

中国宋元时期的高炉

华道安¹ 著 杨 盛² 译

(1. 四川大学历史文化学院 2. 成都文物考古研究所)

摘要：中国在11世纪的“商业革命”中伴随着一些重要技术的发展。在古代钢铁业，水作为动力被广泛应用，煤炭和焦炭开始取代木炭作为燃料，这一时期的高炉设计出现了最后一次重大进展。这类拥有新构造高炉的使用，就某种程度而言，成为了欧洲早期高炉设计的先兆，从19世纪到20世纪的中国传统钢铁工业中也能认识到这类高炉的一些情况。本文综述了宋元时期冶铁高炉建造和运行的现有证据材料，特别提到矿物燃料的使用。考古出土的宋元时期高炉有两种类型：穴筑于山坡内或是采用木框架夯土构筑。高炉中使用矿物燃料的证据包括文献资料（尤其是苏轼的著名诗篇《石炭歌》）、铁质文物的化学分析结果和放射性碳测年研究成果。未来对高炉矿渣的研究可能会提供关于矿物燃料如何被使用的可靠证据，但就目前而言，利用17、18世纪英国在高炉中使用煤和焦炭的经验进行比较研究，不啻为一有益的研究途径（本文原文发表于2001年，之后发表的考古材料未被考虑在内）。

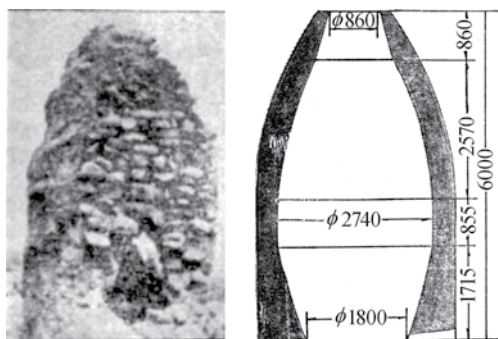
关键词：宋代 元代 冶金考古 铁业 高炉 矿物燃料

一、发掘出土的高炉

中国有7个省份发现了宋元时期冶铁遗址^[1]。这几处遗址的发掘报告足够详细向我们说明了宋元时期的高炉是如何建造的，以及这些高炉与早期及后期的高炉有何不同^[2]。

一座高达6米多的巨大的宋代高炉今天依然矗立在河北邯郸市附近（图一）。图上的照片是在1959年的《光明日报》上公布出来的^[3]，并配上了简短的说明，后来经常被转载引述^[4]。高炉所在地区为宋代的磁州，是当时主要的钢铁生产县之一。据《宋会要辑稿》统计出的数据，1078年磁州和相邻的邢州交付的原料铁，超过全国总额的75%^[5]。

据说，关于该炉的一项重要调查已于最近完成。在报告公布之前，我们对相关情况知之甚少，但这个高炉看起来有点像我们已知的一些19世纪和20世纪的中国传统的高炉。也许我们在图一中看到的高炉内部炉衬是图二、图三所示的高炉去掉木制框



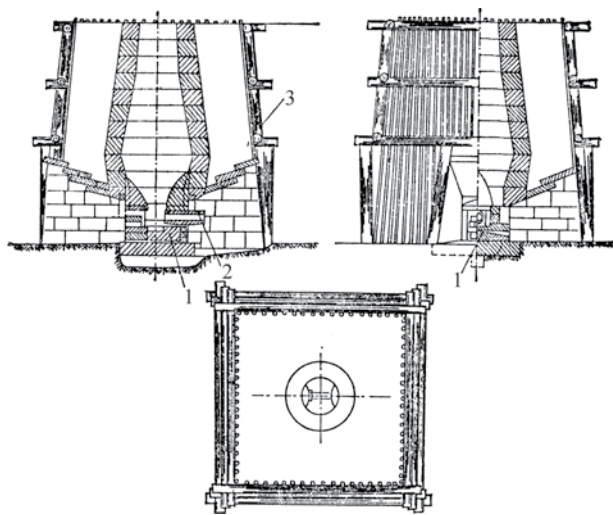
图一 一座至今矗立在河北省邯郸市附近的
矿山村宋代高炉

(左图源于1959年12月13日的《光明日报》，在刘云彩
1978年文中第23页中的图八重新采用；右图是采自
刘云彩同文绘制的复原简式图)



图二 1958年湖南省西部的高炉

[路易·艾黎拍摄(1961年, No.10)]



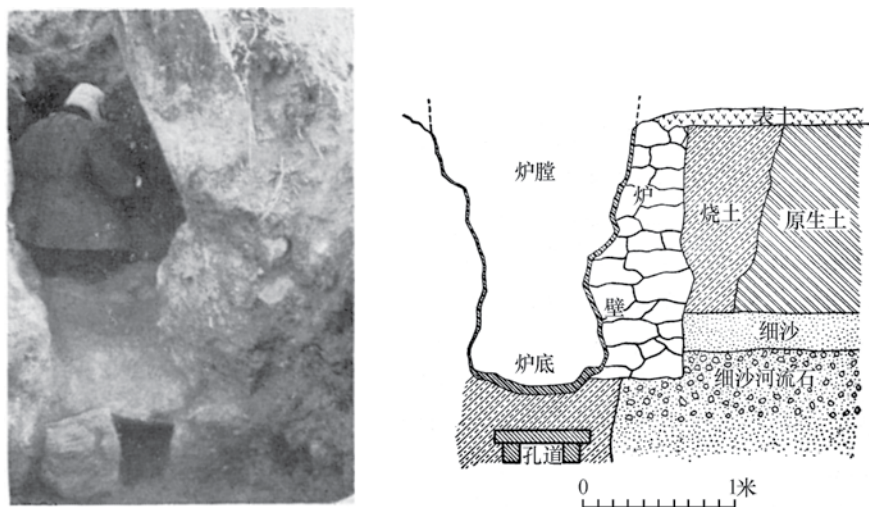
图三 四川省高炉草图, 1958年左右绘制

(采自《中国古代冶铁技术发展史》第185页, 图47)

架和夯实填土后的样子。在河北邯郸市附近的安阳和林县, 有其他几个大型高炉已经被普查出来, 但详细结果尚未发表^[6]。

二、依山而建的高炉

有一种奇特的宋元时期高炉遗存, 直接穴筑于一座小山冈, 不需要坚固的外部结构, 这种高炉在河南、江西、黑龙江等地都有发现。迄今仅有的较为全面的细节描述来自于黑龙江省阿城县的一些12世纪的遗址^[7]。虽然该地方在历史文献资料中几乎没



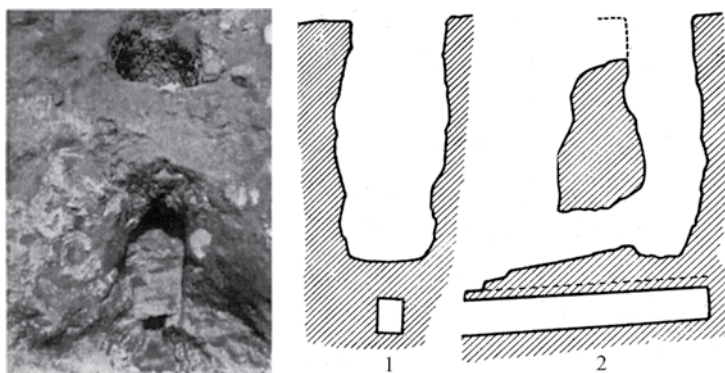
图四 阿城县东川2号高炉照片及草图

(采自《考古》1965年第3期, 第127页, 图5和图版7.4)



