

## A Summary of Ancient Iron Smelting Technology Based on Iron Slag Analysis

# 以炉渣分析为主揭示古代炼铁技术的研究与探索

黄金胜 Huang Quansheng

广西广播电视大学理工学院, 南宁, 530022

李延祥 Li Yanxiang

北京科技大学冶金与材料史研究所, 北京, 100083

陈建立 Chen Jianli

北京大学考古文博学院, 北京, 100871

铁付德 Tie Fude

中国国家博物馆学术研究中心, 北京, 100006

### 内容提要:

本文根据国内外相关文献及研究成果, 综合考察了自 20 世纪 50 年代以来国内外对古代铁渣的研究方法及取得的成就。利用业已确立的古代冶炼炉渣的研究方法及判定标准, 近年来对我国部分古代冶炼遗址特别是广西地区的古代冶铁遗址等开展了较为深入的调查和科学研究。研究实践表明, 主要从铁渣的成份、显微组织结构等检测分析, 来判定古代钢铁冶炼技术类型是可行的, 采用该研究方法对古代铁矿冶遗址开展调查与研究也是可行有效的。研究结果显示, 从炉渣的金属含量及其赋存状态方面可辨别炼铁渣和非炼铁渣; 古代块炼铁与生铁炉渣的基本成份和显微组织结构有明显区别, 两者夹杂金属颗粒赋存状态也有较明显差别。在高铁炉渣中, 古代块炼铁和炒钢炉渣的显微组织结构有较明显差异, 浮氏体间是否存在磷钙化合物也可作为区分块炼铁和炒钢炉渣的关键指示标之一。

### 关键词:

古代 铁渣 冶铁技术 冶金考古

**Abstract:** Based on related documents and researches, the authors review research methods on ancient iron slag and achievements from China and abroad since the 1950s. Using existing research methods and criteria on ancient smelting slag, in-depth investigations and scientific researches have been made in recent years on certain ancient metallurgical sites in China, especially iron smelting sites in Guangxi. Research findings prove that it is feasible to determine the ancient iron smelting technology mainly through analysis of the composition and microstructure of slag and that it is feasible and effective to adopt such methods to investigate and research into ancient iron mining and metallurgical sites. Research results show that metal content and occurrence inclusive of slag can be used to distinguish ferrous slag and non-ferrous slag; the compositions, microstructures and occurrences of inclusive metal particles of bloomery iron slag and cast iron slag are obviously different. In terms of blast furnace slag, the microstructures of ancient bloomery iron slag and puddling slag are different. The compounds of  $3\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$  can also be used as one of the key indicators to distinguish between ancient bloomery iron slag and puddling slag.

**Key Words:** ancient; iron slag; iron smelting technology; archaeometallurgy

考古研究表明,约公元前两千纪早期或中早期,小亚细亚的赫梯人(Hittites)<sup>[1]</sup>首先发明了冶铁技术,自此人类文明开始进入了铁器时代。公元前两千纪中期之后,铁制品大规模应用于日常生活、战争以及手工业、农业生产等等;工业革命以后,钢铁就变成人类社会基本的重要的材料之一。冶铁技术的发明及其应用,对人类文明的进程起着不可估量的推动作用;冶铁技术的传播及其发展,为世界不同国家不同民族的经济发展和进步提供了强大的技术推动力。

## 一 冶铁考古研究的基本路径

首先,对出土的古代钢铁制品进行金属学研究,对古代钢铁制品的制作技术进行研究并建立相应的研究方法及鉴别标准,为古代钢铁冶炼技术的研究提供论据。其次,对古代矿冶遗址进行调查、试掘,通过对冶铁遗迹遗物的考古学、冶金学分析,揭示其工艺类型和技术水平,认定产品特征,为历史学、考古学的研究提供科学论据。这两方面的研究途径应当说是相辅相成的。

