

第十一章 化工单元操作及相关的设备

任何一项化工生产都是由一系列的单元操作所组成，例如，粉碎、混合、加热、煅烧、吸收、冷凝、浸取、沉降、结晶、过滤、溶解等。这些基本的单元操作为数不多，并且只有相当少数包括在某一特殊的化工生产过程中。对单元操作的研究正是化学工程这门工程技术科学的主要内容之一。经过对各种单元操作的分析、综合，发现所有的单元操作均有共同的基本规律，它们离不开流体的流动（动量传递）、传热和传质等一些基本原理。例如，过滤显然只是流体传递的一种方式；蒸发只是传热的一种形式；萃取和吸收都包含有质量的传递；干燥和蒸馏既是传热，又是传质。总之，单元操作实质上只是传热、传质及流体流动的特定结合。因此，动量传递、热量传递、质量传递是化学工程的基本问题。伴随上述“三传”的一个重要特征是化学反应，故化学工程的研究实际上以研究传递过程和反应过程（通称为“三传一反”）为中心而展开。

在化学工程这门学科提出来之前，化工单元操作和“三传一反”这些化工过程在实践中已经历了漫长岁月。可以说，古代的化工生产已孕育了这些古人尚未总结的操作技能和科学原理。下面列述几项古代化工生产中的显见而又关键的技术的演进。

第一节 陶瓷窑炉的演进

制陶是以黏土为原料，和水塑捏成一定赋形的陶坯，再在高温烧烤下变成坚硬的陶器的系统技术。在烧成中，黏土中的多种成分会发生一系列复杂的化学变化，包括失去结晶水，晶形转变、固相反应以及玻璃相的产生。这种高温条件是黏土化学反应的前提，是人为制造的。这一过程不仅有热量传递，还兼有质和量的变化。由于陶器的质量与烧成温度密切相关，人们就想方设法提高或控制好烧成温度，从而创造了陶窑并促进其发展。

1. 从无窑烧陶到有窑烧陶

根据历史资料，特别是 1977 年中国硅酸盐学会组织一些专家对今云南西双版纳州一些少数民族聚居地区的原始制陶工艺的调研，使人们确信在制陶史上确实存在一个从无窑烧陶到有窑烧陶的发展历程：平地露天堆烧→一次性泥质薄壳封烧→

横穴窑或竖穴窑烧陶。

调研中看到的“平地露天堆烧”(图 11-1),是先将陶坯置于铺在地上的木柴上面,点火烤干,趁坯体还热,就在陶坯周围架起木柴垒成锥状,利用下面的炭火继续点燃架起的木柴。从点火烘烤到最后烧成,约需两小时。最高温度可达 800~900℃。木炭烧完后,立即把陶器挑出,趁热用虫胶涂抹口沿,使其坚固耐用。酒坛则需通体里外都要涂抹。这样做还有防渗漏的作用。若用茅草、稻草、碎木片为燃料,则须在烧成过程中,当某部分草烧尽而陶坯外露时,应随时添加草料。平地露天堆烧的特点是升温快,烧成时间短。缺点是保温不好,温度不均衡,热效率低,有些坯体难免出现生烧或烧毁现象。



图 11-1 平地露天堆烧

一次性泥质薄壳封烧(图 11-2),是先在地面上铺一层木柴等燃料作窑床,接着把预先烘干的陶坯小心地放置其上,四周和顶部再围堆上柴草,外面再用稠泥浆抹上一层,使柴草外面有一层厚约 1 厘米的泥皮,从而形成“泥质薄壳窑”。点火后,用棍子在窑顶上戳几个洞,以便出烟之需。这种烧陶方法较之平地堆烧,保温较好,只要调整窑顶出烟孔以及掀起贴近地面的窑皮,可以调节窑内温度,烧成温度同样可达 800~900℃,而且燃料耗费少多了。



图 11-2 一次性泥质薄壳封烧

2. 横穴窑和竖穴窑

窑的出现是提高烧成温度的前提。新石器时代的烧陶方式大多是采用了横穴窑（图 11-3）和竖穴窑。根据考古发掘对迄今已发现的 200 多处窑址的研究，除了早期的陶窑不够规整外，它们基本上属于横穴窑和竖穴窑。仰韶文化早、中期似乎横穴窑较普遍。例如，属于新石器早期的裴李岗文化的陶窑呈圆形，前有火道，结构属横穴窑。又如西安半坡的横穴窑（见图 11-4），它的火膛位于窑室的前方，是一个略呈穹形的筒状甬道，后部有三条大火道倾斜而上，火焰由此通过火眼到达窑室。窑室平面略呈圆形，直径约 1 米左右，窑壁的上部往里收缩，火服均匀分布于窑室四周，较之裴李岗文化的横穴窑已有明显的进步。



图 11-3 横穴窑烧陶

到新石器时代中期的龙山文化，出现了竖穴窑（见图 11-5），竖穴窑较横穴窑最大的改进在于其燃烧室已位于窑室之下，为口小底大的袋形坑。火焰通过数条火道直接进入窑室。这一改进可使窑温较为均匀，保证窑室里的陶坯同时受热，减少残次品。但是它的火焰还是经过火道和窑室一走而过，不利于温度的提高，所以最高烧成温度尚不足 1000°C 。



图 11-4 仰韶文化遗址横穴窑复原图

图 11-5 龙山文化遗址竖穴窑复原图

到了商周时期，竖穴窑又有发展，首先窑室不再直接位于火膛上，而是让火焰通过倾斜的火道进入窑室。窑室容积增大，其底部呈“北”字形的沟状火道或在火道上修筑多火眼的窑箄。火膛、窑室相对位置的变化，火道、火眼的增加及其在窑内的均匀分布，都是为了便于火焰进入窑室，提高窑室的温度。更重要的变化是窑室不再是就地挖穴而成，而是让窑室高出地面，并将窑顶密封后开设排烟口，从而提高了烧成温度。无论是横穴窑还是竖穴窑，其火焰在火膛产生，经过火道、火眼进入窑室，最后成烟由窑顶排出，火焰流向从下而上，属升焰窑。当不能控制进入窑室的空气流量，高温被气流很快带走，必然会影响窑室的烧成温度；若窑室高出地位就必须修筑窑墙、窑顶，而且其上部往内作弧线收缩，窑顶只留几个可控制的出烟口，这样进室的火焰和空气流量可控，就能提高烧成温度了。据测当时利用这样的陶窑可使烧成温度达到 900~1050℃。这种陶窑既能烧出氧化焰的红陶；当在烧成后期采用了植物茎秆封顶和往里喷水等措施就可以烧出还原焰的灰陶或黑陶。

也是在商周时期，南方的个别地区对上述的竖穴窑又有改进，主要表现在陶窑顶部开设了烟囱，以它来代替出烟口，既便于控制室气氛，又提高烧成温度达 1200℃左右。原始瓷器就是在这种陶窑中烧成的。如已发掘到的张家坡西周晚期的陶窑，这个窑的窑室仍挖在地下，但在窑的后部已设有烟囱，其浅高为 0.9 米。烟囱由顶部移到了后部，也是一种进步。这种移动开始于西周晚期，因为它能使火焰在窑室内停留时间增长，保持窑温。到了战国时期，已有更多的陶窑在窑后设有烟囱，如湖北江陵县毛家山和浙江肖山县的两座陶窑，特别是前者，已不是挖地为窑，而是在地面上筑墙为窑。烟囱的开设和筑墙为窑，都为增加室内抽力和改变火焰走向创造了条件，从而提高了烧成温度。

3. 龙窑

在战国时期，在南方还出现了龙窑，北方出现了圆窑。早期的龙窑是由竖穴窑发展而来，战国时，大部分陶窑已在地面上修筑，窑床多作成平台形，火膛从窑床下面移到前面，使火焰直接进入窑床。这也是提高烧窑温度的新举措。当人们在丘陵地区的山坡上修筑陶窑时，依坡倾斜而建，很自然地使窑身前后有一个相当大的高度差，形成一定自然抽力，火焰顺势而上，窑尾有一不高的烟囱，甚至于不设烟囱都具有一定抽力。这就是龙窑（见图 11-6）。在浙江上虞发现的一座东汉龙窑，残长 3.9 米，估计全长 10 米，窑底的倾斜度前段为 28°，后段为 21°，如平均按 25° 计算，其高度差可达 4 米多。东汉成熟的青瓷就是在这种龙窑中烧成，烧成温度达到了 1310℃。后来，为了更好利用热能和增加窑室空间，人们将窑床建成长方形，逐步发展成长约 20~30 米，宽约 1.5~2.5 米，高约 1.6~2 米，容积约 50~100 米³的大龙窑。这个规模已是后来成熟龙窑的样子了。龙窑经过从战国到两汉

的长期发展，成为南方许多地区陶瓷窑的主要类型。甚至沿用到近代，2011 年笔者在云南建水仍看到一座大型龙窑在烧仿古日用青花瓷。

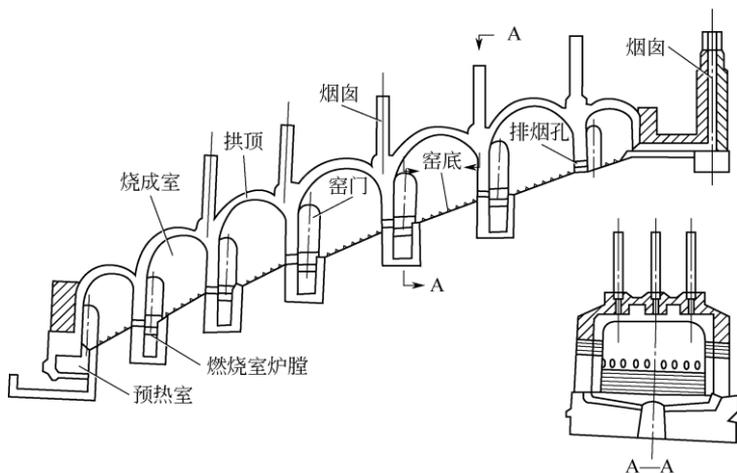


图 11-6 古代龙窑示意图

任何一种窑炉体系，为了保持稳定的较高窑室温度，不仅要烧好燃料，还要注意窑室内空气流通的状况。龙窑中空气流通的最大阻力来自坯件的装置阻力，只要有序地摆装好大小坯件，阻力就变得很小了。这种状况就对外加的气压和窑尾的抽力要求不高，较易保持气流的稳定和平衡。这实际上保证了足够的高温烧成时间。另外，适当的窑身倾斜度也很重要，大了或小了皆会影响适当位能的保持，从热工特性来说，这能促进热传递取得较佳的效果。由于烧窑开始时需要热量最多，窑头横断面积最小，热量便于集中。窑中间横断面积最大，窑尾又较小，以保持适当动压。窑身的拱顶呈弧形，西侧上部或窑顶还有投燃料的孔（投松枝或茅草，直径约 0.15m）两排或数排，每排前后孔相距约 0.8~1.0 米。窑身有窑门 2~4 个（高约 1.8 米），供装坯件和出产品之用。全窑结构简单，用费极省。龙窑有效地利用烟气热量来预热坯体，又充分地完成了坯体到产品的热传递，既提高了燃烧温度，又把废气的热损耗降到很低。由于有窑墙，窑内压力变化不大，辐射散热和蓄积热损都不多，所以热效率高，烧成较快，生产周期短。一般龙窑的操作使用寿命，不加修理时约为一年。龙窑适宜烧小件产品或质地比较疏松的大型产品。它的主要缺点是装窑和出窑的劳动强度大。窑内某些部位的产品质量不稳定。

4. 圆窑和馒头窑

分布在北方地区的圆窑，也是由竖穴窑发展而来。它的窑室在地面上呈圆形，故称圆窑（图 11-7）。它的进一步完善就成为后来主要流行于华北，特别是河北一带的馒头窑。早期的白瓷就是在这种窑中烧成，唐宋时期一些北方著名的色瓷、彩瓷也是在馒头窑中烧成，产区以磁州（今河北邯郸）较集中，故又有“磁州窑”之

