

电弧炼钢炉实用工程技术

徐立军 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

电弧炼钢炉实用工程技术

徐立军 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2013

内 容 简 介

本书介绍了电弧炼钢炉的基本组成、辅助工艺装备和公辅设施,对电弧炼钢炉作了比较详细的分类和对比;通过对电弧炉炼钢操作工艺常用术语和传统的三期操作工艺的解析,浅显地讲解了电弧炉炼钢生产的冶金原理和基本工艺技术;概述了电弧炉工程建设的工作程序、电弧炉炼钢车间工艺设计及初步设计的内容和要求;并收录了一些与电弧炉工程相关的常用计算公式、工具图表、单位换算和电弧炉工程图纸资料。

本书可以作为电弧炉工程建设的参考资料,供从事电弧炉工程建设和技术改造的工程技术人员以及企业决策者们参考阅读,也可以作为电弧炉炼钢生产企业职工培训教材的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电弧炼钢炉实用工程技术/徐立军编著. —北京:冶金工业出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-5024-6092-1

I. ①电… II. ①徐… III. ①电弧炼钢炉—职业培训—教材
IV. ①TF748. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 309133 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6092-1

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2013 年 2 月第 1 版, 2013 年 2 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 14 印张; 7 插页; 399 千字; 212 页

65.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序

近几十年来，世界电弧炉炼钢生产技术发展很快，目前世界电炉钢的产量已占总钢产量的1/3左右。在美国和西欧一些老牌工业化国家，电炉钢产量约占其钢产量的一半。电炉钢的生产技术和工艺装备等各方面也得到了迅速的发展。

我国电炉炼钢生产技术和工艺装备近年来同样也得到了较快的发展，但由于我国工业化比较晚，钢的积累量较低，能提供的废钢少，受废钢原料数量的限制，我国电炉钢在钢产量中占的比例较低。

在科学发展观和可持续发展战略的指导下，以废钢为主要原料的电弧炉炼钢流程与以铁矿石为原料的高炉—转炉炼钢流程相比，具有能耗低、环境污染少、建设费用低、建设周期短、劳动生产率高、生产灵活性好等一系列的特点。自20世纪末以来，我国钢产量一直稳居世界第一位，未来钢铁积累量和废钢原料供应量也会以极快的速度增加，电弧炉炼钢这一钢铁资源循环利用的再生工艺流程必将在我国得到更为迅速的发展，并在钢铁生产中占据重要位置，在生产技术、科学研究和工厂建设、工艺装备等方面迅速赶超世界先进水平。

本书作者徐立军长期从事有关电弧炉炼钢工艺装备、生产技术的科研技术工作和电弧炉炼钢工程的设计和建设工作的经验，对国内外电炉炼钢工业的生产技术、科学发展和工厂设计建设等方面的技术成就，进行了认真细致的分析和总结。

本书系统地介绍了国内外电弧炉炼钢工业现代生产技术和工艺装备的发展状况、电炉炼钢工厂设计和建设工作的经验，对可能出现的问题进行了分析并提出了建议。对于从事电弧炉炼钢生产技术工作和电炉钢厂工程设计及建设工作的科技人员和企业决策人士有一定的参考价值。

期望《电弧炼钢炉实用工程技术》一书的出版，能对我国迅速发展的电弧炉炼钢工业发挥积极作用。

徐立军

2012年8月

前 言

电弧炼钢炉工程技术涵盖了冶金工艺、机械传动、电力供应、液压控制、测量计控、给排水工程及环境保护等诸多专业技术领域。作者在多年的工作实践中，深切体会到电弧炉工程是一个系统工程，每一个电弧炉炼钢工程项目的竣工投产，都是这些相关专业技术的综合体现。纵观电弧炉炼钢技术发展的轨迹，充分印证了炼钢工艺技术与工程装备技术是密不可分的，应该相互促进、共同发展。

本书以介绍电弧炉炼钢设备及工程技术为主，并从非炼钢专业的企业经营管理者、工程技术人员和现场操作人员应通晓的基础知识这个角度，讲述了电弧炉炼钢的基础知识、工程建设特点和电弧炉工程项目建设的一般工作程序、方法及要求。