迄今为止,中国公认较为全面详细记录古代钢铁冶炼技术的著作当属17世纪40年代末宋应星的《天工开物》。中国冶铁史研究的早期,主要研究方法是对史料的考证。20世纪20年代末到30年代初,章鸿钊、朱希祖、马衡等学者对中国的铁器时代等问题开展了讨论和探索,并发表研究文章,这可视为中国冶铁史研究的开端。20世纪40年代末到70年代中期,随着中原地区、华北地区、东北地区等地发现一批冶铁遗址和出土大量铁器,以张子高、杨宽、杨根等为代表的学者,主要采用金相和化学分析手段,直接考察出土铁器的组织和成份,以鉴定其性能或者判断其可能的冶炼方法,再结合文献探讨中国古代冶铁技术的发展历程,并发表了相关研究文章。20世纪70年代中期之后,柯俊、韩汝玢等科学家们,除了对文献史料进一步考证和研究外,开展了大量的实地调研和考察,利用现代自然科学手段对古代冶铁遗物进行实验室的研究进展相当迅速,鉴定的出土铁器数量大量增加,采用的科学技术手段越来越丰富。除金相观测分析、化学检测分析之外,扫描电镜、电子探针、X-射线衍射分析、原子吸收光谱和发射光谱等分析手段的使用应用已相当普遍。这期间,发表了一批富有新意和创见的学术论文,其中《关于藁城商代铜钺铁刃的分析》<sup>[2]</sup>为探索我国利用陨铁的起源提供了科学根据,《中国封建社会前期冶炼技术发展的探讨》<sup>[3]</sup>开创了我国钢铁冶炼史系统研究之先河,梅建军对中国冶金史进行了回顾<sup>[4]</sup>,苗长兴总结分析了冶铁技术史<sup>[5]</sup>等等。该阶段主要是通过出土钢铁制品的金相组织等研究揭示我国的古代钢铁技术。通过钢铁制品的金相组织及夹杂物的检测分析,来鉴定人工冶铁的冶炼技术类型是世界各国冶金考古学者最为常用的科学检测分析手段之一。因为冶炼温度和还原气氛不同,钢铁制品的金相组织和夹杂物形态具有明显的差别,由此可鉴别其原来冶炼和加工方法。北京科技大学冶金与材料史研究所等对此做了大量而卓有成效的工作,总结出一整套判定不同冶炼方法和深加工处理工艺的标准<sup>[6]</sup>。具体判定标准见表一。

表一 古代钢铁制品的金相组织及夹杂物特征

类型	基体组织	夹杂物
块炼铁	铁素体组织,较纯净。	有氧化亚铁夹杂,氧化亚铁~铁橄榄石型硅酸盐共晶夹杂物多,变形量小,沿加工方向延伸。

类型	基体组织	夹杂物
块炼渗碳钢	质地不均匀(表现在铁素体与珠光体分布、碳含量、夹杂物形态等方面),有明显的分层现象。有的有渗碳层,有的有折弯现象。	有氧化亚铁夹杂,氧化亚铁~铁橄榄石型硅酸盐共晶夹杂物多,变形量小,沿加工方向延伸。成份中P、Mn等有差异。
铸铁脱碳钢	铸件组织均匀,质地纯净。基本不析出石墨或只析出极少石墨。有的局部还残留少量生铁组织或铸造缺陷。	夹杂物数量较少,以硅酸盐为主,变形量很小。
炒钢	组织均匀或分层,各层中含碳量均匀	以硅酸盐为主,夹杂物细小且变形量大,成份较均匀。

在欧洲,早期的古铁矿冶遗址研究可以追溯到19世纪,当时已有一些科学家如W. Borlease 开始从事考察和著录古铁矿采冶遗址的工作。到了19世纪末和20世纪初,既有对古铁矿冶遗址的考古勘查和发掘,也有对古代金属文物的金相观察,最著名的是英国学者W. Gowland, 他的工作显示出综合应用考古学和金属学研究方法的特色。在此之后,O. Davies 对欧洲境内古罗马帝国时期的采矿遗址开展了考察和研究;而古代冶金炉渣专家H. G. Bachman, 则注重从炉渣入手,对古代冶铁技术和工艺开展了深入研究<sup>[7]</sup>。英国是最早开展冶铁遗址调查与研究的国家之一,发展了一整套包括田野调查、发掘、模拟实验、实验室检测分析、综合研究等内容的冶金考古方法,至今仍被世界各国冶金考古同行所沿用。R. F. Tylecote 在遗址田野调查研究以及在冶金考古队伍建设方面的努力<sup>[8]</sup>,对英国乃至整个世界的冶金考古学术界产生了深远影响。

除了对古代文献和史料进一步考证及深入研究之外,对于史前时期以及缺少文献记载的历史时期的冶铁技术的研究,国内外的冶金考古学者一般都是从古代遗存器物检测和分析、古矿冶遗址调查和研究两个方面进行。就其冶炼技术研究而言,古代铁矿冶遗址调查、发掘及对其遗迹和遗存遗物进行检测分析,是目前世界各国较为通行的方法。近年来,世界各国专家学者的冶铁考古研究的主要方法已转变为对遗址进行详细考察,充分利用测年技术、遗址遗物成份检测分析等技术手段判定遗址属性、技术类型、技术水平,进而揭示其考古学、历史学价值,为遗址保护和开发利用提供有价值的科学信息。我国古代铁矿冶遗址的调查与炉渣研究正处于积极发展的阶段,也取得一些显著的初步成果。