称。馒头窑在结构上也有若干不同形式，如烟囱有单有双，可能与当地的资源环境及北方陶瓷不同的坯体组成有关。馒头窑一般具有倾斜角为 4° 的实心窑底，长约 2.7 米，宽约 4.2 米，有效面积 11 米^2 左右，窑全高 5.15 米，窑前燃烧室呈半圆形，约 3.5 米^2 。窑门口留一炉口加燃料（宋代始用煤）。火焰沿弧形窑墙以近平行的形式流向窑后（见图 11-7），火焰到窑后遇壁变成热烟再倒向窑后下方的烟道口，通过烟囱排出。根据火焰的流向，馒头窑实际上属于倒焰窑。热传递时间较长，也有助于窑温的提高。在陕西铜川宋代的陶窑遗址中，发现当时的馒头窑已开始用煤烧窑。煤的火焰较松柴短，煤层阻力较柴大。这就要求缩短窑身前后长度，扩大窑前炉栅面积，减薄煤层，尽可能地造成宽的焰面，利于温度的均匀。又由于煤的点火速度慢，着火温度高，燃烧时间长，只有加深、加大灰坑才能适应煤炭燃烧中的通风和及时去除炉灰和煤渣。

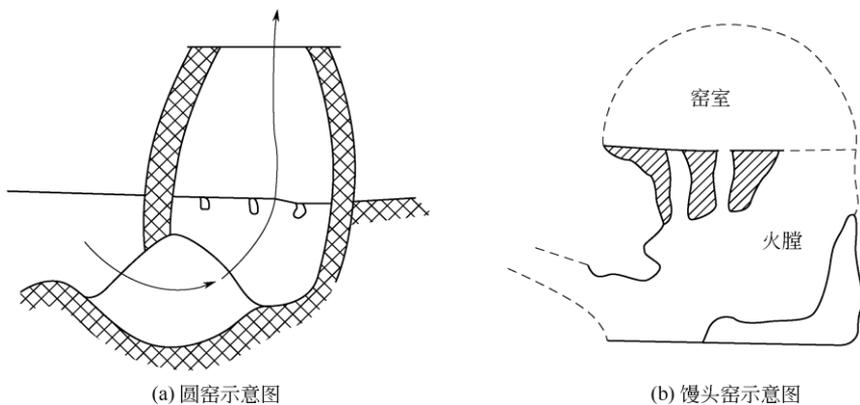


图 11-7 古代圆窑、馒头窑示意图

有了深而大的灰坑，就有可能架好炉栅，不仅可以减少大块结渣，还形成了馒头窑的另一特色。这特色就是窑床乃是由下面摆好的圆木棒上面盖以陶瓦所组成，在此上面燃烧无烟煤粉末，将不完全燃烧的半煤气送入烧成室，并由窑墙上所设的小孔送入空气，使之完全燃烧。这种架构恰好是通风能力较弱的窑炉最适当的形式。在古代尚无机械鼓风设备的情况下，克服烧煤所产生的煤层阻力主要依赖窑后烟囱的有限抽力。抽力大一些势必造成陶瓷坯体在氧化焰中烧成。在北方，由于寒冷期较长，为了保温，窑炉采用了较厚的窑砖彻筑。这样一来也限制了坯体的快烧速冷，为了减少坯体的变形，就趋于加厚坯体，逐渐形成了北方瓷器浑厚凝重的外观特征。馒头窑的优点是基建投资少，易于修建，不需太高烟囱。局限性则表现在温度不均（前高后低，上高下低），欠火或过烧的次品常在 10% 以上，烧成时间长，耗煤量大等。

5. 阶级窑

阶级窑是由早期的龙窑改进而来，最早出现在福建的德化。它也是依山倾斜砌筑，与地平线构成 $17^{\circ} \sim 18^{\circ}$ 角。一般为五间到十间，每间大小不同，原则上是头二间小，中间大，尾间小。内高约 $2.5 \sim 4$ 米，宽约 $3 \sim 4$ 米，窑间长约 $2.6 \sim 3.5$ 米，窑全长 $15 \sim 30$ 米。容积每间约 $18 \sim 40$ 米³，八间者共约 200 米³。每间隔墙下有通气孔（囱脚眼），每间前面近隔墙处有燃烧室（凹沟槽），供燃烧木柴之用。两侧窑墙有窑门，砌窑门时留出投柴孔。全窑颇似一个倾斜放置的简易冷底多室窑。有的地方将每间窑修筑成圆形的缸窑，再串起来成接缸窑，如《天工开物》中所绘（见图 11-8）。它实质上与阶级窑是一类的。



图 11-8 《天工开物》所描绘的接缸窑

阶级窑比龙窑较易控制还原气氛与正压。在还原阶段如掌握得当，可使游离氧小于 1，烧出较好的细瓷。阶级窑烧的是较粗的木柴，由烟气出口变为一次空气入口的通气孔也较大，因此在还原阶段，窑工可用柴灰来控制空气流量，即相当于以柴灰的堆积来缩小通气孔的断面积。通过观察，可以发现火焰似蛇行蜿蜒流动，流速随着与通气孔的靠近而由慢变快。流速的快慢将会影响温度和气氛的均匀。由于每间窑的上下前后的温度和气压均有差别，窑工主要在火色孔来测压和看火，一般借控制投柴的间隔和数量来掌控烧窑的过程。阶级窑虽然也如龙窑那样，可以利用废热来预热生坯和用产品热来预热空气，但是由于窑墙较厚和中间隔墙较多，蓄积热损还是较大的，只好通过二次燃烧（即由投柴口加柴燃烧）来弥补。阶级窑的优点与龙窑相近，突出的是日用瓷的烧成质量较龙窑好，匣钵的损耗也较少。

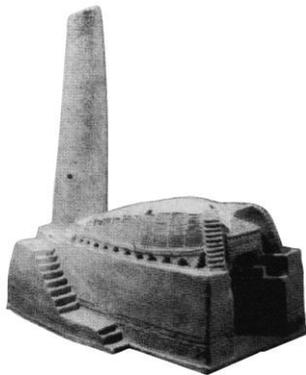
6. 蛋形窑

景德镇窑，又称蛋形窑（见图 11-9），可能是从龙窑并参考北方馒头窑又根据松柴特性而修筑的，是中国古代瓷都景德镇的标志性工业设施。全窑形状如半个瓮俯复，又似半个蛋复置，也像一个前高后低之隧道。窑门在前，烟囱在后。窑前端呈弧形，窑门设在其中，窑门约高 $2.7 \sim 3$ 米，宽约 $0.5 \sim 0.7$ 米，窑门往后弧形而上， $3 \sim 4$ 米处为全窑最高、最宽点，高约 5.4 米，宽约 4.6 米。然后逐渐向窑底倾斜，与地平线成 3° 角。窑身长约 18 米。全窑容积约有 $160 \sim 200$ 米³。窑墙火砖厚约 $0.23 \sim 0.25$ 米，窑顶处厚 $0.19 \sim 0.20$ 米。距窑头约 15 米处为烟囱底部进烟气口，俗称“挂窑口”；断面高约 2.2 米，宽约 2.6 米。装窑时，用匣钵砌成通路，以其面积大小调节和控制烟囱抽力；主要是根据窑的特性与季节和气象酌情予以变化。烟囱的高度约 19 米。其断面亦似蛋形，大头方向与窑头相同，向上略为收缩倾斜。烟囱顶部呈钢笔尖形，尖头倾向窑头。烟囱这样的构型，既不受外面风力的影响，

又保持窑内窑外压力的平衡，避免窑外冷气倒灌。炉栅及投柴口均在窑头，火焰向窑后趋向平行流动。炉栅有效面积约 $0.18\sim 0.28$ 米²，灰坑深约 1.2 米，坑前端略深而宽，炉栅及支柱均由小型匣钵架成。窑身周围有护墙，宽约 2 米，高约 4 米，与窑墙中隔 $0.2\sim 0.3$ 米空隙，用砂土填至拱脚，上部用适量火砖及数根木材加以覆盖。空隙可起隔热保温作用，并减少辐射热损，还能减弱薄壳窑拱和窑墙因热变化造成胀缩引起的破裂倾向。窑门设除渣孔，其上为投柴口。投柴口上面距炉栅 2.3 米处，用两个小型匣钵并列嵌砌于窑门上方，根据火焰颜色来观测窑前温度。窑底用紫石英砂或老土子铺。 $0.2\sim 0.3$ 米厚，用于装窑，并增加辐射热能，促进传热效率。窑项由前向后有通风孔、左看火孔、右看火孔及烟囱看火孔等，作通风或观测用。



(a) 《天工开物》所绘的蛋形窑



(b) 景德镇蛋形窑的后期模式

图 11-9 古代的景德镇窑

景德镇窑十分讲究装窑方法，因为不同的装窑方法可以改变全窑各部位的阻力状况，因而会有不同的温度。不同的坯件应放在其最适宜的窑位。在烧窑中，发火初期每次投柴后，投柴口暂不用柴堵封，这样可以增加空气流量，防止局部温度上升过快。两小时后，窑头已达 $500\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，再酌情用木柴封堵，控制空气过剩系数，提高燃烧温度。炉栅上柴堆呈半圆锥形，高度经常与投柴口相平。柴堆底部面积远较炉栅为大，使炉栅等于煤气炉中风帽（使柴堆构成一个不具外壳的煤气发生炉），既得到了还原气氛，又维持了气氛稳定。一般采用勤烧多加方法，最大的投柴量可达 1500 千克/小时。生成之可燃气体，汇合由投柴孔进入的冷空气，被逐渐加强的抽力形成的气流，在匣钵之间燃烧。当烟囱底部匣钵柱约有三分之一发红，火焰已越过体柱顶部，此时可考虑将炉栅空隙的夹砖去掉，使有效面积扩大，以增大通风量。临近烧成时，窑工多以窑内火焰一清如水、不见显著痕迹、窑后略现眩白色、不易辨出匣钵间隙、往窑后看火孔内吐痰在窑底立化白光散去等现象为参考，停火。窑内烧成温度均为 1300°C 左右，烧成时间共约 $18\sim 24$ 小时。全窑耗柴量共

约 20~30 吨。

景德镇窑是一种适于快速烧成、快速冷却的陶窑。从热工技术上来看，其窑头内的大炉膛兼作燃烧室。这燃烧室一是在窑内，二是空间大，既可以提高燃烧的热效率，又能使燃料充分燃烧，保证了较高的燃烧温度。另外，窑内是以接近半煤气体质的可燃气体，沿着 15~18 米的长度上，在匣钵坯件中分段递进依次烧成。气体燃烧是单相反应，瞬间即可完成，但是整个燃烧过程却取决于可燃气体与二次空气混合后的温度、方式与时间。气流的速度与烟囱的抽力相关，窑前部投柴孔的逐渐敞开也会影响气流的进速。只有保证一定的抽力即气压差，才能确保窑后部坯件的烧成。整个燃烧过程可以看成是氧化火焰—弱还原火焰—重还原火焰—生成可燃气体—可燃气体燃烧。

景德镇窑的前部可以看作是倒焰窑（圆窑）的窑室，后部可视为倒焰的烟道。由于实际上窑身很长而没有烟道，倒焰中那些剩余的可燃气体能集中在后部有足够时间燃烧，从而充分利用了热能，减少了热损。景德镇窑在气氛控制上，也比龙窑、阶级窑、馒头窑强。由于其结构和装窑、烧窑技术的独到，在烧到 800℃ 以后，不仅窑中能生成需要的 CO（CO 体积分数大于 6%），而且使游离的氧含量较低（O₂ 体积分数小于 1%），这样气氛的烧成就促使景德镇青白瓷产生白里泛青的传统风格。此外，烟囱底部又装置了生匣钵。这匣钵使烟囱的空隙可大可小，还造成不同的局部阻力和摩擦阻力。其好处甚多：一是充分利用了热能，特别是废热；二是稳定了烟囱底部温度，减少了抽力波动；三是匣钵可多可少，借以维持动压、控制流速和流量。

