

钢的成分、组织与性能

(第二版)

第一分册：合金钢基础

崔 崑 编著

非
外
借



科学出版社

钢的成分、组织与性能

(第二版)

第一分册:合金钢基础

崔 崑 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

《钢的成分、组织与性能》系列著作全面介绍常用钢类的成分、组织、性能,以及它们之间的关系,同时介绍各钢类的相关标准及工程应用。本书为第一分册,除绪论之外,还介绍钢的生产与冶金质量、铁基二元相图与钢的相组成、合金元素对钢中相变的影响、合金元素对钢的性能的影响,以及相关的国家标准和行业标准。

本书适合从事钢材研究、应用的科研人员、工程技术人员阅读,也适合高等院校金属材料类专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

钢的成分、组织与性能. 第一分册,合金钢基础/崔崑编著. —2版. —北京:科学出版社,2019. 1

ISBN 978-7-03-059778-6

I. ①钢… II. ①崔… III. ①钢-研究②合金钢-研究 IV. ①TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 276913 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:师艳茹 / 封面设计:刘可红

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

天津文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 1 月第 二 版 印张:25

2019 年 1 月第一次印刷 字数:486 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

钢铁工业是我国国民经济的重要支柱产业,在经济建设、社会发展、国防建设等方面发挥着重要作用,为保障国民经济稳定快速发展做出了重要贡献。1996 年我国粗钢产量达 1.0002 亿 t(未包含港澳台数据),跃居世界第一产钢大国,2010 年达到 6.3 亿 t(当年世界钢产量为 14.1 亿 t)。近年我国的钢产量增长趋缓,主要任务是研发高技术水平品种,淘汰落后产能。目前,我国大型钢铁企业和一些技术先进的钢铁企业的吨钢综合能耗已接近国际先进水平。2017 年我国粗钢产量达到 8.317 亿 t(当年世界钢产量为 16.912 亿 t)。

近年来,我国钢铁工业在大型化和现代化方面有了很大的进展,许多企业优化了工艺流程,建立了高效率、低成本的洁净钢生产体系,提高了钢的冶金质量。此外,控制轧制和控制冷却技术已广泛应用,以强化冷却技术为特征的新一代控冷技术有了较快的发展和应用。我国近年兴建的中厚钢板厂已引进和自主开发了一些具有国际先进水平的轧后控冷系统,可以生产出高强度并具有良好的韧性的中厚钢板,提高了众多品种的低合金钢和微合金钢的使用性能,提高了产品的规格。

建筑、机械、汽车等领域是推动钢材需求的主要部门。为节约资源,国家积极引导和促进高效钢材的应用,提倡在建筑领域使用 400MPa 及以上高强螺纹钢取代 335MPa 螺纹钢。在新修订的国家标准中,取消了 335MPa 级的螺纹钢牌号。2007 年我国成立了汽车轻量化技术创新战略联盟,努力发展高强汽车用钢以实现商用汽车减重 300kg 的目标。2006~2017 年,我国陆续制定了《汽车用高强度热连轧钢板及钢带》系列国家标准,包括 7 个部分;还制定了《汽车用高强度冷连轧钢板及钢带》系列国家标准,包括 11 个部分,其中包括双相钢、相变诱导塑性钢、复相钢、液压成形用钢、淬火配分钢、马氏体钢、孪晶诱导塑性钢等,并已成功开发出 1200MPa、1500MPa 高强钢,为汽车轻量化提供了支持。

机械、汽车、航空工业的发展促进了机械制造用钢(包括弹簧钢和轴承钢)的发展。新修订的国家标准中,对这类钢的硫、磷和其他杂质元素的含量有了更为严格的要求,对低倍组织和非金属夹杂物的要求也更为严格。为满足航空发动机、直升机等高新技术领域的需求,国内外开发出高性能的轴承齿轮钢。用这些钢制成的零部件,有更好的耐磨性、韧性,以及更长的机械疲劳和接触疲劳寿命,因此,具有更高的使用寿命和安全性。

模具钢是工具钢中的一种。由于用模具生产零件具有材料利用率高、制品尺寸精度高等优点,能极大地提高生产率,在工具钢中,模具钢产量的比例日益增加。

因此,最近在修订国家标准《合金工具钢》(GB/T 1299—2000)时,将其名称更改为《工模具钢》(GB/T 1299—2014),新纳入的模具钢牌号有 46 个。

