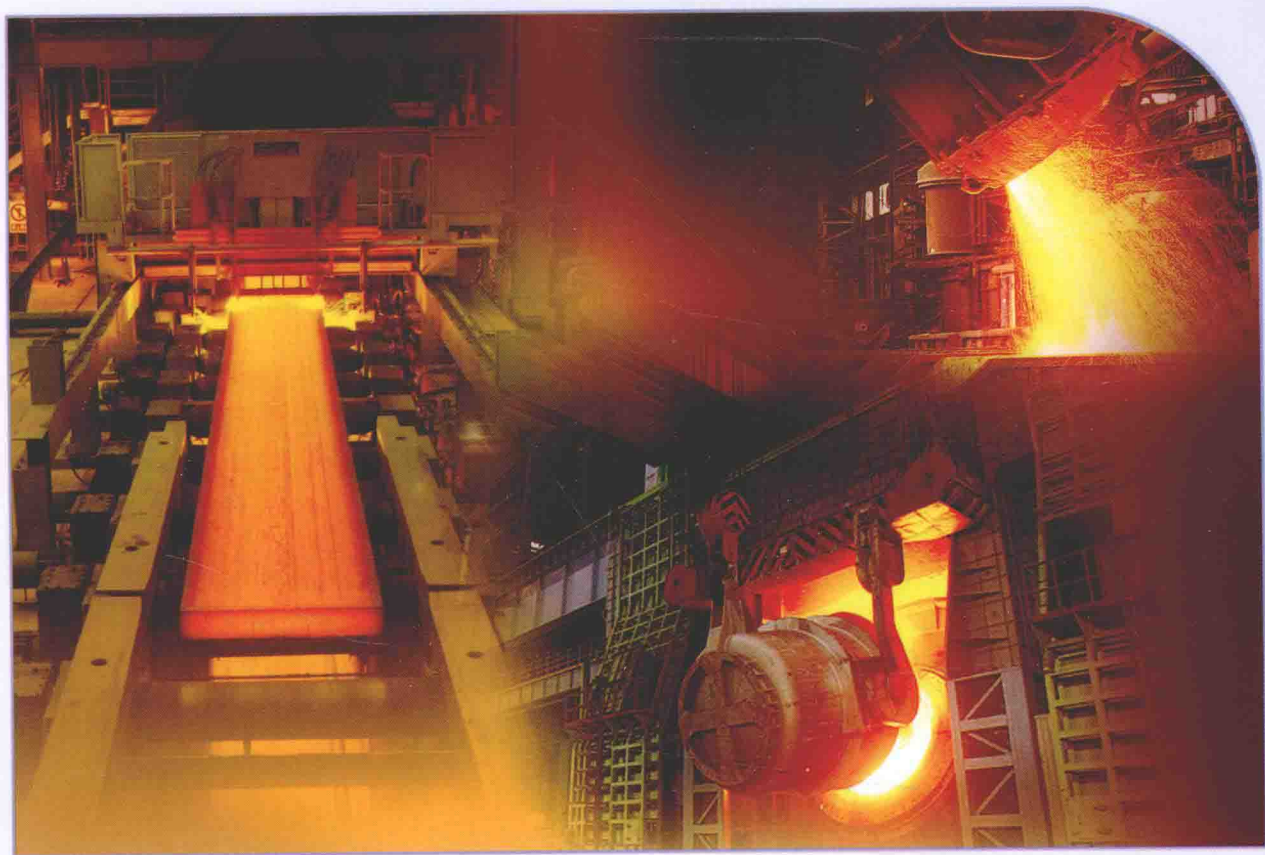




炼钢工艺与操作

LIANGANG GONGYI YU CAOZUO

■ 主 编 马 琼

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

炼钢工艺与操作

主 编 马 琼

副主编 孟建荣 侯 伟



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书依据炼钢工作过程对知识与能力的需求来选择和组织内容,重点介绍了炼钢基本知识,转炉、电炉炼钢,炉外精炼及连铸等钢铁冶金过程,突出强调工作任务与岗位能力和知识的联系。全书围绕炼钢所需的知识和技能,将相关内容分为五个情境以及若干个相对独立的学习任务,充分体现了工作过程的完整性。每个任务主要由任务概述、相关知识、任务实施等部分组成,个别任务中还包括拓展知识内容。

