

钢铁冶金工程的演化过程与规律

张寿荣

(武汉钢铁(集团)公司, 武汉 430081)

摘要: 本文概述了钢铁冶金工程的演化过程, 并对其演化、规律进行了归纳。钢铁是现代社会使用的主要的材料之一。我国在公元前 600 年进入铁器时代, 长期的经验积累使钢铁冶炼成为一门技艺; 随着人类社会经济的发展, 钢铁冶炼演变为农牧业外的手工冶炼作坊; 工业革命拉动了社会对钢铁需求的增长, 与此同时带来的技术创新促进了钢铁工业的诞生, 形成了钢铁冶金工程; 在 20 世纪全球经济快速增长中, 在技术创新推动下, 钢铁工业获得空前的大发展。在 21 世纪, 钢铁仍然是人类社会使用的重要材料, 钢铁工业将继续发展。人类历史, 总体来讲, 就是人类为自身生存、发展的需要而谋求经济发展的演变过程, 钢铁冶金工程的演化是人类对利用、使用和制造工具的演变过程中一个组成部分。

关键词: 铁器时代; 冶铁技艺; 工业革命; 钢铁工业; 工程演化

中图分类号: T-09

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2010)03-0251-13

1 引言

人类与其他动物的主要区别在于能使用和制造工具, 这是人类得以发展和创造出人类文明的重要前提。人类祖先要使用工具就要寻找制造工具的材料, 首先是石头, 然后是青铜, 最后是铁。人类社会发展阶段划分为旧石器时代, 新石器时代, 青铜时代和铁器时代, 就是以制造工具的主要材料为依据的。

考古研究认为, 公元前 2900 年就已冶炼出金属铁(埃及金字塔中发现的), 但至今未发现有古代文献的记载。关于冶炼过程的第一个描述是埃及公元前 1500 年古墓墙上的壁画。我国约在公元前 1500 年进入青铜时代, 公元前 600 年进入铁器时代。铁以其在地球上特有的赋存状况和物理化学性能优势, 在人类文明形成过程中, 成为人类社会所使用的最主要的材料, 而且在可预见的未来

中不会改变。钢铁工业已成为支撑人类社会文明的基础产业。

工业革命以来, 人类社会所使用的材料总体上可以分为两大类: 金属材料与非金属材料。在金属材料中也可以分为两大类: 钢铁与非铁金属材料。由于自然赋存条件的不同, 以及钢铁材料本身固有的特性, 目前人类社会使用量最大, 使用面最广的材料是钢铁。不同金属材料的制造工艺是千差万别的, 本文仅对钢铁冶金工程的发展过程加以回顾、分析。

2 长期的经验积累使钢铁冶炼成为一门技艺

金属铁在地球上是不能自然赋存的。人类如何从矿石中得到第一批金属铁, 至今仍是谜。但可以肯定的是古人从富铁的氧化物, 如富铁矿中得到铁(有人说是从陨石中得到的)。由于工艺简

收稿日期: 2010-08-16; 修回日期: 2010-08-25

基金项目: 中国工程院“工程演化论研究”课题

作者简介: 张寿荣(1928-), 男, 河北定县人, 中国工程院院士, 主要从事钢铁冶金工作。E-mail: 007lzl@163.com

陋,不可能达到金属铁融化的温度,首先冶炼出的不是液态金属,而是还原并软化了了的、含有渣的金属铁的混合物。由于当时知识的限制,冶炼过程的温度低,从铁矿石中还原出的金属铁不能大量吸收碳,含碳量低的铁熔点较高,因而处于半熔融状态,相对而言由氧化物、硅酸盐等形成的渣熔点低于金属铁而处于液态。实际上,当时由富铁矿经还原得到的是半熔融状态的金属铁和液体渣的混合物,人们经过反复锻打把渣挤压出去得到含碳低的熟铁。按现代的分类,熟铁属于钢的范畴。因此可以认为,在人类文明史上,人类先冶炼出“钢”,许多年之后才冶炼出现代意义上的生铁。

据考古学者的研究,早期的冶炼炉是熔融洞,

用石块砌筑并涂上泥衬,用风箱送风(见图 1)。风箱是人力驱动的,使用的燃料和还原剂是木炭。熟铁太软,不能制造器具,古代人创造了熟铁渗碳的技术,使熟铁转变为具有所需强度、硬度和韧性的钢。

由于送风设备的机械化,送风能力增大,使冶炼炉容增大,炉体高度的增加,冶炼炉演变成立式炉。随着炉容增大,热效率提高,竖炉内温度升高,冶炼出的不是熔融状态的熟铁而是液态铁水。由于温度升高,铁液熔池发生了增碳过程,铁水中的含碳量提高,铁水凝固后得到生铁。生铁流动性好可以铸成器具。14 世纪欧洲出现了竖炉,这种竖炉是近代高炉的前身,如图 2 所示。

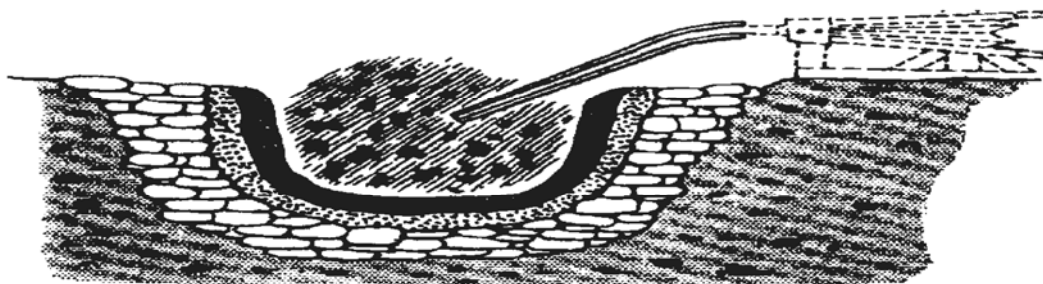


图 1 早期炼铁熔融洞^[1]

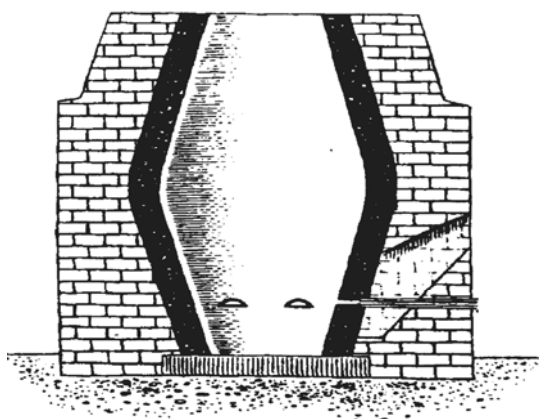


图 2 竖炉的结构^[1]