为节约战略资源镍,国内外加速了现代铁素体不锈钢的研究和发展,开发出一些新的铁素体不锈钢和超级铁素体不锈钢。我国高铬铁素体不锈钢产量份额(包括高铬马氏体不锈钢)在 20 世纪 80 年代仅占我国不锈钢产量的 10% 左右;近年已接近 20%。

耐热钢主要应用于大型火电机组和内燃机。在新修订的这种钢的国家标准或行业标准中,都加严了对成分、组织和质量的控制,并引进了国内外一些使用性能良好的钢种。高温合金的发展不仅推动了航空/航天发动机等国防尖端武器装备的技术进步,而且促进了交通运输、能源动力等国民经济相关产业的技术发展。金属材料领域中许多基础概念、新技术、新工艺都曾率先在高温合金研究领域中出现。进入 21 世纪以来,世界各国在高性能高温合金材料研究方面的步伐明显加快,需要对高温合金发展的新进展作一简单评述,主要包括:成分设计方法,组织结构等的定量表征,以及变形、强化与损伤过程的研究。

《钢的成分、组织与性能》一书的上、下册于 2013 年出版,距今已 5 年有余。在此期间,我国钢铁的生产技术不断进步,产品质量和性能持续提升,开发出一些高技术产品,更新了大部分国家标准并制定出一些新的标准。因此有必要对原书进行修订,再版发行。

在《钢的成分、组织与性能》第二版中更新了 58 个与钢种有关的国家标准或行业标准,还列入了 27 个新制定的与钢种有关的国家标准或行业标准。

为便于读者查阅,本书由原来的上、下册,更改为第二版的六个分册。其中,第一分册:合金钢基础,包括原书的第 1 章至第 4 章,第二分册:非合金钢、低合金钢和微合金钢,以原书的第 5 章为主干,第三分册:合金结构钢,包括原书的第 6 章和第 7 章,第四分册:工模具钢,以原书的第 8 章为主干,第五分册:不锈钢,以原书的第 9 章为主干,第六分册:耐热钢与高温合金,以原书的第 10 章为主干。

由于编著者学识有限,书中难免存在不妥和疏漏之处,尚祈读者不吝指正。

崔 崑

2018 年 9 月

第一版前言

人类现代文明与钢材的大量生产和使用密不可分。高新技术在钢铁工业上的应用使钢铁工业成为世界上最高产、最高效和技术最先进的工业之一,因而钢材价格也比较低。钢材具有良好的综合性能,是世界上最为常见的多用途制造材料。钢材制成的产品服役报废后,绝大部分可以回收利用,具有良好的循环再生能力。环保技术与钢铁生产工艺的结合,使得钢铁生产中空气排尘与污泥外排正在减少,产生的固体废弃物已近全部回收利用,因此钢铁材料是与环境协调、友好的材料。与其他基础材料相比,钢铁材料,特别是作为基础结构材料,在 21 世纪仍将占据主导地位。

近年来国内陆续出版了不少有关各类专用钢的书籍,也出版了一些有关钢铁材料工程的大型工具书。作者撰写本书的目的是想在一部作品中对工程上常用的钢类(不包括电工用钢)作较全面的介绍,着重阐明合金元素在钢中的作用,钢的成分与其热处理特点、组织、性能之间的关系及其工程应用。

2005 年,国家标准化管理委员会召开了全国标准化工作会议,要求加大采用国际标准和国外先进标准的力度,进一步促进提高我国产品、企业和产业的国际竞争力。之后有关部门加快了钢标准的修订和制定工作,我国国家标准与国际标准一致性水平大幅提升,我国钢标准体系更加科学、技术更加先进、市场更加适应、贸易更加便利。本书尽量采用最新制定的国家标准和行业标准,对国内常引进的国外钢号和各类材料的发展方向亦作了适当的介绍。