希望能够通过本书的介绍，使正准备要涉足电弧炉或刚刚接触电弧炉的朋友们，对电弧炉炼钢的基本原理、设备选型原则、辅助工艺装备的特点以及配套公辅设施的作用和要求等有一个概略的了解；能够初步掌握电弧炉炼钢车间设计和工程初步设计的基本方法和内容要求；对在规划建设或改造电弧炉生产线时，解决所遇到的问题能有所帮助。

本书共分为8章：第1章综合评述了电弧炉炼钢的起源、主要特点、可以生产的钢种，并讲述了钢的标准与牌号，以及合金对钢性能的影响；第2、3章讲述了电弧炼钢炉的分类、设备组成；第4、5章讲述了电弧炉炼钢的辅助工艺装备及公辅设施；第6、7章通过讲解电弧炉炼钢常用工艺操作术语和电弧炉炼钢的三期操作工艺，重点讲述了电弧炉炼钢的基础知识和基本工艺技术，并对目前几种常见的电弧炉与其他冶炼设备的组合操作工艺进行了介绍；第8章主要讲述的是电弧炉工程项目建设的前期工作，着重讲述了工作程序要求、条件、选型配置原则、电弧炉炼钢车间的工艺设计和工程初步设计的内容及范围。在本书的附录中还收集了部分常用计量单位、物理量的表示方法和换算关系，工程材料的物理性能以及实用速查表和部分工程图实例，以供读者参考。

罗啟洸与徐立军共同完成本书的全部插图，并完成了全书的文字整理工作；翟静芳、夏栗平承担了本书审校工作；梁慧媛对本书的电气部

分进行了审校并编写了 5.2 节。感谢大家为本书出版所付出的辛勤工作。

在本书的编写过程中得到了我国工模具钢专家、原首钢特殊钢公司总工程师徐进先生的具体指导和热情帮助，在此表示由衷的感谢！

本书的出版得到了中国钢研科技集团刘浏总工程师的大力支持，在此表示感谢。

马绍弥先生对本书编著的全过程都给予了无私的支持和帮助，在此表示感谢。

感谢中国钢研科技集团先进钢铁流程及材料国家重点实验室齐渊洪常务副主任为本书提供图片资料。

在此还要特别感谢首钢特殊钢公司、临安冶金成套设备公司、中冶迈克公司等单位为本书提供有关资料和数据，对上述单位领导的支持表示诚挚的感谢。

鉴于作者水平有限，如有不妥和疏漏之处，望读者批评指正。

作 者

2012 年 8 月

目 录

1 电弧炉炼钢综述	1
1.1 引言	1
1.2 电弧炼钢炉发展简史	1
1.3 电弧炼钢炉可以生产的钢种	2
1.4 钢的标准、牌号与分类	2
1.4.1 标准	2
1.4.2 钢号	2
1.4.3 钢的分类	3
1.5 合金元素对钢性能的影响与作用	3
1.6 电弧炉炼钢的主要特点和发展趋势	6
1.7 电弧炉的主要技术参数	7
1.8 电弧炉生产的主要技术经济指标	7
2 电弧炼钢炉的分类比较	9
2.1 按冶炼能力的大小分类	9
2.2 按不同机构运行方式、设备基础位置、传动和结构类型分类	9
2.3 按不同供电形式和供电能力分类	11
2.4 按不同工艺操作方式分类	11
2.5 三相交流电弧炉与单电极直流电弧炉的比较	12
2.5.1 交流电弧炉与直流电弧炉的发展史概述	12
2.5.2 交流电弧炉与直流电弧炉的结构特点及性能比较	13
2.5.3 交流电弧炉与直流电弧炉设备工程量的比较	16
3 电弧炼钢炉的基本组成	18
3.1 炉体结构	18
3.2 炉盖结构	20
3.2.1 具有独立电极水圈型的全砖体炉盖	20
3.2.2 中心水冷三角区型的半砖体炉盖	22
3.2.3 中心区圆形打结小炉盖体的管式水冷炉盖	23
3.3 倾动机构	24
3.3.1 托轮式减速机传动的倾动机构	24