本书可作为高等院校冶金技术、金属压力加工、矿物加工等专业的教学用书,也可作为钢铁冶金企业工程技术人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

炼钢工艺与操作/马琼主编. —北京:北京理工大学出版社, 2015. 1

ISBN 978 - 7 - 5682 - 0049 - 3

I. ①炼… II. ①马… III. ①炼钢 - 生产工艺 - 高等学校 - 教材 IV. ①TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 305493 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / [http://www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京泽宇印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 16

字 数 / 371 千字

版 次 / 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 48.00 元

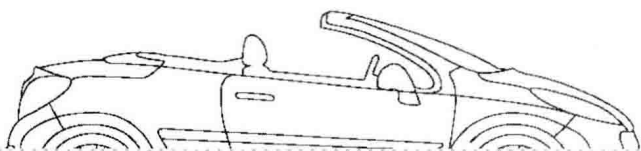
责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 马振武

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



前言

P R E F A C E

本书围绕炼钢过程的典型工作任务展开，主要内容包括炼钢基础认知、转炉炼钢工艺与操作、电炉炼钢工艺与操作、炉外精炼工艺与操作、连铸工艺与操作等部分。

本书主要特点是：以工作过程为导向，以能力培养为本位；省去了大量复杂的计算、推导等理论篇幅，以任务驱动的形式展现工作过程，内容简洁易懂。

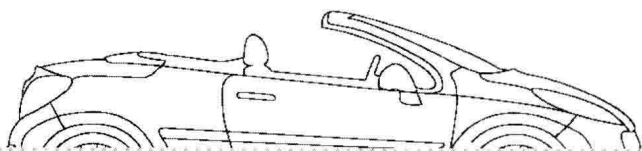
教学方法及建议：本书适合采用学、训一体方法教学，也可采用多媒体教学等形式。

本书由马琼担任主编，孟建荣、侯伟担任副主编。参加编写的有李军库、杨生州、尹文艳、张珺、徐海芳、沈春飞、李小虎、史满庆。

本书在编写过程中参阅了大量相关文献资料，并进行了多次企业调研，在此向有关人员和单位表示衷心感谢。

由于编者水平和经验所限，书中存在错误和疏漏之处在所难免，恳请各位读者批评指正。

编 者



目 录

CONTENTS

项目背景	001
情境一 炼钢基础认知	003
任务 1.1 炼钢基本任务认知	003
1.1.1 任务概述	003
1.1.2 相关知识	003
1.1.3 任务实施	009
任务 1.2 炼钢基本反应认知	009
1.2.1 任务概述	009
1.2.2 相关知识	010
1.2.3 任务实施	045
复习思考题	046
情境二 转炉炼钢工艺与操作	047
任务 2.1 准备炼钢原材料	047
2.1.1 任务概述	047
2.1.2 相关知识	047
2.1.3 任务实施	055
任务 2.2 铁水预处理	061
2.2.1 任务概述	061
2.2.2 相关知识	061
2.2.3 任务实施	067
任务 2.3 氧气顶吹转炉冶炼一炉钢的操作	072
2.3.1 任务概述	072
2.3.2 相关知识	072
2.3.3 任务实施	102