## 二 古代有色金属和炼铁炉渣的区别与判定

古代矿冶遗址上的各种遗迹和遗物都可用于研究其冶炼技术。就目前田野调查的发现,遗存比较完整的古代冶炼遗址遗迹一般常见于后世人类活动罕至的偏僻地方,或者较早时期就列入文物保护单位而较少受到破坏。实际上,比较完整的古代冶炼遗址遗迹遗存是相当罕见的。由于年代久远,有的冶炼遗址因为自然灾害如地震、沙尘暴等不复存在于地表,有的冶炼遗迹因为城市的发展进程加快而被吞没和泯灭,有的冶炼遗存由于工业或农业的开发而被大规模的破坏甚至消失,等等。由于古代冶炼遗址遗存遗迹譬如炼炉等的破坏和不完整性,给我们科技考古工作者从事冶金考古研究带来许多困难,而能够在古代冶炼遗址

采集或发掘到冶炼产品的机会一般来说是可遇不可求的,有时候只能靠运气。但是,冶炼废物遗弃的炉渣是最易获得的。炉渣是冶炼产物之一,其中携带的冶炼反应信息被永久封闭<sup>[9]</sup>。对古矿渣的检测与分析是研究和揭示古代冶炼技术、工艺类型等方面的很重要的技术手段。因此,近年来世界各国有一部分冶金考古专家和学者专注于古矿渣的检测分析研究,取得了丰硕的成果。

炉渣研究包括冶炼渣的成份检测和显微组织观测分析等。其基本理论假设为:炉渣中某些元素的较高或较低含量或者某些特定的显微组织结构可作为某种冶炼技术类型的标志或指示。有关古代有色金属冶炼炉渣和炼铁炉渣的鉴别与判定,专家李延祥在研究各国文献的基础上进行了总结:古代冶金炉渣如炼铜渣、炼铅(银)渣和炼铁渣多呈同样的玻璃态或非玻璃态块状物,大量遗弃在冶炼遗址表层或不同地层;分析表明,它们皆可为铁橄榄石类渣型,并可含有钙、铝等成份。研究结果显示,炼渣的渣型与冶炼性质有关,但仅凭渣型难以分辨有色金属炼渣和炼铁渣,更多的研究是通过炉渣中某金属的含量和存在的形式来判定其是否为冶炼此种金属的炉渣<sup>[10]</sup>。

R. F. Tylecote 等指出,有色金属炉渣的唯一辨别方法是测定以颗粒或硫化物形式存在的金属含量,并认为各项条件合适的炼铜渣含铜应低于1%,建议以0.5%为早期炼铜渣含铜量的下限,同时指出现代炼铜渣可低于0.3%。R. F. Tylecote 等从炉渣外观和渣内含有的金属存在形式等方面界定了各种炉渣的特点<sup>[11]</sup>(参见表二)。P. T. Craddock 等<sup>[12]</sup>认为,含铜、铅或锡量低于0.1%的早期炉渣可能是炼铁渣。富铅的、有时富锌的炉渣可能是炼银渣。含银量约100ppm是炼银炉渣的强有力证据,而含银量远低于此的炉渣就意味着矿石含银过低难以经济地提取,含银量远高于此的炉渣则表明没有认识到银的存在。B. Rothenberg 等<sup>[13]</sup>将含铜低于0.5%、含铅为1~5%的炉渣视为炼铅(银)渣,含铅低、含铜高于0.5%至5%(一般为0.5~2%)的炉渣可以视为炼铜渣。

综上所述可知,古代炼铁渣与有色金属炉渣的主要区别是:炼铁渣一般没有有色金属颗粒残存,同时其含铜量一般都低于0.5%,铅、锡、锌含量均低于0.1%,含银量几乎没有。块炼铁与生铁炉渣中夹杂颗粒赋存状态有较明显的区别,两者的比重之差别比较大。

