

A Preliminary Study on Experimental Archaeometallurgy

冶金实验考古研究初探

刘海峰 陈建立 潜伟 铁付德 Liu Haifeng, Chen Jianli, Qian Wei, Tie Fude

128

内容提要：

新考古学的诞生为现代实验考古的产生和发展提供了理论基础。20世纪50年代以来，国内外冶金考古学者在矿石的开采和加工、金属冶炼和铸造、金属制品的加工和使用等领域进行了大量的实验考古研究，为解决古代冶金技术、复原古代冶金活动及其组织形式、探讨冶金活动与环境的关系等问题提供了有效途径。本文以国内外四个铜和铁的冶炼实验考古案例为例，对冶金实验考古的发展历程进行初步讨论，认为国外学者在青铜冶炼、块炼铁冶炼和特殊钢铁制品模拟等领域开展了大量的工作，国内学者在青铜铸造和黄铜冶炼等领域的工作亦具有重要作用。研究表明，国内工作在研究方法、研究内容、参与对象、学科参与度等方面都存在局限性，需要进一步开展更多的工作。

关键词：

冶金考古 实验考古 模拟实验

Abstract: The “new archaeology” has provided theoretical framework for modern experimental archaeology. Since the 1950s, archaeologists abroad have done a lot of researches on mining, smelting, casting, metal working and application and the results help to understand the metallurgical technologies in ancient world as well as the influences of metallurgical activities on society and environment. By reviewing four cases of experimental archaeometallurgy, the current authors find that foreign researches focus on bronze smelting, bloomery iron smelting and special iron objects techniques and Chinese scholars mostly focus on bronze casting and brass smelting; for the Chinese scholars, there is much room for improvement in the future, especially in methodology, subjects of study, participation of archaeologists and inter-disciplinary involvement.

Key Words: Archaeometallurgy; experimental archaeology; simulation experiment

一 引言

作为考古学重要组成部分的实验考古学，以详尽和客观的考古材料和数据为基础，复原考古材料的生产、使用、废弃和埋藏过程，可帮助考古学家重建某项技术或某一个社会形态，对于提高田野考古操作方法以及深化对古人行为的认识，推动考古学理论研究等方面均具有重要作用。金属是古人利用自然材料通过化学反应而获得的，是推动古代社会发展乃至当今社会进步的物质基础之一，它涉及采矿、冶炼、熔炼、铸造、加工、使用、废弃和埋藏等一系列活动，而学界对这一过程虽开展了大量研究，但仍不充分，因此开展冶金实验考古研究与操作是正确了解古人关于冶金活

刘海峰 / 北京科技大学冶金与材料史研究所, 北京, 100083
陈建立 / 北京科技大学考古学研究中心, 北京, 100871
潜伟 / 北京科技大学冶金与材料史研究所, 北京, 100083
铁付德 / 中国国家博物馆, 北京, 100006

动所必需的一种手段。

冶金实验考古是将古代与冶金有关的事物复原出来的过程，在这个过程中可以模拟和探讨古代冶金的生产信息，包括技术、生产组织管理、产品流通和使用、工匠的社会生活和文化等，因此冶金实验考古的复原对象包括冶金场所、设施、工具、矿石、燃料、生产过程、产品和工匠的生活等。一般来说，冶金实验考古可分为室内研究和室外研究两种，前者着重验证古代冶金生产的物理化学反应过程和器物的使用状况，以解释其技术上的问题，大部分模拟实验便属于此类；后者是在室外对冶金生产过程进行全方位的模拟，除了技术本身还要还原生产过程、环境和人类的活动等。由此可见，冶金实验考古的过程一般包括以下几个步骤：一是对古代冶金遗址和遗物进行研究，提供复原的参数和依据；二是对古代冶金生产的各个环节进行理论研究，为之后的复原工作提供文本和假设；三是实验考古的操作过程，具体来说就是寻找与假设和考古材料相对应的环境、材料、设施和工具等，利用它们还原古代冶金过程；最后是将实验考古的产物与古代冶金遗物进行比较研究，以验证该实验是否成功，或所建立的假设是否成立。

所知较早的冶金实验考古始于 20 世纪 50 年代末 Wynne E. J. 和 Tylecote R. F. 对冶铁炉 (low shaft furnace) 的复原^[1]。60 年代，H. Straube、H. Hagfeldt 和 W. Schuster 等也对这种冶铁炉和鼓风管进行了复原研究^[2]。70 年代以后，冶金实验考古工作大量开展起来。目前，国内外有几个研究团队比较活跃，开展了较多的冶金实验考古工作。国外方面有英国冶金史协会、德国波鸿古矿业博物馆和日本古代冶铁研究会等，国内方面有北京科技大学冶金与材料史研究所、中国社会科学院考古研究所、中国科学院自然科学史研究所、上海博物馆、鄂州博物馆、中国科技大学、中国科学院研究生院和中国钱币博物馆等。

在采矿领域，Peter Crew^[3] 和 Lewis A.^[4] 于 1989 分别在 Rhiw Goch 和 Great Orme 地区实验了火爆法采矿，使用工具模拟了当地考古遗址出土的工具。同年，Simon Timberlake 在 Cwmystwyt 地区也对火爆法进行了研究，他采用的工具包括了鹿角工具^[5]。此外，Craddock B. 模拟了石锤采矿^[6]。国内方面，邹友宽、卢本珊等人在湖北铜绿山^[7] 和江西铜岭^[8] 对商周选矿技术特别是溜槽选矿法进行了模拟实验研究，认为当时处理贫矿带中的矿石多采用重物选矿法，西周开始对次生富集带中的矿石采用先进的溜槽选矿法选矿，达到了较高的水平。

在金属冶铸领域，国外有 Tylecote R. F.^[9]、Peter Crew^[10]、Gill Juleff^[11]、Killick D.^[12]、J.D. Verhoeven^[13] 等对古代冶铁生产过程和相关工艺的研究以及 Tylecote R. F.^[14]、Merkel J. F.^[15]、Simon Timberlake^[16]、Günther Woelk^[17] 等在冶铜工艺上的研究。在国内，北京科技大学、中国科学院对早期黄铜冶炼工艺进行了模拟实验，中国社会科学院考古研究所铜绿山工作队在铜绿山遗址开展了古代炼铜技术的模拟实验，此外较多学者还对古代的青铜铸造工艺进行了大量的复原研究。前人还在银冶金、铅冶金、锡冶金等有色金属冶炼领域开展了相关工作，如 Susan E. Kruse 对银锭的铸造进行了实验考古研究^[18]，Marie - Pierre Guirado 等人对 16 世纪灰吹炉炼银进行了研究^[19]，Lorna Anguilano 等人对欧洲中世纪使用 bole hearth 炼铅进行实验考古研究^[20]，Simon Timberlake 在 Flag Fen 进行了炼锡的实验^[21]等。

