

中国的铜矿资源与发展人工冶铜的机会

Copper Mine Resources in China and the Opportunities for Developing Artificial Copper Metallurgy

供稿|毛卫民^{1,2}, 李一鸣², 王开平¹ / MAO Weimin^{1,2}, LI Yiming², WANG Kaiping¹

内容导读

人工冶铜技术的出现、传播和发展是推动生产力提高和人类进入文明时代的关键性因素。技术起始于人们发现了自然铜块并将其捶打成工具使用,进而开始积累出金属变形加工的知识。在人类生活地区蕴藏着足够的铜矿资源是发展人工冶铜的核心基础。新石器时代末期人类族群烧制陶器的高温水平对于把混入窑炉的铜矿石转变成金属铜发挥着重要作用,温度越高,越有利于借助烧烤到偶然混入的铜矿石而尽早发现人工冶铜技术。公元前 2000 年之前,中国掌握了捶打加工天然铜块的能力,且各地在铜矿资源和高温技术方面均保有一定优势;中国的这些优势会明显提高借助偶然机会发现人工冶铜技术的概率,因此有充分的能力和机会去发展本土的人工冶铜技术。

引言

根据中国地质博物馆的资料,地壳中蕴藏的铜比较少,质量分数仅约为 0.01%;在自然界中已经发现了自然铜,250 多种含铜矿物。在自然界的所有大小铜矿区都会生成一定比例的自然铜^[1],自然铜的颜色往往呈现暗红色,也被称为红铜。人类使用金属的历史,可以上溯到距今一万多年前的新石器时代初期^[1],那时人类已经可以借助捶打加工把自然铜制成制品使用,即已经初步掌握了铜的变形加工技术^[2]。公元前 20 世纪及之前,在中国的河北、甘肃、西藏等地的许多遗址中都发现了早期一些用自然铜制作的红铜器^[3-4],即在那时中国多地已经掌握

了铜器的早期变形加工技术。由于地球表面自然铜的数量非常有限,难以用自然铜大规模制作铜器,因而无法借此大幅度地提高社会生产力,也难以有力地促进文明时代的到来^[5]。考古研究证实,以人工冶铜的方式把铜矿资源转变成金属铜并大量制作铜器才会显著促进人类文明的萌生。由此可见,人类族群能否获得足够可利用的铜矿资源是制约社会生产力发展和进入文明时代的重要因素。

发展人工冶铜所需的铜矿资源

一个人类族群或社会群体若想发展出本土的人工冶铜技术,需要具备若干必不可少的条件,包括

作者单位: 1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010

掌握铜器变形加工的能力、有较充足可利用的铜矿资源、较成熟的高温技术^[2]以及有较高的概率借助偶然的机会发现人工冶铜的基本流程等。在这些条件中,族群的居住地附近是否蕴藏着较丰富的铜矿资源处于首要的地位。随着地球外部地壳的形成,其内各处所蕴藏铜矿资源的分布状态在人类出现之前就已经稳定下来;在之后的地球演变过程中,地壳内的铜矿资源很难再发生根本性的改变。由此可见,不同人类原始族群的祖居地是否蕴藏较丰富的铜矿资源完全在于大自然的馈赠,与人类自身努力的关系并不大。

地壳中的铜元素通常以硫化物或氧化物的形式存在。一般认为,铜与硫的亲合力偏高而与氧的亲合力偏低,且在自然界中铜的硫化物比铜的氧化物的化学稳定性更高^[6]。因此,地壳中主要蕴藏着的两大类铜矿石,包括体量占大多数的硫化类铜矿石,例如黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿、硫砷铜矿、铜蓝等,以及体量占少数的氧化类铜矿石,例如蓝铜矿、黑铜矿、赤铜矿、绿铜矿、孔雀石等^[7]。在摄氏几百度的加热温度下多数天然铜矿石都会发生分解,但分解产物通常仍是铜的某种化合物。在碳或一氧化碳等还原性气氛下加热时,一些氧化类铜矿石就会在固体状态下转变为金属铜。在高温加热条件下,硫化铜类矿物会快速转变成以硫化亚铜为主的混合物^[6],加热温度超过 1000 °C 时可变为液态的冰铜^[8],冷却凝固后成为制作铜器的预制品,即可用作经重熔和冶炼加工而制成铜器的冰铜锭(图 1)。在高温重熔冶炼过程中,铜的硫化物经一系列氧化过程转变为金属铜,同时释放出二氧化硫气体^[6]。



图 1 安徽贵池春秋时期冰铜锭(安徽博物院)

高温加热是铜矿石人工冶炼成铜并制成铜器必不可少的环节。各种铜矿石的主要化学成分、杂质类型和含量、加热气氛等化学特性都会影响到人工冶铜时加热温度所必须达到的高温水平。一些铜矿石在较低的加热温度并保持固体的状态下借助低温人工冶铜技术就可以冶炼成铜并制作成铜器,而另一些铜矿石则需要较高的加热温度下借助高温人

工冶铜技术才可能制作成铜器^[2];有鉴于此,前者可称为低温铜矿石,后者则为高温铜矿石。由于世界各地蕴藏着不同类型的铜矿石,早期各地人类需要相应地采用不同的加热温度人工冶炼所获得的铜矿石。

中国与环地中海地区铜矿资源的分布

从现代工业的角度观察,中国并不是一个遍布大型铜矿区,蕴藏巨量铜矿资源的国家^[7]。中国是目前世界上铜消费量最大的国家,每年都需要从国外大量进口铜矿资源和各种铜材^[9]。然而,对于远古时期的中国社会来说,并不一定需要储量巨大的大型铜矿;只要有一定的储量,最好不要埋藏在很深的地壳里,就可以满足人工冶铜对铜矿资源的需求。即便是中、小、微型铜矿,只要是遍布全国各地,就非常有利于支撑早期人工冶铜技术的发展。而遍布全国各地,刚好是中国铜矿资源的主要分布特征。

图 2 展示了遍布于中国各地并被开发利用的铜矿区。表 1 给出了所查阅到的中国各地铜矿区的名称^[10],这里并未能包括部分历史上或许曾被利用过,而今天已经废弃的铜矿区。目前可获得各省铜矿分布的信息并不充分,因此很难对全国所有铜矿区作较完整的统计。例如仅在陕西省目前就存在约 90 个铜矿区以及约 150 个铜矿点^[11],因此表 1 所列出的矿区极为不完整。但仍可以看出全国各地均蕴藏有数量不同的铜矿区,且不论各矿区蕴藏铜矿资源数量的多少,矿区位置呈现出了遍布各地的分布状态。在新石器时代的中晚期这种分布也必然早已存在,为中国发展出本土的人工冶铜技术提供了必要的铜矿资源。图 3 列举出了在中国多地发现的各种铜矿石,且不同铜矿石的物理化学特征各不相同;其中赤铜矿、孔雀石、蓝铜矿等属于氧化物类的低温铜矿石,其余大多是硫化物类的高温铜矿石。

作为对比,图 4 给出了欧洲和环地中海地区许多地方发现的众多铜矿点。然而据不完整的统计^[12],铜器时代早期在环地中海、欧洲大陆、英国等地实际得到利用的铜矿区则主要涉及:西班牙的莫雷纳山脉和阿拉莫(Sierra Morena and El Aramo)、奥地利



图2 中国各地有所开发利用的铜矿区及其名称^[10], (实心圆圈:铜矿区的位置,不表示铜矿区的规模)

的北提洛尔(North Tyrol)、法国的中央高地(Massif Central)、希腊雅典附近的拉夫里(Lavrion)、意大利的撒丁岛(Sardinia)、东地中海的塞浦路斯(Cyprus)英国的康沃尔(Cornwall)、德国的西格兰(Siegerland)等(图4)。尽管还有一些其它关于欧洲古代铜矿资源的报道^[13-14],但整体上看,欧洲及环地中海地区当时可利用的铜矿资源并不十分充沛^[12]。研究显示^[15],囿于当时有限的高温技术尚不足以冶炼所有可接触到的铜矿资源,致使公元前2500年之前该地区可利用的低温铜矿石资源逐渐枯竭,进而造成较为低迷的铜器时代、乃至长期的铜石并用时代^[16]。图5列举了在欧洲及周边地区发现的各种铜矿石;其中孔雀石、蓝铜矿、翠铜矿等多属于氧化物类的低温铜矿石,其余为硫化物类的高温铜矿石。

在自然界中大多数铜矿石属于硫化类铜矿石,但在高温氧化条件下铜的硫化物也会向铜的氧化物转变^[6]。在地球形成地壳表面硫化类铜矿区的初期,

与高温空气接触的表层硫化铜会转变成一定厚度的氧化类铜矿石层,下面则是难以与空气接触的内部区域,仍保持为硫化类铜矿石层。另外不能完全排除,长期处于较强氧化环境的铜矿区,其表层部分硫化铜也可能会缓慢地转变成氧化铜矿。在中国^[17]和欧洲^[15]都存在着表层为次生的氧化类铜矿石^[6,18]而内部为硫化类铜矿石的铜矿区。上述所描述的铜矿资源分布情况难免有所遗漏,但仍可以看出中国各地铜矿区的存在确实具有普遍性。虽然无法确认早期中国各地的族群是否能及时发现并充分利用这些资源,但至少铜矿资源不会成为制约中国出现人工冶铜技术的因素。

中国的铜矿资源对早期人工冶铜活动的支撑

在没有合金设计理念的早期，人类只能就近取得本地的铜矿石，直接制作质地为黄铜、白铜、锡青铜、砷铜、红铜等多种铜器。因此，本地铜矿石的化学组成，除了铜以外矿石中是否还含有其他元

表 1 中国各地铜矿区的名称 (根据不完全的查阅和统计)

地区	省/自治区	铜矿区
华东	江苏	安基山
	浙江	西裘
	安徽	铜陵、贵池、沙溪、麻姑山、琅琊山
	山东	王家庄、福山、埠口
华南	广东	大宝山、石录、锯板坑、天堂、玉水
	广西	拉么、大厂、钦甲
	海南	石碌
	福建	紫金、蔡西
	江西	德兴、银山、封山洞、城门山、武山、村前、枫林、天排山
华北	河北	高板沟、小寺沟、寿王坟
	山西	铜矿峪、篦子沟、落家河
	内蒙古	东升庙、甲生盘、孟恩陶勒盖、霍各乞、白云、炭窑口、莲花山、毛登、大井、黄岗梁、敖尔盖
华中	河南	银洞坡、刘山岩、大河
	湖北	铜山口、铁山
	湖南	七宝山、宝坪
西南	四川	拉拉厂、李伍、大铜厂
	贵州	条台
	云南	大红山、红山、雪鸡坪、东川、赫家河、狮子山、老厂、卡房、大村、三家厂、白马寨、六苴
	西藏	玉龙、多霞松多、马拉松多
东北	辽宁	红透山、凡河
	吉林	红旗岭、天宝山、赤柏松
	黑龙江	二股、多宝山、弓棚子
西北	陕西	陈家坝、八一、万丈沟、午峪沟、汉中
	甘肃	白银厂、公婆泉、白山堂、金川、蛟龙掌、陈家庙
	宁夏	中卫
	青海	浪力克、铜峪沟、赛什塘、德尔尼、纳日贡玛、红沟、锡铁山、朵科合
	新疆	黄山、阿舍勒、喀拉通克、索尔库都克、小热泉

素,或还含有何种元素,就决定了所制成铜器是否为红铜器或属于何种合金质地的铜器^[19]。统计归纳显示,中国各地发现了公元前 3000 年及更早时期许多通过人工冶铜技术制作的铜器^[19]。

在偏西北的陕西,公元前 47—前 46 世纪临潼姜寨仰韶遗址发现了黄铜管、西安半坡遗址发现了白铜片,此外公元前 37—前 31 世纪渭南北刘遗址也发现了黄铜筭。陕西勉县、略阳县、宁强县一带的铜矿区以及陈家坝铜矿床蕴藏有含锌以及含镍的铜矿石^[2,20],陕西柞水县万丈沟蕴藏有涉镍的铜矿^[21],陕西汉中铜矿^[22]及宝鸡香泉铜矿^[23]均有含锌的铜矿石;这些铜矿资源可以支撑起当地黄铜器和白铜器的制作^[19]。

公元前 45~前 40 世纪内蒙古赤峰市西台遗址发

现了铸造小件青铜的模具,相应的铸件可能属于锡青铜;而其附近内蒙古锡林郭勒的毛登^[24],赤峰的大井^[25]、莲花山^[26]、黄岗梁^[27]都蕴藏有含锡的铜矿床,适合于在该地区用来制作锡青铜器^[19]。

约公元前 3000 年的青铜器涉及青海同德县宗日遗址的砷铜刀、甘肃东乡林家的锡青铜刀、新疆吉木乃县通天洞遗址的锡青铜管残件^[19]。青海门源县的浪力克^[28]和兴海县的朵科合^[29]等矿区蕴藏有含砷的铜矿石,甘肃的白银厂^[30]和西北部的公婆泉等矿区^[31]、以及新疆的阿舍勒铜矿区^[32]都有含锡的铜矿石,可以支撑起各地砷铜器及锡青铜器的制作^[19]。

约公元前 3000 年的红铜器涉及山西榆次源涡镇的红铜炼渣、辽宁朝阳牛河梁的红铜环、山东泰安大汶口遗址 1 号墓葬的铜绿锈等^[19]。山西南部的铜

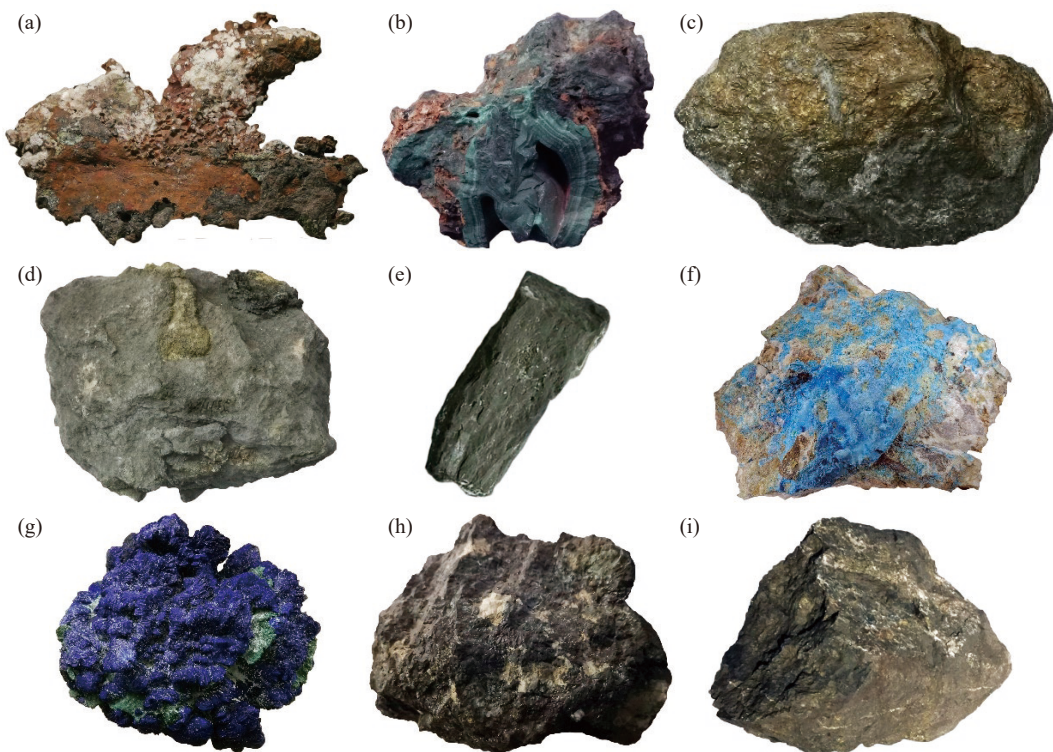


图3 中国各地的铜矿石: (a) 云南赤铜矿; (b) 湖北孔雀石; (c) 山西黄铜矿; (d) 甘肃辉铜矿; (e) 陕西黝铜矿; (f) 贵州绒铜矿; (g) 江西蓝铜矿; (h) 吉林斑铜矿; (i) 新疆铜镍矿 ((a-f) 来自中国地质大学逸夫博物馆, (g-h) 来自中国地质博物馆, (i) 来自新疆可可托海地质陈列馆)



图4 欧洲及地中海地区分布的铜矿资源及铜器时代早期得到实际利用的铜矿区^[12] (实心圆圈: 铜矿点的位置, 不表示铜矿点的规模, 信息来源德国柏林新博物馆; 实线环: 铜器时代得到实际利用的铜矿区)

矿峪^[33]和洛家河等铜矿区^[17]、辽宁东部的红透山^[34]和凡河^[35]铜矿区、山东泰安附近的埠口铜矿^[36]及东部的王家庄铜矿^[37]等蕴藏有可以仅借助低

温人工冶铜技术制成红铜器的赤铜矿、孔雀石、蓝铜矿等次生氧化物低温铜矿及自然铜, 足以支撑当时各地的红铜器制作^[19]。

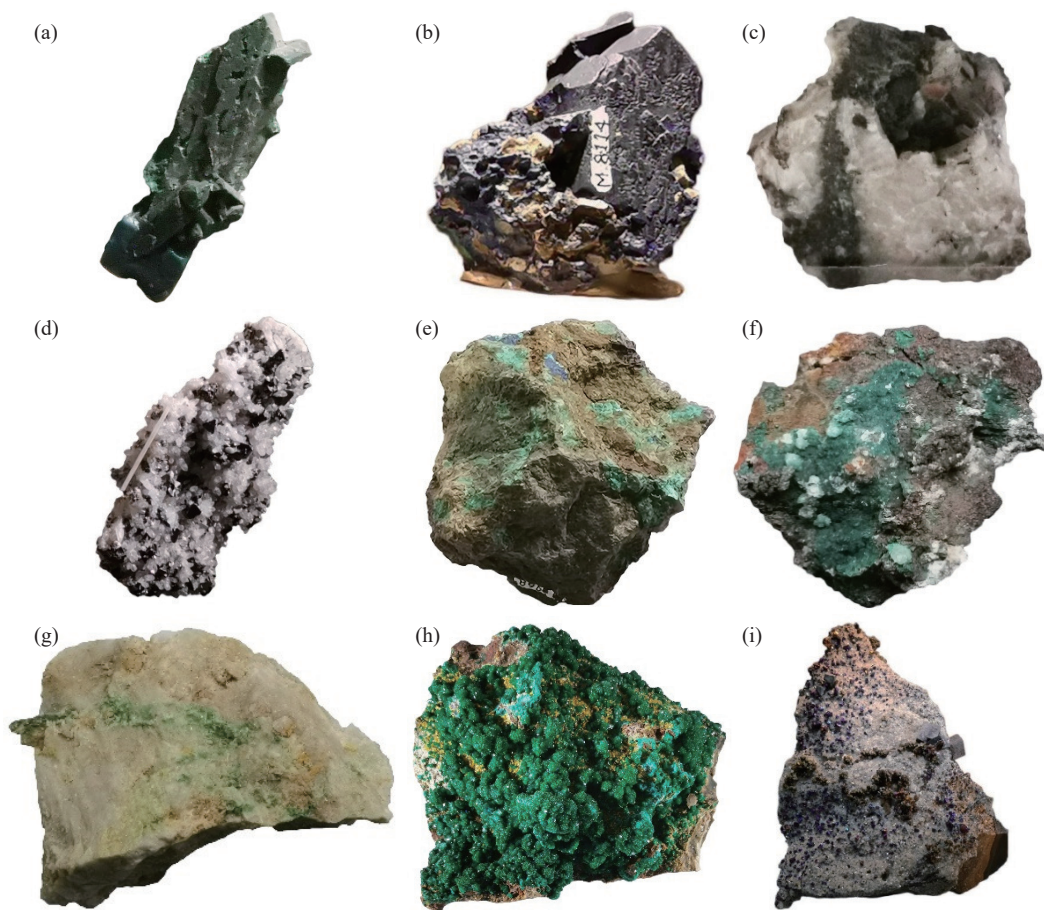


图5 欧洲及周边各地的铜矿石：(a) 摩洛哥孔雀石；(b) 法国蓝铜矿；(c) 英国辉铜矿；(d) 奥地利孔雀石；(e) 西班牙铜泡石；(f) 德国锌钙铜矿；(g) 法国乳砷铅铜矿；(h) 刚果翠铜矿；(i) 匈牙利斑铜矿 ((a-g) 来自中国地质博物馆, (h-i) 来自中国地质大学逸夫博物馆)

中国用自然铜加工制作的早期铜器

在漫长的石器时代末期，各地的人类都能非常娴熟地把天然石料加工成砍砸器、刮削器等工具使用。地壳各处的铜矿区都可能存在一定比例自然铜^[1]。自然铜中会含有一定量的杂质，但往往含铜量较高，接近纯铜，呈偏红的色泽^[4,38]，因此考古挖掘中所发现铜器时代之前的很多金属器都是由自然铜制作而成的红铜器。

当人类把捡拾到的自然铜块当作石料加工时，就会发现这种偏红色的块状石料可以经捶打而直接变形，并被加工成所需的形状和更优质的工具^[2]。自然铜块的色泽明显区别于其它石料，很容易被识别出来^[39]。如果反复出现捡拾到自然铜块并捶打加工成工具的情况，人们就学会了如何在自然界中识别出自然铜块，如何把自然铜块加工成铜工具，甚至如何加热捶打过的铜块使之软化等铜器变形加工方

面的知识^[1]，并不断积累和完善这些知识。

在河北唐山市大城山新石器时代龙山文化遗址中发现了两块经穿孔加工，近似红铜的铜牌^[40]。公元前 21 世纪是甘肃祁连山北麓的齐家文化时期，在该地区的武威皇娘娘遗址中发掘出了 23 件红铜器，在永靖大何庄遗址中发现了红铜的铜匕和铜器残片，在永靖秦槐家遗址中出土了 6 件红铜器；分析这些铜器的结构和可能的捶打成型过程可知，它们均取材于自然铜^[3]。在西藏地区也发现了约公元前 2000 年自然铜制作的红铜器^[4]。除了甘肃、青海地区，在山东、河南一带约公元前 2500 年的大汶口文化末期多次发现有用自然铜制作的小型红铜工具和用具^[38]。

发明人工冶铜技术的偶然性和概率

公元前几千纪之前，人类所掌握的知识非常有

限。对于他们来说,发明人工冶铜技术并不是一件容易的事情。观察和分析早期人类发明人工冶铜技术的过程,可以体会到至少要获取铜矿资源、高温技术、自然铜的变形加工知识、发明人工冶铜技术的机会这四个必备的条件。铜矿资源是发明人工冶铜技术最基本性的条件,没有铜矿则一切无从谈起。另外,新石器时代烧制陶器的高温技术也是人工冶铜必不可少的前提;是否能够获得发明人工冶铜技术的机会则在很大程度上依赖于人类族群以往长期的知识积累,尤其是对自然铜变形加工知识的积累。

世界各地的铜矿资源产生于地壳形成之时。今天人们仍能借助考古研究和地质考察分析确认出,新石器时代与铜器时代交替之时地球上各地的人类族群所能获得的铜矿资源。新石器时代烧制的陶器在破碎、失效后即被丢弃,或留存于墓葬之中。陶器在自然气氛中的化学稳定性极高,早期陶器的墓葬遗留及各种碎片可以保留至今。利用今天的科技知识分析这些陶器遗留的化学组成和结构,可以获知当时烧制时所能达到的最高温度。因此,结合考古研究和历史研究可以为当时所能实现的高温技术提供可靠的证据。现在的考古研究已经能够获知新石器时代末期人类某时、某地使用的铜器是源自自然铜还是源自人工冶炼的铜。然而,何地的人类族群,在何时、如何发明了人工冶铜技术则会存在显著的偶然性;这种技术发明很大程度上依赖于人们以往知识的积累和主观的努力。但是,在大量铜器因其金属特性而损毁湮灭的情况下,某地何时偶然性地发明了人工冶铜技术的历史行为难以仅借助考古发掘去客观地证实。另一方面,当人类族群是否较容易地获得了铜矿资源、掌握的高温技术是否足够好、是否已掌握了加工自然铜的能力等,会对其偶然发明人工冶铜技术的概率产生重要影响。

根据图2可以看出,在今天中国的地理范围内各地铜矿资源分布的普及程度很高、甚至优于环地中海地区^[41],在大多数地区生活的族群都可以非常容易地在日常生活中接触到铜矿资源,因而具备了发展本土人工冶铜技术的第一个必备条件。根据对新石器时代末期烧陶温度的比较分析可以获知,当时中国各地的高温技术普遍具备达到或超过1000℃的能力,瓷器的发明也说明中国高温技术领先于环

地中海地区,这不仅适于发展低温人工冶铜技术,而且也适合于发展高温人工冶铜技术^[2],因而具备了发展本土人工冶铜技术的第二个必备条件。如上所述,公元前2000年之前,中国多地已经掌握了收集自然铜块,并借助捶打加工而制成铜器的能力;因此,尽管尚难确认更早时期中国是否已经在加工自然铜块,但原则上各地并不缺乏自然铜的变形加工知识,由此具备了发展本土人工冶铜技术的第三个必备条件。发展本土人工冶铜技术的第四个必备的条件涉及发明人工冶铜技术的机会。人工冶铜技术出现之前,世界各地的人类族群已经非常普遍地烧制陶器。制作烧陶窑炉的炉壁、炉底等部位的石料中混入的铜矿石在长期的烧制陶器过程中会被还原成疏松的铜块,不再适合继续用于窑炉而被替换出来,借助制作红铜器的经验把替换出来的疏松铜块制作成铜器,如此就是今天可以设想的人类发展出人工冶铜技术的基本过程^[2]。

是否能及时获得发明人工冶铜技术的机会涉及到当时人类族群的生存方式,以及是否曾积极探索人工冶铜过程,是一个较难借助考古和历史研究确认的事情。因此,需换一个角度来观察。分布广泛的铜矿区(图2)一方面可使生活在中国各地的族群有捡到自然铜块的更高概率,因而容易获得对自然铜块捶打变形加工的知识和能力;另一方面,制作烧陶窑炉的炉壁、炉底等部位的石料中会以更高概率混入铜矿石,进而在长期烧制陶器的过程中,发现混入的铜矿石被自动地还原成类似于自然铜的铜块,进而发现人工冶铜的基本技术过程。中国当时的高温技术更具备优势,因而混入烧陶窑炉的铜矿石会更高效地还原成金属铜。总体上看,基于上述的种种情况,新石器时代末期发展出人工冶铜技术对于中国各地的族群来说并不十分困难;且基于铜矿资源、高温技术等方面的优势,中国会以很大的概率发展出本土的人工冶铜技术。

结束语

足够的铜矿资源、足够好的高温技术、对自然铜变形加工的知识、发明人工冶铜技术的偶然机会是发展人工冶铜技术的四个必备条件。与环地中海地区相比较,新石器时代末期中国各地在普遍获取铜矿资源和掌握烧陶高温技术方面均呈现出相对的

优势,而且掌握了自然铜变形加工的知识和能力;铜矿资源和高温技术方面的优势会明显提高发明人工冶铜技术的概率,因而中国各地充分具备了发展本土人工冶铜技术的基础和条件。

参考文献

- [1] Tylecote R F. *A History of Metallurgy*. London: The Metals Society, 1976
- [2] 毛卫民,李一鸣,王开平.中国古代的高温技术与发明人工冶铜.金属世界,2024(2): 42
- [3] 王根元,申柯娅.我国古代认识的主要含铜矿物.地球科学,1986,11(1): 111
- [4] 霍巍.试论西藏发现的早期金属器和早期金属时代.考古学报,2014(3): 32
- [5] 毛卫民,王开平.人工冶铜技术与文明时代的概念.金属世界,2023(2): 28
- [6] 彭容秋.铜冶金.长沙:中南大学工业出版社,2004
- [7] 达文波特 W G,金 M,施莱辛格 M,等.铜冶炼技术.杨吉春,董方,译.北京:化学工业出版社,2006
- [8] 许并社,李明照.铜冶炼工艺.北京:化学工业出版社,2007
- [9] 文博杰,代涛,韩中奎,等.中国铜资源在用存量与二次供应潜力.地球学报,2023,44(2): 325
- [10] 史长义,王惠艳,冯斌,等.中国铜的区域成矿地球化学分布模式与找矿预测.地学前缘,2014,21(4): 210
- [11] 齐文,侯满堂.陕西铜矿床类型及找矿方向.西北地质,2005,38(3): 29
- [12] Ling J, Stos-Gale Z, Grandin L, et al. Moving metals II: provenancing Scandinavian Bronze Age artefacts by lead isotope and elemental analyses. *J Archaeol Sci*, 2014, 41: 106
- [13] 李延祥.巴尔干半岛铜冶金考古.文物保护与考古科学,1999,11(2): 53
- [14] 崔春鹏,李延祥,潜伟.近年国外早期铜冶金的研究进展.中国国家博物馆馆刊,2020(9): 147
- [15] Hong S, Candelone J P, Soutif M, et al. A reconstruction of changes in copper production and copper emissions to the atmosphere during the past 7000 years. *Sci Total Environ*, 1996, 188(2/3): 183
- [16] 拱玉书.西亚考古史(1842—1939).北京:文物出版社,2002
- [17] 孙桂琴,霍卫民.山西省落家河铜矿地质特征及矿床成因浅析.化工矿产地质,2011,33(4): 232
- [18] 张润峰,于凤金,杨铁军,等.辽宁红透山铜矿树基沟矿区资源潜力分析.有色矿冶,2011,27(1): 5
- [19] 毛卫民,李一鸣,王开平.中国及周边地区早期的铜器.金属世界,2024(1): 23
- [20] 丁坤,王瑞廷,秦西社,等.陕西陈家坝铜铅锌多金属矿床C、H、O、S、Sr同位素地球化学示踪.矿床地质,2019,38(2): 355
- [21] 王建平,陈小刚.陕西镇安县午峪沟—柞水县万丈沟铜矿成矿地质背景、地质特征及找矿前景.世界有色金属,2023(8): 53
- [22] 张天运,袁波,吴前瑞,等.汉中某铜矿石工艺矿物学研究.现代矿业,2021,37(11): 153
- [23] 任建梅,陈元,李晓国,等.陕西省宝鸡香泉铜矿地质特征及控矿因素探讨.陕西地质,2022,40(1): 51
- [24] 刘玉强.毛登锡铜矿床成矿分带及其成因讨论.矿床地质,1996,15(4): 318
- [25] 王京彬,王玉往,王莉娟.大兴安岭中南段铜矿成矿背景及找矿潜力.地质与勘探,2000,36(5): 1
- [26] 康欢,刘翼飞,江思宏.内蒙古莲花山铜矿床辉钼矿铼-钨年代学、矿石硫-铅同位素地球化学与矿床成因.地质学报,2019,93(12): 3082
- [27] 肖成东,杨志达.内蒙赤峰北部两个重要的成矿带及其成矿特征.有色金属矿产与勘查,1997,6(4): 197
- [28] 张伟峰.门源县浪力克铜矿地质特征及矿床类型分析.世界有色金属,2016(13): 78
- [29] 李文明,宋治杰,张汉文.青海杂科合含铜银矿床成矿地质特征及矿床成因浅析.西北地质科学,1996,17(2): 30
- [30] 叶荣.白银厂矿区折腰山矿床碳酸盐矿物的新认识.西北地质,1983(4): 65
- [31] 刘杰,郭旭,刘鹏进,等.甘肃省铜矿主要类型与时空分布特征.中国金属通报,2022(8): 219
- [32] 白旭晖.新疆阿舍勒铜矿区地质特征及三维成矿预测.金属矿山,2108(10): 146
- [33] 王全家,张国.铜矿峪选矿厂生产实践及问题探讨.中国矿山工程,2007,36(5): 9
- [34] 刘长纯.基于MRAS证据权重法的抚顺—清原地区红透山式块状硫化物型铜矿产预测.地质找矿论丛,2017,32(3): 468
- [35] 李涛,陈元江.辽北凡河地区细碧岩型铜矿成矿地质条件及找矿方向.中国科技信息,2011(8): 23
- [36] 李亚东,冯启伟,鹿波.山东埠口铜矿成矿地质背景分析.世界有色金属,2018(23): 95
- [37] 常洪华,赵体群,李亚东,等.山东邹平火山岩盆地王家庄——碑楼铜矿床地质特征及成因探讨.山东国土资源,2021,37(4): 17
- [38] 王志俊.中国早期铜器的起源及发展.文博,1996(6): 30
- [39] 陈晓洁,汪常明.自然铜浅说.金属世界,2011(1): 25
- [40] 陈惠,唐云明,孙德海.河北唐山市大城山遗址发掘报告.考古学报,1959(3): 17
- [41] 毛卫民,王开平.中西方铜器时代差异分析.金属世界,2019(4): 12

作者简介:毛卫民(1950—),男,北京科技大学退休教师。曾长期开展材料基本原理和应用技术的研究,现从事材料技术进步与人类社会发 展内在联系 的观察与分析,著有《材料与文明》、《文明与物质——从材料学视角探索中西文明差异》、《文明的回荡——中西方文明特征差异的物质基础与演变概览》等著作。《金属世界》杂志社特邀作者。通信地址:北京海淀区学院路30号北京科技大学材料学系,100083; E-mail: wmmao@ustb.edu.cn。