表二 几种主要的古代炉渣的鉴别特点

外观特征	夹杂颗粒	比重	渣的类别
黑色结晶态	Cu, Cu/Fe(磁性), 冰铜	3 - 4	炼铜渣
黑色玻璃态	Pb, Sn, 通常没有	3.5 - 4	炼铅、锡渣
黑色玻璃态	Sn	3 - 4	炼锡渣
灰-黑色	Sb, SbS+FeS, Fe	3 - 4	炼锑渣
黑色结晶态	Fe, 很少, 通常没有	3.5 - 4	块炼铁渣等
蓝-绿黄色	生铁, 少, 通常没有	2 - 2.7	竖炉生铁渣

### 三 古代生铁和块炼铁冶炼炉渣的判定

20世纪60年代起, G. R. Morton、E. Tholander 等<sup>[14]</sup>学者较早注意到了古代炼铁渣的分类,并从炉渣的成份和显微组织研究来求证古代冶铁方法。

古代人工炼铁技术有两种基本类型:一是在较低温度下,以木炭的固体C等为还原剂

将铁矿石中的铁从氧化物中分离出来还原成固体金属铁的直接还原过程，称块炼法，其炉渣简称块炼铁渣。二是在较高温下，主要以气体 CO 等为还原剂将铁矿石中的铁从氧化物中分离出来还原成液体金属铁并生成生铁的间接还原过程，称生铁冶炼法，其炉渣简称生铁渣。

古代使用的铁矿石一般是品位较高的磁铁矿和赤铁矿等。其实，不同的铁矿石在块炼法和竖炉冶炼生铁过程中两种还原反应相似，差别在于冶炼温度和还原气氛不同等。在直接还原过程中，主要问题是铁的氧化物被还原的状况<sup>[15]</sup>。而生铁冶炼过程的一个主要任务就是造渣<sup>[16]</sup>。冶炼生铁时矿石中的脉石和燃料的灰份、助熔剂，与被还原的金属形成互不相溶的两液相：渣和液态生铁，此二者借比重的差别而分离。通过对熔渣成份的控制，保证炉内主要反应顺利进行。

炉渣基体由构成渣相的复杂硅酸盐的各成份组成，习惯上以氧化物形式表示，如 FeO、SiO<sub>2</sub>、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、MgO 等，其总和在正常炉渣中占 95% 以上，在冶炼反应控制上起着重要的作用。构成此渣相的各氧化物可有以下几个来源：一是矿石。依其类别和品位不同矿石中含各氧化物的量不尽相同，一般硅、铝的含量较高。矿石中的各氧化物有的是真实存在，有的是以氧化物之间形成的矿物形式存在。矿石中没有还原的不同价态的氧化 Fe 及其它氧化物在熔炼时都进入炉渣。二是造渣剂。矿石多难以自熔，为使熔炼顺利添加石灰石或者锰矿石作为造渣剂（特别是生铁冶炼过程当为必需的）。三是被浸的炉衬。特别是酸性炉渣对炉衬有侵蚀和冲刷作用，使炉衬的成份进入炉渣。四是灰份。木炭等燃料燃烧后的灰份成份也有部分进入炉渣。由上述分析可知，炉渣中某一氧化物的来源不一定是唯一的，利用炉渣基体判定炉渣属性就要考虑多种因素。

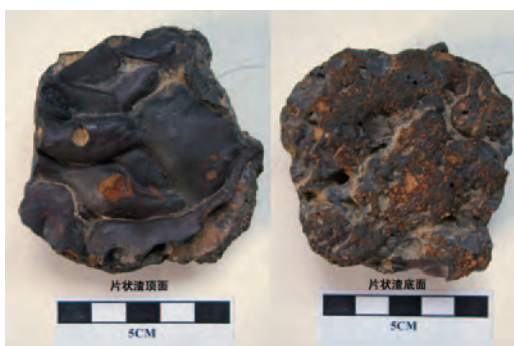
从冶炼工艺看，生铁冶炼法与块炼法的主要差别是冶炼温度高低不同。竖（高）炉生铁冶炼温度较高（一般 1400℃ 以上），还原气氛较好，铁和渣能有效分离；矿石中的脉石成份大多能熔化参与造渣或脱除而进入渣中；如为了造渣添加助熔剂，矿石中铁的氧化物大部分能被还原出来生成金属铁，助熔剂也进入渣中。因此，炉渣的显微组织结构常以玻璃相为主，可有少量锰橄榄石等，有时会残留金属铁等。而直接还原的块炼法一般冶炼温度较低（一般 1100℃ 左右），且没有添加助熔剂，以复杂化合物形式存在的铁的氧化物大部分未能被还原出来而留在渣中，提取效率很低，炉渣基体的显微组织结构一般以铁橄榄石为主，很少量玻璃相，有时会残留金属铁等；由于冶炼温度较低，还原出来的金属铁多为固体呈铁素体，偶见滴状液体金属颗粒。

