

中国冶金史

论文集

北京钢铁学院

1986年10月

这本论文集收集了近年来北京钢铁学院冶金史研究室，金相实验室，压力加工实验室等单位在国内外16种杂志中已发表的有关中国冶金史研究的部分论文。为了节省篇幅，对论文进行了删节。

中国古代冶金技术有着辉煌的成就，1966年以前，北京钢铁学院图书馆根据中国科学院科学史委员会的安排，在已故胡庶华馆长的领导下，数名教师开展过中国冶金史的文献研究工作。为了系统阐明中国古代冶金技术发展的历程，特别是钢铁冶金技术，以及对中国及世界文明的贡献，自1976年开始，北京钢铁学院上述各单位的教师，先后与全国各省、市考古、文物部门合作，用现代化实验手段研究各种金属文物四千多件，调查遗址、遗迹70余处，取得了一些成绩，受到了国内外考古、历史、科技史、冶金学者的鼓励。有些研究内容已被广泛引用。为了交流研究成果，利于查找，特编印这本论文集。

论文集集中部分文章曾使用集体笔名，如李众。我院参加冶金史研究的人员有所变化，主要成员包括有柯俊、黄务淦、丘亮辉、高武勋、韩汝玢、吴坤仪、孙淑云、于长青，李秀辉、张长生、姚建芳、刘建华等，杨尚灼、吴承健、马肇增、王克智、叶杏圃、屠懽、秦文秀等均参加了研究工作。

北京钢铁学院冶金史研究工作，一直得到原社会科学院副院长，考古研究所所长夏鼐先生生前的指导、鼓励和支持；中国科学技术史学会第一届理事长物理学教授钱临昭先生的鼓励和支持；并得到了国家和各省、市博物馆以及许多大学考古学专业、研究单位、各学报的大力支持和密切合作，在此论文集出版的机会，我们谨向所有协作，支持和帮助我们的单位和个人表示衷心的感谢和敬意。

柯 俊

一九八六年九月

目 录

总 论

1. 冶金史——《中国大百科全书》矿冶卷条目……………柯 俊 (1)

有 色 冶 金 史

2. 中国早期铜器的初步研究……………孙淑云 韩汝玟 (12)
3. 战国以前我国有色金属矿开采概况……………**杜发清** 高武勋 (22)
4. 铜绿山冶铜遗址冶炼问题的初步研究……………朱寿康 韩汝玟 (26)
5. 广西北流县铜石岭冶铜遗址的调查研究……………孙淑云 刘云彩 唐尚垣 (30)
6. 从传统法炼锌看我国古代炼锌技术……………胡文龙 韩汝玟 (36)

钢 铁 冶 金 史

7. 关于藁城商代铜钺铁刀的分析……………李 众 (39)
8. 中国封建社会前期钢铁冶炼技术发展的探讨……………李 众 (53)
9. 易县燕下都44号墓葬铁器金相考察初步报告……………压力加工专业 (68)
10. 河南汉代冶铁技术初探……………河南省博物馆等 (70)
11. 关于“河三”遗址的铁器分析……………《中国冶金史》编写组等 (86)
12. 巩县铁生沟汉代冶铸遗址再探讨……………赵青云 韩汝玟等 (92)
13. 郑州古荥镇冶铁遗址出土铁器的初步研究……………丘亮辉 于晓兴 (108)
14. 从古荥遗址看汉代生铁冶炼技术……………《中国冶金史》编写组 (115)
15. 满城汉墓部分金属器的金相分析报告……………金相实验室 (120)
16. 汉长安城武库遗址出土部分铁器的鉴定……………杜弗运 韩汝玟 (126)
17. 河南浍池窖藏铁器检验报告……………金属材料系 中心化验室 (128)
18. 从浍池铁器看我国古代冶金技术的成就……………李 众 (133)
19. 古代展性铸铁中的球墨……………丘亮辉 (137)
20. 郑州东史马东汉剪刀与铸铁脱碳钢……………韩汝玟 于晓兴 (141)
21. 中国古代的百炼钢……………韩汝玟 柯 俊 (143)
22. 我国古代钢铁冶炼技术的重大成就……………冶金史研究室 (147)
23. 中国冶金技术的兴衰……………丘亮辉 (152)

古代金属工艺发展史

24. 鍍金……………吴坤仪 (157)
25. 关于满城汉基金丝、金箔的实验报告……………压力加工实验室 (162)
26. 秦始皇陶俑坑出土的铜鍍表面氧化层的研究……………韩汝玟 马肇曾 王曾隽等 (164)
27. 荥阳楚村元代铸造遗址的试掘与研究……………吴坤仪 于晓兴 (171)

28. 明永乐大钟铸造工艺研究.....吴坤仪 (180)

29. 梵钟的研究及仿制.....吴坤仪 (185)

30. 沧州铁狮的铸造工艺.....吴坤仪 李京华 王敏之 (191)

31. 当阳铁塔铸造工艺的考察.....孙淑云 (195)

32. 中国古代铜鼓的制作技术.....吴坤仪 孙淑云 张世詮 王大道 (198)

研 究 方 法

33. 试谈冶金史的研究方法.....丘亮辉 (208)

* * *

英文摘要..... (A1)

* * *

图版..... (B1)