在金属制品加工工艺和使用性能方面，早在现代实验考古诞生之前就有西方学者进行了大量的复制工作。1955 年李约瑟对灌钢的模拟实验为研究灌钢、大马士革钢等古代

钢铁制品提供了重要的依据^[22]，此外 Greenfield H. J.^[23] 和 Mathieu J. R.^[24] 等还对不同质地（青铜、铁和石器）工具的使用性能进行了研究。此类研究是国外开展较为充分的一个领域，分析其原因可能是因为此类模拟实验可以在实验室内进行，对实验考古场地和工作条件要求较为简单。

由于冶金实验考古研究对象的众多，本文拟以铜和铁的冶炼实验考古研究为例进行简单讨论，并对上世纪 70 年代以来几个重要的具有代表性的案例进行论述，以期对国内冶金实验考古起到抛砖引玉的作用。

二 铜冶金实验考古

古代铜冶金的实验考古研究较为充分，较早的工作开始于 Tylecote R. F. 等人对 Timna 遗址炼铜技术的研究^[25]，他们认为当地的铜矿石不经过焙烧，只需一次还原熔炼即可获得金属铜。实验过程中使用了冶炼炉进行冶炼，同时采用了鼓风技术，添加了铁矿石和石灰石作为造渣剂，冶炼完毕采用的是毁炉取物法，在 Timna 的实验考古工作对冶金实验考古的发展起到了极大的推动作用。此后，Merkel J. F.^[26]、Simon Timberlake^[27]、Günther Woelk^[28]、M. Bamberger^[29] 等都采用筑炉冶炼的方法对青铜时代的炼铜技术进行了实验考古研究。此外，Cushing F. H. 对原始炼铜技术^[30]、Pollard A. M. 等人对砷铜冶炼技术^[31]、W.G.J. Bunk 对罗马时期炼铜技术^[32]、Emilien Burger 等人对西欧早期硫化铜矿冶炼技术^[33]、Olover Pryce 等人对爱琴海地区青铜时代炼铜技术^[34] 等领域的实验考古研究也先后开展起来。Marco Cavalieri 等人还复原了公元 7 世纪意大利中部的一处作坊，这个作坊同时存在生产铜器、陶器、玻璃器和金器的技术^[35]。

在黄铜冶炼方面，北京科技大学^[36] 和中国科学院科技史与科技考古系^[37] 先后进行了黄铜的模拟实验。前者分别采用木炭还原混合的氧化亚铜和氧化锌以及还原混合的孔雀石和菱锌矿的方法获得了黄铜，结果表明古代在 950 - 1200 的温度下用碳还原铜锌混合矿或共生矿是可以得到黄铜的。后者分别实验了不同温度和不同配比下木炭还原红铜片和菱锌矿（炉甘石）的方法，认为在 900 摄氏度以上可以产生黄铜。法国博物馆研究和修复中心的 David Bourgarit 也利用冶炼坩埚对不同的 Zn/Cu 比例下进行的 ZnO 的还原过程进行了热力学和温度上的系统测量^[38]。

在铜器铸造方面，国内学者开展了大量的工作。最早的工作始于 20 世纪 60 年代初，李济、万家保对 1928 年到 1937 年殷墟出土青铜器的模拟实验研究^[39]。70 年代，华觉明、冯富根、王振江和白金荣复原了妇好墓出土的青铜器^[40]。90 年代，谭德睿等人研制出与古陶范性能相当的范料，模拟铸造了具有典型技术特征的古代青铜器^[41]。廉海萍在此基础上，模拟铸造了吴越细绳纹类青铜礼器^[42]。此外，董亚巍、周卫荣、王昌燧等近年来也对青铜范铸技术^[43] 进行了复原研究，华觉明、谭德睿、黄金洲等对中国古代失蜡法工艺也进行了复制^[44]。在石范铸造技术^[45]、铸钱工艺^[46]、铜镜铸造^[47] 和相关的计算机模拟^[48] 等方面，学者也做了大量的工作。

本文选择国内在铜绿山遗址进行的炼铜模拟实验和国外 Günther Woelk 等对欧洲古代青铜冶炼技术的实验考古为案例进行分析，选择 Günther Woelk 的工作关键在于其实验考古过程详尽、所遇情况复杂以及解决方案详细。

(一) 铜绿山炼铜技术的模拟实验

1980年6月,中国社会科学院考古研究所铜绿山工作队在铜绿山古矿冶遗址进行了炼铜模拟实验研究,实验者根据考古出土炼炉的不同,复原了2座炼炉^[49]。

炼炉结构和材料:一号炉截面为圆形,上口直径为40cm,腹径60cm,炉壁厚30-50cm,风沟为“一”字形,设置一个风口。二号炉截面为长方形,长、宽各65、28cm,炉壁厚40-70cm,有7°的炉腹角,风沟为“T”字形,设置两个风口。筑炉材料为红色粘土和耐火材料(高岭土和石英),炉基铺垫石块。筑炉时采用木架稳固,使用木槌、木夯锤等工具夯筑炉壁。

原料:矿石按品位不同分为含铜20%及以上的矿石和含铜7%及以下的矿石,矿石既有块状,又有颗粒度为3-4cm的粉矿。燃料为当地产的栎木木炭。加入了石灰石作为助熔剂。

实验过程:一号炉由小型电动鼓风机鼓风,反应不充分,炼炉冻结而停止,只获得少量粗铜。二号炉鼓风充分,冶炼顺利,并分别投入品位不同、粒度大小不一的矿石,共进行了10小时36分钟的冶炼,耗费木炭600kg,原料和助熔剂共1300余kg,先后排渣14次、放铜2次,练出粗铜100余kg,达到预期效果。

