

## 第三章

# 钢铁冶铸技术的中国特色

铁矿石冶炼技术的发明是继青铜之后，在冶金发展史中出现的又一个里程碑。它对社会发展的影响远远超过青铜，不仅因为铁矿石在地球上的储量远多于铜，还因铁及其随后发展出来的铁合金，特别是各种钢，其应用在发展社会生产力及对社会的深刻影响方面远非石器和青铜器可以比拟。铁矿石虽然有广泛分布，但是在地球上几乎找不到天然铁，因为自然界中存在的铁矿石主要是一些铁的氧化物，如赤铁矿（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）、磁铁矿（ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）、褐铁矿（含结晶水的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）、菱铁矿（ $\text{FeCO}_3$ ）等，不醒目，难于识别。而且铁矿常与其他金属矿共生，例如，黄铁矿与黄铜矿混杂在一起，古人是难以分辨的。从金属冶炼技术的角度来看，铁的冶炼较铜、锡、铅等都要困难，特别是渣铁分离。因此人类掌握冶铁技术较炼铜晚多了。从炼炉的高温技术来看，以木炭及其燃烧所产生的  $\text{CO}$  来还原这些铁矿石，大约在  $600\sim 700^\circ\text{C}$  才开始，要到  $1000^\circ\text{C}$  左右才能得到固态的铁块，但想要得到铁水，至少要  $1600^\circ\text{C}$ 。只有在冶铜过程中取得相当丰富的冶炼经验后，才可能发展到冶铁。因此冶铁技术的发明与青铜冶炼技术的发展有关。

### 第一节 冶铁技术的出现和块炼铁の利用

冶铁技术发明的最初细节，目前尚找不到文字记载，只能做些符合逻辑的推理，沿着冶铜工艺发展的线索寻找早期冶铁的痕迹。例如，在高代晚期就已开始炼铜的湖北大冶铜绿山冶铜遗址的炼炉旁有大量赤铁矿粉堆积着，有的炼铜炉渣里含氧化铁竟高达 50%，表明有极大可能当时在炼铜时已有意识地采用赤铁矿石为助熔剂。因此，在那竖炉中，很可能在排出铜液后，会遗留下一些块状铁和炉渣的混合物。这一发现能否成为冶铁技术出现的启示？另一项启示可能来自陨铁的使用和追求。

从世界上各个文化发源地的冶金发展史来看，人类最早接触到的铁是从宇宙降落下来的陨铁。正是通过对陨铁的加工利用，人们收获对于铁的最初认识。天降的陨铁是陨星的一类，主要组成元素是铁和镍，即由铁镍合金组成，镍约占 4%~20%，还含有少量的钴、铜、铬、锆、镓、磷、硫等元素。它与石陨星一起被古人视为“天降之火”，既珍贵又神秘。尽管陨铁不如自然铜和自然金那么容易识别，古人还是很早发现了它，且将其加工成工具。这种铁镍合金锻造性能好，强度高，



制成的器物较锋利，深受古人喜爱。已知最早的陨铁器物分别是在尼罗河流域的格泽发现的匕首(含镍 7.5%)以及在幼发拉底河的乌尔地区发现的匕首(含镍 10.9%)。经鉴定，这两件都是公元前 4000 年的器物。根据考古发现，中国至今发现的陨铁制品有七件。在河北藁城和北京平谷分别发现商代中期，即公元前 14 世纪的铁刃铜钺各一件。河南浚县发现的商末周初，即公元前 11 世纪的铁刃铜钺、铁援铜戈各一件。河南三门峡市虢国墓出土的西周末，即公元前 9 世纪的铜内铁援戈、铜釜铁铤、铜柄铁削各一件。其中，1972 年在河北藁城台西村发现的铁刃铜钺(见图 3-1)，此兵器仅刃部是陨铁加工而成。由于铁刃已全部氧化，鉴定有一定困难，经过细致的科学分析表明，镍含量在 6% 以上，钴含量在 0.4% 以上，其中没有人工冶铁所含的大量夹杂物。更为重要的是，虽然经过锻造和长期风化，铁刃中仍保留有高低镍、钴的层状分布，表明它是用陨铁锻成的。这些陨铁制品的发现，表明当时的陨铁系由青铜冶铸业所使用，工匠正是由此逐步认识铁，了解铁的热加工性能，还识别了铁与青铜在材质上的差别。



图 3-1 河北藁城出土的铁刃铜钺

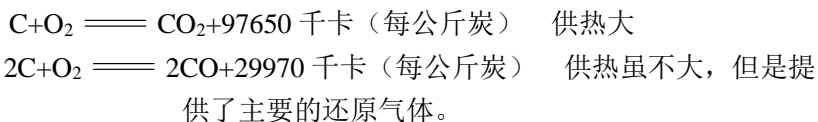
在三门峡市虢国墓地出土了 3 件陨铁制品的同时，还出土了 3 件人工冶铁制品。陨铁与人工冶铁同时使用是世界各地区文明古国的共性。这在一定程度上说明，陨铁の利用对人们认识铁是有帮助的。但是，陨铁的加工毕竟与人工冶铁不是一码事。为了研究人工冶铁的历史，首先要注意辨别陨铁与人工铁的区别。凭借现代科学技术手段，人们已不难对这两种铁加以区别：因为原始的人工冶铁由于冶炼温度不够高，总会含有相当多冶炼时混入的硅酸盐夹杂物；而陨铁中不仅不会含有这些夹杂物，而且总有一定量的金属镍，此外还含有少量的钴。若用电子探针技术来研究，可知陨铁中的镍和钴呈层状的不均匀分布；即这种高镍和低镍的层状组织只能在宇宙中经历了极端缓慢的冷却(每 100 万年冷却  $0.5\sim 500^{\circ}\text{C}$ )过程之后才可能形成，而在人工冶炼的铁中是不可能出现的。

在古代，从矿石中人工冶炼、加工出来的铁主要是块炼铁(熟铁)、生铁和钢。这三种铁实质上都是“铁碳合金”，它们主要的区别在于含碳的多少。一般地说，含碳量在 0.5% 以下而有较多杂质和炼渣的是块炼铁。根据其性能，人们又称它为软铁或锻铁，若含杂质很少，那也可算是低碳钢；含碳量在 0.5%~2%，杂质较少的是中碳钢和高碳钢；含碳量在 2%~5% 的是生铁，也称为铸铁，因它质地硬脆，只能用熔化、浇铸的方法加工成型，所以也叫铸铁。

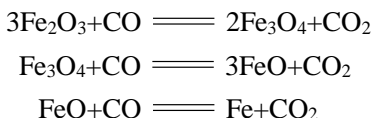
在古代，和炼铜一样，冶铁所用的燃料是木柴及木炭，冶炼过程中的还原剂是

由木炭生成的一氧化碳。木炭在燃烧中造成高温的同时，还生成还原性气体一氧化碳。使炉内的铁矿石发生如下化学变化。

木炭燃烧的化学变化：



促使铁从氧化态中还原的化学反应如下：



一氧化碳还原铁矿石，热力学要求温度为 500~600℃。这应是起码的温度范围，实际上要达到一定反应速度，并使还原得到的金属铁能聚结，要求的炉温为 1000℃ 或更高。在冶铁兴起之初，由于炼炉小，只靠自然通风或皮囊鼓风，炉温不够高，只有 1000℃ 左右，虽然勉强把铁从矿石中还原出来，但不能把它充分熔化，炼出来的只能是铁和炼渣及矿石中其他未还原的金属氧化物的混合物，即是海绵状、半熔融的铁渣混合的一块铁坨。这种铁坨只能是趁热锻打，才能部分地挤出那些夹杂物。这样加工获得的铁就是质地疏松、孔隙中夹杂矿渣的“块炼铁”。这种技术称为低温固体还原法或块炼法。基于同样的原理，在炼铜中，当以铁矿石作炉衬或作助熔剂时，温度高时也可能得到块炼铁与炉渣的混合体。早期的冶铁由于炉温不够高，还原速度慢，每次取出固体块炼铁都要扒炉，这样一来，生产只能是间歇操作，不仅效率低，而且也直接影响产量。出炉的块炼铁必须经过反复的加热锻打，才能成材制造器物，可见既费工又劳力。这就造成块炼铁的技术和使用推广缓慢。不易得到的块炼铁尽可能地被用于制造某些重要的武器和工具。这种含碳量较低的、接近于纯铁的块炼铁质地柔软，易于锻造加工，当放在炭火上加热后再反复锻打时，会渗入一定量的碳，从而有可能转变为钢。因此，块炼铁在加工中，不知不觉地变成了钢，使用的性能和价值就大为提高。人们正是鉴于这一经验，逐渐把块炼铁作为早期制钢的原料。由此可见，早期的块炼铁技术从冶炼到制成武器或工具，实际上包括冶炼和热锻两个工艺。

中国的人工冶铁始于何时？若仅考证古代文献，实难有准确的结论。一方面古文献记载大多有一定局限性。另一方面，古文献涉及的文字时常含意不清，后人解释各异，加上有些重要的著作已佚，如《冶铁志》。鉴此，当今研讨此题多依赖于考古发掘出土的实物所提供的重要线索。截至目前，考古发掘出土属于公元前 5 世纪以前的铁制品共计 130 余件（新疆地区和年代有争议者未计入），大多出自墓葬。这些出土的早期铁器多数锈蚀严重，技术鉴定十分困难。从经鉴定的 29 件铁制品来看，其中 13 件是锻件，即是块炼技术制作的铁兵器、工具等。目前已知最早的人工冶铁制品，是河南三门峡市虢国西周晚期墓出土的三件兵器。它们是玉柄铁剑、

铜内铁援戈、铜骹铁叶矛各一件。这三件兵器出自两座国君级的墓葬之中，属于公元前9—前8世纪的人工冶铁制品，经鉴定是块炼铁和块炼渗碳钢，与世界其他文明古国使用的块炼法技术类似。块炼铁虽然生产效率低，但工艺和设备简单，产品又具有优良的锻造性能，在炭火中进行渗碳，即可成为中碳钢，克服了它不够刚强的弱点，因而始终是古代锻造铁和钢的重要原料，在一定程度上能适应古代社会制造兵器和工具的需要。自西周晚期以后历代的以块炼铁或以块炼铁为原料的渗碳钢锻制的器物几乎都有发现（见图3-2）。

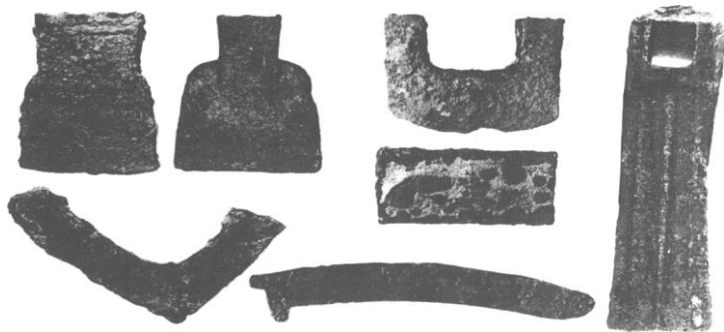


图3-2 战国时期的铸铁农具

湖北大冶铜绿山古矿井出土的铁耙和铁钻，河北省易县战国燕下都44号墓出土的铁剑，西安半坡战国中晚期墓葬出土的铁凿，河北满城汉墓出土的锻铁兵器、工具以及中山靖王刘胜的一付铠甲都是块炼铁的制品。1964—1974年在江苏六合县程桥分别出土了弯曲的铁条一件和铁丸一件。经鉴定，铁条属于早期的块炼铁，铁丸则是最早的生铁，同属春秋晚期制品（见表3-1）。

表3-1 出土的部分早期的铁制品

出土地区		出土铁器	时代
楚国	长沙杨家山	钢剑1，铁鼎形器1，铁削1	春秋晚期
	长沙窑岭山	铁鼎1	春秋战国之际
	常德德山	小铁镢1	春秋晚期
	长沙	铁锤、铁削3~5件	春秋晚期
	长沙识字岭	小铁锤1	春秋晚期
	信阳长台关	错金铁带钩5	
	长沙龙洞坡	铁削1	春秋晚期或春秋战国之交
吴国	江苏六合程桥	铁丸1	春秋晚期
	江苏六合程桥	弯曲铁条1	春秋晚期
周	洛阳中州路	铜环铁首削1	战国早期
	洛阳水泥制品厂战国灰坑	铁铲1，铁铤1	春秋战国之际
韩国	山西长治分水岭	铁铲3，铁凿1，镢斧等5	战国早期
	山西长治分水岭	铁凿1，铁锤1，铁镢1，铁斧5	战国早期