生铁与熟铁不同,可以直接铸成器具,虽硬但质脆,不具备韧性和延展性,可加工性差。要得到具备韧性和延展性的钢,必须使生铁中的碳降低并除去含有的杂质。办法是将生铁中含有的碳元素氧化,并降到所需要的含碳量,从而使生铁转变为钢。西方采用的炼钢工艺是用搅钢炉将

生铁炼成熟铁(含碳量很低的一种“钢”),然后再用渗碳工艺得到不同性能的钢。欧洲大量采用坩埚炉渗碳,见图 3 及图 4。

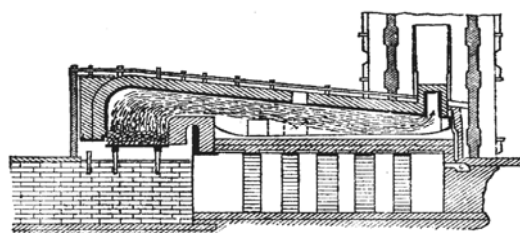


图 3 搅钢炉的简图^[2]

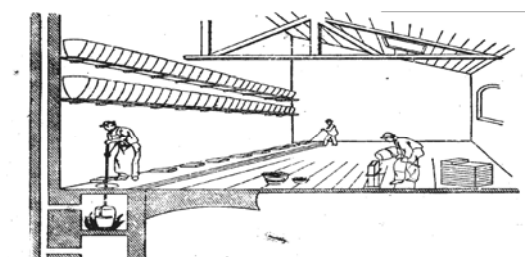


图 4 坩埚炉熔炼作坊的断面图^[2]

我国是最早掌握冶铁技艺的世界文明古国之一。秦朝时期已在主要产铁地区设置铁官,可见当时已形成了一定规模的手工作坊性的产业,当时我国的冶铁技术处于世界领先地位。详细记载我国古代冶铁技艺的书有宋应星著的《天工开物》(此书初刊于1637年)。该书对当时铁、钢冶炼过程均有详细的描述。图5为该书描述钢铁冶炼工艺的插图。我国古代用的装备与西方不同,但基本原理是相同的:即先从铁矿石中冶炼出生铁(铁水),把铁水中的碳氧化掉一部分得到钢(或熟铁)。

随着冶铁工艺的不断改进,钢、铁产量规模不断扩大,长期经验的积累,使钢铁冶炼和加工成为一门技艺。无论在西方或东方,钢铁冶炼加工均以一定规模的冶铁手工作坊的形式成为农牧业之外手工业的重要组成部分。

3 工业革命及其带来的技术创新促进了现代钢铁工业的诞生

进入18世纪,欧洲的工业革命已经开始。蒸汽机的出现,带动了纺织、铁路、轮船等的发展,当时,需要大量生产钢铁来支持工业、交通、运输业的发展。当时铁路的轨道是木制的,上面包一层铁皮,船舶、建筑物、大部分桥梁都是木制的,甚至容器也是木制的。工业革命带来的经济增长期盼着现代钢铁工业的诞生。现代钢铁工业

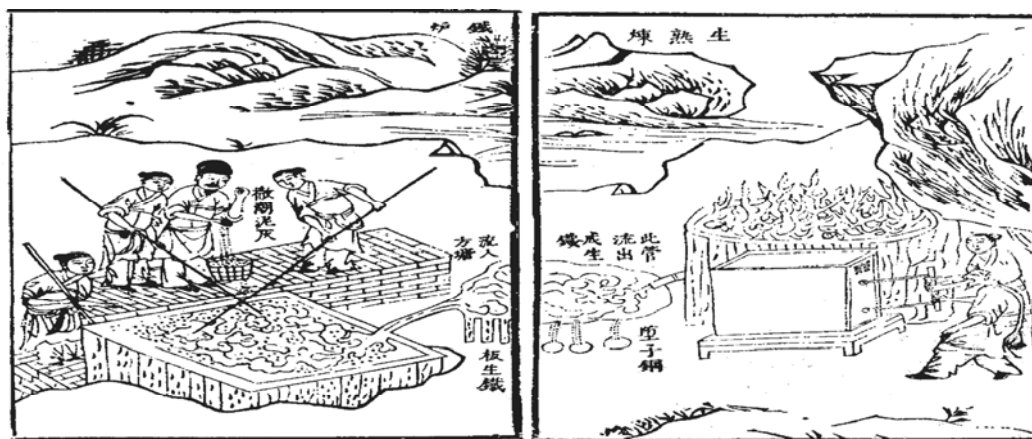
的演化经历漫长的历史过程,其中充满着技术创新和旧技术的淘汰,同时也充满着工程系统的集成和演进。就技术创新而言,既有渐进性的改进,又有突变性的发明,与此同时,相应落后的工艺装备被淘汰出局。就工程系统的集成而言,也经历了“万能化”的钢厂到以“专业化”生产的钢厂,钢厂的生产流程发生了重构性的演进。进入新世纪以来,随着循环经济等概念的发展,钢厂的功能拓展也提到学界和产业界的日程上来。总的看来,钢铁工业已经历了丰富多彩的演化,并且将继续演变进化着。

钢铁工业属于流程制造业。流程制造业的功能是把自然资源加工成制造业所需的材料。工业革命前,无论流程制造业和加工制造业都以手工作坊的形式存在。工业革命促使所有的制造业和手工作坊演化为门类不同的工业,即现在称之为的传统制造业。

下面将对若干在形成钢铁工业的演化过程中重要的技术创新和工程系统的集成作简要的描述:

3.1 焦炭高炉替代木炭高炉^[1]

18世纪以前炼铁作坊的高炉使用的燃料是木炭,当时英国作为产铁大国不得不大量砍伐森林来烧制木炭,从而产生了不少问题。进入18世纪,英国政府下令禁止砍伐森林烧木炭,使许多高炉



初刻本插图九七,生熟炼铁炉。

图5 《天工开物》中的炼铁炉^[3]

停产。英国人试用煤代替木炭炼铁, 但效果不理想。直到 1718 年英国人 A. 达比(A. Darby)在什罗普郡(Shropshire)的 Coalbrookdale 厂的高炉上成功地用焦炭全部取代了木炭。由于 A. 达比为了保持个人利益, 此项技术在 1771 年以后才得以推广, 但这一技术创新为其后炼铁高炉进一步发展提供了重要的物质基础。

3.2 高炉炼铁由冷风改为热风^[1]