3.3.2	液压缸传动槽式出钢的倾动机构	24
3.3.3	液压缸传动偏心底出钢的倾动机构	25
3.3.4	倾动机构的参数设计	26
3.4	炉盖升降和开启机构	29
3.5	电极升降机构	34
3.6	电极卡紧机构	36
3.7	炉门机构	39
3.8	电弧炉主供电系统	40
3.8.1	电弧炉变压器	41
3.8.2	电抗器	45
3.8.3	高压断路器	45
3.8.4	隔离开关	46
3.8.5	检测计量装置	47
3.8.6	直流电弧炉主供电系统与交流电弧炉主供电系统的区别	47
3.9	短网系统	48
3.9.1	短网系统的组成	48
3.9.2	短网系统中的主要部件介绍	49
3.9.3	短网系统的总体设计要求和工程注意事项	58
3.10	电极自动调节系统	58
3.10.1	可控硅-电磁滑差离合器调节系统	59
3.10.2	可控硅-小惯量直流电机调节系统	60
3.10.3	可控硅-三相交流双(绕组)电机调节系统	61
3.10.4	PLC-交流变频电机调节系统	61
3.10.5	电液伺服阀调节系统	62
3.10.6	PLC-比例阀调节系统	64
3.11	液压系统	66
3.12	水冷系统	69
3.13	除尘系统	70
3.13.1	电弧炉除尘系统概述	70
3.13.2	电弧炉除尘系统的组成	72
3.13.3	我国首次从国外引进的电弧炉除尘系统简介	75
3.13.4	电弧炉除尘技术的发展方向	77
4	电弧炉炼钢辅助工艺装备	78
4.1	电弧炉辅助工艺装备概述	78
4.2	常用电弧炉辅助工艺装备简介	78
4.2.1	料罐	78
4.2.2	钢水包	80
4.2.3	氧枪	83

4.2.4 喂丝机	87
4.2.5 加料装置	87
4.2.6 底吹装置	90
4.2.7 测温装置	92
4.2.8 补炉装置	93
4.2.9 燃烧烘烤装置	93
4.2.10 风动送样装置	95
4.2.11 浇钢设备	98
5 电弧炉工程的公辅设施	109
5.1 电弧炉公辅设施的概述	109
5.2 变电站	109
5.2.1 变电站为电弧炉炼钢车间供电的基本要求	109
5.2.2 公共供电点的确定	109
5.2.3 谐波治理	111
5.2.4 谐波治理实例	112
5.3 氧气站	114
5.4 空压机站	115
5.5 燃料站	116
5.6 炉前化验室及质量检验设施	117
5.7 循环水处理站	118
5.8 废钢原料处理场	119
5.9 钢渣处理场	121
5.10 工业炉窑	122
5.11 机修车间	122
5.12 原辅料库	122
5.13 电弧炉炼钢车间的起重运输设备	122
6 电弧炉炼钢操作工艺简介	123
6.1 电弧炉炼钢操作工艺常用术语	123
6.1.1 原料准备	123
6.1.2 装料方式	124
6.1.3 操作法	124
6.1.4 炼钢炉渣	125
6.1.5 搅拌	126
6.1.6 沸腾与镇静	126
6.1.7 脱氧	127
6.1.8 取样	127
6.1.9 测温	128

6.1.10 成分	129
6.2 传统的三期操作工艺	131
6.2.1 简介	131
6.2.2 工艺流程	131
6.2.3 熔化期	131
6.2.4 氧化期	135
6.2.5 还原期	139
6.3 钢水的浇铸	144
6.3.1 钢水的结晶凝固过程	144
6.3.2 钢水的浇铸形式	145
6.3.3 铸温、铸速的确定	145
6.4 钢锭的缓冷与热处理(退火或高温回火)	148
6.4.1 钢锭的缓冷与热处理的目的	148
6.4.2 钢锭的缓冷与热处理的工艺制度	148
6.4.3 钢锭的缓冷	149
6.4.4 钢锭的退火	149
6.5 钢锭的精整	152
6.5.1 钢锭精整的目的	152
6.5.2 钢锭精整的方法	152
6.6 电弧炉炼钢操作要点	152
6.7 现代电弧炉炼钢操作工艺技术的改进	152
7 电弧炼钢炉与其他冶炼设备的组合生产工艺	154
7.1 前期熔炼设备组合	155
7.1.1 中频感应炉与电弧炉的熔炼组合	155
7.1.2 高炉与电弧炉的熔炼组合	155
7.1.3 直接还原铁生产设备与电弧炉的熔炼组合	155
7.2 后期精炼设备组合	158
7.2.1 EBT 电弧炉与 LF 钢包精炼炉的组合操作	158
7.2.2 电弧炉与 AOD 氩-氧吹炼炉的组合操作	160
7.2.3 电弧炉与 VD 真空脱气设备的组合操作	163
7.2.4 电弧炉与 VOD 真空精炼炉的组合操作	165
7.2.5 电弧炉与电渣重熔精炼炉的组合操作	167
7.2.6 几种常用钢包精炼方法简介	168
7.3 一种特殊的设备组合——康斯迪电弧炉	169
7.3.1 康斯迪电弧炉简介	169
7.3.2 康斯迪电弧炉工艺特点	169
7.3.3 工艺流程	170
7.3.4 设备设计特点	170