图五 黑龙江省阿城县东川4号(右)、5号(左)两座高炉照片

(采自《考古》1965年第3期, 图版7.1)



图六 黑龙江省阿城县东川5号高炉照片及草图

(采自《考古》1965年第3期, 第128页, 图6和图版6.3)

有记载,但这里显然是一个金国或女真政权的主要冶铁生产地区。调查发现了一个大型矿冶遗址,其中根据建筑遗址的规模推测可以容纳1000名工人,在古代矿坑附近约10千米范围内分布着50多个冶铁遗址。该报告作者认为有些冶铁遗址的分布距离矿区很远,毫无疑问是为了更有效地利用森林资源作为燃料。

图四—图六显示了其中一处遗址的3座高炉。这种类型的高炉似乎最适合在黏性土壤地区建造,它们的修建需要劈开地形。在山坡上选择一处较平坦的地方,挖出一条长达数米的中轴,以及深2—3米的半圆坑。从侧面的坡壁沿水平方向挖出孔洞,内壁用花岗岩铺砌加强。然后炉身再铺一层混合小石子的黏土,再抹一层耐火黏土。第二个孔洞经常挖在底部以下,可能是便于散热和减轻炉底部的裂解。而高炉工作产生的高温将靠近石壁厚达半米原生黄土炙烤成深红色^[8]。

在炉底部部有一长条形石洞,直通达炉的后壁,但与炉膛并不相通。据推测,这个石洞是为了鼓风或是为了排出炉渣和铁水。这一部分的炉壁是炉体最薄弱的部分,由于经受的温度最高,需要经常更换,而其余的部分仅需要不定期的重新加涂一层新的耐火黏土。

黑龙江的高炉高度始终为2—3米,炉膛呈方形,炉膛横截面尺寸的范围为50—80厘米。这些高炉尺寸都非常小,与后来大别山的“矮”高炉相仿^[9],也许具有同样的运行特征。它们最适合偏远地区的小规模生产,在黑龙江看到像这样大型制铁生产地区使用到这种技术让人感到惊奇。或许未来的研究中,将对宋金之间的技术转移渠道给出一个解释。

河南安阳附近的冶铁遗址清理出三处较大尺寸的属于相同类型的高炉,发掘者认为这里从宋代至明代一直有高炉在运行。这些高炉直径2.4—4、残高约4米^[10]。我们希望在不久的将来,这里有更多的发现刊登出来。

成书于17世纪的工艺百科全书《天工开物》中曾简要记叙过这种类型的高炉。根据李小平的建议^[11]。《天工开物》提及的这句“其炉多傍山穴为之,或用巨木匡围”^[12],可以被翻译如下:“The [iron-smelting] furnace is often made in a pit at the side of a mountain; or else it is encompassed using a framework of heavy timbers. (这种炉子大多傍靠山洞砌筑,有些采用巨大的木材围成框架构筑起来。)”

有一些出版物翻译时忽略了这里提到了一个“穴”字^[13]。给出的一种译文是:“It is generally located near the mine, and sometimes made with a frame of heavy timbers... (炉一般位于矿坑附近,有时用巨大的木材打围。)”^[14],这也是另一种理解。但如果考虑到考古发掘出土的资料,李小平的建议更适合解释原文。

三、使用矿物燃料冶铁的证据

北宋时期木材的供应出现了危机,煤炭作为燃料被广泛使用。煤炭用于家庭供暖,也用于工业生产,包括钢铁行业^[15]。

有迹象表明，煤炭可能早在公元4世纪时就已经被用于冶铁，佛教旅行者道安对现代新疆的某个地方有这样的记载：“释氏西域记曰：屈茨北二百里^[16]有山，夜则火光，昼日但烟，入取此山石炭，冶此山铁，恒充三十六国用。”^[17]

但是，当我们豁然拥有很多的文献资料时，这是唯一在宋代以前提到矿煤的记载。燃料危机和用煤冶铁清楚地写在一首苏轼的著名诗篇《石炭歌》^[18]中：

彭城旧无石炭。元丰元年十二月，始遣人访获于州之西南，白土镇之北，冶铁作兵，犀利胜常云。
君不见前年雨雪行人断，城中居民风裂骭。
湿薪半束抱衾裯^[19]，日暮敲门无处换。
岂料山中有遗宝，磊落如磬万车炭。
流膏迸液无人知，阵阵腥风自吹散。
根苗一发浩无际，万人鼓舞千人看。
投泥泼水愈光明，烁玉流金见精悍。
南山栗林渐可息，北山顽矿何劳锻。
为君铸作百链刀，要斩长鲸为万段。

还有其他一些文献证据^[20]，但是这首诗的灵感，确信来源于作者曾目睹过用煤炭或焦炭来作为高炉的燃料，听到过鼓风管“阵阵”的声音，闻到过烟雾中硫磺味，看到过发光的铁水被排出（亦或许他只是听说过一个关于冶铁的生动描述，但不管怎么说，可以一眼认出这是高炉工作运行的情况）。

文物的化学分析结果也显示：在众多的宋朝时期铁质文物中，均发现含硫量偏高，这被确认为是使用煤炭冶炼所致^[21]。

更明确的证据是由3件宋元时期铸铁文物放射性碳测年结果提供的^[22]。这些铁质文物标本的年代数据分别为距今11 540、12 400和13 840年。这些年代数据显然过早，这表明生产这些文物标本所用的燃料是煤矿（年代上限趋于无限）。仇士华、蔡莲珍计算得出，高炉冶铁使用的燃料是三成木炭和七成煤炭的混合物^[23]。这是很有可能的，但我们必须记住，此结果还涉及另一种炉，即很有可能将高炉产出的生铁重熔来铸造铁制品时还用到了冲天炉。可以肯定的是，至少有一个炉子使用了矿物燃料。对于上述资料，通过分析该时代铁厂的组织结构及生产经营情况^[24]，推测煤炭很有可能是在大型高炉中使用。冲天炉使用燃料比起高炉要少得多，并且重熔和铸造的工作很可能在较小规模的当地铸铁场进行。这些铸铁场本来就更倾向于使用木炭作为燃料，因为木炭是更方便获得的燃料，当然只要当地的生态条件允许。

现在要提问的是，关于从用木炭作为燃料转变为用煤炭作为燃料，会带来哪些问题，以及这些问题是如何被解决的？目前我们还没有找到能直截了当的回答这个问题的方法，因为还没有发现回答这一问题的技术证据，这需要文献或更多的考古材料。

但我们应看到, 不管怎么说, 这个问题并非是纯粹的技术问题。

使用煤炭冶铁的方法之一是坩埚熔炼工艺, 最近几个世纪在山西省使用^[25]。但到目前, 还没有确切可信的文献证据及实物证据证明早在宋代就使用了这种工艺^[26]。

另一方面, 由于在高炉中使用过煤炭或焦炭, 这一点是毫无疑问, 因此我们可以从17世纪—19世纪在英国和美国的高炉工作的燃料从木炭过渡为焦炭的历程中获得一些思路^[27]。

四、题外话: 英国冶铁矿物燃料的早期使用

西方用煤冶铁第一个在经济上取得成功的是由亚伯拉罕·达比 (Abraham Darby) 在什罗普郡 (Shropshire) 的科尔布鲁克代尔 (Coalbrookdale) 完成的。如今, 在铁桥峡工业博物馆 (一个占地面积不小的奇妙的露天工业遗址博物馆) 里, 游客们可以看到达比的高炉工业遗迹, 上面的标示告诉他们——1709年, 在这个位置上, 工业革命开始了。