早期的炼铁高炉使用的是冷风, 当时的高炉冬天产量高, 夏天产量低。有人错误地认为冷风比热风好, 却忽视了冬天空气湿度低, 利于提高燃烧温度的特点。直到 1828 年, J. B. 尼尔森 (J. B. Neilson) 在苏格兰的高炉上进行了加热鼓风试验成功后, 使高炉炼铁由冷风改为热风, 这一技术创新为高炉提高生产力、降低能源消耗提供了重要的技术支撑。

3.3 工业革命经济增长的需求促进了炼钢工艺第一次技术革命

工业革命的市场需求对炼钢工艺在提高生产力上有新的要求。1850 年至 1860 年间英国人 H. 贝塞麦(H. Bessemer)根据化学热力学计算方法, 推算出在使用铁水炼钢时, 向铁水中吹入空气, 一方面可以去除铁水中碳和其他杂质, 同时其所产生的热量足以使得到的钢水处于高温的流动状态。贝塞麦提出了用转炉替代搅钢炉的设想, 并进行了多次试验, 最终在谢菲尔德(Sheffield)取得成功。贝塞麦的技术创新使炼钢工艺的生产力上了一个大台阶, 开创了炼钢史上第一次重大的工艺技术革命, 为大规模的现代钢铁工业的形成奠定了基础。这一工艺被称为贝氏炼钢法, 如图 6 所示。

由于当时搅钢炉一炉的产量只有 500 磅, 生产一炉钢要 6—7 个小时, 而贝塞麦转炉一炉钢数以吨计, 冶炼一炉钢只要数十分钟, 适应了工业化大规模生产对钢的市场需求。贝塞麦转炉的钢水可以直接铸成钢锭, 同时此法的炼钢过程不需要外加燃料, 生产效率高, 成本相对低, 并适合于规模化生产, 贝塞麦转炉迅速得到推广。

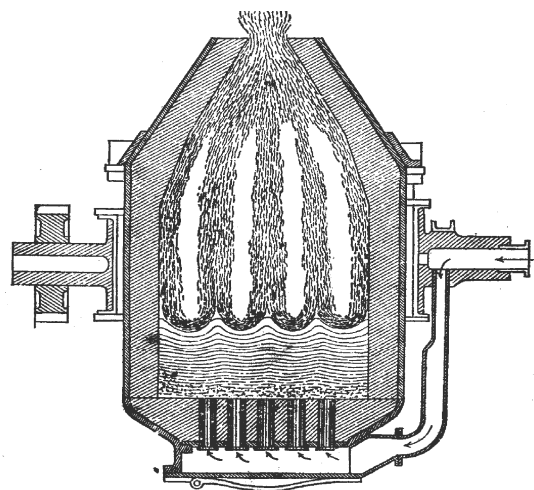
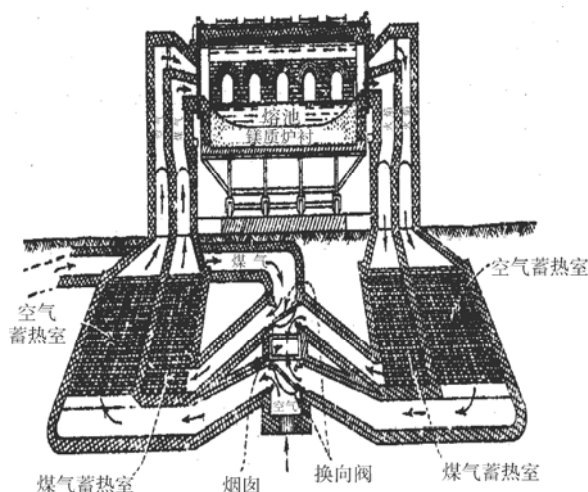


图 6 吹炼时, 贝塞麦转炉的断面图^[2]

贝塞麦法也显示出其缺点, 主要是不能脱除硫、磷等钢中有害元素, 钢水中气体含量高, 钢的质量不如搅钢炉的熟铁。其后, 1855 年, 英国工程师 W. 西门子(W. Siemens)发明了以蓄热室加热燃烧用煤气和空气, 使燃烧后获得高温的技术, 采用此项技术可将废钢和生铁融化成液态进行精炼, 燃烧废气将热量传给蓄热室, 如此反复循环, 可以成为一种以生铁和废钢为原料的炼钢方法, 这就是近代炼钢平炉的雏形。法国人皮埃尔·艾米莉·马丁(Pierre-Emile Martin)取得西门子的专利权后加以改进, 1864 年西门子-马丁炼钢法(平炉炼钢法)出现, 其钢质优于贝氏炼钢法。

由于在起始阶段平炉和转炉使用的耐火材料都是酸性的, 因而都难以脱除钢中的有害杂质(硫、磷), 1875 年英国的 S. G. 托马斯(S. G. Thomas)和 P. G. 吉尔吉里斯特(P. G. Gilchrist)在发明了碱性耐火砖的基础上, 发展出称为托马斯转炉炼钢法, 由于托马斯炼钢法采用碱性炉衬和碱性炉渣, 这样钢中的有害杂质—硫和磷就可以脱除, 钢的质量明显提高, 并可以利用欧洲的高磷铁矿资源。其后平炉也改用了碱性炉衬和碱性炉渣, 由此, 碱性平炉炼钢工艺得到大发展, 由于平炉易于扩大炉子吨位并大量利用社会废钢资源, 逐步成为 19 世纪后期和 20 世纪中期占统治地位的炼钢工艺。图 7 为当时碱性平炉的简图。

图7 碱性平炉的简图^[2]

在炼钢工艺革命过程中,冶金物理化学过程的理论研究的深化发挥了重要作用。除了上述贝塞麦炼钢法是在物理化学原理指导下出现的,碱性转炉,碱性平炉的演化也都是在冶金物理化学理论的指导下完成的。在这方面,物理化学家的贡献功不可没。

3.4 钢材加工技术的改进

搅钢炉炼出的是熟铁,经过渗碳增碳提高强度后使用。当时对熟铁的加工成型方法是用锻锤加工成所需的形状。焦炭高炉代替木炭高炉后,加上高炉使用热风代替冷风,生铁产量增加,搅钢炉产量增加,使钢加工材料应用范围扩大,并开始出现以钢材替代木材和石材的格局。1779年英国建成第一座铁桥(Ironbridge,桥长59.8米,桥高13.7米,桥重378.5吨)。1839年J.内史密斯(J.Nasmyth)发明了蒸汽机锻锤,大幅度提高了加工钢材的能力,钢材的市场供应能力增大,使得建筑物、工作机械、动力机械、运输机械的部件由木质变为钢(铁)制。

为了适应更大规模生产钢材,轧钢机开始出现,蒸汽机、电动机的出现,轧机的动力增加,使得热压力加工的轧机出现,随后轧钢机替代锻锤成了钢材加工的主要设备。轧机由两辊式演变为三辊式,并出现了初轧/开坯轧机,棒材、线材、型钢轧机,大型/轨梁轧机,中/厚板轧机,薄板轧

