

钢铁冶金从技艺走向工程科学的演化进程研究

张福明^{1, 2}

(1. 首钢集团有限公司, 北京 100041; 2. 北京冶金三维仿真工程技术研究中心, 北京 100043)

摘要: 以工程哲学的视野, 研究了钢铁冶金的起源、发展和演化进程。阐述了钢铁材料的功能与地位, 论证了钢铁对人类社会进步和文明发展的重要作用。研究了古代钢铁冶金技艺的发展、传承和创新, 讨论了17世纪以后, 文艺复兴以及近代科学的肇始对钢铁冶金技术和科学的影响。论述了近代科学对钢铁冶金从技艺走向工程科学的重大和深远的影响, 并对以冶金物理化学为代表的钢铁冶金基础科学的创建进行了详细论述。阐述了以冶金反应工程为代表的钢铁冶金技术科学对现代钢铁冶金工程的重大意义, 讨论了宏观钢铁冶金工程科学、冶金流程工程学对钢铁产业发展的重要意义。提出了钢铁冶金基础科学、技术科学和工程科学协同发展、相互支撑的学科体系, 以及未来钢铁工业可持续健康发展的目标和方向。

关键词: 钢铁冶金; 工程演化; 物理化学; 冶金反应工程; 冶金流程工程学; 工业革命

中图分类号: N031

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2020)06-0527-11

1 钢铁材料的功能与地位

长期以来, 钢铁由于资源储备丰富、制造成本相对低廉、材料综合性能优越、易于加工且便于循环利用, 成为了当前世界上重要的结构材料, 也是世界上消费量最大的功能材料(例如电工钢、不锈钢等)^[1]。毋庸置疑, 钢铁是伴随着人类文明演化发展的重要材料和重要标志, 甚至可以说, 人类文明的发展史与钢铁息息相关, 钢铁是人类生存发展不可或缺甚至是无可替代的重要基础材料、结构材料和功能材料。

考古学认为铁器时代是人类发展进程中一个极为重要的时代, 是继石器时代、青铜器时代之后的一个新时代, 铁器时代以人类能够进行铁的冶炼和铁器的制造为标志。人类从石器时代演变到青铜时代和铁器时代, 其重要的标志就是人类生产和生活的工具从石器变成了青铜器和铁器。

众所周知, 无论是旧石器时代、中石器时代还是新石器时代, 人类先祖们开始使用三角形、梯形或不规则四边形的尖锐、锋利且容易持握的天然石器作为工具, 所用的石材全部来自于自然界, 仅是对石器进行简单的挑选、打磨和加工而已, 谈不上对石器的“深加工”和精雕细刻。究其原因, 一方面是人类当时还找不到比石器更加坚硬锋利的材料和工具, 另一方面是当时人类还处于从蒙昧向智人的过渡时期, 人们对自然的认知能力还极其有限。直到进入新石器晚期, 人类才开始使用陶器, 人类社会才开始进行农业和畜牧生产, 人类农耕文明时代从公元前8000年一直延续到了17世纪^[2]。

2 古代钢铁冶金技术的发展

中华民族大约在春秋战国时期, 创造了举世闻名的青铜文化, 在冶金领域制造和生产出许多绝世经纶、庄重精美的国之重器, 如20世纪考古

发现的司母戊鼎（1939 年出土）、曾侯乙青铜编钟（1978 年出土），充分证实了我国古代先民高超的制造技艺和水平^[3]。在当时，除了制造精美无比的青铜器制品，人们还探索了青铜冶炼、铸造的一般规律，进行了初步的理论性总结。我国著名的古代科技名著《考工记》中“金有六齐”、“改煎金、锡则不耗，不耗然后权之”的论述，阐述了青铜冶金的成分调剂，利用标准量器准确计量，是商周以来积累的青铜合金中铜、锡、铅的成分配比的系统总结和归纳，在世界上属于首次阐述；“铸金之状”总结了冶炼和铸造青铜时的几种情状，以及对“火候”的描述，通过观察火焰颜色变化规律，根据焰色变化规律掌握火候，这可以认为是现代高温冶金工艺中，通过观察冶金过程火焰和温度来判定冶金进程的“滥觞”。

铁器时代是在青铜器时代之后的人类重要文明时代。铁的冶炼和铁器的制造，在今天看来，仍是人类社会的发展过程中一个了不起的成就。考古研究认为，人类对铁的冶炼始于距今大约 3500 年以前，而铁器的大量使用始于距今 1500~2000 年以前^[4]。古代冶铁的工艺和现代大不相同，基本是在青铜冶炼和铸造的基础上发展起来的。囿于当时的工艺和技术水平，人们将铁矿石和木炭放入陶罐中加热，加热的温度只能达到 800~1000℃，得到的其实是一种块状海绵铁，然后再经过反复锻打的方法脱除海绵铁中的碳和杂质，这种方法被称为“块铁法”，现在从冶金学的学术角度来看，这种方法属于铁矿石直接还原工艺。海绵铁经过反复锻打脱碳后被称为“熟铁”，实际上就是含碳量低的铁，性能更加良好，也就是现代的钢。从含碳量高的生铁，变成含碳量低的钢，要经过反复的加热、锻打和脱碳，工艺十分复杂。古代钢铁冶金的历史，也是不断发展演进的，从“块铁法”、“炒钢法”、“百炼钢”到“灌钢法”等，许多工艺方法在不断发展变革^[5]。大约在 2000 年前，利用竖炉生产生铁的工艺开始问世，这是古

