

铁器时代演变与工业革命

Evolution of Iron Age and Industrial Revolution

供稿|毛卫民^{1,2}, 王开平² / MAO Wei-min^{1,2}, WANG Kai-ping²

内
容
导
读

铁器时代初期强盛的铜器制造业使中国历史上出现了较长的铜器铁器混用时期，而欧洲没有经历这种时期。中国有长期金属冶炼和因制造原始瓷器而累积的高温加热技术，因此工业革命前中国在炼铁、制钢等多方面技术长期领先于世界。但中国历史上两千多年皇权专制统治对冶铁业的长期限制以及禁止，尤其是明清时期的禁铁措施使得工业革命前后一百年，中国的冶铁业从领先世界而迅速转变为极度落后的状态。而在欧洲多国邻立的环境保障了钢铁技术和产业的相互借鉴、交流和发展，为工业革命的顺利推进提供了物质支撑。

铁器时代之前的文明

进入铁器时代之前，人类文明处于铜器时代，且中西方铜器生产和使用存在着巨大的差异^[1]，这种差异可以简略地用图1表示。

对人类文明产生巨大影响的材料技术不仅是新技术出现时间的早晚，更重要的是大量使用这种材料的规模。公元前5000年—公元前4000年期间，中西方均出现了人工冶铜技术。由于远古中国地区拥有到处可得的铜矿资源和良好的高温烧陶技术^[2]，中国铜器时代的铜器使用量持续增长。自约公元前3000年开始的五帝时代，中国的冶铜技术已经比较成熟并广泛应用于生产和战争。在夏代中国已经出现了铜鼎等大型铜器，至商周时期中国的铜器技术发展达到历史的巅峰^[1]。自公元前5000年欧洲及附近地区出现人工冶铜技术而进入发展期以后，由于铜矿

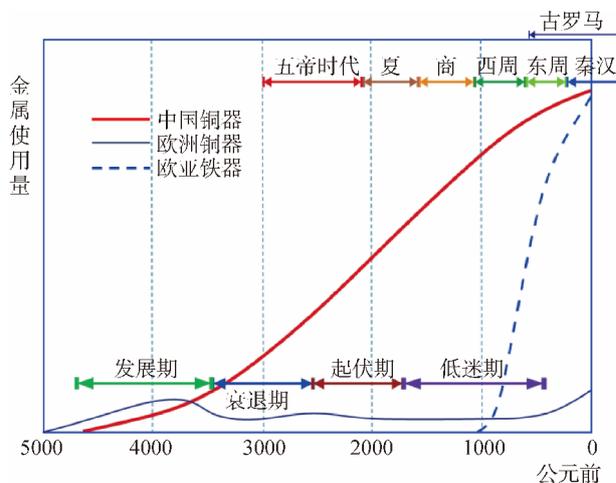


图1 铁器时代前中西方铜器使用量的差异

资源的缺乏以及其高温技术局限，不能利用那些需要更高温度冶炼的铜矿，导致欧洲铜器的使用进入

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

了衰退期。随后虽有所起伏，但在公元前2000年—公元前700年的1300年期间，西亚、北非和欧洲等地铜的年平均总生产量仅约为非常低迷的400 t^[3]。

自公元前1000多年前世界各地发明人工冶铁技术以来至20世纪70年代，人类都是处于广义的铁器时代，包括工业革命前的传统铁器时代，直至其后的后铁器时代或钢铁时代。20世纪晚期在所涌现大量新材料的推动下信息产业的兴起才标志着铁器时代的结束。早期的人工冶铁技术主要包括炼铁和炼钢两个重要环节。炼铁过程大致为：用燃烧木柴、煤炭或木炭等燃料加热以氧化铁或硫化铁为主的铁矿石，达到足够高的温度后燃料中的碳与铁矿石中的氧或硫结合成气体逸出，还原出铁矿石中的铁。还原出来的铁中还残留了铁矿石中的硫、磷、硅……以及多余的碳等许多杂质。炼铁获得的产物称为生铁，其性质脆而硬，通常并不适合直接使用。可以把炼铁过程简单地理解为：把天然铁矿石转变成含有很多杂质的生铁。炼钢或制钢过程大致为：利用多数杂质元素比铁更容易氧化的特性，在高温下向生铁内输入空气中的氧气以便氧化生铁内的硫、磷、硅、碳等杂质元素，然后设法清除这些

杂质氧化物。例如，在液态铁水中投入氧化钙等造渣剂，使其与氧化的杂质形成钢渣漂浮于铁水表面并被清除。炼钢过程中还可以控制适当的含碳量或加入某些有利的元素，以获得更好的使用性能。可以简单地把炼钢过程理解为：去除生铁中的杂质并获得洁净和优良性能的钢制品。