生铁的生成主要是已还原的金属铁溶入其他合金元素以及渗碳过程。随着冶炼温度不断升高，当提高至 1400℃ 以上，固体金属铁熔化为金属铁滴；在液体状态下金属铁与碳的接触条件得以改善，渗碳过程加快，金属铁滴的碳含量可以很快增加到 2% 及以上，吸收碳后其熔点随之降低。生铁的大部分渗碳过程在炉腰和炉腹中基本完成，铁滴经过滴落带的途径越长，其在滴落带的停留时间就越长，碳的渗入量也就越多<sup>[17]</sup>。竖（高）炉的高度较高，炉腰和炉腹较深，滴落带较长，渗入的碳量足于金属铁滴形成生铁。由于排渣时冷却迅速，炉渣中残留的铁颗粒仍然保留与产品一样的组织形态，所以炉渣中残留颗粒的赋存状态应以圆滴状居多，其组织以生铁组织为主。

就目前研究所见，古代块炼铁炉渣的宏观形貌大致可分为两种<sup>[18]</sup>。一是地炉冶炼炉渣：“碗状”或块状<sup>[19]</sup>，形貌与其炼炉底部形状吻合<sup>[20]</sup>（图一）；二是矮竖炉块炼炉渣：一般是



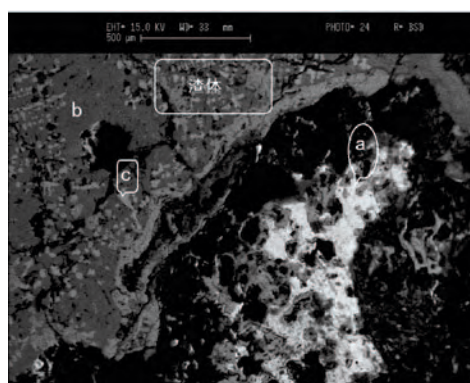
图一 广西平南汉代块炼铁“碗状”炉渣底部与平面形貌



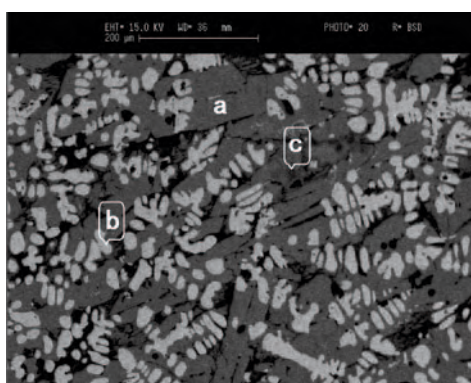
图二 广西贵港汉代块炼铁排出片状渣形貌



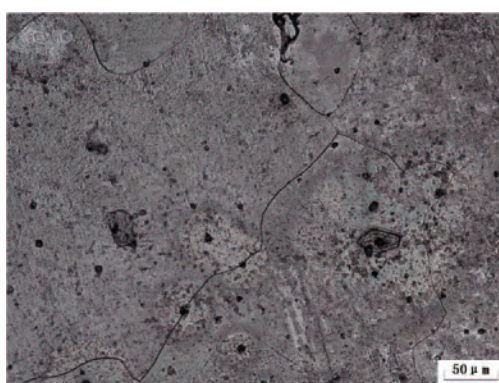
图三 广西兴业唐宋时期生铁排出片状炉渣形貌



图四 广西平南汉代块炼铁“碗状”炉渣背散射图片



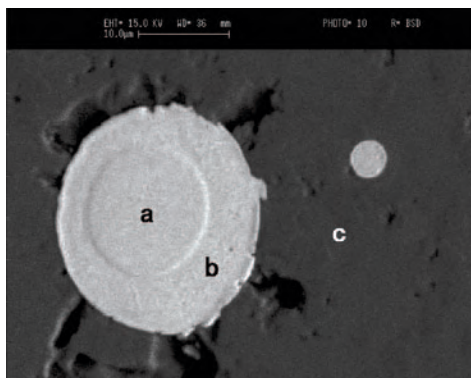
图五 广西贵港汉代块炼铁片状渣背散射图片



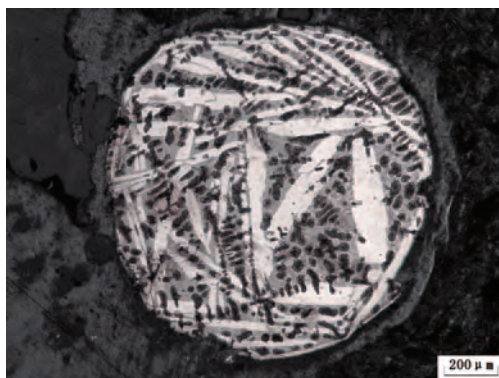
图六 广西平南汉代块炼铁“碗状”炉渣金属颗粒 (图四: a亮白相) 金相图片

排出片状渣<sup>[21]</sup> (图二)。生铁冶炼炉渣一般都是排出片状渣<sup>[22]</sup> (图三)。

研究表明,在古代生铁与块炼铁冶炼的炉渣中,它们夹杂或残存的金属颗粒的赋存状态有较明显的区别,生铁与块炼铁炉渣的基本成份、显微组织结构亦有较明显的区别<sup>[23]</sup>:古代块炼铁炉渣的含铁量一般较高,显微组织基体是以铁橄榄石为主,总有浮氏体的存在(图四、图五);而其冶炼产品为铁素体组织(图六),炉渣夹杂金属颗粒多为纯铁。不同的是,古代生铁冶炼的还原效率较高,炉渣的含铁量相对就很低,含铁量常见低于10%以下,含铁量高于10%属罕见<sup>[24]</sup>;炉渣基体的显微组织一般是以玻璃态硅酸盐为