Contents

1. A brief history of metallurgy T. Ko (1)
2. A preliminary study of early Chinese copper and bronze artefacts
..... Sun Shuyun and Han Rubin (12)
3. The mining of nonferrous metal minerals in ancient China
..... Du Faqing and Gao Wuxun (22)
4. A preliminary of copper smelting in Tonglushan
..... Zhu Shoukang and Han Rubin (26)
5. A Han dynasty copper smelting site at Tongshiling(copper ridge),
Beiliu, Guangxi...Sun Shuyun, Liu Yuncai and Tang Sangheng (30)
6. A crucible method employing built-in condenser for zinc smelting
..... Hu Wenlung and Han Rubin (36)
7. Studies on the iron blade of a Shang dynasty bronze Yueh-axe
unearthed at Kao Cheng Li Chung (39)
8. The development of iron and steel technology in ancient China
..... Li Chung (53)
9. A metallographic study of c3BC iron artefacts unearthed at Yixian,
Hebei.....Metal Working Laboratory (68)
10. The iron and steel making technique of the Han dynasty in Honan
.....Honan Provincial Museum, Blast Furnace Plant, Shoutu
Iron and Steel Company and Chinese Archaeometallurgy
Study Group (70)
11. Iron artefacts of Han dynasty excavated from Henan No.3 site at
Teishenggou, Henan (Honan)
.....Chinese Archaeometallurgy Study Group, Henan
Provincial Museum (86)
12. A reinvestigation of the remains of the iron and steel works of
Han dynasty at Tieshenggou, Henan
.....Zhao Qingyun, Li Jinghua, Han Rubin, Qiu Lianghui and T. Ko (92)
13. A preliminary study of iron artefacts unearthed at Iron Works
"Henan No.1" of Han dynasty at Guxing, Henan
.....Qiu Lianghui and Yu Xiaoxing (108)
14. The iron making technigue of Han dynasty as evidenced from
"Henan No.1" site at Guxing, Henan
..... Chinese Archaeometallurgy Study Group (115)
15. Microscopic examination of metallic objects unearthed from a Han
Tomb (113BC) at Mancheng, Hebei
.....Optical Microscopy Laboratory (120)
16. The metallographic structure of iron arm found at an armoury site

	(200BC-cAD25) of Han dynasty ...Du Fuyun and Han Rubin (126)
17.	Composition and Microstructure of iron artefacts found in hoards from Mianchi, Henan (AD25-280)Optical Microscopy Laboratory and Centre for Chemical Analyses (128)
18.	The development of iron smelting technique as seen from the artefacts, Mianchi Hoards Li Chung (133)
19.	Spherular graphite in ancient malleable iron..... Qiu Lianghui (137)
20.	The excavation of Dongshima scissors and steel making by solid state decarburization of cast iron in ancient ChinaHan Rubin and Yu Xiaoxing (141)
21.	Steel of hundred refining (Bailian Steel) in ancient China Han Rubin and T. Ko (143)
22.	The achievements of iron and steel making in ancient China BUIST Archaeometallurgy Group (147)
23.	The ups and downs of metal production in ancient China Qiu Lianghui (152)
24.	Chemical distribution of mercury in ancient Chinese gold gilt Wu Kunyi (157)
25.	The gold wire and foil found in the Han Tomb (113BC) at Mancheng, Hebei Metal Working Laboratory (162)
26.	Studies of the black passive oxide film on bronze arrowheads unearthed with the Terra-Cotta Warriors near the Qin Tomb (210BC) at Lintong, Xian Han Rubin, Ma Zhaozeng, Wang Zengjun and T. Ko (164)
27.	Studies of a foundry site of Yuan dynasty (AD1271-1368) at Chucun village, Xingyang, Henan..... Wu Kunyi and Yu Xiaoxing (171)
28.	Casting technique of the 46tons bronze bell of Yongle period (cAD1420) Wu Kunyi (180)
29.	Casting of Buddhist bells Wu Kunyi (185)
30.	The casting technique of the Iron Lion at Cangzhou, Hebei (AD953) Wu Kunyi, Li Jinghua and Wang Minzhi (191)
31.	The foundry technique of the Iron Pagoda (AD1061) at Dangyang, Hubei.....Sun Shuyun (195)
32.	Bronze drum making techniques in ancient southwestern China Wu Kunyi, Sun Shuyun, Zhang Shiquan and Wang Dadao (198)
33.	Methods of archaeometallurgical investigation.....Qiu Lianghui (208)
	* * *
	Abstracts (A1)
	Plates (B1)

1 冶金史

柯 俊

在新石器时代后期人类开始使用金属，经历了铜——青铜（包括铜砷、铜锡、铜铅和铜锌合金），铁（包括块炼铁、生铁、熟铁或钢）几个时代。世界各地进入铜器、铁器时代的时间各不相同，技术发展的道路也各有特色。冶金技术和金属的使用同人类的文明紧密联系在一起。新石器时期的制陶技术（用高温和还原气氛烧制黑陶）促进了冶金技术的产生和发展。冶金技术的发展提供了用青铜、铁等金属及各种合金材料制造的生活工具、生产工具和武器，提高了社会生产力，推动了社会进步。中国、印度、北非和西亚地区冶金技术的进步是同那里的古代文明紧密联系在一起的。16世纪以后，生铁冶炼技术向西欧各地传播，导致了以用煤冶铁为基础的冶金技术的发展，这一发展后来又和物理、化学、力学的成就相结合，增进了对冶金和金属的了解，逐渐形成了冶金学，进一步促进了近代冶金技术的发展。

铜器时代——铜石并用时代

人类在新石器时代晚期开始利用天然金属。此后逐渐以矿石为原料冶铸铜器。此时以使用石器为主，也使用少量小件铜器，被称为铜器时代或铜石并用时代。

早期对天然金属（铜、金、陨铁）的使用 在现在伊朗西部艾利库什（Ali Kosh）地区发现公元前七、八千纪用天然铜片卷成的铜珠。在伊朗中部纳马克湖南部泰佩锡亚勒克（Tepe Sialk）发现了公元前五千纪的铜针。在克尔曼（Kerman）之南的叶海亚（Yahya）地区发现了公元前五千纪后期天然铜制成的铜器。

天然金虽然容易发现，但一般块金尺寸较小，数量较少。砂金的利用则有待冶金方法的出现，所以出现较晚。目前世界上已发现金制品最早的为公元前五千年。南美最早使用的金属则为天然金。在秘鲁，对金的加工始于公元前1500年，而用铜和铜银合金则在公元前1000年以后。11~14世纪的金人反映了印第安文化。

陨铁不如天然铜、金容易识别，使用较晚。目前最早的陨铁器是公元前四千纪的铁珠和匕首（含镍7.5~10.9%），出土于尼罗河流域的格泽（Gerzeh）和幼发拉底河流域乌尔（Ur）地方。