7.3.5 康斯迪电弧炉对比其他电弧炉的明显优势	171
7.3.6 康斯迪电弧炉工程建设注意事项	172
8 电弧炼钢炉工程建设的前期工作	173
8.1 电弧炼钢炉工程建设项目的基本工作程序	173
8.2 新建电弧炼钢炉工程项目的前提条件	173
8.3 电弧炉炼钢车间的工艺设计	174
8.3.1 炼钢区域的平面设计	174
8.3.2 电弧炉炼钢区域的立面设计	177
8.3.3 钢水浇铸区域的设计	180
8.3.4 其他公辅区域的设计	187
8.4 电弧炉炼钢车间初步设计的主要内容	188
8.4.1 工程概述	188
8.4.2 工程设计特点描述	189
8.4.3 生产计划	189
8.4.4 车间组成、工艺布置、生产操作流程说明及金属平衡	189
8.4.5 主要设备的选择及配置	189
8.4.6 环境保护及综合利用	190
8.4.7 安全生产	190
8.4.8 电弧炉炼钢工程辅助设施的建设	190
8.4.9 动力系统设施概况	190
8.4.10 总图运输	190
8.4.11 土建及采暖通风	190
8.4.12 经济分析及主要经济指标	190
8.4.13 工程概算	192
参考文献	194
附 录	195
附录1 工程中常用计量单位的表示方法及换算关系	195
附录2 工程常用物理量及单位	198
附录3 工程常用材料的物理性能	201
附录4 工程常用管径与流速、流量的参考对照	205
附录5 电弧炉投产前应进行的基本测试检验项目	206
附录6 炼钢专业常用英文缩略语简介	207
工程图例	211
工程图例简介	211

图例 1	70t 康斯迪电弧炉炼钢车间工艺布置图	211
图例 2	70t EBT 电弧炉立面总图	211
图例 3	70t 电弧炉液压系统图	211
图例 4	70t LF 钢包精炼炉立面总图	211
图例 5	30t EBT 电弧炉炉体结构图	211
图例 6	30t EBT 电弧炉短网施工布置图	212
图例 7	30t 电弧炉液压系统原理图	212
图例 8	20t 全液压电弧炉总图	212

1 电弧炉炼钢综述

1.1 引言

冶金工作者往往会探究“钢铁是怎样被人类开发出来的”这个问题。由于铁容易氧化，所以考古发掘中见不到远古的铁器，也因而对人类制造铁器无从了解，无法界定冶炼铁器的起始年代，更不知我们的先人最初是如何得到铁器的。

在中国广播电视出版社 2009 年版的赵恩语先生所著《我们早已忘记了的童年——华夏文明渊源要论》一书中论及：“制陶与冶金的关系，有点像用火与制陶。因为没有制陶过程的控制或积累的经验，是不可能产生作为原始冶金所用的耐高温的容器如坩埚之类，也就无法冶炼出金属来……”他根据传说和史籍的记载以及其后我国与同时代外国制作的铁器水平相比，认为中国至晚在 4000 ~ 7000 年前就应该能制铁器了。所以，应该认为铁器是在上古时代陶器技术日渐成熟的基础之上不经意间发展起来的。当初因铁易锈、易脆断且禁不起锤打加工制造，因此这种既没有使用价值而且外观又远不如真金和青铜的副产品，就被称之为“恶金”，而弃之于不顾；后来，由于有兵器和农具方面的需要，经多少代人的刻意钻研，才开发出来钢铁这个产品。