机,无缝钢管等多种轧机。在轧钢工艺上逐步由可逆轧制进化为半连续轧制、连续轧制。轧钢技术进步,使钢轨、棒、线、板和型材的批量生产成为现实。1876年用贝氏钢建造的美国第一座悬索桥——布鲁克林大桥建成。其后,英国用平炉钢建造了福布斯(Forbs)桥。1877年英国用厚钢板建造军舰。管材以及棒材、线材、型钢、钢轨、厚板、薄板的加工技术进步使钢铁成为人类社会主要的结构材料。19世纪确立了线材和带材的连续轧钢工艺。进入20世纪以后,连续轧钢技术在宽幅薄板轧机上的应用实现了工业化。1923年在美国建成了第一套热轧薄板连轧机。连轧机的出现一方面为钢铁企业的大型化创造了条件,同时为汽车工业、机械制造业、电器制造业以及制罐业的发展提供了可能。

3.5 钢铁工业的诞生——工程的演变与集成化

自1880年碱性平炉炼钢法出现后,由于生产规模大,原料适应性好,得到快速发展,钢的生产能力大幅度提高,搅钢炉工艺逐渐被淘汰。以液态炼钢工艺为核心,形成了高炉—平炉炼钢—铸锭—开坯—轧钢—热处理等工艺集成的近代钢材生产流程,从而出现了钢铁联合企业。与以前的钢铁生产手工作坊相比,该流程不仅生产规模大,成本低,而且产品质量好。最重要的是,这一工艺流程适时地满足了当时社会经济发展对钢铁产品的需求,支撑了人类社会的工业化进程(当时这一进程主要出现在欧洲和北美)。

随着钢铁生产能力的大幅度提高,钢铁厂数量增多,从业人员增加,使在手工作坊为主的钢铁冶炼技艺的基础上形成了产业——近代钢铁工业。可见,工业革命促进了近代钢铁工业,特别是钢铁联合企业的诞生。

电炉炼钢法的出现比空气转炉晚。1878年W.西门子进行过电炉炼钢法试验,电炉法的应用首先在电解铝方面。1899年,法国电弧炉炼钢获得成功,法国Creugot公司在施耐德(Schneider)

的普拉格(La Prag)电炉炼钢厂建成。从钢铁工业的形成过程看, 电炉炼钢厂的出现是在第一代钢铁联合企业诞生之后。

19 世纪, 工业发源地的英国在钢产量在世界领先。1871 年, 英国钢年产量为 33.4 万吨, 德国为 25.1 万吨, 法国为 8.6 万吨, 美国为 7.4 万吨。炼钢工艺技术革命后, 美国由于拥有矿石、焦炭资源优势, 贝氏炼钢法得到迅速推广, 1890 年, 美国钢产量超过英国成为第一产钢国, 德国超过英国居第二。碱性平炉出现后, 取代了贝氏炼钢法。19 世纪末出现了世界上第一代钢铁联合企业, 如: 美国钢铁公司(1882 年), 德国的蒂森钢铁公司(1890 年), 日本八幡制铁所(1891 年), 美国伯利恒钢铁公司(1892 年), 加拿大钢铁公司(1895 年)。我国第一个钢铁联合企业汉冶萍公司, 1890 年开始建设, 从欧洲引进当时的先进技术, 1894 年投产, 时间也并不晚, 但由于清政府的腐败, 这座钢厂在民国初期就倒闭了。部分设备在抗日战争初期拆迁到重庆建了钢厂。现在汉阳的遗址已不存在。

4 技术创新推动了 20 世纪以来的钢铁工业大发展

碱性平炉炼钢工艺的开发成功和推广, 使其成为炼钢的主导工艺, 特别是在美国。1900 年全世界钢产量是 2850 万吨, 其中美国钢产量为 1035.2 万吨, 占世界产量的 36.3%。电力的出现使蒸汽机被电动机取代。这一创新加速了钢铁工业的发展。世界钢产量 1906 年超过 5000 万吨。第一次世界大战后, 1927 年全世界钢产量超过一亿吨。尽管 20 世纪 30 年代的经济危机使全球钢产量下降到一亿吨以下, 但危机后钢产量又恢复到一亿吨以上。

二次大战后, 战后重建和经济发展对钢铁的需求发生了显著的变化。二战之前, 钢铁主要用于机械、铁路、运输、造船、军工等方面。二战以后, 随着汽车工业的发展, 住宅、高速公路、港口、机场等基础设施的建设, 农业机械化、家

用电器的应用推广, 石油天然气输送管道的建设以及机械化、自动化技术的推广应用, 对性能好、价格低的结构材料 and 功能材料的需求越来越迫切。由此钢铁制品进入所有的制造业和工程领域, 并大量进入居民家庭。与其他材料相比, 钢材在质量、性能和性价比上都是最佳的, 与其他金属材料相比, 铁资源的蕴含量较为丰富, 钢铁成了人类社会实现工业化的首选材料, 从而成为发展的重点。

二次大战后, 在全球范围内, 出现了许多高品位的铁矿石供应基地(例如巴西、澳大利亚等), 加上远洋运输技术和能力快速增长, 使铁矿石的供应趋向国际化, 进而为钢铁工业的大发展提供了物质基础, 并使铁矿石资源贫乏的国家(例如日本、韩国等)能够依靠科技进步和沿海港口的优势, 逐步成为主要产钢国。

20 世纪以来世界钢产量的演变见图 8^[4]。

20 世纪中期以来出现的钢铁制造技术创新推动了钢铁工业的大发展, 钢铁工业成为世界性的重要产业。由图 8 可见, 20 世纪以来世界钢铁工业出现了两次高速增长期。第一次高速增长期, 从 50 年代开始到 70 年代初, 世界钢年产量由 2 亿吨增至 7 亿吨。第二次高速增长期, 由 20 世纪末开始, 钢产量由 2000 年的 8.43 亿吨升至 2007 年的 13.4 亿吨, 目前仍在持续之中。两次高速增长期都是世界经济增长需求的拉动力和技术进步的推动力的结果, 如表 1 所示。

20 世纪以来, 2000 年的钢产量比 1900 年增长超过 28 倍, 2008 年的钢产量比 2000 年又超过 60%, 2009 年的经济危机使全球钢产量下降, 仍为 2000 年产量的 140%。把 20 世纪称为钢铁工业大发展的世纪是符合实际情况的。

4.1 氧气转炉炼钢技术推动了钢铁工业大发展

20 世纪 40 年代瑞士的 R. 杜勒(Robert Dürer)教授等对氧气转炉炼钢进行了研究, 但由于当时的技术限制氧气价格太贵而不能实现工业化。

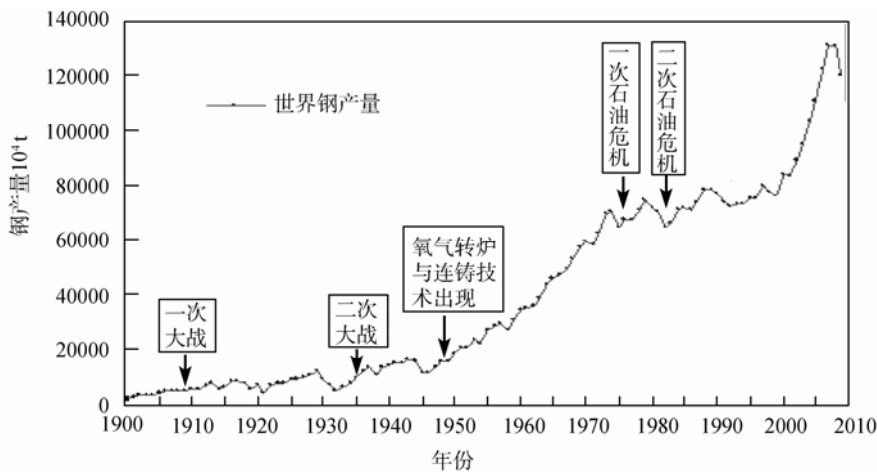


图 8 20 世纪以来世界钢产量的演变

表 1 1950 年以来世界钢铁工业两次高速增长期的拉动力和推动力^[4]

	第一次高速增长期	第二次高速增长期
主体拉动力	美、欧发达国家以及日本、苏联及东欧社会主义国家，二次世界大战后的恢复重建和工业化。	发展中国家(主要是中国)及新兴工业国家的工业化和大规模基础设施建设。
持续时间	20 世纪 50 年代中期至 1973 年	20 世纪与 21 世纪之交开始，目前仍在持续中
推动力	工业发达国家的自有技术创新	从发达国家引进的技术和装备
涉及人口	7 亿—8 亿	约 14 亿
增长速度	约 1900 万吨/年	近 6000 万吨/年

进入 50 年代，制氧工业的进步使氧气机产能大幅提高，氧气成本下降，氧气炼钢的条件趋于成熟。1952 年奥地利的 VOESTALPINE 公司在林茨钢厂成功开发出 30 吨的氧气转炉炼钢法，即 LD(Linz—Donawitz)法，并与瑞士的 BOT 联合以专利方式向全世界推广。

与其他炼钢工艺相比，LD 法热效率高，控制钢含碳量的能力强，冶炼周期短，能够实现设备大型化。此外，使用高纯氧使钢中含[N]量低，废钢使用比例较平炉为低，废钢带入的有害杂质少，提高了钢的质量，从而使氧气转炉炼钢技术在全世界得到迅速发展。第一次钢铁高速增长期，日本、欧洲钢产量的快速增长与氧气转炉的普及密不可分。我国 80 年代以后钢铁工业的崛起，氧气转炉的推广和平炉炼钢的淘汰起了重要作用。

4.2 高炉炼铁的技术创新

二次世界大战以后，高炉大型化的趋势明显，

特别在日本与苏联。1959 年日本最大的高炉是户畑 1 号高炉，内容积为 1603 m³；1976 年日本大分厂内容积为 5070m³ 的 2 号高炉投产，10 多年时间内，高炉容积扩大了近 3 倍。20 世纪 70 年代前期，苏联也在克里沃罗格和切列波维茨建了 5000 m³ 级高炉。欧洲也以建 3000—5000m³ 级高炉来淘汰 1000 m³ 级高炉。高炉大型化提高了高炉生产水平和劳动生产率并降低了能耗。

高压操作是 20 世纪 40 年代出现的高炉炼铁技术创新。首先在美国和苏联应用，以后全世界推广。提高炉顶压力促进了高炉增产，并推进高炉大型化。

20 世纪 50 年代高炉风温一般在 600—800℃ 之间，900℃ 以上就算是高风温。随着热风炉结构的技术创新和耐火材料的更新换代，20 世纪 90 年代高炉风温水平一般超过了 1100℃，相当多的高炉超过了 1200℃，这为高炉风口喷吹燃料和降低焦比创造了条件。

高炉风口喷吹燃料是 20 世纪 50 年代以后的重要技术创新。最初, 从风口喷吹重油来替代焦炭, 效果良好。石油危机后, 由于油价高涨, 为降低炼铁成本, 风口喷吹煤粉大发展, 并可以做到置换焦炭用量的 40% 左右。20 世纪后期, 风口喷吹剂趋向多元化, 同时富氧鼓风也得到发展。高炉的生产成本和生产效率不断得到改善。

4.3 炼铁原料准备的技术创新

国际大型富铁矿山的开发和铁矿资源的全球化, 促进了炼铁原料品位的提高。选矿工艺技术进步, 加工、混匀、整粒技术进步, 烧结及球团工艺技术进步, 提高了炼铁原料的质量水平。许多地区的高炉根据具体条件, 寻找出合理的炉料结构, 为高炉强化冶炼提供了物质基础。

焦炭是炼铁高炉的发热剂、还原剂和料柱支撑骨架。焦炭质量对高炉炼铁的生产能力、效率和经济性具有决定性作用。炼焦工艺的技术创新, 焦炭质量的提高, 对 20 世纪钢铁工业的大发展发挥了巨大作用。

4.4 钢铁制造工序的解析与集成

第二次世界大战后, 全球经济增长对钢铁工业提出新的需求, 是世界钢铁工业出现高速增长的拉动力。需求增长促进了技术创新。除了工序本身的技术创新, 对钢铁制造工序之间的链接与组成的合理化与优化也出现了创新, 结果是提升了钢铁制造流程的效率与产品的质量, 其主要表现形式是工序的集成与解析。

工序集成的目的是缩短钢铁制造流程, 以提高效率和求较低物耗与能耗。连铸技术的出现是一个典型。连铸技术的实质是炼钢铸锭与初轧机开坯的集成。这一集成的主要成果是钢材成材率大幅提升(平均 $\geq 10\%$)和能耗降低, 同时将万能式大型钢厂转化为专业化钢厂, 使钢铁制造流程走向以连铸为中心的格局。

流程工业技术进步的核心是优化流程, 并不仅仅是缩短流程。连铸技术属于缩短了制造流程。

社会经济增长对钢材产品的质量、品种要求不断提高, 单独靠缩短流程不可能予以满足, 从而促成了炼钢工艺的解析与分工。第一代钢铁工业的流程是高炉将铁水送到炼钢, 炼钢的功能是把铁水炼成钢水并铸成钢锭。炼钢炉的功能是: 脱碳、脱硫、脱磷, 升温并调整钢水成分, 使其达到成品要求。随着钢材质量要求的不断提高, 炼钢炉实现功能的难度越来越大。其解决问题的出路是功能的解析与分工。现代化的炼钢工序已解析为: 铁水预处理解决脱硫问题 $\rightarrow$ 脱磷转炉脱磷并稳定地产出低磷低硫铁水 $\rightarrow$ 转炉脱碳升温 $\rightarrow$ 二次精炼技术完成脱氧和成分调整, 生产出符合连铸工序和成品要求的优质钢水。炼钢工序功能的解析与分工, 提高了生产效率, 钢水质量和降低了消耗, 使钢铁制造工艺流程的优化前进了一大步。

4.5 电炉流程的兴起

长期以来, 钢铁产品中金属铁的来源是铁矿石。随着世界钢产量的增长, 社会废钢积蓄量增加。进入 20 世纪下半叶, 在美国、意大利和瑞典等国, 通过大型超高功率电炉, 偏心炉底出钢、强化用氧和喷吹燃料等技术的开发成功和集成, 使得电炉炼钢过程由 4 小时缩短到 1 小时左右, 由此引起了大型超高功率电炉——钢包精炼炉——连铸机构成的现代电炉炼钢流程, 推动了电炉炼钢厂的数量增加。电炉炼钢不用铁水, 只使用固态料, 主要是废钢。电炉炼钢厂主要生产合金钢, 特殊钢和铁合金。电炉钢比例很低, 直到 20 世纪 60 年代, 美国的电炉钢产量比才达到 10%, 其他国家则更低。随着世界钢产量的增长, 社会废钢积蓄量的增加, 电炉钢规模增加。20 世纪 70 年代以后, 电炉钢由以生产合金钢、特殊钢为主转向生产长材(主要为了使用废钢降低成本)。薄板坯连铸连轧工艺的出现, 动因之一就是为了寻找一种以废钢为原料, 用电炉工艺低成本生产板材的工艺流程。电炉钢的生产规模主要取决于废钢资源的多少。进入 21 世纪, 欧盟电炉钢产量很大, 超

过 8000 万吨/年, 占其总钢产量 40%以上; 美国电炉钢产量超过 5000 万吨/年, 占其总钢产量 50% 以上; 日本电炉钢产量大约 3000 万吨/年, 约占总钢产量的 25%—30%。我国近年来电炉钢产量也不少, 2010 年将超过 6000 万吨, 但占总钢产量的比例只有 10%左右。随着中国社会废钢积蓄量的增大, 今后电炉钢的比例将上升。从节能降耗出发, 今后应尽量扩大废钢的循环利用, 电炉钢将会发展, 而电炉工艺也将成为第二个钢铁制造的主流工艺流程。

4.6 连续铸钢的技术创新

连续铸钢是钢水凝固技术的重大创新。将原来的钢水铸锭和初轧开坯集成为一个工序, 提高了收得率、缩短了加工周期、节约了能源。20 世纪 40 年代连铸技术首先在德国实现工业化, 50 年代以后取得显著发展。1970 年日本大分制铁所建成世界第一座全连铸钢厂。20 世纪 70 年代以来的世界钢铁工业的发展和我国 90 年代以后钢铁工业的崛起, 连铸技术都发挥了重要作用。

连铸不仅有效地取代了原来的模铸、初轧/开坯轧机, 而且对钢厂生产过程中上下游工艺、装备乃至钢厂的总平面图、物流系统都发生了重大的、结构性的影响。在工艺技术上, 连铸加速了大型碱性平炉的淘汰, 加速了初轧/开坯轧机的淘汰; 同时, 推动了炉外精炼, 各类连轧机, 以及铸坯热送热装等节能工艺的发展, 钢材收得率提高了 12%—15%, 吨钢能耗大幅度降低, 市场竞争力明显提高。与此同时, 全连铸钢厂的出现, 使得钢铁联合企业的产品结构由原来与初轧/开坯对应的“万能化”生产转变为“专业化”生产, 从而推动了大型钢铁联合企业的结构调整。

4.7 薄板坯连铸连轧技术创新

1989 年, 德国 SMS 公司开发的薄板坯连铸连轧生产线在美国纽科(Nucor)公司的克劳福斯维尔(Crowfordsville)厂投产, 这是继连铸之后凝固技术又一重大创新。由于该技术具有建设投资省, 劳

动生产率高, 能耗低, 生产成本低于常规热连轧机而受到广泛关注。迄今为止, 全世界薄板坯连铸连轧总生产能力已超过 1 亿 1 千万吨, 我国已建成的能力已超过 3500 万吨/年。薄板坯连铸连轧技术为规模较大的钢厂生产薄板产品, 提供了一种新的解决方案。

4.8 连续轧制技术的持续发展

20 世纪, 连续轧制技术不断地得到了发展, 使生产效率、钢材的成材率、钢材的尺寸精度和板型, 特别是连轧工艺与控轧控冷技术相结合, 使得钢材的质量明显提高, 并开发了许多高级的钢材品种。现在热宽带钢轧机的年生产能力已达 350 万—550 万吨/年, 薄板坯过薄连轧作业线年产能力达到 200 万—300 万吨/年, 高速线材能力已达 60 万—70 万吨/年, 棒材连轧机能力已达 60 万—100 万吨/年。最近有些国家在开发薄带铸造。从国际市场需求和条件的多样性出发, 今后的发展应是常规热连轧, 薄板坯连铸连轧等多工艺并存。

4.9 信息化、自动化等高新技术的应用

设备大型化、连续化、高效化必须依靠信息化和自动化。高新技术为钢铁工业提供了新的检测手段、控制手段和计算机调控系统, 使钢厂的生产效率进一步提高, 成本降低, 钢铁产品的质量大幅度提高, 新品种不断涌现, 资源、能源消耗逐年降低, 劳动生产力空前提高, 从而使钢铁在材料工业中的竞争力不断增强。

由计算机技术、网络技术、通讯技术等组成的信息技术, 已经在钢铁工业得到较好的应用和开发, 不仅已在工艺装置控制、产品质量保证、新产品开发、各类经济、技术管理等方面得到应用, 而且将在新一代钢厂全流程控制、能量流控制、环保控制等方面进一步得到开发应用。