中国的最早陨铁文物是商代中期（约公元前13世纪中叶）的藁城铁刃铜钺。

最早冶金 天然金属的资源有限，要获得更多的金属，只能依靠冶炼矿石制取金属。人类在寻找石器过程中认识了矿石，并在烧陶生产中创造了冶金技术。

矿石炼铜是人类文化发展的重要里程碑。最先使用的是氧化铜矿如（孔雀石），将氧化矿石与木炭混合加热还原得到金属铜。已知最早的人工冶炼的铜器出土于伊朗叶海亚（Yahya）地区（约当公元前3800年前），含有少量砷（0.3~3.7%），其中有的经过铸造、冷加工和退火。与此同时，在埃及和美索不达米亚使用含镍或含砷铜器。碱性砷酸铜矿与孔雀石相似，

用它或硫砷铜矿冶炼砷青铜比较容易，镍则往往与铜共生，容易炼成镍铜。砷铜和镍铜的使用延续了相当长的时间。中东的炼铜技术在公元前三千纪向欧洲和印度传播，保持了含镍和用砷的特点；在较晚的铜器中，如印度河流域哈拉帕（Harappa）文化，在公元前2500～前2000年也有含砷或镍的锡青铜。已知的最早含锡青铜器，产于现伊拉克地方的乌尔第一王朝（公元前2800年），含锡8～10%。

中国的早期冶金 中国甘肃东乡马家窑文化的青铜刀（含锡6～10%），是迄今发现的中国最早的青铜器物，约当公元前三千纪初期，与乌尔青铜同时。此外，马厂文化的青铜刀，约当公元前三千纪后期，相当于印度河流域哈拉帕文化发展锡青铜的时代，和东南亚泰国北部嫩诺塔（Nor Nok Tha）出土的锡青铜时代。锡青铜在中国的出现和发展与两河流域的历史相当，而早于东南亚。而且，中国早期没有出现砷铜和含镍铜合金的阶段，这些都表明中国青铜技术是独立发展起来的。

青 铜 时 代

青铜主要指铜锡合金，古代青铜往往还含有铅或其他金属。铜中加入锡可以改善性能。青铜的熔点比铜低，铸造性能好，逐渐成为古代铜器的主要品种。最早的锡青铜出现于两河流域，约当公元前3000～前2500年。在公元前两千纪，铜及青铜冶炼技术达到了全盛时代。埃及青铜时代约开始于公元前2600年。欧州则在公元前1800～前1500年经历过砷铜时代后才出现锡青铜。

中国商代以前的青铜器 在商代之前和商代初期，黄河流域已经出现了一些铜器，包括红铜、锡青铜和铅青铜。山东胶县出土了龙山文化的极为原始的黄铜锥；河南登封出土公元前三千纪末期的青铜片。河南偃师二里头文化三期（公元前17世纪）已能铸造锥、铈、铃和铜爵等较复杂的青铜器物。夏家店下层文化也出土了红铜、青铜器和石范。甘肃齐家文化和火烧沟文化遗址出现了大批铜、青铜器和金银饰品。此时已掌握铸造中空器物的技术，如铜四羊权杖首。权杖首还使用了嵌铸技术，这些都反映了较高的铸造水平。

商周青铜铸造 商周是中国青铜器的鼎盛时期，在技术上达到了当时世界的高峰。出土大批商周铸造铜器包括生产工具（斧、铈、钻、刀、削、锯、锥等）、农具（锄、铲、耒）、武器（戈、矛、钺、镞等）以及大量的礼器和生活用器。河南偃师二里头出土了近30件商代早期（公元前16世纪）的锡青铜器，河南郑州出土的商代中期两只方鼎，分别重64.2公斤和82.3公斤，高约1米，后者含铅17%、锡3.5%。河南安阳出土的商代晚期的司母戊鼎，是世界上已出土的最大古青铜器。这反映了在商代后期中国青铜铸造的卓越技术和宏大规模。古代铸造遗址中往往发现铜锭而遗存铜矿甚少，可以推断，此时使用了冶铜场冶炼的铜料，而在铸造作坊制作青铜器。

铸造技术 中国商周青铜器大都用经过焙烧的泥范铸造，晚期则和世界其他国家一样使用少量铜范。殷墟妇好墓出土了精美青铜器四百四十多件，有些器物形状尺寸基本相同，可能已用一套模制作几套范，这批铜器中还有结构复杂的铸件，如汽柱甗形器（青铜汽锅）。

这一时期利用陶范、铸接的办法，铸造了许多精巧的青铜器，如湖南出土的四羊尊，河南出土的莲鹤方壶。春秋战国之交（公元前6～前5世纪）利用泥范铸成的编钟，不仅是声学、律学上的光辉创造，也是青铜铸造工艺的卓越成就。湖北随县曾侯乙墓（约公元前430年）出土青铜器四千余件，总重达十吨，其中错金铭文的编钟多达64枚，每钟两音。另有楚王赠

送的重达135公斤的铸钟，同墓还出土了两只重320公斤的大缶和用失蜡法铸造的结构极为复杂的一套尊和盘。

矿石和熔剂 冶铜的一个重要发展是硫化铜矿的使用，在阿尔卑斯山区，至迟在公元前1200年已经使用硫化铜矿，并生产了重达40公斤的铜锭。

在中国，古代使用的铜矿石主要是氧化铜。湖北大冶铜绿山矿冶遗址采用了木结构支护和排水提升设备。矿石在矿区用竖炉冶炼，附近遗留有流动性很好、铜渣分离良好的玻璃质炉渣约40万吨，渣中含铜平均0.7%。根据炉渣成分和炉旁的赤铁矿推测，冶炼时使用了熔剂，以调整炉渣成分，提高渣的流动性。

冶炼设备 在冶炼设备方面，最早使用了陶质容器，从外面加热或直接埋入木炭中，加热燃烧，以得到高温和还原气氛。后来发展成为带有风嘴的直径约30厘米的地炉。在中国，早期使用陶尊，外部涂有草拌泥，起到绝热保温的作用，内面涂有耐火泥层，铜矿和木炭直接放入炉内。这一装置不同于从外部加热的“坩埚”熔炼，可使炉内温度提高，这种内热式陶尊炉发展成为泥砌或预制陶圈叠成的竖炉，下部有可以直接出渣、出铜的孔，如山西侯马春秋冶铸遗址的炉子。