总之，景德镇窑在所有烧木柴的陶窑中具有最大的热利用率，由于它能快速烧成和快速冷却，又有较佳的烧成气氛控制，不仅能适合景德镇制瓷的资源环境和烧成独具特色的瓷器，还能烧成多品种瓷器，使景德镇成为古代的瓷都，奠定了技术的基础。景德镇蛋形窑的后期模式见图 11-9(b)。

第二节 冶金炼炉的发展

烧陶的高温技术，特别是陶窑的构筑把窑室与燃烧室分开，并设置了烟囱，获得了较高烧成温度（1000℃ 以上），还掌握了控制窑内气氛的经验。这一切都为后来的冶铜炼铁提供了技术上的借鉴。假若将孔雀石、蓝铜矿等矿石放在烧成温度已近 1000℃ 的陶窑中，就很可能得到海绵状铜。原始的炼铜可能与熔铜相近，将混有燃料的铜矿石放在类似坩埚的熔器中，再将其放置火上，外有加热，内在燃烧，将金属铜从矿石中熔融分离，倒入铸模中成型。这种方法操作起来较麻烦，而且效率很低，质量也成问题。在商代铸造遗址中，曾发现一种叫“大口尊”的熔铜炉。这种熔铜炉实际上是一口圆筒形的粗陶器，直径在 30 厘米以上，底部较小，内外

均涂有草拌泥，可能从上面鼓风。用这种“大口尊”炼铜是完全可以的。这种方法依然很原始，不能连续操作，生产效率较低。后来在生产实践中，逐渐改进了炉型，改进操作方法，终于创造出竖炉冶炼法。

1973年，考古学家在湖北黄石市大冶铜绿山发现规模宏伟的古代采矿与冶铜遗址。矿井的时代上限在商代晚期，一直延续到春秋战国和西汉。在铜绿山的东北坡上先后发现了10座春秋时代的炼铜炉。这些炼铜炉构筑方法相近，尺寸大小相同，炉型属于竖炉。全高大约1.2~1.5米，若复原后如图11-10所示。竖炉由炉基、炉腔（又叫炉缸）、炉身三部分组成。炉基在地面以下，是用黏土、石块，混合逐层夯筑而成；炉基下设防潮保温风沟。炉腔横截面呈圆形或椭圆形，直径约0.5米，有效容积约0.3米³。竖炉的不同部位分别用黏土、白瓷土、石英砂、火成岩屑、铁矿粉、木炭粉分层夯筑。炉身则是用混合型耐火材料分内、外壁夯筑，再加炉衬。炉的前壁下部设有排出铜液的“金门”，冶炼时将金门堵塞。其上则有排渣的孔洞。炉身的两侧各有一条略向下倾斜的通风沟，以向炉内鼓风。这种结构与原始炼炉比较，已有很大进步，表明当时建炼铜竖炉已积累了很多经验。由于冶炼温度较高，炉渣的流动性好，致使炉渣中的残铜量降到了1%以下。对铜绿山春秋早期矿冶遗址的发掘研究表明，当时的冶铜业已有一定规模和成套技术，鼓风竖炉炼铜业已成熟。这一先进的炼铜技术，是我国当时青铜冶铸业兴盛发达的基础。正是这种鼓风竖炉及其冶炼技术为随后的生铁冶铸术的发明提供了技术前提，在中国冶金史上具有重要的意义。

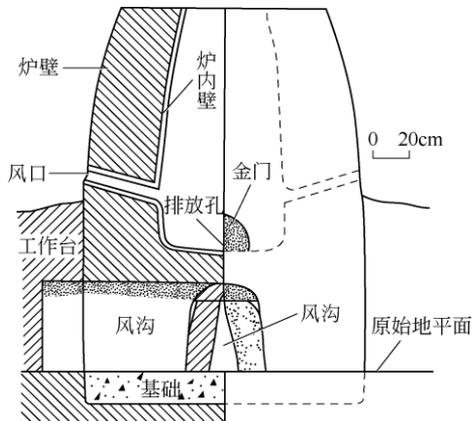


图 11-10 大冶铜绿山冶铜竖炉示意图

古代炼铁炉大致可分为三种类型：块炼炉、坩埚炉、竖炉。块炼炉炼铁是最原始的炼铁技术，遍及世界许多地方。它有的依山靠坡，有的就地为穴，结构简单，随建随拆，因此留下来的遗迹极少。这种方法通常是在地上挖一个坑，上面砌一个较矮炉墙的敞口炉，炉的高度大致与炉的直径相当。将碎矿石和木炭混装或分层装入炉中，点燃后用鼓风机通过风嘴将风直接鼓入，最高温度可达1150℃，这种炉没有出渣口，炉渣和熔铁向下流到底部成坨，坯铁在渣上，在冶炼结束后取出坯铁，清理炼炉。这种“碗式炉”是最原始的炉型，热效率极低，而且还原出来的是渣铁不分，呈团块状的坯铁，必须经过热煅加工后才成材。

坩埚炼铁就是上述采用“大口尊”的冶炼方法。它实际上是以熔铁为主，在煅造铁制农具、工具的铁匠作坊中常见。也可以说是中国传统的炼铁方法之一。

坩埚炼铁就是上述采用“大口尊”的冶炼方法。它实际上是以熔铁为主，在煅造铁制农具、工具的铁匠作坊中常见。也可以说是中国传统的炼铁方法之一。

由于生铁冶铸在中国冶金技术发展中逐渐成主流，因此鼓风竖炉炼铁在中国

由于生铁冶铸在中国冶金技术发展中逐渐成主流，因此鼓风竖炉炼铁在中国

是最常见的炼铁方法。中国的炼铁竖炉是从炼铜竖炉发展而来。早期的炼铁竖炉目前尚未发现，但从铜绿山春秋时期的鼓风炼铜竖炉和河南登封战国时期熔铁炉的结构形式及已出土不少公元前 5 世纪的生铁器物来看，可以判定春秋战国时期已使用半连续操作的鼓风竖炉冶炼出液态生铁了。考古工作者先后在河南鲁山望城岗、鹤壁鹿楼村、巩县铁生汤、汝州夏店、西平赵庄、桐柏张畈村、方城河村、郑州古荥和江苏徐州利国驿等处发现汉代炼铁竖炉共 30 座。它们可分为两类，一类截面为圆形，内径约 0.9~3.1 米；另一类截面为椭圆形，短轴 1.4~2.8 米，长轴 2~4.4 米。

河南西平县赵庄出土一座炼铁竖炉，是距今年代久远的（约为战国至汉代），而且炉体保存较好的遗址。其残存最高处为 2.1 米，炉缸椭圆形，内径为 0.65 米×1.05 米。炉壁厚约 37 厘米，内壁粘附着炉渣，用木炭作燃料，炉基用炭粉、粗砂和黏土混合夯筑成长方形，有炉腹角、鼓风口，在炉腹下可能有两个风口。此筒形高炉具有现代土高炉的雏形。在附近发现有炼渣堆积。在河南巩县铁生沟发现 8 座汉代圆形炼炉，保护最好的是编号为 T20 的炉，其炉缸表面已烧成青灰色玻璃状，残深 1.1 米，内径 2 米，残存炉壁厚 0.6 米，出铁槽向南，长 3.4 米，宽 0.9 米。

由于社会生产力发展的需求，在汉代，人们试图建筑大型的炼铁竖炉，但是受到鼓风能力的制约，人们只能将炉型由圆形改进为椭圆形。通过对比，可以看到椭圆形炉缸因为沿短轴方向，风口距离可以近些，风力易到达炉心，故椭圆形炉缸较圆形炉缸热效率要高些。因此椭圆形竖炉的出现是古代炼铁炉扩大炉容的尝试。

河南郑州古荥镇就有一处大面积的汉代冶铁遗址。这里不仅出土了两座炼铁竖炉的炉基和大量的炼渣，还出土了大量完整的陶范、铁器遗迹及许多相关的遗物。特别是从炉前坑中清理出 12 块巨大积铁块，展示了当时炼铁业的规模和技术水平。

古荥镇出土的两座并列的炼铁竖炉结构相同，都是椭圆形的炉缸，长轴约 4 米，短轴约 2.7 米，残存的炉缸面积实测约有 8.28 米²。一般高炉内铁矿石还原出金属铁并开始熔化的高度约占料柱全高的一半以上，因此可推测该炉子的有效高度可达 6 米。该炉身以下呈喇叭形（上大下小）。这在现代高炉上叫炉腹。古荥炉的炉腹角大致为 62°。炉身上部呈直筒。据此估算这座炉子的有效容积约 50 米³。这是目前为止发掘出的古代容积最大的炼铁炉。日产生铁估计约 1 吨。

从出土的积铁块来看，含碳高达 3.5% 以上，表明曾生产过大量液态生铁，其化学成分与一般出土的汉代生铁相近。由于生铁在炉内充分熔化，含硅量为 0.16%~0.28%。再从堆积的炉渣来分析，一种是颜色发黑，熔化不充分的渣，另一种是断口呈玻化状的渣。前者出自冶炼不正常，如操作不当造成炉冷，使渣铁流



动不畅，大量氧化铁未被还原而进入渣中，故呈黑色。后者显然是经过充分熔化，铁渣分离较好的结果。这种渣是碱度较低的酸性渣。可能在冶炼中加入了适量的石灰石作助熔剂。从古茱出土的大块积铁形状来看，可能竖炉的每侧有两个风口，全炉共有四个风口，这样才能保证炉缸内铁矿熔化还原反应得以均匀正常进行。从出土的大量铁矿石堆积来看，矿石大多经过加工，破碎成径长 5 厘米左右，最大的不超过 12 厘米。燃料则是采用质地坚硬的栎木炭，这种木炭可以在矿石还原熔化中，支撑料柱的重量，不会形成炉缸内的“积块”（堵塞），另一方面是使用木炭使熔化的生铁中含硫很低（相对燃煤而言）。

在河南鹤壁发现了 13 座椭圆竖炉，炉体宽 2.2~2.4 米、长 2.4~3 米；江苏徐州利国驿也发现了东汉时期的椭圆竖炉。东汉以后椭圆形竖炉没有继续发展，而是随着鼓风技术的改进，又被圆形竖炉所代替。东汉时的南阳太守杜诗制造了水排，用于冶铸，韩暨在魏国官营冶铁业中作了改进，推广了水排。水排作为自然动力的一种利用，不仅省去了人工，而且也强化了鼓风，这对于促进炉型的改进，生铁产量和质量的提高都是明显的。

考古发现唐宋时期的冶铁遗址较多。例如，在安徽繁昌县就发现了六处唐宋时期的冶铁遗址。其中保存较完整的竹园湾遗址，炉膛内尚存有未炼成的铁矿石、栗树柴炭、石灰石等。该炉缸为圆形，直径 1.15 米，残存炉身高 60 厘米，炉壁厚 36 厘米。炉壁用长方形灰砖砌成，内塘护 4 厘米厚的耐火泥。耐火泥中麝有大量粗砂粒。炉门宽约 60 厘米。炉底下层铺长方形灰砖，上层同样搪着上述的耐火泥，厚约 17 厘米。从炉内积存物分析，当时炼铁方法是：先将栗树柴铺在下层作燃料，再装入碎铁矿石和石灰石，然后点火冶炼。

河南地处中原，历史上一直是冶铁业较发达的地区。现通过对河南几处唐宋时期炼铁遗址的考察来看当时冶铁竖炉的状况。一是安阳县后堂坡冶铁遗址和铍炉村粉红江冶铁遗址。前者可能是汉至宋代的官营冶铁作坊。其炼炉已被严重破坏，所剩炉壁残块甚多。从残块来看，多呈夯层状，位于炉腔一面大多有程度不同的黑色熔融层，另一面则呈红色。炉腔外面则用小块砖砌筑。后者可能是从宋至元时期的冶铁作坊。其冶铁炉大多依断崖挖筑而成，炉口开在台地面上。1 号炉现存炉体高 4 米，炉径 4 米，炉腔呈圆井状，炉墙由河卵石筑就。3 号炉现存炉高 4 米，直径 2.4 米，炉墙大部分倒塌，局部残留有河卵石筑的直筒形炉墙。由于把炉口开在台地上面，矿石和燃料同时放在台地上，加工和装料较为方便，省去了提升装料的设备。出铁口、出渣口和鼓风设施放在台地下边，出渣、出铁及鼓风的操作也很方便。