代高炉炼铁的起源。中国古代高炉的鼓风设备被称为“橐”，实际上是一种用皮革制成的皮囊，也就是鼓风用的风箱，利用畜力或者水车对橐进行反复压缩，将空气鼓风送入高炉。

我国北宋著名科学家、政治家沈括（1031-1095）撰写的《梦溪笔谈》^[6]，是一部涉及古代中国自然科学、工艺技术及社会历史现象的综合性笔记体著作，在我国乃至世界科技史上具有崇高地位，被英国科技史学家李约瑟评价为“中国科学史上的里程碑”。《梦溪笔谈》是沈括晚年的总结性著作，是他一生学问最精华部分的结晶，包罗万象、广博精深，涉及的门类非常广泛。书中就记载了“灌钢”的炼钢方法，“取精铁锻之百余火，每锻称之，一锻一轻，至累锻而斤两不减则纯钢也，虽百炼不耗矣”。由此可见，早在 900 多年前的宋代，我国就已经完全掌握了通过反复加热、锻打而脱除碳和其他杂质的“百炼钢”工艺。

我国明代著名科学家宋应星（1587-约 1666）在《天工开物》中写到，“凡铁分生、熟，出炉未炒则生，既炒则熟。生、熟相合，炼成则钢”，从工艺制造方法上给出了铁和钢的区别，描述了钢的制造方法，直到今天来看，这些论述都有很高的学术研究价值。“取出加锤，再炼再锤，不一而足。俗名团钢，亦曰灌钢者是也”^[7]。《天工开物》中详细记载了古代钢铁冶炼和加工的方法，是记载我国科技发展的世界性科技名著，特别是其中的生产工艺图尤为可贵。在钢铁冶炼工艺的记载中，有很多是我国先民的发明创造，如灌钢法、以煤炼铁、直接将生铁炒成熟铁、采用大型活塞式风箱鼓风炼铁等，都是我国先民的发明创造和对人类冶金技术的贡献，在人类文明的发展进程中，闪烁着熠熠光辉。

3 近代钢铁冶金技术的突破

3.1 文艺复兴与第一次工业革命

纵观人类科学技术发展史，可以更加清晰地

梳理出人类科技进步的历程和现代科技文明起源及其发展的脉络。公元 5 世纪后期到公元 15 世纪中期,历史上被称为“黑暗的中世纪”(从公元 476 年西罗马帝国的灭亡开始,直到公元 1453 年东罗马帝国的灭亡终止),欧洲经历了长达近千年的黑暗时期,这个时期欧洲没有统一的封建集中政权,封建割据带来频繁的战争,再加上天主教对人们思想的禁锢,造成了科技和生产力发展停滞,人们生活在毫无希望的痛苦之中。中世纪对自然现象缺乏兴趣,漠视个人主张,其根源在于一种超自然的观点、一种向往来世的思想占据着支配地位^[8]。直到 14~16 世纪,欧洲开始了文艺复兴运动^[9],进入到了近现代时期,欧洲文艺复兴运动的代表性人物包括:意大利著名诗人但丁,意大利著名人文主义者弗兰齐斯科·彼特拉克,意大利著名诗人、文学家乔万尼·薄伽丘(《十日谈》的作者),文艺复兴运动最负盛名的意大利著名画家达·芬奇、拉斐尔·桑西,意大利著名雕塑家米开朗基罗·博那罗蒂,以及文艺复兴时期英国著名的文学巨匠莎士比亚。所谓“文艺复兴运动”是由于当时还没有成熟的文化体系取代天主教宗教文化,人们借助复兴古代希腊、罗马文化的形式来表达他们的文化主张。因此,文艺复兴并不是单纯的文化文艺的古典复兴,而是一场尊崇古典、弘扬人本主义的新文化运动,其根本目的是摆脱天主教的神权统治,摒弃宗教禁欲主义对人们思想禁锢和束缚的思想和文化的解放运动,实际上是资产阶级反封建的新文化运动。文艺复兴是欧洲近代三大思想解放运动(文艺复兴、宗教改革与启蒙运动)之一,在人类文明进程中具有极其重要的地位。

直到 18 世纪末至 19 世纪初的第一次工业革命以后,高炉开始使用焦炭、机械动力和热风炼铁,开启了近代高炉冶炼的新时代^[10]。第一次工业革命是人类科技发展史上的一次巨大革命,开创了以机器代替手工劳动的时代。这不仅是一次

技术革命,更是一场深刻的社会变革。以蒸汽机为代表的机械动力的出现,使社会生产力发生了巨大的变化,从而使人类社会步入了工业文明、电气文明和信息文明的新时代。

3.2 近代科学的肇始

17 世纪被世界史学界誉为近代科学肇始的时代^[11]。欧洲文艺复兴运动后期,近代科学研究开始起源。最具代表性的科学家是意大利天文学家、物理学家和工程师伽利略·伽利雷(Galileo Galilei, 1564-1642)。伽利略对 17 世纪的自然科学的发展起到了重大作用^[12],改变了人类对物质运动和宇宙的认识,被后人誉为“现代物理学之父”、“科学方法之父”、“现代科学之父”,爱因斯坦曾经评价:“伽利略的发现和所用的科学推理方法,是人类思想史上最伟大的成就之一,而且标志着物理学的真正开端!”。伽利略开创了以实验事实为根据并具有严密逻辑体系的近代科学体系,伽利略的科学发现不仅在物理学史上而且在整个科学史上都占有极其重要的地位。