合金的认识 在商周冶铸的基础上，战国后期（公元前3世纪）的《考工记》，记载了铸造各类青铜器所用合金成分，即“六齐”，这是世界上已知的最早的关于合金成分规律的记载。《吕氏春秋·别类篇》（公元前240年左右）记载：“金（即铜）柔锡柔，合两柔则刚”，这是世界上较早的有关合金强化的叙述。《荀子》（公元前313～前238年）中指出铸造青铜时“刑范正，金锡美，工冶巧，火齐得”，即要求铸范精确，原料纯洁，工艺细致，温度、成分适当，也是较早的有关铸造工艺的记载。在公元前二千纪，使用锡青铜同时，中国也广泛地使用铅青铜和铅锡青铜。

其他金属的使用 在公元前三千年以前，铅、银、金极为少见，但在公元前三千纪的早期青铜时代，在广大地区，从希腊到中国各类文化中，它们已在窖藏墓葬中常常出现。在两河流域出现了含铜27.5%的银合金匕首，当时已从铅中用灰吹法提银。

在青铜的应用还处在兴旺时期，铁已经登上历史舞台了。

铁 器 时 代

铁的应用 人类使用铁至少有五千多年历史，但进入铁器时代则在公元前第一千纪初。下表是截至1980年为止发现的关于近东和东地中海地区的早期铁器件数和情况的报道。

时 代	（公元前）	陨铁	人工冶铁	未经分析	合计
青铜前	3000以前	4	1	9	14
早青铜时代	3000～2000	6	6	10	22
中青铜时代	2000～1600	0	2	6	8
晚青铜时代	1600～1200	18	0	56	74
总 计		28	9	81	118

除实物外，苏美尔语铁字“AN·BAR”已见于公元前20～前19世纪的文献。但由上表可见，已经发现的属于公元前13世纪以前的铁器不多，确定为人工冶炼的则更少。根据文献

记录(约公元前18世纪),中青铜时代以前这些铁器大都是贵族馈赠的礼品,如匕首、项链。

在当时涉及贸易的文献中,唯一与冶铁有关的是在公元前1250年左右赫梯国王哈图斯里三世(Hattusilis III),在可能是给亚述国王萨尔玛那萨尔一世(Shalmaneser I)的信中表示,因为气候不佳,生产欠顺,又无储备,无法满足收信人提出的供给一批铁料的要求。从公元前12世纪起,铁器在地中海东岸地区日益增多,最早发源地可能在现今土耳其地区,开始作为珍品,如剑柄,以后制成铜柄铁剑。到公元前10世纪,铁工具已经比青铜工具更为普遍。公元前8世纪西亚的亚述军队已使用铁武器,铁农具如犁、锄、锹和手工业使用的铁工具也普遍应用。制铁术已经传播到欧洲中部当今奥地利、瑞士地区。

公元前8—前7世纪北非、欧洲相继进入铁器时代。当时使用的炼铁炉主要是地炉和竖炉。地炉直径约40厘米,深20厘米,冶炼海绵铁。冶炼后取出全部炉料,经过锤打分离炼渣,或者先行破碎,分选后烧结锻造成锭,这种方法称为块炼铁法。在底格里斯河上游豪尔萨巴德王宫出土的铁锭长30~50厘米,厚6~14厘米,重4~20公斤。这个时期的铁剑,有的较软,有的则经过渗碳和反复叠打,并经过快冷或淬火变得更硬。不受中国文化影响的地区,一直到14世纪后期,都以这种方法作为重要炼铁方法,也发展了一些卓越的工艺,如印度在公元300年左右锻造出德里铁柱,高7.2米,重达6吨。在制钢技术上,逐渐发展出用坩埚冶炼超高碳钢(含碳1.5~2%)(印度Wootz钢)或渗碳的高碳钢和低碳钢叠打,经淬火后获得硬的刀刃,或用植物酸腐蚀得到各种花样的大马士革钢(波斯制造后在大马士革销售)。

中国冶铁 春秋末期,中国的冶铁技术有了很大突破,使中国在这一领域长期遥遥领先。迄今出土与上述块炼铁法相类似的中国早期铁器有:①泾河上游甘肃灵台景字坪,春秋中叶秦墓出土的铜柄钢剑;②江苏六合程桥春秋末叶楚墓出土的铁条;③湖南长沙出土的春秋末年的铁削;④长沙战国初期楚墓出土的钢剑。灵台和长沙出土的钢剑可能从固态还原的铁,再渗碳锻造成,在公元前3世纪,这种渗碳钢剑已出现在被斩首的士兵丛葬坑中,未被回收,从而可以判断当时这种钢剑价格不会很高。这种技术在中国大约沿用到西汉中期才为生铁制钢所取代。

中国铸铁的发明与发展 春秋末叶起生铁在中国得到了日益广泛的应用。此后利用生铁或经退火制造韧性铸铁和以生铁为原料制钢技术的发明,标志着生产力的重大进步。这两大发明对战国和秦汉农业、水利、经济、军事的发展起了重大作用,是促进中华民族的统一和发展的重要因素之一。

春秋晚期(约当公元前6世纪末叶)的生铁器物出土的有江苏六合程桥楚墓的铁丸,湖南长沙楚墓的铁镢,长沙杨家山楚墓的白口铁鼎。生铁的出现是因为中国烧陶窑和冶铜炉炉温较高,具备了高温冶铁的条件。铁矿石在温度较高的炼铁炉中高温还原并渗碳,得到含碳达到3~4%的液态生铁。战国初期出现了用热处理方法,使白口铁中与铁化合的碳(Fe_3C)成为石墨析出,发明了韧性铸铁的工艺。这一工艺是用退火方法试图降低白口铁脆性的结果。在河南洛阳出土了战国初年经退火表面脱碳的钢面白口铁镢,是当时已有退火操作的一例。在这基础上延长退火时间就可用以产生韧性铸铁。这一发明使铸铁得以大量、广泛应用于军事和农业生产。《孟子》记载了孟轲(约公元前390~前305年)的话“许子以铁耕乎?”,反映了在公元前4世纪铸铁农具正在推广。

战国后期,发明了可以重复使用的铁范。到汉代发展为由铁官制造铁范,发给作坊,用以生产统一规格的铁器。战国时已用叠铸方法生产铜钱,汉代以后,叠铸方法进一步发展,并大量生产车马器件等。