1.2 电弧炼钢炉发展简史

法国海洛尔特 (P. L. T. Héroult) 于 1888 ~ 1892 年利用电极的电弧高温，开发出煤的代替能源，发明了工业性直接冶炼的电弧炉。起初电弧炉只用于电石和铁合金的生产，到 1906 年才发展用来炼钢，并因而使废钢得以实现经济化、规模化的回收利用。电弧炉通过石墨电极的端部和炉料之间发生的电弧，将电能转换为热能进行熔化炉料并完成其后的高温冶金反应。由于它使用电能，便于调整炉内的气氛，因此可以冶炼包括含易氧化元素在内的各种类型的合金钢。随着电力工业的发展、工艺设备的不断改进以及冶炼技术的提高，电弧炉应用日趋广泛，生产能力与规模越来越大。20 世纪 30 年代电弧炉的最大容量为 100t，50 年代为 200t，70 年代初已有 400t 的电弧炉投入生产。

尤其是在近 50 年的时间里，电弧炼钢炉的技术性能逐步提高，生产成本明显下降，欧美发达国家电炉钢的比例已超过 50%。

现代电弧炉冶炼技术的发展随时代进步。20 世纪 60 ~ 70 年代主要是发展超高功率供电及相关技术，高功率电弧炉 (HP) 和超高功率电弧炉 (UHP) 是相对于一般的普通功率电弧炉 (RP) 而言的。它们主要是按每吨炉容量所配变压器容量的多少来区分，近年来有越来越高的趋势。这意味着单位时间内输入电弧炉的热能大幅度增加，使熔化时间显著缩短，从而提高生产能力，降低电极消耗，减少热损失，降低电能消耗，结果是使产能再提高的同时，成本也大幅度下降。

与超高功率电弧炉相配套的高压长弧操作、水冷炉壁、水冷炉盖、泡沫渣技术、使用

外热源助熔等已被广泛采用,钢包精炼及强化用氧也已被采用。20 世纪 80 年代,LF 及 EBT 技术的开发使电弧炉冶炼加炉外精炼的现代电弧炉炼钢流程基本成熟。值得注意的是,自此以后,人们关注的焦点已不再是用直流还是交流供电的方式,而是二次燃烧和烟气显热的利用,即废钢预热的问题。不同的废钢预热方式产生了不同类型的现代电弧炉,它们包括用料篮废钢预热的普通电弧炉、带托爪的烟道竖炉、双壳电弧炉和 Consteel 电弧炉等。

目前,电弧炉的设备和生产技术仍然在继续发展之中。

1.3 电弧炼钢炉可以生产的钢种

电弧炼钢炉的原料主要是固体的废钢并配加合金料、调整碳含量用的生铁等,也可以使用直接还原铁或配一部分热铁水,原料的选择范围广阔;因此,除一些超低碳品种钢,或者必须采用诸如真空处理等特殊手段的品种、特殊合金材料之外,大部分钢种几乎都可以冶炼。

1.4 钢的标准、牌号与分类

1.4.1 标准

各种钢的性能、成分、用途以及交货条件和热处理状态等各自不同,为了识别而被赋予特定的名称,称为牌号(也就是钢号)。

标准则是把成分、性能、用途等相类似的钢号按既定的原则归并分类,并以统一格式编排,集成系统。

没有钢号就无法建立标准系统;没有标准系统,生产、选用以及买或卖就没有依据。所以,世界各国都非常重视钢的分类和标准的制订。目前广泛应用的标准有国际标准化组织(ISO)标准、各国的国家标准以及一些知名品牌的企业标准。

通常标准的内容包括钢种的化学成分、主要力学性能、热处理规范及金属的组织结构、主要用途、交货条件等,仅将主要标准体系列举在表 1-1 中。

表 1-1 标准体系列举

国家或地区	标准体系	钢号示例(18-8 型不锈钢)	国家或地区	标准体系	钢号示例(18-8 型不锈钢)
中 国	GB	1Cr18Ni9	俄罗斯	ГОСТ	12X18H9
国际标准化组织	ISO	X10CrNiS18-9	瑞 典	SS	2337
法 国	NF	Z10CNT18.00	英 国	BS	302S25
德 国	DIN	X12Cr1NiTi18-8	美 国	AISI	S30200
日 本	JIS	SUS302	美 国	SAE	302
韩 国	KS	STS302	附:中国台湾地区	CNS	302