(二) 欧洲青铜时代筑炉炼铜技术的实验考古研究

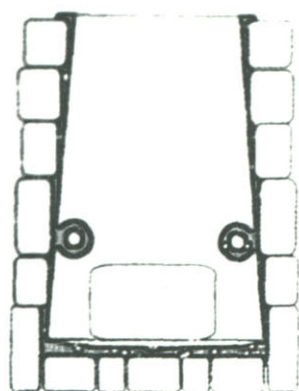
Günther Woelk 等对古代欧洲的炼铜技术进行了实验考古研究,他们选择了法国中部的Moulin de Gasne遗址作为场所开展工作(图一、二和三皆引自Günther Woelk 论文并改绘,不再一一列出)^[50]。

炼铜炉结构和材料:炉底宽40cm,深60cm,炉身向上倾斜呈一个锥形结构,炉顶开口为36cm×46cm大小。炉门大小为30cm×12cm,冶炼时用石块和粘土封上。炉壁由大块石头和粘土结合在一起,分为15-17cm厚的石块层和3-5cm厚的耐火粘土层。作为炉壁中粘结材料的灰浆取自当地的粘土,炉壁中包含由现代工业耐火粘土和当地粘土糅合的耐火材料。风口位于炉身20cm处,两根鼓风管与炉子的夹角分别为53°和63°。

燃料和原料:燃料为2-8cm大小的木炭。原料为工业上的铜废料和铁废料,添加石英砂和石灰石,含量为Cu₂O16%、Fe₂O₃50%、SiO₂18%、CaCO₃16%。

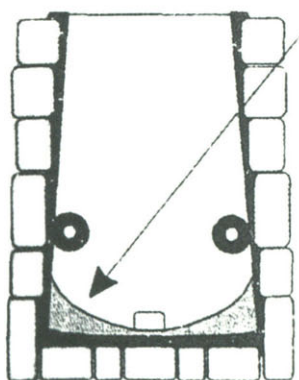
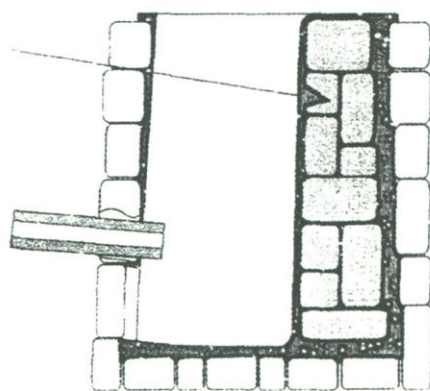
实验过程:

- 1) 炉内预热,以保证炉内壁的粘土达到耐火材料的要求,先放入干柴等,再放入点燃的木炭,燃烧6个小时。
- 2) 第一次冶炼,木炭和原料的比例是4:1,先加入16kg的木炭,再加入4kg的原料,冶炼了近8个小时,结果是冶炼不充分,原料未被有效的还原。
- 3) 第一次改进冶炼炉,将炉后壁往前移,减少了炉内60%的空间,填充的部分取自河床的大块石头和本地砖窑的粘土砖砌成(图一)。
- 4) 第二次冶炼,先添加木炭烧,加热到反应温度后添加矿石和助熔剂,将1kg原料和2kg木炭的混合物添加在炉顶,连续添加5次,最终时木炭和原料之比达到3:1,总共添加了12.5kg木炭。冶炼持续6个小时,炼出的铜块散落在炉渣和灰烬中,直径最大达1cm,未达到预期效果。
- 5) 第三次冶炼,与第二次冶炼相比,木炭和原料的比例降至2.5:1,冶炼时间有



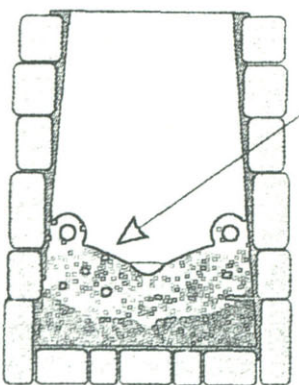
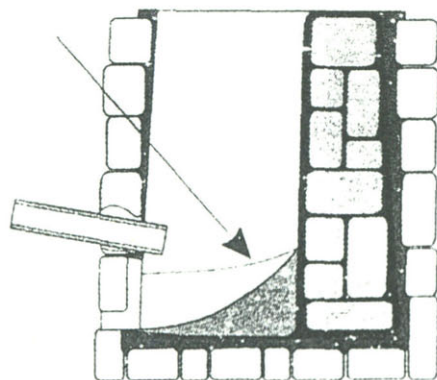
图一

第一次改进



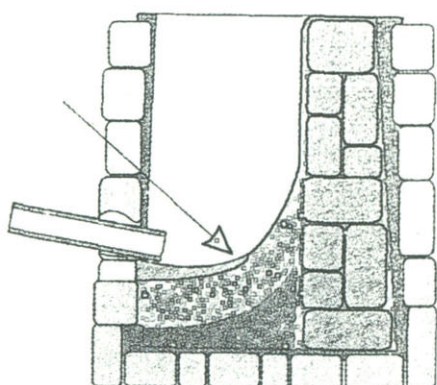
图二

第二次改进



图三

第三次改进



所延长，冶炼效果与第二次相当。

6) 第二次炼炉改进，前三次实验中炉底都会残留大量的木炭，很多铜块散落其中。为避免这种现象，在鼓风风口下填上粘土材料，形成一个弧形的炉底(图二)。

7) 第四次冶炼，先将 8kg 的木炭填满炉子进行预热，2 小时 10 分钟后当炉前壁温度达到 1000 后，加入 1kg 原料，将风量提高到 16m³/h(一般情况下为 8m³/h)，此时可以看到蓝色的火焰。再过 1 小时 15 分钟后，将风量减少到 12m³/h，20 分钟后，加入 3kg 原料并覆盖上 1kg 木炭，45 分钟后，再次加入 3kg 原料和 1kg 木炭。3 小时 14 分钟后，有炉渣流出来，在经过共 4 小时 35 分钟后，冶炼停止。第 2 天早上，可以看到风口下有许多块状的炽热的金属块，一些主要包含金属，一些主要是炉渣。