本书重视钢种的热处理工艺、性能和应用,特别是国家标准中列入的钢号,使从事钢铁材料工程的科技人员能依据部件或构件的服役条件合理选用钢材。

全书共 10 章。第 1 章简要介绍钢的生产过程及其对钢的冶金质量的影响。自 20 世纪中叶以来,世界钢铁生产工业装备技术快速发展,普遍采用了炉外精炼、连铸等新技术。1978 年我国钢铁工业进入了稳定快速发展时期。近年通过大量引进国外先进的工业设备和技术创新,我国一些大中型钢铁企业的装备和生产工艺已进入世界钢铁生产企业的先进行列,大大促进了我国钢质量的提高和新钢种的开发。第 2 章介绍常用的铁基二元相图与钢的相组成,这是各类钢的成分设计基础。第 3 章介绍合金元素对钢中相变的影响,主要分析钢中加入合金元素后对各种热处理相变所产生的影响,以及各类组织的特征和性能,对各种相变的不同理论不作过多的分析,因为这方面已有许多专著。第 4 章介绍合金元素对钢的性能的影响,这些性能包括力学性能(强度、塑性、韧性、硬度、疲劳和磨损)、钢的淬透

性、热变形成形性(控制轧制和控制冷却、锻造性能)、冷变形成形性(拉伸、胀形、弯曲)、焊接性、切削加工性。对于钢的热处理性能及表面处理,除淬透性外,未专门作介绍,同样因为这方面已有许多专著和大型手册。第5~10章为各大类钢的介绍,在各章中又将各大类钢分为若干小类。钢的分类方法有多种:按化学成分、按质量等级、按组织、按用途等。本书的分类不拘一格,第5章大体上是按化学成分分类,后面各章是按用途分类,而且也不是很严格。例如,第5章中在论述TRIP钢时,既有低合金钢又有合金钢,这是为了论述的系统性。

本书第1~9章由崔崑撰写,并经华中科技大学谢长生教授和张同俊教授审阅,第10章由谢长生教授撰写,经崔崑审阅。全书最后由崔崑统一定稿。

本书对钢材领域的科学研究人员、材料科学专业的师生、广大的钢材应用部门和材料选用者均有参考价值。读者如果具有物理冶金(金属学)和金属热处理的基本知识,阅读本书不会有困难。

在撰写本书过程中,引用了大量的专著、论文,以及标准中的图、表和数据,作者均注明出处,并尽可能引用原始文献,在此谨向文献作者、标准制定者和刊物的出版者表示诚挚的感谢!

本书的撰写得到华中科技大学材料科学与工程学院和华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室的支持和资助,作者表示衷心的感谢!

由于作者学识有限,书中必有不妥之处,恳请读者不吝指正。

崔 崑

目 录

第二版前言

第一版前言

第0章 绪论	1
参考文献	8
第1章 钢的生产与冶金质量	9
1.1 钢的冶炼	9
1.1.1 普通铁水预处理	9
1.1.2 氧气转炉炼钢	10
1.1.3 电弧炉炼钢	12
1.1.4 感应炉炼钢	14
1.1.5 炉外精炼	15
1.1.6 特种冶炼	20
1.2 钢的浇注	22
1.2.1 模铸钢锭	23
1.2.2 连续铸钢	26
1.3 钢的压力加工	30
1.3.1 轧制	30
1.3.2 锻造	31
1.3.3 薄板坯连铸连轧	38
1.3.4 冷轧薄钢板和钢带	39
1.4 钢的冶金质量和质量检验	41
1.4.1 偏析	42
1.4.2 低倍缺陷	44
1.4.3 高倍缺陷	52
1.4.4 断口检验	59
1.5 钢的分类	62
1.5.1 按化学成分分类	63
1.5.2 按主要质量等级和主要性能或使用特性的分类	64
1.5.3 其他分类方法	67
1.5.4 编号方法	69

参考文献	85
第2章 铁基二元相图与钢的相组成	87
2.1 钢中常见元素与铁的相图	87
2.1.1 铁碳合金相图	87
2.1.2 合金元素对铁同素异构转变的影响	88
2.1.3 二元铁合金相图	89
2.2 铁基固溶体和钢中的碳化物	101
2.2.1 铁基固溶体	101
2.2.2 钢中的碳化物	105
2.2.3 合金元素在铁素体和渗碳体间的分配	111
2.3 钢中的氮化物和硼化物	113
2.3.1 氮化物	113
2.3.2 硼化物	114
2.4 钢中的金属间化合物	115
2.4.1 σ 相	115
2.4.2 拉弗斯相	116
2.4.3 有序相	117
2.5 合金元素对铁碳合金状态图的影响	117
2.5.1 合金元素对钢的共析成分的影响	117
2.5.2 合金元素对钢临界点的影响	120
2.6 溶质原子在晶粒中的分布	122
2.6.1 溶质原子与晶体缺陷的交互作用	122
2.6.2 晶界的平衡偏聚	123
2.6.3 晶界的非平衡偏聚	125
参考文献	127
第3章 合金元素对钢中相变的影响	129
3.1 钢中的扩散问题	129
3.2 碳在铁中的热力学活度	133
3.3 合金元素对钢在加热时转变的影响	135
3.3.1 奥氏体的形成	135
3.3.2 合金元素对奥氏体形成及其成分不均匀性的影响	137
3.3.3 非平衡组织加热时奥氏体的形成	139
3.3.4 碳化物和氮化物溶解于奥氏体中的规律	142
3.3.5 合金元素对奥氏体晶粒长大的影响	144
3.3.6 热变形对奥氏体组织状态的影响	149