达比之前就有一些其他企业家曾试图用煤炭或焦炭来炼铁。一个很早就被使用过的简单工艺, 就是在往高炉装入的木炭中混入少量的煤炭或焦炭^[28]。

英国人杜德利 (Dud Dudley 1599—1684年), 在他的著作《火星之金》 (*Metallum Martis*, 1665年) 中宣称自己第一个成功使用矿物燃料冶铁。

冶金历史学家的共识似乎是, 他成功的使用煤炭冶炼出铁, 但他肯定没有在经济上获得成功, 大概是因为他的铁产品质量低劣、性能不可靠^[29]。

另一位早期的先锋人物是罗伯特王子 (Rupprecht von der Pfalz, 1619—1682年), 他是国王查尔斯一世的表弟和英国皇家学会的成员^[30]。埃里克 (Erik Odhelius 1661—1704年) 报告了罗伯特王子用煤炼铁的实验, 埃里克是瑞典最重要的冶金学家之一, 他在1686年和1691—1692年访问了英国^[31]。他关于欧洲金属工业的报告手稿仍然存世, 但从未公开出版。在伊曼纽·史威登堡 (Emanuel Swedenborg) 1734年出版的著作《钢铁》 (*De Ferro*) 中^[32] 和一份在1744年的瑞典皇家委员会的报告中, 都可以找到罗伯特王子用煤炼铁的实验简要摘录。后者的内容如下:

50多年前, 在苏塞克斯 (Sussex) 的高炉中, 罗伯特王子尝试用矿煤熔炼铁矿石, 但没有成功, 因为不但焦油把高炉弄得脏兮兮的, 而且冶炼出来的铁因含硫而十分脆弱, 这种工艺注定要被放弃。后来, 在科尔布鲁克代尔 (原文是Coalebrooksdal) 的工厂中, 使用矿煤作为燃料的高炉操作工艺已经如同使用木炭作为燃料的工艺一样完善。但是仍然有一些问题: ①矿煤能化开 (即熔融) 的铁矿石还不到木炭化开的铁矿石的一半^[33], 更确切地说, 铁的成分中含有相当大比例的硫; ②生产出来的大部分铁料依然不能被锻铁厂使用, 除了一小部分可以和优质铁料混合使用外。但另一方面, 这些铁料很适用于各种铸造厂。

时间会告诉我们这门工艺是否可以被带到一个更高的水平。但该委员会认为，实际上这门工艺不可能更进一步，因为铁料与硫杂质之间的天敌特性很难被清除。^[34]

有意思的是，罗伯特是在苏塞克斯进行的实验，这里的木炭资源丰富而煤炭资源不足（Hodgkinson 1994），但在17世纪的时候，英国大部分高炉都位于这里〔以森林覆盖著名的维耳德（Weald）地区〕^[35]。据推测，对冶铁场地的选址是由合作的制铁业内部人士确定的。

罗伯特王子遇到焦油污染高炉的麻烦，暗示出他使用的原料是烟煤而非焦炭，很可能与杜德利最早的实验一样^[36]。使用原煤作为燃料，炉料会黏附在高炉内衬上生成“瘤状物”，这会产生严重的问题，这种“瘤状物”随后可能突然崩溃，有时会酿成灾难性后果^[37]。

简而言之，烟煤是一种复杂的高分子有机化合物，通常含大约75%的碳^[38]。烟煤的“焦化”（如同木炭的炭化）是热解过程（干馏），它可以提供有用的有机馏出物（煤焦油）以及焦炭，焦炭通常含超过90%的碳。传统焦炭的炼制过程非常像木炭的烧制过程，这两个过程都被看做是“通过燃烧去除杂质”。在各自的现代工艺中的热解使用的热源比煤炭或木材被蒸馏的使用的热源更便宜和更容易控制。

烟煤在家用和工业应用中最好是制成焦炭使用，因为焦炭“燃烧得很干净”：燃烧产物中闻不到硫的味道，不包含污染炉子、烟道和空气的重烃化合物。

硬煤，或称“无烟煤”，是一种在地质过程中植物性物质煤化程度最高的煤，因此，它含有90%以上的碳，氢含量不超过1%—2%。它不能被焦化，对于大多数工业用途而言，这种煤不需要焦化。由于硬煤反应活性非常低，在高炉中使用起来非常困难^[39]。

焦炭曾在英国被广泛使用，包括从17世纪初起用于冶炼铜和铅，似乎可以肯定的是，亚伯拉罕·达比，在高炉中使用的是焦炭而不是煤炭^[40]。焦炭是反应活性要低于木炭，因此在高炉中的反应需要更高的温度^[41]。这意味接下来需要消耗更多的燃料和更大体积的高炉。焦炭燃料炉的炉料渗透性不太好，所以还需要更大的炉内压力^[42]。在达比的会计账簿中可以清楚地看出更多的燃料消耗，并可以看出在科尔布鲁克代尔的高炉增加了水动力的使用，起到了满足更大的鼓风量和压力需求的作用。

在瑞典人关于铁厂的报告的评论中，指出了亚伯拉罕·达比成功最重要的原因：他是一个诚实的贵格会教徒，和杜德利及其他人比起来是一个更好的商人。对于他生产的铁，他并没有言过其实，但他生产的铁仅适用于许多初级的应用。毫无疑问，他的生铁含有过多的硫，不适合作为制作熟铁的原材料，但它很可能是一种特别适用于铸造的原材料。在高炉中的高温导致铁料中的硅含量较高，因此，它可以用于制作薄的灰口铸铁产品。碰巧本地矿石中包含了大量的锰，锰硫结合导致铸造出来的铁件没有出现明显缺陷。达比的铁厂成为著名的生产大型薄壁铁盆的工厂，薄壁铁盆要优于

较厚的盆,而且更经济实用,因为用的铁料更少,价格更便宜。

另一方面,锰不能降低熟铁和钢中由于硫所引起的“热脆性”(在高温下的脆性),而生产熟铁又需要含硫量低的生铁。解决这个难题的方案是,在高炉装入大量的石灰石,这是很简单的工艺方式,但发现和探索这种工艺花费了一些时间。石灰石(CaCO_3)在现代高炉有两个功能:一是作为助熔剂,可以调节炉渣的熔点到一个切实可行的温度,另外是作为脱硫剂,通过这个反应 $\text{S} + \text{CaO} + \text{C} = \text{CaS} + \text{CO}$ 将硫变成炉渣去除^[43]。早期高炉使用的石灰石的量通常太少,对脱硫没有太大的作用,但对于使用木炭作为燃料的高炉这点并不重要。后来,人们发现,在使用焦炭作为燃料的高炉中装入更多的石灰石可以帮助解决硫的问题,但所需的用量却大大提高了炉渣的熔点。从生铁中除去硫的关键问题,仍然是在高炉中实现更高的温度。焦炭的使用已经提高炉中的温度,但还不够。这时亚伯拉罕·达比的高炉产出的生铁还不能作为生产熟铁的原料,直到纽科门蒸汽机安装后,为高炉增加水动力,使得更高的温度的获得成为可能^[44]。

五、宋元时期冶铁的矿物燃料

前文关于18世纪英国什罗普郡的案例是否可以告诉我们宋元高炉操作技术的可能性?