2.3.4 拓展知识	107
复习思考题	121

情境三 电炉炼钢工艺与操作

122

任务 3.1 传统电弧炉炼钢工艺与操作过程

122

3.1.1 任务概述

122

3.1.2 相关知识

122

3.1.3 任务实施

137

任务 3.2 现代电弧炉冶炼一炉钢的工艺操作

145

3.2.1 任务概述

145

3.2.2 相关知识

145

3.2.3 任务实施

149

3.2.4 拓展知识

152

复习思考题

163

情境四 炉外精炼工艺与操作

164

任务 4.1 LF (V) 法炉外精炼工艺与操作

164

4.1.1 任务概述

164

4.1.2 相关知识

165

4.1.3 任务实施

167

任务 4.2 AOD 法炉外精炼工艺与操作

168

4.2.1 任务概述

168

4.2.2 相关知识

168

4.2.3 任务实施

171

4.2.4 拓展知识

173

复习思考题

182

情境五 连铸工艺与操作

183

任务 5.1 完成一炉钢的连铸操作

183

5.1.1 任务概述

183

5.1.2 相关知识

184

5.1.3 任务实施

218

任务 5.2 处理常见事故

227

5.2.1 任务概述

227

5.2.2 相关知识

227

5.2.3 任务实施	232
5.2.4 拓展知识	237
复习思考题.....	242
 附录 某企业电炉冶炼作业指导书	 243
 参考文献	 246

项目背景

常见的工业材料有金属、陶瓷、塑料、木材和纤维等，用量最多的是金属材料，而在金属材料中约 95% 是钢铁材料，主要原因如下：

(1) 铁元素资源丰富，在地壳中约占 5%，是居第 4 位的丰富资源，且矿床品位也较高。

(2) 钢铁冶炼方便，价格便宜。

(3) 钢铁材料在强度、硬度、韧性等方面都具有较好的性能，且经过热处理以及不同的加工方法加工后还可以获得更高的性能。

普通钢铁材料有密度较大、容易生锈等缺点，但可通过开发高强度钢、不锈钢及对钢材表面涂层和表面处理等加以克服。

从自然界最原始的含铁原料到具有使用价值的钢材，需要通过钢铁联合企业的加工生产，现代钢铁联合企业包括采矿、选矿、烧结、焦化、炼铁、炼钢和轧钢等环节。炼钢包括铁水预处理、转炉炼钢、炉外精炼及钢的浇铸等工序。“炼钢”是联合企业的中心环节，其前道工序是炼铁，后道工序是轧钢。

工业化炼钢方法有转炉炼钢法、电弧炉炼钢法和平炉炼钢法，但目前平炉炼钢法已被淘汰。各炼钢法及其特点见表 0-1。

表 0-1 炼钢方法及特点

炼钢法	转炉	电弧炉
原料	主要是铁水，还有少量废钢	主要是废钢，还有少量生铁或铁水
热源	铁水的物理热和元素的氧化热	电能
氧化剂	纯氧	铁矿石、氧气
造渣剂	石灰、萤石等	石灰、火砖块、铁矾土、萤石等
特征	冶炼周期短，易与连铸相匹配	品种多、质量好、冶炼周期长

转炉炼钢法是 1856 年由英国人亨利·贝塞麦研究成功的。

氧气顶吹转炉炼钢法于是 1952 年和 1953 年在奥地利的林茨（Linz）与多纳维茨

(Donawitz) 首先投入工业生产的, 所以也称 LD 法。1964 年 12 月, 我国第一座 30 吨氧气顶吹转炉在首钢投入生产。氧气顶吹转炉炼钢法具有以下优点:

- (1) 吹炼速度快, 生产率高;
- (2) 品种多, 质量好;
- (3) 原材料消耗少, 热效率高, 成本低;
- (4) 基建投资省, 建设速度快;
- (5) 容易与连续铸钢相匹配。

氧气顶吹转炉炼钢现已成为主要炼钢方法。

电弧炉炼钢法是以电能为主要能源、废钢为主要原料的炼钢方法, 平时常称电炉炼钢法, 1897 年产生于德国。其显著的优点是: 熔池温度易于控制和炉内气氛可以调整, 故常用来生产优质钢和高合金钢; 此外, 它不像氧气转炉那样需配建一套庞大的炼铁生产系统, 同时本身的设备也比较简单, 因而投资小, 建厂快。自 20 世纪 60 年代以来, 电弧炉在向大型化发展的同时, 采用了高功率 ($400 \sim 700 \text{ kV} \cdot \text{A/t}$), 甚至超高功率 ($700 \sim 1\,000 \text{ kV} \cdot \text{A/t}$) 的供电系统和水冷炉壁、助熔、自动化操作及偏心炉底出钢等技术, 使其“电能耗高、生产率低”的状况得到了明显的改观, 一些大型电弧炉已大量用于冶炼碳素钢, 电炉钢的产量占世界钢产量的比例逐年增加。

