

# 冶金学

在熙熙攘攘、五花八门的人类社会中,无时无地不与金属及其制品发生关系。人们的衣、食、住、行,从纺织、缝纫到炊事用具,从住房建筑、铁道桥梁到各种交通车辆、船舶和飞机,都离不开金属。人们从事生产和其他活动所用的工具和机器以及其动力匹配,包括发电、输电和蓄电,也都要使用金属。一句话,没有金属便没有人类的物质文明。本文第一节将阐述冶金在人类文明进化中的重要作用及其发展概况,值得注意的是,冶金发展水平与社会制度的关系是很密切的。

从历史上看,中世纪以前的冶金基本上是纯经验式的操作实践。由于当时缺少书刊,技术和经验传播只能通过师徒授受,谈不上资料积累和知识交流,因而冶金技术水平低,生产操作盲目性大,工业发展十分缓慢。冶金学创建后,在近代自然科学中有关的实验方法和理论的指导下,冶金生产技术进入了新的发展阶段。近代自然科学以伽利略—牛顿时期为起点,到现在还不到四百年,冶金学比较起来当然要年轻得多。本文第二节将表明冶金是怎样从近代自然科学吸取营养,到18世纪末开始成为现代独立学科的。

19世纪到20世纪,在冶金学的指引下,冶金生产技术发展极其迅速,即有广度,又有深度,内容十分丰富。表达这些内容将是本书一整卷的任务,本文第三节只能针对那些作用大而影响面广的项目做综合介绍。列举这些项目可能是“仁者见仁,智者见智”,而且挂一漏万,也在所难免。

20世纪下半叶以来,电子技术特别是集成电路和电子计算机的发展对冶金产生了深刻影响。一是电子计算机的应用使自动化技术与冶金工艺学结合得越来越紧密,二是电子器件对材料的需求超出了金属的范围,从而促使冶金学发展成为材料科学。本文第四节将讨论这方面的问题并提出展望。

最后,为了便于读者了解冶金学的全部内容,对冶金的分支学科或专业用图解方式进行了分类。

## 一、冶金生产技术在人类文明史中的地位及其发展概况

冶金作为一门生产技术,起源十分古老,它的发展在人类文明史中占有极其重要的位置。众所周知,人类从使用石器、陶器进入到使用金属是古代文明的一次飞跃,它是从使用天然金属主要是天然铜开始的,时间距今大约不下6000年。由于铜经过锤打能显著变硬,因而最早被用来制造器皿和工具。但天然铜资源十分有限,更多的铜必须从矿石中提取。最早炼铜是中东波斯湾北部的米索波达米亚地区,时间大约在公元前3500年。在炼铜作业的过程中,发现铜矿石与锡矿石共熔能得到青铜。这种铜熔点低,强度比纯铜高,铸造性能好,适宜于制作刀具和器皿等多种用途。青铜最早是在Sumer地区发现的,时间大致是公元前3000年,以后不久即传入埃及。公元前2600年埃及就开始用石蜡法铸造青铜器件,为大量提供青铜器皿和工具创造了条件,这标志着人类文明进入了青铜时代。

用铁器取代青铜是人类文明的又一重大进步。最早炼铁是黑海南岸某山区的赫梯人,时间大约是公元前1300年。以后不久(公元前1200年),铁器的应用在埃及已占一定的分量,一般认为,这是人类文明进入铁器时代的开始。显然,在不同地区,铁的使用和生产发展水平是很不相同的。在欧

洲,公元前1000年中欧就开始用铁,但向西欧传播则极其缓慢,直到公元前55年罗马人入侵英伦三岛才传入英国。在亚洲,印度在公元前已知道如何锻铁成钢,方法是把熟铁块放置木炭中加热渗碳并进行锤锻。中世纪阿拉伯人制造大马士革钢剑就是采用此法。中国炼铁是自己独树一帜,最早用铁大约是公元前700年,以时间上讲比西方晚,但掌握铸铁技术则比西方早1500—2000年。正因为掌握了铸铁,中国从汉代(公元初)以后铁的生产就占主要地位,而欧洲则直到公元15世纪初,铜和青铜仍然是生产得最多的金属。