如同放射性碳的研究表明,他们可能已经将一些煤炭或焦炭与木炭混合后装入高炉中。这可能意味着可以节省木炭和降低整体燃料的反应活性,其结果是高炉工作温度升高和产出的生铁中硅和硫的含量也略微增加。

根据冯·里希特霍芬(von Richthofen)的记载^[45],19世纪在湖南南部(耒阳市的南部)的一座高炉,已经开始使用烟煤原料作为燃料。这座高炉高6米,用砂岩垒筑,外框为木制,中间由泥土夯实(在1958年的湖南,有一些类似的高炉,如图二、图三所示)。鼓风装置主要由三名男子操作。他的记述表明,通过生产出来的生铁断面的物理外观可以推测硫含量可能相当高,这种生铁被精炼为熟铁后依然具有较高的硫,质量虽然较差但还是能销售出去。

这个例子表明,在宋代时期所知的一种高炉类型可能已经使用烟煤作为燃料,尽管我们不知道他们如何解决前文讨论的技术难题。在苏轼的诗中提到的“腥风”使人想起硫化氢的气味,这暗示着可能在这种高炉中使用了煤炭而不是焦炭,虽然我们不应该过多的立足于一首诗中的一句来进行推理。

罗斯托克(Rostoker)和布朗森(Bronson)在1990年讨论过同样的问题^[46],他们指出一些中国的传统的高炉,开口广且浅。他们认为在这种炉中,凝集和结瘤的问题会远不如其他更常见的类型高炉严重。他们是专指宋应星的著作《天工开物》中提到的一种17世纪的高炉^[47]。原文中没有告诉我们在哪里使用的是什么燃料,但有意思的是,宋应星从来没有提到焦炭,可能是他对此并不了解^[48]。

另一方面,在20世纪初中国中部的一座高炉非常类似上述高炉,如图七所示,使用焦炭作为燃料^[49],和许多其他使用木炭作为燃料的传统高炉的形状有点类似^[50]。

早期的中国已经认识到焦炭的各种用途。最早的文献可以上溯到公元4世纪初^[51]，哈特韦尔（Hartwell）指出在两份文献中明确提到宋代已经开始使用焦炭^[52]，特别是在钢铁冶炼中。焦炭也在19世纪—20世纪的一些中国传统高炉中当做燃料使用^[53]，似乎看起来在宋代不使用木炭作为燃料的高炉中，最常见的燃料是焦炭^[54]。

我们所知道的宋代的高炉是大型竖炉，有时会有一个不寻常的外部构造，但内部形式是相同的，并且我们在前文讨论的以焦炭为燃料的英国高炉中掌握到的知识，应该可以用于认识这些高炉。从木炭过渡到煤炭或焦炭，将需要较高的温度，因此，需要较大的燃料消耗量和更大的鼓风量以及压力。这可能是在宋代冶铁中使用水动力的一个重要原因^[55]。掘地破土建造的半地下高炉与大家比较熟悉的立于地上的高炉比起来有更好的绝热性能，而且可能在一定程度上降低了对高炉长度的要求。

生产出来的生铁可能硫含量较高，除非认识到石灰石作为脱硫剂的有效性，并被应用于实践。但是，使用石灰石需要更高的炉内温度，以及更强大的鼓风装置。使用人力鼓风，或者使用轻型下冲式水轮，使用这种水车似乎是中国宋代的规范工艺，能否达到脱硫所需的温度看起来值得怀疑。一定要牢记我的这个猜测：这个问题能不能圆满回答，取决于分析相关高炉遗址提供的炉渣。

即便硫含量低至0.1%的水平，也使得熟铁或钢几乎无法使用。因此，如果在使用煤炭或焦炭作为燃料的高炉中不实行有效的脱硫工艺，他们的产品是不可能被用作制造熟铁的原料，但可以被铸造厂使用。

另一方面，在铸造厂中，我们认为用煤炭或焦炭作燃料的高炉产出的生铁通常会有一个优点，即较高的硅含量可以减少铸造中的气泡，并且可能生成一种灰口铸铁态结构。较高的硫含量不一定就是一个缺点。如果生铁中的锰含量大约是硫含量的两倍，两者结合，生成锰硫化物（MnS）从而形成无害的微观夹杂物^[56]。即使没有锰，铸铁中的硫，唯一重要的结果是形成一种白口铸铁态结构，非常硬且脆。在许多应用中，白口铸铁是完全可以接受的，甚至优于灰口铸铁^[57]。

我们不知道宋代冶铁厂是否用过像《天工开物》中提到的那种开口广且浅的高炉，或如图七所示，总之有关这种炉的技术特点我们几乎一无所知。他们与现代高炉是如此不同，以至于我们不能想当然地运用我们从现代高炉实践得到的知识来分析，如分析炉内温度、鼓风量需求、或产出生铁中的含硅量和含硫量。在这种情况下的双重无知很难做些什么，只有将这种类型高炉的问题暂放一边，并期望未来会有一些启示。



图七 中国中部地区一处炼铁厂（江西或湖南）
（拍摄于1910年左右，采自Lux的著作，1912年，第140页）

六、结 语

木炭冶铁工业并不必然导致森林砍伐。这在很大程度上取决于钢铁业者的长期战略规划,以及他们在何种程度上能够保卫自己的森林资源不为其他燃料用户所用,在中国历史上代代都有成功的保护自然森林资源的案例^[58]。所有的木炭炼铁生产中遇到的问题,即使有最好的森林资源管理,每单位面积林地可持续供应冶铁生产都有一定的上限。要生产出更多铁,有必要开发其他地方,或者找到替代燃料。在宋代,这两种选择似乎一直在尝试以应对不断增长的钢铁需求,森林资源丰富的南方产铁量一直在增加,而北方开始使用煤炭冶铁。从现有资料来源来看,这些发展过程都没有明确的细节,但从大的轮廓来看,这似乎的确发生过。

如果这是真的,正如我前面提到的,即用煤炭或焦炭为燃料的高炉产出的生铁是不适合用来锻造熟铁的,那么新的燃料无法代替木炭,但可以作为生产铸铁产品的一个补充,以填补不断增长的铸铁需求。宋元时期可以看得见的一个转变是,熟铁工具的使用要远比铸铁工具的使用更受欢迎^[59],但在人口增长和农业扩张时期,更便宜的铸铁工具仍然有一定的市场份额。许多其他种类的铸铁产品的需求也一定在增长,例如各种大小的盆,从普通的炊具到巨大的煮盐用的牢盆。铁钱的铸造也很可能可以接受含硫量高的铸铁,但我想看到一些宋代铁钱的分析报告^[60],来确认这个观点。这里我一直在专注于11世纪的情况,而一个世纪后的湿法制铜工艺中需要大量廉价的铁,毫无疑问,这些铁可能是由使用煤炭或焦炭作为燃料的高炉所提供的^[61]。

致谢:本文在修订之后成为了我撰写的《中国科学技术史》“钢铁冶金”分册的其中一章。我在剑桥大学李约瑟研究所的研究工作,在1990—1991年度由Julie von Müllen基金会资助,在1993—1996年度由Leverhulme基金会资助。

作为一个尝试,我把文章的最终稿的前一稿刊发在互联网上,期待网上三处讨论区的意见和建议^[62]。大家的反馈是相当令人鼓舞的,我要特别感谢Martha Goodway, Peter Hutchison, Peter King和Alan Williams的有益意见。与往常一样,文中不妥之处,皆在于我。

译者按:此篇文章首次刊登在*East Asian Science, Technology, and Medicine*第18期(2001年)41—74页^[63]。华道安博士和EASTM总编辑Hans Ulrich Vogel先生在提供翻译版权许可方面给予了帮助,承李映福教授通阅全文,在此表示感谢。

注 释

- [1] 杨宽:《中国古代冶铁技术发展史》,上海:上海人民出版社,1982年,第166—171页。
胡悦谦:《繁昌县古代炼铁遗址》,《文物》1959年第7期。李小平:《新余古代冶铁考