传统炼钢是一门技术, 直到物理化学在炼钢中得到应用并且发展到炼钢基础理论, 炼钢才真正成为应用科学。

物理化学是运用物理原理和实验方法, 从物理变化和化学变化的相互联系中, 研究整个化学领域内各种现象间内在联系和本质的共同规律的学科。掌握这些具有实质性的共同规律, 能加深我们对物质世界的认识, 促进并指导生产和科学技术的发展。

炼钢过程实际上是在高温条件下进行的复杂的物理化学过程。为了适应生产发展的需要, 不断地改进工艺流程和工艺操作, 必须深入、全面地分析研究各种冶炼过程中所发生的现象, 即必须掌握一定的理论知识, 为科学炼钢奠定理论基础。

随着现代科学技术和工业的发展, 对钢的质量 (如纯净度) 要求越来越高, 用普通炼钢炉 (转炉、电炉) 冶炼出来的钢水已经难以满足质量要求; 为了提高生产率、缩短冶炼时间, 也希望能把炼钢的一部分任务移到炉外去完成; 另外, 连铸技术的发展, 对钢水的成分、温度和气体的含量等也提出了更严格的要求。这几方面的因素, 使得炼钢工作者急于寻求一种新的炼钢工艺, 于是就产生了各种炉外精炼方法。

铸坯或铸锭是炼钢产品最初成形的工序, 直接关系到炼钢生产的产量和质量。钢的浇铸有钢锭模浇铸 (模铸)、连续铸钢 (连铸)、压力浇铸和真空浇铸四种方法。其中, 常用的是模铸和连铸。模铸法生产钢锭已有一百多年的历史, 目前在炼钢生产中仍然占有一定的位置。由于我国的钢铁工业起步较晚, 所以在国内一些工厂, 特别是小型钢厂, 目前仍然还在采用模铸法生产钢锭。近年来, 随着世界钢铁工业的迅猛发展, 连续铸钢法已逐渐取代模铸法, 成为钢液浇铸的主要方法。

情境一

炼钢基础认知

任务 1.1 炼钢基本任务认知

1.1.1 任务概述

- (1) 了解钢铁企业的工艺流程，充分掌握炼钢的基本任务，进一步明确钢与铁的区别及联系；
- (2) 了解钢中主要夹杂物的来源与危害；
- (3) 清楚钢液温度调整的重要性。

1.1.2 相关知识

1.1.2.1 钢与铁

钢铁材料有两大类，钢与铁，铁又分为生铁和工业纯铁，工业纯铁具有很好的延展性，焊接性也很好，但强度和硬度差，除在电器工业上应用外，在其他工业领域应用不多，故日常生活所说的铁多数指生铁。

从化学成分来看，钢和生铁都是铁碳合金，并且还含有 Si、Mn、P、S 等元素，但含量不同，根据 Fe—C 相图（见图 1-1）划分，理论上，碳含量为 0.021 8% ~ 2.11% 的铁碳合金称为钢；碳含量在 2.11% 以上的铁碳合金称为生铁；碳含量在 0.021 8% 以下的铁碳合金称为工业纯铁。根据国家标准和国际标准规定：碳含量 2% 为钢和生铁的分界点。一般含碳量为 2% ~ 4.5% 铁碳合金称为生铁，含碳量 0.02% ~ 2.0% 铁碳合金称为钢，含碳量小于 0.02% 的铁碳合金称为纯铁。正是因为化学成分的不同导致在其性能方面出现了差异，钢和生铁的区别可从表 1-1 中看出。由于钢具有很好的物理化学性能与力学性能，可以进行拉、压、轧、冲、拔等深加工，因此，钢比生铁的用途广泛。除约占生铁总量 10% 的铸造生铁用于生产铁铸件外，约占生铁 90% 的炼钢生铁要进一步冶炼成钢，以满足国民经济各行业的需要。

表 1-1 钢和生铁的区别

名称	含碳量/%	熔点/℃	特性
生铁	2.0 ~ 4.5	1 100 ~ 1 200	脆而硬，无韧性，不能锻、轧，铸造性能好
钢	<2.0（工业上使用的钢中一般 $w[\text{C}] < 1.4\%$ ）	1 450 ~ 1 500	强度高，塑性好，韧性大，可以锻、压、铸