就金属种类而言,中国在春秋战国之际(公元前600年)即已掌握金、银、铜、铁、锡、铅、汞等七种常用金属。欧洲则直到罗马帝国末期(公元400年)才全部掌握上述金属,比中国晚1000年。在以后1000年中直到公元15世纪初,欧洲仍只有上述7种常用金属,中国则比欧洲多一种,这就是锌。由此可见,中世纪以前人们能够掌握的只是那些矿石成分单纯,并且容易通过炭还原能得到的金属,其中除铁外,大都是熔点较低的金屬。

16世纪欧洲出现资本主义的萌芽,它是生产管理体制改革后的产物,首先发生在英国。英王亨利八世(公元1509年登位)为了筹措经费加强国防,不得不变卖寺院财产,把采矿和冶金企业拍卖给当时的冒险家或新生资本家。这次变卖产生了实质性的变化。冶金企业从那些不懂行又不热心生产的寺院主持手中转移到苦心经营、孜孜追求高额利润的资本家手中,开创了资本家之间的贸易竞争,从而推动了生产技术的发展。15世纪以前,英国的冶金以及其他生产技术都落后于欧洲大陆,但经过上述改革开始出现转机。正因为这样,在公元1640年以后的250年中,以炼铁、炼钢为主的冶金生产发展主要发生在英国。尤其是从公元1700年到1890年,一系列的技术发明创造使英国的炼铁、炼钢工业得到蓬勃发展。这些发明创造是:炼铁方面:①公元1713年Darby用焦炭代木炭炼铁成功;②1828年Neilson采用热风使炼铁焦比降低,生产效率成倍提高。炼钢方面:①公元1730年Huntsman采用坩埚炼钢法首次生产铸钢件;②Hall在生铁中混入氧化铁以促进脱碳,这在1856年Scimens改进炼钢炉后发展成为平炉炼钢法;③公元1859年Bessemer发明吹空气转炉炼钢法,开创了快速炼钢的新纪元,使钢生产得到大发展;④Thomas与Gilchrist发明碱性炼钢法,成功地解决了用高磷生铁炼优质钢的问题,从而扩大了炼钢原料的来源。轧钢方面:①公元1697年John Hanbvirg用平辊轧制镀锡板;②1783年Henry Cort用孔型轧制生产熟铁棒,这个方法后被用来生产型材。上述许多技术发明创造使英国炼铁、炼钢在18、19世纪走在世界最前面。19世纪末英国钢铁产量虽已被资源丰富的美国超过,但在质量方面仍然领先。炼铜情况也是一样,铜资源并不充裕的英国在工业革命的推动下,1860年时竟然成了世界上产铜最多的国家。从以上可以看出,英国冶金之所以能从落后变为先进,主要应归功于较早采用适应当时生产力发展的资本主义体制。正如马克思在《共产党宣言》中所指出的,“资产阶级在它不到一百年的阶级统治中所创造的生产力,比过去一切世代创造的全部生产力还要多,还要大。”

我国古代冶金比欧洲先进,尤其是铸铁技术比欧洲先进得多。大量发掘我国古代铁器的鉴定结果表明,中国在汉朝生产的铸件其中石墨呈球絮状,颇与近代球墨铸铁相似,因而具有一定的柔韧性。由于这种铸铁能适应制造农具的要求,中国自汉代后铁的生产就超过了铜。正因为这样,铁的经营管理在汉代已经提到重要议事日程,《盐铁论》的提出是其明证。从《盐铁论》可以看出,当时官商、私商并存,官商承办大铁件,私商则经营小铁件。显然,官商与私商之间不存在竞争。有理由认为,官商对私商起制约作用,因而私商之间也没有竞争。没有竞争就无形中减弱了发展生产技术的动力。受官方制约的私商不可能发展成左右社会经济命脉的资本家,当然产生不了资本主义。中国冶金生产技术之所以长期停滞不前,与缺乏竞争的上述封建管理体制不无关系。