17 世纪中后期,荷兰物理学家、天文学家、数学家克里斯蒂安·惠更斯(Christiaan Huygens, 1629-1695),是继伽利略之后一位重要的物理学先驱,是科学发展史上著名的物理学家之一。他对力学的发展和光学研究都有杰出的贡献,在数学和天文学方面也有卓越的成就,是近代自然科学的一位重要开拓者。他建立了向心力定律,提出动量守恒原理,并改进了计时器。

对人类近代自然科学起源具有重要贡献的代表性人物是英国著名科学家艾萨克·牛顿(Isaac Newton, 1643-1727),他出生于伽利略去世以后的第二年。牛顿在系统地总结了伽利略、惠更斯等人的科学研究工作以后(史称“牛顿综合”),1687 年发表论文《自然定律》,提出了万有引力定律和牛顿运动三大定律,提出了光的色散原理,发明了反射式望远镜,还与莱布尼茨共同发明了微积分,他的科学发现、发明和论述奠定了物理

世界的科学观点,他在力学、光学、数学等多学科领域的开创性研究,奠定了自然科学研究的基础,并成为现代技术科学、工程科学的基础,大力推动了现代科学革命。

1687年牛顿发表巨作《自然哲学的数学原理》^[13],开辟了大科学时代。牛顿被公认为是最具影响力的科学家,被誉为“科学的天才”和“物理学之父”,他是经典力学基础牛顿运动定律的建立者。他提出的运动三大定律和万有引力定律,为近代物理学和力学奠定了基础,牛顿在科学上的巨大成就连同他的朴素唯物主义哲学观点和一套初具规模的物理学方法论体系,对物理学乃至整个自然科学的发展,特别是对于18世纪的工业革命、社会经济变革及机械唯物论思潮的发展带来了巨大和深远的影响。

18世纪中叶至19世纪中叶,自然科学基础理论发展和第一次工业革命,有力推动了人类科技进步,也推动人类社会从封建君主专制发展到了资本主义共和制^[14]。

3.3 近代钢铁冶金技术的突破

钢铁冶金的技术演化历史,既是人类文明进步的历史,还是技术、工程、科学三元论最有力的实证。第一次工业革命以前,直到1825年之前,人们并不清楚钢铁冶金的科学理论,也不完全懂得钢铁冶金过程的氧化-还原反应和热量、质量、动量传输和化学反应(“三传一反”)的传输理论。钢铁冶金术长期以来就是一门技艺和技巧,很多技术的变革和工艺的改进都是工匠们奇思妙想或从反复失败的教训中总结得出的,谈不上科学理论依据和理论基础,也不是在科学理论指导下的实践,完全是一种经验和技艺的总结、提炼、学习、传承和发扬,属于典型的实践先于理论、技术先于科学、工程先于科学。回顾古代冶金技术的发展演化进程,是无数的工匠们经过口传心授、不断摸索和反复实践,冶金技术的知识、经验和技艺的传承基本停留在“默会知识”和“隐性知

识”的范畴内,类似于现在非物质文化遗产的传承,高明的工匠在总结前人经验的基础上,敢于探索创新就会产生新的技艺和方法;一旦这些技艺和经验失传,也就很难再复原。因此,千百年间,古代冶金技术和技艺基本没有取得突破性的跃迁和颠覆性的革命,像陶瓷、纺织等大多数生产加工技艺一样,世代相传,延绵不绝。直到19世纪中叶,随着物理化学学科的发展,冶金过程热力学、动力学等知识体系的形成与发展,才逐渐形成了现代冶金学及其造块、炼铁、炼钢、连铸、金属压力加工等学科分支,完成了钢铁冶金从技艺到科学的嬗变^[15]。

1856年,英国著名发明家、冶金学家和工程师贝塞麦(Bessemer Sir Hery, 1813-1898)发明了转炉炼钢工艺,将融化的生铁装入转炉内,吹入高压空气便可通过氧化反应脱除生铁所含的硅、锰、磷、碳等元素,将生铁冶炼成钢。这是世界首创的大批量炼钢的方法,生产效率大幅度提高。贝塞麦转炉炼钢工艺后来经过马希特(R. Mushet)父子的改进,在钢水中加镜铁(含锰量较低的锰铁)用来脱硫,使转炉炼钢工艺得到进一步完善。贝塞麦转炉炼钢工艺的诞生标志着早期工业革命的“铁时代”向“钢时代”的演变,在冶金技术发展史上具有重要的划时代的意义。后来欧洲、美洲都引进了这一先进炼钢工艺,世界从此进入了现代钢铁时代。直到20世纪中叶,顶吹纯氧的转炉炼钢工艺在世界范围内推广普及,极大地推动了炼钢技术的进步。

4 现代钢铁冶金科学、技术和工程的发展

4.1 钢铁是工业革命的基础产业

现代钢铁冶金是人类社会进步不可或缺的重要支撑。18世纪中下叶的第一次工业革命^[16],以英国为代表,开始了将热能通过蒸汽机转化为机械能的机器化工业生产,随后以机器生产为标志的工业革命浪潮席卷欧洲、北美乃至全球。19世纪以来,随

着电力技术的发明和应用,以电力能源技术、无线电通讯技术为核心的第二次工业革命迅速爆发,电力作为全新的二次能源被广泛地应用到工业生产中,内燃机得到了普遍应用,人类的交通工具从马车、火车、轮船,跃进到汽车、飞机时代。20 世纪中叶,电子信息技术的发展突飞猛进,电子计算机技术、集成电路以及信息网络技术的相继问世,使

人类社会步入了崭新的时代。毋庸置疑,工业化颠覆了人类传统的生产和生活方式,极大推动了人类文明的快速发展。钢铁材料在第一次和第二次工业革命中都扮演着重要的角色,是支撑科技进步、产业革命和经济社会发展的重要结构材料、功能性材料或首选材料,甚至是不可替代的。图 1 是 1900~2019 年世界粗钢产量变化的情况。

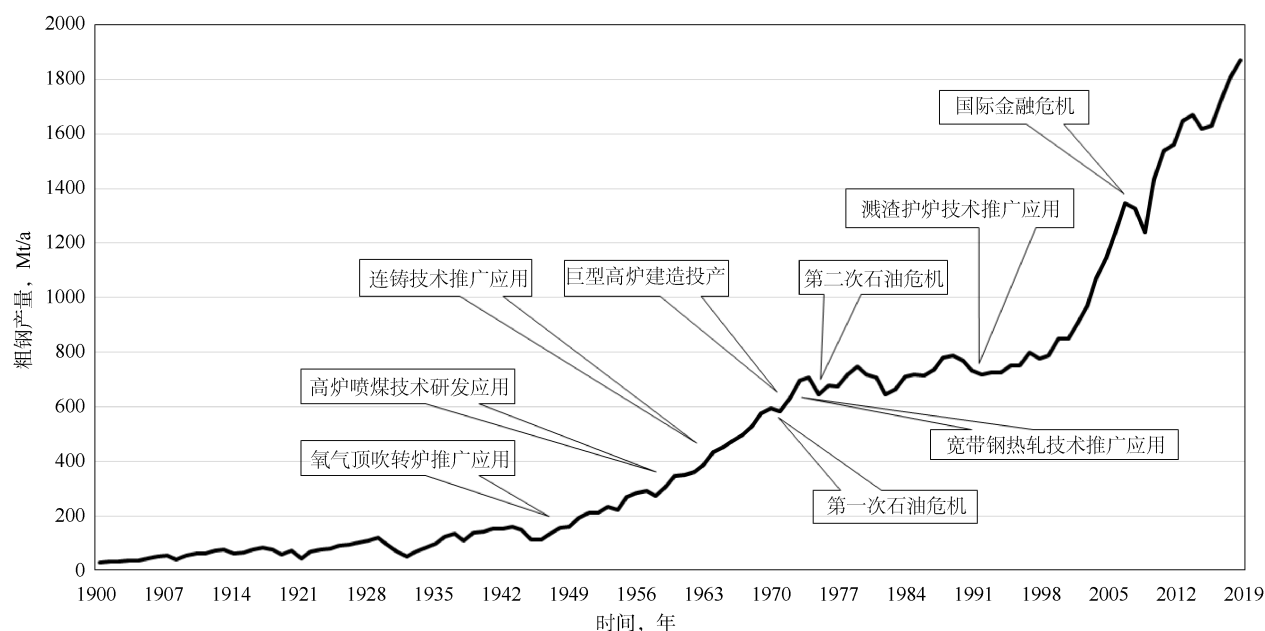


图 1 1900 年以来世界粗钢产量的变化

4.2 现代冶金科学的创立

第一次工业革命以后,钢铁冶金科学、技术和工程都取得了飞跃发展,在不同的尺度和层次上,形成了原子、分子为研究对象微观尺度的基础冶金科学,工序、装置中观尺度的冶金工艺技术,以及工厂、钢铁企业宏观尺度的冶金工程,学科发展和学科知识体系日臻完善^[17]。

1840~1847 年,德国医生迈尔(1814-1878)、英国物理学家焦耳(1818-1889)和德国物理学家赫尔姆赫兹(1821-1894),相继在卡诺热力学研究的基础上,提出并阐述了热力学第一定律——能量守恒定律。1850 年,德国物理学家克劳修斯(Ruddof Lulius Emanuel Clausius, 1822-1888)发表重要论文,首次提出热力学第二定律的概念,即

热量不可能从低温的物体转移到高温的物体,要实现这一过程就必须做功;随后克劳修斯又引入熵的概念,因此热力学第二定律又被后人称之为熵增定律。1851 年,英国物理学家、发明家开尔文(Lord Kelvin, 1824-1907)提出了另一种形式的热力学第二定律,即不可能从单一热源吸收热量使其完全做功,而不发生其他变化。与此同时,卡尔文对热力学第一定律和第二定律的公式化做出了重要贡献,是热力学的主要奠基者之一。钢铁冶金热力学的理论基础是建立在经典热力学三大定律——能量守恒(热力学第一定律)、反应进行的可能性及最大限度(热力学第二定律)、绝对零度不能达到(热力学第三定律)的基础上,主要体现是热力学第二定律在钢铁冶金过程中的应

用^[18]。

1925年,英国法拉第学会(Faraday Society)在伦敦召开的“炼钢过程物理化学”讨论会,对当时乃至以后的冶金学和钢铁冶金工业的发展产生了重要和深远的影响。1932年,德国物理学家申克(R.Schenck, 1900-?)出版了学术专著《钢铁冶金过程物理化学导论》,首次提出了钢铁冶金物理化学的概念,奠定了钢铁冶金物理化学的学科基础,新的学科由此诞生。经过20世纪近70年的发展,钢铁冶金已经初步形成了现代钢铁冶金科学、技术和工程三元体系。冶金学从20世纪初开始跨入了现代科学的发展进程。然而,冶金学又是有别于物理学、化学、生物学、地学、天文学、数学等以研究自然物理现象为主要目标的基础科学的。从根本上看,冶金学是属于研究人工物世界的工程科学、技术科学范畴,是重在研究发展现实生产力的工程知识、技术知识和工程科学知识。其知识的来源是多元化、多层次、集成、综合性的,不仅是只来源于基础科学。冶金学的知识重在对各类要素、各类知识集成起来,并能转化为现实的、直接的生产力,发明、集成、综合、转化是其特征。

4.3 现代冶金技术科学的形成

20世纪是钢铁冶金发展成为科学,特别是成为技术科学的关键时期。20世纪20年代,化学热力学理论应用于钢铁冶金领域中,逐渐发展为冶金过程物理化学;其中化学反应热力学主要解决冶金化学反应过程中分子与分子之间的反应问题,包括化学反应进行方向上的可能性,反应平衡的极限,不同元素之间反应的选择性、排序性,反应平衡时的焓变化等。化学反应热力学主要是对冶金过程中化学变化本质的认识和规律的揭示,对冶金学而言,具有划时代的科学意义。上述属于基础科学性质的理论研究,主要是从原子或分子尺度的微观层次上进行一系列的研究,通过合理的简化、假设、典型化,采用“还原论”的

研究方法,将发生在原子/分子间的冶金反应过程假设成为“孤立系统”进行研究,再将研究结果“还原”到实际冶金反应过程中。显然,这些基础科学的研究对解释各类冶金-材料方面的现象、理解过程的本质,具有非常重要的理论价值,使冶金-材料的生产过程从手艺、技艺、经验逐步迈入科学^[19]。

当前,冶金过程化学反应热力学理论已经得到了较为系统的研究,其理论体系集中地表现在:(1)冶金化学反应过程中氧化-还原的基本规律;(2)凝固过程中晶体形核的热力学;(3)金属固态相变热力学;(4)金属再结晶过程热力学;(5)冶金化学反应过程动力学。这些以分子尺度进行研究的微观动力学理论,并不研究反应分子如何达到反应区,也不研究反应产物如何离开反应区。这种化学反应动力学是以反应体系均相分布为前提的,研究纯化学反应的微观机理、步骤和速率等问题,实际上是分子层次上的微观动力学。

在钢铁冶金过程中,多数的冶金化学反应是在相界面进行的多相反应或非均相反应,因此,研究其反应速率和机理时,必然要解析反应物到达反应区以及反应产物离开反应区的物质传输过程,这也是实际的冶金化学反应过程的一部分。对某一反应过程而言,这属于“宏观”动力学。而这种“宏观”是相对于原子/分子尺度的微观而言的,实际上仍然是分子层次的动力学问题,只不过是包括了对反应区附近的传质过程的综合分析。因而,这类关于冶金过程化学反应动力学的研究及其知识,仍然属于冶金基础科学的研究范畴。

钢铁冶金的基础科学主要解决原子、分子尺度上的问题;技术科学主要解决工序、装置、场域尺度上的问题;工程科学主要解决制造流程整体尺度/层次以及流程中工序、装置之间关系的衔接、匹配、整合、协同、优化问题。物理学、化学、金属学、物理化学、传输理论等基础科学和学科知识是钢铁冶金学的理论基础。冶金学科的发展使得人们研究冶金问题的思路和方法越来越

开阔,基础学科理论知识奠定了冶金学科的基础。

冶金反应工程学是 20 世纪 70 年代兴起的一门新的学科,最初始于 20 世纪中叶,50 年代以后,冶金学家分别在不同的条件下将化学反应工程学的观点、原理和方法应用于冶金过程。以日本的鞭岩和森山昭为代表,他们合著出版的《冶金反应工程学》开创了化学反应工程学在冶金过程的应用^[20]。冶金反应工程学主要研究某些典型冶金反应器的工艺特性及其功能改进,如钢水连铸的中间罐冶金、钢包冶金等装置。这些研究主要是应用数学模型化的方法,首先建立物理模型,进而建立数学模型,给定初始条件和边界条件,选用或开发适用的计算软件(如 CFD、FEM 模型软件),借助于编程和计算机数值计算,解析研究某一类冶金反应器及其系统操作过程的现象、特性和规律,从而通过对比研究和参数优化,得到优选的解决方案、工艺参数或结构尺寸;与此同时对新工艺、新装置、新设备的开发过程中可以预测其功能的特性,或者进行数值化的动态运行(仿真模拟),进而指导生产操作工艺的改进以及装置的优化设计。而且,对于已运行的冶金装置的革新、改造以及操作优化,冶金反应工程学都能够提供较完备的解决方案和相应的技术信息的支持。

4.4 钢铁冶金工程科学的创建与发展

现代钢铁冶金工程的发展经历了漫长的演变、集成、完善、变革和创新的过程。其中理论体系的形成、建立和发展,技术的发明、开发、应用和革命,生产工艺流程的组合、集成、演变和完善,在第一次工业革命以后大约 200 年的历史进程中,不断交替出现和相互促进,理论的形成、发展和不断完善,是指导技术发明和技术创新,以及工程集成和工程创新的重要动力。

与此同时,回顾钢铁冶金的发展演进历程不难看出,由于钢铁冶金包括矿物开采与加工、高温冶金过程、凝固-成形过程、金属塑性变形过程

与材料性能控制过程,具有工序繁多、功能各异、过程复杂、流程结构多样等特点,因而钢铁冶金基础理论的形成、建立和发展,是多领域、多学科的理论研究和相互交叉发展的过程,呈现出一种典型的解析-组合-再解析-再组合的不断发展和不断完善的过程。

20 世纪是钢铁冶金基础科学的完善与深化、技术的集成与进步、工程的演化与创新以及钢铁产业的快速发展的重要时期^[21]。转炉炼钢技术的普遍应用和连铸技术的推广普及,有利推动了钢铁工业的技术进步和产业发展。全球钢铁产量随着“颠覆性”冶金新技术的问世、应用和普及,快速攀升并不断增长;钢铁冶金装备大型化和现代化,也推动了钢铁冶金工业的迅猛发展。从近两百年的现代冶金工程技术演化发展的历史中,可以推断出,经济社会的发展和市场的需求是钢铁冶金产业发展的“拉动力”,而技术进步则是钢铁冶金产业发展的“推动力”。图 2 解析了钢铁工业可持续发展的“五力”模型。未来钢铁工业的科学、健康和可持续发展,必须在这几种力量的平衡协调中寻求发展——走钢铁制造流程绿色化和智能化的新型工业化道路。

从 20 世纪 90 年代开始至 21 世纪初,我国冶金学家开始思考钢铁冶金产业层面的宏观科学问题,以钢铁联合企业为关注点,从全局性和系统性的视角,考察钢铁制造流程的运行规律及其特征。2004 年,我国著名冶金学家殷瑞钰院士发表了开创钢铁冶金工程科学的学术专著《冶金流程工程学》^[22],基于耗散结构理论对钢铁制造流程的物理本质进行了深入研究,提出了现代钢铁制造流程应具有产品制造、能源高效转换和消纳-处理废弃物并实现资源化的“三大功能”。经过 21 世纪初 20 年的发展,钢铁冶金工程科学体系已经初步形成,在冶金流程工程学理论的指导下,我国第一个自主设计建造的沿海靠港千万吨级新一代可循环钢铁厂——首钢京唐钢铁厂于 2010 年全面建成、顺利投产^[23-25]。

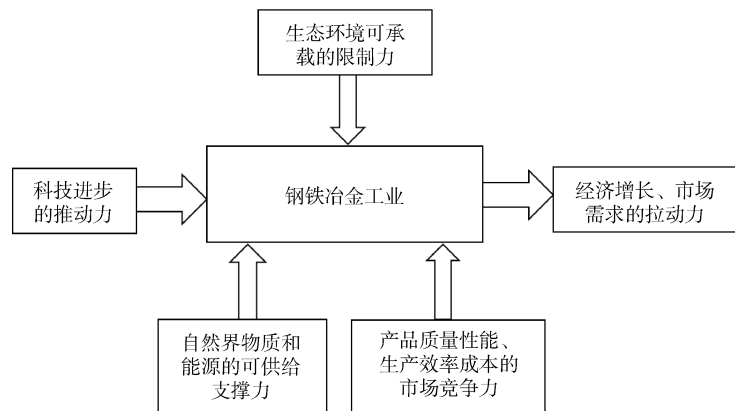


图 2 钢铁工业可持续发展的“五力”模型

经过近百年的探索、研究发展进程，现代钢铁冶金学（冶金科学与工程）也已形成三个层次的知识集成体系，即原子/分子层次上的微观基础冶金学、工序/装置层次上的专业工艺冶金学和全流程/过程群层次上的动态宏观冶金学（图 3）。可见，随着不同层次科学问题研究的深入，学者们的研究目标、研究领域不断扩宽，认识问题的视野发生了层次性跃迁，并进而嵌套集成为一个新的知识结构，即不囿于经典热力学孤立系统观念，

跨入探索冶金企业全流程的过程群的集成优化、结构优化，研究的对象发生了变层次、变轨的跃迁。同时，扩大了研发领域，既引导企业全流程中过程和过程群的自组织结构，以及他组织调控过程中共同形成的耗散结构和耗散过程优化的研究，又引导新的工程设计、工程运行的理论和方法。当代冶金学发展的战略目标也跟随时代的发展，发生了战略性的变化；当代冶金学的战略目标除了制造新一代产品以外，已经聚焦于冶金工

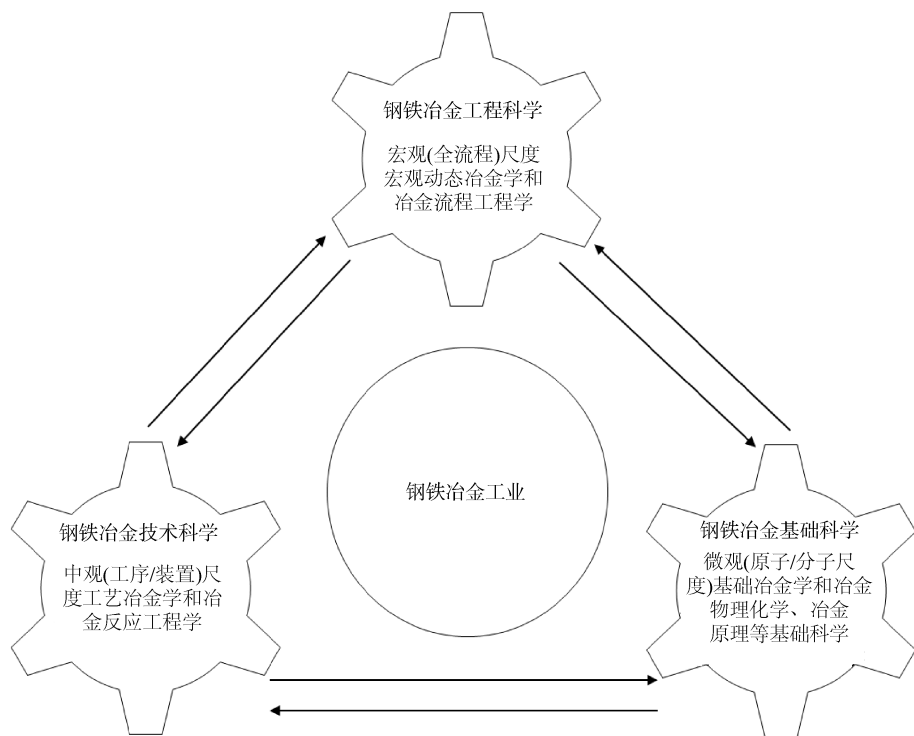


图 3 钢铁冶金科学-技术-工程的集成知识体系

厂的绿色化（绿色、低碳、循环发展）和智能化（智能化设计、智能化制造、智能化服务、智能化管理等）^[26]。

从钢铁冶金的发展演进历程，可以看出钢铁冶金工业现在面临的挑战是多方面的，要解决这些复杂环境下的复杂命题，就必须从战略层面上来思考钢铁厂的要素-结构-功能-效率问题，实质上这是全厂性的生产流程层面上的问题，必须从生产流程的结构优化及其相关的工程设计等根源着手。进而还可以清晰地认识到，这样的系统性、全局性、复杂性问题，不是依靠技术科学层次上的单元技术革新和技术攻关所能解决的，而是需要以工程哲学的视野，在全产业、全过程和工业生态链等工程科学层次上解决。

钢铁冶金制造过程，利用来自于自然界的铁矿石、煤炭、水、空气等天然的资源 and 能源，经过一系列复杂的物理-化学变化和生产加工过程，制造出满足经济社会和人们生活所需的钢铁产品，而且钢铁制造过程所产生的煤气、蒸汽、电力、冶金渣等副产品也成为其他产业的资源或能源。与此同时，钢铁制造过程还可以消纳、处理大宗人们生活或其他产业所产生的废弃物，如废钢、废轮胎、城市污水等，经过无害化、资源化处理或高值化循环利用，使其成为新的再生资源或再生能源。面向未来，钢铁工业必须建构与自然生态环境、经济社会和相关产业之间和谐友好、相互依存、持续发展的新格局（见图4）。

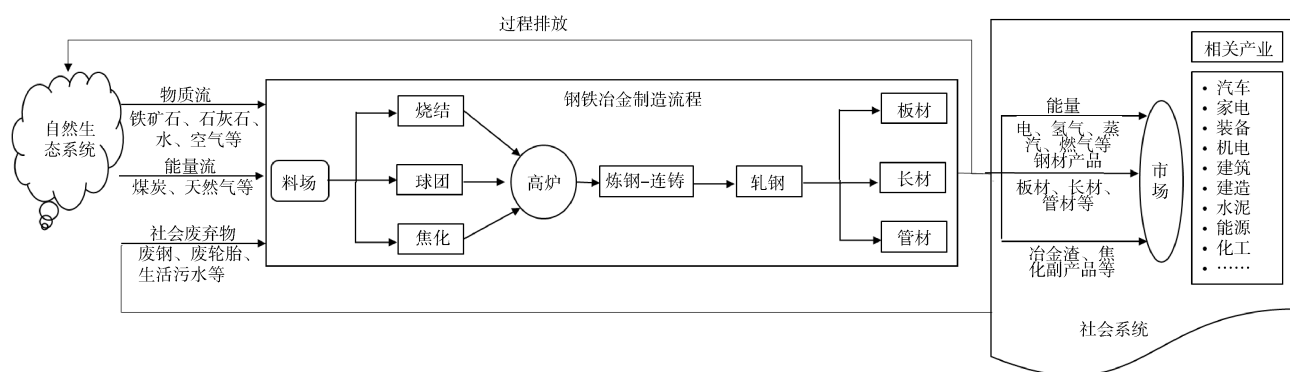


图4 现代钢铁冶金工程与自然和社会的协同关系

21 世纪初国际金融危机以来，全球经济出现新一轮的衰退，经济发展动力不足、增速缓慢，与此同时，全球政治、经济、金融、贸易形势错综复杂，预见和不可预见的各类风险不断叠加，不确定性和涌现性以及由此带来的突发性，造成全球钢铁产业面临着新的发展挑战和机遇。

5 结语

钢铁无论在过去、现在，乃至未来，都是人类文明发展和经济社会进步不可或缺的基础材料，具有重要的功能和地位。古代钢铁冶金技术主要依靠技艺的学习、传承和传播，囿于经济发展和当时的技术条件，制铁匠人的技艺、技能和