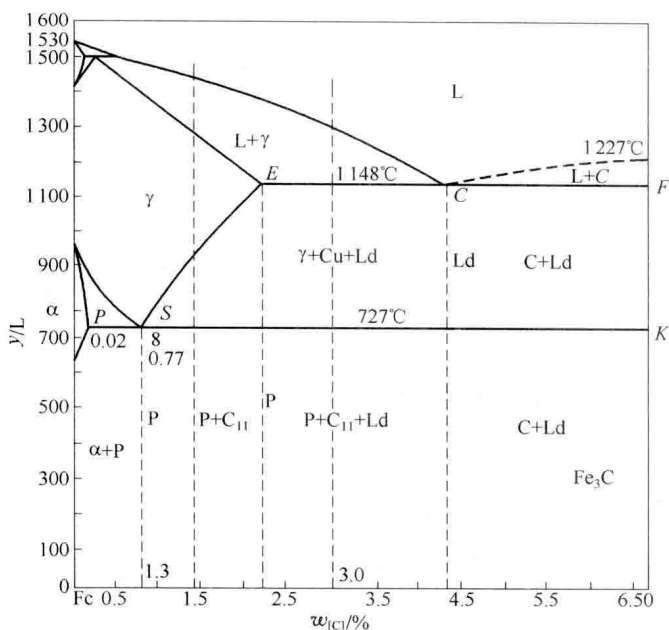


图 1-1 Fe—C 相图

钢铁企业的工艺流程如图 1-2 所示。

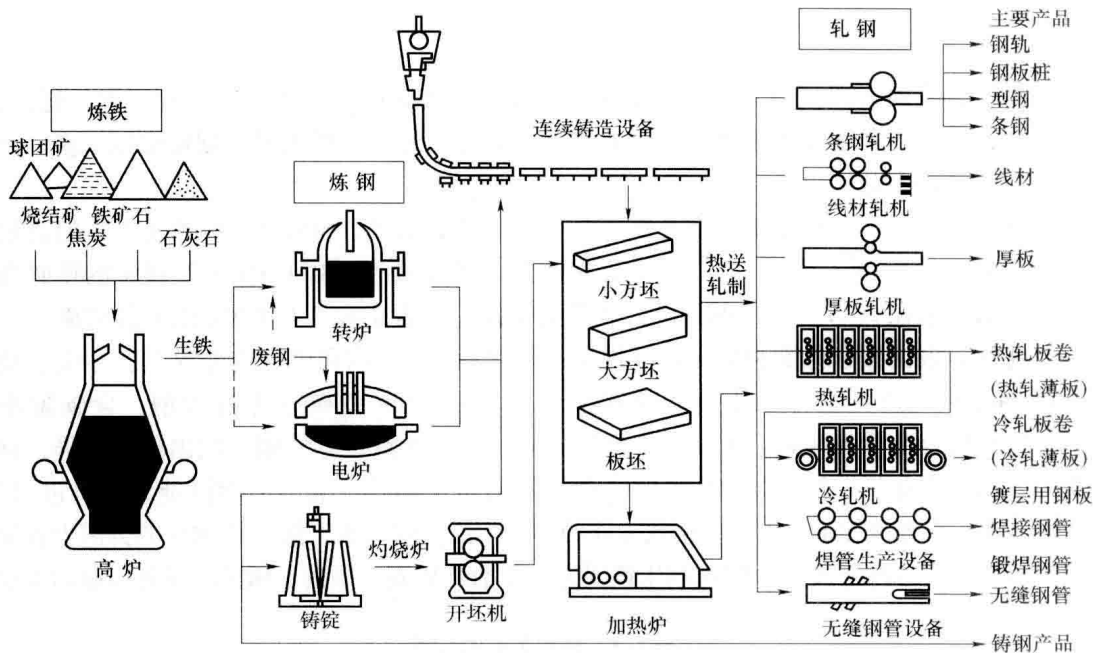


图 1-2 钢铁企业工艺流程

1.1.2.2 炼钢基本任务

将原材料转变成合格的钢液必须完成下列基本任务。

1. 去除杂质

去除杂质，一般是指去除钢中的硫、磷、氧、氢、氮和夹杂物。

1) 脱硫

硫在钢中以 FeS 的形式存在，FeS 的熔点为 $1\,193^{\circ}\text{C}$ ，Fe 与 FeS 组成的共晶体的熔点只有 985°C 。液态铁与 FeS 虽然可以无限互溶，但在固溶体中的溶解度很小，仅为 $0.015\% \sim 0.020\%$ 。当钢中的硫含量超过 0.020% 时，钢液在凝固过程中由于偏析使得低熔点的 Fe—FeS 共晶体分布于晶界处，在 $1\,150^{\circ}\text{C} \sim 1\,200^{\circ}\text{C}$ 的热加工过程中，晶界处的共晶体熔化，钢受压时造成晶界破裂，即发生“热脆”现象。如果钢中的氧含量较高，则会在晶界产生更低熔点的共晶化合物 FeO—FeS（熔点为 940°C ），更加剧了钢“热脆”现象的发生。

[Mn] 可在钢凝固温度的范围内生成 MnS。纯 MnS 的熔点为 $1\,610^{\circ}\text{C}$ ，FeS—MnS 共晶（FeS 占 93.5% ）的熔点为 $1\,164^{\circ}\text{C}$ ，它们能有效地防止钢在轧制时开裂。因此，在冶炼一般钢种时，要求将 $w_{[\text{Mn}]}$ 控制在 $0.4\% \sim 0.8\%$ 。但过高的硫会产生较多的 MnS 夹杂物，轧、锻后的硫化物夹杂被拉长，降低钢的强度，使钢的磨损增大，明显地降低钢的横向机械性能和深冲压性能。在实际生产中，还将 $w_{[\text{Mn}]} / w_{[\text{S}]}$ 作为一个指标进行控制。