似乎和鼓风管具有一定的相似之处。当中，砂质鼓风管和砂质炉壁的材料总体上较为接近，可能使用由相同方法配制的坯料制作而成。相反，泥质炉壁和泥质鼓风管的原料选择和差异较明显。虽然主体应是当地的黄土，在制作时也有可能刻意加入含铝较高的材料，但泥质鼓风管材料中所含的砂粒粒度较大，而且还有较大的岩屑和熟料。相较之下，泥质炉壁材料所含砂粒基本以细粉砂为主，很

可能没有添加大颗粒的属合料,也没有添加熟料的工序。

六、讨论

郟城铸铁作坊尽管规模较小,但分析结果显示,三类冶金陶瓷各有不同的原料选择和工序过程,技术选择明确。陶范,砂质鼓风管和砂质炉壁的主要原料是砂粒,按现代矿物学的分类标准均属中砂砂粒,原料与渭河河滩或河床相关。从60年代美国的Corona卫星照片可知,郟城作坊的南部在20世纪60年代初已被渭河河道北移而破坏,因此作坊砂质原料甚为丰富。这说明西汉时期地方小作坊的选址除考虑原料的运输及与城址的远近距离外,砂质原料也是重要因素之一。获取原料后,工匠会根据需要对材料进行分选或再加入不同的属合料。由分析显示,砂质鼓风管和炉壁砂粒粒径明显大于陶范,表明陶范材料所要求的分选度应高于鼓风管和炉壁。砂质鼓风管砂含量均在42%左右,远低于陶范的64%和71%,因此,陶范材料中砂与黏土混合的比例,明显要高于砂质鼓风管和炉壁。砂质鼓风管的质地和陶范虽然较接近,但其砂粒最大径普遍大于陶范,分选度有明显区别,再加上有机属合料和熟料的添加,整套制作流程与陶范比较有较大区别。

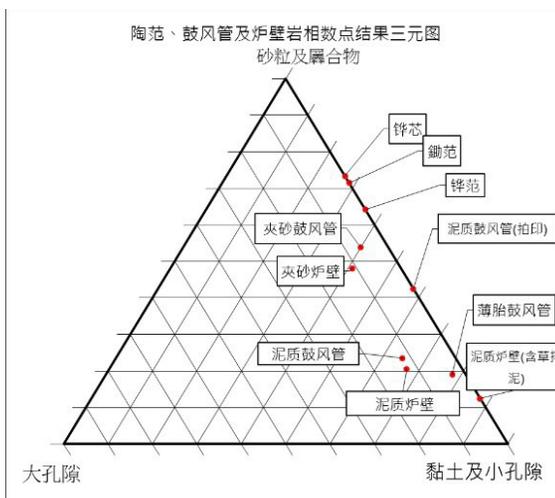
砂质鼓风管和炉壁在矿物成分和属合料虽然略有不同,但共性要高于差异,我们不排除当时工匠在备料时,实际上使用了同一批制作的坯料,属于协作分工生产(co-crafting)组织。黄土也是泥质鼓风管和炉壁的重要原料。这两种冶金陶瓷中细粉砂的比例都只有20%左右(表三),和一般黄土中粉砂的比例十分接近。但和砂质炉壁类似,在选料后有进一步的分选。从化学成分来看,泥质材料中铝的比例较高,镁和钙则偏低,坯料中应添加了高铝的耐火黏土一类材料。而且,在泥质鼓风管和炉壁中,都发现有有机物属合料和熟料。由此可看出,泥质鼓风管和炉壁在材料准备过程中也有较多相似之处,也有可能用于同批生产的原料。

对三类陶范原料选择的对比,显示出一定的配方差别,表明陶范的制作的工匠群中,也有进一步细致分工现象。锄范中的砂粒粒径相对较小,砂的比例较高;铍范的砂粒粒径较大(表三),且砂粒比例较低。制作陶范时,工匠应先对砂进行初步筛选,去除较大颗粒的岩屑后,便能制作铍范;再进行更为精细的分选,以挑选相对粒径更小的砂料来制作锄范。因此,工匠在制作时要先准备粒度差别较大砂粒和淤

土,并按照不同比例将砂粒和黏土配比,制作不同类别的陶范。

从功能来看,这种以石英砂粒为主要材料的陶范,对于批量制作器型简单且需要耐高温的铸铁陶范,应是较直接且有效的方法。在西汉时期,陶范的制作技术继承了商周时期的陶范工艺基础,主要的变化则为使用以石英砂颗粒为主的原料,以批量生产耐高温但对胎体强度和黏结力要求不高的陶范。由于石英砂粒的熔点高,更能满足生铁铸造时比铸铜更耐高温的要求。与铸铜陶范相比,铸铁花所铸之器物外型简单,生产的工具器型小,自然无需复杂的分范技术,铸型组合自然简单,像锄范即以双合范便可组成铸型,这一类陶范对胎体强度和黏结力的要求便可以不需过分讲究。而且铍范材料中砂粒粒径较大,可能与铍范一般外型较大,胎体要求的强度略高有关。

在作坊中,以中砂为原料的技术也应用于鼓风管和炉壁的制作也应用中等砂砾原料,但工匠应根据鼓风管和炉壁的技术要求,在选料和制作工艺和技术有所调节,显示出和陶范较大区别(表二、表三、图一三)。鼓风管和炉壁筛选的砂粒度大,属含有有机质和岩屑,材料中黏土的比例较高,质地较致密,而陶范中的孔隙较少,透气性较好,这种高黏土的配比应与材料要求更高的强度和黏合程度有关系。由于目前没有发现相关的熔炉残体,无法判断到底不同是代表不同的熔炉、还是同一熔炉或鼓风管不同部位差别。但是鼓风管和炉壁的材料中,黏土中铝比例甚高,甚至高于关中平原黄土中一般铝的含量。相反,铍芯含有较高的钙,但炉壁和鼓风管中钙的比例一律偏低,可能在芯的材料加入了含较高钙的属合料,这三类冶金陶瓷使用的黏土所加入的添加材料



图一三 陶范、鼓风管和炉壁岩相结果三元图

表三 各类遗物砂粒大小及比例

	砂粒最大边长均值(微米)	标准差	方差	变异系数	砂粒比例	大颗粒属合料比例	大孔洞比例	黏土与小孔洞比例
铎范	328	0.13	0.02	0.41	64.18	-	-	35.82
铎芯	52	0.04	0.001	0.73	73.33	-	-	26.67
锄范	259	0.11	0.01	0.42	71.44	-	-	28.56
泥质鼓风管	92	0.1	0.01	1.1	23.5	-	12.0	64.5
泥质鼓风管(外侧有拍印加工)	29	0.01	0.000	0.37	42.5	-	-	57.5
砂质鼓风管	468	0.19	0.04	0.41	42.25	11.6	6.1	39.95
薄胎细砂鼓风管	22	0.01	0.000	0.51	19	-	3.0	78.00
砂质炉壁	434	0.2	0.04	0.45	42.7	5.4	10.9	40.9
泥质炉壁(含较多草拌泥)	15	0.01	0.000	0.45	12.5	-	-	87.5
泥质炉壁	23	0.01	0.000	0.52	20.5	-	12.5	67.0

也有一定区别。

因此,分析所见原料和配比方式的最大区别,在于西汉时期炉壁和鼓风管的选材制作完全和陶范不同,肯定是由不同工序和技术生产所得。周文丽的研究指出,晚商时期孝民屯坩埚和熔炉的材质与陶范(面料)非常相似,原料一样都是黄土,只是坩埚和熔炉的耐火材料中还夹杂有植物纤维,燃烧后留下的孔洞便能提高隔热性能^⑤。但到了西汉以后,陶范,鼓风管和炉壁的基本材料获取方式和加工工序却差别甚大,不单原料来源更为细分,工序流程也有区别,而不同的技制选择表明生产更为专门化。原料中加入含高铝原料这一现象,更显示出作坊在获得原材料时并不能完全就地取材。查阅当代的地质矿物志^⑥,在渭河中段的河谷地带实际上没有耐火黏土的分布,要获取高铝的原料,作坊工匠可能需要专门运输耐火性能较高的黏土材料到作中。表明作坊最基本的生产设备原料,部分也是通过较长距离交通运输获取。

这种专门制作含较多砂粒且耐高温的材质,与商周时期的和铸铜陶范^⑦相比,所用的原料变得更粗糙,总体来看是符合中国古代陶范发展的基本规律。但郃城陶范的分析与《南阳汉代冶铁》和《汉代叠铸》中简单介绍过的陶范资料相比,也有其特殊之处。首先,温县烘范窑中车马器陶范以细砂粒度(270目)最多,其次是50-140目,砂比为88%,其中还有旧范粉和植物粉。而瓦房庄的陶范中,砂比为34.83-47.3%,砂的粒度多在50-140目(300-106微米)之间^⑧。由于介绍过于简单,记录中也无明确说明到底是铸造何种铁器之范,陶范中物质组成(如矿物属合料或草木灰)以及孔隙度也没有详细描述。但值得注意的是,

郃城出土锄范和铎范的含砂量,明显高于瓦房庄发现的资料,砂粒的尺寸也是明显高于温县叠铸的陶范。同时,除了锄范有少量的有机质属合料的证据外,铎范和铎芯都没有明确看出夹杂有植物纤维的痕迹。郃城陶范整体上砂粒比例高,黏土比例低,可塑性不高,甚至比同时期用于铸车马器的陶范用料更为粗糙。我们也许能大胆推测,郃城作坊因是铸造铁农具地方中小型作坊,工匠为了节省成本作坊,便可能选择使用更粗糙的砂粒为原料。我们希望随着以后更多资料的积累,能帮助判别到底郃城特点到底只是地方技术还是因工艺不同而选择不同的材料。

郃城作坊与其他汉代作坊的技术差异,还体现于砂质炉壁的材料。根据瓦房庄报告,炉衬筛选用了0.3~0.5厘米直径的砂粒和黏土混合而成,中层的耐火砖筛选用0.5厘米左右砂粒和黏土混合,砂用量较多;而炉基座底层的耐火材料,砂的粒度0.5-1.5厘米,砂的用量也较多^⑨。但是郃城作坊中的发现的砂质炉壁,除去颗粒较大的材料,大多数砂的粒度在300-500微米之间,在切片中也未见夹杂有炭颗粒,远不及汉代中期以后砂质炉衬所见砂粒的尺寸。在原料的制作上和西汉中期以后的瓦房庄不同,可能因地方作坊产量不需特别多,熔炉尺寸不大,无需使用大粒径的砂粒以制作强度较大的炉壁。因此,从作坊遗物分析可以判断,材料的选择既涉及作坊内部的分工协作,同时也体现了小作坊在地方环境中的各种制约。从已有材料已能初步看出,制作上原料选择和加工方式一定程度应和生产和管理组织有一定联系。过去也有研究指出,西汉早期的中小型铸铁作坊,大多数是家庭式小规模生产,主要针对本地市

场^⑨。从郅城资料来看,冶金陶瓷却显示出相对密集的劳动力要求和复杂的手工业生产分工组织。因此,对于炉壁和鼓风管的科技分析,将从微观的视角为汉代冶铁技术演进提供新的视角。

七、结 语:

西汉早期地方作坊原料的技术选择

本文以郅城作坊陶范、鼓风管和炉壁三大类材料为对象,了解其制作技术、原料选择和可能相关的组织与分工方式,尝试由微观的分析出发,窥探作坊可能存在的运作方式,为汉代铁器工业过去讨论尚有的不足之处提供新线索。

首先,这三大类冶金陶瓷的主要原材料虽然基本上为砂和黄土,但从原料的选择到分选和配比上,存在明显差异(表四)。陶范所见的矿物基本皆为单晶砂粒,且材料的分选度高,少见较大颗粒的粗砂(或属合料)或岩石碎屑,似乎是以河砂为原料可能性较高。虽然陶范、砂质鼓风鼓与砂质炉壁主要的矿物种类也为石英、长石与云母,且石英占砂粒的大多数,但鼓风管和炉壁砂粒除了呈单晶体矿物颗粒以外,一般还常见体积较大的沉积岩或火成岩碎屑的残块和多晶矿物。砂粒的大小尺寸明显要大于陶范,分选度较差,泥质鼓风管和炉壁则基本上以当地黄土再加入高铝的黏土。三类材料的选材和配比方式区别十分明显。

其次,陶范、鼓风管和炉壁的差异,显示出作坊根据情况,调节材料选择和配比以适应实际的需要。例如,陶范砂粒最大粒径比较均匀,而且砂含量最高。工匠当时应该考虑到制作表面相对光滑的铸铁陶范透气性和退让性的要求。同时,因为所铸铁器器壁薄,且铸型结构简单,结构强度便不用太高。而鼓

风管和炉壁则包括砂质和泥质两大类。砂质鼓风管和炉壁以砂为原料,但和砂质陶范的原料和制作不同,材料中含有较多黏土,有机属合料和较大的岩屑,除了要保证耐高温和透气性外,最主要原因是为了增强材料的黏合性和强度,以抵抗高温铁液等的冲击、侵蚀和炉内气氛变化的影响。而泥质鼓风管和炉壁虽然以当地黄土为原料,但是在材料却加入了含铝较高的黏土,以提高耐火性能。

第三,郅城作坊虽然规模较小,但从陶范和鼓风管的制作来看,作坊对原料的筛选和配比显示出作坊具有专业的劳动分工,作坊工匠根据不同的要求进行配比。陶范的配比方式和泥质炉壁和鼓风管不同。与砂质炉壁和鼓风管相比,原料的分选度和黏土的配比也有一定的区别。即使是泥质炉壁和鼓风管,在矿物来源方面也具一定的差异性。作坊中不单是按类对原料进行配比与制作,在同一类别之下,工匠也会根据需要,对每一小类进行调整。先不论到底三类材料是否由同一批工匠根据经验分别配比,但分析显示出对配比要求较精确的控制和掌握,也说明了郅城作坊能高效生产。郅坊这一类作坊的出现和大量布局,应该说是西汉时期铁器工业急剧发展的基础。即使是地方中小型作坊中,也能按照较严格的配比和筛选方式进行选料和备料,有系统的分工和专业化生产的认识。汉代制铁工业的发展肯定与这些地方性作坊较发达的分工有关。

最后,在技术上郅城显示出对战国作坊传统的继承,同时也和已知瓦房庄等较大型汉代铸铁作坊有区别的现象。值得注意的是,从长时段工艺技术的演进角度来看,郅城出土陶范以粒径较大的砂(例如河砂)为原料,和春秋-战国时期铸铜作坊已有的研究结果不同。然而,作坊砂质炉壁选材和筛选又与西汉中期以后的作坊有较大的区别。因此,郅城作坊体

表四 各类遗物矿物类别总结

	磁铁矿	石英	长石	云母	砂岩屑	泥砂岩屑	玄武岩屑	植物纤维	熟料
铎范	√	√	√	√	√				
铎芯		√							
锄范		√	√	√				√	
泥质鼓风管	√	√	√	√		√	√	√	√
泥质鼓风管 (外侧有拍印加工)		√	√	√		√		√	
砂质鼓风管	√	√	√	√		√	√	√	
薄胎细砂鼓风管		√				√		√	
砂质炉壁	√	√	√	√	√	√		√	√
泥质炉壁 (含较多草拌泥)	√	√				√		√	√
泥质炉壁		√				√			√

现的技术,似乎是承上启下的转折点,对郃城相关冶铸遗物的发现与研究,将推动战国以后古代中国铸铁技术进展的研究。我们希望本次对郃城作坊的分析结果,可为以后探讨西汉时期铸铁技术的对比研究积累更重要的基础材料。

附记:

本文为文物局文化遗产保护领域科学和技术研究课题—西汉时期关中地区冶铁工业的形成与特点,香港中文大学 Directgrant 支助项目 #4051063,及香港特别行政区政府 RGC—ECS 支助项目 #24607916 (The archaeology of iron technology and the sovereignty of the Han dynasty in its southern periphery)和文物保护科技优秀青年研究计划“田野考古与文物保护信息采集与定量处理技术研究”(No.2014226)的阶段性成果。写作过程得到周周田野工作坊诸位老师提供了启发性意见。于此并致以谢忱。

注释:

①a.李京华:《古代熔炉起源和演变》,《中原古代冶金技术研究》,第144—152页,中州古籍出版社,1994年;b.陈建立:《中国古代金属冶铸文明新探》,第236—239页,科学出版社,2014年。

②白云翔:《先秦两汉铁器的考古学研究》,科学出版社,2005年。

③李京华:《汉代大铁官职官管理体系的再研究》,《中原文物》2000年第4期。

④a.李京华:《南阳汉代冶铁》,中州古籍出版社,1995年。b.河南省博物馆《中国冶金史》编写组:《汉代叠铸:温县洪范窑的发掘和研究》,文物出版社,1978年。c.刘海峰:《中国古代制铁炉壁材料初步研究》,北京科技大学博士学位论文,2015年。

⑤Lemonnier, Pierre. The Study of Material Culture Today: Toward an Anthropology of Technical Systems. Journal of Anthropological Archaeology 1986 5(2):147—186.