3.4 合金元素对珠光体转变的影响	151
3.4.1 珠光体转变	151
3.4.2 亚共析钢或过共析钢的珠光体转变	154
3.4.3 影响珠光体转变的动力学因素	158
3.4.4 钢中的相间析出	160
3.5 合金元素对马氏体转变的影响	162
3.5.1 马氏体转变的特点	162
3.5.2 马氏体的组织形态	165
3.5.3 影响马氏体组织形态的因素及奥氏体稳定化	167
3.5.4 马氏体的力学性能	171
3.6 合金元素对贝氏体转变的影响	174
3.6.1 贝氏体转变特点和转变机制	174
3.6.2 贝氏体的组织形态	175
3.6.3 合金元素对贝氏体转变动力学的影响	182
3.6.4 贝氏体的力学性能	184
3.7 合金元素对过冷奥氏体转变曲线的影响	187
3.8 合金元素对淬火钢回火转变的影响	196
3.8.1 碳钢的回火过程	196
3.8.2 合金元素对马氏体分解的影响	201
3.8.3 合金元素对残余奥氏体转变的影响	202
3.8.4 合金元素对铁素体组织的影响	204
3.8.5 合金元素对碳化物转变的影响	204
3.8.6 合金元素对回火稳定性的影响	210
3.8.7 回火脆性	212
3.9 固溶处理与时效	226
3.9.1 脱溶过程	226
3.9.2 脱溶相粒子的粗化	230
3.9.3 低碳钢的时效	232
参考文献	238
第4章 合金元素对钢的性能的影响	244
4.1 钢的强度	245
4.1.1 静拉伸试验	245
4.1.2 决定断裂类型的因素和力学状态图	252
4.1.3 在其他静加载下的力学性能	254
4.1.4 强化机理	262

4.2 钢的韧性	274
4.2.1 冲击试验	274
4.2.2 低温脆性和韧脆转变温度	277
4.2.3 几种接近实际服役条件的冲击试验	279
4.2.4 断裂韧度	284
4.2.5 影响断裂韧度的因素	288
4.2.6 断裂韧度与其他性能的关系	290
4.3 疲劳性能与磨损	292
4.3.1 疲劳极限	292
4.3.2 低周疲劳	294
4.3.3 疲劳裂纹的萌生与扩展	295
4.3.4 影响疲劳强度的因素	297
4.3.5 冲击疲劳	301
4.3.6 磨损	303
4.4 合金元素对钢的力学性能的影响	309
4.4.1 合金元素对铁素体力学性能的影响	310
4.4.2 合金元素对退火和正火结构钢力学性能的影响	318
4.4.3 合金元素对淬火和回火结构钢力学性能的影响	320
4.5 钢的淬透性	324
4.5.1 淬透性	324
4.5.2 淬透性的测定	326
4.5.3 合金元素对淬透性的影响	330
4.5.4 硼对淬透性的影响	333
4.6 热变形成形性	336
4.6.1 控制轧制与控制冷却	336
4.6.2 锻造性能	346
4.7 冷变形成形性	347
4.7.1 拉深成形性	348
4.7.2 胀形成形性	350
4.7.3 弯曲成形性	352
4.7.4 钢板冲压性能的试验方法	353
4.8 焊接性	355
4.8.1 焊接方法与焊接缺陷	355
4.8.2 影响钢材焊接性的因素	357
4.8.3 熔焊后钢的组织	360