二是林县（今林州市）正阳集东冶汉代冶铁遗址、铁炉沟冶铁遗址、申村冶铁遗址。据当地农民介绍，正阳集西北风霜沟一带，传说在宋代曾有 72 座炼铁炉，但经近代平整土地后，一座也看不到了。但是在路边和断崖上，仍看到到处都有炼

渣、炉壁残块、炉底残块、鼓风管残块，铁矿粉堆积 10 吨左右。河沟边有 1.5 米高的炼炉积铁块，直径 6 米左右。东冶应是一处规模较大，由冶炼到熔铸，从汉代到宋代的重要冶铁遗址。铁炉沟冶铁遗址，在南北半公里的小河两岸，残存着 9 座炼炉、三处炼渣堆积和一处矿石、煤炭堆积场。炼炉的炉膛内径 0.9~2.6 米，呈圆筒形，炉子靠近沟坡建造，利用山坡地形可使炉子坚固，同时在山坡上平台装料便于运送，下面平台鼓风、出铁、出渣，便于操作。利用含硅很高的河卵石建炉，不仅耐高温，同时就地取材十分经济。申村冶铁遗址至今仍保存有 21 个残炉址。它们是在挖矿粉过程中发现的。能看出，它们的结构有两种：一为河卵石筑构的冶铁炉；二为用弧形砖建造的熔铁炉。据推测这里也曾是官冶作坊。

此外，还发现有桐柏县冶铁遗址、鲁山县望城岗汉代冶铁遗址、南召县宋代冶铁遗址。其中南召县下村冶铁遗址保留下来的遗物较丰富。在 1.6 万平方米的遗址上，残存炼炉 7 座。保存最好的是 6 号炉，其残高 3.9 米，炉壁厚 0.8~1 米，内径 3.5 米，外径 6.1 米。炉壁均采用河卵石砌筑，石缝间填耐火泥，石壁外是一层 0.5 米厚的火烧土层。炉腔的上部筑成 $78^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 内倾炉身角，说明圆形炼炉内型结构有重大进步。这是因为高炉在冶炼中，炉内煤气上升，其温度随着上升而逐渐降低，煤气体积也收缩，从炉顶装入的炉料，在下降的过程中逐渐加热，炉身内倾结构恰好适应这种变化，从而改善恶劣煤气分布，节省大量能源。炉身的内倾还有利于煤气沿炉壁气流顺行。炉料在炼炉上部呈固体状态，而炉身内倾则大大减少炉料对炉壁的摩擦，延长炼炉的寿命。炉壁结构分两层，内层用河卵石砌筑，这种石砌高炉的结构，以前在国内尚不多见，而下村遗址的高炉炉缸部位，砌筑很细致，烧结后没有缝隙，致使铁水不会渗漏。相反的是炉体上部砌筑较粗糙，特别是在靠近黏土处的外壁，用形状不规则的岩石随便砌筑，表明工匠认识到，高炉上部在冶炼过程中的功用仅是装料，不易损坏，不必严格要求。通过对矿石和炼渣的分析，可知其采用的铁矿石属自熔性的，含硫、磷较低的优质矿，因为含钙较高，在冶炼中只需少量石灰石即可。遗址位于两河交汇处，推测其当时采用水力鼓风。

元明清时期，有关炼铁文献多起来了。不仅方志中的“食货”记述某些地方的冶铁产地和冶炼情况，而且还有一些记载生产技术的专著介绍了冶铁技术。例如《弘治徽州府志》和《嘉靖徽州府志》的“食货”中都援引宋末元初人胡升所记的元代初年婺源州的炼铁情况：“凡取矿，先认地脉，租赁他人之山，穿山入穴，深数丈，远或至一里。矿尽又穿他穴。凡入穴，必祷于神。或不幸而复压者有之。既得矿，必先烹炼，然后入炉。煽者、看者、上矿者、取钩沙者、炼生者，而各有其任。昼夜番换，约四五十人。若取矿之夫、造炭之夫，又不止是。故一炉之起，厥费亦重。或炉既起，而风路不通，不可熔冶；或风路虽通而熔冶不成，未免重造，其难如此，所得不足以偿所费也。”这里有一项技术改革，即自汉代起，入炉的矿石采用砸碎、筛分后再入炉，十分费力，此时改为入炉前先焙烧再破碎，应视为技

术进步。因为矿石经焙烧，促使酸铁分解，有利于冶炼进程。从冶铁中有煽者（鼓风工人）、看者（观察炉况）、上矿者（送矿料入炉）、炼生者（冶炼操作）等细致分工，昼夜轮班生产，可见冶铁技术已达相当水平。

元代陈椿在《熬波图》（见图 11-11）中对当时的冶铁竖炉作了如实的描绘：“熔铸拌（盘），各随所铸大小，用工铸造，以旧破铁锅镬铁为上。先筑炉，用瓶砂、白膳、炭屑、小麦穗和泥，实筑为炉。其铁拌，沉重难秤斤两，只以秤铁入炉为则，每铁一斤，用炭一斤，总计其数。鼓鞴煽熔成汁，候铁镕尽为度。用柳木棒钻炉脐为一小窍，炼熟泥为溜，放汁入拌模内，逐一块依所欲模样泻铸。如是汁止，用小麦穗和泥一块于木杖头上抹塞之即止。拌一面，亦用生铁一二万斤，合用铸冶工食（时）所费不多。”这里描绘的虽然是用化铁炉来铸造铁盘，实际上它与冶铁炉有许多相似之处。都能反映元代冶炼操作的技术水平。

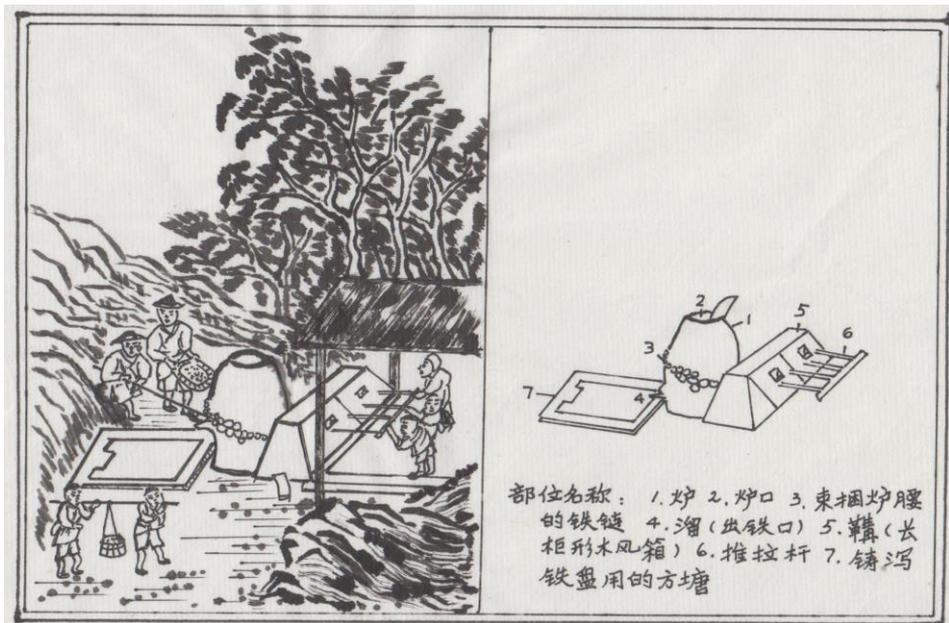


图 11-11 元代陈椿《熬波图》绘制的化铁炉（1330 年绘）

使生铁、熟铁串连起来连续生产是明代冶铁技术的一项重要成就。与此相适合的当然是冶铁竖炉的改进和完善。明人朱国桢在《涌幢小品》卷四“铁炉”对冶铁竖炉有具体的描述：“遵化铁厂深一丈二尺，广前二尺五寸，后二尺七寸，左右各一尺六寸，前辟数丈为出铁之所。俱石砌，以筒千石为门，牛头石为心。黑沙为本，石子为佐，时时旋下，用炭火，置二鞴扇之，得铁日可四次。妙在石子产于水门口，色间红白，略似桃花，大者如斛，小者如拳，捣而碎之，以投于火，则化而为水。石心若燥，沙不能下，以此救之，则其沙始销成铁。不然则心病而不销也，如人心

火大盛，用良剂救之，则脾胃和而饮食进，造化之妙如此。……生铁之炼，凡三时而成，……其炉由微而盛，由盛而衰，最多九十日则败矣。”

这段文字揭示了以下四点。

(1) 高炉的大小 深一丈二尺即高 3.804 米。广前二尺五寸即是指前面出铁口的内径 2 尺 5 寸。后二尺七寸是指后面出渣口的内径 2 尺 7 寸。左右各一尺六寸是指两侧进风口的内径各 1 尺 6 寸。

(2) 筑炉的材料 整个炉身全用石头砌成，以“牛头石”做成炉的内壁，用“筒千石”做成炉门，用二个风箱鼓风。

(3) 助熔剂 炼铁过程中，黑沙即是小块的黑色矿石，可能是磁铁矿。色间红白，略似桃花的石子应是一种淡红色的萤石（即氟石，氟化钙）。这种捣碎的萤石作熔剂，熔点较低，投入炉火中，顷刻化为水。萤石伴随着矿石就像药剂助脾胃一样，助熔效果极佳。

(4) 炼炉的产能和寿命 每三个时辰（6 小时）出铁 1 次，每天出铁 4 次，高炉连续使用最长达 90 天。

遵化铁厂是明代主要冶铁基地之一，政府制造军器所需之铁的一个主要来源。遵化铁厂在正德四年（1509 年）有高炉 10 座，共炼生铁 486000 斤，正德六年开高炉 5 座，产量同前。嘉靖八年（1529 年）以后，每年只开高炉 3 座，炼生板铁 180800 斤，生碎铁 64000 斤。从这里可知冶铁竖炉的生产率是在提高。遵化铁厂是每年十月开工，到次年四月放工，即只在农闲时节生产，只生产 6 个月，据此推算，一个冶铁炉在 6 个月中能炼出生铁 77200 斤，约 486 吨。

由于高炉的寿命最长达 90 天，再炼就要折旧建新，故高炉要完整保存下来实属不易。河北省武安县矿上村曾有一座明代冶铁竖炉遗迹，仅存半壁，残高 6 米，外形呈圆锥形，具有炉身角，实测炉直径 3 米，内径 2.4 米，估算炉容为 30 米³。冶金史家刘云彩依据照片，绘出了该竖炉的复原简式图（见图 11-12）。

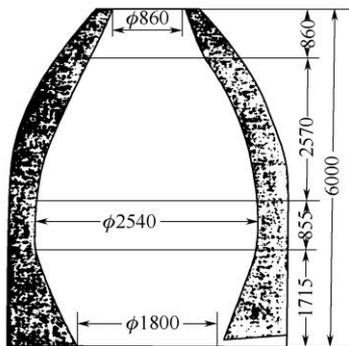


图 11-12 河北武安矿山村明代冶铁竖炉遗迹及其复原简式图（尺寸单位：毫米）

矿山村明代冶铁竖炉和遵化铁厂的明代冶铁炉一样，都属于当时一种较大的高炉。宋应星《天工开物》“五金”和方以智《物理小识》“金石类”也都对当时的冶铁竖炉作过介绍。明代一般的高炉都用盐和泥砌成，泥要经过长时间的锤炼，有的炉靠山穴筑成，有的炉用大木柱框围起来。一般的冶铁炉，仅大风箱就用四人或六人才能鼓动，每炉可以装入矿砂 2000 斤，每个时辰（即 2 小时）可以炼出一炉铁，出铁 600 斤。