欧洲冶金生产技术的发展是另一种情况。公元初,欧洲只有熟铁制品,当时用铁较多的是造船

铆钉和马蹄铁等。熟铁是铁矿石在木炭中加热还原后经过多次锤锻以去除铁中杂质得到的,生产既费力又难以制作大件和形状复杂的用具。熟铁的大量需要迫使冶金企业采用机械操作来提高生产效率,有条件的地方水力被用上了。从公元1100年开始,欧洲在使用机械方面做出了很大努力。例如利用偏心轮使圆周运动转换为直线运动来操作风箱以加大炼炉鼓风,采用齿轮传动来控制杠杆进行锤锻或压力加工等,就是上述努力的成果。公元1550年,德国采用水力鼓风,加大、加高了炼铁炉,提高了炉温,并使还原后的铁有足够的时间与灼热的炭接触以增加铁中的含碳量,炉底才有熔融的铁水沉积,流出炉外,即是铸铁或生铁。由于铁中含碳高因而很脆,为了获得具有韧性的钢,上述铸铁需进一步加热,并同时锤锻以去除其中一部分碳,锤锻时又往往要使用机械操作。对比之下,中国使用机械鼓风比欧洲早得多,东汉、三国时期(公元200年以前)已有“水排”,即水力鼓风,但由于满足于使用铸铁,长期忽视了压力加工。欧洲则在抓铸铁技术的同时也抓了压力加工。因此,欧洲在16世纪中叶突破了铸铁技术关时,其冶金技术在某些方面已超过中国。资本主义在欧洲萌芽后,加快了该地区冶金发展的步伐,从那时起中国日甚一日更加瞠乎其后者了。

关于有色冶金,中国也曾经是先进的。前面已经提到,中国掌握7种常用金属比欧洲早得多。中国用石蜡法铸制青铜器件大约是在春秋初期(公元前600年左右)开始的,虽远不如埃及,但与欧洲相比较并不算晚。但是,像炼铁一样,中国的有色冶金作业也偏重铸造而忽视压力加工。一个突出的例子是,清朝的铜钱仍是铸制的,西方则在公元前500年的希腊就开始用模锻制造钱币了。在常用金属中,我国公元1400年时,已出现金属锌制的货币等物品,欧洲则直到公元1738年才有人取得用蒸馏法制锌的专利。对比之下,中国用锌比西方至少早300年。然而,锌在封建统治下的中国未能对社会经济发展起明显的促进作用,可是18世纪传到资本主义正在上升的欧洲后,便立即用于发展黄铜制造业,使价廉的黄铜逐步取代了一大部分价格昂贵的青铜。这里又一次说明,社会制度对冶金发展是关系极大的。

## 二、从冶金生产技术到冶金学的建立

前面已经提到,冶金作为一门生产技术,起源十分古老,可是作为一门现代科学,则很年轻,从开始建立到现在,不过200年左右的历史。显然,冶金技术经过发展和提高到最后成为独立的学科,经历了一个漫长的过程。

有理由认为,15世纪以前的冶金基本上处于盲目性占主导地位的摸索阶段。那时,效益显著的冶金操作大都凭个人经验或者依靠师徒授受。由于缺乏书本记载,加上技术保密,谈不到知识的积累和传播。在某些情况下,有的技术甚至难免失传,中外历史都提到过这一类的事例。回顾以往,从开始用铜的远古时代算起,到15世纪时人类从事冶金活动已经历了5000多年,可是掌握的金属总共只有七八种。可见,在盲目性占主导地位的情况下,冶金方面的进展是何等缓慢。16世纪中叶,欧洲最早的两本著作问世了。这就是《De Re Metallica》和《De La Priotechnia》,是德国Agricola和意大利Biringuccio两人分别在公元1540—1550年间完成的。两书特别是前者较完整地记载了当时欧洲的冶金技术操作,起到承前启后传播知识的作用,使德国在有色冶金方面走到欧洲其他国家前面。这两本书在欧洲冶金文献中公认是先驱,影响深远。在中国,冶金书刊的出版显然比欧洲早得多,宋朝张甲著书《浸铜要录》可惜早已佚失,明代溥峻的《冶铁志》也同样失传。目前能见到的是明朝宋应星所著《天工开物》,这本书较详细地记载了我国当时的冶金技术,时间大致是16世纪晚期。可是,宋应星以后到清末这300多年间,我国封建科举制度的桎梏不仅没有削弱反而不断加强,使科学技术在知识界不受重视,《天工开物》这种书在我国就很少有人问津了。