4.8.4 钢的焊接性判据	363
4.8.5 焊接裂纹试验方法	364
4.9 切削加工性	366
4.9.1 评定切削加工性的标准	367
4.9.2 影响钢材切削性能的因素	368
4.9.3 钢中夹杂物热加工时的变形性能	370
4.9.4 易切削元素和易切削机理	371
参考文献	381

第 0 章 绪 论

人类最早发现和使用的铁是陨铁。陨铁的基本成分是 Fe, 一般含有大约 10% 的 Ni (含 Ni 4%~26%)^[1]。最早的陨铁器是约公元前 4000 年的铁珠和匕首 (含 Ni 7.5%~10.9%), 出土于尼罗河和幼发拉底河流域^[2]。1972 年, 在我国河北省藁城县台西村出土了一把商代铁刃青铜钺, 其年代在公元前 14 世纪前后。在青铜钺上嵌有铁刃, 该铁刃就是将陨铁经加热锻打后, 和钺体嵌锻在一起的^[3]。不过, 自然界存在的陨铁数量非常有限。

冶铁术的发源地可能在土耳其, 起源于公元前 1200 年前后, 当时铁器在土耳其被视为珍品, 用于制作匕首、剑柄等。公元前 1000 年前后, 土耳其铁工具已比青铜工具更为普遍, 铁制工具、农具、武器已普遍使用, 这标志着该地区已进入铁器时代。当时采用的是块炼铁法, 这是一种低温固态还原法, 用木柴或木炭做燃料和还原剂, 与铁矿石一起置于较小的炉体 (地炉和竖炉) 内, 在较低温度 (约 1000℃) 下使氧化铁还原成固态的海绵铁。这种铁的结构疏松, 需经过锤打挤出渣滓, 或者将渣铁混合物破碎后, 拣选出其中的铁粒再加热锻打, 才能得到质地较紧密但仍含较多夹杂物的纯铁料块。纯铁比较软, 可以通过渗碳而获得钢, 经过快冷或淬火而变硬。后来制铁技术传入了欧洲。公元前 8~前 7 世纪, 北非、欧洲相继进入铁器时代。一直到 14 世纪后期, 这些地区都以这种方法作为重要的炼铁方法。

公元前 800 年以后, 印度北方已能生产出少量铁制品, 其冶铁术是由伊朗向东传入的, 并得到发展^[1]。大约在公元前 350 年, 在制钢技术上, 发展出用坩埚冶炼高碳钢的方法。这种方法是把纯铁料块或不均质钢锻成小片, 再与木屑和树叶一起装入坩埚, 然后把坩埚封闭, 在敞开的炉子内强制通风加热数小时, 通过渗碳, 可以得到均质的高碳钢 (含碳 1%~1.6%), 被称为乌兹 (Wootz) 钢^[4]。大约在公元前 300 年, 在印度的德里, 用块炼铁锻焊出的铁柱, 其碳含量为 0.08%, 磷含量为 0.11%, 硫含量为 0.006%, 高 7.2m, 重达 6t^[1]。

公元 300 年前后, 在叙利亚的大马士革开始采用另外的方法制成用于制造刀剑用的钢, 被称为大马士革钢^[4]。将经过渗碳的薄钢带与熟铁薄带交互叠层, 然后整体焊接、扭转、锻造, 制成扁钢, 再反复对折、重叠、焊接, 直至把薄带锤锻成一体, 然后加工成刀剑, 经过淬火获得硬的刀刃, 这种剑被称为大马士革剑。由于原有材料碳含量不同, 其具有波纹状、条带状的外观。

* 本书所指含量, 如无特别说明, 均为质量分数。

我国在冶铁技术上走了不同的技术道路,可能是从当时高度先进的青铜技术发展而来^[1,5]。冶铁术在我国可能始于西周时期(公元前 1046~前 771 年)^[6],开始时也是使用块炼铁法。在春秋末期(公元前 500 年前后),我国冶铁技术有了很大突破,发明了生铁冶铸技术,使用较高大的炉体,用木炭做燃料和还原剂,在较高温度(约 1200℃)下使氧化铁还原并充分吸收碳,成为碳含量达 3%~4%的液态生铁,生铁的熔点为 1148℃。这是一种高温液态还原法。熔融的低硅生铁从炉中放出,直接浇铸成器或铸成锭块后供重熔使用。由于冶炼生铁时,炼炉可以半连续操作,生产效率和经济效益比块炼铁法要高得多。在生铁中,碳全部以 Fe_3C 的形式存在,所以生铁很脆,影响了对生铁的使用。