清代冶铁炉的规模大体上同明代。明末清初屈大均《广东新语》卷十五“货语”的“铁”条中，记述了广东冶铁炉的情况：“炉之状如瓶，其口上出，口广丈许，底厚三丈五尺，崇半之。身厚二尺有奇。以灰沙盐醋筑之，巨籐束之，铁力、紫荆木支之，又凭山崖以为固。炉后有口，口外为一土墙，墙有门二扇，高五六尺，广四尺，以四人持门，一阖一开，以作风势。其二口皆镶水石，水石产东婆大峰山，其质不坚，不坚故不受火，不受火则能久而不化，故名水石。”“凡开炉，始于秋，终于春……下铁廿（矿）时，与坚炭相杂，率以机车从山上飞掷以入炉，其焰烛天，黑烛之气数十里不散。铁廿既溶，液流至于方池，凝铁一版取之，以大木杠搅炉，铁水注倾，复成一版，凡十二时，一时须出一版，重可十钧。一时而出二版，是日双钩，则炉太旺，炉将伤，须以白犬血灌炉，乃得无事……”“凡一炉场，环而居者三百家，司炉者二百余人，掘铁廿者三百余，汲者、烧炭者二百有余，驮者牛二百头，载者舟五十艘，计一铁场之费，不止万金，日得铁二十余版则利赢，八九版则缩，是有命焉。”

由这一记述可见清初广东冶铁竖炉的状况，炉内部好似瓶状，上口口径约有 1 丈，底部直径 3 丈 5 尺，炉高 1 丈 7~8 尺，整个炉身厚约 2 尺多，用灰沙、盐醋调和后筑成，筑成后再用巨藤捆束，并用铁力紫荆木加以支撑，使之牢固。炉口和通风口都镶有耐火的“水石”。通风口在炉后面，口外有土墙，墙上装有两扇高 5~6 尺、阔 4 尺的门，作为鼓风设备。这种运用门扇的鼓风设备，应是宋、元时期“木扇”的发展。炉靠山崖建筑，崖上装有“机车”，铁矿石用机车从山上抛掷到炉中，表明当时已有上料的机械设备。一个时辰每炉炼出生铁 1 版，重达 300 斤。一个炉每天得铁 10 多版，日产量应在 3600 斤，约 1.8 吨。炉场每年生产“始于秋，终于春”，约 6 个月，每炉的年产量可达 324 吨。

根据《广东新语》对佛山冶铁竖炉的描述，刘云彩绘成了该炉复原示意图（见图 11-13）。

冶金的冶炼炉实际上就是一个实施化学反应

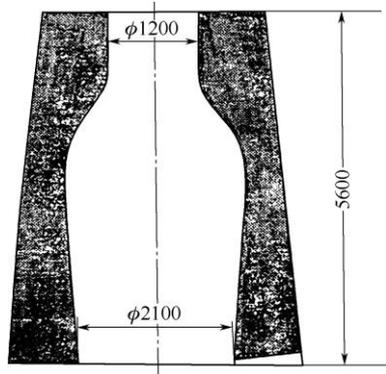


图 11-13 佛山清代冶铁炉复原示意图（图中尺寸单位为毫米）

的容器，在外界条件的维护下，其中进行了复杂的热、质和流动的传递，最终人们获得预期的金属产品。不同的金属有不同的物理化学性质，因而冶炼的条件（温度、气氛等）和设备的构造都会各有特点。上述炼铜和炼铁的竖炉是常见的一类，而炼铅，因为熔点低，用敞炉即可。又如炼锌，因氧化锌还原温度接近金属锌的沸点，故其冶炼的设备构造就有特殊之处。总之，金属冶炼的经验和知识（包括炼炉的构筑）都为后来化学工程理论体系的建立提供了铺垫。

第三节 古代的鼓风技术

烧陶瓷的窑，除了原始的泥质薄壳窑可能使用过吹管鼓气外，较少使用鼓风技术。一是陶窑火膛中的燃烧主要依靠窑炉构筑所形成的抽力来推进；二是陶瓷器烧成讲究窑室气氛的控制，不便使用鼓风技术。冶铜、冶铁的竖炉以及化铜化铁的熔炉情况就不一样，它们大多离不开鼓风技术。特别是当炼炉构筑、炉料齐备、熔炼工艺等条件均已具备，鼓风装置的变革便成为推动冶铁生产进一步发展的关键因素。古代冶金技术的发展与鼓风器械的使用和改进密切相关。在现代的化学工程中，化学反应常在液体或气体状态下进行，液体和气体统称为流体。流体的输送过程往往需要借助于各种往复泵和送风机、鼓风机、压缩机等机械设备。古代的鼓风器械就是这些机械设备的前身。

在冶金中，采用的鼓风器械有多种，世界不同地区的鼓风技术各有特点。设备虽不同，原理却差不多。鼓风器从最原始的扇子、吹管发展到利用皮囊，再由利用自然力的水排和人力的多种木扇、风箱，发展到活塞式的木风箱。鼓风技术的进步充分展示了人类的才智。在早期的炼铜、冶铁中曾采用自然通风，为利用上升气流，像早期的陶窑一样将炼炉建在坡地或岗顶，有的还在炉下部开挖风道，以加强风流。这种自然通风的风力不大，加旺火力靠它显然是不够的。人工鼓风也是借鉴于陶窑烧陶的技术。例如，泥质薄壳窑烧陶，除了在泥皮下方开设风口外，有时为了烧得更旺，就借助泥皮扇动来鼓风。最早、最简单的鼓风器应是扇子和吹管。扇子是用人力摇晃扇子而制造风流。吹管则是通过管子，用口将气吹出。在日常的炊事中，可以常见到扇子和“吹火筒”的使用。在埃及古墓的壁画上（约公元前2400年），就有描绘埃及工匠用陶嘴吹管鼓风吹火熔化金属的场景（见图11-14）。在早期的冶铸金属的遗址中就偶尔发现这种吹管。例如，在辽宁凌源牛河梁转山土带孔的冶铜炉壁残块中就发现过吹管遗物。

扇子和吹管鼓风都是风力有限，而且人体也难久持。真正对早期冶金生产起了重大作用的鼓风器具，是用兽皮制成的风囊。战国时称其为橐，鼓风管称为龠。由于人们已认识鼓风的重要性，并把它看作冶金的必备装置。古籍对此有许多论述。《管子》：“吾非挺埴，摇炉橐而立黄金也。”《论衡·虚知篇》：“工



师凿掘，炉橐铸炼乃成器。”可见当时在人们心目中的冶金技术都是炉、橐并称。关于皮囊的作用，《老子·道德经》曰：“天地之间犹橐龠乎，虚而不屈，动而愈出。”意思是皮制的皮囊因其里面充满空气而不塌缩，拉动它又能将里面的空气压出。《墨子·备穴》曰“具炉橐，橐以牛皮，炉有两甗，以桥鼓之百十。”桥即桔槔，用拉杆推动，上下运动拉压皮囊，使两具皮囊一开一合，从而得到较为持续的风流。



图 11-14 埃及工匠用吹管吹火助熔

为了强化鼓风，在冶炼中，往往使用多橐鼓风。由单橐鼓风发展为多橐，甚至于排橐，要求有更巧妙的设计，是一种技术上的进步。晋代王弼在注释《道德经》时就说：“橐，排橐也。”高诱在注释《淮南子》中又说：橐是“冶炉排橐”。“排”字的象形就像用手推动多具皮囊。多橐鼓风可能在春秋时期已被开始使用，《吴越春秋·阖闾内传》中说：“童男童女三百人鼓橐装炭，金铁刀濡，遂以成剑。”表明多橐鼓风需要多人轮番操作。在汉代的冶金中使用多橐鼓风已很普遍。《淮南子·本经训》中曰：“鼓橐吹埵，以销铜铁，”《淮南子·齐俗训》中说：“炉橐埵坊设，非巧冶，不能以冶金。”

皮囊鼓风在汉代的又一发展，可以从出土于山东滕县宏道院的一块东汉画像石（见图 11-15）得以展示。中国历史博物馆（现国家博物馆）王振铎对该画像石的研究，确认这种皮囊是悬挂于梁上的杆系来带动的，并由定位构架限制其运动方向，橐端有柄和进风活门，另一端设出风口和风管。据此作了设计复原，如图 11-16 所示。



图 11-15 山东滕县宏道院出土冶铁画像石

从画像来看，这种鼓风皮囊是用水力推动的，而且还要有人躺在皮囊底下操作，把皮囊推回原位。在高温的炉旁这样操作，可以想象劳动是很艰辛的。还必须指出，这只是在锻铁炉上使用的鼓风设备，应是比较小的，而在炼铁高炉上使用的鼓风设备，肯定要大得多，而且有更多的自然力的介入。

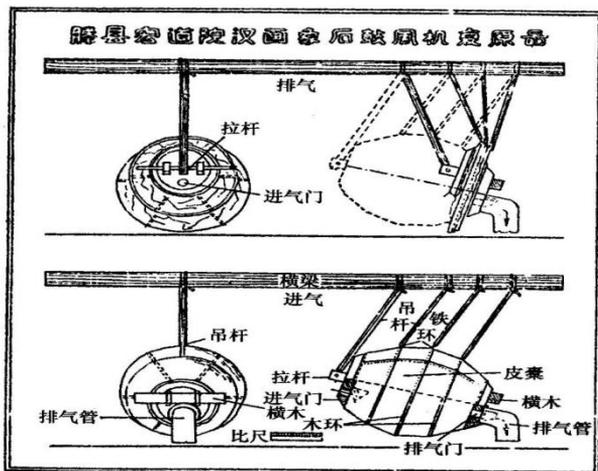


图 11-16 滕县宏道院汉代画像石鼓风机复原图

(采自《文物》1959年第5期王振铎《汉代冶铁鼓风机的复原》)

鼓风装置由人力驱动（人排，或称步冶）发展到使用畜力和水力驱动（马排、牛排、水排，或称水冶），是汉代冶铁技术的重大创新。《后汉书·杜诗传》记载：“善于经略，省爱民役，造作水排，铸为农器，用力少，见功多，百姓便之，又修治陂地，广拓土田，郡内比室殷足。”杜诗于建武七年（公元31年）调任南阳太守，他倡导建造水排用于鼓风铸造铁制农具，用力少，效益显著，加上修治坡地，开荒种田，使当地经济更加殷实富裕。这段史料应是使用水排鼓风冶铁的最早文献。

从东汉到南北朝，水排继续得到推广使用。《三国志·魏书》中记述了南阳郡堵阳人韩暨任监冶谒者，即主管魏国金属冶炼的官员，在更大范围内用水排来代替马排和人排：“旧时冶作马排，每一熟石用马百匹，更作人排，又费功力。暨乃因长流为水排，计其利益，三倍于前，在职七年，器用充实，制书褒叹，就加司金都尉，班五九卿。”韩暨推广的水排设在阙门（今河南新安县），河南安阳市下有个水冶县，相传即是古代引水鼓铸之处而得名。北魏酈道元《水经注·谷水》曰：“魏晋之日，引谷水为水冶，以经国内，遗迹尚存。”宋代李昉等编的《太平御览》武昌记也有元嘉初年（公元424年）在武昌建造冶塘湖，利用水排冶铸的记载。宋代苏轼在《东坡志林》卷四中也记载了四川冶炼用水排鼓风。由此可见，水排由东汉至北宋，一直得到广泛应用。