在欧洲,16世纪到17世纪是自然科学播种和萌芽的时代。哥白尼(公元1543)已对当时奉为神圣不可侵犯的亚里士多德天体学说发动攻击,开普勒继承哥白尼学说,在公元1630年提出天体行星运行理论,欧洲知识界寻求真理的思想日益活跃起来。17世纪初,培根(Francis Bacon)明确指出,认识事物要有正确的方法。于是数学进一步受到重视并日益成为增进知识的重要工具。这时英国人 John Napier 已将他的对数发明公布于世,以后不久,莱布尼茨(Leibniz)和牛顿又各自发明了微积分。这些数学发明对开拓自然科学许多领域都起了重要作用。另一增进知识的重要工具是科学实验设备的采用,复合显微镜就是这个时期被 Zacharier Jansen 发明的。以后不久,Hooke(1665)用显微镜观察剃刀表面的锈点和划痕,Réanmur(公元1713—1716)用它观察金属断口,说明显微镜用于冶金制品的观察在索比(Sorby)以前200年就开始了。

18世纪被认为是欧洲的启蒙时期。公元1730年铸钢技术被突破后,对钢进行探讨的条件初步具备了,要求也更加迫切了。当时,人们对钢存在着严重的误解。例如,Hooke认为不同热处理使钢具有不同硬度是由于钢中掺杂着不同量的玻璃态物质,Réanmur则认为钢是铁中渗进了别的物质,主要属于“盐类和硫类”。这两人的观点显然都是不正确的。18世纪下半叶,Bergman对钢进行了认真分析,才证明钢中含的主要是碳,他由此得出结论:“钢是铁与碳交互作用的产物。”公元1786年,Joseph Priestley也得出相同的结论,他与De Morveau一致,都认为铁能与碳化合,钢的性能则决定于铁碳化合物。这时,人们对钢的实质才有较为正确的理解,从而为钢冶金指明了方向,那就是生铁要去掉一部分碳才能成钢,要改变钢的性能,就必须在碳上做文章。关于冶金反应,以前人们对金属氧化这种常见现象也缺乏认识,把金属的燃烧看做放出所积“燃素”,其实质是把“燃素”当成一切可燃物质中的必要组成之一。公元1786年上述“燃素”学说被拉瓦锡等人彻底推翻,人们对氧化燃烧现象才有正确认识。众所周知,氧化及其反面反应——还原,是冶金的化学基础,改变碳在钢中的形式是钢进行热处理的基本依据,如果对这两者缺乏起码的认识,建立冶金学科就无从谈起。由此可见,冶金学的序幕,在18世纪末才真正揭开。

冶金学的序幕揭开时,欧洲日常生活中能见到的金属仅比15世纪多了五种,即砷、锑、铋、锌、铂。在这里,铂的应用有其特殊重要作用。因为,用铂做化学器皿和某些实验装备,使新金属首先在化学实验室中被发现并制备出来,是使冶金进一步得到发展的必要条件。18世纪中叶,钴和镍被发现,以后新金属逐年增加,到公元1890年时,周期表上只剩下7种金属尚待发现,其中除镓外,其他6种基本上与冶金无关。上述新金属的发现,为冶金的发展开辟了广阔新园地,但这时单凭“炭还原”已不能应付局面了。在电尚未被人们掌握并大量供应以前,火法冶金能制取的新金属很少。事实上,公元1850年的冶金产品仍只限于炭还原能提供的钢铁以及铜、铅、锡、锌、锑、铋、汞和有关的有色金属如黄铜、青铜等。

### 三、冶金向生产的广度和深度进军,形成两大分支学科——冶金工艺学和物理冶金学(金属学)

冶金学的建立,为冶金生产技术的发展提供了方向盘。在自然科学规律的统一引导下,物理、化学、力学等方面的新成就不断渗透到冶金中来,指引着冶金生产技术向广度和深度进军,从而丰富了冶金学的内容,使它形成两大学科分支——冶金工艺学与物理冶金学,各自都结出了丰硕的果实。

