

C.P.J.J

北京市社会科学理论著作出版基金资助项目

HANJIN ZHONGYUAN JI BEIFANG DIQU
GANGTIE JISHU YANJIU

汉晋中原及北方地区 钢铁技术研究

陈建立 韩汝玢 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金资助项目
北京市社会科学理论著作出版基金资助出版

汉晋中原及北方地区钢铁技术研究

陈建立 韩汝玢 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

汉晋中原及北方地区钢铁技术研究/陈建立,韩汝玢著. —北京:北京大学出版社,2007. 1
ISBN 978-7-301-11577-0

I. 汉… II. ①陈…②韩… III. 钢铁工业—技术史—中国—前 2 世纪~5 世纪
IV. TF4-092

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 010707 号

书 名: 汉晋中原及北方地区钢铁技术研究

著作责任者: 陈建立 韩汝玢 著

责任编辑: 李卫东

标准书号: ISBN 978-7-301-11577-0/K · 0471

出版发行: 北京大学出版社

网 址: <http://www.pup.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752033 出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 280 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: (010)62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

目 录

绪 论	1
第一章 中国古代钢铁技术体系的建立	3
第二章 古代钢铁技术研究方法	10
一、金相组织及杂质元素分析	11
二、夹杂物形貌及其元素分析	12
三、炉渣状态、组织及元素分析	13
1. 中国和欧洲古代炉渣的元素组成特征	13
2. 数学统计方法在冶金考古中的应用	15
3. 中国和欧洲古代炉渣的主成分分析	18
4. 日本古代炉渣的主成分分析	19
四、古代钢铁制品冶炼方法和材质种类的判定	31
五、古代铁器的加速器质谱 ¹⁴ C 年代测定	33
第三章 古代冶铁铸造遗址的考察与研究	39
一、古代冶铁铸造遗址的发现	39
二、河南鲁山望城岗冶铁遗址的技术研究	45
1. 金相组织观察及成分测定	46
2. 年代测定	48
3. 几点讨论	49
三、小结	53
第四章 汉诸侯王陵出土铁器的制作技术	54
一、徐州狮子山楚王陵出土铁器的金相实验结果	55
1. 金相组织	55
2. 夹杂物的分析	60
3. 对磷偏析的检验	65
4. 狮子山楚王陵出土铁器的鉴定结果	66
二、徐州狮子山楚王陵出土铁器的制作技术	67
1. 兵器	67
2. 工具	67
3. 其他用具	68
三、汉诸侯王陵墓出土铁器的比较	68

1. 兵器	69
2. 工具	70
3. 农具	70
四、汉王陵出土铁器反映的秦汉时期钢铁技术	71
1. 块炼铁和块炼渗碳钢	71
2. 生铁和生铁制钢	71
3. 炒钢	72
4. 局部淬火工艺	72
5. 冷锻工艺	72
五、结论	72

第五章 北票喇嘛洞鲜卑墓地出土铁器的制作技术

74

一、北票喇嘛洞鲜卑墓地出土铁器的金相实验研究	74
1. 样品的选择	74
2. 金相组织观察	75
3. 夹杂物及金属基体元素组成	85
4. 显微硬度测定	87
5. 金相鉴定结果	88
二、北票喇嘛洞出土铁器的材质	89
1. 白口铁和韧性铸铁	89
2. 铸铁脱碳钢	90
3. 炒钢制品	90
4. 其他钢铁品种	91
三、喇嘛洞墓地出土铁器的制作工艺	92
1. 工、农具的制作技术	92
2. 兵器制作技术	93
3. 淬火和冷加工工艺的使用	94
4. 微量磷、砷元素偏析	96
5. 出现板材的意义	96
四、结论	97

第六章 汉晋中原和东北地区钢铁技术的发展与交流

98

一、中国早期铁器的考古发现与研究	98
二、东北地区铁器的使用和发展	100
三、鲜卑铁器及冶铁业考古研究状况	107
四、魏晋南北朝时期鲜卑铁器的使用和发展	111
五、鲜卑铁器和匈奴铁器的比较	112
六、鲜卑铁器与高句丽铁器的比较	114
1. 高句丽考古与出土金属器	115

2. 铁制农、工具	118
3. 铁兵器	120
4. 甲骑具装与马镫	122
5. 冶铁技术	124
七、鲜卑与邻近地区冶铁技术的传播和交流	124
八、中国与周边地区古代钢铁技术关系简述	128
九、结论	131
第七章 古代钢铁制品中的浮凸组织研究	132
一、浮凸组织的研究现状	132
1. 中国古代钢铁制品中有浮凸组织的样品	132
2. 对古代钢铁制品中浮凸组织的研究现状	133
二、实验研究	135
1. 研究方法	135
2. 金相组织观察	135
3. 显微硬度分析	140
4. 样品的成分分析	141
5. 样品的结构分析	147
三、浮凸及带状组织形成原因初探	147
1. 磷元素的偏析形成了浮凸组织	147
2. 磷的来源	150
3. 浮凸组织不同形貌的形成原因	151
4. 带状组织的形成原因	153
5. 浮凸组织研究的现实意义	153
四、结论	154
参考文献	155
英文摘要	172
后 记	177

绪 论

近几十年来,配合田野考古学的发展,作为科技考古学的一个重要分支的冶金考古学也在各方面的努力下取得了较大的进展,钢铁冶金技术发展史一直是冶金考古的重要研究内容之一。

铁的使用是人类文明史上的重要里程碑。人类使用铁至少有 5000 多年的历史,而真正进入铁器时代则是公元前二千纪中叶以后。由于社会发展的历程不同,各文明区域各民族进入铁器时代的时间也不同,钢铁冶金技术发展的历程及其社会作用也有显著的区别。对文献资料和考古发现的系统研究表明,中国开始人工冶铁约在公元前 9~前 8 世纪,相当于春秋早期或更早。虽然中国冶铁技术发明的时间不算最早,但是中国较早地发明了生铁冶炼技术,并且在生铁冶炼的基础上发明了一系列生铁炼钢技术。这极大地促进了生产力的发展,对中国的封建国家政权的建立、统一和巩固起到了重要的作用,使中国较早地进入了封建社会。所以研究中国古代钢铁技术发展史不论是对自然科学史研究、对考古学研究,还是对历史学的研究均具有重要意义。特别是我国东北地区,自古以来就是多民族聚居的地区,对中国古代历史的发展起到重要的作用,在亚洲以至世界上都占有优越的地理条件,有着重要的经济、战略意义。在鸦片战争以后,这里也成为各帝国主义列强在中国进行角逐的热点地区。某些研究者在学术上鼓吹“历史独立性”,论述所谓的“独立发展过程”,以期从文化上将中国东北地区的发展与中原割裂开来,所以正确研究这一地区铁器发展史具有重要的历史和现实意义。本书则试图通过对中国东北地区出土铁器的金相学分析和冶铁技术的发展、传播与交流问题的研究来讨论中原和中国东北地区的经济文化关系等方面的问题。