图七 广西兴业唐宋时期生铁排出片状炉渣背散射图片



图八 广西兴业唐宋时期生铁排出片状炉渣金属铁颗粒金相图片

主(图七),浮氏体极少发现,经常残存有生铁颗粒(图八)。判定标准<sup>[25]</sup>见表三。

表三 古代生铁与块炼铁冶炼技术及炉渣判定主要特征

冶炼方法	主要渣型	炉渣主要特征	残留铁颗粒主要特征
地炉块炼法	铁硅系	宏观形貌为盘形凸底似“碗状”。基体显微组织以铁橄榄石为主,有浮氏体和少量玻璃态硅酸盐,偶有未熔化矿石、石英残留。可有 $Fe_2O_3$ 存在。	偶有不规则形状微小铁颗粒,以铁素体组织为主。
矮竖炉块炼法	铁硅系	宏观形貌为排出片状渣。基体显微组织以铁橄榄石为主,有浮氏体和少量玻璃态硅酸盐。可有 $Fe_2O_3$ 存在。	偶见不规则形或滴状微小铁颗粒,以铁素体组织为主。
生铁冶炼法	硅钙型	宏观形貌为排出片状渣。基体显微组织多呈玻璃态硅酸盐,可有少量铁橄榄石。	偶有圆滴状铁颗粒,以生铁组织为主。
	硅锰型	宏观形貌为排出片状渣。基体显微组织多呈玻璃态硅酸盐,可有少量锰橄榄石。	偶有圆滴状铁颗粒,以生铁组织为主。

#### 四 高铁炉渣：古代块炼铁和炒钢炉渣的判定与探索

研究表明,古代块炼铁和炒钢炉渣的铁含量都相当高,高铁炉渣不一定是块炼铁炉渣。块炼铁冶炼是还原过程,其炉渣为还原渣;而炒钢属于氧化过程,它的炼渣属于氧化渣。不同的冶炼过程理论上应当产生不同的炉渣。氧化渣基体构成的各渣相应与还原渣有所区别,因为构成渣相的各氧化物来源及数量不同。构成氧化渣相的各氧化物可有以下几个来源:一是生铁。生铁中的硅、锰等氧化物杂质与空气接触氧化后一部分生成非晶态渣相,另一部分可与 $FeO$ 生成低熔点硅酸铁。二是被浸的炉衬。被炉渣浸蚀和冲刷作用后,炉衬的成份进入炉渣。三是灰份。燃料燃烧后的部分灰份成份也进入炉渣。

在氧化过程中,由于气态氧和炼炉的作用,首先是形成 $FeO$ ,然后才是 $FeO$ 与溶解元素的相互作用<sup>[26]</sup>。 $FeO$ 与生铁中的氧化物杂质(硅、锰等)形成低熔点夹杂进入渣中,而另一部分氧化物杂质与空气接触氧化之后有部分生成非晶态渣相亦会进入渣中;处在气相—熔渣界面的 $FeO$ 由于气态氧所氧化而形成 $Fe_2O_3$ <sup>[27]</sup>,由于局部碳的偏析而产生较低的碳势,致使 $Fe_2O_3$ 不能充分与碳反应而部分保留在渣中;由于生铁中及被浸蚀冲刷的炉壁没有足够