	三门峡后川	铁短剑 1	战国早期
--	-------	-------	------

注：摘自杨宽《中国古代冶铁技术发展史》，1982。

早期人工冶铁制品有以下特点：

(1) 形体薄小，器形简单，不少用金、玉、青铜作柄，有的还错金嵌玉，表明它们是作为珍品而随葬的。

(2) 一些铁器的形制与同时期青铜制品相同，表明在制作中是按当时的青铜器仿造的。

(3) 中国早期铁制品既有块炼铁、块炼渗碳钢，还有生铁及生铁脱碳处理的制品，可以说两种冶铁技术几乎同时发展。

## 第二节 生铁冶铸及其柔化处理技术的发明与应用

随着冶炼技术的提高，人们加高了炼炉的身高度，强化了鼓风的力度，炉子也逐步从地坑式向竖炉发展。炼炉的改进，通过燃烧强度的增大，提高了炉内的熔炼温度，冶炼的反应更充分了，反应速度也明显加快，从而使被还原出来的铁充分熔化，与炼渣很好地分离，金属铁以液态的铁水流出炉外。矿石和木炭可继续自炉的上方投入炉内，生产不必间歇，因此生产效率得以提高，热能也得到较好的利用。当然，这是炼铁技术的极大进步。但也引出一个新问题，即还原出来的铁温度越高，溶解的碳也会越多，当含碳量超过 2% 以后，就引起了质变，得到了另一类产品，即生铁。生铁熔点（1150℃）比纯铁熔点（1535℃）低得多，降低了近 400℃；炉温升高后，还促使原料矿石中其他元素被还原而渗入铁中，尤其是硫和磷，它们会使生铁熔点进一步降低。生铁的优点是易熔化，便于铸造成型，质地坚硬耐磨，缺点则是很脆，完全失去了锻造的性能，并使铸造出的器物经不住猛力敲打、撞击。

上述经鉴定属于公元前 5 世纪的 29 件出土铁器中，有 16 件是由生铁制成的，比块炼铁的多。山西天马一曲村发现的铸铁器残片 2 件是属于公元前 8 世纪的产品，虽然残片器形难辨，但是通过金相组织鉴定，此 2 件铸铁残片为共晶白口铁，是中国迄今为止出土的最早生铁铸件。江苏六合县程桥出土了生铁制品——铁丸。同属春秋晚期的还有长沙识字岭第 314 号楚墓中出土的生铁铸造的小铁锹。1978 年，在长沙杨家山 66 号墓和窑岭山 15 号墓出土了春秋晚期的、生铁铸成的铁鼎，表明那时的楚国已掌握了比六合铁丸更好的生铁冶铸技术。河南洛阳水泥厂出土的铁铤、山西长治分水岭出土的铁镢、铁凿、铁锤等工具也都是由白口铁铸成，并经柔化处理而成的脱碳铸铁。

上述铁器的出土及其研究，进一步表明我国的生铁冶铸技术居然在块炼法产生后不久就出现，是我国冶金史上一个重要的特点。生铁冶铸技术是中国人的重大原创性发明，是中国古代钢铁文明长期居于世界前列的技术基础。在欧洲，从块炼铁发展到生铁，其间大约经过了 2500 年。这大概与我国在冶铁发明的时代已有了高度发展的青铜冶炼技术有关。例如，大冶铜绿山春秋时期的冶炼遗址中已有了小竖

炉，只要进一步强化鼓风，即有可能冶炼出生铁。

在春秋晚期，人们用生铁铸造各种农具，如铲、铤、锛、镢等，制作工具，如削、凿、斧、锤等；而用块炼铁制作剑、戈、矛等兵器及小件的的工具。能合理地加工和使用块炼铁和生铁，除了对块炼铁和生铁的性能有些了解外，还各有一套加工方法，扬长避短，发挥各自特长。这绝非一朝一夕所能成就的，表明当时冶铁已经积累有一些经验。当时的冶铁业大概首先兴起于南方的吴、楚两国，其次是与楚国相邻的韩国和周朝京城一带。原因是这些地区拥有较优质的木材和蕴藏在河谷或沿海边的浅层、高品位的铁矿。

生铁性脆，影响了它的使用功能，古罗马时期也曾提高炉温炼得生铁，但一锻即碎，遂被弃置不用，从而使刚露头的生铁冶铸技术被长久的埋没。而中国工匠在实践摸索中发展出一套柔化处理技术，克服了生铁的脆性而可用，在白口铁的基础上又先后发展出韧性铸铁、灰口铁、麻口铁等品种。白口铁是最早的生铁品种。

(1) 白口铁 从六合县程桥出土的铁丸和长沙出土的春秋战国之际的铁鼎可以看到，其断口均呈银白色，是典型的共晶白口生铁。由于白口铁中所含的碳以碳化铁 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) 和游离渗碳体的形态存在，故具有很高的硬度，一般在 HB500 以上，但性脆。它的优点是耐磨，较适合铸造犁铧之类的农具。《管子·小匡篇》说：“美金（青铜）以铸戈、剑、矛、戟，试诸狗马；恶金（白口生铁）以铸斤、斧、锄、夷（锄类）、锯、櫛（皆属钁类），试诸禾土。”这就是当时对青铜和白口生铁的认识，对生铁虽然评价不高，但是已给它找到了合适的用武之地。

(2) 韧性铸铁 是对白口生铁进行柔化处理的最早成果。柔化处理也叫退火处理，其基本操作是将白口生铁长时间加热、保温，再让它缓慢冷却。在此过程中，一方面通过氧化作用使白口生铁由表及里逐步脱碳，另一方面通过高温使其中的碳化铁分解，析出石墨，因而使其基体成为铁素体（即  $\alpha\text{-Fe}$  和以它为基础的固熔体）或铁素体-珠光体（本质上是一种铁素体和渗碳体相间成层排列的混合物，由于显微镜下图像状似珠母，被称为珠光体）的低碳钢或中碳钢，从而消除了其脆性，成为可锻铸铁。通过对早期可锻铸铁的深入研究和模拟实验，探明古代的柔化技术曾在两类气氛下进行，因此得到了大致可分为两类五种不同材质的可锻铸铁。

第一类是在氧化气氛下对铸铁进行柔化处理，加热、保温时间较短。这类方法使用较早。按照脱碳的程度和石墨析出的情况，分别得到三种材质。一是表面脱碳不完全，且内心仍是白口铁组织的白心韧性铸铁。例如，石家庄和大冶铜绿山出土的战国时期的铁锤 [见图 3-3(a)]。二是表面层脱碳完全，但内心仍是白口铁组织的白心韧性铸铁。例如，河南辉县出土的战国铁钁 [见图 3-3(b)]。三是脱碳完全，白口铁组织已基本消失，通体成为铸铁脱碳钢。例如，南阳市出土的西汉铁犁铧和郑州古荥镇冶铁遗址出土的铁板。

第二类是在中性或弱氧化性气氛下对白口铁铸件进行长时间加热、保温处理，使白口铁组织向石墨化转化。按石墨析出的性状，又可分为黑心韧性铸铁和球状石墨铸铁两种材质。前者石墨呈团絮状或菜花状聚集体析出，如河南南阳出土的东汉铁锤等。后者的石墨呈小球状聚集体析出，如河南巩县铁生沟出土的西汉铁镢。



(a) 铁锤 (大冶铜绿山遗址出土)

(b) 铁镢 (河南辉县出土)

图 3-3 战国时期氧化气氛下柔化处理的铸铁

通过对出土铁器的科学分析，特别是金相检验，可以判断生铁的柔化处理技术至迟在春秋战国之际已经发明应用。1978年洛阳水泥厂出土的春秋战国的铁铤、铁钁各一件，经检验，证明它们的材质都是白口铁经柔化处理的铸铁。其中铁铤经过脱碳退火，表面冷却后形成一层珠光体组织，内部仍为白口铁组织，但其表面脱碳层较薄，表明退火温度较低，大约  $750^{\circ}\text{C}$ ，退火时间也较短，它可被视为韧性铸铁发展中初级阶段的产品。而铁钁则作了较充分的退火处理，不仅表面为脱碳层，中心部分已出现较完善的团絮状石墨，成为黑心铸铁。柔化退火处理技术发展战国时期，已在楚、韩、魏、赵、燕等国被推广，用于农具和兵器的加工。

能将低硅、高碳的生铁加工成黑心铸铁，发展到西汉又通过柔化退火技术制得球墨铸铁，在世界冶金史上是件了不起的成就。迄今为止出土的早期铸铁工具中，经检验属于球状或团絮状石墨组织材质的有 10 件，分别出土于河南巩县铁生沟、南阳瓦房庄、郑州古荥镇等汉代冶铁遗址和渑池县北魏铁器窑藏。其中，1959年在河南巩县铁生沟出土的西汉铁镢，经北京科技大学冶金史研究室检测，其基体为铁素体和网状珠光体，边缘存在珠光体窄带，球状石墨外轮廓呈多边形，其圆整度、弥散分布和偏光效应都与现代球墨铸铁相差无几；考察其石墨体的结构，证实其具有典型的年轮状组织；金相研究表明其在加热过程中相当稳定，碳的扩散主要是以中心脱熔的形式进行，球的崩解与消失是在液相形成后突然发生的，采用扫描电镜



对石墨球进行观察,发现有微米级以下球形微粒存在,有可能成为石墨球的结晶核心;经化学分析,铁镗中含碳 1.98%、硅 0.16%、锰 0.04%、硫 0.048%、磷 0.297%。综合上述检测结果,可以认为当初浇铸铁镗时由于冷却速度较快,铸后又进行长时间的高温退火处理(加热到 900℃左右,保持 3 天至 5 天),以致形成球状石墨,而未曾加入球化剂。

上述出土早期铸铁的检测资料充分表明我国生铁变性工艺(包括柔化退火技术)发展迅速,到了西汉已臻成熟。自西汉中期始,由于冶铁业实行官营,这种技术得到进一步推广,并被列为技术的规范。此后脱碳不完全的白心铸铁逐渐少见。人们又在柔化处理技术的经验中孕育出炒铁和炒钢的新工艺。

(3) 灰口铁 当炼铁竖炉的炉温升高,会使溶解于铁水的硅量急剧加大,硅量的加大能使铁中的碳在凝固时发生石墨化,形成一条条石墨片,而基体变成含碳低的铁素体,所以断面呈灰色,称作灰口铁。这种结构的生铁脆性大大降低,而且铸造性能较好,凝固收缩率也小,适于铸造各种精巧、纹细的器物,应用范围广。要炼出灰口铁必须创造更高的熔炼温度。目前经科学鉴定的最早的灰口铁制品出自河北满城西汉墓,是用来制成车上的辘(轴承)。由于灰口铁的组织中含有石墨片,有一定的润滑作用,所以正适合做轴承材料。出土的这件车辘,表明在西汉时期已能炼出灰口铁,并找到它的恰当用途,这也是冶铁史和机械史上一项重要的成就。

(4) 麻口铁 其性质介于白口铁与灰口铁之间,可以算作白口铁向灰口铁发展中的过渡产品。在大冶铜绿山古矿遗址和满城汉墓中出土的犁铧就由麻口铁制成,因此最早的麻口铁制品应在战国后期。

由于有了多种经验较丰富的柔化处理技术,生铁的改性工艺使生铁的应用得到极大的扩展,逐渐使中国的冶铁工艺有了两条发展的技术路径,块炼铁和生铁冶铸长期平行发展。在许多阶段,生铁冶铸甚至有更大的用武之地。西方的许多地方和国家则是长期地采用块炼铁法,熟练地掌握生铁冶铸则是在公元 14 世纪的事情。与块炼法的发现、使用之间相距了整整 21 个世纪。