5 钢铁生产工艺技术的演变和钢厂的升级换代

回顾 18 世纪以来的钢铁工业的发展史, 是社

会经济发展需求拉动的结果, 而从技术层面上讲, 则是钢铁制造工艺的技术创新史和钢铁制造流程的集成演进史。

作为一个重要的基础产业, 钢铁厂的组织形式也经历了一个长期的演化过程。自钢铁冶炼形成一门技艺起, 就出现了以冶炼为中心的手工作坊。工业革命后, 钢铁制造流程中各工序随着生产规模的扩大, 形成不同工序钢铁制造工厂。工业革命带来的技术创新, 形成了以液态炼钢工艺为核心, 从高炉炼铁→平炉炼钢→模式铸锭→初轧开坯→分品种轧钢→热处理、到成品的钢材制造流程。19 世纪末出现了第一代钢铁联合企业。第一代钢铁联合企业各工序之间, 除了炼铁与炼钢工序的直接连接, 其他工序之间并非连续的, 而是间歇的, 工序之间靠仓库缓冲。钢材制造过程中经过多次降温 and 升温。第一代钢铁联合企业大多靠近原料产地建设, 产品往往是多品种并存。第二次世界大战后, 随着澳洲、南美洲的大富铁矿基地的发现, 以及海运业的发展, 使世界铁矿石资源走向国际化, 铁矿石资源贫乏的国家也可以发展钢铁工业。氧气转炉炼钢技术和连续铸钢技术的出现, 淘汰了模式铸锭和初轧开坯, 使炼钢与轧钢工艺直接连接, 而连轧机计算机自动控制的实现, 使钢铁制造流程的生产规模大幅度扩大, 流程缩短, 形成了第二代钢铁联合企业。第二代钢铁联合企业中, 一部分是新建的临海钢铁企业, 一部分是第一代钢铁联合企业改造、扩建后形成的。年产量 100 万吨以上就可以算得上第一代钢铁联合企业, 而第二代钢铁联合企业的规模基本上在年产 500 万吨以上, 有的接近 1000 万吨。薄板坯连铸连轧技术的出现, 使钢铁厂的流程进一步缩短。第二代钢铁联合企业以连铸工序为核心, 使钢铁制造工艺能耗降低, 实现高效化, 同时使产品走向“专业化”。随着全球工业化的发展, 钢铁工业的功能除了生产钢铁产品外还要保护地球环境, 从而必须节约能源, 减少排放。钢铁企业由以供应钢

铁产品为主要功能, 向供应市场需求的钢铁产品及副产品、能源转换和消纳社会废弃物以及地球环境友好三项功能转变。目前正处于第二代钢铁企业向新一代(第三代)钢厂演化的初始阶段。

我国钢铁工业由于国情, 资源的条件, 人口众多, 地域辽阔, 钢铁工业的规模不可能小, 人均年耗粗钢量将在 300 公斤/人以上。我国钢铁企业将逐步形成两大类钢厂: 区域性钢厂与跨区域钢厂。区域性钢厂以满足区域内的钢铁材料需求, 而跨区域钢厂则以生产高技术附加值和全国性需求的钢材为主。由于我国铁矿石对外依赖性高, 跨区域钢厂将主要设在沿海沿江地区。这种格局将在 21 世纪前期形成。

当然, 在一些后工业化社会的国家, 由于大量社会折旧废钢的出现和相对价廉的电能供应, 以废钢和直接还原铁为原料的电炉流程(所谓短流程)以其成本低、生产效率高、资源与环境负荷小等优势, 而得到发展。

21 世纪钢铁材料仍将是人类社会所使用的主要材料。为适应地球环境与资源能源条件约束, 钢铁企业必须依据地域条件的不同, 多种形式并存。总体上必须走绿色制造的道路, 新一代钢铁企业的形成必须依靠科学技术进步和不断的研究、探索开发, 这将是一个更为深刻的演化过程。

6 几点启示

(1) 人类社会的发展始终是受经济需求拉动的。

最初是人类为了自身生存和繁衍的需求而不得不进行生产活动, 向自然界索取, 利用地球的资源。也正因为学会了利用, 使用和制造工具, 使人类从其他动物中区别开来, 最终形成人类社会。人类历史, 从总体上看, 就是人类为自身生存、发展的需要而谋求经济发展的演变过程。其间, 人类对利用、使用和制造工具方式的演变, 发挥了重大的作用。钢铁作为人类社会所使用的主要材料, 参与了这个演变过程。随

着人类社会需求的不断增长，对自然界物质运动规律的认识不断加深，钢铁材料制造成为一种技艺。在工业革命的推动下，钢铁制造由手工作坊演变为近代钢铁工业，而钢铁制造技术由技艺演变并优化、集成为钢铁冶金工程，进化为现代钢铁工业。进入 20 世纪，钢铁工业已成为世界上的最重要的产业之一。

从历史过程看，钢铁制造经历了手工业作坊→近代钢铁业→现代钢铁业的演变过程。钢铁工业属于流程制造业。可以认为，传统制造业基本上都经历了钢铁工业相似的发展过程，这个工程是长期的工程演化过程的典型之一。

(2) 钢铁工业的演变过程是人类社会发展过程中诸多“选择”过程之一。

首先是人类社会需求对制造工具材料的选择，最终把钢铁作为首选材料。其次是对钢铁制造工艺的选择。这个选择过程是漫长而复杂的，包括无数的工艺改进、技术创新和科学实验。选择的结果是构成了钢铁冶金工程和现代钢铁产业。这个“选择”过程仍在进行之中，选择的主体是人类社会的“人”。

(3) 工业革命以来的实践表明：人类社会经济发展对钢铁需求的增长是钢铁工业增长的拉动力；技术进步是钢铁工业发展的推动力，而地球资源、能源、环境的约束是钢铁工业发展的限制力。

这一格局，在 21 世纪内不会改变。见图 9。

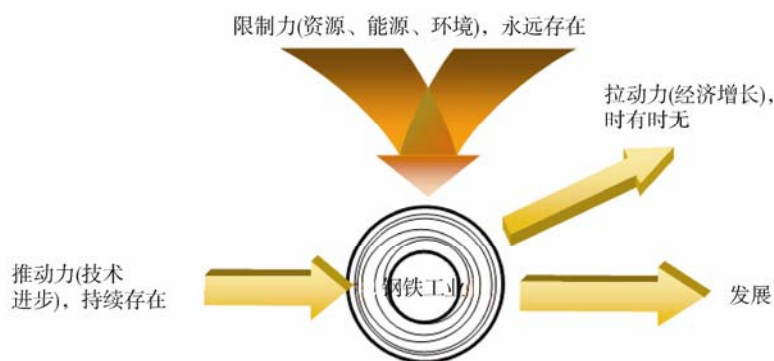
随着世界钢铁生产规模的扩大，以及自然、社会和谐因素的凸显，限制力将进一步增强。工程是伴随着人类文明的形成过程出现的。而工业的形成则是由工业革命促成的。大多数工业由技艺为核心的手工作坊演变为以技术为核心的工业。技术的形成经历了科学知识的积累、技术创新和无数实验和实践。技术的形成实质上是以人为核心对生产制造方法的选择过程。同样，工程的形成和演化也是以人为核心的选择过程。这是工程演化与生物演化的基本区别之一。