的硅与 FeO 形成大量的铁橄榄石。因而炒钢渣的显微结构以浮氏体为主，可有少量单相玻璃态硅酸盐和铁橄榄石，有时会残留金属铁和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等。

目前国外一些学者与中国的冶金考古学者的分歧或不同看法，主要源于中国古代炒钢技术与生铁脱碳钢工艺即精炼究竟有什么区别？韩汝玢等认为，中国古代炒钢是在炉内将生铁熔化，并鼓风搅拌令生铁与空气中的氧接触，促使其中的碳氧化，达到脱碳成钢的目的；炒钢可把生铁炒成熟铁，再经过渗碳成钢，亦可有控制地把生铁炒到需要的含碳量，锻制成钢制品<sup>[28]</sup>。此种炒钢法主要是以东汉文献为依据的。

研究表明，如果仅从成份结果看，很难判断出炒钢渣与块炼铁渣的区别，而主要从显微结构着手进行鉴别。P. Dillmann 对法国 Glinet 等遗址遗存的公元 15 至 16 世纪的精炼氧化渣进行了研究<sup>[29]</sup>，结果表明精炼氧化渣与块炼铁渣的形貌有明显区别，它们的显微结构也有明显区别。

R. B. Gordon 对 17 世纪至 19 世纪欧美 42 处炼铁遗址出土的炉渣、块炼铁和炒钢制品等遗物进行了检测和比较分析，认为炒钢渣可区别于块炼铁渣，即炒钢渣的显微组织以浮氏体为主<sup>[30]</sup>，块炼铁渣的显微组织以铁橄榄石为主。近年来，世界各国的冶金考古研究多以此为区分炒钢渣与块炼铁渣的主要鉴别标准。

近期以来，陈建立等<sup>[31]</sup>通过对中国古代炒钢炉渣与精炼渣样品的检测分析、形成机理及其判定等问题开展了进一步深入探索，并取得了重要的研究成果。结果认为，显微组织有玻璃相和浮氏体的高铁炉渣中，浮氏体间存在  $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$  化合物时，可以确定该炉渣为炒钢或精炼的遗物；而如何区分精炼与炒钢主要甄别炉渣残存金属铁颗粒内部中是否存在磷钙化合物，如果铁颗粒内部中存在磷钙化合物，可以确定为炒钢的遗物。

## 五 结语

通过以上综合分析及研究可知：从炉渣的金属含量及其赋存状态方面可以辨别炼铁渣和非炼铁渣。古代块炼铁冶炼与生铁冶炼的炉渣中，块炼铁与生铁炉渣的基本成份和显微组织结构有着很明显的区别，它们的夹杂金属颗粒赋存状态也有着较为明显的区别。在高铁炉渣中，古代块炼铁和炒钢炉渣的显微组织结构也有着较为明显的区别，浮氏体间是否存在磷钙化合物可以作为区分块炼铁和炒钢炉渣的关键指示标；而炒钢炉渣与精炼炉渣的区别，则关注炉渣残存金属铁颗粒内部中是否存在磷钙化合物等。

研究实践表明，主要通过炉渣等研究揭示古代钢铁技术是可能的。基于炉渣的成份、显微组织结构等检测分析，来判定古代钢铁冶炼类型是可行的。我们采用该研究方法对中国部分古代铁矿冶遗址开展了调查与研究，结果表明是有效可行的，并且取得了一些成绩，积累了有益的经验。由于冶金过程的复杂性，在田野考察阶段，还要特别关注炼炉结构、冶炼地点、冶炼年代、冶炼产品等因素；在实验室研究时，还需要综合考虑炉渣宏观形貌、成份组成、炉渣各物相和显微组织结构及其形成过程的物理化学反应等情况，加以综合判定冶炼遗物相对应的冶炼方法和冶炼技术，其结果可能更为准确。