析》，《南方文物》1995年第3期。新余市博物馆：《江西新余市分宜县古矿冶遗址调查简报》，《南方文物》1992年第2期。邓道炼：《江西永平铁冶遗址初探》，《南方文物》1991年第3期。陈仲光：《同安发现古代炼铁遗址》，《文物》1959年第2期。黑龙江省博物馆：《黑龙江阿城县小岭地区金代冶铁遗址》，《考古》1965年第3期。中国冶金史编写组、首钢研究所金相组：《磁县元代木船出土铁器金相鉴定》，《考古》1978年第6期。河南省文物研究所、中国冶金史研究室：《河南省五县古代铁冶遗址调查》，《华夏考古》1992年第1期。吴坤仪、于晓兴：《荥阳楚村元代铸造遗址的试掘与研究》，《中原文物》1984年第1期。任志远：《沙河县的古代冶铁遗址》，《文物参考资料》1957年第6期。唐云明：《河北邢台发现宋墓和冶铁遗址》，《考古》1959年第7期。王兆生：《龙烟铁矿矿区发现辽代炼铁遗址——该矿由外国人发现的历史将改写》，《文物春秋》1994年第1期。刘云彩：《中国古代高炉的起源和演变》，《文物》1978年第2期。

- [2] 早期汉代高炉参阅Donald B. Wagner, *The State and the Iron Industry in Han China*, Copenhagen: Nordic Institute of Asian Studies, 2001. 19世纪和20世纪的中国传统高炉参阅Donald B. Wagner, “Some Traditional Chinese Iron Production Techniques Practiced in the 20th Century”, *Journal of the Historical Metallurgy Society*, Vol.18 (1984), pp.95-104; Donald B. Wagner, “Dabieshan Traditional Chinese Iron-production Techniques Practised in Southern Henan in the Twentieth Century”, *Scandinavian Institute of Asian Studies Monograph Series*, No. 52, London & Malmö: Curzon Press, 1985. Donald B. Wagner, *The Traditional Chinese Iron Industry and its Modern Fate*, Richmond, *Nordic Institute of Asian Studies, NIAS Report Series*, 32, Surrey: Curzon Press, 1997.
- [3] 图片一采自陈应祺：《邯郸矿山村发现宋代冶铁炉》，《光明日报》1959年12月13日。这一时期中国处于纸张短缺，报纸被停止出口，在任何欧洲图书馆我都未能找到影印版本。
- [4] 刘云彩：《中国古代高炉的起源和演变》，《文物》1978年第2期。Donald B. Wagner, “Dabieshan Traditional Chinese Iron-production Techniques Practised in Southern Henan in the Twentieth Century”, *Scandinavian Institute of Asian Studies Monograph Series*, No. 52, London & Malmö: Curzon Press, 1985.
- [5] 磁州交付原料铁1 971 001斤，邢州交付原料铁2 173 201斤，全国原料铁交付总额5 501 097斤（1180年）。《宋会要辑稿》卷33《食货》，北京：中华书局，1957年，第1935页。Hartwell通过制铁行业的实物税额的比例关系，根据一系列假定推算出北宋时期中国的铁产量为125 000英吨，约合115 000公吨，人均产铁1.2公斤。看起来这个数据很可信，但是他的理论存在严重缺陷，这一点被吉田光邦和Wagner指出，参阅吉田光邦，“宋代の鉄について”，*东洋史研究*, Vol.24 (1966), pp.517-523, pp.508-524; Repr. Yoshida, 1972, pp.353-371. 另参阅刘俊文主编：《日本学者研究中国史论著选译》第十卷《科学技术》，北京：中华书局，1992年，第184—201页。Donald B. Wagner, “The Administration of the Iron Industry in Song China”, *Journal of the Economic and Social History of the Orient*, Vol. 44 (2001), pp.175-197.
- [6] 北京钢铁学院《中国冶金简史》编写小组：《中国冶金简史》，北京：科学出版社，1978年，第148、149页。河南省文物研究所、中国冶金史研究室：《河南省五县古代铁冶遗址

- 调查》，《华夏考古》1992年第1期。
- [7] 李小平：《新余古代冶铁考析》，《南方文物》1995年第3期。新余市博物馆：《江西新余市分宜县古矿冶遗址调查简报》，《南方文物》1992年第2期。黑龙江省博物馆：《黑龙江阿城县小岭地区金代冶铁遗址》，《考古》1965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。
- [8] 黑龙江省博物馆：《黑龙江阿城县小岭地区金代冶铁遗址》，《考古》1965年第3期。
- [9] Donald B. Wagner, “Dabieshan Traditional Chinese Iron-production Techniques Practised in Southern Henan in the Twentieth Century”, *Scandinavian Institute of Asian Studies Monograph Series, No. 52*, London & Malmö: Curzon Press, 1985; Donald B. Wagner, *The Traditional Chinese Iron Industry and its Modern Fate*, Richmond, Surrey: Curzon Press, 1997.
- [10] 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。
- [11] 李小平：《新余古代冶铁考析》，《南方文物》1995年第3期。
- [12] (明)宋应星著、钟广言注释：《天工开物》，香港：中华书局，1978年。
- [13] (明)宋应星著、任以都、孙守全译，*T'ien-kung K'ai-wu: Chinese Technology in the Seventeenth Century*, University Park & London: Pennsylvania State University Press, 1966. (明)宋应星著、蕞内清译：《天工开物》，东京：平凡社，1969。1978年钟广言注释的《天工开物》第14章中，虽然把“穴”字翻译成山洞，但没有给出解释。
- [14] Li Chiao-ping [Li Qiaoping 李乔平] (et al., trs.), *Tien-kung-kai-wu 天工开物, Exploitation of the Work of Nature: Chinese Agriculture and Technology in the XVII Century*, Taipei: China Academy. (Chinese Culture Series, 2-3), 1980, p.351.
- [15] Peter J. Golas, “Chemistry and Chemical Technology Part 13: Ming”, in Joseph Needham eds., *Science and Civilization in China*, Vol.5(1999), Cambridge: Cambridge University Press, pp.195-196; Christian Daniels, Nicholas K. Menzies, “Biology and Biological Technology. Part 3: Agro-industries and Forestry”, in Joseph Needham eds., *Science and Civilization in China*, Vol. 6(1996), Cambridge: Cambridge University Press, p.654. 许惠民：《北宋时期煤炭的开发利用》，《中国史研究》1987年第2期。
- [16] 今新疆库车县，参见冯承钧、陆峻岭：《西域地名》（增订本），北京：中华书局，1980年，第55页。
- [17] 王国维校，袁英光、刘寅生整理标点：《水经注校》，上海：上海人民出版社，1984年，第40页。《释氏西域记》参阅岑仲勉：《中外史地考证》，香港：太平书局，1966年，第213页。Thomas T. Read, “The Earliest Industrial Use of Coal”, *Transactions of the Newcomen Society for the Study of the History of Engineering and Technology*, 1940, pp.123-125.
- [18] 苏轼, “Coal, by Su Shih.” trans. by Sivin, N., *Technology Studies Bulletin*, Vol.1 (1973), p.33.
- [19] 句中“抱衾裯”，语出《诗经·召南·小星》，意为侍寝，亦借指作妾。
- [20] Robert M. Hartwell, *Iron and Early Industrialism in Eleventh-century China*, Ph.D. Dissertation,