社会的需求促进了生产，汉代大的高炉容积已达50立方米左右。河南郑州附近古荥镇汉代钢铁场遗址出土的两座高炉，炉缸呈椭圆形，长径4米，短径2.7米，高（从积铁估计）约6米。积铁每块重在20吨以上，场址面积达12公顷。在当时的世界上，这种炼铁技术是先进的，规模也最宏大。与当时中国以外地区使用块炼铁技术比较，生铁产量大，成本低，生铁的铸件制作容易，因而在日常生活中得到广泛使用，如制造炉、釜、锁，甚至用以封闭墓门（如河北满城汉代刘胜墓）。各地出土的汉代铁器，除白口铁、铁素体或珠光体为基体的韧性铸铁件外，还有灰口铁。

汉代冶铁场所还有以铸造为主的作坊，大多设在城市附近。如河南南阳汉代冶铁遗址，山东临淄古冶铁作坊遗址。

中国的生铁炼钢 生铁和韧性铸铁的大规模生产导致了生铁制钢的发明。在汉代先后发明了以下几种生铁制钢的方法。

铸铁脱碳钢 将含碳3~4%的低硅铸铁器在氧化气氛中加热，在适当条件下，特别是厚度不大的情况下，可以避免石墨的形成。早期炼铁温度较低，含硅量低，石墨析出较慢，有利于脱碳，使制造韧性铸铁的工艺发展成为铸铁脱碳成钢的方法。这种钢称为铸铁脱碳钢，它们有的不再加工，河南郑州东史马东汉墓出土的剪刀就是一例，其组织是球化珠光体而夹杂物很少，只有相当于铸铁中的夹杂。另一类铸铁脱碳钢是将生铁铸成薄板，脱碳后供锻造用。古荥镇汉代“河一”冶铁遗址出土了许多这类钢板。满城汉墓和北京大葆台汉墓出土了用类似原料加工成的铁镞、环首刀。

炒钢 向熔化的生铁鼓风，同时进行搅拌促进生铁中的碳氧化。用这种方法可将生铁制成熟铁，再经过渗碳锻打成钢。也可有控制地把生铁含碳量炒到需要的程度，再锻制成钢制品。这种钢中含有的硅酸铁夹杂物成分比较一致而数量较少。炒钢技术始于西汉末年，到东汉已相当普及。江苏出土新莽残剑，徐州出土建初二年（公元77年）五十炼钢剑，山东临沂苍山出土的永初六年（公元112年）三十炼钢刀等所用的原料都属于这一类型。

公元2世纪末出现了“百炼”这一工艺名称，留下了“百炼成钢”的成语。在此之前，王充（公元27~97年）《论衡》一书《率性篇》曾以铁的反复锻炼比喻人的性格锻炼，但没有提到“百炼”。曹操（公元155~220年）在《内诫令》提到“百炼利器”，孙权（公元182~252年）有以“百炼”命名的宝刀。初步可以认为百炼钢是用炒钢反复叠打变形，细化晶粒和夹杂物而成的，甚至可以用不同含碳钢材复合组成。炼数大致相当于反复折叠锻打后最后的层数。炼数增多，表明加工量加大，晶粒和夹杂进一步细化，质量提高。炒钢技术的发明是炼钢史上的一次革命。

灌钢 中国生铁制钢技术自战国初期到汉代经过几百年的历程，从块炼铁、渗碳炼钢发展到生铁固体脱碳炼钢、炒钢、炼制熟铁、以及重新渗碳硬化或淬火硬化。在这个基础上，发明了利用液态生铁对熟铁进行扩散渗碳炼钢的方法。这一方法的最早记载见于《北齐书·綦母怀文传》，称为“宿铁”，后世称为灌钢，又称团钢。这是中国古代炼钢技术的又一重大成就。

中国钢铁生产设备、燃料和辅助材料 中国汉代的钢铁生产工艺其他方面的进步表现在：

① **炼铁高炉的扩大** 由于经济、军事等发展的需要，汉代生铁冶炼的规模不断加大，古荥镇出土的“河一”高炉，炉缸面积达8.5平方米，日产生铁估计在一吨左右。铸造化铁炉的规模也不断增大。

② **鼓风** 山东滕县宏道院出土的汉代画像石描绘了锻造用皮囊，直径约0.6米，长约1

米。后来发展成为畜力鼓风的马排、牛排，公元31年出现了水力鼓风的水排。

③ 熔剂 古荥镇汉代遗址的炼铁炉渣流动性良好，渣和铁完全分离，炉渣中含氧化钙25%左右，氧化镁2.5%左右。河南巩县铁生沟汉代“河三”遗址曾发现石灰石。由此可以推论冶炼时曾加入碱性熔剂。

④ 燃料 古荥镇和铁生沟炼铁都使用木炭。无烟煤和煤饼则作为加热炉或退火炉的燃料。根据现有化验资料，五代已用煤炼铁，炼铁用焦炭则始于16世纪。

在中国，到南北朝（公元6世纪）时，除坩埚法和近代钢铁技术外，各种钢铁技术都已经得到应用。宋元时期，中国边疆地区有炼制镔铁的记载，宋代进一步发展了用熟铁中夹嵌高碳钢的技术，如江苏镇江博物馆所藏南宋咸淳六年（公元1270年）印侍郎铁刀，元大都出土的文物中也有这种钢刀。明代以后亦有钢表铁里，或熟铁锻件（如锄的刃口）进行液态生铁淋口硬化的技术。

中国古代钢铁技术对其他国家的影响 中国冶金技术，特别是战国秦汉以后的钢铁冶炼技术，不断向外传播。战国时期传到朝鲜，汉代进一步传到日本。铁制农具也在这个时期带到了越南。张骞通西域以后，把生铁的冶铸技术带到中亚和西亚。据《汉书·大宛传》记载，