从出土的历代生铁器物来看,它主要是用来制造农具,充分发挥它质硬耐磨的特长。例如,河北兴隆出土的大批铁范表明,当时已铸造了各种形式的农具,有小型的铲、锄、镗、镰等,也有较大型的犁铧、耨铧等。它们的使用对中国古代农业的发展起了巨大的推动作用。制造用于手工业的生铁工具也很广泛。例如,河南辉县固围村战国魏墓出土的 95 件铁器中很多都是手工工具。此外用作车辆零件的也不少,例如,陕西西安礼泉出土的汉代的生铁辘(车辆轴与毂之间的金属圈)和齿轮、河南浚池县出土的汉魏时期各种大小的成套轴承。生铁虽不宜于制造带刃的兵器和工具,但在火药武器出现后,它曾被用于铸造炮筒之类的重型武器。从 12 世纪的南宋开始,铸造大炮的炮身越来越长,有的长达数米,炮身越来越重,从数百斤到数千斤。有的炮筒为多层套铸,内层铸生铁,外层则铸青铜,以防震裂。

尽管中国古代建筑以砖木结构为主，但是历来在建筑中使用铁制品的地方也不少。例如，西汉中山靖王刘胜墓的墓道外口有两道夹墙，其间浇灌了铁水，形成铁门，严加密封；例如，位于河北赵县洨河上著名的赵州桥，这座建造于隋代的大桥至今完好，它之所以如此坚固耐久，在筑桥的石缝中浇铸了铁水也是一个原因。陕西乾县唐代乾陵墓道砌石每块之间也都采用了这种“冶金固隙”的技术，经检验是在石块之间凿成串通的孔道，再注入生铁水。

在宗教祠堂等建筑中也出现一些用生铁铸造的大型器物。河北沧州古城的铁狮子是五代后周广顺三年（953年）用生铁铸件组装而成的，狮身高3.9米，头高1.5米，共高5.4米，身长6.8米，总重约十余万斤。这座铁狮子经历千年，风吹雨淋，仍能保存至今，实为壮观[见图3-4(a)]。山西晋祠至今仍保存完好的四个铁巨人是宋代的生铁铸件[见图3-4(b)]；南阳瓦房庄汉代冶铁遗址出土的口径达2米的大铁釜；浙江雁荡山能仁寺保存的口径2.2米，高1.55米，重27000斤的大铁锅（北宋元祐七年铸，系灰口铁整体铸造），也都是古代留下来的生铁制品。此外，各地留下来的古代铁塔甚多，例如湖北当阳玉泉寺有座北宋嘉祐六年铸造的铁塔，有十三层，高七丈，分层铸造，分八角形，套接而成，重约106600斤；山东泰山也有一座明嘉靖十二年铸造的铁塔，也为十三层，八角形，全高达10米以上。这些古代的生铁铸件是珍贵的文化遗产，向后人展示了古代的科技文明，特别是当时的冶铁技术的水平和成就。



(a) 沧州的铁狮子



(b) 太原晋祠宋代铁人

图3-4 宗教祠堂等建筑中的大型生铁铸件

### 第三节 多种炼钢技术

中国冶铁业的兴起虽然比西亚两河流域地区要晚，但是进步很快，这不仅表现在较早掌握了生铁冶铸技术，并使它与块炼铁技术同步发展，还表现在较早地实现了钢的冶炼，即在春秋晚期已摸索出炼钢工艺，而到战国、西汉时期炼钢技术就开始应用于制造兵器和工具。起初，由于制钢技术滞后，兵器仍多用铜铸，到了东汉，制钢技术成熟了，并且得到迅速推广，中国进入了完全的铁器时代。

由于钢制兵器在战场上的优势，像《史记》、《战国策》、《吴越春秋》、《越绝书》、《墨子》、《韩非子》等众多古籍都有钢制兵器及其制造的记述。实际上块炼铁的加强锻打和生铁的柔化处理都为炼钢技术的出现做了技术的铺垫。通过对大量出土古代钢制品的检测，可以认为中国古代的炼钢技术有以下几种。

#### 一、块炼渗碳钢技术

世界上最早的渗碳钢器物是埃及出土的公元前 12 世纪的铁制品和塞浦路斯遗址出土的公元前 12 世纪的刀。早期的块炼铁渗碳钢，含碳量较低，组织不均匀，表明当时的渗碳处理并不是有意识的。而埃及出土的属于公元前 9 世纪的刀，金相组织已具有不同含碳量的层状组织，表明这是有意识地进行硬化处理的结果。公元前 9 世纪以后，铁制工具和器物在两河流域地区和西亚、北非地区迅速增加。近年来在伊朗发现的有数千件铁兵器的窖藏及一些铁制品，都是公元前 10 世纪到公元前 6 世纪的产品，足以说明块炼渗碳钢技术在那里的的发展。但是直到 14 世纪后期，那些地区的人们仍然主要使用块炼渗碳钢技术炼制兵器和工具。

1976 年，湖南长沙杨家山 65 号墓出土的春秋晚期（约公元前 5 世纪）的钢剑，全长 38.4 厘米，组织均匀致密，夹杂极少，含碳约 0.5%，渗碳体已球化，看来经过了多次地折叠锻打，是块炼铁渗碳钢制品。1965 年河北易县战国燕下都 44 号墓出土的剑、戟、矛等经金相检验，表明它们都是块炼铁渗碳钢制品，含碳不均匀，有明显的折叠痕迹（见图 3-5）。它们也是块炼铁渗碳钢的早期产品。相对来说，块炼铁渗碳钢技术比较简单，较早被掌握。它以块炼铁为原料，通过渗碳、锻打成钢。由于块炼铁是在较低温度下（约 800~1000℃）用木炭还原铁矿石所得的铁料，其基体

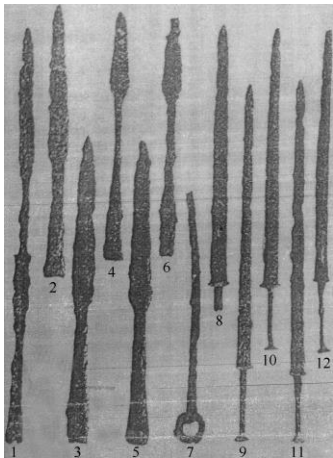


图 3-5 河北易县战国燕下都 44 号墓出土的铁兵器

1—III式矛；2、3、5—II式矛；  
4、6—I式矛；7—刀；8~12—剑

成分接近于纯铁，所以熔点很高，质地较软。又因为它夹杂很多炼渣，得到的是结构疏松的海绵体，故又称海绵铁。海绵铁必须通过锻打，挤出其中夹杂物后才能制造器物。当工匠将块炼铁放在红热的炭火上加热时，碳便会慢慢渗入其中，首先是表层逐渐渗碳变成了低碳钢，出现表层碳多，里面碳少的现象。锻打延伸成片后，工匠们再把它折叠起来继续锻打，最终得到长剑或刀、矛之类兵器。在这些兵器中，它的横截面上会显现出含碳高低不同的分层现象，既有含碳 0.5%~0.6% 的高碳层，又有含碳 0.15%~0.2% 的低碳层，各层有厚有薄，分界有的明显，有的则存在一个过渡层。不同的组织结构则有不同的物理性能，这完全在工匠手艺和经验的掌控中。

河北满城汉墓出土了中山靖王刘胜的佩剑（见图 3-6）、错金书刀等和内蒙呼和浩特市二十家子古城出土的铁甲都属于汉武帝时期的遗物。经科学鉴定，它们都是块炼铁渗碳钢制品。原料与战国燕下都的相同，但是质量有明显提高。通过金相鉴定，可以看到含碳不均匀现象已大为减少，夹杂物的尺寸和数量也减少许多，钢的组织更加细致，成分更为均匀。这些都是反复加热锻打的效果。而且无论是铁剑坚硬锐利的刃部，还是铁甲片都经过了退火处理，提高了钢的延展性。上述出土的钢铁制品表明，西汉时期中国的块炼铁渗碳钢技术业已成熟。

在印度，公元 3—4 世纪曾锻造成高 7.2 米、重达 6 吨的德里铁柱，表明当时印度也具有较高的冶金水平。特别是约在公元 540 年波斯的萨珊王朝开始采用坩埚渗碳法制成高碳钢，称为乌兹钢。这种钢被波斯人制成刀、剑、盔甲等兵器销往周边各国，十分抢手，又称为大马士革钢。因为这种钢性能优良，所制作的兵器特别锋利，又在表面锻有特殊花纹而在当时声誉远播。这种制钢法在西方得到广泛推广，应用延至 19 世纪末。

与波斯这种坩埚渗碳法炼钢相近的技术在中国被称为“密封加热渗碳炼钢”，即后世长期流行的“焖钢法”。它以块炼铁为原料，配以适量的干木材、植物茎叶等含碳物质，放在坩埚中密封后，以炭火加热，并使用大型鼓风囊鼓风。在坩埚中，块炼铁的表面就会发生明显的碳化作用，逐步形成一些熔点较低的，有流通性的铸铁。它再渗入海绵组织内部空隙，经过四五个小时，块炼铁就变成了中碳钢或高碳钢。有学者曾推测《吴越春秋》中干将、莫邪等所铸的宝剑的钢材可能采用了“焖钢”。但是仔细思量一番，似乎这一推测尚缺乏科学的旁证。有一点是可以肯定的，那就是“乌兹钢”（在中国的音译为“镔铁”）在北魏时期陆续通过波斯、大食、印度等国传入我国。宋代初期，它曾作为贡品和商品大量传入。可能在宋代时我国西北地区的兄弟民族率先学会了仿制乌兹钢的技术，即焖钢法。元朝政府已设官自己炼制，《元史·百官志》说：工部设有镔铁局，“提举右八作司，……并在都局院造



图 3-6 中山靖王刘胜的佩剑  
（河北满城出土）

作镔铁、铜、钢、鎗石、东南筒铁。”到了元明之交叉进一步掌握它的显示花纹方法了。明代宋应星在《天工开物》“锤锻”一节中载有密封渗碳炼制钢针的方法，就是采用这种工艺。宋应星说：“用铁尺一根，锥成线眼，抽过条铁成线，逐寸剪断为针。……然后入釜，慢火炒熬。炒后入土末 [入松木、火矢（木炭）、豆豉三物（渗碳剂）] 覆盖，下用火蒸。留针二三口插于其外，以试火候。其外针入手捻成粉碎（完全炭化），则其下针火候皆足。然后开封，入水健定（淬火）。”

这种焖炉炼钢的方法在河南、湖北等地流传甚久。当时所用的焖炉是方形的，用土坯砌成。炉下部设有炉栅（即炉条），炉栅距地面约半尺高。在炉栅下面四周留有通风口，以便炉子自动抽风；炉子的正前面留有方形的装料口，在炉项上留有方形的通火口，以便出炉时散发热度。焖罐所用的罐子，可用铁罐（可焖几十次）、砂陶罐（只焖一两次）。焖钢所用渗碳剂主要是木炭，近代则有用煤或焦炭。另外，焖钢时还常掺入骨粉，因骨粉中含有丰富的磷酸钙，在红热木炭作用下还原出磷质，渗入熟铁中，可降低铁的熔点，加速碳的渗入，所以骨粉又常被称作渗碳的“催化剂”。焖钢冶炼的基本方法是：先把熟铁锻制成器物（称作焖件），调好配料，装入焖罐时要依次放一层渗碳剂配料，再放一层焖件，罐的底层和上层所放配料要厚些，焖件之间距离应该均匀，以便焖件能充分吸收碳分子。待焖罐装好后，用黏土把罐口密封，置入焖炉，再把装料口以土坯封闭，点火加热。加热时间视焖件大小而定，大者需 24 小时，滚珠等小件只要 3 小时，一般需 9 个小时。焖件出炉后要淬火，加以硬化。这种方法在缺乏炼钢设备的农村使用起来较方便，故一直在某些地区留传至近代。

## 二、铸铁脱碳钢技术

块炼铁虽然冶炼容易，但是其质量差，产量低，且须毁炉取铁，加上锻制成钢材又费时费工。相形之下，铸铁脱碳成钢无论是成本还是效率都比块炼铁渗碳炼钢强多了。在我国古代，由于较早地掌握了生铁的冶铸，而且推广快，产量大，铸铁脱碳成钢技术在探索的实践中，到西汉时取得了成功，使我国古代炼钢工艺和钢铁产业向前迈进了一大步，成为制作钢工具和兵器的主要途径。

### （一）炒铁与炒钢技术的发明和应用

随着对生铁柔化处理经验的积累，工匠们从中领悟到铸铁经过长时间的红热（氧化）退火可以变性，即可以变得像块炼铁一样柔软，即生铁可以炒成熟铁。由此发明了炒铁的技术。这种工艺是先将铸铁锤成碎粒，和木炭一起放在炒炉内，点火加热，并从上方向下鼓风，把铸铁加热到半熔融状态，通过不断搅拌（炒），增加铁和空气的接触，可使铸铁中的碳逐步氧化，温度随之升高。其中的硅、锰、磷等杂质氧化后和氧化铁变成了硅酸盐、磷酸盐夹杂物。随着碳分降低，铁的熔点增高，于是又凝聚成疏松的团块，再经锻打，排挤出夹杂物，便成为钢料。但是在古

代冶铁工匠的认知和技术条件下，他们只能凭经验而不知其机理，故很难控制铁中的含碳量，往往是一炒到底，得到的是熟铁。欲得到钢材还要对熟铁在锻打中经渗碳才能制得。

炒铁工艺操作简便，生产效率高，原料易得，因此能向社会提供大量廉价、优质的熟铁和制钢铁料。炒铁工艺自西汉发明之后，得到了推广和快速发展，到了东汉时期，铁兵器便全部替代了青铜兵器；那些大型的锻铁农具，如长 30 厘米的耢头和镰刀也显著增多，对农业生产的促进作用不言而喻了。还有铁制工具的增加和性能提高使石雕工艺得到扩展，各类的石碑、石像、石阙、石宝大量涌现，造就了“碑碣云起”的文化新景观。汉代画像石集中出现在南阳、沂南等冶铁发达的地区、魏晋时期大规模石方工程的兴修，都与炒铁技术的发明推广、优质锻造钢工具的普遍使用有着密切的关系。

炒铁技术的发明打破了生铁不能转化为熟铁的界限，沟通了原先各行其是的两个工艺系统，形成统一的钢铁冶炼加工技术体系。从而开辟了钢铁生产的便捷通道，为高产、优质的钢铁材料的大量供应提供了技术保障，对于中国过渡到完全的铁器时代具有关键作用。可以说炒铁技术的发明是继生铁冶炼技术之后，又一项具有划时代意义的创造发明。

由上述炒铁的工艺过程可见，炒钢技术仅是炒铁技术的延伸，能否将生铁炒成钢或炒成高、中、低碳钢完全取决于炒铁所得材料中的含碳量，当时只能凭借经验来掌控。由于东汉时通过炒铁技术取得大量熟铁，人们为了把生铁与高、中碳钢相区别，便赋予高、中碳钢一个专门名称——镵铁。但是，当时还是难以把熟铁与低碳钢准确地区分开来。这一认识可从古代的相关文献中窥见一斑。

东汉以后，不乏关于炒铁、炒钢的记载。宋代苏颂在《图经本草》中说：“初炼去矿，用以铸泻器物者为生铁，再三销拍，可以作镵者为镵铁，亦谓之熟铁。”文中“镵”是轧成的金属片，所谓“再三销拍”就是炒铁。在古籍中关于炒钢的最完整记载要数《天工开物》（卷十四）中的描述：“凡铁分生熟。出炉未炒则生，既炒则熟。生熟相和，炼成则钢。凡铁炉用盐做造，和泥砌成。其炉多傍山穴为之，或用巨木匡围。塑造盐泥，穷月之力不容造次。盐泥有罅，尽弃全功。凡铁一炉载土二千余斤，或用硬木柴，或用煤炭，或用木炭，南北各从利便。扇炉风箱必用四人、六人带拽。土化成铁之后，从炉腰孔流出。炉孔先用泥塞。每旦昼六时，一时出铁一陀。……若造熟铁，则生铁流出时相连数尺内，低下数寸筑一方塘，短墙抵之。其铁流入塘内，数人执持柳木棍排立墙上，先以污潮泥晒干，舂筛细罗如面，一人疾手撒揅，众人柳棍疾搅，即时炒成熟铁。其柳棍每炒一次，烧折二三寸，再用则又更之。炒过稍冷之时，或有就塘内斩划成方块者，或有提出挥锥打圆后货者。若浏阳诸冶，不知出此也。”（见图 3-7）。在以上炒炼生铁的过程中，撒放泥粉的作用主要是利用泥土所含硅土和氧化铁，既可帮助生铁中的碳氧化，又使其中氧化铁

生成易熔硅酸铁——炼渣，促使熟铁凝结成较大的块。这就是所谓的“混土精炼法”。特别要注意的是当时已把炼铁高炉与炒铁炉串联起来，让从高炉流出的生铁立即流入炒铁炉，趁热搅拌渗碳，从而节约了燃料，提高了效率。



图 3-7 《天工开物》中描绘的炒钢技术

## (二) 铸铁脱碳钢工艺的发明

这种工艺是把生铁铸成比较薄的铁板，经过热处理，在退火的同时氧化脱碳，使之成为低碳钢板或熟铁板。显然，此工艺是在铸铁柔化处理工艺基础上发展起来的，是这种技术的巧妙运用。这项工艺的特点之一是可控制适当脱碳，与可锻铸铁的区别在于它是由表及里全部地、均匀地适当脱碳，基本上并不析出石墨。因为它是以生铁为原料，因此所得的钢件中夹杂物很少。

北京大葆台西汉燕王墓出土的环首刀、簪、箭镞、扒钉等，经鉴定都是用铸铁脱碳钢制成的，表明这种工艺在西汉时业已发明。1976年在河南浞池汉魏窖藏中，不仅发现有许多铸铁脱碳钢的制品，例如，斧、镰等工具和兵器，而且还发现一批准备用来制造铸铁脱碳钢器件的、厚度在3~6毫米的方铁板和有铬铁板。郑州市博物馆在东史马发掘到六件东汉时的钢剪（见图3-8）。经金相检验，观察到剪刀的整个断面都是含碳在1%的碳钢，组织均匀，碳素体成匀称的球状；通体非常纯净，几乎看不到夹杂物，只在断面较厚的部位上见到微小的石墨。这都证明这种剪刀是先白口铁铸成成形的铁条，再经过脱碳退火而成钢材后，磨砺刃部，而后加热弯

曲做成交股式 8 字形的剪刀。充分表明东汉铸铁脱碳制钢工艺已趋成熟。



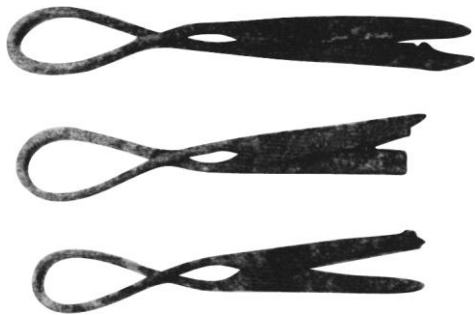
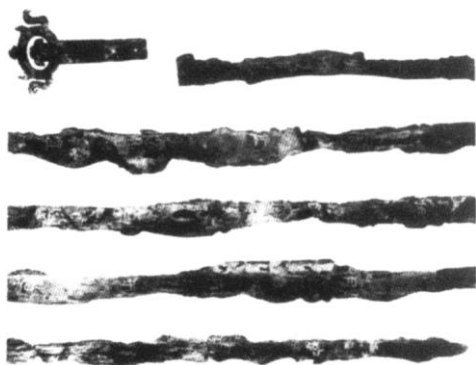


图 3-8 东汉铸铁脱碳钢的剪刀（河南郑州出土）

### 三、百炼钢技术

在汉代以前，为了从块炼铁中挤出夹杂物，工匠们在红热的炭火上加热和锻打它，从而渗碳提高了质量，成为渗碳钢。这就是百炼钢的起源和初始状态。在这种实践中，工匠们发现反复加热锻打的次数越多，钢件会越加坚韧，于是很自然地把加热锻打作为一种提高材质的正常作业。西汉以后，炒铁技术的发明，大大扩大了熟铁的来源。工匠们一方面以炒成的熟铁为原料，另一方面增加锻打的次数，以此来制作优质的渗碳钢，促使百炼钢技术步入成熟阶段。

近代著名学者罗振玉在其著述的《贞松堂吉金图》中记录有三件东汉广汉郡工官所作的金马书刀（即是有错金的马形纹饰的兵器），其错金铭文中都注明“卅涑”，其中一件铭文为：“永元十六年（东汉和帝，公元 104 年）广汉郡工官卅涑，史成、长荆、守丞熹主”，“卅涑”即三十炼。1974 年在山东苍山县东汉墓中出土一把环首钢刀，全长 111.5 厘米，刀身宽 3 厘米，刀身上有错金火焰纹和隶书铭文：“永初六年（东汉安帝，公元 112 年）五月丙午造卅涑大刀，吉羊宜子孙”。1978 年徐州博物馆在铜山县驼龙山汉墓出土了一把钢剑，通长 109 厘米，剑身长 88.5 厘米，剑把正面有错金铭文：“连初二年（东汉章帝，公元 77 年）蜀郡西工官王愔造五十涑△△△孙剑△”，内侧上阴刻铭文：“直（值）千五百”。1961 年在日本奈良县东大寺古墓出土了一把钢刀，上有错金铭文：“中平纪年（东汉灵帝，约公元 184 年）五月丙午造作，百炼清 [钢]”（见图 3-9）。

图 3-9 东汉（中平）时期的百炼钢刀  
（日本奈良栢本东大寺山古墓出土）

文献中“百炼”一词最早见于东汉王充的《论衡·状留编》，原文是：“干将之剑，久在炉炭，铄锋利刃，百熟炼厉，久销乃见作留，成迟故能割断。“百熟炼厉”

就是指“百炼”。“百炼”主要意思是锻铁必须达到足够的加热锻打的次数，才能保证剑刃具备锋利的程度。至于是否锻打必须进行百次，这似乎是没有严格的定量标准，因为在实际操作中，很难统计次数，真正的标准在于锻打的刀剑是否达到锋利的要求。

百炼钢工艺发展到三国时期已趋成熟，魏、蜀、吴三国都有工匠应用这种技艺生产刀剑。曹操曾令工匠为他制作“百辟利器”，据说造出了五把宝刀。曹植还为这类宝刀作文《宝刀赋》。据南朝齐梁人陶弘景所作的《刀剑录》说：“蜀主刘备令蒲元造刀五千口，皆连环，及刃口刻七十二涑。”晋代崔豹在《古今注·舆服》中说：“吴大皇帝有宝刀三、宝剑六，……刀一曰‘百炼’，二曰‘青犊’，三曰‘漏景’。”可见百炼钢制品在三国时期已很普遍。

#### 四、灌钢和苏钢技术

灌钢技术出现在南北朝时期。这项发明可以说是既独特又卓越，对于炼钢技术的大发展起到了关键作用。生铁含碳量高、熔点较低、质地坚硬过脆，而熟铁含碳量低、熔点较高、质地过软，这两种铁材性质差异较大，缺陷明显，影响了各自的应用。于是人们通过将熔融的生铁与熟铁（一般用炒钢、炒铁）一起加热、保温合炼，使碳分自生铁向熟铁中渗透、扩散，趋于均匀，而成为含碳适中的钢材。然后再经反复锻打，进一步使其组织纯化、均匀，最终成为优质高碳或中碳钢。这就是灌钢法。

灌钢亦称团钢，它的基本原理就是把生铁和熟铁按一定比例配合起来冶炼，即所谓“杂炼生铁”。南朝时炼丹家陶弘景曾说：“钢铁是杂炼生铁作刀镰者。”北朝稍晚时也记载了这一炼钢工艺。当时最著名的掌握这一工艺的匠人是綦毋怀文。他是一位攻习道术之人，曾经炼制过一种“宿铁刀”。《北史》卷八十一记载：“造宿铁刀，其法烧生铁精以重柔铤，数宿则成钢。”这“宿铁”即是灌钢。这个“宿”字的寓意是：生铁、熟铁如同雌雄两性的动物宿在一起交配，生铁在加热下泄出精液来，灌注到熟铁中，经过几度交配就成为钢材了。“宿铁”就是据此比拟的思维而得名。

灌钢法应是炼铁工匠在炒钢的实践中逐渐摸索出来的。将生铁炒成钢，当时最难操作的是火候的控制，往往会因炒炼“过火”，得到的是熟铁而不是钢，于是不得不再重新添一些生铁加以补救。这样把生铁和熟铁同时炒炼就逐渐掌握了“杂炼生铁”的炼钢规律，从而创造了灌钢法。

灌钢法较之以前的各种炼钢法，操作简便，劳动强度小，产率高，火候、配料的掌握比较容易，所以自发明以后，很快流行。经过唐代时期的实践进一步成熟，到了宋代已成为普遍流行的炼钢方法。宋代沈括（1031—1095年）在其著述的《梦溪笔谈》中对灌钢法作了较全面的论述。他写道：“世间锻铁所谓钢铁者，用柔铁

屈盘之，乃以生铁陷其间，泥封炼之，锻令相入，谓之团钢，亦谓之灌钢”。这里的柔铁是炒得的熟铁。他所说的灌钢生产工艺是将熟铁条卷曲成盘，配以适量的生铁，放入熟铁盘中，用泥封起来烧炼。泥封主要是为了防止加热时发生氧化脱碳。由于生铁熔点比熟铁低，生铁先熔化，铁汁流入熟铁盘中间，碳从生铁中向熟铁扩散，加上锻打，使成分均匀，成为硬度高、性能好的钢材。

到了明代，这种灌钢法又有进步。“生铁—炒熟铁—灌钢—锤锻”的工艺路线似乎成了最流行的炼钢法。所以宋应星在其《天工开物》中介绍了炒熟铁技术之后，紧接着说：“凡钢铁炼法，用熟铁打成薄片，如指头阔，长寸半许，以铁片束包尖（夹）紧，生铁安置其上（原注：广南生铁名堕子生钢者妙甚），又用破草履盖其上（原注：粘带泥土者，故不速化），泥涂其底下。洪炉鼓鞴，火力到时，生钢（按指名为‘堕子钢’的生铁）先化，渗淋熟铁之中，两情投合。取出加锤，再炼再锤，不一而足。俗名团钢，亦曰灌钢者是也。”明代的灌钢法与宋代的相比有它的独到之处：①不用泥封，而用涂泥的草鞋覆盖，使生铁在还原气氛下逐渐熔化；另外，可以使大部分火焰反射入炉内，以提高温度。②不把生铁块嵌在盘绕的熟铁条中，而是放在捆紧的若干熟铁薄片上，利用生铁含碳量高、熔点低的特点，使生铁液能够均匀地灌到熟铁薄片的夹缝中，增加了生熟铁之间的接触面积，使生铁中的碳能更迅速和均匀地渗入熟铁中，这是我国灌钢法的一大改进。

明代方以智的《物理小识》卷七、李时珍的《本草纲目·金石篇》、唐顺之的《武编·前编》都提到或介绍了灌钢法。从唐顺之的介绍中还可以发现，在灌钢技术的基础上，人们又发展出苏钢技术。相传苏钢技术是由江苏人发明而得名。苏钢技术的具体操作如下：炼钢时，先把熟铁（未经锻打的料铁）两条放入炉内红炽的火炭中，加盖鼓风。几分钟后去炉盖，用火钳钳住一块长方形生铁板入炉。此时炉内温度约 $1000^{\circ}\text{C}$ ，继续鼓风，当温度上升到 $1300^{\circ}\text{C}$ 左右，生铁开始熔化，将火钳左右移动使生铁液均匀地滴到熟铁上，同时用钢钩不断翻动熟铁。一块生铁滴完后接着用第二块生铁继续熔滴，淋铁完毕取出钢块放到砧上锻打成钢团，接着把钢团在另一炉中再加热并锻成钢条，待钢条呈红色时入水淬冷。

各地的苏钢技术大同小异，其产品质量不仅与原料的质量有关，还与淋用生铁的多少、滴抹的均匀程度、温度控制等操作技术有关，总之，工匠的熟练程度在其中起着关键作用。与古代灌钢技术相比，苏钢工艺的最大改进在于改善了生熟铁的接触条件，使淋漓的生铁和承受淋漓的熟铁都处于运动状态，并可由人来适当掌握。这比将生熟铁固定在一起加热自然要好些。当然，操作中工匠要付出更智慧的劳动。

在明清时期，安徽芜湖曾是苏钢生产最兴盛的中心，由于芜湖境内繁昌、当涂两县盛产铁，皖南山区产木炭，而且水陆交通便利，芜湖的炼钢作坊多从南京迁来，炼钢工匠也出自南京周边地区。从康熙到嘉庆年间（1662—1820年），芜湖炼钢作坊发展到18家。嘉庆六年（1801年）清政府加强了对炼钢作坊的管理，钢材质量

有了保证，芜湖生产的苏钢行销七省，最远的销往山西。乾隆年间，苏钢技术传到湖南湘潭，湘潭也很快成为苏钢又一冶炼中心。在咸丰年间，湘潭计有 40 余家的苏钢作坊，所产之钢，销于湖北、河南、陕西、山东、天津、汉口、奉天、吉林等地，产销畅旺。四川省的威远和重庆的苏钢生产也有较久的历史。例如，1938 年在重庆北碚看到的一个苏钢工厂，炼钢炉有 0.7 米高，炉膛由砂石砌成，炉内衬以耐火砂泥，结构形似陶甗，上口有泥制盖板，下部用两个平列的风箱鼓风。

## 第四节 有特色的铸造、锻造及金属表面装饰技术

铸造、锻造技术都是古代冶金史的重要组成部分，人们正是通过铸造、锻造或又铸又锻等技术，将青铜、钢铁等材料加工成实用的农具、手工工具、兵器及礼器、衡器等，促进生产的发展和社会文明的建设。

### 一、铸造技术

根据考古发掘的资料，已发现的古代冶铸遗址多达数百处，加上从这些遗址中又出土了不少冶铸器具和产品，为研究古代的冶铸技术提供了丰富的原始材料。范铸技术是用范组合成铸型进行浇注的方法。范是铸造金属器物的空腔器。中国古代铸造技术依据制型材料的不同可分为：石范铸造、泥范（陶范）铸造、金属型（包括铜范和铁范）铸造、失蜡法铸造、砂型铸造及叠铸技术（一种特殊的泥范铸造）等。范铸法具有多种工艺形式，如铸接、铸焊、铸镶等。

#### （一）石范铸造

古代石范出土的地域十分广泛，其中较早的有甘肃玉门火烧沟遗址出土的镞范。其实，石范是人们较早使用的铸范，在夏、商、周的许多冶炼遗址均有数量不等的石范发现。石范上凿刻的器物大多是斧、镞、矛、钺、剑等器形较简单的工具和兵器。所用的石材有很多种，出土最多的是砂岩，其次为滑石，此外还有片麻岩、千枚岩等，都是较易凿刻的石料。从考古发现来看，所出的石范大多数是双面范，部分有芯范，例如，某些斧范、钺范。石范范面的刻制大多相当合理和精致规范，特别是那些有纹饰的。为改善石范透气性较差的缺点，石范上都加刻有排气槽。

石范制作工艺大致如下：第一步，将 2 块砂石琢磨成一面平的近半圆柱体，上下大小；第二步，将 2 块范平面对合严密无缝后，在上范两端各凿一长方形凹槽，用于操作时搬抬用；第三步，在下范开出器形的凹槽，用铲刀修平，至此双合范制成；第四步，制犁铧内芯，以一环首刀形铁片为骨，外敷耐火泥，一层敷完需烘干或阴干后再敷下一层，数层后，用刀将其修成一面平、一面凸的舌形，经过烘烤即可使用。

外范、内芯制好后就可以准备合范、熔铁浇注。合范后用铁箍和楔子将范箍紧，即将浇注前将石范浇口朝上支撑成倾斜状，以待浇注。浇注后先抽出内范，依次去除楔子、铁箍，分开石范就可得到犁铧铸件，待冷却后清除毛边即可。

每次浇注使用后，都需检查外范、内芯，加以修整以备再用。用石墨粉涂刷外范微细裂纹处，防止再用时铁水浸入裂隙造成外范破裂。一般在使用两三个月后，石范都要大修一次，将整个表面打磨平整，修补处要烘干。

## (二) 泥范铸造

泥范铸造是中国古代的主要铸造方法。泥范是用经过挑选和简单加工的黏土和砂配制，经过缓慢阴干，再烘烤而成。泥范的制作技术是在制陶技术的基础上发展而来的，倘若烘烤温度较高时，泥范就近似陶质，故此种泥范又称陶范。

在众多的冶铸遗址中都有泥范的发现。目前发现年代较早的泥范有：1987年在内蒙古赤峰市敖汉旗西台聚落遗址出土的双合泥范，其出土的地层是红山文化的房基堆积，即属于新石器时代后期。在河南偃师二里头遗址中，出土的泥范已较多，表明当时的泥范铸造技术已比较成熟。之后的商周春秋战国时期，泥范铸造技术已得到广泛应用，众多当时的冶铸遗址都能证实这点。例如，山西侯马晋国铸铜遗址就出土了5万余块陶范，且陶范上多刻有蟠螭纹、云纹、弦纹、几何纹等，所铸器件涉及工具、兵器、礼器、车马器、生活用具及空首布（钱币）等，而且像空首布、带钩、环、箭镞等小件器物都是一次成型多件，生产效率较高。此后泥范成为最常见的范具。

早期的泥范大多从实物翻制，使用单一面料。到了商代晚期或西周初期，用料已有面料、背料之分。面、背料选用的原料在组成和颗粒度上有所不同，面料较细，可以提高其强度和可塑性，从而能制得清晰、精确的型范；背料较粗，含砂量多，并麝入植物纤维和熟料，以改善型芯的退让性。为了增加铸件表面的光洁度，还在泥范表面涂上细泥浆、煤粉或滑石粉。制泥范和制陶一样，黏土大多是就地取材。选用的黏土具有较好的可塑性及复印性，易于制作、修整、组合与装配。在范料中加入细砂是为了提高其耐火度和增加强度。麝入如麦秸之类禾本科植物等烧成的草木灰，可改善泥范的透气性，降低泥范的蓄热系数。对范料的加工处理大致有以下工序：原料精选、配料、练泥、陈腐、制范。其过程与制陶工艺相似。古代的泥范都需经过一定温度的焙烧，以提高其强度、耐火度、减少发气量。焙烧温度为700~1000℃，恰好稍低于完全烧结的温度。当然，温度稍高或烘烤时间长，泥范就陶化了，成为陶范。若温度再高，泥范就会烧塌而变形，废了。泥范的质量与铸件的好坏是直接相关的。泥范按组成铸范的数量可分为单合范、双合范、复合范。

泥范铸造又分为浑铸、分铸、焊铸及嵌铸四种方法。“浑铸”是把结构复杂的铸件分解为若干部分，各部分分别制作成单元泥范，再将若干件单元铸范组合成整

个器物的铸范，一次浇注而成，也叫做分范整铸法。中国古代大多数精美铜器多用此法铸成。“分铸”技术又称铸接工艺，是把金属铸件的整体分为先铸件和后铸件，把先铸件放到后铸件的铸范内，当浇注后铸件时，两者铸接为一体。著名的商代司母戊鼎、四羊方尊都是采用此法铸造的。可以说分铸法的发明与熟练运用，是古代泥范铸造技术的重大突破。“焊铸”是指铸件上的附件与主体用焊料结合。如山西太原金胜村出土的莲花方壶，两侧的虎形手柄是先铸好后，再用铅锡低熔点焊料将其焊接在壶体上。“嵌铸”技术是把铜器上欲设置的纹饰，预先用红铜制成纹饰片，放置在铸范上，浇注铜器时红铜花纹片就嵌铸在器物表面上，构成红铜色的纹饰。湖北随州曾侯乙墓出土盨缶表面的红铜纹饰就是用此法铸成的。

泥范铸造的工艺大致如下。

- (1) 制泥模 用塑性好的泥料制成实心泥模，在其上刻镂或模印花纹，再烘烤。
- (2) 制外范 用适合的范料在泥模上翻制出若干外范。
- (3) 制内芯 有三种方法：其一是将泥模表面刮去一层而成，刮去的厚度也就是器物的厚度；其二是利用芯盒制内范；其三是利用外范翻内范。
- (4) 合范、糊草拌泥、阴干 把分片制好的外范及内范合拢成型，糊草拌泥，阴干。为了固定泥芯，同时更好地控制铸件的壁厚，在合范时普遍使用泥芯撑或金属芯撑。
- (5) 焙烧 阴干后，将范放入窑内焙烧至  $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ 。
- (6) 浇注及清理 根据铸件所需成分熔炼金属，浇入范内，待冷却后打开型范，取出铸件，整理加工即可。

泥范铸造技术在商周时期已基本定型，其后变化不大，原先主要用于铸造青铜器，尔后推广到生铁铸造及其他金属。由于自然环境和气候条件的差异，加上各地的技术传承因素的影响，各地的泥范铸造技术各有特色。

### (三) 金属范铸造技术

使用金属材料（铜、铸铁）制作型范以浇注铸件的技术即是金属范铸造技术。其间型范可以重复使用，故大多用于批量生产，生产效率较高，但是技术要求严格，工艺操作复杂。

最早使用的金属型范是铜范，出现在春秋战国时期，主要铸造有阴纹或阳纹的铜质钱币。这种技术在秦汉时得到推广，但是用它铸造实用器物仍少见。铁范最早发现在战国时期的燕国和赵国的冶铸遗址。例如，1953年在河北兴隆燕国冶铸遗址中就出土了48副86件铁范，主要是农具范（见图3-10）。到了汉代，随着冶铁业的发展，铁范的使用范围和地域进一步扩大。河北、河南、山东及湖南一些汉代的冶铸遗址都有铁范出土。魏晋南北朝时，铁范的品种增加到20种以上，使用范围

继续扩大。只是在宋代以后，由于铁农具、铁工具大多采用锻制，铁范的使用仅限于犁铧、犁镜的制造，范围缩小了。山西阳城犁镜在明清时仍采用铁范铸造技术，沿用至近代。



图 3-10 兴隆出土的铁范

铁范铸造工艺过程大致如下。

(1) 制作泥范 先作金属模板或木质模框，在模板上刻制欲铸铁范表面的各部分，在金属模板周边围以模框，将配制好的泥范料填舂其内，待成型后去掉模框和模板，自然干燥。

(2) 翻制铁范 将制好的泥范合型，糊上草拌泥加固，阴干后送入烘范窑中烘烤，达到一定温度时出窑，冷却，浇注。待铁液凝固后，去掉加固泥和泥范，就得铁范。

(3) 浇注铁器 在铁范表面涂上双层涂料，将两扇铁范合在一起，加固后进行浇注，待铁液凝固后及时开箱，就得到所要的铸件。

铁范的材质随着人们认知水平的提高和冶铁技术的发展而不断改进。最初的铁范基本上是共晶白口铸铁，后来发现白口铁的缺陷，不仅是硬而脆，而且热稳定性较差，在高温铁液的反复作用下，会引起范体的胀裂。工匠们逐渐改用灰口铁为范材。灰口铁不仅坚固耐用，还有较好的热稳定性。范材的改进，保证了铁范的正常、耐久的使用，从而使运用铁范铸造技术生产常规农具、工具沿袭至今。

#### (四) 叠铸技术

叠铸技术是中国古代创造的大批量生产小型铸件的铸造技术，是在传统陶范铸造技术的基础上发展而来的。所谓的叠铸是将多层铸型叠合起来，组装成套，从共用的浇口杯和直浇道中浇注金属，一次得到多个铸件。

叠铸技术起源于战国时期还是西汉初期，尚有争议，但是它的广泛应用在王莽

时期是不容置疑的。叠铸工艺主要用于金属钱币的制造，所以研究叠铸工艺也都是由此深入。王莽之后的东汉，叠铸技术更为成熟，不仅用于铸钱，而且广泛用于车马器、衡器等小件器物的铸造。

完备的叠铸工艺包括以下工序步骤。

(1) 范盒的制作 要素有四：一、分型面的选取要有利于降低每层范的高度，以此增加铸范的层次，因而汉代的叠铸范全部采用水平分型面，但对于不同形状的铸件又采用不同的分型方式；二、减少吃砂（泥）量，也就是减少造型材料的用量，提高功效；三、范盒的制作要考虑泥范的收缩量、范盒壁及铸件的拔模斜度，保证范从范盒中能顺利脱出；四、要考虑叠铸范组装时榫卯定位问题，以保证不错位。

(2) 制范 由金属范盒翻制出泥范。型范的范料由黏土、旧范土、细砂、粗砂、草木灰、草秸等组成。其中的旧范土即是用过的范经破碎筛分后的土，它经过烘烤从而具有比生土优越的性能，例如，干燥收缩率、加热膨胀率都较小，较少开裂变形。选用这些比较粗糙、疏松的范料，特别是大量的草秸，烘烤后形成许多孔隙，有助于铸范的散热和浇注后铸件的清理。

(3) 内芯的制作 内芯有三种：一是自带式泥芯，即铸件的泥芯直接在范盒上做好；二是使用对开式垂直分型的陶质芯盒制成泥芯；三是没有芯座的泥芯。

(4) 叠铸范的合箱、装配 这一环节很重要，合箱的准确与否直接关系到铸件的质量。合箱有两种方法。一是心轴组合法：组装时将范块一个个叠在一起，用木质心轴由上而下贯穿中心孔，对准直浇口，再糊上加固泥，就成为一套叠铸范。二是定位线组合法：对于没有中心圆孔的范，为防止组装出差错，在每个范的一侧均划出三条定位线，另一侧做出二条定位线，再依照范两边的定位线进行组装。

(5) 范的干燥和烘烤 组装好的叠铸范干燥几天，再入窑焙烧。在窑内铸范逐层堆放，堆放要距离合适，保证受热均匀。铸范浇口向下或向上要加盖泥团，以防杂物灰尘进入铸范内。烘烤叠铸范，先是低温预热，缓慢升温。同时将窑门封住，减少水分随炉气逸出，让范内、范外升温一致。待铸范彻底预热后，炉温可以快速提升，达到 600~700℃ 以上，保温一段时间让铸范烘透，同时打开窑门和烟道，加速烘烤。铸范烘好后，缓慢冷却后再出窑，备用浇注。

(6) 浇注 不同的铸件采用不同类型的浇注系统，即有开放式、封闭式、半封闭式浇注系统。该系统一般由浇口杯、直浇道、横浇道、内浇道组成。浇口杯设在铸范的顶部和直浇道相连，有正漏斗和偏漏斗两种形状，其作用是便于金属液的浇注（见图 3-11）。封闭式浇注系统适用于较小铸件；开放式浇注系统常用于厚重的铸件。

## (五) 失蜡法铸造技术



在古代，为了铸造某些形制复杂而又要求精细的金属铸件，工匠们创造了失蜡法铸造技术。其原理是用蜡料制成与铸件相同的模，外敷造型材料，成为整体铸型，干燥后加热将蜡熔化掉，形成整体无分范面的空腔铸范，再将金属液浇入，凝固后脱掉外范，即得铸件。此法是现代金属工艺中的熔模精密铸造的前身。



图 3-11 《天工开物》中描绘的大钟和小件器的铸造

失蜡法在中国至迟出现在春秋早、中期。目前已确认为失蜡法铸件的，年代最早的文物是河南浙川下寺出土的春秋晚期的铜禁和铜盂（约公元前 6 世纪）。从湖北随州曾侯乙墓出土的诸多青铜器和其他一些文物的分析来看，在春秋晚期和战国早期，当时的楚文化地区的冶铸工匠已熟练地掌握了失蜡法铸造技术。

战国时期，失蜡法铸造技术的应用范围逐渐扩大，技术上也更成熟，它与泥范铸造、错金银等技术相配合，制造出一大批精美的青铜器。从各地已出土的失蜡法铸件来看，当时使用失蜡法铸造技术的地域也相当广泛。1977 年河北平山中山王墓出土的错金银龙凤铜方案、十五连盏烛台、嵌金银虎食鹿屏风台座和 1982 年江苏盱眙南窟庄出土的青铜错金银陈璋圆壶（约为公元前 315 年所铸）等都是古人留下的失蜡法铸造的艺术珍品。

汉代的失蜡法铸件大多是实用的器物，到了魏晋南北朝，佛教的传入，部分佛像开始用失蜡法来铸造。隋唐时期，工匠们将以宗教神像为代表的雕刻艺术与失蜡

法铸造技术相结合，制出了许多生动、精美的佛像。1974年陕西西安八里村出土的董钦造弥陀鎏金铜像（铸于公元584年），其中佛、菩萨、天王和狮子、香炉、莲花等均采用失蜡法铸成，再相互用榫卯和销钉连接，共由23件组装而成，反映了当时的技术水平。

明永乐年间铸造的武当山金殿，明万历年间铸造的山西五台山的铜塔和铜殿，还有闻名的明宣德炉（见图3-12）等都是失蜡法铸造的，表明失蜡法铸造技术在明代继续处于高水平阶段。这种高水平的铸造技术一直延续到清代，大量的、现存的清代失蜡法铸件很好地证明了这点。

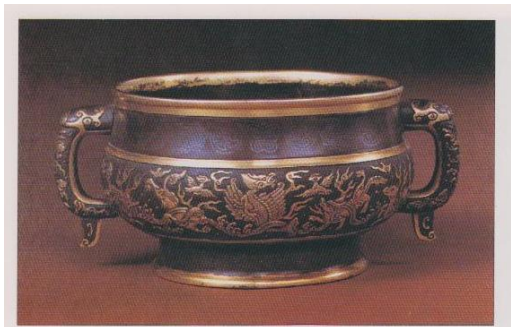


图3-12 失蜡法铸造的明宣德炉

许多文献记载了失蜡法铸造工艺，例如，南宋赵希鹄的《洞天清禄集》、明代宋应星的《天工开物》等。其工艺过程大致如下。

(1) 制芯 以黏土为主要材料，加入适量细砂和有机物质（马粪、纸浆）制成泥芯，部分泥芯内加以铁丝为芯骨。

(2) 制蜡模 蜡料由蜂蜡或石蜡，加上松香和油脂组成。据所铸的不同器物而选择不同的蜡料，例如需强度稍高，采用松香基蜡料；需塑性好者，用蜂蜡基蜡料。因气候变化会影响蜡料的塑性，故要加入适量的油脂。一般是将蜡和松香熔化后，加入油脂，搅拌均匀，冷凝后即成蜡料。利用剥蜡法或拨蜡法制作蜡模。

(3) 制型 在蜡模上涂挂涂料，涂料由马粪泥、纸浆泥等组成。先涂面层泥，一层面层泥阴干后再涂下一层，达到一定厚度后外敷外层料，加到一定厚度，以增加强度。设制浇注系统，自然干燥即可。

(4) 出蜡、焙烧 出蜡时，铸型可翻动者，浇口杯应朝下，以便排蜡；无法翻动者，则专设排蜡口于蜡模最低处。外施火力，使蜡料受热熔化流出铸型。注意加热顺序，让铸型自下而上依次升温，蜡料由下而上依次熔化流出。出蜡后的铸型进窑焙烧，烧掉残留在铸型内的蜡料，提高铸型的强度和透气性，并保持一定温度。

(5) 熔化、浇注 将铸型从窑内取出，立即将熔化的金属液浇注入铸型，待冷凝后再取出铸件进行清理和加工，即得成品。

## 二、锻造技术和热处理技术

### (一) 锻造技术

古代的锻造技术源于新石器时代人们对天然红铜的锤击。天然红铜是自然界中最早被利用的金属之一，由于它质软，通过硬物的锤打即可制成小件的装饰品或用具。冶铜工艺出现后，人们除了用铸造技术使铜合金（早期冶炼铜矿石，得到的大多是青铜之类的合金）赋形外，还常趁热锻打来加工赋形，也就是说从冷锻发展到热锻，从此以后，锻造技术成为金属加工的基本手段之一。

对金属铁的认识始于从天而降的陨铁。约在商代中期，中国先民发现陨铁的坚韧特性，遂通过加热锻打将其制成刀刃部，再将其嵌入青铜的部件而成为当时最锐利的兵器。1972年河北藁城和1977年北京平谷出土的商代铁刀铜钺都是这样加工而成。正是通过加热锻打，人们才逐渐熟悉了铁的热加工性能，并认识到铁与青铜在性质上的差异。从炼炉中，人们最早得到的铁是海绵状的块炼铁，也是通过加热锻打才将其从无用的“恶金”变成了有用的“良材”。加热锻打之中，除了排挤出那些在冶炼过程中混入的炼渣、矿渣之类杂质外，与炭火的接触无形中变成渗碳的过程，熟铁在锻打后不经意地变成了低碳钢。从出土的春秋中期到战国中晚期的一批经锻造过的块炼铁制品和用块炼渗碳钢锻造成的刀、剑等文物来看，可以说当时的锻造技术已达到较高水平。

到了汉代，绝大多数的兵器都是用块炼渗碳钢锻造而成，只有少数是由块炼铁直接锻造，特别像铁铠甲一类战场上主要的防护用具，这些铁甲片均以铸铁脱碳钢为原料经过锻打而成，既使用了热锻，又使用了冷锻。河南南阳石房庄遗址和巩县铁生沟遗址都发现了锻铁炉，表明锻造工艺已成为冶铁作坊重要的组成部分。迟在公元3世纪，中国的先民已应用夹钢、贴钢工艺了。

唐宋时期锻造技术不仅在继续进步，而且在许多地方形成了独特的优势。例如，宋代的蟠钢剑，它就是通过不断地反复锻打，使钢中杂质极少，组织致密，性能优异。沈括在《梦溪笔谈》中介绍说，它不仅可以“挥剑一削，十钉皆截”，而且“用力屈之如钩，纵之铿然有声，复直如弦”。据北宋史书记载，西夏不仅能冷锻制甲，而且锻造技术已相当发达。位于甘肃安西县南的榆林窟就有一幅带木风扇风箱的《锻铁图》，这就是当时西夏锻造技术的描述。青海羌族冷锻尤精，就是传承西夏的锻造技术。

明清时期，铁器的热锻和冷锻技术大展宏图，大至“千钧锚”，小到锯、钹、凿、针等都能锻造（见图3-13）。宋应星的《天工开物》中既记载了冷锻锯条，又总结了大型锻件千钧锚的锻造方法（见图3-14）。表明当时工匠已掌握了有相当难度的大型锻件的生产。由于锻件愈来愈大，单靠人力锤打已难操作，工匠们先后发明了人拉绳索和滑车提升重锤再自由落下锤打坯料的方法。这可以说是古老的锻压设备。14世纪以后又出现了畜力和水力落锤锻造设备，这些技术上的发明都是今天万吨水压锻床的前身。

锻造的产品远不止于人们常见的兵器、工具及农具，还有几项反映其技术水平

的传统产品。下面作一简单介绍。

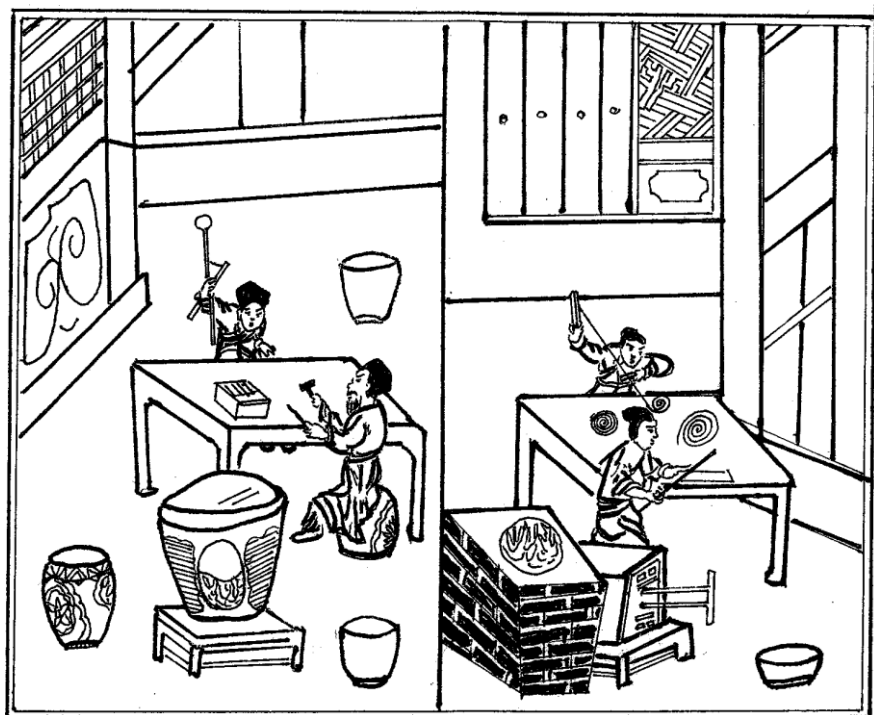


图 3-13 《天工开物》描绘的制针技术

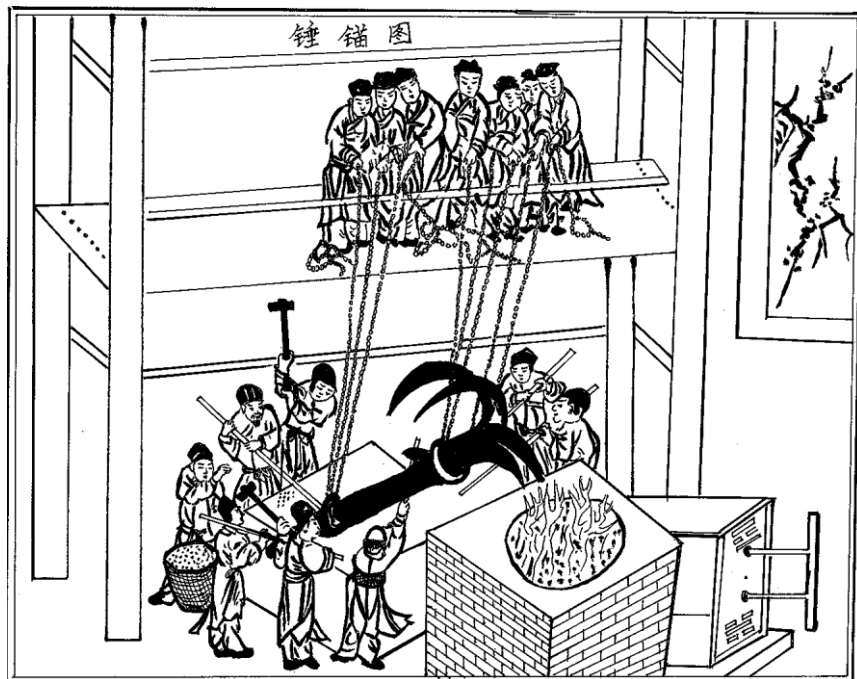


图 3-14 《天工开物》描绘的锻铁锚

## 1. 金箔

利用金所具有的极好的延展性能，将其锤打成很薄的片料即是金箔。制作金箔在世界各文明古国都有悠久的历史。根据考古资料，在中国的黄河流域早在商代前期已使用金箔来装饰某些贵重的器物。像四川广汉三星堆古蜀国文化遗址发现的金杖、金面罩、金虎等，都是在器物表面包裹一层经锻打而成的薄金片。使用金箔或金薄片的装饰技术一直沿用至今，但史书记载很少，直到明代，宋应星在《天工开物·五金》中才有总结性的描述：“凡金箔，每金七厘造方寸金一千片，粘铺物面，可盖纵横三尺。凡造金箔，既成薄片后，包入乌金纸内，竭力挥椎打成。”金箔和金薄片的加工，起初应是以单片敲打而成，何时中间加纸多层叠打，至今仍不清楚。传承下来的金箔生产传统工艺流程大致如下。

熔铸—拍叶（开坯）—下料（将金片切成小块）—打开子（打箔）—入傢生（下料）—丢捻子（打箔）—切箔—包装—成品金箔—背金—上光—切金—摇金—包装—成品金线。

此工序中有许多专门术语，说明此工艺的传承是有自己一套规章，并有些保密性。笼统地说就是将金块熔铸成一定规格金条后，再将其锤锻成金薄片，又经退火硬化后，再拍打至 0.01 毫米的金薄片，随后又将金叶之间撒上青石粉等固体润滑剂裹在乌金纸中反复锤锻至 0.15~0.32 微米的金箔。再用条状金箔加工得成品金线。由此可见，制作金箔的传统工艺除了锤锻外，还与热处理技术，固体润滑剂的使用及乌金纸等材料的质量有关。

## 2. 斑铜

斑铜是云南铜器中具有独特风格的一种金属工艺品，因其表面显现光泽闪烁的自然结晶的斑纹而得名。斑铜又分生斑和熟斑两种。

云南的会泽、东川地区盛产铜矿，在铜矿中有含铜达 99% 以上的自然铜。其铜质纯而块头大的，不用熔化，捡来即可锤打成香炉、花瓶之类工艺品。这就是生斑产品。这种自然铜通常在山洪爆发后在山涧采到。它经锻打成型、药水浸泡后，表面显现棱角冰裂状花纹，颜色艳丽，似樱桃花、无夹皮。当地人称其为金斑铜。金斑铜工艺品在明末清初以后一直成为深受喜爱的云南特产。

其工艺操作如下：先是锻打采来的铜坯，边加热边锤打，加热以不烧红为限，锤打有一套专门的工具，有方有圆，能伸能缩，反复锻打多次，直到锻成坯形。一般这种锻打壳子的技术都是有经验的老工匠操作。接下来是将壳子进行烧斑处理。所谓的“烧斑”即是对壳子进行再结晶的退火。用火炭加热（约 700~800℃）在架子上的壳子，不能吹风，最好在关上门窗的黑屋里操作，当壳子烧至发白，显出花纹即撤火，温度越高花纹越大，但不能熔化。斑纹就是形变后退火形成再结晶的晶粒和孪晶。烧斑完成后，先将器物表面锉磨平整，由粗到细，然后用松香粘在木轮上对其磨光，再用宝砂（用玉石加工的细粉）擦磨，最后用炭（由花桃木烧成）抛

光、打磨、精加工。打磨好的器物再浸泡在一种特制的药水中数次，最后一次就要 24 小时左右，直到色泽鲜艳。视花纹呈现的情况，药水可以加热。提斑着色后，将器物冲净、擦干，最后进行蜡封（在 100℃ 下烘时涂蜡），让蜡起着氧化保护膜的作用。

因自然铜原料有限，可改用电解铜加入 2%~3% 锌等合金元素，用精密铸造的斑铜产品即是熟斑。

熟斑的工艺操作为：先是在石墨坩埚中加入搭配好的原料和焦炭熔合金。接着用失蜡法浇铸成壳子，再对铸件通过 28 道工序整形，通过反复敲打，使表面压贴致密，并修饰缺陷，再锉平、打磨、抛光，由粗到细好几次。对于复杂的器物还需焊接组装，锉鏤花纹。熟斑的提斑着色蜡封工序与生斑的相同。

## （二）热处理技术

冶炼铸造的许多金属器物都需要进行热处理，以提高它的性能和扩展它的使用功能。常见的热处理技术包括退火、淬火、渗碳及贴钢技术。

### 1. 退火技术

退火是将金属、合金加热到适当温度，保持一定时间，然后缓慢冷却到室温的金属热处理工艺。退火工艺应用广泛，主要是为了降低金属的硬度和强度，也用于改变金属的其他性能或显微结构。最早，人们在加工自然铜时就发现，加工到一定程度，自然铜会变硬了，再敲打甚至会断裂；于是对它再次加热处理，它又变软而能进一步加工。人们就是经历这样的实践摸索出退火技术（最早的是再结晶退火）。通过对大量出土文物的分析可以肯定，中国先民在商代已能熟练地使用退火技术。

为了改善白口铁的脆性，至迟在公元前 5 世纪发明了生铁脱碳退火技术，从而使脱碳铸铁的农具、工具得以大量生产和应用，这就是生铁冶铸工艺路线在中国得到强势发展的重要原因。后来，随着经验的积累，退火技术又从再结晶退火发展出均匀化退火、稳定化退火、完全退火、不完全退火等多种方式。

### 2. 淬火技术

淬火是将金属器件加热到临界温度（铁素体转变为奥氏体温度）以上某个温度，保温一段时间，然后以适当速度冷却到室温的金属热处理工艺。应用最多的是钢件的淬火，淬火后的钢件组织为马氏体或贝氏体。淬火可提高钢件的强度、硬度。淬火后的钢件可经过不同温度的回火工艺得到具有不同组织结构和性能要求的工件，在工业生产中应用广泛。

尽管不了解淬火对铁内组织结构的影响，但是早在公元前 8—前 7 世纪，地中海地区的铁匠已熟悉淬火工艺了。对此，荷马史话《奥德赛》中已有记载。在中国古代，司马迁的《史记·天官书》、《汉书·王褒传》等也有淬火技术的描述，连文人都知道了。可以推测，在公元前 1 世纪淬火技术已在推广，许多出土的钢铁兵器可以验证这点。在这些出土的钢刀钢剑中，有部分则是采用了局部淬火技术，即只

对刃部进行局部渗碳和淬火，表明淬火技术在进步。三国时期著名的造刀能匠蒲元，对用不同水质淬火，可影响钢的质量已积累一些经验。据宋代的《太平御览》三百五十卷“蒲元传”记载：蒲元为诸葛亮造刀三千口，蒲元认为汉水纯弱，不适宜淬火用，命人去成都取蜀水。取水返回后，蒲元用之淬火，发现淬火时声响不对，问取水人怎么回事？取水人很吃惊，不承认有错。蒲元用刀在水中一划后说，你加进八升涪水还不承认？取水人才叩头认错，道出实情：承认在渡河时不小心将水罐打翻，洒出部分水，因害怕完不成任务，就用涪江水补进罐中。众人敬佩蒲元称他为神妙手。刀制成后，在竹筒内装满铁球，举刀砍之，当即劈开，被誉为神刀。北朝綦母怀文制作宿铁刀后，即“浴以五牲之溺，淬以五牲之脂”。表明当时他已使用牲畜的尿和油脂作淬火冷却剂。能采用多种淬火剂说明当时的工匠对不同冷却速度的淬火与成品的性能之间的关系，已有一些经验。在而后的淬火实践中，经验得到提升，逐渐发展出多种类的淬火技术。如按冷却方式，可分为直接淬火、分级淬火、等温淬火、水冷淬火、油冷淬火、气冷淬火、喷液淬火、喷雾淬火等；按淬火部位分为整体淬火、局部淬火及表面淬火；按加热方式，分为盐浴淬火、铅浴淬火、火焰淬火等。淬火的技术要素是掌握好加热温度、保温时间和冷却速度。

### 3. 渗碳技术

渗碳技术是为了增加钢件表层的含碳量和一定的碳浓度梯度，将钢件在渗碳介质中加热并保温，使碳原子渗入表层的化学热处理工艺。若钢中含碳过低，淬火效果又不理想，就势必影响钢件的硬度。最常用和有效的方法就是往钢中适量增碳。根据对河北满城出土的钢剑和错金书刀的鉴定，表明它们都经过了固体渗碳技术处理，由于渗碳剂中可能使用了骨灰作促渗剂，钢中夹杂有含钙、磷较多的氧化亚铁。钢制品经过表面渗碳处理，获得心部柔韧而表面硬化的良好性能。

将块炼铁通过渗碳变成钢是渗碳技术的最早应用，自汉代起人们使用固体渗碳技术生产钢剑、钢刀等兵器大行其道。在宋代，渗碳技术又发展出一种生铁淋口工艺。经鉴定河南登封出土的宋代的铁锄等都是经过生铁淋口处理。到了明代，这种生铁淋口技术逐渐成为强化工具、农具刃口的常规加工技术，一直沿用到近代。所谓的“生铁淋口”即是用熔化的生铁作为渗碳剂，加以渗碳处理，以提高农具刃口表面的含碳量，使刃部一侧为软而韧的熟铁，另一侧为硬而耐磨的高碳钢，从而使刃部耐磨锋利，而且具有自磨锐利的特点。对此工艺，宋应星的《天工开物》有所描述。

古代固体渗碳工艺在而后还发展出一种固体渗碳制钢的方法——焖钢。其具体工序如下：熟铁工件放在密封罐内，填充以木炭粉、骨粉等渗碳剂以及少量起催化作用的物质（如食盐、碳酸钠、黄血盐等），一起放到炉内加热，达到一定温度后保温 10 小时左右，视工件大小，也有长达一昼夜以上，出罐后立即进行淬火。焖



钢的器件即成。

#### 4. 贴钢技术

所谓的夹钢、贴钢工艺即是在某些兵器、小农具、工具的刃口部分锻焊（夹在中间或贴在表面）上一块含碳较高，硬度较强的钢，使刃口锋利耐久，而基体是由含碳较低的钢制成，两者在固态下锻接在一起。这种技术使不同材料合理组合，充分发挥各自的性能优势。北宋沈括在《梦溪笔谈》和明代宋应星在《天工开物》中都记载了这种技术。

### 第五节 中国古代钢铁技术体系的特色

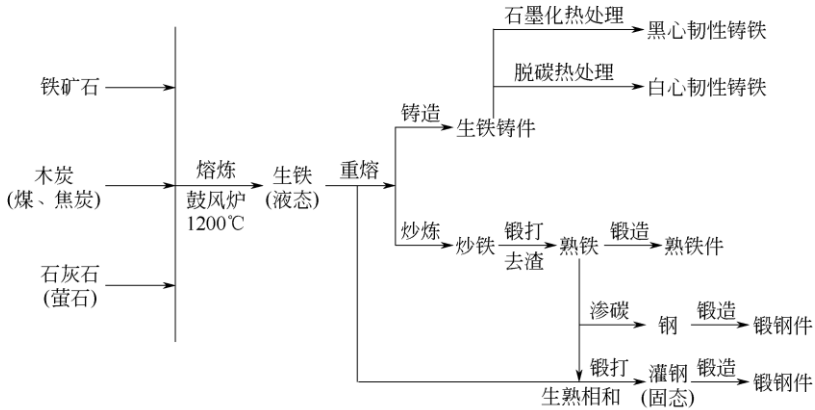
中国的冶铁业是从青铜冶铸业中产生的，青铜冶铸业的建立又与制陶业的发展密切相关。烧陶的高温技术，包括对炉温和炉内气氛的控制为工匠所倚重。他们又将这一经验应用于青铜冶铸上，遂发展形成以铸为主的工艺传统和技术观念，创建了世所公认的灿烂的商周青铜文明。传承青铜冶铸技术精华的冶铁业，在继承中把这一工艺传统和技术观念得以发展，形成中国独有的钢铁发展的技术路线。

对于先秦时期的冶金工匠，青铜和其他一些有色金属冶铸的成功经验，使他们深信金属（包括它的矿石）只有把它放到熔炉中加热熔化成水，再铸成所需的器物，这是最佳的生产途径。在冶铁中，当他们从炼炉中得到的铁水（生铁）再铸成器件后，却发现这器件太脆了，经不起锤打磕碰。不信邪的工匠干脆把器物放到窑里烧它几天，终于摸索出将生铁加工成可锻铸铁或低碳钢和熟铁的多种方法。硬是坚持原先的传统和观念，走出冶铸钢铁的有特色的路径。这样一来，在古代中国，形成了一个有特色的，以生铁为本的钢铁冶炼加工体系。

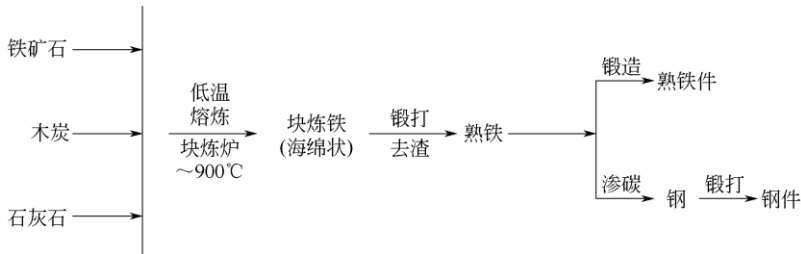
西方（主要是欧洲）的情况与中国的不同。在青铜时期，他们沿用的是锻铸并举，以锻为主。这可能是偏爱锻打自然铜和青铜合金而形成的工艺传统。待到冶铁业出现后，他们仍习惯于用锻打技术来加工在低温下得到的块炼铁，锻打挤渣得到熟铁，再渗碳得到钢材。西方古代一直沿用这种单式的钢铁技术路线。据说，罗马时期，西方人也因炉温较高而炼得了生铁，当发现生铁器件根本无法锻打后，便漠视这一发现，这种冶炼技术也被弃置不用。欧洲直到14世纪才重新认识和使用生铁，与中国约公元前8世纪就使用生铁冶铸技术相比，其间相差约21个世纪。这在技术史上是件令人惊奇的事件。中国著名的技术史专家华觉明认为，这是由于在世界不同地区，因种种原因形成了不同的工艺传统和技术观念所致。现将华先生总括的中国古代与西方早期的不同钢铁技术路线绘于图3-15。

两条不同的技术路线当然会对各自的钢铁冶金业的发展产生重要的影响。在中国自从秦汉起，钢铁制造的生产工具，特别是农具对农业生产乃至整个社会生产力

的促进是显而易见的。农业、手工业的发展又增进了商品经济的活跃和城市的发达、经济的繁荣，特别是，有了剩余的粮食，使那些不直接从事体力劳动的知识阶层有了可靠的物质支撑，推动了文化的进步。总之，钢铁冶金业的发展对于中国封建社会的演进是至关重要的。同时，它为中华民族的各民族的融合和国家的统一、炎黄子孙创造的华夏文明的连续发展奠定了坚实的物质基础。



(a) 中国古代的钢铁技术路线



(b) 西方早期的钢铁技术路线

图 3-15 中国古代与西方早期的不同钢铁技术路线

北京科技大学（原北京钢铁学院）冶金与材料史研究所的专家学者经过深入研究，总括出中国在 17 世纪以前，至少有 10 项钢铁技术居世界领先地位，见表 3-2。

表 3-2 中国古代钢铁技术的 10 项发明

发明内容	时间（公元世纪）	
	中国	欧洲
生产出白口铁铸成实用器	前 6	14
退火生产出韧性铸铁农具、工具	前 5	18
铸铁模成批生产农具、工具	前 4~前 3	19
生铁固体脱碳成钢材、条材	前 5	

生铁炒炼成熟铁	前 2	18
---------	-----	----

续表

发明内容	时间（公元世纪）	
	中 国	欧 洲
百炼钢制造名刀、宝剑	1~2	6
水排鼓风用于冶铸	1	16
灌钢法用液态生铁对熟铁渗碳成钢	4	
用煤/焦作炼铁燃料	10/16	17
冶铸用活塞式木风箱鼓风	17	18

此外，与领先的金属冶炼技术相匹配，中国古代广泛使用铸造技术，形成了以铸为主的工艺传统。中国铸师发展了一系列卓越技术，其中较为突出的有：

（1）在商周时已熟练地使用陶范来铸造青铜器；在战国时期就开始利用铁范进行大规模的生产，保证了产品的规范和批量生产；

（2）至迟在战国时期已经掌握了用叠铸技术来生产钱币、箭镞等小型器件；

（3）由于使用竖炉冶炼，提高了液态金属的铸造温度，为大型器件的铸造创造了条件。在商代就铸造重量过百斤的较大青铜器，唐代以后又陆续铸造出像当阳铁塔、沧州铁狮、登封铁人等大型铸件。特别是重达 46.5 吨的北京永乐大钟、重达 76 吨的河北正定铜佛等大型器件都显示出当年高超的铸造技艺。