- University of Chicago, 1963; Robert M. Hartwell, “A Cycle of Economic Change in Imperial China: Coal and Iron in Northeast China, 750-1350” , *Journal of the Economic and Social History of the Orient*, Vol.10 (1967), pp.102-159, pp.61-72; Wang Ling, “The History of the Use of Coal by the Chinese in Early Periods.” 内部资料, 剑桥大学李约瑟研究所文献, 1982年, 第25页。Hua Jueming 华觉明, “The Use of Coal, Briquetting and Agglomeration in Ancient Chinese Metallurgy” (内部资料), 剑桥大学李约瑟研究所文献, 1989年, 第5页。许惠民: 《北宋时期煤炭的开发利用》, 《中国史研究》1987年第2期。
- [21] 北京钢铁学院《中国冶金简史》编写小组: 《中国冶金简史》, 第152页。Hua Jueming 华觉明, “The Use of Coal, Briquetting and Agglomeration in Ancient Chinese Metallurgy” (内部资料), 剑桥大学李约瑟研究所文献, 1989年, 第5页。
- [22] 仇士华、蔡莲珍: 《我国古代冶铁燃料的碳十四鉴定》, 《中国考古学研究》, 北京: 文物出版社, 1986年, 第359—363页。Kenzo Igaki, “¹⁴C Dating Study of Ancient Iron Artifacts” , in BUMA-3: The Third International Conference on the Beginning of the Use of Metals and Alloys, 18-23 April 1994, Sanmenxia 1994, pp.38-39; Tsutomu Saito, “Development of New Methods for Isotope Analysis on Ancient Metal Objects – Lead Isotope and ¹⁴C Measurements” , in BUMA-3: The Third International Conference on the Beginning of the Use of Metals and Alloys, 18-23 April 1994, Sanmenxia 1994, pp. 40-41.
- [23] 仇士华、蔡莲珍: 《我国古代冶铁燃料的碳十四鉴定》, 《中国考古学研究》, 北京: 文物出版社, 1986年, 第359—363页。
- [24] Donald B. Wagner, “The Administration of the Iron Industry in Song China” , *Journal of the Economic and Social History of the Orient*, Vol. 44 (2001), pp.175-197.
- [25] Donald B. Wagner, *The Traditional Chinese Iron Industry and its Modern Fate*, Richmond, Surrey: Curzon Press, 1997.
- [26] 多位学者认为坩埚熔炼工艺是中国最早使用的冶铁工艺, 但没有任何实物证据。参阅Joseph Needham, *The Development of Iron and Steel Technology in China*, London: The Newcomen Society. Second Dickinson Memorial Lecture to the Newcomen Society, 1956, p.14; Theodore A. Wertime, *The Coming of the Age of Steel*, Leiden: E. J. Brill, 1961; Hartwell, 1963, pp.71-72; Hartwell, 1967, p.119, 参阅注 [20] 。
- [27] 西方用煤冶铁的历史参阅: T. S. Ashton, “The Discoveries of the Darbys of Coalbrookdale” , *Transactions of the Newcomen Society for the Study of the History of Engineering and Technology*, Vol.5 (1924/25), pp. 9-14; Alan Birch, *The Economic History of the British Iron and Steel Industry, 1784-1879: Essays in Industrial and Economic History With Special Reference to the Development of Technology*, London: Cass, 1967; W. H. Chaloner, “Further Light on the Invention of the Process for Smelting Iron Ore With Coke” , *Economic History Review*, 2nd ser., Vol.2 (1950), pp.185-187; Jean Chevalier, “La mission de Gabriel Jars dans les mines et les usines britanniques en 1764” , *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.26 (1949), pp.57-68; Catherine Clark,

English Heritage Book of Ironbridge Gorge, London: Batsford / English Heritage, 1993; Nancy Cox, "Imagination and Innovation of an Industrial Pioneer: The First Abraham Darby", *Industrial Archaeology Review*, Vol.12 (1990), pp.127-144; Philippa Dobson, *The 250th Anniversary of the First Successful Use of Coke in Ironmaking: A Select Bibliography*, London: School of Library and Information Studies, Ealing College of Higher Education, 1982 (Ealing Miscellany, 25); Michael W. Flinn, "William Wood and the Coke-smelting Process", *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.34 (1962), pp.55-71; Hans Otto Gericke, "Die Verwendung von Koks bei der Erzverhüttung im mitteldeutschen Raum um 1584", *Technikgeschichte*, Vol.66 (1999), pp.87-113; Bertrand Gille, "L' Utilisation de la houille en sidérurgie (Notes d' histoire de la technique métallurgique, II)", *Métaux et civilisations: Les métaux dans l'histoire, les techniques, les arts*, Vol.1, No.5 (1946), pp. 99-104; J. R. Harris, *The British Iron Industry, 1700-1850*, Basingstoke & London: MacMillan Education, 1988; J. R. Harris, *Industrial Espionage and Technology Transfer: Britain and France in the Eighteenth Century*, Aldershot, Hants.: Ashgate, 1998; Charles K. Hyde, *Technological Change and the British Iron Industry, 1700-1870*, Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1977; Laurence Ince, "The Introduction of Coke Iron at the Stour Forges of the Knight Family", *Journal of the Historical Metallurgy Society*, Vol.24(1991), pp.107-113; P. W. King, "Dud Dudley and Pit-coal Iron", *The Blackcountryman*, Vol.29 (1996), pp.23-24; G. R. Morton & M. D. G. Wanklyn, "Dud Dudley – A New Appraisal", *Journal of West Midlands Regional Studies*, Vol.1 (1967), pp.48-65; R. A. Mott, "Dud Dudley and the Early Coal-iron Industry", *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.15 (1935), pp.17-37; R. A. Mott, "Abraham Darby (I and II) and the Coal-iron Industry", *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.31 (1959), pp.49-93; R. A. Mott, "The Coalbrookdale Group Horsehay Works (Parts I – II)", *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.31 (1959), pp.271-287; Vol.32 (1961), pp.43-56; Carl W. Pfannenschmidt, *Die Anwendung des Holzkohlenhochofens seit Ende des 16. Jahrhunderts zur Erzeugung von Gusswaren erster Schmelzung und die spätere zweite Schmelzung in Flamm- und Kupolöfen bis Mitte des 19. Jahrhunderts* (Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Fachausschussbericht, 9.007), Düsseldorf: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 1977, pp.128-131; Arthur Raistrick, *Dynasty of Ironfounders: The Darbys and Coalbrookdale*, 2nd ed., York: Ironbridge Gorge Museum Trust & Sessions Book Trust 1989; J. E. Rehder, "The Change From Charcoal to Coke in Iron Smelting", *Journal of the Historical Metallurgy Society*, Vol.21 (1987), pp.37-43; J. E. Rehder, "Abraham Darby and Coke in the Blast Furnace", *Iron and Steelmaker*, December 1998, pp.29-33; Philip Riden, "Some Unsuccessful Blast Furnaces of the Early Coke Era", *Journal of the Historical Metallurgy Society*, Vol.26 (1992), pp.36-44; Philip Riden, "The Final Phase of Charcoal Iron-smelting in Britain, 1660-1800", *Journal of the Historical Metallurgy Society*, Vol.28 (1994), pp.14-26; J. M. Treadwell, "William Wood and the Company of Ironmasters of Great Britain", *Business History*, Vol.16 (1974), pp.97-112; Barrie Trinder, *The Most Extraordinary District in*