8) 第三次炼炉改进，第四次冶炼中金属块与炉渣是分离的，与考古材料不符，同

图一
第一次炼铜炉改进示意图

图二
第二次炼铜炉改进示意图

图三
第三次炼铜炉改进示意图

时仍然有木炭堆积在炉底,因此第三次改进将炉底用粘土填高至风口位置,出渣口的位置也相应提高(图三)。

9)第五次冶炼,开始时每支鼓风管的风量控制在5m/h,经过3小时的加热后,炉壁温度达到1000℃,风量增加至15m/h,倒入3kg木炭和3kg原料。冶炼过程耗时6小时15分钟,中间添加了3次原料和木炭,每次都是添加2kg原料覆盖上2kg木炭。最后一次添加原料和木炭30分钟后,鼓风停止,再过3个小时可以看到,炉身像布满了瓷砖一样。第2天早上,可以看到风口下两大块金属块躺在炉底,共重1.64kg,原料中90%的铜被还原出来,并且是以铜铁镍合金的形式存在,与考古材料相一致,实验成功。

三 铁冶金实验考古

古代冶铁技术可分为块炼铁和生铁冶炼两个不同的技术体系。在西方,块炼铁技术一直占据主流地位,而在中国,生铁及生铁制钢技术在东周时期就得以创造和发展,并最终成为古代中国钢铁技术的主流。

铁冶金实验考古开展得较早,20世纪50-60年代,Wynne E. J.和Tylecote R. F., H. Straube, H. Hagfeldt, W. Schuster等人对古代的冶铁炉和冶炼技术进行了复原研究。H. Straube复原了两座炉子,一座高150cm、直径75cm,另一座高100cm、直径45cm,两座炉子都使用了直径2.5cm的鼓风管进行鼓风。H. Hagfeldt复原的炉子高40cm、直径为42.5cm,在冶炼时对木炭进行了粉碎(0.3-1.5cm)。W. Schuster复原的炉内风道(blast tube)直径为3.5cm,与之不同的炉外鼓风管(tuyere)直径为4cm,改善了鼓风的状况^[51]。

70年代以后,欧美学界在块炼铁技术及加工工艺上的实验考古研究发展壮大起来,其中以Peter Crew^[52]的工作最具代表性。此外,Gill Juleff在斯里兰卡进行了季风炼铁的冶铁实验考古研究^[53],Killick D.对非洲块炼铁技术进行了调查,并对其早期的冶铁技术进行了复原研究^[54],李约瑟对灌钢的制作方法进行了模拟实验^[55],Eleanor Blakelock等通过对模拟实验块炼铁样品进行了钢中非金属夹杂物研究^[56],J.D. Verhoeven^[57]对大马士革钢的复制进行了相关研究,德国波鸿古矿业博物馆、瑞典拉皮坦工业遗产保护区、日本美术刀剑保存协会等分别对当地古代和近现代的制铁技术进行了复原和模拟研究。其中,日本古代冶铁研究会(日本たたり研究会)对日本古代炼铁技术进行了系统调查与考古发掘,并对中国和韩国等古代冶铁遗址进行考察,根据这些考古资料,从矿石、燃料、鼓风、炉型结果、冶炼流程等多方面,完全按照古代技术状况进行模拟,组织完成多次冶铁实验考古研究,取得较大收获^[58]。

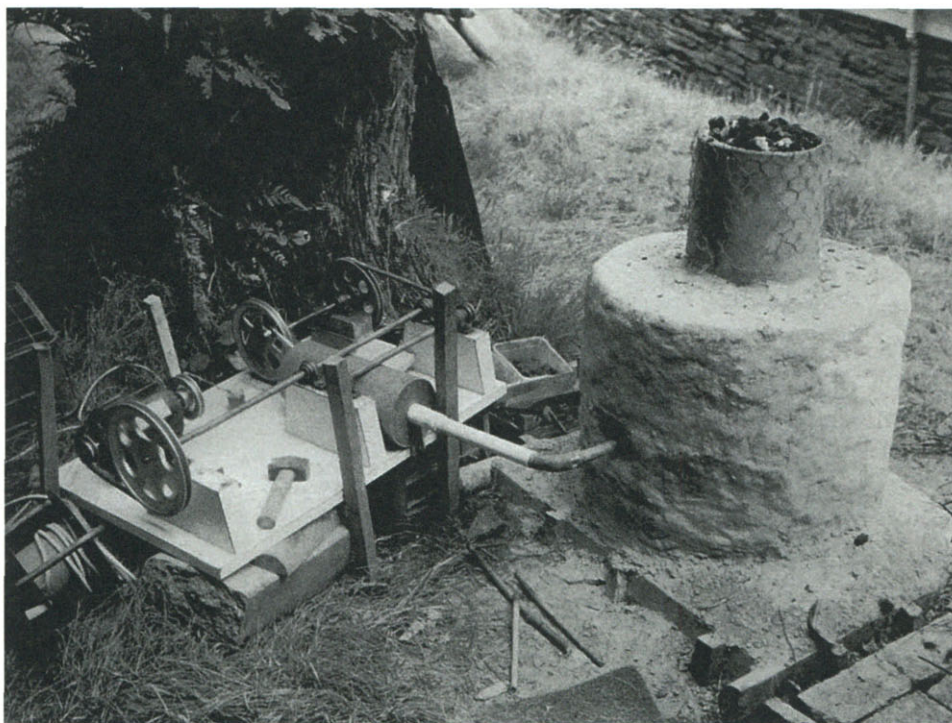
国内方面,《中国冶金史》编写组根据古代球墨形成的初步分析结果,采用古代白口铁和现代白口铁分别进行了退火成球的实验,证明了古代木炭冶炼的白口铁在920℃长期退火过程中能得到球化石墨的组织,认为古代韧性铸铁中约有10%出现球墨是正常的现象。实验还说明在不同的退火温度和时间条件下,最终的产品也是不一样的,通过控制温度、时间以及器物在退火窑中的位置可以得到脱碳铸铁、铸铁脱碳钢、韧性铸铁和古代球墨铸铁等不同的材质,为研究中国古代铸铁退火技术提供了重要的依据^[59]。

值得注意的是,目前铁冶金实验考古工作多集中于国外,国内该方面的工作颇为少见。国外大量工作集中于20世纪70-90年代对块炼铁技术的研究,此外对斯里兰卡季风

炼铁的实验考古案例也十分重要。

(一) 欧洲古代块炼铁 (bloomery) 技术及加工工艺的实验考古研究

欧洲学者对古代块炼铁技术的研究已较为广泛,是冶金实验考古领域最为成熟的内容,如 Tylecote R F^[60]、Peter Crew^[61]、Cleere. H 等人的工作,其中以 Peter Crew