## 1. 冶金工艺学(亦称生产冶金, Production Metallurgy 或 Process Metallurgy)

冶金工艺学是研究冶金新流程或新方法,其目的是为了<sup>1</sup>提高生产效率、改进质量、降低成本,以及扩大品种和增加产量。公元1828年英国人Neilson依据热工原理对高炉采用预热空气鼓风,当时其预热温度不过350℃,可是却显著地获得了降低焦比并使炼铁效率成倍提高的效果。炼铁效率提高后,坩埚炼钢或炒钢法就显得很不适应了。公元1850年英国产生铁2 500 000吨,产钢却只及60 000吨。显然,只有很小一部分生铁能被当时的炼钢能力所吸收。公元1856年柏塞麦(Bessemer)向转炉中铁水吹空气,使铁水中硅、锰、碳等元素含量迅速降低,并同时产生大量的热能,这才真正开辟快速炼钢的新纪元。转炉炼钢是冶金史上最杰出的成就之一,是创造性地将化学反应动力学应用于冶金生产工艺的典范。钢生产大发展造成积累废钢越来越多,有必要解决其回炉冶炼问题。西门子(Siemens)发明的平炉炼钢法在1868年首次投产,其重要意义首先在于能用废钢作原料。平炉采用同流换热法使炉温显著提高,在冶金炉热工方面是又一项重大突破。为了扩大炼钢原料来源,Thomas与Gilchrist依据磷在渣和钢中平衡分配这一物化原理,采用碱性炉衬、碱性造渣并根据具体情况进行多次扒渣以促进去磷,成功地解决了用高磷生铁冶炼优质钢的问题。上述许多问题在19世纪下半叶得到解决后,炼钢生产的发展犹如脱缰之马,驰骋向前。公元1850年西方产钢总共约66 000吨,1900年仅低碳钢就达2 800万吨,1955年世界共产钢2.6亿吨。以1850年的钢产量为基数,50年增长了400倍,一百年增长了4 000倍,也是其他工业企业难以比拟的。

20世纪下半叶以来,钢铁冶金又有新的发展。采用温度高达1200℃的热风和2.5大气压的高压炉顶操作,使炼铁生产效率进一步提高到一个新的水平。目前,高炉体积也加大了,日产铁万吨以上的高炉并不罕见。炼钢方面,最主要的发展是氧气转炉(包括顶吹和底吹)和连续铸锭,目前,氧气转炉已取代平炉成为最主要的炼钢方法,用此法生产的钢已占世界年产钢量的一半以上。轧钢则向高速化和连续化发展,薄板的轧制速度可高达每秒40米以上。连铸和连轧的采用提高了钢的收得率,节约了能源。其他如真空处理、纯氩吹炼、钢包喷射等技术对提高特殊钢的质量各自都起了重要作用。

有色冶金方面,生产工艺技术的发展主要表现为新的金属工业相继问世。公元1850年以来,首先投入工业生产的新金属是镍,1865年即有镍锻件。有色金属矿大都是硫化矿或氧化矿,并且多种金属往往共生,有的金属在矿石中的含量又很低。针对这种情况,一般都要首先进行选矿,选出的精矿才是冶金原料。概括起来,提取金属的方法有以下几种:

(1) 镍冶金。精选后的硫化矿物中镍和铜共存,首先要分离镍和铜。方法是将精矿粉与硫酸钠混合共熔,熔体缓慢冷却凝固后分为两层,上层主要是硫化铜,下层是硫化镍。提镍可以有两条途径。第一种是将硫化镍破碎与焦炭混合入回转炉加热还原成粗镍,再进行湿法电解提纯。此法于公元1899年为加拿大工业所采用。另一种方法是将硫化镍焙烧成氧化镍,然后在水煤气中加热到400℃即还原成粗镍,再将这种粗镍在50℃与一氧化碳化合生成气相 $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ,以便分离杂质,后者引入另一容器加热到180℃即分解成精镍。此法是公元1890年蒙德(Mond)发明的,1900年在英国投产。硫化矿物的处理在有色冶金中是很重要的,镍冶金有一定的代表性。

(2) 铝冶金。铝是较早引人注目的金属,公元1855年法国人Deirille用钠还原法制出金属铝,但生产成本高,铝与银同价,不能推广应用。1886年法国人赫劳特(Hérault)和美国人霍尔(Hall)各自采用熔盐电解法炼铝成功,铝冶金才真正达到工业化。方法是将氧化铝溶解在石墨槽中加热的冰晶石熔体,然后进行电解。