在战国时期(公元前 475~前 221 年)发明了热处理方法,使生铁坯件中的 Fe_3C 部分或全部分解为石墨,或者对生铁坯件进行脱碳热处理,使生铁变为韧性铸铁。从此,铸铁得以大量生产,广泛用于农业生产、军事等。到汉代已有大炼铁炉,容积达 50m³,积铁每块重 20t 以上。

在汉代(公元前 206~公元 220 年),先后发明了几种生铁炼钢的方法。一种是铸铁脱碳法,将碳含量为 3%~4%的低硅铸铁在氧化气氛中加热,在厚度不大的情况下,可以使铸铁脱碳成钢,这种钢称为铸铁脱碳钢;另一种是称为炒钢的生铁炼钢法,向熔化的生铁鼓风,同时进行搅拌促使生铁中的碳氧化,可以得到钢或纯铁,然后锻制成钢制品。炒钢技术始于西汉末年,到东汉已相当普及。当时还发明了利用液态生铁对熟铁进行扩散渗碳的炼钢方法,后世称为灌钢。这种方法解决了中高碳钢制备的难题。这些炼钢技术的发明对当时和以后的农业、经济、军事的发展起了重大作用,到明代中叶(1500 年前后),我国的炼钢技术一直处于世界领先水平。

15 世纪初期,炼铁高炉在欧洲迅速发展,主要特点是加强鼓风、加大炉身、增大燃料比。17 世纪初,北欧和西欧开始用生铁炒炼熟铁。1709 年用焦炭代替木炭炼铁成功,1857 年发明了蓄热式热风炉后,风温急剧升高,强化了高炉冶炼过程,使铁的产量迅速增长。

1742 年英国人洪兹曼(B. Huntsman)发明了一种可以熔炼液体钢的方法——坩埚法,该方法是将切成小块的渗碳铁料装入石墨和黏土制成的坩埚内,再将坩埚置于反射炉中,火焰加热熔化炉料,之后将熔化的炉料铸成钢锭。坩埚法产量小,主要生产一些作为工具使用的高碳钢^[4,7]。

18 世纪中叶在欧洲开始的工业革命促进了现代炼钢技术的发展。1856 年英国人贝塞麦(H. Bessemer)发明了酸性底吹转炉炼钢法,首次解决了大规模生产液态钢的问题,标志着现代炼钢法的开始,这种冶炼方法也称为贝塞麦法。贝塞麦法采用酸性炉衬,炉渣为酸性,不能脱除磷和硫。1856 年,英国人马希特(R. F. Mushet)研究了加入锰铁脱氧的方法,消除了硫含量高带来的热脆,并防止浇注后

凝固的钢锭产生蜂窝气泡,使钢锭能顺利地进行热加工,保证了钢质。西欧许多铁矿为高磷铁矿,1879年英国人托马斯(S. G. Thomas)发明了碱性底吹转炉炼钢法,解决了酸性转炉不能冶炼高磷生铁的问题。1856年英籍德国人西门子(W. Siemens)取得蓄热法专利。1864年法国人马丁(P. E. Martin)发明了平炉炼钢法(Siemens-Martin法)。最早的平炉也用酸性炉衬,同样不能去除原料中的磷和硫。在托马斯发明碱性法之后,平炉也改用碱性炉衬。碱性平炉炼钢法能适应各种原料配比(从100%生铁到100%废钢),所炼的钢品种多且质量优于空气底吹转炉钢,因而迅速成为世界上最主要的炼钢方法。1899年法国人埃鲁(P. L. Héroult)发明了电弧炉炼钢法,这种方法主要作为合金钢和特殊钢的生产方法。1927年诺思拉普(J. K. Northrop)发明了高频感应炉炼钢,成为高合金钢生产的普遍方法,并使真空冶炼成为可能。

19世纪中叶起,高炉炼铁发展速度加快,新技术不断涌现,如采用精料、高炉向大型化和自动化方向发展、采用喷吹燃料技术等。

现代炼钢技术的进步,使钢的产量迅速增加,生产成本显著降低。1900年世界钢产量已达到2850万t,1950年世界钢产量增加到2.1亿t。钢的应用遍及工农业和国防的各个部门,在国民经济和社会生活中起着重要的作用。