技术世代相传，鲜有突破。14~16 世纪的欧洲文艺复兴开启了近代思想解放运动，随后哲学、艺术、文学、技术、科学协同发展，17 世纪则是近代科学肇始的时代。人类从宗教和神学统治的思想禁锢中解放出来，对自然界的认知从模糊的主观认知走向科学探索和理性研究。钢铁冶金在第一次工业革命以后，在工艺技术上得到飞跃发展，贝塞麦转炉炼钢技术的发明，极大地推动了钢铁冶金技术进步。

20 世纪初，钢铁冶金物理化学学科的创立形成了钢铁冶金工程的理论基础；20 世纪 70 年代，冶金反应工程学的创建标志着钢铁冶金技术科学走向成熟；21 世纪初，冶金流程工程学的创建则

标志着钢铁冶金工程科学的形成, 从而形成了钢铁冶金基础科学、技术科学和工程科学的三个学科层次。

面向未来, 到 21 世纪中叶, 钢铁工业必须坚持绿色化、智能化的可持续发展道路, 在资源、能源、生态环境、技术和市场等多种要素的耦合作用下, 实现与经济社会的和谐相融和可持续发展。

参考文献

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学(第2版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [2] 殷瑞钰, 李伯聪, 汪应洛, 等. 工程演化论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 152-167.
- [3] 闻人军 译注. 考工记译注[M]. 上海: 上海古籍出版社, 2008: 41-59.
- [4] 杨宽. 中国古代冶铁技术发展史[M]. 上海: 上海人民出版社, 2014: 1-17.
- [5] 姜茂发, 车传仁. 中华铁冶志[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005: 49-84.
- [6] 沈括. 梦溪笔谈[M]. 施适 校点. 上海: 上海古籍出版社, 2015: 16.
- [7] 宋应星. 天工开物译注[M]. 潘吉星 译注. 上海: 上海古籍出版社, 2013: 111-133.
- [8] 王鸿生. 科学技术史[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2011: 184-186.
- [9] 亚·沃尔夫. 十六、十七世纪科学、技术和哲学史[M]. 周昌忠, 等 译. 北京: 商务印书馆, 2016: 5-11.
- [10] 吴国胜. 科学的历程(第二版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002: 362-364.
- [11] 亚·沃尔夫. 十八世纪科学、技术和哲学史[M]. 周昌忠, 等 译. 北京: 商务印书馆, 2016: 811-826.
- [12] 伯纳德·科恩. 科学中的革命[M]. 鲁旭东, 赵培杰 译. 北京: 商务印书馆, 2017.
- [13] 艾萨克·牛顿. 自然哲学的数学原理[M]. 任海洋 译. 重庆: 重庆出版社, 2015: 1-24.
- [14] 蔡子亮, 杨钢, 白政民. 现代科学技术与社会发展[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2006: 36-41.
- [15] 徐匡迪. 20 世纪——钢铁冶金从技艺走向工程科学[J]. 上海金属, 2002(1): 1-10.
- [16] 扬·卢腾·范赞登. 通往工业革命的漫长道路[M]. 隋福民 译. 杭州: 浙江大学出版社, 2016: 1-1.
- [17] 殷瑞钰, 张福明, 张寿荣, 等. 钢铁冶金工程知识研究与展望[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2019, 11(5): 438-453.
- [18] 沈峰满. 冶金物理化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017: 1-18.
- [19] 殷瑞钰. 冶金流程集成理论与方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 14-16.
- [20] 鞭岩, 森山昭. 冶金反应工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [21] 徐匡迪. 中国钢铁工业的发展和技术创新[J]. 钢铁, 2008, 43(2): 1-13.
- [22] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [23] 张福明, 顾建新. 冶金工程设计的发展现状及展望[J]. 钢铁, 2014, 49(7): 41-48.
- [24] 张福明, 崔幸超, 张德国, 等. 首钢京唐炼钢厂新一代工艺流程与应用实践[J]. 炼钢, 2012, 28(2): 1-6.
- [25] 殷瑞钰, 张寿荣, 张福明, 等. 现代钢铁冶金工程设计方法研究[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(5): 502-510.
- [26] 张福明. 我国高炉炼铁技术装备发展成就与展望[J]. 钢铁, 2019, 54(11): 1-8.

Research on Iron and Steel Metallurgy Evolution Process from Skill to Engineering Science

Zhang Fuming^{1, 2}

(1. Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100041, China ;2. Beijing Metallurgical 3D Simulation Engineering Technology Research Center, Beijing 100043, China)

Abstract: The origin, development, and evolution process of iron and steel metallurgical technology were studied under the view of engineering philosophy. Both the function and status of iron and steel materials were explained, and the significant roles of iron and steel in human society progress and civilization development were demonstrated. Research on ancient metallurgical skills from development and inheritance to innovation was carried out. Further, the influence of Renaissance and modern science initiation on iron and steel metallurgy technology and science since the 17th century was discussed. Modern science has had an impressive and profound impact on iron and steel metallurgy in terms of the skill change to engineering science, which was pursued comprehensively. It also focuses on the foundation of basic iron and steel metallurgical courses and metallurgical physical chemistry. The remarkable and far-reaching influence of modern science on iron and steel metallurgy as a skill to engineering science was discussed. The significance of iron and steel metallurgical technical science represented by metallurgical reaction engineering to modern iron and steel metallurgical engineering was expounded. The discipline system of the basic, technical, and engineering science of iron and steel metallurgy was put forward, in addition to the goal and direction of sustainable and healthy development of the industry in the future.

Key Words: iron and steel metallurgy; engineering evolution; physical chemistry; metallurgical reaction engineering; metallurgical process engineering; industrial revolution