熔盐电解在有色冶金中占有重要地位。除铝冶金外还有许多其他金属。如用 $\text{MgCl}_2$ 熔盐进行

电解生产镁,用类似方法还可制取钾、钠、钙、钡与铀等。又如用  $\text{BeCl}_2$  与  $\text{NaCl}$  混合熔盐或用  $50\text{BeO}$ 、 $\text{BeF}_2$  与  $50\text{BaF}_2$  混合熔盐电解得到铍,将  $\text{NaF}_2$  溶解在  $\text{KCl}$  熔盐中进行电解得到铈,用  $\text{LiCl}$  与  $\text{KCl}$  混合熔盐电解得到锂,将  $\text{ThCl}_4$ 、 $\text{KCl}$  放入  $\text{KCl}$  与  $\text{NaCl}$  熔盐中进行电解得到钍等等。

(3) 湿法电解。方法是对金属水溶液进行电解,常用于生产纯金属如纯铜、纯铬、纯锰等。上述水溶液一般是酸性,生产钢、镓、铊等也用此法,锗则只能在碱性溶液中电解出来。

(4) 用离子交换或有机萃取从浸除液中分离金属。此法都用于从低品位矿中提取金属,如从铀矿中提铀。钍以及许多稀土金属的分离一般也用此法。

(5) 金属热还原。方法是用钙、镁、铝等作还原剂,还原其他金属的化合物。如用镁或钙还原  $\text{TiCl}_4$ 、 $\text{ZrCl}_4$ 、 $\text{VF}_4$  等分别得到钛、锆、铀。又如用铝粉或镁粉与其他金属氧化物混合后加热起反应还原出其他金属,1859年 Wöhler 首次用此法生产金属铬,后来生产金属锰也用此法。

(6) 氢还原。此法在半导体冶金中特别重要,例如氧化锗在  $540^\circ\text{C}$  氢气中还原成锗,四氯化硅在  $1100^\circ\text{C}$  氢气中还原成硅。在适当温度下,氧化钨被氢还原成钨,钨粉就是这样制成的。

(7) 蒸馏法。如根据金属本身沸点不同,用蒸馏法分离镉和锌,利用可挥发氧化物分离 Se、Te 等。

(8) 化合物加热分解成金属。如氢化钛、氢化锆在真空中加热到一定温度分解成金属钛、金属锆等。

(9) 悬浮熔炼与区域提纯。前者是在感应线圈产生的电磁场作用下使金属熔体悬在空中以避免与坩埚接触产生污染。后者是利用杂质在液态比在固态金属中的溶解度大,在横置坩埚中使金属熔融区域从一端向另一端缓慢移动,反复多次后,可以使金属条的一端成为超纯。这是制备超纯金属的常用方法,对科学研究的意义尤其重大。上述内容,大致是 1850—1950 这 100 年内完成的。在这里,各种电炉和真空技术的应用起了重要作用。高频感应炉是 1920 年以后出现的,真空自耗炉大约晚 20 年。如果没有这些技术装备,活泼金属如钛、锆、铀等是难以制备的,熔点很高的金属如铈、钼之类则只能用粉末冶金的方法了。

## 2. 物理冶金学(亦称金属学,Physical Metallurgy 或 Metal Science)

金属学是从物理冶金学直接演变而来的。19 世纪中叶,在钢生产大发展的同时,为了获得钢的热处理和有关使用方面的知识,1864 年 Sorby 开始创建金相学,用显微镜对钢的组织进行系统观察。金相学以自己的特色丰富了当时的物理冶金内容,使冶金向深度进军迈开了极其重要的一步。由于金相学的出现,金属的显微组织及其在各种条件下的变化受到应有的重视,物理冶金的研究方向一研究金属及其合金的组成、组织结构与性能之间的内在联系——也就更加明确起来。为了掌握各种合金相或组织结构的生成条件,相图工作提到了日程。公元 1900 年德国人 Roozeboom 在前人工作基础上运用 Gibbs 相律建立铁-碳相图,是当时一项重大成果,成为物理冶金发展中的一个重要里程碑。在相图工作的指引下,发展合金尤其是发展合金钢的工作多起来了。19 世纪下半叶出现的只有含钨工具钢和耐磨的高锰钢,至于用途较广的镍铬钢系列则是第一次世界大战前夕 Brearley 等人首次发展出来的。回顾公元 1860 年,那时西方国家实际应用合金及钢总共不超过 40 种,1890 年后开始多起来,到 1960 年时正式列入各国工业产品目录的合金及钢总共不下 4000 种。可以认为,从冶金角度看,20 世纪进入了合金时代,进入了人类按使用要求创制性能合格的金属材料卓著成效的时代。