人们对钢的生产和使用,在很长的时间内,限于不同碳含量的碳钢。直到1820年,人们才了解熟铁、钢和生铁的差异主要是碳含量的不同。英国的物理学家法拉第(Faraday)同时也是一位冶金学家,他在1820~1822年研究了钢中加入镍、铬、铜等合金元素(含量到10%),以及加入一些贵金属对钢的某些性能的影响,是合金钢研究的先驱^[8]。

现代炼钢技术的发展,促进了机械制造和机械加工工业的大发展。原来使用的碳素工具钢刀具的车削速率比较低,刀具受热温度不能超过200℃。在这种需求下,马希特在1868年发明出高钨自淬工具钢,当时称之为“R. Mushet 特殊钢”(2%C、7%W、2.5%Mn),这是一种实用的高合金工具钢。1900年美国人泰勒(Taylor)和怀特(White)提出了成分为1.85%C、3.80%Cr、8.00%W的钢,并以用该钢制成的刀具成功地进行了高速切削试验,标志着高速钢的诞生。1903年他们又将钢的成分调整为0.70%C、14%W、4%Cr,这是近代高速钢的原型。1910年,具有18%W、4%Cr、1%V成分的高速钢问世。1920年制造出钴高速钢。截至1920年,主要类别的工具钢,包括冷作模具钢和热作模具钢大都已生产出来^[4]。

1882年,英国的冶金学家哈德菲尔德(R. A. Hadfield)曾分别研究了硅和锰对钢的影响。1884年,他发明了制作硅钢片的硅钢。他还试制成功高锰耐磨钢,成分为1.35%C、0.69%Si、12.76%Mn。该钢的特点是在淬火后不但不硬,反而有良好的韧性,可是在高应力接触磨损条件下却越磨越硬。之后,高锰耐磨钢得到了

日益广泛的应用,时至今日,其基本成分仍没有变化,这在合金钢史上是少见的。硅钢的优良电磁性能是在 1900 年被发现的,随之受到人们的重视,当时的成分是 0.20% C、2.5% Si^[8]。

随着社会经济的发展,各种工程结构,如桥梁、船舶等,需要使用大量的钢材,因而开始使用加工成形性比较好的低碳结构钢。由于结构物尺寸的增大,低碳结构钢的性能已远不能满足设计建造的要求,迫切需要提高钢的强度,减小截面,降低自重而又不降低承载能力,从而促进高强度低合金钢的开发。早期高强度低合金钢的设计是以抗拉强度为基础的,碳含量较高,在 0.30% 左右。人们企图通过加入少量合金元素提高钢的强度,合金元素都是单独采用的,如铬、镍、硅、锰等,每一种元素的含量相对较高,钢材通常以轧制状态供应使用。1870 年,美国在密西西比河上建造了一座桥梁,其拱形桁架的跨度为 158.5m,采用了含铬 1.5%~2.0% 的低合金钢。1895 年,俄国曾用 3.5% Ni 钢建造了“鹰”号驱逐舰,之后这类 3.5% Ni 钢还用于建造大跨度桥梁。20 世纪 20 年代以后,焊接技术广泛应用于制造金属结构,这给高强度低合金钢的发展带来深远的影响,焊接性能成为评价这类钢的重要性能指标。因此,降低碳含量,采用少量多元素合金化是发展焊接性能好的高强度低合金钢的必然要求。由于这类钢的用途越来越广,用量越来越大,钢种的经济性也必须予以考虑。第二次世界大战期间,发生了许多起全焊接结构的船舶断裂的事故,这种破坏往往是脆性的。经过研究认为,这种破坏是由于船舶结构用钢的缺口敏感性引起的。之后,研究开发了一些缺口韧性更好的材料,出现了一些经过调质处理的高强度低合金钢,如美国的 HY-80,苏联的 AK-25 等。20 世纪 60 年代以后,一些重要的钢生产国均致力于微合金钢的开发和生产工艺的革新,并取得重要进展。