- the World: Ironbridge and Coalbrookdale. An Anthology of Visitors' Impressions of Ironbridge, Coalbrookdale and the Shropshire Coalfield*, 2nd ed., Chichester, 1988. West Sussex: Philimore / Ironbridge Gorge Museum Trust; Theodore A. Wertime, *The Coming of the Age of Steel*, Leiden: E. J. Brill, 1961; Peter W. King, "Sir Clement Clerke and the Adoption of Coal in Metallurgy", *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.73 (2002), pp.33-52.
- [28] Birch (1967, p.26, 参阅注 [27]) 指出, 在约克郡的制铁业者的一份协议中, 曾经明确提到考虑采用这种工艺。在Birch看来这种工艺仅仅是为将来提供一种可行性的做法。但从该协议的措辞上看, 更像是一个业内人士提及众所周知的现行做法。
- [29] 关于杜德利 (Dud Dudley) 的正反面观点参阅: Geo. R. Morton, "The Early Coke Era", *Bulletin of the Historical Metallurgy Group*, Vol.6 (1966), pp.53-58; G. R. Morton & M. D. G. Wanklyn, "Dud Dudley—A New Appraisal", *Journal of West Midlands Regional Studies*, Vol.1(1967), pp.48-65; T. S. Ashton, "The Discoveries of the Darbys of Coalbrookdale", *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.5 (1925), pp.9-14; R. A. Mott, "Dud Dudley and the Early Coal-iron Industry", *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.15 (1935), pp.17-37; W. K. V. Gale, *The Black Country Iron Industry: A Technical History*, 2nd ed., London: The Metals Society, 1979, pp.16-18; Bertrand Gille, "L' Utilisation de la houille en sidérurgie (Notes d' histoire de la technique métallurgique, II)", *Métaux et civilisations: Les métaux dans l'histoire, les techniques, les arts*, Vol.1 (1946), p.101.
- [30] Patrick Morrah撰写的罗伯特王子传记中有一章节, 记述了罗伯特王子的科技成就, 引证了大量档案资料, 但没有提及他的冶铁实验。参阅Patrick Morrah, *Prince Rupert of the Rhine*, London: Constable, 1976, pp.387-399. 其他的传记中, 包括*The Dictionary of National Biography* (《英国国家传记大辞典》), 都没有提及罗伯特王子的科技成就。但值得注意的是, 在英国内战期间, 杜德利在莫里斯王子的军团中担任过职务, 莫里斯王子是罗伯特王子的兄弟。参阅*Dictionary of National Biography, From the Earliest Times to 1900*, Oxford: Oxford University Press, Vol.6 (1973), p.100; G. R. Morton & M. D. G. Wanklyn, "Dud Dudley – A New Appraisal", *Journal of West Midlands Regional Studies*, Vol.1 (1967), pp.48-65.
- [31] 罗伯特王子逝世的时间是1682年, 埃里克访问英国的时间发生在此之后, 因此他的报告内容不可能来自于他的亲眼所见。参阅Alan Birch, "Foreign Observers of the British Iron Industry During the Eighteenth Century", *Journal of Economic History*, Vol.15 (1955), pp.23-33; Eli F. Heckscher, *An Economic History of Sweden*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1954, p.87. (Harvard Economic Studies, 95); Herman Hofberg, *Svenskt biografiskt handlexikon: Alfabetiskt ordnade lefnadsteckningar af Sveriges namnkundiga män och kvinnor från Reformationen till nuvarande tid. Ny upplaga, 2 vols.*, Stockholm: Albert Bonniers Förlag, Vol.2 (1906), p.228; Eli F. Heckscher, *Sveriges ekonomiska historia från Gustav Vasa. 4 vols.*, Stockholm: Albert Bonniers Förlag, 1949; Sven Rydberg, *Svenska studieresor till England under Frihetstiden*. Uppsala: Almqvist & Wiksell, 1951, pp.142-143. (Lychnos-bibliotek, 12).

- [32] 参阅Emanuel Swedenborg, *Regnum subterraneum sive minerale*. [Vol. 2:] De ferro, deque modis liquationum ferri per Europam passim in usum receptis . . . Dresdæ et Lipsiæ: Friderici Hekelii, 1734, § 12, p.158; 瑞典文译Hj. Sjögren, *Mineralriket, av Emanuel Swedenborg: Om järnet och de i Europa vanligast vedertagna järnframställningssätten . . .* Stockholm: Wahlström & Widstrand, 1923, p.190; 法文译Emanuel Swedenborg, *Traité du fer, par M. Swedemborg, trad. du Latin par M.Bouchu*(Description des arts et métiers: Art des forges et fourneaux à fer, par M. le Marquis de Courtivron et par M. Bouchu; 4ème section), Paris: Guerin et Delatour, 1762, pp.96-97.
- [33] 参阅注 [29] 。
- [34] 关于委员会的欧洲钢铁业的完整报告发表在 “*Järnhandtering i Europa under midten af 1700-talet*”, *Blad för bergshandteringens vänner*, Vol.15 (1918), pp.125-140. 该段摘录内容翻译自第135页。
- [35] 参阅Philip Riden, “The Final Phase of Charcoal Iron-smelting in Britain, 1660-1800”, *Journal of the Historical Metallurgy Society*, Vol.28 (1994), pp.14-26. Peter King曾告知我, 高炉数量的这个状况很有可能是正确的, 但是维耳德地区的钢铁业是在17世纪70年代后期才衰落的, 到了18世纪才变得无足轻重(2000年3月10日的个人信件)。
- [36] 参阅注 [27] , Morton, 1966; Morton & Wanklyn, 1967.
- [37] 参阅John Percy, *Metallurgy . . .* [Vol. 2:] Iron; steel, London: John Murray, 1864, pp.521-526.
- [38] 烟煤的化学知识参阅Martin Grayson, eds., *Kirk-Othmer concise encyclopedia of chemical technology*. 3rd ed., New York: Wiley, 1985, pp.285-289; R. A. Mott, eds., *The History of Coke Making and of the Coke Oven Managers' Association*, Cambridge: Heffers, 1936; John Percy, *Metallurgy: ...* [Vol. 1:] Fuel; Fire-clays; Copper; Zinc; Brass; etc., London: John Murray, 1861, pp.78-107, 144ff; G. J. Pitt & G. R. Millward, eds., *Coal and Modern Coal Processing: An Introduction*, London / New York / San Francisco: Academic Press, 1979; J. E. Rehder, “The Change From Charcoal to Coke in Iron Smelting”, *Journal of the Historical Metallurgy Society*, Vol.21 (1987), pp.37-43; J. E. Rehder, “Abraham Darby and Coke in the Blast Furnace”, *Iron and Steelmaker*, December 1998, pp.29-33; Terkel Rosenqvist, *Principles of Extractive Metallurgy (McGraw-Hill Series in Materials Science and Engineering)*, New York: McGraw-Hill, 1974, pp.223-227; William Rostoker & Bennet Bronson, *Pre-industrial Iron: Its Technology and Ethnology (Archeomaterials Monograph, No. 1)*, Philadelphia, 1990, pp.66-69.
- [39] 参阅W. Ross Yates, “Discovery of the Process for Making Anthracite Iron”, *Pennsylvania Magazine of History and Biography*, Vol.98 (1974), pp. 206-223.
- [40] 参阅注 [27] , Mott , 1959; Rehder, 1987; 1998.
- [41] 高炉操作技术研究参阅Donald B. Wagner, *The Traditional Chinese Iron Industry and its Modern Fate (Nordic Institute of Asian Studies, NIAS Report Series, 32)*, Richmond, Surrey: Curzon Press, 1997. 在高炉中轴的上半部分有一个“相对恒温反应区域”, 在这个区域内平衡稳定的温度取决于燃料的活性。在现代高炉中通过控制燃料的活性来获得高温是可行的。