20 世纪以来,物理冶金或金属学取得了一系列的重大成就或突破,为冶金生产发展和金属科学的推进做出了贡献,其中影响较大的是:

(1) 美国人 Davenport 与 Bain(1930)研究奥氏体在不同温度下的恒温转变特征及其产物,创造了 C 曲线,从而阐明了钢的一般热处理原理。

(2) 研究金属冷加工形变过程及退火后的组织结构变化,掌握单晶及双晶等制备方法,发现取向结构对硅钢片性能有显著影响,从而找到了生产高性能硅钢片的方法。

(3) 法国人 Guinier 与英国人 Prestior 在 30 年代晚期各自应用精细 X 射线衍射法研究高强度铝合金的时效硬化机制,指出 Al-Cu 合金中的铜原子处于脱溶状态时其硬度效应最大。这项研究结果启发人们对合金中微量元素的作用产生新的理解。

(4) 德国人 Knoll 与 Ruska(1931)发明电子显微镜,经过 Siemens 公司于 1940 年制成商品后,根据使用要求不断提高其分辨能力,成为研究微观结构的有力工具。近年来,电子显微镜的分辨能力已接近原子尺寸水平,能直接观察金属中的面缺陷、位错和点缺陷等。应用电子计算机进行图像处理,进一步提高电子显微镜的分辨能力,还能直接看到金属晶体中单个原子的清晰图像。这方面的进展是 20 世纪科技中的杰出成就之一。

(5) 位错理论是 1934 年英国人 Taylor、荷兰人 Polanyi 和匈牙利人 Orowan 分别提出的。1956 年英国人 Hirsch 用金属薄膜在电子显微镜下进行观察证实了位错的存在,以后其他学者又陆续验证了理论上对金属中位错生成、增殖和运动规律的推测,这对阐明金属形变以及强度和断裂机制起了重要作用。

(6) 钢中马氏体相变的研究加深了对马氏体中碳原子固溶强化以及对位错与孪晶等作用机制的了解,有效地指导了高强度、高韧性钢的设计和发展。形变热处理,应变时效热处理,以及低碳马氏体钢、马氏体时效钢、相变塑性钢(TRIP)等都是以此为指导原则提出来的。关于有色合金,30 年代在铜合金中观察到马氏体相变的可逆性,其伪弹性效应及形状记忆效应近年来颇受重视,因而又发现若干具有同样性能的新合金。有的记忆合金在某些新技术中已实际应用。

(7) 20 世纪 40 年代以来,喷气发动机的发展对高温合金的工作温度提出日益严酷的要求。1943 年英国制造第一台喷气发动机使用镍基高温合金的工作温度是 650℃,以后逐年提高,70 年代达 950℃,用的仍然是镍基合金,这意味着其使用温度达到相当于合金熔点绝对温度的 75%以上。这是 20 世纪冶金方面出色成就之一,是综合运用金属学理论与使用材料所积累的经验以及发展冶金新工艺等得来的结果。

(8) 液态金属经快速冷却生成微晶或非晶态金属,各自具有独特的性能。微晶金属是将液态金属在惰性气体中喷雾,使之快速冷却形成超细粉末,然后将这种超细粉末压制成型并进行烧结成为所需的部件。这种部件内含微晶结构,成分均匀,其强度性能较一般合金部件优越得多。非晶态金属则是从液态以每秒大于  $10^5$ ℃ 的冷却速度冷到室温的金属,其性能不仅强度高,抗腐蚀性能也优于一般。非晶态硅钢片的电磁性能也远远优于普通硅钢片,因而受到电力工作者的重视。显然,微晶金属和非晶态金属的发现,为金属学开辟了广阔新园地。

(9) 金属表面科学研究日益深入。为提高钢部件表面硬度以提高其抗磨性能,表面渗碳、渗氮等在 20 世纪 30 年代已普遍应用。以后,新的表面处理方法不断出现,如采用喷丸处理使金属部件表面产生压应力以提高其疲劳性能,采用气相沉积例如在表面沉积氮化钛以增强抗磨性能,采用激光处理使金属表面产生一层非晶态物质以改善其抗腐蚀性能等等。近年来,离子注入被用来改变金属表面的成分和结构及电子行为仍在进行研究。