附记：在研究过程中，得到国家自然科学基金资助项目(50874015)和广西高校优秀中青年骨干教师培养工程项目(GXQG022014070)资助。



注释：

- [1] Tylecote R. F., *A History of Metallurgy*. London: The Metals Society, 1976.
- [2] 李众：《关于藁城商代铜钺铁刃的分析》，《考古学报》1976年第2期
- [3] 李众：《中国封建社会前期钢铁冶炼技术发展的探讨》，《考古学报》1975年第2期。
- [4] 梅建军：《中国冶金史研究的回顾》，《中国冶金史料》1990年第1期。
- [5] 苗长兴：《中国冶铁技术史研究综述》，《中国冶金史料》1992年第3期。
- [6] 陈建立、韩汝芬：《汉晋中原及北方地区钢铁技术研究》，北京大学出版社，2006年。
- [7] 梅建军：《方兴未艾的世界冶金考古研究》，《中国冶金史料》1992年第1期。
- [8] Cleere H., "Twenty Years of Bloomery Studies in Britain" in Pleiner R., *Archaeometallurgy of Iron: Results Achieved 1967-1987*. Czech, Liblice: UISPP Prague, 1989: 191-211.
- [9] 李延祥、洪彦若：《炉渣分析揭示古代炼铜技术》，《文物保护与考古科学》1995年第1期。
- [10] 李延祥：《铜绿山、九华山古代炼铜炉渣研究》，北京科技大学科学技术史专业博士学位论文，1995年。
- [11] Tylecote R. F., *The Early History of Metallurgy in Europe*. Longman Archaeology Series. New York, 1987: 300.
- [12] Craddock P. T., Freestone I. C., Gale N. H., et al. "The Investigation of a Small Heap of Silver Smelting Debris from Rio Tinto, Huelva, Spain" in *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity, British Museum Occasional Paper, No. 48*. London: British Museum, 1985: 199-218.
- [13] Rothenberg B. A., Blanco-Freijero, *Studies in Ancient Mining and Metallurgy in South-West Spain*. London: Institute for Archaeo-Metallurgical Studies, 1981: 312.
- [14] Tholander E., "Microstructure Examination of Slags as an Instrument for Identification of Ancient Iron-Making Processes" in Pleiner R., *Archaeometallurgy of Iron: Results Achieved 1967-1987*. Czech, Liblice: UISPP Prague, 1989: 35-42.
- [15] 秦民生：《非高炉炼铁》，冶金工业出版社，1991年，第40-45页。
- [16][17][26][27] 黄希祐：《钢铁冶金原理》，冶金工业出版社，1981年，第85-91页。
- [18][23][25] 黄全胜：《广西贵港地区古代冶铁遗址调查及炉渣研究》，漓江出版社，2013年。
- [19] 黄全胜、李延祥：《广西贵港地区早期冶铁遗址初步考察》，《有色金属》2008年第1期。
- [20] 黄全胜、李延祥：《广西平南六陈坡嘴遗址冶炼技术研究》，《有色金属》2011年第1期。
- [21] 黄全胜、李延祥：《广西桂平罗秀古代冶铁遗址群初步研究》，《中国科技史》，2012年第4期。
- [22] 黄全胜、李延祥：《广西兴业县高岭古代遗址冶炼技术研究》，《自然科学史研究》2012年第3期。
- [24] 参见黄全胜、李延祥：《广西兴业县高岭古代遗址冶炼技术研究》，《自然科学史研究》2012年第3期；河南省文物研究所、中国冶金史研究室：《河南省五县古代铁矿冶遗址调查》，《华夏考古》1992年第1期；郑州市博物馆、郑州古荣镇汉代冶铁遗址发掘简报，《文物》1978年第2期；河南省文物研究所、信阳地区文物科：《信阳毛集古矿冶遗址调查简报》，《华夏考古》1988年第4期；李京华、陈长山：《南阳汉代冶铁》，中州古籍出版社，1995年。
- [28] 参见李京华、陈长山：《南阳汉代冶铁》，中州古籍出版社，1995年；韩汝芬：《中国科学技术史·矿冶卷》，科学出版社，2007年，第344-630页。
- [29] Dillmann P., Arribet-deroin D., Vega E., Benoit P., "Early Modern Cast Iron and Iron at Glinet" in *Proceedings of the Norberg Conference "Norberg-Nora, 700 Years of Iron Production"*. Norberg, 2003.
- [30] Gordon R. B., "Process Deduced from Ironmaking Wastes and Artefacts" in *Journal of Archaeological Science*. 1997. 24 (1): 9-18.
- [31] 陈建立、张周瑜：《基于炉渣分析的古代炒钢技术判定问题》，《南方文物》2016年第1期。

(责任编辑 崔名芳)