1.4.2 钢号

钢号的表示方法和标准密切相关,钢号不仅可区别钢材的具体品种,而且往往还可据以大致判断钢的特性,不同标准的钢号具体表示方法因标准的不同而各自有所规定,因此无法概括出一个通则来,读者有需要时,请查阅标准原件或相关的标准手册。

1.4.3 钢的分类

我国钢种的分类方法如表 1-2 所示。

表 1-2 钢的分类方法 (%)

钢的分类	举 例
按钢中所含化学成分含量分类	1. 碳素钢, 其中: 低碳钢: 碳含量 $\leq 0.25\%$; 中碳钢: 碳含量 $0.25\% \sim 0.60\%$; 高碳钢: 碳含量 $\geq 0.60\%$ 。 2. 合金钢, 其中: 低合金钢: 合金元素总含量 $\leq 5\%$; 中合金钢: 合金元素总含量 $5\% \sim 10\%$; 高合金钢: 合金元素的总含量 $\geq 10\%$
按脱氧程度分类	1. 镇静钢: 用锰铁、硅铁、铝进行完全脱氧, 钢中氧含量低, 因而浇铸时不会发生碳-氧间的沸腾反应, 故称镇静钢。一般合金钢和优质碳素结构钢都为镇静钢。 2. 沸腾钢: 沸腾钢在熔炼末期, 钢液仅用弱脱氧剂锰铁进行不完全脱氧, 钢液中保留相当数量的 FeO, 在浇铸时钢液在锭模内因 C 和 FeO 反应, 析出 CO 而发生沸腾, 故称沸腾钢。沸腾钢成本低、延展性好, 常用来制作低端结构用材或深冲用板材。 3. 半镇静钢: 脱氧程度介于沸腾钢和镇静钢之间, 目前生产量较少
按合金元素种类分类	碳素钢、硅钢、锰钢、铬钢、铬镍钢、硅锰钢、硼钢……
按品质分类	1. 普通钢: 硫含量 ≤ 0.05 , 磷含量 ≤ 0.045 ; 2. 优质钢: 硫含量 ≤ 0.035 , 磷含量 ≤ 0.035 ; 3. 高级优质钢 (钢号后加 “A”): 硫含量 ≤ 0.030 , 磷含量 ≤ 0.030
按专业用途分类	结构钢、工具钢、特殊性能用钢 (如: 轴承钢、不锈钢、弹簧钢、模具钢、高温合金钢、低温钢、焊条钢等)
按冶炼方法分类	电炉钢、平炉钢、转炉钢
按加工方法分类	热轧钢、冷轧钢、锻钢、铸钢、冷拔钢等
按金相组织分类	亚共析钢、共析钢、过共析钢、铁素体钢、奥氏体钢、珠光体钢、马氏体钢、贝氏体钢、莱氏体钢、双相钢等

注: 表中的含量均为质量分数。

1.5 合金元素对钢性能的影响与作用

由于钢的性能取决于其组织与状态, 而钢的组织是由其成分所决定的。因此要根据对不同牌号的各钢种的性能要求、元素的物理性质和化学性质对钢液进行成分设计, 并使用各种合金元素按设定的比例进行“合金化”, 以冶炼出合格的钢。由于纯元素价格昂贵, 所以通常加入钢中的合金元素都被制成铁合金, 现将一些主要的合金元素对钢材性能的影响, 列于表 1-3。