- [42] 参阅J. E. Rehder, “The Change From Charcoal to Coke in Iron Smelting”, *Journal of the Historical Metallurgy Society*, Vol.21 (1987), pp.37-43; J. E. Rehder, “Abraham Darby and Coke in the Blast Furnace”, *Iron and Steelmaker*, December 1998, pp.29-33. 这两篇文章中对这些技术点给予清晰的讨论, 部分讨论基于19世纪高炉操作实践, 这些高炉的生产会因不同的燃料类型市场价格的变化而变动, 焦炭燃料的鼓风量大约是木炭燃料的两倍。
- [43] 参阅注 [2], Wagner, 1997, pp. 22-23.
- [44] 参阅注 [27], Rehder, 1987, pp.42-43; 1998, pp.31-32.
- [45] 参阅Ferdinand von Richthofen, Vol.3, 1877-1912, China: Ergebnisse eigener Reisen und darauf gegründeter Studien. 5 vols., Bd. 3: Das südliche China, Berlin: Dietrich Reimer; F. R. Tegengren, *The Iron Ores and Iron Industry of China: Including a Summary of the Iron Situation of the Circum-Pacific Region (Memoirs of the Geological Survey of China, series A, No. 2)*, Vol.2, Peking: Geological Survey of China, Ministry of Agriculture and Commerce, 1923-1924, p.338. 除了铁厂情况外, 关于该地区的一些情况请参阅Ferdinand von Richthofen, *Baron Richthofen's Letters, 1870-1872*, Shanghai: North China Herald, n.d., [1872?], pp.5-7; Ferdinand von Richthofen, *Ferdinand von Richthofen's Tagebücher aus China*, Berlin: Dietrich Reimer, 1907, pp.375ff; W. Dickson, “Narrative of an Overland Trip, Through Hunan, From Canton to Hankow”, *Journal of the North China Branch of the Royal Asiatic Society*, N.S., Vol.1(1864), pp.159-173.
- [46] 参阅注 [38], Rostoker & Bronson, 1990, p.66.
- [47] 参阅注 [12]、注 [13] 和注 [14]。
- [48] Hartwell认为宋应星在《天工开物》第11章中描述了用煤炭炼焦, 参阅Robert M. Hartwell, *Iron and Early Industrialism in Eleventh-century China*. Ph.D. Dissertation, University of Chicago, 1963, p.69. Hartwell的观点可能是受到《天工开物》卷中“煤炭”是记述于《燔石第十一》之中启发, 但如果通读全文很难让人信服这个观点。参阅注 [13]、注 [31], Sun & Sun, 1966, pp.205-206; Li Chiao-ping, 1980, pp. 291-293; Yabuuchi, 1969, pp. 219-220.
- [49] 参阅Fr. Lux, “Koksherstellung und Hochofenbetrieb im Innern Chinas”, *Stahl und Eisen*, Vol.22 (1912), pp. 1404-1407.
- [50] 参阅注 [2], Wagner, 1984; 1985; 1997.
- [51] 语出《太平御览》卷605: 陆云与兄陆机书, 英译文参阅注 [15], Peter J. Golas in Needham, 1999, pp.193-194; Thomas T. Read, 1940, pp.125-126. “The Earliest Industrial Use of Coal”, *Transactions of the Newcomen Society*, Vol.20 (1939-1940), pp.119-133.
- [52] 李焘:《续资治通鉴长编》卷164, 北京: 中华书局, 1979年, 第12页。欧阳修:《乞条制都作院》,《欧阳文忠集》(四部备要版)卷188, 北京: 中华书局, 1920—1936年, 第6—8页; 参阅《欧阳永叔集》, 第14卷, 第8—10页; 参阅注 [20], Hartwell, 1963, pp. 69-70; Robert Hartwell, “Markets, Technology, and the Structure of Enterprise in the Development of the Eleventh-century Chinese Iron and Steel Industry”, *Journal of Economic History*, Vol.26 (1966), pp. 55-57.
- [53] 参阅注 [45], Tegengren, Vol.2 (1923/24), p.316, p.317, p.339, p.354.

- [54] 通常认为炼焦工艺在宋代以后失传, 也许是由于宋应星没有提及的缘故, 参阅Mark Elvin, “Skills and Resources in Late Traditional China”, in Dwight H. Perkins, eds., *China's Modern Economy in Historical Perspective*, Stanford: Stanford University Press, 1975, pp. 85-113. 但在20世纪早期有多种完全传统的炼焦工艺方法在使用, 我们并没有理由假定这种工艺曾经失传而又重新被发明出来, 参阅Woo Yang Tsang, “The Manufacture of Coke in Northern China”, *Transactions of the American Institute of Mining Engineers*, Vol.36 (1906), pp. 661-664; Fr. Lux, 1912. 参阅注 [49]。
- [55] Joseph Needham, *Science and Civilisation in China. Vol. 4: Physics and Physical Technology. Part 2: Mechanical Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press, 1965, pp.369-380.
- [56] H. T. Angus, eds., *Cast Iron: Physical and Engineering Properties*, 2nd eds., London: Butterworth, 1976, p.20.
- [57] S. C. Massari, “The Properties and Uses of Chilled Iron”, *Proceedings of the American Society for Testing Metals*, Vol.38 (1938), pp.217-234; William Rostoker, Bennet Bronson, & James Dvorak, “The Cast Iron Bells of China”, *Technology and Culture*, Vol.25 (1984), pp.750-767; Donald B. Wagner, *Iron and Steel in Ancient China*. Leiden: Brill, 1993, p.345.
- [58] 参阅注 [15] 和注 [2], Nicholas K. Menzies in Needham, 1996, p.607ff et passim; Wagner, 1985, pp.33-37.
- [59] 磁县文化馆: 《河北磁县南开河村元代木船发掘简报》, 《考古》1978年第6期。中国冶金史编写组、首钢研究所金相组: 《磁县元代木船出土铁器金相鉴定》, 《考古》1978年第6期。
- [60] 关于宋代的货币制度请参阅Hartwell Robert, “The Evolution of the Early Northern Sung Monetary System, A.D. 960-1025”, *Journal of the American Oriental Society*, Vol.87 (1967), pp. 280-289.
- [61] 参阅注 [15], Peter J. Golas in Needham, 1999, pp.370-386; L. S. Yang, 1952, pp.27-29.
- [62] Archaeometallurgy <arch-metals@mailbase.ac.uk>; East Asian Archaeology <ean@ccat.sas.upenn.edu>; East Asian Science <easci@ccat.sas.upenn.edu>.
- [63] Donald B. Wagner, “Blast Furnaces in Song-Yuan China”, *East Asian Science, Technology, and Medicine*, No. 18 (2001), pp. 41-74.

Blast Furnaces in Song-Yuan China

Donald B. Wagner

(School of History and Culture, Sichuan University)

Abstract: The Chinese “commercial revolution” of the 11th century was accompanied by number of important technical developments in all fields of industry. In the iron industry, the last major advances in blast furnace design were made. Water power was widely used for the blast, and coal and coke began to take the place of charcoal for the fuel. New blast furnace structures came into use, in some cases foreshadowing early European designs and those known from the traditional Chinese iron industry of the 19th and 20th centuries. This article reviews the available evidence on the construction and operation of iron blast furnaces in the Song and Yuan periods, with special reference to the use of mineral fuel. Excavated blast furnaces of the period are of two types: built into hillsides or wooden-framed with tamped-earth fill. Evidence for the use of mineral fuel in blast furnaces includes written sources (especially the famous poem “Coal” by Su Shi) and chemical and radiocarbon studies of iron artefacts. Future studies of slag from the blast furnaces may provide reliable evidence on precisely how the mineral fuel was used, but for the present, comparison with 17th- and 18th-century English experience with coal and coke in blast furnaces provides useful insights. The original article in English was published in 2001, and archaeological material published since that time has not been taken into account.

Keywords: Song Period, Yuan Period, Archaeometallurgy, Iron Industry, Blast Furnace, Mineral Fuel