(4) 工程的发展是人们为满足人类社会的需要，对利用自然的方式不断进化，对自然规律认识不断深化的过程。

从感性经验积累逐渐提升到利用自然科学理论解释，并进入到可以利用科学理论指导实践的程度。工程的发展体现着人类对自然界不断深化的认识过程，也可以认为是以人为核心的选择过程。这个选择过程的判定标准不是人的主观偏好，而是工程实践的结果。与科学理论探索不同，工程方案不是唯一的，选择的结果是在多方案和比较的基础上生产的。

(5) 工程的发展进程往往伴随着人们对客观规律认识不断加深，并螺旋上升的过程。

以炼钢物理化学原理为例，搅钢炉以渣中的 FeO 为杂质氧化剂，靠外加燃料供热。而空气转炉则是以空气中的氧为杂质氧化剂，以氧化产生



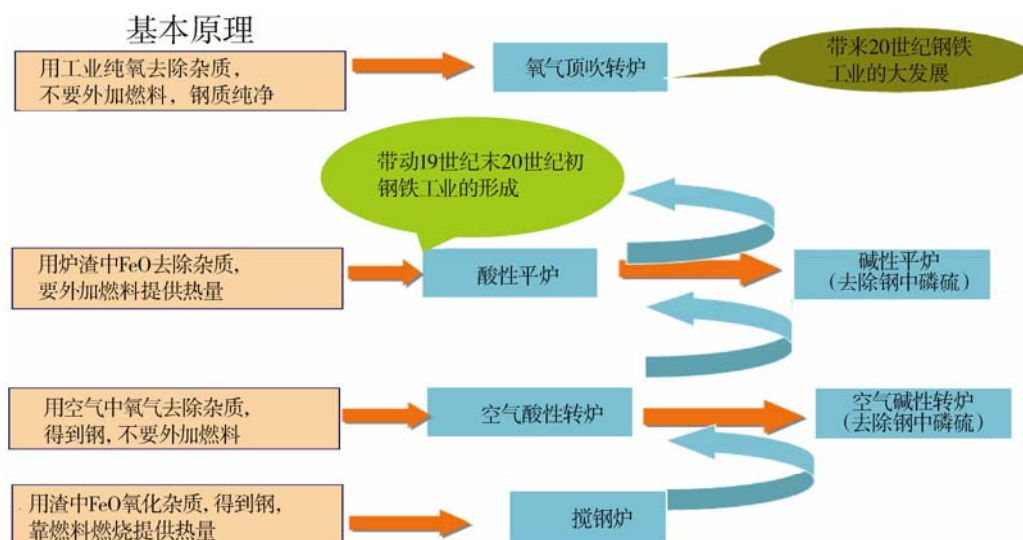


图 10 炼钢工艺的演化过程

的热量供热, 不靠外加燃料。空气转炉演化为平炉, 氧化剂又回归为渣中的 FeO , 热量要靠外加燃料, 实质是向搅钢炉的原理的回归。氧气转炉则是由平炉向空气转炉原理高一个层次的回归。炼钢工艺的发展过程实质上是一个液态下炼钢工艺流程螺旋上升的过程, 见图 10。

(6) 技术是形成工程的主要支撑, 工程、产业的发展要依靠技术进步。

产业的形成要靠社会经济需求的拉动。没有社会经济发展需求, 任何技术都不能形成产业。产业的形成和发展都要靠技术进步的推动。任何一项大的工程都是在工程理念的引导下开展的。工程的成功需要正确的工程理念, 而工程理念随着包括技术在内的客观条件的变化而演化。思考工程演化过程将会对工程实践发挥指导作用。

(7) 工程是对诸多相关的, 异质的、技术的集成和构建。

无论是已有的技术还是新技术, 只有在工程的总体集成过程中有效地“嵌入”工程系统中去, 才能得到有效应用和发展, 并对工程系统的结构调整、产业升级发挥推动作用。有时, 工程系统的总体集成需求, 也会引导、诱发技术的发明和创新。

参考文献

- [1] Richetts J A. A Short Story of Ironmaking, 1998 ICSTI/ Ironmaking Conference Proceeding[G]. Toronto: ISS Publication, 1998: 3-40.
- [2] Stoughton B. The Metallurgy of Iron and Steel[M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 1938: 27-49.
- [3] 宋应星. 天工开物: 五金第十四[M]. 长沙: 岳麓书社, 2002: 334.
- [4] Zhang Shourong, Yin Han. The Trends of Ironmaking Industry and Challenges to Chinese Blast Furnace Ironmaking in the 21st Century[C]. Shanghai: The 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. 2009: 1-13.

The Process and Law of the Evolution of the Ferrous Metallurgical Engineering

Zhang Shourong

(Wuhan Iron and Steel Corp., Wuhan 430081)

Abstract: Ferrous metals have been the basic material used by human beings. In 600 BC, China started to enjoy the Iron Age, so in the long-term practice, iron-smelting had come to be a skillful technique. Accompanied with the economic development of human society, iron-smelting had been transformed into handicraft iron making workshops in addition to farming and stock-raising. The Industrial Revolution boosted the increasing demand for iron and steel products in society and the technological innovation had brought the birth of steel industry and had formed the ferrous metallurgical engineering. In the course of rapid growth of economy in the 20th century, driven by technological innovations, steel industry has made tremendous development. In the 21st century, iron and steel will still be the important materials for human society, and the development of steel industry will be continuing. The history of human society, as a whole, has been an everlasting course of evolution for the survival of human being and the needs for the development of human society. Human race has endeavored to improve economic growth. The evolution of ferrous metallurgical engineering has been just one constituent in the evolution course of utilization, application and fabrication of tools for human society.

Key words: Iron Age; iron-smelting skill; Industrial Revolution; steel industry; engineering evolution

□责任编辑：王佩琼

《工程研究——跨学科视野中的工程》 投稿系统开通通知

本刊已开通远程稿件处理在线办公系统，请作者直接通过此系统进行投稿，详情请登陆本刊网页：
<http://www.jescas.cn>。投稿前务请阅读“投稿须知”。注册和上传稿件过程中如有问题，请电话咨询
010-88256710。

已经成功投稿的作者，可通过您投稿时设立的用户名和密码在此系统上直接查询稿件进展情况。

《工程研究——跨学科视野中的工程》编辑部

2010年8月25日