水排的结构图直到元代才见于文献。元代王桢《农书》不仅记述了立轮式和卧轮式两种水排，还绘出了卧轮式水排的示意图（见图 11-17）。

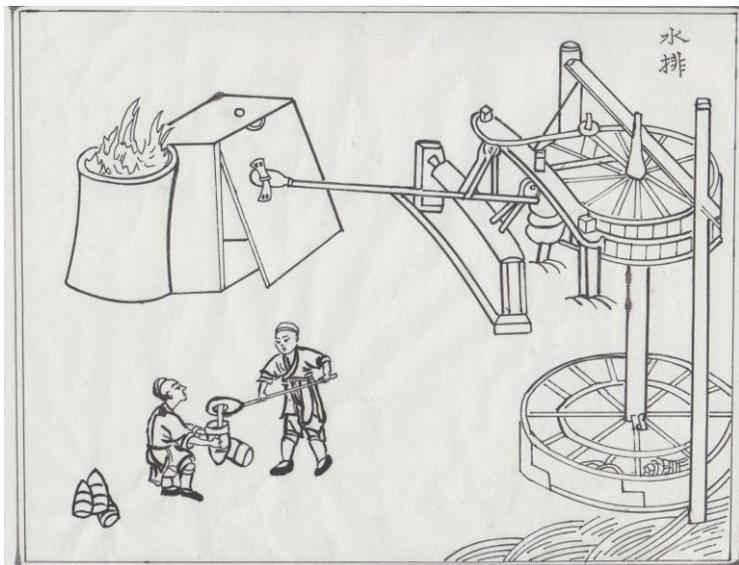


图 11-17 王祯《农书》绘制的卧式水排

关于卧式水排，王祯写道：“其制当选湍流之侧，架木立轴，作二卧轮。用水激转下轮，则上轮所周弦索，通激轮前旋鼓，掉枝一例随转。其掉枝所贯行枕，因而推挽卧轴左右攀耳以及排前直木，则排随来去，掬治甚速，过于人力。”可见当时的水排已是结构复杂的机械装置。

水排是鼓风技术的重大创造，对中国古代和欧洲中世纪冶铁业发展起了重要作用。英国科技史家李约瑟（J. Needham, 1900—1995 年）指出，水排又是机械学的重大创造，通过曲柄、连杆机件将旋转运动变为往复运动以水排为最早。欧洲到十三四世纪才开始将水力用于鼓风，到 15 世纪水力鼓风技术才得到推广普及。这一技术促进了欧洲冶铁技术的提高，才使他们首次炼出了液态生铁。欧洲最早的抽水机所使用的曲柄连杆结构在 1440 年被创制，很可能就是接受了中国水排的影响。矿用抽水机的发展改进，是蒸汽机发明的前奏，由此可见，水排的创造在世界科技史上的地位和意义。

唐宋时期鼓风设备的一项重要发展是出现了木扇。这木扇已不是人们在灶前或炎热时用的扇子，而是比皮囊鼓风器坚实耐用的一种鼓风器械。据北宋曾公亮等编写的《武经总要·前集》卷十二介绍了一种用于军事的行炉。行炉实为化铁炉，以移动方便而得名。炉子外形呈方形，与炉子相连是一梯形木风箱，它们一起安装在木架上，木扇利用木箱盖板的开闭来鼓风。如图 11-18 所示。在扇板上装有两根拉杆，并开有两个小方孔，拉杆用于启闭扇板，两小方孔为进气活门，仅向内开，当盖板扇动时，这两个活门交替开闭。当时，行炉在军事上，主要用作“熔铁汁，异行于城上，以泼敌人。”在敦煌榆林窟，西夏（1032—1226 年）壁画的锻铁图中，

也绘有木扇，如图 11-19 所示。该木扇有两扇门，由一人操作，两门一前一后相继鼓风，形成连续风流。元代陈椿《熬波图》中，其铸造铁盘中所用的化铁炉也用了木扇鼓风。如图 11-11 所示。

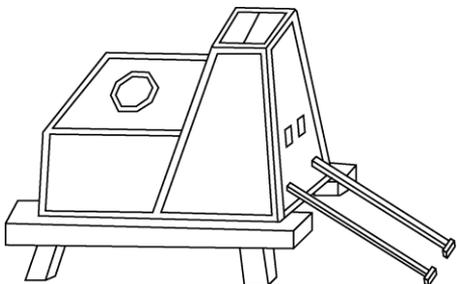


图 11-18 宋代《武经总要》中的行炉



图 11-19 敦煌榆林窟西复壁画绘制的木扇图

与中国的木扇相似的日本“蹈鞴”，是一种脚踏式的鼓风机，最早见于日本 15 世纪的文献中。类似的欧洲皮木结构的手风琴式风箱在意大利冶金家毕林古乔 (V. Biringuccio, 1480—1539 年) 在其著写的《炉火术》(Dela. Pirotechnia, 又译为《论烟火制造技术》) 中有详细的介绍，该书还描述了其他一些人力和水力驱动风箱的器械。德国冶金家乔治·鲍尔 (G. Bauer, 1494—1555 年，拉丁文名叫阿格里柯拉) 在其名著《金属学》中也记载了手风琴式风箱的制作方法 (见图 11-20)。约在 1640 年，来到中国的德国传教士汤若望等人曾将该书译成中文，呈送朝廷，译本



图 11-20 欧洲手风琴式风箱

名《坤輿格致》，可惜的是时逢明王朝覆灭前夕，社会动乱，官方无心付诸出版，译稿下落不明。这种手风琴式风箱直到蒸气活塞式鼓风机问世才被取代。

在水排和木扇等鼓风设备的原理引导下，又借鉴于利用拉杆活塞的军火器——猛火油柜的设计技巧，在宋代，人们发明了活塞式风箱。这种风箱利用活塞推动和空气压力自动开闭活门，产生比较连续的压缩空气，从而提高了风压和风量，强化了冶炼。它构造巧妙，鼓风效率高，制作可大可小，使用起来十分方便，因此很快得到推广。在明代宋应星《天工开物》的有关冶铸技术的插图中，几乎每张插图都有这种风箱的展示，说明它在当时已被普及了。

关于这种风箱的制作和使用，清代徐珂《清稗类钞》中有详细的描述：“风箱以木为之，中设鞞鞞，箱旁附一空柜，前后各有孔与箱通，孔设活门，仅能向一面开放，使空气由箱入柜。柜旁有风口，籍以喷出空气。同时，抽鞞鞞之柄使前进，则鞞鞞后之空气稀薄，箱外空气自箱后之活门入箱。鞞鞞前之空气由箱入柜，自风口出，再推鞞鞞之柄使后退，则空气自箱后之活门入箱，鞞鞞后之空气自风口出。于是箱中空气喷出不绝，遂能使炉火盛燃。”见图 11-21 所示。清代吴其濬《滇南矿厂图略》中也剖示说：“风箱，大木而空其中，形圆，口径一尺三四五寸，长丈二三尺，每箱每班用三人。设无整木，亦可以板箍用，然风力究迫。亦有小者，一人可扯。”在日本有一种名为“箱吹子”的鼓风机，1574 年出版的《铸货图录》（佐野英山著）描绘了用它加热铸铁币的情况。1879 年编成的《日本矿山篇》绘出了“箱吹子”的结构，人们才发现其结构与中国的活塞式风箱完全一样。据此日本学者叶贺七三男认为：这种鼓风机是中国木匠于 15 世纪传到日本的。

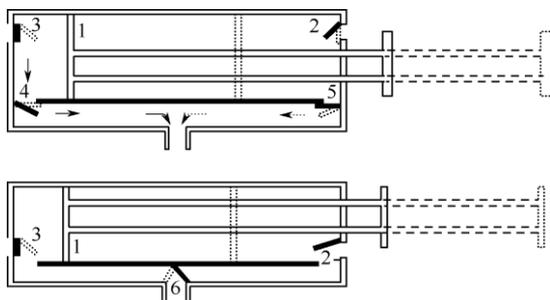


图 11-21 长方形活塞式木风箱结构图

1—鞞及其拉手；2~6—活门

（选自：北京钢铁学院冶金史编写组，中国冶金简史，1978 年）

第四节 从炊蒸到蒸馏、升华的技术发展

蒸发是传热的一种形式，而蒸馏则不仅能传热，在许多化工生产中，它还有传

质和促进化学反应在气态中完成的功能。升华与蒸馏又不同，它是让物质气化后而传输出去。蒸馏、升华作为化工生产的重要单元操作在整个化工技术发展中都是受到特别关注的。

陶器的发明和发展，促使炊煮食物成为食物加工的主要方法，特别是对于加工液态食品或将食物加工成流质，原先的烧烤技术难以胜任。在实践中，人们又发明了一种新的陶制器具——甑。甑的形状像一个敞口的陶罐，底部有许多小孔，将其放置在有水的鬲或釜上。一旦加热鬲或釜，其产生的水蒸气通过小孔便可蒸熟甑中食物。因此，陶甑就是后世蒸笼的先驱。它最早出现在仰韶文化时期。到了龙山文化，由于陶器可以随意赋形，人们又发展出一称作“甗”的陶制炊具。它是一种有箆的炊具，分两层，上层相当于甑，可以蒸食，下层如鬲，可以煮食，一器可两用。所以它实际上是甑和鬲或釜的套合（见图 11-22）。由于用青铜铸造有较大难度，故青铜制的甗出现较晚。在殷墟妇好墓中出土了一具用青铜铸造的分体甗，可分可合，轻巧灵活。后来又发现了三联甗，能同时蒸熟三甑食物，与此相同的方法，竹编的蒸笼的使用也被推广。表明先秦时期炊饮中的蒸法已很普遍。



(a) 大汶口陶甑

(b) 商代晚期青铜甗

图 11-22 最早的炊蒸器——甑

在世界各地、各民族中，煮食法可能是发明陶器后最普遍的一种烹饪方法，而在东亚和东南亚，可能由于很早就以稻、粟等谷物为主食，加工方法中较早发展起蒸法。馒头、包子的出现和推广就是一个例子。像烙饼一类烤制食品在中国古代的面食中虽然也是常见方式，但不是唯一方式。而在西方民族中，烤制面食几乎是唯一方式，这就是他们吃面包，我们吃馒头的习惯来由。馒头的出现及酵面的产生与酿酒有关。最早的面团发酵技术就是酒酵发面法。这种炊法，据考证大约出现在 2 世纪前后。蒸食法的发展为蒸馏技术的出现准备了技术前提。

秦汉之际，炼丹术（又名金丹术）在中国兴起，方士们借鉴于生产、生活中的

实用技术，改头换面地将它们变成炼丹的技法和设备。煮食和蒸食的许多器具摇身一变成了炼制神丹的装置。蒸和馏的技术随之升格为“抽”和“飞”的技巧。可能由于炼丹家所用的药品主要为汞、硫、铅等少数几种固态物质，让它们在陶罐或金属制的器具中，与其他物质混在一起，通过“煅”、“炙”、“熔”等手段实现物质的转化，以期得到梦寐以求的，使人长生不老的神丹仙药。在这个炼制过程中，大多也使用过蒸馏、升华等技术，但是因为陶瓷或金属都是不具备有玻璃器具那样的透明性，所以是看不到发生在容器里的化学反应，而只能等待最后的结果。在这种实验环境下的操作，收获和发现受到很大的局限。虽然他们采用蒸馏技术，严格来说是升华技术，从硫化汞中提取到汞，但是他们让许多有意义的物质随着水蒸气或变成气态飞逸了。

有人曾认为，收藏在上海博物馆的那具青铜蒸馏器（见图 11-23）是用来生产蒸馏酒的。经认真研究，这推测是经不起推敲的。这具青铜蒸馏器基本形式与汉代的釜甑相似，但有一些特殊部件，其形制和功用值得讨论。

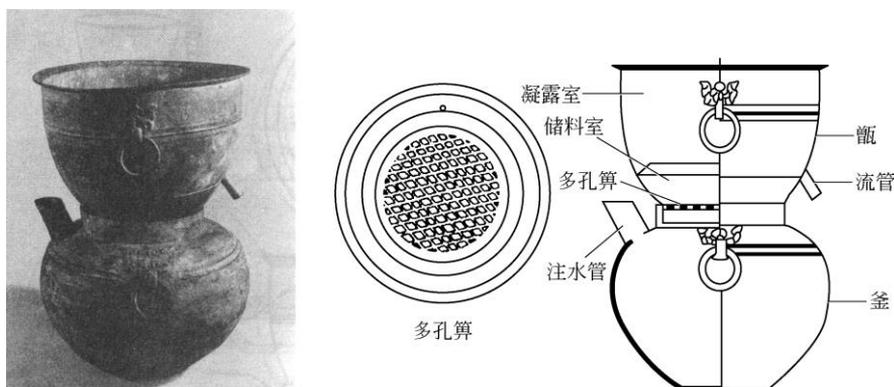


图 11-23 上海博物馆所藏青铜铸造蒸馏器及其示意图

实测数据如下：通高 53.9 厘米，甑体高 30.6 厘米，口外径 30.55 厘米，口内径 28 厘米，甑下部储料室上缘宽 2.7~2.9 厘米，口径 22.2 厘米，储料室底径 17.7 厘米，甑底高 2.7 厘米，储料室容积约 1900 毫升，储料室上缘至甑上口为凝露室，容积约 7500 毫升，蒸馏液流管长 4.4 厘米，径 1.6 厘米，釜体高 26 厘米，颈高 2.9 厘米，内口径 17.4 厘米，腹外径 31.6 厘米，底外径 12.8 厘米，注水管长 6.9 厘米，注水管下端至底部容积约 10500 毫升。