表 1-3 合金元素对钢材性能的主要影响

元素名称	对钢材性能的主要影响
C (碳)	钢中碳含量对于冶炼、轧制和热处理的温度制度均有极大影响。碳含量在 0.25% 以下的低碳钢塑性很好, 没有淬硬倾向, 焊接性也好。碳含量为 0.25% ~ 0.60% 的中碳钢综合性能良好 (即强韧性均好), 碳含量 $\geq 0.60\%$ 属高碳钢, 硬度高、塑性差。碳在轴承钢和工、模具钢中, 形成多种高硬度碳化物, 可提高钢的硬度和耐磨性
Si (硅)	硅在炼钢过程中是主要的还原剂和脱氧剂, 镇静钢一般含有 0.15% ~ 0.30% 的硅。在室温下钢中的硅能溶于铁素体, 对钢有一定的强化作用。如果钢中硅含量超过 0.50% ~ 0.60%, 可显著提高钢的弹性极限、屈服点和抗拉强度, 故可被用于弹簧钢。硅和钼、钨、铬等结合, 有提高抗腐蚀性和抗氧化的作用, 能用以制造耐热钢。硅含量 1% ~ 4% 的低碳钢, 具有极高的磁导率, 是电工硅钢片的原料。硅含量较高时, 易导致冷脆, 存在于中碳钢和高碳钢里回火时易产生石墨化
Mn (锰)	锰在碳素结构钢中的含量为 0.50% ~ 1.50%, 在优质碳素结构钢中为 0.20% ~ 1.20%。锰是主要脱氧、除硫元素。对于镇静钢来说, 锰可以提高硅和铝的脱氧能力, 钢中的锰形成的氧化物有部分可与硫结合而生成球形、高熔点的硫化锰, 它在高温下具有一定塑性, 从而可减轻硫所造成的热脆性, 在一定程度上可消除硫在钢中的有害影响。另一部分锰溶于铁素体引起固溶强化, 使钢在轧后冷却时得到比较细且强度较高的珠光体, 可提高钢热轧后的硬度和强度, 对断面收缩率 (Z) 和冲击韧性 (A_{KV}) 略有影响。锰是一种强烈扩大 γ 相区的元素, 可用于高锰奥氏体耐磨钢、高强度无磁钢、奥氏体不锈钢和耐磨钢
P (磷)	磷随原料进入钢中, 磷有极强的固溶强化作用, 能全部溶于铁素体中, 使钢的强度、硬度增加, 而显著降低其塑性和韧性。这种脆化现象在低温时更为严重, 称“冷脆”。特别是磷在结晶过程中, 由于容易产生晶内偏析, 使局部磷含量偏高, 致使冷脆转变温度升高, 危害更大。此外, 磷的偏析还使钢材在热轧后形成带状组织。在钢中要尽量降低磷的含量 (一般钢小于 0.045%, 优质钢则要求磷含量更低)。在一定条件下, 磷与铜的共同使用会提高低合金高强度钢的耐大气腐蚀性能
S (硫)	硫是随原料及燃料进入钢中的。在固态下, 钢中的硫以 FeS 的形态存在, 其溶解度极小, 由于 FeS 的塑性差, 使含硫较高的钢脆性大。尤其是 FeS 与 Fe 可形成低熔点的共晶体分布在奥氏体的晶界上, 当钢加热到 1200℃ 进行压力加工时, 由于晶界处共晶体熔化, 晶粒间结合被破坏, 使钢材在加工过程中沿晶界开裂, 这种现象称为“热脆”。为了消除硫的有害作用, 要严格限制硫的含量, 并适当增加钢中锰含量。通常情况下硫被认为是有害成分, 但硫含量较多的钢, 因为能形成较多的 MnS, 在切削加工中, 能起润滑和断屑作用, 可改善钢的切削加工性, 所以是易切削钢的常用添加剂
Cr (铬)	铬是贵金属, 它有固溶强化的作用, 使钢具有热硬性, 能提高高温性能、抗氧化性和耐腐蚀性, 是高温合金及超硬高速钢的重要合金元素。 在结构钢和工具钢中, 铬能显著提高强度、硬度和耐磨性, 但会降低塑性和韧性。铬能提高钢的抗氧化性和耐腐蚀性, 因而也是不锈钢、耐热钢的重要合金元素
Ni (镍)	镍对酸碱有较高的耐腐蚀能力, 在高温下有防锈和耐热能力, 但价格昂贵, 是我国的稀缺资源, 常在高级合金钢中与铬、钼联合使用, 为热强钢及不锈钢以及高温合金的主要合金元素。镍能提高钢的强度并保持良好的塑性和韧性
Cu (铜)	铜含量高时, 对热变形加工不利, 如超过 0.3%, 在热变形加工时会导致高温铜脆现象, 含量高于 0.75% 时, 经固溶处理和时效后可产生时效强化作用。在低碳合金钢中, 特别是铜与磷同时存在, 可提高钢的抗大气腐蚀性, 2% ~ 3% 的铜在不锈钢中可提高对硫酸、磷酸及盐酸的抗腐蚀能力