## 四、冶金学的现状和展望

20 世纪下半叶以来,冶金生产工艺与自动化技术的结合日益紧密。氧化转炉炼钢、连续铸锭以及轧钢高速化与连续化等新工艺之所以能把钢冶金生产效率不断推向新的水平,在很大程度上应归功于应用电子计算机进行自动控制。倘若没有自动控制,氧化转炉就难以充分发挥其快速炼钢能力,连续铸锭就难于保证质量并获得高收得率,轧钢就难以实现高速化和连续化。有理由认为,生产过程自动化刷新了冶金工艺学的内容,成为当前和今后冶金发展的一个重要方向。

单纯从提取金属着眼,可以认为我们今天已有的自然科学知识和技术手段基本上能对付一切。这就是说,矿石品位再低,组成再复杂,我们也有办法把金属提取出来,问题在于消耗的能源和工本是否合算。矿石品位的最低限,工艺流程的合理性,工程设施的规模大小等等,归根到底,决定于整个冶金企业能否获得最佳的经济效益。今天,冶金工艺学不只是着眼于工艺和技术,也必须同时着眼于工业经济。

金属学或物理冶金为生产服务是要为提供合乎使用要求的冶金产品探索途径,同时也要发展金属的新用途。在这里,研究和发展新合金,也就改善冶金产品性能的各种处理方法和技术等等,是其重要内容。钢在自然界原来并不存在,是人们在长期实践中摸索出来的,到 20 世纪上半叶才形成钢的系列。在创制钢或新合金的过程中,人们对成分、组织结构和性能之间的内在联系进行了研究。如果仅仅从使用着眼,合金的性能当然是首要的;从生产的角度出发,则优先考虑的是成分,是否便于冶炼加工,是否合理等等。但是,合金的性能并不完全取决于成分,而在很大程度上决定于组织结构。因此,研究金属及其合金的组织结构是金属学最重要的一环。目前,从宏观到微观包括合金成分偏析、夹杂、显微组织、晶体结构与晶体缺陷等各个层次有关组织结构的作用及其变化因素都已积累大量知识并总结出一套规律。应用这些知识和规律能大大减少生产和使用金属材料的盲目性。可是,与其按特定要求,不经过实验就能设计出合格的合金还有很大距离。

从 20 世纪 60 年代开始,一个明显的动向是冶金与陶瓷工艺学、固体物理、固体化学等学科汇合成材料科学。在西方国家,各大学的冶金系多数已改名为冶金与材料科学系,有的学院则干脆采用材料科学与工程这个名称。有理由认为,材料科学的提出是为了适应电子工业特别是电子计算机制造业发展的需要。材料科学中与此有关的首先是半导体冶金,其对象是锗、硅以及 III-V 族化合物。硅是一种非金属,但制取硅要应用冶金技术。半导体材料的最大特点是要求超纯,有的需制备无位错单晶,有的还要掺入某种特定的添加物。在这里,离子注入这项新技术得到应用,并为冶金开拓了新的发展前景。向超纯单晶某一取向注入离子是制备薄膜半导体的一种方法,也可能成为深入研究晶格中电子行为的一种实验途径。近年来,为了获得超高磁场,发展了超导材料。继生产  $Nb_3Sn$ ,  $Va_3Ga$  等临界温度在 20K 以上的超导合金,表达了这方面的最新成就。显然,探索临界温度更高的超导材料是材料科学工作者的长期努力目标。

事物在发展,时代在前进。局限在金属框框里的冶金学也不能适应近代工业发展和文明进化的要求,因而出现了材料科学。材料科学的一项重要内容是复合材料,其中包括不同金属之间的复合,金属与非金属的复合,有机塑料与金属或非金属的复合等等。关于复合材料的某些组织结构,冶金工作者并不生疏,事实上一些共析型的合金如 Co-TaC 等,其碳化物呈胡须状沿凝固结晶方向穿插在金属基体中,就是一种复合材料。目前,用各种胡须或纤维加强金属或塑料的复合材料已在许多方面开始应用。可以预期,随着材料科学的进展,复合材料将像 100 年前一样,越来越显示出其强大生命力。



最后,为了读者的方便,对冶金学内容按专业或分支学科,用图解表达其相互关系和分类如下:

