

doi: 10.3969/j.issn.1007-7545.2018.09.018

邯郸西炉上冶铁遗址初步考察研究

李延祥¹, 王荣耕^{1,2}, 潜伟¹, 陈建立³

(1. 北京科技大学, 北京 100083;
2. 河北科技大学, 石家庄 050018; 3. 北京大学, 北京 100871)

摘要:对邯郸市峰峰矿区西炉上冶铁遗址进行现场考察和科学分析,发现炉渣中残留有焦化煤块并含有较高的硫,钾含量比木炭为燃料的生铁冶炼渣低一个数量级,进而确认该遗址大规模使用了以煤为燃料的高炉冶炼生铁技术。通过古文献考证和伴生瓷片类型研判认定遗址的年代为元代,显示邯郸地区在元代存在以煤为燃料的官营冶铁业。煤非常有可能是先行烧制成焦炭再作为燃料用于生铁冶炼。

关键词:冶金考古;西炉上遗址;冶铁渣;煤;焦炭;元代

中图分类号:K878 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-7545(2018)09-0079-08

Primary Investigation on Xilushang Iron Smelting Site in Handan of Hebei Province

LI Yan-xiang¹, WANG Rong-geng^{1,2}, QIAN Wei¹, CHEN Jian-li³

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;
3. Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Xilushang iron smelting site with slag heap of large scale was confirmed in Yuan Dynasty (AD 1271-1368) by field and literature surveys. The slag belongs to byproduct of furnace operation according to its form and size. Many big agglutinates are mixed with slag, ores, limestone and coal nuggets in the form of coke. The slag containing low potassium and high sulfur indicates coal as the original fuel. Coal is probably roasted first to produce coke and then used for iron smelting.

Key words: archaeometallurgy; Xilushang site; iron slag; coal; coke; Yuan Dynasty

河北省邯郸地区地处晋冀豫三省交界地带,拥有丰富的煤铁资源,是中国古代重要的冶铁基地,拥有丰富的古矿冶文化遗产资源。近年来作者等开展了该地区的冶铁遗址调查研究工作,陆续发现了多处遗留至今的冶铁遗址,本文报道的是其中的西炉上遗址的初步研究结果。

1 遗址状况

西炉上遗址位于峰峰矿区彭城镇西侧 3 km 处炉上村西北、沙果园村东北、滏阳河一支流东岸

(图 1),在长约近千米的范围内普遍存在炉渣堆积,1958 年以来曾有大量炉渣、矿石被挖走,但是遗留量仍然可观,目前仍可在遗址北部见有约 500 m 长的炉渣集中堆积,平均厚度约 5 m(图 2)。大量融化良好的炉渣呈块状玻璃态,另有相当数量融化不良炉料烧结物,其大者块径可达 1 m 以上(图 3),其中夹杂有白色的石灰石、未反应完的煤块(已焦化)(图 4)、铁矿石颗粒等。同时也采集到遗留的铁矿石。在炼渣堆积中和附近地表采集到数量较多的瓷片(图 5)。

收稿日期:2018-04-25

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(51374031)