秦汉至魏晋南北朝时期,是中国古代钢铁技术发展的重要阶段。这一时期不仅生铁得到了大量应用,而且出现了炒钢、铸铁脱碳钢和局部淬火等热处理工艺,这方面的研究较多。但是对于钢铁技术本身而言,还存在许多问题亟须解决。例如正确判定出土铁器的材质种类是研究的基础,但如何确定古代钢铁制品的材质种类?炒钢技术是何时发展起来的及发展过程如何?秦汉时期钢铁技术大发展的社会、经济及技术原因是什么?如何深入理解钢铁技术的发展与社会进步的关系等有关问题?中原地区发达的冶铁和锻造技术经过我国东北地区和朝鲜半岛传到日本,对这些地区的经济、军事、文化和科学的发展,社会制度的更替与进步,都起到了极为重要的作用,所以铁器文化的传播与交流问题也是东北亚文化交流研究的重要课题之一,但是钢铁技术的交流与传播的方式和机制如何?同时在多年的中国冶金史研究中也发现了诸如浮凸组织、具有球状石墨的韧性铸铁组织、长期室温时效下铁素体晶粒内有新相析出组织、晶粒间界迁移以及铁器锈层中保留有原组织的痕迹等多种特殊结构的显微组织,这些金属显微组织及锈蚀产物是数百年乃至千年变化的产物,在现代材料科学的显微组织中是很少能够见到的,并且到目前为止还没有人对产生这些现象的原因进行深入、系统的研究,这也是冶金史研究的重要问题,这些问题的解决都需进一步的研究工作。

几十年来大量秦汉至魏晋南北朝时期的遗址和墓葬的调查和发掘,以及出土数量众多的

铁器和有关冶铁制钢遗物,为研究公元前 2 世纪~公元 5 世纪中国钢铁的冶炼、制造工艺提供了十分珍贵的资料。特别是河南鲁山望城岗冶铁遗址、江苏徐州狮子山西汉楚王陵和北票喇嘛洞三燕文化基地的发掘,为研究这一时期钢铁技术的发展提供了契机。本书选择这三个地点出土的铁器进行金相学和年代的研究。

徐州作为汉代诸侯国楚国的国都,历年来发掘了数座楚王陵,揭示了西汉楚国的经济、文化、技术等若干问题。在此之前,北京科技大学冶金与材料史研究所已经研究了其他地方的 6 座汉代诸侯王陵墓中出土的钢铁制品的冶炼、制造工艺,为通过汉王陵出土的铁器这一侧面来研究秦汉时期钢铁技术打下了基础。河南南关外望城岗冶铁遗址的考古调查和发掘,出土的泥模范残块、大型椭圆冶铁高炉炉基及其附属系统遗迹,是继 20 世纪 70 年代郑州古荥镇汉代冶铁遗址后的又一重大发现,为研究这一时期冶铁技术的发展提供了重要资料。辽宁北票喇嘛洞墓地是近年来重点发掘的魏晋十六国时期鲜卑族遗存,时代约为公元 3 世纪末~4 世纪中叶。墓地位于北票市八家子乡四家板村喇嘛洞屯西 300 米的一处向阳山坡上,自 1992 年以来已经进行了 5 次发掘,1996 年曾被评为全国十大考古发现之一。在清理的 400 多座墓葬中,绝大多数是小型墓,出土器物不多,但是每墓必定出土铁器制品,无一例外,主要有农具、工具和兵器,特别是大型墓中出土的全套甲骑具装更引人注目,无论是研究鲜卑的发展史,还是研究当时该地区的钢铁技术发展水平,了解以鲜卑为主体的三燕早期文化内涵及与相邻地区的经济、技术交流等问题均提供了重要考古资料。

鉴于此,本书将研究实验和历史文献相结合,在讨论古代钢铁技术研究方法的基础上,讨论古代钢铁制品的判定标准,以徐州狮子山楚王陵、河南鲁山望城岗和北票喇嘛洞墓地出土铁器的鉴定为出发点,着重研究我国秦汉至魏晋南北朝时期中原和北方地区铁器发展历程及与周边地区的关系,并系统研究浮凸组织出现的原因及对现代材料研究的意义。

第一章 中国古代钢铁技术体系的建立

人类自新石器时代晚期开始使用天然金属,已有近 9000 年的历史。在各种金属中,铁的蕴藏量仅次于铝,约占地壳总重的 5%,且有 300 多种铁矿物遍布各地。然而,人们在生产实践中首先大规模冶炼和使用的金属是铜。随着历史的发展,人们才逐渐掌握了冶铁技术,进而取代了铜,极大地促进了社会进步。铁的使用是人类文明史上的重要里程碑。人类使用铁至少有 5000 多年的历史,而最早进入铁器时代则是公元前二千纪中叶以后的事。由于社会发展的历程不同,各文明区域民族进入铁器时代的时间也不同,钢铁冶金技术发展的历程及其社会作用也有显著的区别。中国古代先进的钢铁冶炼技术对中国的政治、经济、文化产生了多方面的影响,在世界钢铁技术史上具有重要的地位。自 20 世纪 20 年代以来,中国学者已就中国钢铁技术起源问题进行了讨论,50 年代以后,随着大规模考古工作的进展和对出土铁器及冶铁遗址的科学研究,我们已经初步掌握了中国古代钢铁技术的起源、发展、技术特色和管理体制等一系列问题,从而对中国古代钢铁技术体系的问题有了比较明确的认识。

人类最早发现和使用的铁是自然铁和天空中落下来的陨铁。自然铁只在格陵兰岛以较大块存在,爱斯基摩人曾用它制作刀具。现有材料表明,世界最早的铁器出土在两河流域、地中海沿岸和古埃及,这些地区大约在公元前 4000 年就使用了陨铁^①。中国已在河北藁城台西村^②、平谷六家河^③、河南三门峡虢国墓地^④和浚县辛村^⑤出土了 7 件商周时期(公元前 14~前 9 世纪)经过锻制的陨铁制品,它们均出自青铜铸师之手。这些器物的共同点在于它们都是铜铁复合器,陨铁均锻焊于刃部等使用部位,表明工匠已经对陨铁的性能有了一定的认识。所以在发明人工冶铁之前,经历一个人类认识并使用天然陨铁的阶段是普遍现象,但是从陨铁制品的使用到冶铁技术的产生这中间的环节及二者之间的关系还不清楚。而铜铁复合器在各地的不同时期广泛发现,说明了这种工艺对后世具有较大影响。

公元前 6000 年左右,世界各地开始制造黑陶、红陶等陶器^⑥。也许是在烧陶的基础上开始了炼铜,人们又在炼铜的时候,加入了铁矿石作为助熔剂,或选用了含铁量较高的铜矿,在炼铜炉中可能还原出铁,引起人们的注意。后来人们有意识地单独加入铁矿石进行冶炼,最终在冶炼温度、鼓风技术和炉子结构等已有的各种冶炼技术提高的基础上导致冶铁业的产生。R.

① R. F. Tylecote. *A History of Metallurgy*. London: The Metals Society, 1992.

② 李众:《关于藁城商代铜钺铁刃的分析》,见《考古学报》,1976 年 2 期:17~34 页。

③ 张先得、张先禄:《北京平谷刘家河商代铜钺铁刃的分析鉴定》,见《文物》,1990 年 7 期:66~71 页。

④ 韩汝芬、姜涛、王保林:《虢国墓出土铁刃铜器的鉴定与研究》,见《三门峡虢国墓》,北京:文物出版社,1999 年:559~573 页。

⑤ R. J. Gettens etc. Two Early Chinese Bronze Weapons with Meteoritic Iron Blade. *Occasional Papers*, Vol. 4 No. 1, Freer Gallery of Art, Washington, D. C., 1971.

⑥ Robert Raymond. *Out of the Fiery Furnace—the Impact of metal on the history of mankind*. The Pennsylvania State University, 1984.

Maddin 指出了铁器的出现和冶铜的关系^①。湖北大冶铜绿山出土大量铜锭,其中有的铁含量高达 50%,另在河南登封阳城冶铁遗址同时出土的熔铜炉和熔铁炉^②,说明了炼铁术起源于炼铜术的可能性。虽然目前还不清楚中国冶铁术究竟是如何产生的,但是对文献资料和考古发现的研究表明,中国至迟约在公元前 9~前 8 世纪,相当于春秋早期或更早开始人工冶铁。到目前为止,经过鉴定的属于战国早期以前的块炼铁和块炼渗碳钢制品已有 14 件,其中河南三门峡上岭村虢国墓(公元前 8 世纪中期)出土的玉柄铁剑,为中国最早人工冶铁遗物,它是由块炼铁制成的,说明中国最早的人工冶铁制品是块炼铁。

由于块炼铁质地较软,需对其进行渗碳提高硬度和使用性能,或在锻打时吸收碳,这种产品称为块炼渗碳钢。战国中期以后的块炼铁和块炼渗碳钢制品数量增多,一直到西汉时期各地出土铁器中,块炼铁和块炼渗碳钢制品还普遍存在。例如河北满城汉墓^③、北京大葆台汉墓^④、江苏徐州北洞山^⑤和本书第四章讨论的狮子山楚王陵均出土块炼铁制品。苗长兴对河南古代 136 件钢铁制品的研究结果表明,东汉以后的铁器中则不再发现有块炼铁制品^⑥,这是炒钢技术发展及炒钢制品大规模使用的结果。公元前 9~前 8 世纪发明的块炼铁技术在公元前 2 世纪仍在继续使用,但块炼渗碳钢经过反复锻打,钢的均匀性不断改善,夹杂物含量不断减少,质量得以提高。这种现象说明了在业已发展诸如生铁冶炼和制钢等新技术的同时,还有一些相对原始的技术仍在使用,呈现出技术的多样性,亦说明了钢铁技术发展的复杂性及不平衡性,同时也说明了中国古代钢铁技术从一开始就是两条技术体系,二者互相影响,具有明显的中国特色。但是到目前为止,我们还没有发现用于冶炼块炼铁的炉子等冶金遗物,而只能从金相组织的判定来确认该项技术的存在与否,所以进一步的研究工作是必要的。

掌握块炼法不久,即公元前 8 世纪,相当于春秋早期,中国古代劳动人民比其他国家早 1800 年创造了含碳量在 2% 以上的生铁并铸成工具。最早的铸铁件是山西侯马天马一曲村遗址出土的公元前 8~前 7 世纪的白口铸铁残块^⑦。虽然中国冶铁技术发明的时间与西亚地区相比不算早,但是较早地发明了生铁冶炼技术,并且在生铁冶炼的基础上发明了一系列生铁炼钢技术,极大地促进了生产力的发展。

战国时期已有灰口铸铁,是中国古代冶铁技术的又一重大成就。灰口铸铁的性能介于白口铁和韧性铸铁之间,至今仍是工业使用最广、产量最大的铸铁材料。至迟到西汉中叶(公元前 2 世纪末叶)已经根据灰口铁(即不含有共晶莱氏体,超过 2% 的那部分碳成为片状石墨的生铁)的

① R. Maddin. The History of the Evolution and Development of Metal. *The Forum for the Fourth International Conference on the Beginning of the Use of Metals and Alloys (BUMA-IV)*. January 16—17, 1996, Shimane, Japan, BUMA-IV Forum Organizing Committee, The Japan Institute of Metals.

② 河南文物研究所、中国历史博物馆考古部:《登封王城岗与阳城》,北京:文物出版社,1992 年。

③ 北京钢铁学院金相实验室:《满城汉墓部分金属器的金相分析报告》,见《满城汉墓发掘报告》,北京:文物出版社,1980 年:369~376 页。

④ 北京钢铁学院《中国冶金史》编写组:《大葆台汉墓铁器金相检查报告》,见《北京大葆台汉墓》,北京:文物出版社,1989 年:125~127 页。

⑤ 韩汝珩、姚建芳、刘建华:《北洞山西汉楚王墓出土铁器的鉴定》,见《徐州北洞山西汉楚王墓》,北京:文物出版社,2003 年:194~203 页。

⑥ 苗长兴:《北京科技大学冶金史研究室硕士学位论文》,1990 年。

⑦ 韩汝珩:《天马一曲村遗址出土铁器的鉴定》,见《天马一曲村 1980~1989》,北京:科学出版社,2000 年:1178~1180 页。

特点用作工程材料。大冶铜绿山出土的战国中期的铁锤已有片状石墨^①。河北满城刘胜墓出土的车铜(1:2046)、铁范中锄内范(2:3118)、铍内范(2:4073)经鉴定为灰口铁铸件^②。

为了改善生铁的性能,至迟在战国早期,已经发明了将白口铁长期加热的铸铁退火技术。它消除了大块渗碳体,从而克服了白口铁的脆性,产品称为“可锻铸铁”(亦称展性铸铁)。铸铁退火处理是在退火窑中成批进行的。在战国和汉代的冶铸遗址中发现的烘窑,可以稳定地达到 900℃~1000℃ 的高温,还可以控制燃烧速度、窑温和炉内气氛^③。一般认为,古代将白口铁堆放在退火窑内进行退火处理,由于温度分布不均匀,加热条件不同,可能得到脱碳铸铁、铸铁脱碳钢、韧性铸铁和球墨铸铁。古代铸铁退火处理的应用有两种情况:一种是用生铁铸成器物,然后对其进行退火处理;另一种方法是先将铁铸成板材,然后对板材进行退火处理,再将板材锻制成器物^④。河南洛阳水泥厂战国早期灰坑中出土的铁铲是目前中国最早的铸铁退火制品,也是世界上最早的黑心韧性铸铁^⑤,河南登封阳城铸铁遗址发现了韧性铸铁的成品和半成品,在本书检测的公元 3~4 世纪的北票喇嘛洞鲜卑墓地出土铁器中也存在黑心韧性铸铁制品,说明该种产品持续时间较长。部分铸铁退火样品中还出现了球状石墨^⑥。铸铁退火技术的发明是世界冶金史的重大创举。宋以后铸铁退火制品较为少见,并且没有发现球墨铸铁制品,现在认为这种现象与炒钢技术取代铸铁退火技术有关,但是炒钢技术取代铸铁退火技术的内在原因是什么还需要进一步研究。

中国商周时期发达的青铜铸造技术对生铁铸造技术有着重大影响。至迟到战国早期,人们已经使用专门的化铁炉将废旧铁器或生铁原料重熔后浇铸成实用器。河南登封阳城铸铁遗址即出土有这样的化铁炉。这种化铁炉形同当时的化铜炉,可以调整成分,净化铁水,是铸铁技术的一大进步。汉代的化铁炉在河南南阳瓦房庄等地亦出土多座^⑦。从发掘出土冶铁铸造遗物看,中国古代的生铁铸造最先沿用了青铜器陶范铸造技法,至迟于战国时期发明了使用铁范进行大批量铸铁件的生产。铁范可重复使用,生产效率高,技术要求严格,制作出的产品具有较高的质量,标志着中国古代冶铁铸造技术已经达到较高阶段。到目前为止,已经在河北兴隆^⑧、磁县^⑨、满城^⑩,山东莱芜^⑪、滕县^⑫,河南南阳瓦房庄^⑬、郑州古荥^⑭、镇平^⑮和渑池^⑯等地发现战国至魏晋时期铁范或铸造铁范用的泥模,表明铁范使用规模的扩大。从鉴定结果看,从战

① 大冶钢厂冶军:《铜绿山古矿井遗址出土铁制及铜制工具的初步鉴定》,见《文物》,1975 年 2 期:21 页。

② 北京钢铁学院金相实验室:《满城汉墓部分金属器的金相分析报告》,见《满城汉墓发掘报告》,北京:文物出版社,1980 年:369~376 页。

③ 李众:《中国封建社会前期钢铁冶炼技术发展的探讨》,见《考古学报》,1975 年 2 期:1~22 页。

④ 韩汝玢:《阳城铸铁遗址铁器的金相鉴定》,见《登封王城岗与阳城》,北京:文物出版社,1992 年:329~336 页。

⑤ 同③

⑥ 丘亮辉:《古代展性铸铁中球墨》,见《中国冶金史论文集》,北京:北京钢铁学院学报编辑部,1986 年:137~140 页。

⑦ 河南文物考古研究所:《南阳瓦房庄汉代冶铁遗址发掘报告》,见《华夏考古》,1991 年 1 期:1~110 页。

⑧ 郑绍宗:《热河兴隆发现的战国生产工具铸范》,见《考古通讯》,1956 年 1 期:29~35 页。

⑨ 河北省文物管理处:《磁县下潘汪遗址发掘报告》,见《考古学报》,1975 年 1 期:73~116 页。

⑩ 中国社会科学院考古研究所、河北省文物管理处:《满城汉墓发掘报告》,北京:文物出版社,1980 年。

⑪ 山东省博物馆:《山东省莱芜县西汉农具铁范》,见《文物》,1977 年 7 期:68~73 页。

⑫ 李步清:《山东滕县发现铸范》,见《考古》,1960 年 7 期:72 页。

⑬ 同⑦

⑭ 中国冶金史编写组:《从古荥遗址看汉代生铁冶炼技术》,见《文物》,1978 年 2 期:28~43 页。

⑮ 河南文物研究所、镇平县文化馆:《河南镇平出土的汉代窖藏铁范和铁器》,见《考古》,1982 年 3 期:243~251 页。

⑯ 渑池县文化馆、河南省博物馆:《渑池县发现的古代窖藏铁器》,见《文物》,1976 年 8 期:45~51 页。

国西汉至魏晋时期铁范材质是有所变化的,即从白口铁到灰口铁的转变过程,表明古代工匠已经明确认识到灰口铁具有优异的热稳定性与耐用性,这也是灰口铁铁范广泛用于生铁铸造的原因。为了提高生产效率,古代工匠亦采用叠铸技术进行生铁的铸造。其中1974年河南温县招贤村汉代铸铁遗址发掘出土的大批叠铸范,表明东汉时期叠铸技术得到进一步推广使用,技术也高度成熟^①。随着技术的进步和生铁产量的提高,生铁铸造技术广泛应用于大型工程技术和宗教艺术品方面。梁武帝时曾用铁堵塞浮山堰决口,“乃运东西冶铁器数千万斤沉之,亦不能合”^②,说明当时的冶铁的规模已经很大了。山西蒲津渡唐代铁牛,河北沧州五代时期铁狮子,湖北当阳宋代铁塔等著名大型铸铁件及宋代铁铸浑天仪等精密天文仪器的生产,说明中国古代生铁铸造工艺已臻成熟。

生铁和韧性铸铁的大规模生产及技术的进步导致了生铁制钢的发明,铸铁脱碳钢、炒钢、灌钢和其他制钢方法的发明,使中国古代钢铁技术呈现出自己的特色。

对含碳量低的块炼铁及熟铁采用渗碳法制钢,其产品称为渗碳钢;而对于生铁铸件采用脱碳的方法处理得到的钢,称为铸铁脱碳钢。铸铁脱碳炼钢方法是战国中晚期或更早时期在铸铁退火处理工艺的基础上发展起来的。战国时代已经采用了退火处理工艺,对生铁进行脱碳退火,出现了不完全的钢和生铁共存于同一工件中的现象,这种铸件的外部已成为钢,而内层还是生铁。如果生铁铸件脱碳退火时,适当控制时间和温度,基本不析出石墨,不成为韧性铸铁,使得铸件中部分的碳被氧化成气体脱掉,从而变成了钢。这种工艺的特点:一是有控制地脱碳;二是钢件中夹杂物很少。这种固体脱碳制钢的进一步发展,不但广泛使用生铁铸件脱碳成为钢件,而且能够利用这种成形的钢材再锻造成工件。这样,扩大了生铁的使用范围,增加了优质钢材的来源,对钢铁生产有重大作用。可以说,由于脱碳铸铁板材的推广使用,是铸铁脱碳制钢成为一个独立的炼钢方法的标志。目前,在河南登封阳城、古荥、铁生沟^③和南阳等地冶铁或铸铁遗址都已经相继发现了这种板材,北京大葆台西汉墓出土环首铁刀、铁斧等,徐州狮子山西汉墓出土铁凿、铁甲片等,南阳出土的西汉铁刀^④,河南郑州东史马东汉剪刀等多件铁器就是用铸铁脱碳钢板材锻造加工制成的。

炒钢是在半熔融状态下将生铁炒炼脱碳成钢的新工艺。炒钢时,首先将生铁在空气中加热,升温至半熔融状。通过搅拌增加铁和氧的接触面积,使液体中的碳氧化,温度升高,奥氏体中含碳量逐渐下降,铁中的硅、锰等杂质氧化后与氧化铁生成硅酸盐夹杂。如在半固态继续搅拌使氧化完全,则成为低碳熟铁,但也可以在不完全脱碳时终止炒炼过程,以得到中碳钢或高碳钢。然后出炉锻打,使组织致密,挤出杂质,便成为钢材或熟铁材^⑤。炒钢一般在炒钢炉内进行,目前,已经在河南巩县铁生沟、南阳瓦房庄和方城赵河^⑥等冶铁遗址出土多座炒钢炉。对出土铁器的实物检验证明,至迟在公元前2世纪中叶,中国已经使用炒钢来制作兵器和生产工具,炒钢技术在东汉时期已比较普及。其中本书中检测的徐州狮子山楚王陵出土的5件铁器是

① 河南省博物馆、新乡地区博物馆、温县文化馆:《河南温县汉代烘范窑发掘简报》,见《文物》,1976年9期:66~75页。

② 司马光:《资治通鉴》,北京:中华书局,1956年。

③ 河南文化局文物工作队:《巩县铁生沟》,北京:文物出版社,1962年;赵青云、李京华、韩汝玢等:《巩县铁生沟汉代冶铸遗址再探讨》,见《考古学报》,1985年2期:157~183页。

④ 韩汝玢、于晓兴:《郑州东史马剪刀与铸铁脱碳钢》,见《中原文物》,1983年特刊:239~241页。

⑤ 李众:《中国封建社会前期钢铁冶炼技术发展的探讨》,见《考古学报》,1975年2期:1~22页。

⑥ 李京华、陈长山:《南阳汉代冶铁》,郑州:中州古籍出版社,1995年。

目前所发现的最早的炒钢制品。尽管炒钢的发明对汉代的社会发展以及中国封建社会的农业、手工业、水利、交通、建筑、军事力量和人民的物质文化生活都有着重要意义,但是由于不存在大规模发展的条件,直到近代,中国的一些城乡仍在沿用这种技术,没有能够导致工业化的炼钢生产。

古代文献中,“百炼”一词始见于东汉末年。东汉建安年间(公元196~220年),曹操命有司制五把“百辟”宝刀,“百辟”又称“百炼利器”。北宋沈括的《梦溪笔谈》和明朝宋应星的《天工开物》都对“百炼钢”进了记载。近年来国内考古发掘文物有两件属于百炼钢的实物。一是山东临沂苍山县出土的东汉时期的环首钢刀;一是江苏徐州铜山县出土的五十炼钢剑^①。可以说,由于炒钢法的创造,使得百炼钢技术发展成熟阶段。从已发现的古代钢制品来看,中国东汉时代已经掌握了百炼钢技术,当时工艺有三十炼、五十炼、百炼的区别。炼,代表一定的工艺和质量标准;炼数,可能指叠打后的层数。当然,对此还有不同的解释。

中国南北朝时期生铁炼钢技术,最突出的成就,就是“灌钢”法的创造。这种冶炼方法,利用生铁的铁液灌入熟铁中,使碳较快地、均匀地渗入,通过控制生铁和熟铁的比例,可以炼成质量较好的钢。这是成本低、工艺简单而比较能保证质量的一种炼钢方法,是中国早期炼钢技术上一项创造性的成就。从文献记载看,南北朝齐、梁时代的陶宏景已经把“杂炼生柔”当作制钢方法记录下来,指出:“钢铁是杂炼生柔作刀镰者”^②。宋代、明代文献都有不同程度的记载。宋代沈括记载道“世间所谓钢铁者,用柔铁曲盘之,乃以生铁陷其间,泥封炼之,锻令相入,谓之‘团钢’,亦谓之‘灌钢’”^③。沈括第一次使用了“灌钢”的说法。明代宋应星也比较详细地记载了这种方法^④。由此可见,灌钢应是又一种炼钢方法。金相组织鉴定分析表明,江苏盱眙第一次发掘出土的王莽时代的铁剑、北京出土的东汉铁钁、河南唐河出土的六朝窖藏铁刀可能为灌钢制品^⑤,但是如何用金相学来准确判定灌钢制品尚应进一步研究。

为了提高工具的使用性能,需要对工具的刃口部或端部进行进一步的处理工作,夹钢和贴钢技术的使用则是其反映之一。所谓贴钢和夹钢,是在器具刃口部位夹贴上与本体钢不同的钢材,然后将其锻成器具的一种工艺,它利用不同材料的特性提高了器具的使用性能。金相组织观察表明,巩县铁生沟遗址铁钁(No. 4)一侧含碳量高,且有明显分层现象,为已知的早期贴钢制品^⑥。榆树老河深中层文化墓葬出土的1件铁矛(M96:1)和1件直背环首刀(M115:10)的本体含碳量低,边部含碳量高,但是直背环首刀钢和本体钢锻合情况不好,出现氧化裂缝,矛的贴钢工艺制作质量较高,经判定为贴钢制品^⑦。

在明代锻制工具和兵器的锋刃时,采用了“生铁淋口”的办法,使锋刃有钢组织的表面层。生铁淋口即利用熔化的生铁作为熟铁的渗碳剂,使这种熟铁刀口的表面有一定厚度的生铁熔复层和渗碳层。渗碳层具有高碳钢的组织,所以,生铁淋口后进行淬火,就能制成质量上乘的

① 柯俊、韩汝玢:《中国古代的百炼钢》,见《自然科学史研究》,1984年4期:316~320页。

② 李时珍:《本草纲目》,北京:中国书店,1988年。

③ 沈括:《梦溪笔谈》,北京:文物出版社,1975年。

④ 宋应星:《天工开物》,广州:广东人民出版社,1976年。

⑤ 柯俊、吴坤仪、韩汝玢、苗长兴:《河南古代一批铁器的初步研究》,见《中原文物》,1993年1期:96~104页。

⑥ 中国冶金史编写组等:《关于河三遗址的铁器分析》,见《河南文博通讯》,1980年4期:33~42页。

⑦ 韩汝玢:《吉林榆树老河深鲜卑墓葬出土金属文物的研究》,见《榆树老河深》,北京:文物出版社,1987年:146~156页。

产品。这种技术流传很广,几乎遍及全国^①。

除上述几种制钢技术外,还有焖钢、苏钢和镔铁等多种制钢方法,总之,中国古代在生铁冶炼及制钢技术中有多项突破,钢铁的品种种类、产量和质量都得到了发展,在世界钢铁技术发展史上具有独特的意义。使得中国的工农业生产、军事、文化和科学的发展,社会制度的更替与进步,都比冶铁技术出现最早的国家快速得多。

总之,中国古代钢铁冶金工艺在采矿、原料加工、冶炼、铸造、制钢、热处理和锻造技术等各方面都取得了突出的成就,形成自己的钢铁技术体系,见图 1.1,并创造出至少十项领先欧洲的冶铁制钢技术(表 1.1),为中国古代文明的发展作出了巨大贡献。

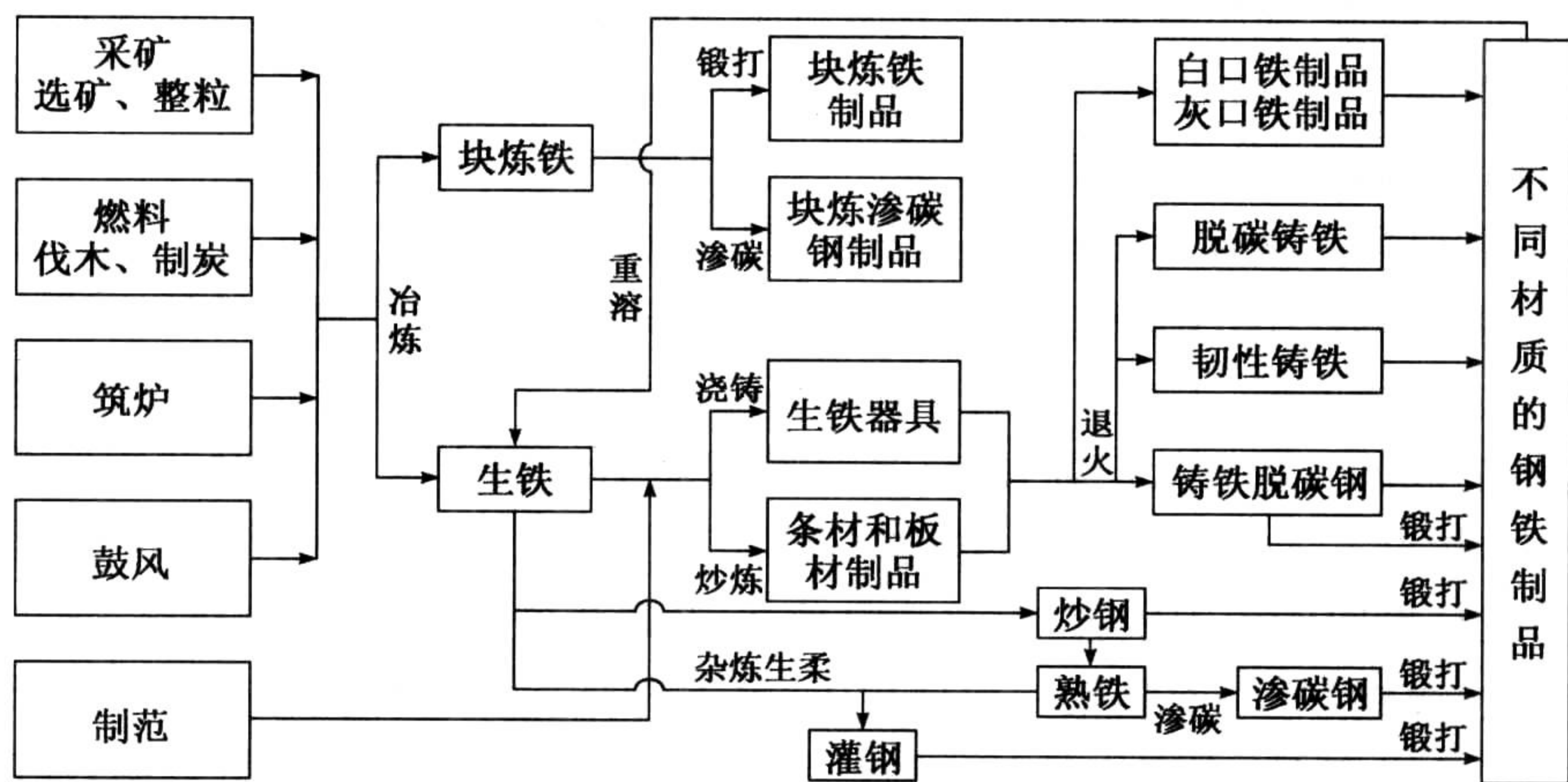


图 1.1 中国古代钢铁技术体系

表 1.1 中国古代钢铁技术的十大进步

技术		发明时间	
		中国	欧洲
1	生产出生铁并铸成实用器物	公元前 8 世纪	公元 14 世纪
2	用退火技术生产韧性铸铁	公元前 5 世纪	公元 18 世纪
3	固体脱碳钢	公元前 5 世纪	
4	用铁范成批铸造生产用具	公元前 4~前 3 世纪	公元 19 世纪
5	用生铁炒炼熟铁或钢材	公元前 2 世纪	公元 19 世纪
6	灰口铁	公元前 2 世纪	公元 17 世纪
7	百炼钢	公元 1~2 世纪	公元 6 世纪
8	灌钢	公元 3~4 世纪	
9	水排鼓风用于冶铸 活塞式木风箱用于冶铸	公元 1 世纪 公元 17 世纪	公元 16 世纪 公元 18 世纪
10	煤用于冶铁 焦炭用于冶铁	公元 10 世纪 公元 16 世纪	公元 17 世纪

但是,对于这个体系中的一些问题的认识还不清楚,还有许多亟待解决的问题。例如中国

^① 杨宽:《中国古代冶铁技术发展史》,上海:上海人民出版社,1982 年。

铁器等金属文物和冶金技术起源于何时、何地,是独立发展起来的,还是从外传来的?秦汉时期钢铁技术大发展的社会、经济及技术原因是什么?如何深入理解钢铁技术的发展与社会进步的关系等有关问题?中原地区发达的冶铁和锻造技术经过我国东北地区和朝鲜半岛传到日本,对这些地区的经济、军事、文化和科学的发展,社会制度的更替与进步,都起到了极为重要的作用,所以铁器文化的传播与交流问题也是东北亚文化交流研究的重要课题之一,但是钢铁冶炼技术的交流与传播的方式、机制、模式、路线、范围和金属制品的产地是怎样的?冶金技术在不同考古学文化中的特点和作用是什么?金属和冶金技术是怎样促进中国社会发展的?冶金技术在人类文明中的地位又如何?这些考古学问题,应该是文物考古的主要课题之一,这关系到中华民族起源与早期发展的重大问题,而这些问题的解决,仅仅靠传统考古学的方法和理论是无法解决的,需要冶金考古来解决这些问题。另外正确判定出土铁器的材质种类是研究的基础,但如何确定古代钢铁制品的材质种类?炒钢技术是何时发展起来的及发展过程如何?同时,在多年的中国冶金史研究中也发现了诸如浮凸组织、具有球状石墨的韧性铸铁组织、长期室温时效下铁素体晶粒内有新相析出组织、晶粒间界迁移以及铁器锈层中保留有原组织的痕迹等多种特殊结构的显微组织,这些金属显微组织及锈蚀产物是数百年乃至千年变化的产物,在现代材料科学的显微组织中是很少能够见到的,并且到目前为止还没有人深入、系统研究产生这些现象的原因,这也是冶金史研究的重要问题。这些问题的解决都需进一步的研究工作。

新中国成立以来,考古工作者已经发掘了秦汉至魏晋时期大量的遗址和墓葬,出土数量众多的铁器,为研究钢铁制品的冶炼、制造工艺提供了十分珍贵的资料。特别是江苏徐州狮子山西汉楚王陵、河南鲁山望城岗冶铁遗址和北票喇嘛洞三燕文化墓地的发掘以及对出土铁器进行的实验研究,为系统研究秦汉至魏晋时期钢铁技术的发展提供了契机。

第二章 古代钢铁技术研究方法

古代钢铁技术的研究除运用历史文献学、考古学、民俗学和民族学等人文社会科学研究方法之外,还主要用到自然科学中的环境、地质、矿业、冶炼、铸造、压力加工、腐蚀与防护、理化分析和年代测定等多学科的技术和方法。具体来讲,就是对涉及古代钢铁技术发展的采矿、冶炼、铸造和锻造等遗址和遗物进行历史文献学、考古学背景、地质环境资料、民族民俗学和传统工艺进行整理研究,并结合现代分析技术对古代钢铁制品进行年代学、金相学、冶金学等方面的研究,其目的是研究钢铁冶炼方法及器物的制作等方面的规律,探索冶金学的特征;对古矿冶遗址进行发掘、调查,通过冶铁遗址遗物的考古学、冶金学分析古代冶铁炼钢技术的面貌,科学地作出结构、生产工艺的判断和复原,揭示其工艺特点和技术水平,认定其产品特征、数量,探索其产品的社会功能,在更加广泛的范围内讨论冶金技术发展及交流状况,在更深层次上讨论冶金技术在人类文明发展中的作用。

因铁元素化学性质活泼,铁器在自然界中比较容易锈蚀,并且出土铁器以武器和生产工具为多,难以引起古代金石学家的重视,所以金石学著作中有关铁器的内容极少,很难从金石学著作中研究古代铁器状况。自20世纪20年代开始,章炳麟^①、章鸿钊^②、郭沫若^③、杨宽^④、雨易^⑤、李学勤^⑥、童书业^⑦和黄展岳^⑧等大批学者开始利用历史文献对铁器的出现和发展进行了讨论。随着大量考古发掘的进展和发掘报告的出版,为利用考古学方法研究中国古代钢铁技术发展提供了重要资料,这方面的研究以李京华^⑨、王巍^⑩和白云翔^⑪先后出版的专著较为详细和深入。华觉明^⑫、吴坤仪^⑬和李晓岑^⑭等学者对各地传统制铁技术进行了调查,取得大量资料。然而金相学和冶金学的方法至今仍是研究古代钢铁技术的一项重要的基本的研究手段,而且通过这种方法所

① 章炳麟:《铜器铁器变迁考》,见《华国月刊》,1925年2期:1~33页。

② 章鸿钊:《石雅》,北京:农商部地质调查所印行,1927年;《古矿录》,北京:地质出版社,1954年。

③ 郭沫若:《奴隶制时代》,北京:人民出版社,1973年。

④ 杨宽:《中国古代冶铁技术发展史》,上海:上海人民出版社,2004年。

⑤ 雨易:《东周考古上的一个问题》,见《文物》,1959年8期:64~65页。

⑥ 李学勤:《关于东周铁器的问题》,见《文物》,1959年12期:69页。

⑦ 童书业:《从中国开始用铁的时间问题评胡适派的史学方法》,《文史哲》,1955年2期:30页。

⑧ 黄展岳:《先秦两汉考古与文化》,台北:允晨文化实业公司,1999年。

⑨ 李京华:《中原古代冶金技术研究》(第一集),郑州:中州古籍出版社,1993年;《中原古代冶金技术研究》(第二集),郑州:中州古籍出版社,2003年;李京华、陈长山:《南阳汉代冶铁》,郑州:中州古籍出版社,1995年。

⑩ 王巍:《东亚地区古代铁器及冶铁术的传播与交流》,北京:中国社会科学出版社,1999年。

⑪ 白云翔:《先秦两汉铁器的考古学研究》,北京:科学出版社,2005年。

⑫ 华觉明:《中国古代金属技术》,郑州:大象出版社,1999年。

⑬ 吴坤仪、苗长兴:《山西阳城犁镜传统生产工艺调查》,见《自然科学史研究》,1994年1期:32~38页。

⑭ 李晓岑、朱霞:《云南民族民间工艺技术》,北京:中国书籍出版社,2004年。

取得的成果也是最为突出的,发表文章和出版的书籍较多^①。因为历史文献、考古、传统工艺调查等研究发表的文章较多,本书不再详细论述这些内容,而主要对金相学、冶金学和年代学的方法进行讨论,包括:(1)古代钢铁制品的金相组织及杂质元素分析;(2)古代钢铁制品中夹杂物的形貌、组织及成分分析;(3)古代钢铁冶炼炉渣的形貌、组织及成分分析;(4)结合数学统计方法对钢铁制品的夹杂物及炉渣的元素组成进行分析,为正确判定铁制品材质和炉渣的种类提供新的手段,并初步给出古代钢铁制品材质的判定标准;(5)古代铁器的¹⁴C年代测定等。

一、金相组织及杂质元素分析

金相组织分析是最传统的,也是最基本的研究方法,利用此种方法已经取得重大成果,有必要将这一方法作一总结。通过对钢铁制品的显微组织(金相组织)的仔细观察,可以知道这件器物是怎样制成的,也可以知道经过了什么样的历程,如受热、锻打、淬火、使用等。所以我们看到的钢铁制品的一切微观组织都是和它的经历联系在一起的,钢铁制品可以看作一个过程(上溯到从矿石中提取出时),亦可以看作一系列事件的集合体。

金相组织的鉴定有两种方法:一是表面金相组织鉴定;二是取样金相组织鉴定。表面金相组织鉴定不需取样,且可以选择多处进行实验,故对文物不会造成较大损坏,但只反映铁器表面的金相组织,多适用于大型铸件。对于内外组织均匀的白口铁,不影响检测结果的准确性,而对于内外组织不同的铁器,如脱碳铸铁件、块炼渗碳钢等,则应该取样进行金相组织鉴定。进行取样金相组织鉴定不可避免地要破坏金属文物,这是深入研究冶金技术的需要,而文物考古及博物馆方面的学者则希望所有文物都应该完好,以利于展览。解决这个矛盾的途径就是:(1)冶金史工作者必须与考古学者密切合作,共同协商进行样品的选择、制备工作;(2)对于必须取样的文物样品,应尽量在不影响外观形貌的情况下选择残断处或不影响主要纹饰、形制的地方取样,截取的样品应尽量地小而又能满足研究的需要;(3)取样可选择用0.1毫米的钼丝线切割法进行,在做完实验之后,将样品镶回。

鉴定样品的选择是研究的基础,正确选择样品是很重要的。对于一个冶金遗址,需要尽可能详细地研究它的规模、持续时间、技术特点等各方面的信息,所以要尽可能多地选取样品,如矿石、炉渣、耐火材料、炉壁、模具、浇冒口、金属成品或半成品等遗物,进行多方面的综合研究。但是更多的金属制品不是在冶金遗址中而是在墓葬、窖藏、城址等其他考古遗址中发现的,所以要根据研究的需要来选择样品。选择的原理是样品要有代表性,不仅要考虑地域、时间、种类的代表性,也应在技术上有代表性,同时选择的样品也应有足够多的数量。如对出土的古代钢铁制品应多重视兵器、工具、农具的金相学研究,也不应忽视生活用具的研究。

制备样品是研究的关键。对于不同钢铁制品应注意截取、制备实验样品的方法。如锻制样品要考虑加工方向,兵器、农具应尽可能在刃部取样。这方面有不少的教训。由于制备样

^① 北京钢铁学院《中国冶金简史》编写小组:《中国冶金简史》,北京:科学出版社,1978年;北京钢铁学院冶金史研究室:《中国冶金史论文集》北京钢铁学院学报编辑部,1986年;北京科技大学冶金史研究室:《中国冶金史论文集》(二),北京科技大学,1994年;北京科技大学冶金与材料史研究所:《中国冶金史论文集》(三),北京科技大学,2002年;华觉明:《中国古代金属技术》,郑州:大象出版社,1999年。