续表 1-3

元素名称	对钢材性能的主要影响
W (钨)	钨熔点高, 密度大, 是中国储量丰富的合金。钨与碳形成碳化钨有很高的硬度和耐磨性。在工具钢里加钨, 可显著提高红硬性和热强性, 适宜制造工、模具钢及硬质合金等
Mo (钼)	钼能使钢的晶粒细化, 提高淬透性和热强性能, 在高温时保持足够的强度和抗蠕变能力。结构钢中加入钼, 能提高力学性能, 还可以抑制合金钢由于回火而引起的脆性, 在工具钢中可提高红硬性、耐磨性
V (钒)	钒固溶于铁素体中产生极强的固溶强化作用, 可以细化晶粒; 钒固溶于奥氏体中可提高钢的淬透性, 提高低温冲击韧性。但化合状态存在的钒, 会降低钢的淬透性、增加钢的回火稳定性, 并有很强的二次硬化作用。碳化钒是一种硬度极高、耐磨性极好的金属碳化物, 可明显提高工具钢的寿命, 提高钢的蠕变和持久强度
Ti (钛)	钛是钢的强脱氧剂, 它能使钢的内部组织致密, 细化晶粒, 降低时效敏感性和冷脆性。钛的固溶强化作用强, 固溶于奥氏体中提高钢的淬透性, 但又会降低固溶体的韧性。钛化合物会降低钢的淬透性、改善回火稳定性并有二次硬化作用, 能提高耐热钢的抗氧化性和热强性、蠕变和持久强度, 对于改善钢的焊接性有良好的作用
Nb (铌)	近年来发展起来的微合金钢 (合金元素含量小于 0.1% 的钢), 主要使用铌、钒、钛为合金元素, 其中铌对于提高钢的强度有突出的作用。它的特点是能与碳、氮结合成氮化物和碳氮化物。这些化合物在高温下溶解, 在低温下析出。其作用是加热时阻碍原始奥氏体晶粒长大、在轧制过程中抑制再结晶及再结晶后的晶粒长大, 在低温时析出起强化的作用。微合金钢所加入的微量元素能提高强度, 但必须采用控轧工艺进行压力加工, 否则韧性反而变坏。这是因为控轧工艺可使晶粒细化, 从而抵消因析出强化而引起的韧性恶化
Al (铝)	铝是化学性质极为活泼的元素之一, 和氧、氮都有很强的亲和力。为了脱氧, 炼钢通常都要加入铝, 它可以细化晶粒、阻碍低碳钢的时效, 提高钢在低温下的韧性; 当被用作合金元素时能提高钢的抗氧化性, 也可用以改善钢的电磁性能、提高渗氮钢的耐磨性和疲劳强度。因此被广泛应用于渗氮钢、耐热不起皮钢、磁钢、电热合金中
B (硼)	硼是化学性质极为活泼的元素之一, 和氮、氧、碳都有很强的亲和力, 加入钢中主要是为提高淬透性, 在 300~400℃ 进行回火能提高冲击韧性, 常用来生产齿轮钢、弹簧钢、耐热钢等。但用于高碳钢或钢中的残余氧含量高时, 会影响其应有的作用
N (氮)	钢中的氮来自炉料, 在冶炼、浇铸时钢液从炉气和大气中会吸收氮。氮引起碳钢的淬火和形变时效, 从而对碳钢的性能发生显著的影响。由于氮的时效作用, 钢的硬度、强度虽然有所提高, 但是塑性和韧性却会降低, 特别是在形变时效的情况下, 塑性和韧性的降低很显著。对于普通低合金钢来说, 时效现象是有害的, 因而, 氮被视为有害元素。 但应用于某些细晶粒钢及含钒、铌钢, 超级不锈钢时, 则由于氮化物有强化和细化晶粒的作用, 因此近年来又发现了它的有益作用。另外, 作为合金元素, 氮被用在一些不锈钢耐酸钢中以及氮化处理中, 氮化处理能使机器零件获得极好的综合力学性能, 延长零件的使用寿命, 所以氮化处理是工具钢用来提高硬度的一种方法
Pb (铅)	铅的熔点很低, 在钢中以低熔点的细小金属颗粒形态分布于晶界, 造成脆性, 对于一般钢而言它是有害元素。然而用以制造铅易切钢时, 由于铅会附着于硫化物的周围, 当切削时熔融铅渗出, 起润滑和断屑作用, 减少缠绕刀具; 而且, 在提高钢的切削性的同时它对常温力学性能的影响不大