作者简介:李延祥(1962-),男,辽宁调兵山人,博士,教授。



图 1 西炉上等冶铁遗址及与相关铁矿、煤矿分布

Fig 1 Location of Xilushang site and nearby iron or coal mines



图 2 西炉上遗址炉渣堆积

Fig 2 Slag heap at Xilushang site



图 3 西炉上遗址所见大块烧结炉料

Fig 3 Big agglomerates mixed with slag at Xilushang site

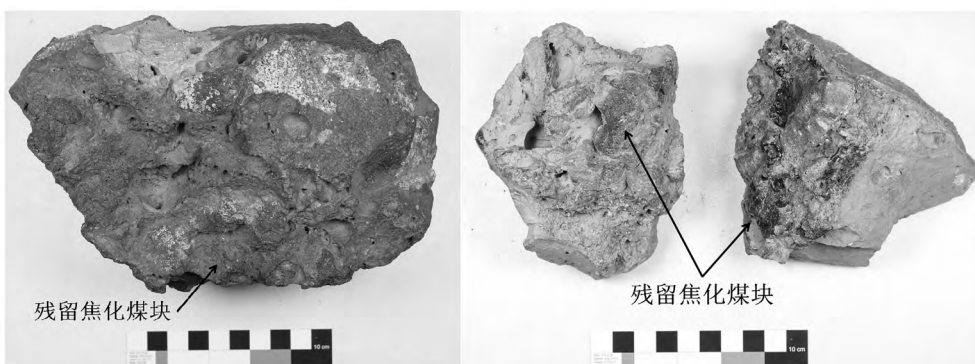


图 4 西炉上遗址含煤炉渣照片

Fig 4 Slag nugget contained coal as coke at Xilushang site

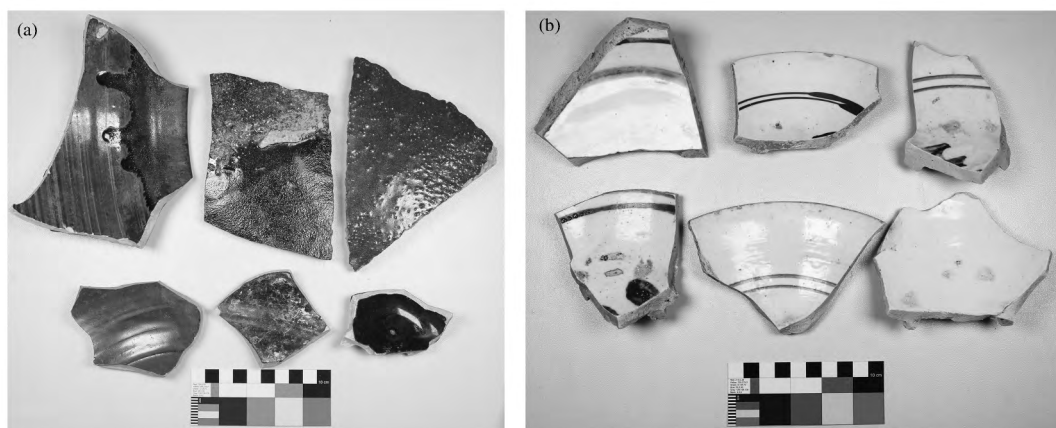


图5 西炉上遗址采集的彩色瓷器残块(a)和白色瓷器残块(b)

Fig 5 The colored porcelain fragments (a) and white porcelain fragments (b) at Xilushang site

2 检测分析

对西炉上6个渣化良好的玻璃态炉渣样品进行了扫描电镜观测。样品经清洗、截取、镶样、打磨、抛光、光学显微镜初步观察后喷碳,使用JSM6480LV型扫描电子显微镜及配备的Noran System Six型能谱仪对炉渣基体成分及含铁硫金属颗粒进行无标

样定量分析,炉渣基体成分见表1。各样品中皆发现数量较多、粒度不一的圆滴状铁颗粒、被硫化亚铁包裹的铁颗粒与单独存在的硫化亚铁颗粒,典型的被硫化亚铁包裹和单独存在的硫化亚铁颗粒见图6和图7(为方便起见,各图中标注并叠加了各分析点的能谱图)。

表1 西炉上遗址炉渣样品主要成分

Table 1 SEM-EDS analysis on matrix of slag samples of Xilushang site

样号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	/%
XL1	0.36	0.66	14.36	53.86	0	0	0.43	25.70	0.88	0.50	3.24	
XL2	0.36	0.70	14.30	49.29	1.52	0	0.65	25.07	0.83	0.53	5.36	
XL3	0.35	0.54	15.55	48.58	1.26	0	0.50	30.68	0.89	0.62	1.02	
XL4	0.85	0.64	14.02	50.69	1.52	0	0.54	28.74	0.95	0.43	1.62	
XL5	0.51	0.51	12.88	46.29	0	0	0.14	36.33	0.72	0.55	2.08	
XL6	0.65	0.84	13.10	48.71	0	0	0.18	33.87	0.16	0.80	1.67	
平均	0.51	0.65	14.04	49.57	0.72	0	0.41	30.07	0.74	0.57	2.50	

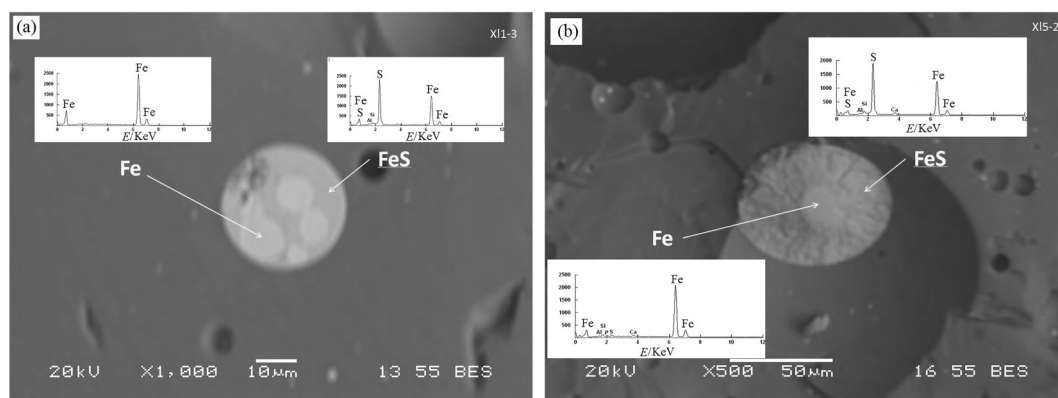


图6 样品XL1(a)和XL5(b)中被硫化亚铁包裹的铁颗粒

Fig 6 The iron prill surrounded by ferrous sulfide in sample XL1 (a) and XL5 (b)

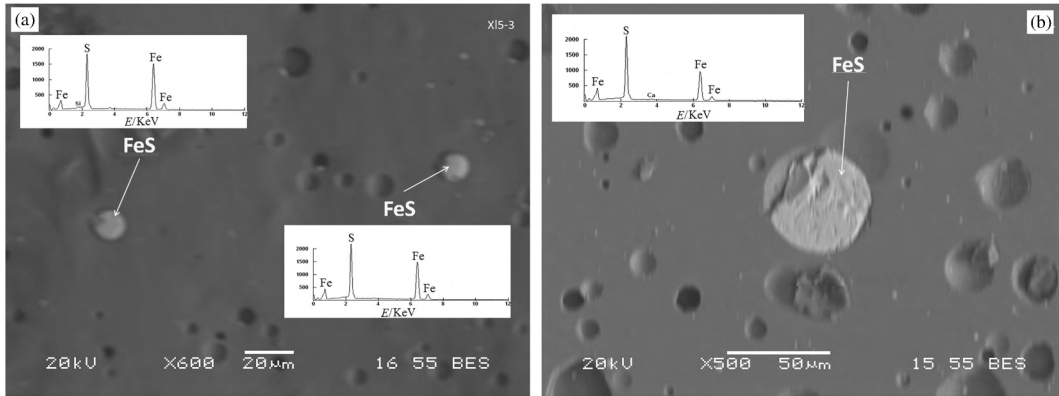


图7 样品 XL5(a)和 XL6(b)中单独存在的硫化亚铁颗粒
 Fig 7 The alone ferrous sulfide prills in sample XL5 (a) and XL6 (b)

3 讨论

3.1 年代判断

在炼渣堆积中发现的瓷片,经多位考古工作者依据类型学研判,除少数几片属宋代钧瓷外,皆为典型的元代磁州窑瓷片,据此可判断西炉上冶炼遗址年代为元代。

关于元代邯郸冶铁的文献记载较为丰富。元人王恽(1227—1304)在《省罢铁冶户》中说:“窃见燕北、燕南通设立铁冶提举司大小一十七处,约用煽炼人户三万有余,周岁可煽课铁一千六百余万。至元十三年(1276年)复立运司以来至今官为支用,本货每岁约三五百万斤,况此时供给边用,虽所费浩大,尚不能支绝,为各处本货积垛数多,其窥利之人用官司气力收买,其价不及一半,当时既是设立提举司煽炼本货以备支持,除支外止合存留积垛以备缓急,今来却行尽数发卖。窃详此事亏官损民,深为未便。今来止合依验旧日有名曾煽炉座存留三五处依例兴煽,据(具)煽到本货,除支持外尽数存留,积垛并不许发卖外,近年新添去处悉行停罢,将所占百姓分拨所属州县,依例当差,仍许诸人认办课额,兴煽小炉,或抽分本货,或认办钞数,临时定夺,如綦阳铁官中统二年(1261年),省部已曾将冶户差发,比较岁炼铁货数甚争,悬以此罢去,其便与否,乞追照元卷备见其详。”^[1]

王恽对綦阳冶铁做过统计,“今切见各处铁冶拨出户计设立头目管领,周岁额办铁货,令人户常川煽炼纳官,官民两便,今略举綦阳并乞石烈、杨都事、高撒合所管四处铁冶,见分管户九千五百五十户,验每户包钞四两,计核钞七百六十四定。今总青黄铁二百四十七万二千六百九十三斤半,比包钞亏官二百九

十五定二十六两六钱半。及其人户俱漫散住坐,每遇秋冬煽炼,逐旋勾集,往复人难,岂为官民有辨。如将上项户计罢去当差,许从诸人自治窑冶煽炼。据官用铁货给价如买,纵是官民两便。据此合行具呈,伏乞御史台照样施行,须至呈者。

綦阳:户二千七百六十四户,每户四两,计钞一百二十一锭单六两;办铁七十五万斤,每十斤价钞一钱,计钞一百五十定。

乞石烈:户一千七百八十六户,每户四两,计钞一百四十二定四十四两;办铁二十六万斤,每十斤价钞一钱,计钞五十二定。

杨都事:户二千户,每户四两,计钞一百六十定;办铁五十三万二千三百三十三斤半,每十斤价钞一钱,核一百六定二十三两三钱半。

高撒合:户三千户,每户四两,计钞二百四十定;办铁九十三万三千三百四十斤,计钞一百六十定。内青铁五十三万五千三百四十斤,每十斤价钞一钱,计钞一百单六定三十三两四钱;黄铁四十万斤,每十五斤价钞一钱,计钞五十三定一十六两六钱。”^[2]

《元史·本纪第十五·世祖十二》记载:至元二十五年(1288年)“癸酉,以河间等路盐运司兼管顺德、广平、綦阳三铁冶”。元代广平为路治,初称邢洛路,后改洛磁路,再改广平路,辖一司、五县、二州,即录事司、永年县、曲周县、肥乡县、鸡泽县、广平县、磁州(下辖滏阳、邯郸、武安、成安四县)、威州(下辖洛水、井陘二县)。当时邯郸武安一带归广平管辖。

元代苏天爵(1294—1352)《滋溪文稿》卷十六“真定杜氏先德碑铭”中记载有:“顺德府君之兄曰瓊;弟曰瑛,臨水鐵冶管勾。”^[3]

在峰峰矿区响堂山风景区黑龙洞有一元代碑

记,其落款为“大德五年(1301年)秋七月朝列大夫广平彰德卫辉等处铁冶都提举东昌杨溥题。”^[4]

《元史·食货二》记载:“在顺德等处者,至元三十一年(1294年),拨冶户六千燔焉。大德元年(1297年),设都提举司掌之,其后亦废置不常。至延祐六年(1319年),始罢两提举司,并为顺德广平彰德等处提举司。所隶之冶六:曰神德,曰左村,曰丰阳,曰临水,曰沙窝,曰固镇。”据朱建路考证,“左村”应为“石村”、“丰阳”应为“綦阳”^[5]。

据《明太祖宝训》卷四记载:洪武十五年(1382年)“五月丙子,广平府吏王允道言:‘磁州临水镇地产铁,元时尝于此置铁冶都提举司,总辖沙窝等八冶炉丁万五千户,岁收铁百万余斤,请如旧置炉冶铁’。太祖曰‘朕闻治世天下无遗贤,不闻天下无遗利。且不在官则在民,民得其利,则利源通,而有益于官;官专其利,则利源塞,而必损于民。今各冶铁数尚多,军需不乏,而民生业已定。若复设此,必重扰之,是又欲驱万五千家于铁冶之中也’。杖之,流海外。”此事在《明史·本纪》卷三记载为:“丙子,广平府吏王允道请开磁州铁冶。帝曰‘朕闻王者使天下无遗贤,不闻无遗利。今军器不乏,而民业已定,无益于国,且重扰民。’杖之,流岭南。”

明初洪武年间高巍(辽州即今左权县人,1354—1402,1382年入太学,后任前军都督府左断事)《开铁冶疏》提出^[6]:“且以臣邻境所有言之,今在河南之北、北平之南、山西之东、山东之西旧有八冶,曰临水、曰彭城、曰固镇、曰崔炉、曰祁(綦)阳、曰山嘴儿、曰沙窝、曰渡口。询之故老,言在元时设立总司提督掬取,曰万贯。例禁民间,不敢私贩,此元之旧弊。今三布政司地面农民多缺利器,使自扇取,许纳课程,犹且不敢。以臣愚见,以产铁去处,行移文榜,如有丁力之家,或两户三户五户起炉一座,矿炭随便所取。国家每月课收钞贯,止征铁数,易换粟帛,许民与贩,如此上济国用,下便农器,庶不弃山泽自然之利也。臣昔经过矿炭之厂,计矿炭之利而兴贩之,实得军国器用之大利也。”雍正十一年(1733年)编撰的《辽州志》中全文收录了《开铁冶疏》,但文末所附“上嘉纳之”四字显系《辽州志》编纂者所加,其所本应是同为《辽州志》所录明代史官陈仁锡(1581—1636)撰写的《高司马传》称高巍“屡上疏陈垦荒田、抑末技、开铁冶、慎选举、惜名器(爵)数事,上嘉纳之”。《辽州志》也收录了高巍的《上高皇帝垦荒田疏》、《慎选举惜名器疏》、《抑末技疏》等^[6]。但《明史·高巍传》中未提及《开铁冶疏》及朱元璋的态度,仅

称高巍“由太学生试前军都督府左断事。疏垦河南、山东、北平荒田。又条上抑末技、慎选举、惜名器(爵)数事。太祖嘉纳之。”清代修撰的《明史·高巍传》作者一定知道明代史官陈仁锡的《高司马传》,高巍给朱元璋的其它建议都提到了,唯独不提开铁冶之事,当系查证出这条建议未被朱元璋采纳而舍弃。

从上述有关记载可知,邯郸地区元代确有大规模官营冶铁活动,明代并未恢复官营,民营冶铁也不能肯定,即使存在也不可能形成西炉上遗址之类的大规模遗迹。

3.2 冶炼与燃料属性

西炉上遗址的田野迹象和炉渣科学检测都指向了使用煤以高炉冶炼生铁。

第一,西炉上遗址炉渣堆积中发现数量较多的带有残留煤块(已焦化)的炉渣或炉料烧结物(图4),显示冶炼使用了煤做燃料。

第二,西炉上遗址虽然有后期破坏,遗存炉渣堆积量仍然很大,显示其冶炼规模巨大。从遗留炉渣及大块炉料烧结物的形貌可以判定其为高炉排放渣。一般熔铁工序不可能排放如此规模的炉渣。

第三,炉渣的科学检测显示其为硅钙系炉渣,其中的氧化钙平均含量为30%,与同一地区经济村遗址的炉渣成分相近,属于典型的生铁冶炼渣,说明在冶炼过程中添加了石灰石作为助熔剂,与现场考察在炉料烧结物中发现有未反应完的石灰石残留的事实相符。

第四,西炉上遗址炉渣中检出大量既与铁颗粒共存的、也有单独存在的硫化亚铁,显示入炉的炉料中有较多的硫,平均含SO₂高达0.72%(表1)。使用同类铁矿石的西炉上遗址附近的早期炼铁遗址如经济村遗址炉渣中未检出有硫化亚铁(该遗址¹⁴C年代测定为535—635AD,95.4%置信度),平均含SO₂仅为0.09%(表2)^[7],表明西炉上遗址炉渣中的硫应来自燃料而非铁矿石。武安地区铁矿以磁铁矿为主,含硫量很低。河北邯郸煤中硫含量为0.81%^[8]。由此推断西炉上遗址使用燃料为煤,与现场考察发现许多含煤(焦化)炉渣及炉料烧结物的事实是一致的。