世界各地不同时期的炼铁炉渣成分分析表

地 区	公 元	成 分 (%)										
		FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	S
土耳其 Sirzi	前 7 世纪	55.65	13.96	8.60	5.16	7.18	1.89	4.87	1.95			
奥地利 Noreia	前 1 世纪	55.72	10.33	20.72	3.85	2.38	1.96	1.85	0.40			
英国 Dorset	24~25	53.00	22.87	15.95	2.75	痕	1.47	0.45	0.40			
法国 Yonne	罗马帝国 时 代	46.9	4.80	31.8	2.10	22	9.9	0.75	0.25	0.45	0.35	
丹麦 Jutland	300~500	41.2	3.6	22.7	1.4	16.8	1.0	1.13	2.20			
德国 Aachen	罗马帝国 时 代	65.42	5.18	17.19	2.73	2.7	4.95	1.68	1.00			
中国郑州 古 荥	汉	2.94		52.20	24.95	2.64	12.06	2.64				0.223
中国山西 阳 曲	南 北 朝	31.61		51.48	8.25	0.1	1.67	0.43	1.1			
中国河南 安阳唐坡	宋	7.94		54.26	25.20			11.69				
中国河南 安阳东冶	宋	18.13		48.73	23.24	0.21		9.55				
日本岛根	奈良前	54.53	10.17	19.45	0.78		5.06					
日本冈山县	奈良前	33.12	9.90	23.60	5.15	1.5	5.03	1.38				
日本青森	平安后	39.08	14.52	18.15	2.81	0.80	7.47		0.7		5.70	

从大宛（帕米尔以北，主要在今苏联费尔干纳盆地至塔什干）一带至安息（今伊朗）都不知铸铁，由汉代官兵教他们铸器。罗马博物学者普林尼（Pliny，公元27~97年）对中国钢铁大加赞赏，认为最优良、卓越的钢是中国产品。

罗马帝国时期的欧洲炼铁技术 普林尼的著作中有用硬铁块（应为生铁）擦涂熟铁使之表面硬化的记载。在英国，曾发现公元2世纪的生铁块，含碳3.2%，硅1%，磷0.76%，硫0.49%。但在15世纪以前，生铁并没有在中国文明影响以外地区大量使用。

相当于汉代时期，欧洲和其他地区炼铁的方法仍然是用固态还原得到的海绵铁再锻造成块炼铁。在罗马帝国迅速膨胀时期（公元前一世纪末至公元一世纪末），铁和其他金属的产量迅速增加。建于公元83年苏格兰英赫图梯（Inchtuthil）地方的一座罗马堡垒，存有90万只不同尺寸的铁钉，其中大的具有较高的含碳量（0.2~0.9%），以承受较大的力。当时欧洲所用的炼铁炉随地区不同大致可分为三类：①地炉，从地面下挖，上有圆顶，侧面鼓风，在炉顶加料和取料；②平地筑炉；③竖炉，有的可以排渣。

世界各地不同时期的炼铁技术可以通过对各地发现的炉渣的分析得到反映（见上表）。

从表中可以明显看出，中国古代炼铁技术所用的方法不同于其他地区。石灰熔剂的使用提高了炉渣中氧化硅、氧化钙的含量，大大降低了渣的熔点和渣中的含铁量，有利于获得生铁。

中国古代冶金的其他成就

铸造技术 继青铜器之后，中国古代广泛使用了铸铁。只是在需要精细的饰物或大型高强度器件（如刀、剑、大锚）的情况下，才使用锻造器件。中国古代的铸师发展了一系列卓越的技术。

陶范和铁范 中国和其他国家一样，铸造是从使用石范开始的，以后使用了铜范。商周青铜器大量使用陶范。它可用母模复制，便于大量生产。模和范经过焙烧，比较坚固，为青铜器的铸造创造了优越的条件。中国铸造技术的先进性还表现在战国时期出现的用金属模制作铁范，然后利用铁范进行大规模生产。这一先进技术实现了产品的规范化和批量生产。

叠铸 约在公元前2200年，西亚地区发明了一范多型，可以同时铸造若干器件的石范。中国甘肃玉门出土的属于火烧沟文化的石范，已能同时铸造两个箭镞。战国时用这种方法铸造钱币，后来进一步发展成多层范片相叠，一次铸造多件的叠铸方法，这是继铸造生产规格化、批量化后，进一步提高工效的重大发展。

精密铸件 陶范的使用和高度的铸造技术水平，铸成了音调准确的双音编钟，面积大而厚度很薄的铜鼓，细达0.1毫米的越国青铜剑剑首底部的环纹。战国初期还用失蜡法铸造出曾侯乙墓尊盘这样的精美制品。

大型铸件 竖炉冶炼的强化，提高了液态金属的铸造温度；焙烧工艺的采用，提高了泥范的强度，为大型铸件的生产创造了条件。中国早在商代就铸造出许多重量在百公斤以上的各种铜器。唐代以后又发展为铸造大型铁件。如铁镬（江苏扬州）、当阳铁塔（湖北当阳，分段铸造）、沧州铁狮（河北沧州）、铁人（河南登封、山西太原）等。到了明代出现了重达46.5吨的北京永乐大钟，和分段铸成整体重达76吨的河北正定铜佛。

金属表面装饰技术 从春秋时代开始，各种金属表面装饰工艺进一步发展。

错金与鎏金 春秋中叶以后，开始在青铜器表面嵌镶不同色泽金属如铜片，后来发展为

尚有细纹和艺术化的文字（鸟篆），纹内嵌入金（银）丝的错金（银）技术。

战国初期（公元前5世纪），中国发明了金（银）汞齐鍍金（银）的技术。在欧洲，这一技术见于公元前半世纪的记载。

表面着色和氧化 中国至迟在战国初期，发明了将青铜器表面氧化成墨黑色的技术，或用以防锈，或作为花饰。湖北江陵出土的越王勾践剑，许多地方出土的吴王剑和吴国剑都有黑色花纹。秦汉时期有些箭镞、剑格也使用了这种技术。后来在铜器表面刻槽作画，槽中用鍍金（银）办法“走金”或“走银”，有的将表面着色，以及制出著名的云南乌铜器。

其他金属及其合金 中国古代除了使用铜、锡、铅、金、银外，还发明了铜镍合金（白铜）的冶炼技术，锌的冶炼和水法炼铜技术，发明了砷白铜和补牙用银汞齐等技术。

白铜 原指铜镍合金。东晋常璩所著《华阳国志》记载：“螳螂县因山而得名，出银、铅、白铜、杂药”。螳螂县在今云南会泽巧家一带，附近东川产铜，四川会理力马河、青矿山有古镍矿遗址。此后，至迟在明代将金属锌加入铜镍合金得到似银合金。含铜40~58%，镍7.7~31.6%，锌25.4~45%的合金被称为白铜或中国白铜。白铜出口到欧洲，1822年苏格兰法伊夫（Fyfe）分析中国白铜，得知是铜、镍、锌合金，后来由德国进行仿制，发展成为重要电阻材料，称为“德国银”（铜25~50%，镍5~35%，锌10~35%）。

铜砷合金 含砷高的铜砷合金色白，具有较好延性。李时珍（公元1518~1593年）、宋应星（公元1587~?年）在著作中都记载了用砷冶炼白铜。在此之前宋代已有可以解释为砷白铜的记载。在中亚、埃及和欧洲曾由于使用含砷或镍的铜矿物为原料，在应用锡青铜以前使用含有少量镍或砷的铜器，后来为锡青铜所取代。中国镍白铜或砷白铜的发明与此不同，是有目的地加入含所需元素的矿物，冶炼成所需的合金。

锌的冶炼 中国在冶金上的另一贡献是金属锌的生产。中国明代以后称锌为倭铅。中国在16~18世纪已经向欧洲出口含锌99%的锌锭。20世纪70年代，云南和贵州尚有古代流传下来的与《天工开物》所记载相似的炼锌方法——坩埚炼锌法。这个方法的基本原理在世界各国一直应用到电解制锌法的出现。

胆铜法 汉初已有“曾（白）青得铁化为铜”的记载，即硫酸铜（曾青）与铁反应，可以析出铜。用此原理生产铜的方法称为胆铜法，在北宋得到广泛应用，并且有专著《浸铜要略》（已失传）。这种方法一直到现在还在应用。

牙用银膏 在牙科中应用银汞齐是中国古代冶金的又一成就。唐代《新修本草》（公元659年）记载银膏（银锡汞合金）可以硬化，并用以补牙。这种合金的制成当与魏晋南北朝炼丹有关。1826年在法国开始应用补牙合金，1833年传入美国。

中国古代冶炼发展的特点 中国冶金的发展和西亚、中亚、欧洲走着不同的道路。

在中国，尚未发现早期使用含砷铜、镍铜的阶段。青铜冶炼的一个特点是铜锡合金和铜铅合金同时并用，早在齐家文化（约公元前2000年）的青铜器中，就有了这两种不同的合金。

在钢铁方面，世界上长期采用固态还原的块炼铁和固体渗碳钢，而在中国，铸铁和用生铁制钢一直是主要的方法。由于铸铁和生铁炼钢法的发明和发展，中国的冶金技术在明代中叶以前一直居于世界先进水平。使用木风箱和焦炭炼铁、生铁炼钢、锌和镍白铜的冶炼、永乐大钟的铸造等，都标志着古代中国冶金技术的卓越水平。

在另一方面，中国虽然是世界上主要产锑国，但迄今未发现文献记载或出土的锑和铜锑合金。硫化锑是古希腊和罗马时代作为服饰的化妆品。早期（公元前1800年以前）青铜偶有锑达15%。公元一世纪普林尼和戴奥斯科瑞德（Dioscorides）都曾提到锑矿石与木炭一

起加热过度时,成为“铅”,即金属锑。阿格里科拉(G. Agricola)在公元1550年所著的De Natura Fossilium中提到用锑锡合金作为印刷字模。

中国古代另一个未曾使用的金属是铂。铂以铂砂状态自然存在,中南美印第安人很早就使用铂的合金,印加人在哥伦布公元1492年发现新大陆以前已炼出含铂18~72%的合金。西班牙人侵入美洲后得识铂的存在,成为欧洲人所熟知的第8个金属(前7个金属为金、银、铜、铁、锡、铅、汞)并于公元1803年用于硫酸的浓缩皿。

近代冶金技术的发展

15世纪末至16世纪初,西欧社会生产力已经有了显著发展,手工业技术不断得到提高,风车、水车的发明并应用于鼓风、排水、提升,使矿冶业得到新的动力,大大提高劳动生产率。这一时期欧洲的矿冶技术详细地记载于两部名著中,即比林古乔(V. Biringuccio)的《火法技艺》(Pirotechnia)和阿格里科拉的《论冶金》(De Re Metallica)。产业革命开始以后,对金属的需求大大增加,也促进了冶金工业的进一步发展。

15世纪初期,炼铁高炉在欧洲迅速发展,主要特点是加强鼓风,加大炉身,增大燃料比。17世纪以后,炉身高达6~9米,日产铁1吨左右。水力锻锤也不断加大,到19世纪已达600~700公斤。蒸汽机的发明(公元1755年)改善了鼓风,达比(A. Darby)用焦炭代替木炭炼铁成功(公元1709年),强化了冶炼过程,使铁的产量增长。尼尔森(J. B. Neilson)采用热风炼铁,焦比降低,而生产效率成倍提高(公元1828年),进一步降低了燃料消耗,使煤铁比从8.00(公元1829年)降低到2.88(公元1833年,风温315℃)。

17世纪初,北欧和西欧开始用生铁炒炼熟铁。到18世纪中叶,英国开始(公元1744年)大量用生铁冶炼熟铁,利用水力鼓风对熔化的生铁进行脱碳,然后锻造排渣,成为低碳熟铁。这时钢仍用固态还原得到的海绵铁进行渗碳制取,少量的高级用钢如钟表发条、剃刀等的用钢,则使用坩埚法炼制。19世纪中叶,英国有炒熟铁炉3400座,每炉产铁达到1.6吨。英国当时的熟铁产量占中国以外的世界熟铁产量的一半。除作为结构使用外,在公元1820年左右,用轧制的熟铁铁轨代替公元1767年开始使用的铸铁铁轨和公元1808年开始使用的韧性(可锻)铸铁铁轨。

贝塞麦(H. Bessemer)在英国,凯利(W. Kelly)在美国尝试向铁水吹入空气的方法进行炼钢。贝塞麦开始时使用固定坩埚,后来采用转炉,于公元1856年取得了初步成功,但由于试验所用的是低硫铁矿,而其他铁矿含硫较高,贝塞麦的专利开始时不能得到广泛应用。马希特父子(R. F. and D. Mushet)利用加锰铁脱氧,并消除了硫含量高带来的热脆,使贝塞麦转炉炼钢完全取得成功,到公元1873年英国转炉钢产量已达50万吨。转炉钢于19世纪中叶大量用于制造钢轨。但是转炉还面对着除磷的问题。即不能以高磷铁作原料。托马斯(S. G. Thomas)和吉尔克里斯特(P. C. Gilchrist)利用碱性炉衬和炉渣,即后世称之托马斯法,于公元1879年解决了这个问题,所产的钢被英国商业部批准用于建造大型桥梁。

西门子兄弟(K. W. and F. Siemens)用斯特林(Stirling)公元1916年创造的炉气余热再生方法(这种方法广泛用于玻璃工业),于公元1855年发明了蓄热室,提高反射炉炉温,炼出液体钢水,取代坩埚制钢法(但在英国未能完全代替炒拌熟铁炉)。1864年法国马丁(P. E. Martin)终于使这种炉子(后世称为平炉)代替了炒钢炉。托马斯转炉炼钢和平炉炼钢是近代炼钢工业的基础。20世纪50年代初,利用德国杜雷尔(R. Durrer)及其学生

在炼钢转炉顶部吹入氧气代替空气的方法发展成为最早的氧气顶吹转炉炼钢的方法(LD法),在奥地利林茨(Linz)和多纳维茨(Donawitz)的工厂投入生产;60年代进一步将底吹法应用于氧气转炉,成为氧气底吹转炉炼钢法。70年代发展为顶底复合吹炼,和顶部或底部吹入煤粉增加热量的方法。

随着科学技术和工业的发展,新的冶炼方法和精炼方法不断出现。1866年德国发明了发电机,它的出现使电解法提纯铜的工业方法得到实现(1869年),从而满足电气工业对高纯铜的需要,也开创了电冶金这一新领域。埃鲁(P.L.T.Heroult)在1899年首先用电弧炉炼钢。虽然低频感应炉早在1877年已经出现,但没有得到发展;诺思拉普(J.K.Northrop)所发明的高频感应炉炼钢(1927年)终于取代坩埚法成为高合金钢生产的普遍方法,并使用真空冶炼成为可能。

工业的发展促进了对新材料的需要,新的金属不断投入使用。继钨钢(1882年,后来发展为高速工具钢)之后,相继出现了高锰耐磨钢和锰钢(1887~1889年),接着又出现了轰动工程界的镍钢(1899年)和耐蚀铬钢。在非铁金属方面,包括轻金属(铝、镁、钛),难熔金属(钨、钼、钽、钨、铌、钽),稀土金属、放射性元素等,在18、19世纪已经先后发现。

从19世纪初,戴维(H.Davy)成功地电解了熔融的氢氧化钠、氢氧化钾,得到金属钠、钾(1807年),开创了熔盐电解方法。1886年美国霍尔(C.M.Hall)和法国埃鲁分别将氧化铝加入熔融冰晶石,电解得到了廉价的铝。经过将近一个世纪,铝已成为用量仅次于铁的第二大金属。

钛是另一个由于科学技术发展的需要进入工业生产的金属。1791年发现钛以后,1825年用钾还原氟钛酸钾获得金属钛,1910年用钠还原法从四氯化钛制得纯钛。40年代用镁代替钠作还原剂,并使钛的大量生产和真空熔炼加工等技术逐步解决后,钛及钛合金的广泛应用才得到实现。

在近代物理化学的指导下,核技术和电子工业的需要促进了稀有金属的生产。铀和其他核燃料以及钼、钨的生产及其分离,钼、铌的分离,稀土元素的分离,促进了离子交换、溶剂萃取、同位素分离和生产、熔盐电解等一系列新技术的发展。第二次世界大战以后,电子工业和半导体工业对超纯材料的要求导致区域熔炼(1946年)及各种单晶制备方法和气相沉积法(1960年)的出现。近年来非晶态金属的制备和具有金属导体性质的非金属的出现,更扩大了冶金技术的领域。

在金属加工方面,欧洲在16世纪以后发展出使用机械的金属塑性加工(或称压力加工)方法。最早的蒸汽锻锤安装在法国(1842年),而水压机则是英国的发明(1861年)。在轧制铅片的手摇轧机基础上欧洲出现了由珀内尔(J.Purnell)设计出的带孔型的双辊轧机(1766年)用以轧制棒状产品。科特(H.Cort)用有孔型的轧机轧制了熟铁,成为生产型材的有效加工方法,科特因此被西方誉为“近代轧制之父”。1836年蒸汽机驱动轧机(二辊三辊)的出现是金属加工的重要进步。为了减薄钢板厚度,英国在1720年左右发明了薄板叠轧的技术,某些工厂至今还在应用。19世纪50年代,厚钢板生产的发展已使法、英两国相继用10厘米厚的轧制铁板制造战舰的装甲。

18世纪末至19世纪初出现的金属挤压技术是金属加工的另一重大成就,此法最早应用于铅管的生产(1797年),后来用以挤压铜及其合金(1894年)和铝及其合金(1930年)并成为某些低塑性金属开坯的重要手段。70年代利用液等静压下挤压的方法加工脆性材料如钼、钨,

还利用有些合金在一定温度范围内的超塑性，发展出超塑性加工方法。

由于各种加工方法的发展和对金属及合金组织的了解，发展出利用形变加工控制合金组织的技术，使材料性能得到更好的发挥，例如取向硅钢片以及用控制轧制提高钢材的强度和韧性等。这些新工艺和新型材料的出现迫使钢铁工业大规模生产每一阶段都必须严格遵守规定的工艺和要求，是生产科学化的重大进步。

人类对金属及其合金经过6000年以上的使用和研究，已经有了一些深入的了解。如果对合金成分、电子和原子运动、晶体缺陷、晶体结构、固态相变之间的关系以及它们和各种性能间的关系得到更加彻底的了解，将会进一步发展出新的合金和材料，并充分发挥它们的各种物理、力学、化学性能。金属学和冶金学的发展，将能促进更加经济有效地获得日益增多的金属材料。

参 考 书 目

R. F. Tylecote, 《A History of Metallurgy》, The Metall society, London, 1976.

(本文原发表于《中国大百科全书·矿冶卷》
中国大百科全书出版社, 1984年9月)