图四



图五

图四
块炼炉及鼓风设施示意图

图五
锻制铁锭示意图 (bar smithing)

的工作最为系统、结果最为满意。Peter Crew 总共进行了 36 次实验，其中又以第 27 次最为成功，下面是对其实验材料及过程的论述(图四、五皆引自 Peter Crew 的论文)。

块炼炉结构和材料：炉壁厚 20cm，炉深 35cm，在炉子顶部增加了一个可移动的陶瓷管(pipe) 以增加空间(图四)。筑炉材料为当地的冰碛中的石头和耐火材料，这些耐火材料由含量较低的粘土与小石头碎块以及一些炉渣混合而成。

原料和燃料：来源于什罗普郡北部 Perry 河谷的铁矿，在冶炼之前对其进行焙烤、粉碎至 0.03 - 2cm。木炭主要是商业供应的山毛榉木炭，粉碎至 1 - 5cm。

鼓风设施：活塞式风箱(piston bellow)，风量控制在 10.8 - 21m/h，2 人操作。

冶炼实验过程：

1) **预热**：在自然通风(在块炼炉底部开一个拱形炉门通风)状态下用燃烧的木炭预热 30 分钟；将炉门封闭，改用风箱鼓风(4.8m/h)，添加 8kg 木炭直到炉满为止，持续 30 分钟；预热再进行 2.5 个小时，添加 6kg 木炭，添加频率由 3kg/h 降到 2kg/h，预热的过程直到出现蓝色火焰为止，持续 3.5 个小时。

2) **冶炼**：第 3.5 个小时开始添加原料，木炭、矿石之比为 1 : 1，始终保持炉满，记录冶炼中的木炭和矿石的消耗率。4.5 小时，统计的木炭和矿石消耗分别为 8kg 和 7.6kg；第 5 小时再加入 2kg 木炭，持续鼓风 1.5 小时，5.25 个小时开始要注意炉渣的流动状况，保证鼓风口的通畅，鼓风量保持 12m/h，直到 6.5 小时后，冶炼结束。

块炼铁加工过程：

加工炉的炉基与块炼炉一样，高度比块炼炉鼓风口高 10cm，使用的加工工具是现代的铁锤(重 1kg)、4 对不同尺寸的钳具和一个圆形的大石砧。木炭的尺寸与冶炼所用一致。

1) **块炼铁加工(bloom smithing)**：将块炼铁清洁成坯料(billert) 的过程需要 2.5 个小时，加热了 14 次，使用了 10kg 木炭，丧失 48% 的质量。

2) **坯料加工(billert to bar smithing)**：清除坯料中的炉渣夹杂物，同时将坯料锻成砧板大小的紧密的铁板，该过程进行了 2.5 个小时，加热了 19 次，使用了 8kg 木炭，丧失 28% 的质量。为了提高加热炉的温度，鼓风风量由每 12m/h 上升到 15m/h。

3) **锻制铁锭(bar smithing)**：由德国工匠 Heinz Dening 完成，他有丰富的制作大马士革钢和处理块炼铁的经验。锻制场所是其作坊，用的是现代的加热炉和无硫煤(图五)。锻造过程经过了 50 分钟，加热了 19 次，最终的产品质量又减少了 18%，Heinz Dening 认为这是一块好铁。

块炼铁的加工过程总共丧失了 70% 的质量。作者认为加工过程在今后应当进一步进行实验，最好全部采用木炭作为燃料，同时由自己全部完成，并且还要增加一个从铁锭到产品的实验过程。

结论：一个完整的冶炼和加工过程至少需要 8 个人，收集矿石和燃料至少需要 5 个人。使用铁矿石在块炼炉里炼出块炼铁并且最终得到 1kg 铁锭，至少需要 100kg 木炭和 25 个人力。

(二) 斯里兰卡季风炼铁的实验考古研究

1994 年 6 月由 Gill Juleff 带领的团队在斯里兰卡 Samanalawewa 地区对当地古代

的冶铁技术进行了实验考古研究，其实验考古的参数和依据来源于之前的考古发掘工作，共修建了2座炉子，进行了3次冶炼实验，此后还对冶铁过程炉内气流的变化进行了数值模拟实验。

炼炉结构和材料：由一个半永久性的炉后壁和临时修建的炉前壁组成，后壁南北对称，两边向西弯曲至竖立的大石头为止，前壁在这两块大石头之间，每次修建前壁时使用木架修建。炉膛南北长120 - 230cm，东西宽约40cm，炉高不超过0.5m，在炉前壁安装嵌入式温度计。鼓风管使用当地传统的耐火导管，不采用鼓风设备，利用当地的西南季风进行鼓风，鼓风口位于炉前壁。使用当地稻田里的粘土、白蚁巢土、河砂、稻草和稻壳等物质混合而成的材料筑炉。

原料和燃料：用当地 *syzygium sp'athulatum* 的树枝烧成的木炭作为燃料，使用当地的矿石作为原料，矿石含有79% - 87%的 Fe_2O_3 。第3次实验中的矿石粉碎至大约3cm，第2次和第3次实验的矿石进行了30分钟的焙烧。

实验过程：

- 1) 将木炭装满炉子后，点火预热2个小时。
- 2) 缓慢添加木炭和矿石，分别采用的矿石与燃料之比为1 : 1.5和1.5 : 1。在3.5小时内将木炭和矿石逐层添加，3次实验分别添加了81kg、95kg和126kg矿石。
- 3) 再经过1.5小时的只加入木炭的冶炼。
- 4) 冶炼结束后，将炉前壁毁掉，将其中的铁(blooms)取出。增加矿石燃料之比、焙烧矿石或者缩小矿石的尺寸可以帮助反应成功进行。第2次实验风速为44km/h，消耗的木炭最多。第3次实验风速为22km/h，生产出来17kg的金属，最为成功。



图六 斯里兰卡季风炼铁示意图

四 冶金实验考古的未来

研究表明,现代冶金实验考古产生于20世纪50年代,70年代获得了大幅度的发展,自90年代至今,冶金实验考古已成为欧美冶金考古重要的研究方法和领域。Tylecote R. F.在Timna遗址的工作是整个冶金实验考古发展的分水岭,在这之前冶金实验考古工作开展不充分,在这之后冶金实验考古获得了突飞猛进的发展。同时,冶金实验考古的研究领域也有了极大的拓展,具体表现在矿石的开采和加工、金属冶炼和铸造、金属制品加工和使用等领域都开展了大量的工作。

冶金实验考古研究有助于我们了解古代冶金的各个环节,帮助我们解决一些古代冶金领域我们尚不清楚的问题,比如如何将矿石冶炼成金属?采取了什么工艺将冶炼产品加工为制品?又采取了什么工艺使得制品的使用性能符合人们生活的需要?冶金生产是如何被组织和管理的?工匠是如何利用本地自然资源进行冶金生产的?产品是如何使用的?人们在冶金活动中又有怎样的文化信仰和习惯?出土器物是如何形成发掘时的埋藏状态的?等等。

国内外目前已开展了较多的工作,解决了一批古代冶金技术问题,但研究方法和内容上仍存在局限性。如何进一步开展工作,并为解决相关考古学问题提供有效的途径是亟需解决的问题。

在研究形式上,国内外学者采取了实验室实验考古和田野实验考古两种主要形式。实验室实验考古有助于了解古代冶金某项技术特征和产品性能,该研究形式的优点是方便、可控性强,缺点是与古代社会和生产背景相差较远。田野实验考古是指在实验室外对古代冶金活动进行较全面的复原,部分学者采用了遗址就地复原的方式,但也有选择在实验考古场或者在一处与原遗址近似的地点开展研究的。田野实验考古的优点在于考虑到了遗址本身的信息,也注意到了社会和自然环境对技术的影响,能够较全面地还原古代冶金的信息,但其难点在于可控性差、操作难度大。这两种研究形式在解决不同的问题上各有优势,都应当继续发挥作用,但在实践中应当鼓励进行更多的田野实验考古。

在研究方法上,国外学者主要采取依据考古材料制定实验方案和假设,在实验过程中不断加以修正和验证的方案进行了大量的研究。通过分析其研究方法并结合新考古学理论,本文拟提出一个实验考古的工作模型,即“信息(数据)—假设(模型)—实验(模拟)—验证(再循环)—总结”的实验考古流程。具体说来,首先要对现有的考古材料进行总结和归纳,这是开展工作的基础,针对不同的遗址要挖掘其固有的特征,充分挖掘每个遗址的细节,完善每个遗址的信息。二是要进行充分的理论验证,建立一个假设或模型。完善实验的每个参数,尽可能的细化实验工作。三是在实验过程中,材料和步骤与考古信息的一致性。最后要对实验产物进行详细的分析,并与考古信息相比较,得出正确的实验结果,从而演绎出冶金生产的各个环节。

此外,对于如何从实验考古中了解古代冶金背后人的活动仍然是国内外研究普遍不足的地方,也是怎样用实验考古方法解释考古学问题的一个难点。产生这个问题的原因有多种,其中相关考古材料的缺乏是不能为重建古代冶金提供参数的重要原因,因此还需要以民族学调查的手段加以补充,特别是传统工艺的调查对于了解古代冶金活动的步骤、工匠的社会地位等具有重要的参考价值。同时,要从科学技术史、科学哲学、社会学、

心理学等学科的理论和方法中汲取营养,多学科的结合是开拓实验考古研究方法和解决相关问题重要的途径。与此同时,将现代科学技术手段用于复原古代社会,从而为解决考古学问题提供参考和依据。再次,在考古实践中主动并大量运用实验考古手段才能更好地发挥实验考古在解决相关考古学问题中的作用。比如在冶金遗址发掘过程中同时进行遗址的全方位模拟,可以有效地帮助解决相关考古学问题。最后,建立实验考古学研究基地和成立实验考古场对于充分开展相关工作具有重要的意义。实验考古场的建设除必要的土木工程可应用现代工程方法建造外,其他内容可着重模拟古人的行为方式进行模拟构建,可帮助学者了解古人在选址、功能区划分等方面的思想和行为。丹麦、英国等国家都建有专门的实验考古场,在该场所内可模拟古代社会人类的生产生活活动,包括冶金活动。此类实验考古场不仅可以促进实验考古活动的持续进行,同时能够在此环境下组合一系列不同的实验考古活动,帮助复原古代复杂社会行为,还可以帮助开展实验考古或者田野考古的技术创新活动等,帮助建立和完善实验考古和田野考古操作规程。另外,实验考古场还可以通过向公众展示、体验和学习文物的发现、保护以及利用的过程,做到考古资料的共享与公众参与的有机统一,从而推动公众考古学的发展,以正确引导公众对考古的认识,加强公众对考古、技术史等文化事业的理解和支持。

目前,国外在冶金实验考古领域发展得较为完善,特别是在青铜冶炼技术、块炼铁冶炼技术和特殊金属制品的复制上取得了显著的成绩,复原了古代西方多项冶金技术。与之相比,国内的相关研究工作则较为缺乏,主要集中于铜器铸造工艺的模拟实验,不利于我们复原和展示中国古代冶金技术和生产面貌。以生铁和生铁制钢技术体系为例,研究表明,自战国开始,该技术体系成为中国钢铁技术发展的主流,极大的推动了古代生产的进步和社会的发展,是一项伟大的发明创造。然而目前我们对于高炉炼铁、生铁铸造、退火和制钢等多个环节仍然处于实验分析和初步的理论验证阶段,尚未进入到实践验证理论的阶段,不利于我们充分了解古代的钢铁生产和人类的冶金活动,不得不说是个巨大的遗憾。因此,未来要突破在研究内容上的局限性,比如在原始炼铜技术、生铁冶炼及铸造、生铁制钢、金属制品使用性能以及技术以外人和社会的活动(如冶金活动的组织、产品的流通和使用)等方面开展工作。

国内对冶金技术本身的研究也取得了很多重要成果,比如北京科技大学模拟黄铜冶炼的实验证实了冶炼温度在 950 ! 1200 用碳还原铜锌混合矿或共生矿都可得到黄铜,而这种冶炼在新石器晚期烧陶技术水平下是可以达到的,所以早期黄铜锥和片是古人炼铜初始阶段,在原始冶炼条件下偶然得到的产物。这一结论对于正确理解冶金技术的起源有重大价值。但同时,实验考古领域过多地集中在对技术和工艺的复原,即开展了大量的模拟实验工作,忽视了技术以外人的活动,这可能与大多数模拟实验是由科技史学者或者科技考古工作者开展有关,考古学家本身没有或者很少参与到实验考古的过程中来,没有提出自身的观点和想解决的问题。因此,一方面实验考古工作者应当从实验室“走出去”,在关注技术的同时寻找技术背后的社会和文化问题,在搞清楚技术问题后,更多地探讨人与社会的问题,或许能够帮助解决一些目前技术本身不能解释的考古学问题;另一方面,考古学者应当参与或者组织实验考古活动,将在考古发掘过程中无法解释的问题在实验考古过程中还原出来,为解决问题的路径塑造一个假设或模型,进而判断其合理性,或许能够帮助解决问题。

通过对国内外冶金实验考古案例的初步调查,可知冶金实验考古是了解古代冶金生

产活动的重要研究方法，它不仅能够解决古代冶金技术问题，也能够较全面地复原古代人类的冶金活动及其对社会、环境产生的影响，对于完善考古和技术史工作都具有重要的方法论和实际意义。目前，国内外在相关领域都开展了较多的工作，但总体说来，国内在研究方法、研究内容、参与对象和学科参与度等方面都存在很大的局限，因此需要进一步建立和完善自己的理论和方法论体系，拓展研究内容，借鉴不同学科的理论和方法；同时最重要的是正在从事实验考古的工作者和未从事相关工作的考古人都应该“请进来”和“走出去”，在实践中多采取实验考古手段，真正利用好该方法帮助解决考古学和技术史问题。

附记：本文得到国家科技支撑计划《实验考古与考古探测技术可控试验场前期设计研究(No.2010BAK67B10)》、国家自然科学基金(No.51074010)和国家文物局“指南针计划”专项课题《中国古代冶铁炉的炉型演变研究(No.20110317)》资助。

注释：

- [1] Wynne E. J., Tylecote R. F. An experimental investigation into primitive iron smelting techniques. *Journal of iron and steel institute*, 1958:339 — 348.
- [2] Nils Bjorkenstam. Prehistoric and medieval iron production: Recation processes in the production of iron ores in low shaft furnaces. *Journal of historical metallurgy society*, 1985, 2:186 — 192.
- [3] Crew P. Firesetting Experiment at Rhiw Goch. In P. Crew and S. Crew (ed.). *Early Mining in the British Isles*. Maentwrog, 1990:57.
- [4] Lewis A. Firesetting Experiments on the Great Orme. In P. Crew and S. Crew (ed.). *Early Mining in the British Isles*. Maentwrog, 1990:55 — 56.
- [5] Timberlake S. Firesetting and Primitive Mining Experiments, Cwmystwyth, 1989. In P. Crew and S. Crew (ed.). *Early Mining in the British Isles*. Maentwrog, 1990:53 — 54.
- [6] Craddock B. The Experimental Hafting of Stone Mining Hammers. In P. Crew and S. Crew (ed.). *Early Mining in the British Isles*. Maentwrog, 1990:58.
- [7] 卢本珊：《商周选矿技术及其模拟实验》，《中国科技史史料》1994年第4期；邹友宽、卢本珊：《中国先秦溜槽选矿法模拟实验研究》，《湖北师范学院学报（自然科学版）》1993年第3期。
- [8] 邹友宽、卢本珊、刘诗中、夏宗经：《铜岭西周溜槽选矿法模拟实验研究》，《东南文化》1993年第1期。
- [9][60] Wynne E. J., Tylecote R. F. An experimental investigation into primitive iron smelting techniques. *Journal of iron and steel institute*, 1958:339 — 348; Tylecote R. F., Austin J. N., Wraith A. E. The mechanism of the bloomy process in shaft furnace. *Journal of the iron and steel institute*, 1971, 342 — 364.
- [10][52][61] Peter Crew. The experimental production of prehistoric bar iron. *Journal of historical metallurgy society*, 1991, 1:21 — 36.
- [11][53][63] Gill Juleff. An ancient wind-powered iron smelting technology in Sri Lanka. *Nature*, 1996, 4:60 — 63; Gill Juleff, D. Molinari, G. Tabor. Computational simulation of air flows through a Sri Lanka wind driven furnace. *Journal of archaeological science*, 2005, 5:753 — 766.
- [12][54] Killick D. The Relevance of Recent African Iron-Smelting Practice to Reconstructions of Prehistoric Smelting Technology. In P. D. Glumes (ed.). *Recent Trends in Archaeometallurgical Research*. MASCA Research Papers in Science and Anthropology, 1991:47 — 54.
- [13][57] J. D. Verhoeven, A. H. Pendray, W. E. Dauksch. The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades. *Journal of metallurgy*, 1998, 9:58 — 64; J. D. Verhoeven, A. H. Pendray. Experiments to Reproduce the Pattern of Damascus Steel Blade. *Mat. Char.*, 1992, 29:195 — 212.

- [14][25] Tylecote R. F. and Boydell P. J. Experiments on Copper Smelting Based on Early Furnaces Found at Timna. In B. Rothenberg (ed.). **Chalcolithic Copper Smelting: Excavation and Experiments**. Institute for Archaeo-Metallurgical Studies, 1978; Tylecote R. F. and Merkel J. F. Experimental Smelting Techniques: Achievements and Future. In P. T. Craddock and M. J. Hughes (ed.). **Furnaces and Smelting Technology in Antiquity**. British Museum, 1985:3 — 20; Tylecote R. F. Summary of Result of Experimental Work on Early Copper Smelting. In W.A. Oddy (ed.). **Aspects of Early Metallurgy**. British Museum, 1991:5 — 12.
- [15][26] Merkel J. F. Experimental Reconstruction of Bronze Age Copper Smelting Based on Archaeological Evidence from Timna. In R. Rothenberg (ed.). **The Ancient Metallurgy of Copper**. Institute for Archaeo-Metallurgical Studies, 1991:78 — 122.
- [16][27] Timberlake S. The Use of Experimental Archaeology/Archaeometallurgy for the Understanding and Reconstruction of Early Bronze Age Mining and Smelting Technologies. In S. L. Niece et al. (ed.). **Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy**. Archetype Press, 2007:27 — 36.
- [17][28][50] Günther Woelk, Peter Gelhoit, Wolfgang Bunk. Reconstruction and operation of a bronze age copper-reduction furnace. **Metallurgical Antiqua**, 1998, 8:263 — 277.
- [18] Susan E. Kruse, Robert D. Smith, Katharine Starling. Experimental casting of silver. **Journal of historical metallurgy society**, 1988, 2.
- [19] Marie-Pierre Guirado, Florian Féreygeol, François Peyrat. Initial experiments on silver refining: how did a cupellation furnace work in the 16th century. **Journal of historical metallurgy society**, 2010, 2:126 — 135.
- [20] Lorna Anguilano, Simon Timberlake, Thilo Rehren. An early medieval lead-smelting before banc tynddoc, Cwmystwyth, Ceredigion. **Journal of historical metallurgy society**, 2012, 2:85 — 103.
- [21] Simon Timberlake. An experimental tin smelt at Flag Fen. **Journal of historical metallurgy society**, 28:122 — 128.
- [22][55] Joseph Needham. **The development of iron and steel technology in China**. Newcomen Society, 1958:30 — 31.
- [23] Greenfield H. J. Distinguishing Metal (Steel and Low-tin Bronze) from Stone (Flint and Obsidian) Tool Cut Marks on Bone: An Experimental Approach. **Experimental Archaeology: Replicating Past Objects, Behaviors, and Processes**. Archaeopress, 35 — 54.
- [24] Mathieu J. R. and Meyer D. A. Comparing Axe Heads of Stone, Bronze, and Steel: Studies in Experimental Archaeology. **Journal of Field Archaeology**, Vol. 24, No. 3:333 — 351.
- [29] M. Bamberger. Shape and microstructure of copper produced in a reconstructed ancient smelting process. **Journal of historical metallurgy society**, 1984, 1:31 — 34.
- [30] Cushing F. H. Primitive Copper Working: an Experimental Study. **American Anthropologist**, 1894, 1:93 — 117.
- [31] Pollard A. M., Thomas R. G., and P. A. Williams. Some Experiments Concerning the Smelting of Arsenical Copper. In P. Budd (ed.). **Archaeological Sciences**. Oxbow Books, 1989:169 — 174.
- [32] W. G. J. Bunk and H. P. Kuhnén. Roman copper ingots found at Trier: original and experimental. **Experimental Archaeology Workshop**, 2006.
- [33] Emilien Burger, David Bourgarit. Reconstruction of the first copper-sulphide smelting processes in western Europe. **Experimental Archaeology Workshop**, 2006.
- [34] Olover Pryce. Copper-smelting experimental in the Aegean, Bronze Age. **Experimental Archaeology Workshop**, 2006.
- [35] Marco Cavalieri. A ceramic workshop with a kiln and spaces for different stages. **The Beginning Use of Metallurgy and Alloys**. 2009.
- [36] 北京钢铁学院冶金史组:《中国早期铜器的初步研究》,《考古学报》1981年第3期。
- [37] 凡小盼、王昌燧、周卫荣:《中国早期黄铜冶炼工艺模拟实验研究》,《中国钱币》2011年第3期。
- [38] David Bourgarit, Fanny Bauchau. The ancient brass cementation processes revisited by extensive experimental simulation. **Archaeotechnology**, 2010, 3:57.
- [39] 李济、万家保:《殷墟出土五十三件青铜容器之研究》,台北中研院历史语言研究所:

《古物研究专刊(五)》,1972年,第19—21页。

- [40] 华觉明:《中国古代金属技术——铜与铁造就的文明》,大象出版社,1998年。
- [41] 谭德睿:《中国青铜时代陶范铸造技术研究》,《考古学报》1999年第2期。
- [42] 廉海萍、谭德睿、徐惠康等:《吴越细绳纹类青铜礼器成形技术研究》,《文物保护与考古科学》2004年第11期。
- [43] 董亚巍:《西周早期圆形尊的范铸模拟实验》,《中原文物》2010年第1期;何薇、董亚巍、周卫荣、王昌燧:《商前期青铜鬲铸造工艺分析与模拟实验研究》,《南方文物》2008年第4期。
- [44] 李元芝、张方涛、陈洪良、徐国平、华觉明、谭德睿:《中国早期失蜡铸件——许公宁蟠虺纹透空饰件的复制研究》,《特种铸造及有色冶金》2010年第2期;黄金洲:《曾侯乙尊盘采用失蜡法工艺铸造毋庸置疑》,《江汉考古》2008年第4期。
- [45] 王楚栋、董亚巍、王金华、周卫荣、李秀辉:《中国古代石范铸钱模拟实验研究》,《中国钱币》2003年第1期。
- [46] 董亚巍、施继龙、周卫荣、戴志强、王昌燧:《萧梁钱币铸造工艺模拟实验》,《文物保护与考古科学》2006年第2期;李迎华、董亚巍、周卫荣、王昌燧:《汉代铜范铸钱工艺及其模拟实验》,《中国钱币》2005年第2期。
- [47] 张少均、秦颖、董亚巍:《西汉星云镜铸造工艺模拟实验》,《江汉考古》2010年第4期;董亚巍:《古代“透光镜”产生的原理及其复制研究》,《江汉考古》2002年第3期。
- [48] 廉海萍、杨戈涛:《汉代铸钱过程的计算机模拟实验》,《文物保护与考古科学》2010年第3期。
- [49] 中国社会科学院考古研究所铜绿山工作队:《湖北铜绿山古铜矿再次发掘——东周炼铜炉的发掘和炼铜模拟实验》,《考古》1982年第1期。
- [51] Nils Bjorkenstam. Prehistoric and medieval iron production: Recation processes in the production of iron ores in low shaft furnaces. *Journal of historical metallurgy society*, 1985, 2:186—192.
- [56] Eleanor Blakelock, Marcos Matinón-Torres, Harald A. Veldhuijzen, Tim Young. Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study. *Journal of archaeological science*, 2009, 8:1745—1757.
- [58] たたり製鉄復元計画委員会:《たたり製鉄の復元とその鋳について》,1971年。
- [59] 韩汝玢、柯俊:《中国科学技术史——矿冶卷》,第553—555页,2007年。华觉明:《中国古代金属技术——铜和铁造就的文明》,1999年,第378—379页。
- [62] Cleere H. Iron smelting experiments in a reconstruction roman furnace, London. *Journal of the iron and steel institute*, 1970.
- [64] 来源于Gill Juleff 2009年在北京科技大学冶金考古暑期学校的讲义。

(责任编辑 宋亚文)