⑥a. Stark, Miriam L. Social Dimensions of Technical Choice in Kalinga Ceramic Traditions. In Material Meanings: Critical Approaches to the Interpretation of Material Culture, edited by E. S. Chilton, pp. 24—43. The University of Utah Press, Salt Lake City, 1999; b. Stark, M. T., R. L. Bishop and E. Miksa. Ceramic Technology and Social Boundaries: Cultural Practices in Kalinga Clay Selection and Use. Journal of Archaeological Method and Theory 2000 7(4):295—331.

⑦湖南桑植朱家台(见张家界市文物工作队):《湖南桑植朱家台汉代铁器铸造作坊遗址发掘报告》,《考古学报》2003年第3期和陕西凤翔雍城南古城(陕西省考古所凤翔发掘队):《陕西凤翔南古城村遗址试掘记》,《考古》1962年第9期。

a. Stoltman, James B. A Quantitative Approach to the Petrographic Analysis of Ceramic Thin Sections. American Antiquity, 1989 54 (1):147—160; b. Stoltman, James B. Ceramic Petrography as a Technique for Documenting Cultural Interaction: An Example from the Upper Mississippi Valley. American Antiquity 1991 56(1):103—120.

⑨刘煜、岳占伟:《殷墟陶范的材料及处理工艺的初步研究》,《科技考古(第一辑)》,第227—236页,中国社会科学出版社,2005年。

⑩a.陈建立:《中国古代金属冶铸文明新探》,第186页,科学出版社,2014年;b. Liu, Siran, Kai Wang, Quanfa Cai and Jianli Chen. Microscopic study of Chinese bronze casting moulds from the Eastern Zhou period. Journal of Archaeological Science 40(5):2402—2414.

⑪周文丽、陈建立、雷兴山等:《周原遗址李家铸铜作坊出土冶铸遗物的分析》,陈建立、刘煜编:《商周青铜器陶范铸造技术研究》,第192—235页,文物出版社,2011年。

⑫a.谭德睿、黄龙:《中国青铜时代陶范铸造技术研究》,《考古学报》1999年第2期;b.刘煜、赵志军、白云翔、张光明:《山东临淄齐国故城汉代镜范的科学分析》,《考古》2005年第12期。

⑬岳占伟、荆志淳、刘煜等:《殷墟陶范、陶模、泥芯的材料来源与处理》,《南方文物》2015年第4期。

⑭雷祥义、岳乐平:《陕西关中晚更新世黄土—古土壤序列特征及其记录的古环境变迁》,《地质评论》1997年43卷第5期。

⑮周文丽、刘煜、岳占伟:《安阳殷墟孝民屯出土两类熔铜器具的科学研究》,《南方文物》2015年第1期。

⑯陕西省地方志编纂委员会编:《陕西省志(第四卷):地质矿产志》,陕西人民出版社,1993年。

⑰a.谭德睿、黄龙:《中国青铜时代陶范铸造技术研究》,《考古学报》1999年第2期;b.谭德睿:《侯马东周陶范的材料及其处理技术的研究》,《考古》1986年第4期;c.谭德睿、黄龙:《侯马陶范的科学研究》,中国考古学会等编:《汾河湾—丁村文化与晋文化考古学术研讨会文集》,第218—225页,山西高教联合出版社,1996年;d. Liu, Siran, Kai Wang, Quanfa Cai and Jianli Chen. Microscopic study of Chinese bronze casting moulds from the Eastern Zhou period. Journal of Archaeological Science 40(5):2402—2414.

⑱李京华:《南阳汉代冶铁》,第25页,中州古籍出版社,1995年。

⑲李京华:《南阳汉代冶铁》,第18页,中州古籍出版社,1995年。

⑳(日)影山刚:《中国古代の製鐵手工業と専売制》,《中国古代の商工業と専売制》,第71—309页,(日)東京大学出版社,1984年。