第五,西炉上遗址的炉渣含钾量明显偏低,其K₂O含量平均为0.41%,远低于使用木炭炼铁的经济村炉渣的K₂O含量(平均2.90%,表2)。使用同类渣型以木炭为燃料冶炼生铁的山东临淄故城中20个炉渣K₂O含量在1.63%~4.84%,平均3.04%^[9]。

木炭与煤在钾含量上有很大差异。一般草木灰含钾量 6%~12%，而峰峰等地的煤灰含钾量皆不

超过 1%(表 3)^[10]。西炉上遗址炉渣的低钾含量也是使用煤作为燃料的另一有力证据。

表 2 经济村遗址炉渣样品平均成分

Table 2 SEM-EDS analyses on matrix of slag samples of Jingjicun site

样号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO
JJ1	0.79	1.87	9.83	46.64	0.30	0.21	2.83	34.34	0.59	0.33	1.77
JJ2	0.71	1.72	10.48	41.82	0.32	0	2.66	38.66	0.65	0	0.77
JJ3	0	1.37	10.24	46.04	0	0	3.07	35.43	0	0	3.31
JJ4	0	1.86	9.46	45.79	0	0	2.74	34.89	0.71	0	4.08
JJ5	0.77	2.03	9.30	46.33	0	0	2.77	34.97	0.50	0.46	2.37
JJ6	0.92	2.04	13.25	45.71	0.26	0	2.91	32.67	0.62	0.37	0.74
JJ7	0.75	2.13	12.54	44.18	0	0	2.90	35.82	0.61	0.13	0.42
JJ8	0	2.24	8.20	47.73	0	0	2.92	33.81	0	0.79	3.79
JJ9	0.75	2.90	10.76	48.98	0	0	3.80	28.81	0.95	1.04	1.35
JJ10	0.70	2.62	8.73	47.26	0	0	2.41	30.92	0.48	0.86	5.60
平均	0.54	2.08	10.28	46.05	0.09	0.02	2.90	34.03	0.51	0.40	2.42

表 3 邯郸峰峰等煤矿灰分

Table 3 The content of coal ash of Handan and so on

煤矿名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₂	K ₂ O	Na ₂ O
峰峰薛村	54.12	28.69	4.40	1.04	4.20	1.07	1.42	0.38	1.19
峰峰小屯	56.65	27.92	5.29	0.94	3.56	0.58	1.04	0.24	3.12
峰峰大淑村	46.94	38.80	2.45	0.94	3.63	0.61	1.50	0.26	1.62
山西常村	41.89	36.14	4.51	1.42	4.44	2.64	4.39	0.09	1.86
山西阳泉	50.79	38.42	3.19	1.36	2.00	0.88	1.36	0.62	1.05

需要特别关注的是西炉上遗址使用的煤是否先行经过了焦化,亦即使用了焦炭。焦炭孔隙度均匀、强度高于煤,更适合高炉冶炼生铁,因此直到现代都是高炉冶炼生铁的燃料。硫在煤中主要以黄铁矿(FeS₂)的形式存在,黄铁矿受热分解为硫化亚铁(FeS)和单质硫(挥发),因此普通炼焦过程理论上脱硫率只有 50%,现代炼焦脱硫率为 40%,土法炼焦脱硫率可能更低,因此古代使用焦炭炼生铁可能同样会出现硫含量较高的炉渣。西炉上遗址炉渣中残留煤块呈焦化状,可能是高炉高温作用的结果,不能依此认定就是使用了焦炭。但必须注意到我国民间有久远的土法炼焦历史,峰峰矿区也有炼焦技术存在的相关考古证据。1957 年发掘的峰峰矿区的磁州窑主要遗址——观台窑址就发掘出炼焦炉址三座,年代为宋到元^[11]。考古直接发现最早的焦炭的报道是山西稷山县马村金代砖墓的 M5 和 M8 的尸床下堆满“煤和焦炭,各约五百市斤”,其年代不晚于金大定二十一年(1181 年)^[12]。上述考古发现显示西炉上等遗址完全有条件使用焦炭来炼铁。

此外,《元史·食货志二》也载有“凡铁之等不一,有生黄铁,有生青铁,有青瓜铁,有筒铁。”前文引

用的王恽相关文献直接提及元代邯郸生产青黄铁,其中的青铁价格每十斤价钞一钱,黄铁价格是每十五斤价钞一钱,后者是前者价格的三分之二。按这些记载判断,王恽所记录的青铁、黄铁应是《元史》所记的生青铁、生黄铁,表明元代存在两种生铁,其中的价格较高的生青铁应是以木炭炼成的生铁,生黄铁应是以煤(焦炭?)炼成的生铁,后者因为含硫高质量差而价格比前者低三分之一。结合上述文献记载,可知元代其它地方也存在用煤(焦炭?)炼铁,而邯郸同时也存在用木炭炼铁。《元史》提及的“青瓜铁”、“筒铁”所指为何尚不能从文献判定,可能指的是生铁炒炼成的钢和熟铁,提示邯郸地区还应存在炼钢遗迹,特别是煤(焦炭?)所炼生(黄)铁如何实现脱硫炒炼更值得进一步研究。

3.3 意义

冶铁用的燃料是冶铁技术的重要组成部分。中国始用煤炭炼铁的具体时间,因为缺乏明显的、足够的证据,目前国内外学术界尚有争议。

冶铁过程可分为多种方法多种工序。以煤为燃料能够实现以下过程:用高炉冶炼生铁、用高炉熔化生铁、用坩埚冶炼生铁、用坩埚熔化生铁、锻炉内加

热锻打铁器等。其中以煤为燃料使用高炉冶炼生铁是关键问题。

古代文献中与用煤炼生铁的相关记载较少,北魏郦道元《水经注》引《释氏西域记》:“屈茨(龟兹)北二百里有山,夜则火光,昼日但烟,人取此山石炭,冶此山铁,恒充三十六国用”常被用来作为魏晋时期用煤炼铁的证据。龟兹所在的库车县多处古代冶金遗址经检测也未见有明确的古代用煤的证据。因此《释氏西域记》的上述记载可理解为当时人们从龟兹北边的山里既开采煤,也开采铁矿用于冶炼,但未必能解释成用此山煤冶炼此山铁矿,因此这段备受关注的记载在目前没有考古实物与科学检测明证的情况下还不能被认定为用煤冶炼生铁的准确记载。

另一则与用煤炼铁相关的文献就是广为人知的苏轼的《石炭诗》。该诗之序“彭城(徐州)旧无石炭,元丰元年(公元1078年)十二月,始遣人访获于州之西南白土镇之北,以冶铁作兵,犀利胜常云”明显指出了用煤冶铁,但是否指以高炉用煤冶炼生铁尚难确认。诗中的“炼玉流金见精悍”既可解释成用煤以高炉冶炼生铁,也可解释成用煤熔化石铁,或者用煤以坩埚冶炼生铁。“北山顽矿何劳锻”也不能明确指向用煤炼生铁还是用煤锻铁,“为君铸作百炼刀,要斩长鲸为万段”更属文学夸张,“百炼刀”从来都是“锻”而非“铸作”。诗人以万丈豪情记载了徐州在其主导下发现并开始大量开采煤炭的事实,但对冶铁过程的关键工序分辨不清,是否直接指向了用煤以高炉冶炼生铁还需对相关遗址遗物的科学检测来佐证。

河南巩县汉代铁生沟遗址^[13]、郑州古荥遗址出土有煤渣、煤块和煤饼^[14],但是这些遗址出土的铁器中硫含量却很低^[13,15],因此是否是用煤炭进行冶铁,尚有争议。

河南鲁山望城岗汉代遗址发现过含有硫化亚铁的铁器,经过¹⁴C测定其中的碳是死碳,应该是来自于煤炭,该铁制品的金相组织证明该样品是铸铁脱碳钢,因此又排除了后处理渗碳时进入碳的可能性^[16]。对宋代高含硫铁钱开展的¹⁴C年代测定则确认了多枚含有死碳(来自煤)^[17]。上述两项科学检测虽然都揭示出铁器中有来自于煤的碳信号,但同样不能确认煤被用来以高炉冶炼生铁。

因此西炉上遗址是目前唯一的证据充分的以煤为燃料用高炉冶炼生铁的遗址。在峰峰矿区和村镇炉渣埝(在西炉上遗址北约11 km处,见图1)也检测到了与西炉上完全相同的迹象,表明与西炉上遗

址性质相同的遗址可能有多处。

西炉上遗址附近数千米范围检索到有多处煤矿和石灰石矿,但未见铁矿。西炉上遗址最近的铁矿是著名的磁山矿,该矿距西炉上遗址约17 km、炉渣埝遗址5 km。磁山矿产出的矿石很可能南运至炉渣埝遗址、西炉上遗址,按以矿就煤的模式进行冶炼。

4 结论及遗留问题

1)西炉上遗址使用的燃料为煤,冶炼过程添加了石灰石做助熔剂,表明邯郸地区在元代实现了大规模使用煤为燃料用高炉冶炼生铁。

2)元代邯郸的煤极可能被先行烧成焦炭(即存在炼焦技术)再作为燃料冶炼生铁,但需更多的田野资料和科学证据来确认。高炉的形制大小、所炼生铁的具体含硫量、煤(焦炭)炼生铁的炒炼问题等都有待更深入的研究揭示。

致谢

本文得到河北省文物考古研究所张文瑞所长、邯郸市文物考古研究所乔登云主任、磁州窑历史博物馆张林堂馆长、北京大学文博考古学院秦大树教授的指导,特此感谢!

参考文献

- [1] 王恽. 省罢铁冶户[M]. 秋涧集,卷90,元人文集珍本丛刊,第2册.台北:新文丰出版公司,1985:467.
- [2] 王恽. 论革罢拨户兴煅炉冶事[M]. 秋涧集,卷89,元人文集珍本丛刊,第2册.台北:新文丰出版公司,1985:452.
- [3] 苏天爵. 真定杜氏先德碑铭[M]. 滋溪文稿,卷十六,文渊阁四库全书,第一二一四册.台北:台湾商务印书馆,1983:192.
- [4] 张林堂. 响堂山石窟碑刻题记总录[M]. 北京:北京外文出版社,2007:274.
- [5] 朱建路. 元代直隶省部地区铁冶研究[J]. 中国经济史研究,2016(5):85-92.
- [6] 高巍. 开铁冶疏[M]. 辽州志,卷6,中国方志丛书,清雍正十一年石印本(影印).台北:成文出版社有限公司,1976:647-676.
- [7] 李延祥,王荣耕. 河北邯郸武安市经济村炼铁遗址考察[J]. 华夏考古,2014(4):31-33,38.
- [8] 洪业汤,张鸿斌,朱永煌,等. 中国煤的硫同位素组成特征及燃煤过程硫同位素分馏[J]. 中国科学(B辑),1992(8):868-873.
- [9] 杜宁,李延祥,张光明,等. 临淄故城南部炼铁遗物研究[J]. 中国矿业,2012,21(12):115-120.

- [10] 李振宗. 峰峰高变质煤作高炉喷吹用煤的适应性研究[J]. 煤质技术, 2003(5):56-60.
- [11] 河北省文物局文物工作队. 观台窑址发掘报告[J]. 文物, 1959(6):58-61.
- [12] 山西省考古研究所. 山西稷山金墓发掘简报[J]. 文物, 1983(1):45-53.
- [13] 赵青云, 李京华, 韩汝玢, 等. 巩县铁生沟汉代冶铸遗址再探讨[J]. 考古学报, 1985(2):157-183.
- [14] 《中国冶金史》编写组. 从古荣遗址看汉代生铁冶炼技术[J]. 文物, 1978(2):44-47, 27.
- [15] 郑州博物馆. 郑州古荥镇汉代冶铁遗址发掘简报[J]. 文物, 1978(2):28-43.
- [16] 陈建立, 洪启燕, 秦臻, 等. 鲁山望城岗冶铁遗址的冶炼技术初步分析[J]. 华夏考古, 2011(3):91-99.
- [17] 黄维, 李延祥, 周卫荣, 等. 川陕晋出土宋代铁钱硫含量与用煤炼铁研究[J]. 中国钱币, 2005(4):38-44.