上海博物馆原馆长马承源曾对此蒸馏器做过实验研究，发现这器具要真正能起蒸馏作用，必须有盖。在配制一个能密合于甑口的金属圆顶盖后，接着用酒醅作蒸馏酒试验。虽然也能顺利蒸馏出含有一定浓度乙醇的酒，但是其数量是很少的。因此它应是加工药物之类的蒸馏器。笔者认为：这蒸馏器的釜可以不断往里加水，因而可以长时间加热煮沸制造水蒸气，在没有盖或密封的盖顶的情况下，长时间蒸制那

些难溶的药物。应是加工药物的蒸馏器。这具蒸馏器的留传，表明汉代能设计并制造某些有特殊功用的蒸馏器，炼丹制药中的蒸馏技术已有一定水平。

在唐宋时期的本草和制药的文献中，常见“九蒸九曝”或“百蒸百曝”等制药方法。这里的“蒸”实际上是指用热气或水蒸气来加热软化药物或萃取药物中某种组分。可能蒸馏技术在装置上较前是复杂了，但是方法技巧上还是差不多。这种判断可以从古代炼丹书中所描绘的所谓“蒸馏器”得到印证。例如，宋代吴俟在《丹房须知》中所描绘的飞汞炉，如图 9-18 所示。它虽然有冷凝装置和导气管，可以完成某些物质的蒸馏，但是从示意图上来看，它主要用于蒸馏水银，实质上是干馏器，还不是后来生产蒸馏酒的蒸馏器。唯独当时花露水的制取最接近真正的蒸馏技术。据唐代冯贽的《云仙杂记》卷六对蔷薇露的描述和宋代王钦若《册府元龟》（外臣部·朝贡五），宋代赵汝适《诸蕃志》及北宋蔡绛《铁围山丛谈》等有关蔷薇水的介绍，一说这些蔷薇水是从西域大食等国进献的，二说这些蔷薇水是用白金为甑，采蔷薇花，蒸气成水，则屡采屡蒸，积而为香，此所以不败。由此可见，唐代时花露水主要从国外传入。到了宋代，在传入的同时，人们可以依照已知的制法，在国内自行生产花露水了。宋代张世南在《游宦纪闻》卷八中就说花露水“以甑釜蒸煮之”。它是直接以水蒸气蒸馏花头，以制花露水，免去了先前以水浸泡花头的工序。明初问世的《墨娥小录》卷十二具体、翔实地介绍了运用蒸馏技术制取花露水的方法。总之，从蔷薇水的传入、认识和自行制造，反映了人们对蒸馏技术的认识和掌握。可以说，至迟在南宋，少数人，主要是制药的炼丹家已积累了关于蒸馏技术的丰富经验，从而为蒸馏酒生产技术在元代的引进、推广创造了条件。

1975 年在河北青龙县西山嘴村金代遗址中出土了一具青铜蒸馏器。该蒸馏器及其结构图和蒸汽流程剖面图如图 11-24 所示。蒸馏器由上下两个分体叠合组成。其各部分的尺寸如附表所列。根据其构造，可以推测其使用时的操作方法可能有两种：①无算直接蒸煮，即将蒸料和水直接放入蒸锅内，然后加热蒸锅，产生蒸汽上升到顶部后被冷凝为液，顺着输出管流出而被收集；②加算蒸烘，先在蒸锅内加入一定量的水，然后在相当于甑高三分之的位置上，加置一个可通气的算，再把蒸料放在算上，套合上冷却器即可加热蒸锅，同样方法收集蒸馏液。从该蒸馏器壁上遗留下的使用痕迹来看，甑锅内壁明显地分成三层，从锅底到高出 6 厘米的下部呈灰黑色；其上 10 厘米高的中间部呈浅灰色；最上部表面附着有一层薄薄的青铜锈。据此可推测上述两种方法都使用过。

考古工作者曾用该装置以加算方式进行蒸酒试验，结果出酒顺利，蒸馏速度也快，约 45 分钟便完成一次蒸酒过程。虽然酒度不高，出酒量可达 1 斤。证明该装置是一件实用有效的小型蒸馏器。正因为是小型，用它于蒸馏酒的生产并不合算；若将其放大制作又有相当难度，故此，这件蒸馏器当时可能主要用于生产

花露水之类香精。也有可能用作某些药料的特殊加工。从这种小型蒸馏器的设计表明，金代在蒸馏技术的掌控上已积累了丰富的经验。从而在元代成吉思汗及其子民的西征中，能很快借鉴阿刺吉酒的生产技术在广阔的中国领域上推广发展起蒸馏酒的产业。

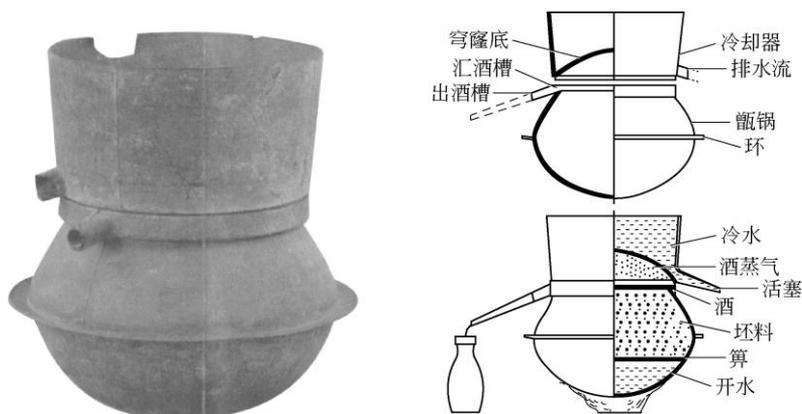


图 11-24 河北青龙县出土金代蒸馏器及其剖面图

到了明代，蒸馏酒的生产得到较大发展，蒸酒的设备和技朧也趋于完善。当时的蒸酒器主要有两种形式：一为锅式，二为壶式。它们主要区别在于冷凝部分结构不同。图 11-25 是锅式蒸馏器示意图。它属于顶上水冷式，蒸馏器主要由天锅、地锅及甑桶组成。天锅内装冷却水，可更换；地锅下釜装水，用于加热制备水蒸气；甑桶内装酒醅。烧沸后，水蒸气通过地锅上的算加热熏蒸甑桶中的固态酒醅，将酒醅中的酒精蒸发成气态上升，到顶部被天锅球形底所冷却，凝成液体沿锅形底向中央汇集，再由一漏斗形的导管引出，从而收集于容器中。这种锅式蒸馏器在中国西南地区较盛行，与泰国、菲律宾、印度尼西亚传统的生产蒸馏酒装置较接近。另一种是壶式蒸馏器，如图 11-26 所示。它也属于顶上水冷式，冷凝器底部呈拱形，拱形周围有一凹槽，冷凝下来的酒液汇集于槽，再导引到锅外容器。壶式蒸馏器在中国北方地区使用较多。日本的兰引蒸馏器与此相近，可能是从中国传去的。

生产蒸馏酒是应用蒸馏技术的一项最熟悉的实例。蒸馏的方法很多，主要有简单蒸馏、精馏、恒沸蒸馏、萃取蒸馏、蒸气蒸馏、真空蒸馏、分子蒸馏等。只是在近代科学发展后，通过细致的实验研究，人们不仅认识到蒸馏是利用液体中各组分挥发性的不同而分离液体混合物的一种方法，并建立起系统的有关蒸馏的理论，还逐步把现实生活、生产中的蒸馏现象加以归纳整理，细划了各种蒸馏技术，从严格的科学定义上认知各种蒸馏现象和蒸馏技术。其实蒸馏技术在生活中最广泛的应用是炊蒸食品。除此之外，蒸馏技术还被化学、石油、食品、冶金等许多生产领域所

使用。

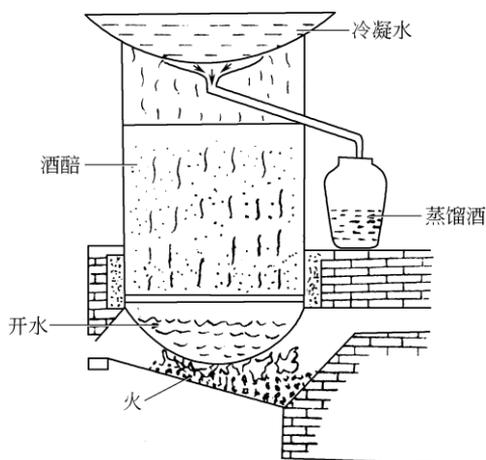


图 11-25 锅式蒸馏器

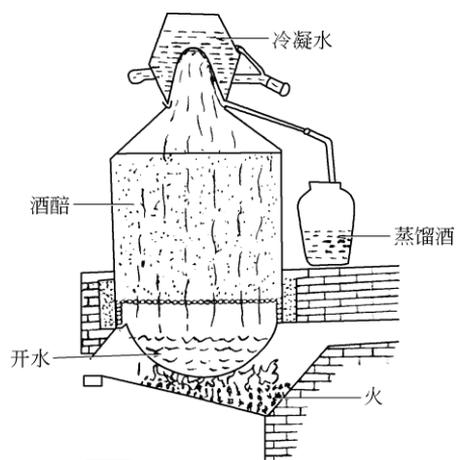


图 11-26 壶式蒸馏器

第五节 炼丹术中的化工单元操作

炼丹术是在中国古代独立发展，并流行了千余年的一种方术。它的目的是试图以自然界一些矿物（也曾使用过某些植物）为原料，通过人工方法（主要是化学加工）制造出某种性质神异的药剂。当人服了这种神丹仙药后，就能长生不死，甚至可羽化成仙。人有长生的奢望是可以理解的，但是怎样满足和达到这一欲望却不是那么简单。古代的一些从事炼丹的方士在“假求外物以自坚固”的神丹观的诱惑下，在他们创立的有关物质变化的阴阳五行的指导下，从事了长期的炼丹活动。他们的活动，现代人觉得十分幼稚，但是不能不承认这是一种有勇气的科学追求。这种活动在中国古代发生过，在世界上其他几个文明古国，如希腊、印度、阿拉伯以及中世纪的欧洲各国，也都先后出现过。尽管各国的炼丹术的内容、侧重点不大相同，但是各国出现这一活动都不是偶然现象，而是社会发展的进程中必然会经历的一个文化阶段，是人类社会迈向文明的重要内容。

炼丹术的内容大致可分为炼丹制药和炼制金银两部分。按中国早期炼丹家的信念，神丹一旦炼成，服后既可长生，又可点化汞、铜、铅等金属为黄金、白银；而人工以药剂点化成的金银，又可作为长生药，他们是把炼丹和炼金密切联系在一起。在西方的古代炼金术，炼制的目的更侧重于炼制金银，期望找到一种能变贱金属（例如，铜、铁等）为贵金属（金、银等）的药剂（又称哲人石）。目标不完全相同。