合金结构钢是合金钢中用量大、用途广、对机械制造工业极为重要的一类。19 世纪末首先开始了对镍钢的研究。英国和法国的一些钢厂开始生产镍含量低于 7% 的合金结构钢。1889 年, Riley 在英国钢铁学会报告了他对镍钢力学性能的系统研究,并指出镍钢的军工意义。他的预言很快就得到证实,镍钢装甲板首先在法国和德国使用,继而开发出具有高淬透性的中碳镍铬钢。第二次世界大战期间,合金钢的需求量迅速增加,由于合金元素的短缺,交战国双方都不得不采取节约措施,减少镍钢及镍铬钢的产量,开发出镍铬钼钢、铬钼钢、铬锰钢等较经济的钢种。随着合金结构钢的出现和发展,热处理工艺也有很大改进,气相表面渗碳(1892 年)及表面淬火(1890 年)方法相继研发成功。

20 世纪初,法国的吉耶(L. B. Guillet)于 1904~1906 年对高铬马氏体及铁素体钢和镍铬奥氏体钢进行了系统的研究。蒙纳尔茨(P. Monnartz)于 1908~1911 年在德国系统地研究了铬钢的耐蚀性,提出了不锈性与钝化理论的许多观点。上述两位学者的试验研究为不锈钢的发展奠定了理论基础。

1913年布里尔利(H. Brearley)在英国开发出13Cr系马氏体不锈钢。1911~1914年丹齐曾(C. Dantsizen)在美国开发了铁素体不锈钢。镍铬奥氏体不锈钢主要是德国克虏伯公司的毛雷尔(E. Maurer)和施特劳斯(B. Strauss)在1912~1930年陆续发展出来并加以完善的。1930年左右在法国的Unieux实验室发现奥氏体不锈钢中含有铁素体时,钢的耐晶间腐蚀性能会得到明显改善,从而开发了 $\gamma+\alpha$ 双相不锈钢。1946年美国的史密斯埃塔尔(R. Smithetal)开发出沉淀硬化型不锈钢。不锈钢的主要钢类已基本齐全。

耐热钢的发展与能源、动力机械的发展有密切的关系。13Cr系不锈钢由于具有比较好的高温强度和抗氧化性,可以用于制作内燃机的排气阀、汽轮机的叶片和转子。随着汽轮机特别是喷气技术的发展,耐热钢的使用温度不断增高,人们发现奥氏体钢的高温强度比铁素体钢高,从而发展出一系列镍铬奥氏体耐热钢。到了20世纪30年代前后,一些学者系统地研究了各种合金元素对钢的高温强度的影响。在20世纪30~40年代开发出Mo钢、Cr-Mo钢、Cr-Mo-V钢等低合金耐热钢,主要用于锅炉、蒸汽轮机、化学工业装置等方面。同时,在原有镍铬奥氏体的基础上加钼、钨、铌等元素提高其耐热性,用做航空喷气发动机的涡轮叶片材料。后来一方面增加镍含量,一方面添加铝、钛以生成微小的 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ 粒子产生沉淀强化,逐渐发展成铁基高温合金。再进一步的发展就是用镍取代铁作为基体而成为镍基合金。1939年英国Mond镍公司首先研制出镍基合金Nimonic 75,1942年Nimonic 80成功地被用做涡轮喷气发动机的叶片材料,是最早以 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ 强化的镍基合金。

在此期间,由于物理冶金学(金属学)的进展,以及新的分析和测试技术的不断出现和发展,使人们对金属与合金的组成和结构,以及其与性能之间的内在联系和在各种条件下的变化规律有了基本的了解。人们可以根据服役条件的要求,开发出能满足特定性能要求的新的合金钢钢种。到20世纪中叶,主要类别的合金钢已建立了较完整的体系,对合金元素在钢中的作用已进行了比较系统的研究,对于合金元素对钢中相变、组织结构和性能的影响已有了比较深入的了解。钢铁材料的发展由凭借经验转为依靠科学。

20世纪中叶,世界钢铁工业进入新的发展时期,钢铁生产工艺装备技术得到了快速发展,2000年世界钢产量增至8.43亿t。

1952年和1953年在奥地利的林茨(Linz)和多纳维茨(Donawitz)先后建成氧气顶吹转炉,因而亦称LD转炉。由于它的生产率高、能量和耐火材料消耗低,在世界范围内迅速推广,取代空气转炉法和平炉炼钢法,成为现代炼钢的主要方法。之后,氧气底吹转炉炼钢方法和氧气顶底复吹转炉炼钢方法亦相继开发成功。目前世界上较大容量的炼钢转炉多数采用氧气顶底复吹转炉炼钢工艺。20世纪90年代,世界氧气转炉钢的年产量已超过钢总产量的50%^[7]。