工业革命之前的铁器时代

约公元前1000年，欧洲地区进入铁器时代初期铜器的应用很不发达。率先掌握冶铁技术的古罗马迅速推广使用铁器，并利用其优势横扫北非、西亚和欧洲大陆。而当时铜器使用非常发达的中国对铁器的推广使用并不那么急迫。公元前210年秦始皇下葬时中国早已掌握冶铁技术，但秦始皇陵中鲜有铁器，却出土了四万多件铜质兵器。中国汉代也有相当长的铜器与铁器的混用时期。然而与铜器相比，铁器具备重量轻、更坚韧、更锋利，且矿产资源丰富的优势，因此古代中国的冶铁技术得到了稳定的发展，并在农业、畜牧业、纺织业、建筑业、交通运输业、军事、文化、日常生活等领域得到了广泛的应用。



图2 中西方铁器时代初期的铁器：(a) 约公元前1400年甘肃临潭磨沟遗址人工冶铁并制作的铁条^[4]；
(b) 约公元前900年希腊铁凿(希腊雅典卫城博物馆)

中西方早期的原始冶铁技术多为块炼铁技术，即在空气中用炭火加热坩埚中铁矿石，使之逐渐转化成海绵状疏松的铁块。随后，借助加热并捶打成形的方式去除杂质、控制碳含量而制成铁器。如果在坩埚底部开口使空气顺畅流通，可明显提高升温速度和加热温度，直至使还原出来的铁熔化成液体，并从坩埚底部的开口不断流出，集中收集，此即为竖炉冶铁技术。这种技术需要更高的温度，而中国发明早期瓷器时所能实现的高温技术为发展竖炉冶铁提供了坚实的支撑。公元前500年以前，中国湖南、湖北、江苏、山西、河南、甘肃等地均出现了竖炉冶铁，由此可以把铁水直接浇铸成形，制成生铁铸件。到公元14世纪在欧洲才出现类似的技术^[5]。



图3 铸于公元953年的沧州铁狮^[6]

竖炉技术的出现使得一次冶铁量得以明显提高，为制造大型铸件提供了便利。中国铁器时代中期最大的铸造铁器为公元953年后周时期重约40 t的沧州铁狮“镇海吼”^[6]。

铁器时期，中国在炼铁、炼钢方面的许多关键环节曾出现过领先于世界的重要技术。将生铁铸件再次加热，烧损铸件中的碳或改变碳的形态可以明显降低所制铁器的脆性并大幅提高铸件的性能。这些技术在春秋战国时期已经出现，秦汉时期得到了推广应用，而直到17、18世纪欧洲才出现类似的技术^[5]。据宋《太平御览》记载，东汉时以含碳较高的冶炼铁条为原料，经过反复加热、锻打，可加工制成钢条。其反复加工的次数可为三十次、五十次、甚至百次，称为三十炼钢、五十炼钢、百炼钢等，即为百炼钢技术。由此衍生出“千锤百炼”、“百炼成钢”等成语。百炼钢刀坚韧、锋利、经久耐用，欧洲则于公元6世纪出现了类似技术。公元1世纪中国出现了水力驱动鼓风技术，17世纪出现了活塞式风箱鼓风技术用于提高冶铁的温度和生产效率。欧洲则分别在公元4世纪和18世纪出现相关技

术。公元10世纪中国开始把煤用于冶铁，16世纪把焦炭用于冶铁，欧洲到17世纪才在冶铁中使用这些更高燃烧值的燃料^[5]。

约公元前2世纪，中国出现了一种炒钢技术。公元1世纪东汉的《太平经》中就曾经记载过这种技术，即采取对生铁水鼓风搅拌促使铁水中的碳烧损氧化，以使生铁变成钢。明朝的《天工开物》中描述了类似的过程(图4)^[7]。用风箱鼓风冶炼出生铁水后，可以直接浇铸成铸件。也可以将高碳铁水继续导入一个方池，用长杆搅拌，即“炒”铁水，使其与空气混合，促使铁水中的碳烧损。其间会向方池中抛洒泥灰，这种泥灰很可能就是造渣剂。图4所示的炼铁、炼钢连续流程已经包含了现代钢铁生产原理中最主要的流程，而欧洲到18世纪才形成类似的流程^[5]。到11世纪初北宋时期，中国冶铁制钢技术领先当时世界水平的程度达到了顶峰，铁的年产量已达到十几万吨的水平^[8]。而直到18世纪初整个欧洲铁的年总产量才达到或超过这一水平，其中工业革命发源地英国于1788年仅生产了6.8万t铁^[9]。



图4 《天工开物》记载的生熟炼铁炉^[7]

工业革命与中西方铁器时代发展的差异

自18世纪中期开始，英国连续发明出了新的各类机器装置，并由此引发了工业革命。用机器大量

取代人工可以使工业化生产的产品实现大批量、高效率、低成本、高品质等特征。然而，制造这些机器不可避免地要大规模使用钢铁材料，同时也对钢铁材料的生产提出了大量、高效、低价、优质的要

求。因此钢铁材料是推进工业革命必备的物质基础。

1856年德国人西门子构想了一种具有熔池的高效炼钢炉,其中设计了燃料和热空气通道,可以快速加热并控制钢水温度,保证钢材的质量。基于西门子的构想,1864年法国人马丁建造了第一个专用炼钢设备,称为平炉,也称为西门子—马丁炉。由此开始了现代的炼钢生产。1871年英、美、法、德的钢产总量达到了约75万t,1875年则快速发展到约165万t^[10, 11]。1879年英国开始用平炉钢建造钢结构桥梁,1889年法国政府用约7000 t平炉钢建成了324 m高的埃菲尔铁塔,是工业革命推进炼钢技术改进的标志性成果。1856年英国人贝斯麦公布了一种转炉炼钢法,在一个可以翻转的熔池内把空气吹入生铁来炼钢的高效方法。但这种方法并不适用于西欧地区生产的酸性生铁。1878年英国的托马斯发明了把炉砖改造成碱性砖的托马斯法,并迅速在法国和德国得到推广应用^[12]。随即,1895年英、美、法、德的钢产总量超过了1000万t^[10]。优质钢铁材料的大规模生产有力地支撑了工业革命的推进。综上所述可以看出,欧洲多国邻近、不同政体并存的环境有利于钢铁技术的交流和钢铁产业的竞争发展。各国的技术思想和钢铁生产会互相借鉴、促进、接续、融合,新技术在一国受阻后会在另一国继续发展,由此导致欧洲钢铁技术与产业蓬勃发展的局面。

在工业革命来临之际,中国虽然已经具备了多种良好的、甚至领先的炼钢技术,但这些技术大多是依靠长期的摸索和经验的积累。其间虽然有很多的技术发明和创新,但对其中的科学原理并不十分明了。中国自西周出现采矿业,春秋时期有了冶铁业。现有文献显示,西周、春秋、秦汉、三国魏晋、隋唐、五代时期、宋元明清等历代历朝都有政府管制矿产和冶铁业的记载^[13]。在中央集权的治理下,这种管制会体现出执行力强而高效的特征,但如果管制决策不够科学严谨则也会对冶铁业造成较大伤害。春秋时期的齐国就禁止民间采矿^[13]。汉朝时官方为限制地方势力,实施严格的官营冶铁和税收管理,并杜绝地方私自铸铁^[14]。宋朝徽宗时曾下令民间除制作农具外,禁止买铁,严厉控制钢铁流通^[15]。明朝初期临近工业革命的开端,明太祖认为矿冶业劳民伤

财,下令停止采矿冶铁,后虽有所松动,但终又行禁令。明成祖、明英宗、明代宗、明世宗等都实施过禁矿禁铁的政策^[16]。明神宗为获取税收包庇矿使营私,致使矿冶业遭到严重破坏^[16]。清朝初期康熙和雍正都禁止包括冶铁在内的矿务^[15]。2000多年来,中央集权的统治在没有明显外来竞争压力的情况下严管采矿冶铁业,一方面可获得大量税收来源,另一方面也为防范地方、民间借助采矿冶铁业迅速强大和因此导致的反叛。然而,中国冶铁业以经验积累的方式形成的先进技术很难借助技术交流在全国推广,且也很容易因政府的禁铁政策而丧失整体传承的连续性。重新开放的冶铁业在很大程度上有需要大量累积重复的经验和技能。因此,从18世纪末期到19世纪末期的100年间,中国的冶铁业很快从领先世界沦落到极度落后于世界的境地。晚清末年,随着洋务运动的兴起,中国全面引进欧洲钢铁技术和设备,于1890年建成青溪铁厂并投产^[17],于1894年建成汉阳铁厂并投产^[18]。然而,时过境迁,中国已经错过了工业革命的时机,所建的两个铁厂前者很快破产,后者只能惨淡经营。

致谢

感谢内蒙古科技大学教育教学改革研究“材料与文明”项目的资助(No.0302051603)。

参考文献

- [1] 毛卫民,王开平.金属的使用与中西方文明的发展(I):铜器制造和使用的差异.金属世界,2018(5):22
- [2] 李家治.中国科学技术史:陶瓷卷.北京:科学出版社,1998
- [3] Hong S, Candelone J P, Soutif M, et al. A reconstruction of changes in copper production and copper emissions to the atmosphere during the past 7000 years. *Science of the Total Environment*, 1996, 188(2-3): 183
- [4] 陈建立,毛瑞林,王辉,等.甘肃临潭磨沟寺洼文化墓葬出土铁器与中国冶铁技术起源.文物,2012(8):45
- [5] 北京科技大学冶金与材料研究所.铸铁中国-古代钢铁技术发明创造巡礼.北京:冶金工业出版社,2011
- [6] 沧州市文物局.沧州文物古迹.北京:科学出版社,2007
- [7] 宋应星.天工开物.北京:人民出版社,2015
- [8] 葛金芳.两宋工艺革命述论.中国社会经济研究,1991(3):14
- [9] 费罗.论英国工业革命前后社会阶级结构的变化.湘潭师范学院社会科学学报,1987(4):69
- [10] 姜曦.浅谈英国钢铁工业发展的历史及未来预测.冶金经济与管理,2015(5):47

(下转第23页)

下, 气压越高, 切割速度会越快, 而当气压达到某个值的时候, 气体会对激光作用区产生干扰作用, 切割速度反而会变慢。

与加工材料相关的要素

板材的材质和厚度会影响到激光能量的消耗。材料的表面状况会影响到激光束吸收的稳定性, 而加工形状又会影响到热量的扩散。

材质: 材料不同, 性能不同, 对激光束的吸收率也不同。因此, 不同的材料具有不同的激光切割适应性。在激光切割加工的时候会看到光斑在工件上快速移动, 光斑越小说明切割的质量越好。例如, 铜、铝等具有高反射率的材料就不利于光斑的形成, 对切割机的要求更高。

厚度: 随着板材厚度的增加, 所需要的激光功率越来越大, 而需要的切割速度越来越低。对厚板加工时, 如果功率不够, 切割速度过快, 就不容易切透。

表面状态: 同种材质, 表面状态不同, 对光束的吸收也不同, 特别是表面粗糙度和表面氧化层都会影响表面吸收率。一般来说, 材料表面越平整, 切割的质量越好。在激光切割过程中, 要想提高材

料的切割性能, 可通过改变材料表面状态来实现。

结束语

影响激光切割的因素有很多, 如激光功率、焦点位置、喷嘴直径及高度等, 如果控制不当, 容易出现明显毛刺、烧蚀、切割面粗糙等质量问题, 要防止或者减少这些质量问题的出现, 在切割前, 要根据板材的材质和厚度来设置相关工艺参数, 在切割中, 一旦出现质量问题, 分析并找出导致质量问题的因素, 调整相关工艺参数, 来改善加工质量。

参考文献

- [1] 叶建斌. 激光切割技术. 上海: 上海科学技术出版社, 2012
- [2] 刘洪顺. 激光制造技术. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011
- [3] 陈海燕. 激光原理及技术. 武汉: 武汉大学出版社, 2011
- [4] 张鹏程, 宋维健. 大功率激光切割质量影响因素. 金属加工(冷加工), 2012(12): 39

作者简介: 李召华, 女, 讲师, 在空军工程大学航空机务士官学校从事机械制造方面的教学工作, 通信地址: 464000河南省信阳市航空路23号222信箱, E-mail: 604697274@qq.com。

(上接第 20 页)

- [11] 张祥国. 欧洲钢铁业二战后发展轨迹及对中国启示. 冶金经济与管理, 2015(2): 24
- [12] 申纪. 钢铁时代的冶金技术改革者——托马斯. 金属世界, 1997(1): 21
- [13] 赵连稳. 古代矿业管理法律制度. 西部资源, 2014(4): 78
- [14] 张剑虹. 我国古代矿业管理法律制度研究. 中国矿业, 2012, 21(6): 28
- [15] 李海涛. 前清中国社会冶铁业. 江苏工业学院学报, 2009, 20(2): 59
- [16] 赵长贵. 明代矿业政策演变的历史考察. 郑州大学学报(哲学社会科学版), 2018, 51(4): 95
- [17] 刘兴明. 中国首个钢铁重工业——青溪铁厂. 文史天地, 2016(5):

12

- [18] 许华利. 汉冶萍公司百年记忆. 湖北文史, 2009(1): 1

作者简介: 毛卫民(1950—), 男, 浙江余姚人, 北京科技大学材料科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向: 金属材料、多晶体材料晶体学各向异性的形成与利用、电工钢材科学原理及新型电工钢品种的开发研究、电解电容器铝箔的材料学原理及新产品开发、高强度钢材各向异性的开发与利用等, 负责完成10多项国家级材料科研项目以及大量企业工程研究项目, 在国内外刊物上发表200余篇学术论文, 出版学术专著6部、教材6部。E-mail: wmmao@ustb.edu.cn。