尽管活动的侧重点不一致，无论是炼丹还是炼金，其主要方法都是采用化学的手段，促成某些物质的质变。在这种活动的长期实践之中，从事炼丹的方士们进行

了许多化学试验。他们借鉴于生产、生活中通用的设备和技术，设计和制造出很多原始的化学实验仪器，例如，某些专用的炉、鼎、蒸馏器、研磨器、坩埚及构造奇异的瓶瓶罐罐等。他们在试验活动中，采用了熔融、熔解、蒸馏、升华、置换、分解、结晶等操作方法，观察到并且发现了许多化学变化。尽管他们的活动被浓厚的神秘色彩所笼罩，活动的内容有许多错误的、消极的东西，但是在客观上，它确实开阔了人类的视野，不仅人工制造出一些自然界不存在的化合物，提取和精制了很多化学试剂，炼出了一些黄色和白色的合金，并且合炼出一些解决疑难病症的丹药，造福于人类。尤其是中国炼丹家在炼丹试验中，发明了原始黑火药。黑火药的发展和应用，极大地推动了人类社会文明的进步。中国古代的炼丹术和西方的炼金术一样，都是以化学试验为其表现的主要形式。可以说它就是以实验为主的化学科学的原始形式，就是遵循它，才最终孕育出近代的实验化学和化工技术。

中国古代炼丹家认为，炼丹是件神圣的事，需要有一个清静，无须人打扰的，有山有水的特殊环境。故炼丹大多选择在名山之中，无人之地，结伴不过三人。炼丹的场所先筑一个能放置各种炼丹器具的土坛，方士们称其为“坛”。坛的样式是讲究一定的法度，即大小尺寸、方位朝向、筑形筑材各有自己的设计。然后在坛上筑炉灶。《丹房须知》说：“鼎若无炉如人无宅何以安居。”关于丹炉，许多炼丹古籍都有介绍，且有简单的绘图（见图 11-27）。

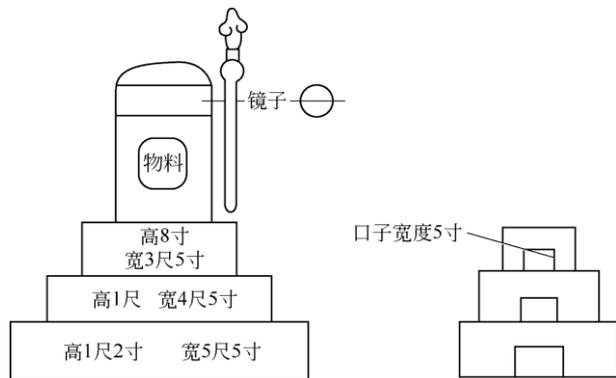


图 11-27 古代炼丹家设计的“坛”

在丹炉之中或之上要放置用金属或陶瓷做成的鼎或匱（见图 11-28）。这就是炼丹的化学反应室。坛、炉、鼎、匱、罐是炼丹的主要设备（见图 11-29，图 11-30），此外还有作为炉、鼎、匱附件或组成部分的升华装置、蒸馏装置、冷凝装置及研磨器等。古代炼丹中，升华技术主要用于炼汞。炼丹家在东汉末年发明的下火上凝式炼汞法和唐代中叶发明的上火下凝式炼汞法，都是当时方士创造的升华制汞的仪器和技术。炉、鼎、匱等可用金、银、铜、铁、瓷作材料，样式根据反应需要而设计。

古代炼丹中蒸馏技术用得不多，主要也是用于升炼水银，即抽砂炼汞的蒸馏装置和制取花露水的蒸馏器。在元代，不是方士，而是酿酒工匠借鉴于西方的蒸馏酒生产技术，在中国推广和发展起来有中国特色的蒸馏酒技术，使蒸馏技术才得以提高到一个新水平。中国古代炼丹讲究“水火相济”，所以很重视冷凝装置，上面讲的升华、蒸馏装置都有部分冷凝过程。炼丹家们还苦心构思，精心设计了一些比较复杂的冷凝装置，例如，在丹书《金华冲碧丹经秘旨》中就有带三个冷却管的鼎。研磨在炼丹中有两个作用：一是使药物细碎，便于混合和起化学反应，二是在研磨过程中就能使几种药物得以化合，例如，硫与汞的混合研磨。因此研磨设备和技术也是炼丹家必备的。

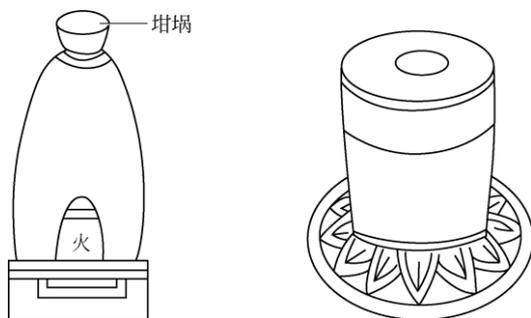


图 11-28 《道藏》所描绘的鼎、匱

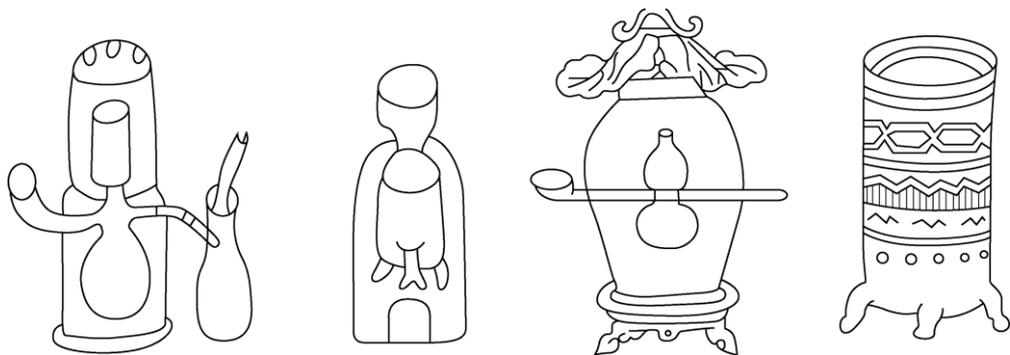


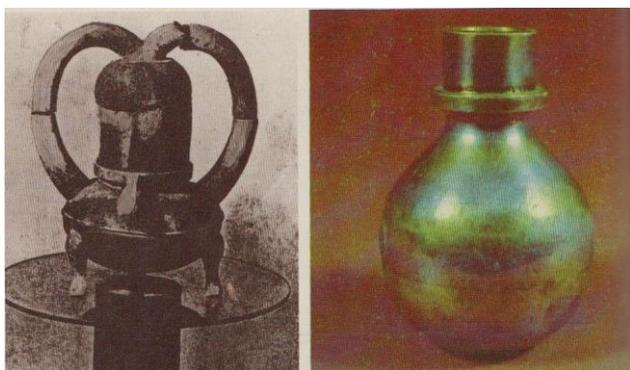
图 11-29 《道藏》里描绘的各种炼丹炉

中国古代炼丹术的操作方法有火炼、水炼两种，火炼占十之八九，水炼只占十之一二。火炼法大致有以下几项操作技巧和专门的术语。

① 炼 指对干燥物质的加热，此过程大多存在化学反应。广义的炼则是指全部人为的物质变化。

② 煨 长时间地高温加热。

③ 炙 将物质进行局部烘烤。



(a) 东汉的彩虹鼎

(b) 唐代的银石榴罐

图 11-30 出土的古代炼丹的设备

- ④ 熔 即熔化某种物质。
- ⑤ 抽 即是蒸馏。
- ⑥ 飞 指与蒸馏不同的升华。
- ⑦ 伏 指经过加热使物质改变其性质。

水炼法大致上有以下几种：

- ① 化 溶解或溶化物质。
- ② 淋 指用水溶解出固体物质的某些部分。
- ③ 煮 是将物质放在水中加热。
- ④ 熬 将物质放在水中长时间加热。
- ⑤ 渍 用冷水在盛物质的容器外降温。

此外，有些方法在火炼或水炼中都可用。例如：点，指加小量的药物，能使较大的物质发生变化。养，物质长时间在低温下加热。封，让反应物质静置或埋于地下一段时间。在火炼法中最常用的是升华技术。

由上述炼丹过程和炼丹设备、技巧的介绍，不难看到炼丹家在炼丹过程中，确实采用了粉碎、筛分、搅拌、过滤、干燥、浸取、焙烧、吸收、蒸馏、汽化、还原等工艺，接触到许多物质的物理变化和化学反应，积累了大量的化学知识。这些操作工艺在其后遂形成了化工单元操作的雏形。明代刘文泰所编写的《本草品汇精要》（彩绘本）中就有许多绘画内容为当时民间制药及制墨的化工操作，从这些形象的描绘中可以看到明代化工生产的某些片断和技术水平（见图 11-31）。

与中国古代炼丹术相仿，从古希腊、古印度到阿拉伯、西欧的炼金术也使用相近的设备和操作方法（见图 11-32），最大的不同点在中国的炼丹设备主要以陶瓷和金属为材料，而西方有条件地采用了玻璃器皿（见图 11-33）。玻璃器皿的透明、可视可以帮助操作者更好地观察到容器内的化学变化，无疑会增加实验的感性收获。因此在发



(a) 用两次升华法提炼樟脑



(b) 松香烧烟制墨工艺



(c) 用水银、白矾和食盐制水银粉(左), 用水银和硫黄制取丹砂(右)

图 11-31 明代《本草品汇精要》(彩绘本) 中民间制药及制墨化工操作

展近代化工与创立近代化学一样，西方的炼金术做出更大的贡献。例如，在欧洲掌握金属加工的淬炼技巧来自炼金术。图 11-34 是一幅取自拉扎勒斯·厄尔克所著的一本有关冶金术的书（1574 年在布拉格出版）的木刻插图。该图描绘的是 16 世纪一个炼铜作坊。作坊近似于炼金家的实验室，设备和技术都是炼金术的成果。图中 A 是一个小型熔炉，B 是熔炉的火门，C 是压碎的矿石，D 是另一个试验炉，E 是风箱，F 是一个圆形的水具，G 是一个盛有铜或其他合金的器具，H

是试验用的坩埚。



图 11-32 炼金术士在实验（十五世纪时的木刻）

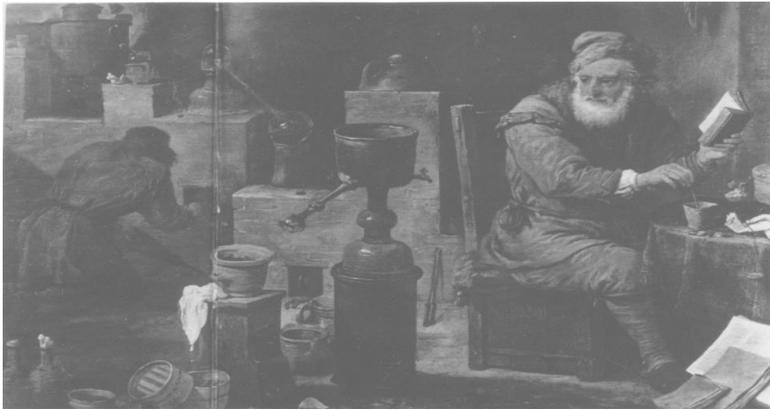


图 11-33 西方炼金术士在实验（十六世纪油画）

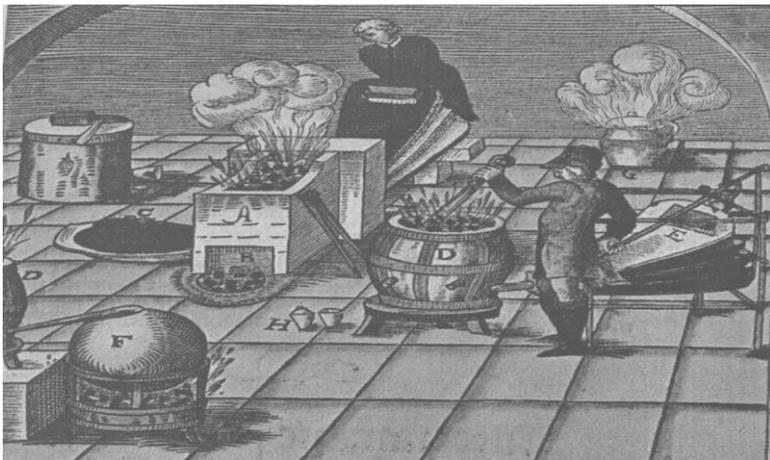


图 11-34 十六世纪西方的炼铜作坊