钢中的 $w_{[\text{Mn}]} / w_{[\text{S}]}$ 对钢的热塑性影响很大，从低碳钢高温下的拉伸实验结果发现，提高 $w_{[\text{Mn}]} / w_{[\text{S}]}$ 可以提高钢的热延展性。一般 $w_{[\text{Mn}]} / w_{[\text{S}]} \geq 7$ 时不产生热脆。

硫除了会使钢的热加工性能变坏外，还会明显降低钢的焊接性能，引起高温龟裂，并在金属焊缝中产生许多气孔和疏松，从而降低焊缝的强度。硫含量超过 0.06% 时，会显著恶化钢的耐蚀性。硫是连铸坯中偏析最为严重的元素。

不同钢种对硫含量有着严格的规定：非合金钢中普通质量级钢要求 $w_{[\text{S}]} \leq 0.045\%$ ，优质级钢要求 $w_{[\text{S}]} \leq 0.035\%$ ，特殊质量级钢要求 $w_{[\text{S}]} \leq 0.025\%$ ，超低硫钢要求 $w_{[\text{S}]} \leq 0.001\%$ 。

易切削钢常以 [S] 作为产生硫化物的介质，在切削过程中，含硫化物的钢车削时易断，常作为易加工的螺钉、螺帽、纺织机零件、耐高压零件等的材料。我国常用的易切削钢有 Y12、Y20、Y30，要求含硫量为 $0.08\% \sim 0.20\%$ 。

2) 脱磷

通常认为，磷在钢中以 $[\text{Fe}_3\text{P}]$ 或 $[\text{Fe}_2\text{P}]$ 的形式存在，为方便起见，均用 [P] 表示。在一般情况下，磷是钢中有害元素之一。通常，磷会使钢的韧性降低，并可略微增加钢的强度。[P] 的突出危害是产生“冷脆”，在低温下， $w_{[\text{P}]}$ 越高，冲击性能（冲击功，单位为 J）降低就越大。磷是降低钢液表面张力的元素，易析集结晶于边界处，随着其含量的增加，表面张力 σ 值急剧下降，从而降低了钢的抗热裂纹性能。

为减少 [P] 的危害、提高钢的品质，必须尽量降低磷含量。可采用炉内氧化法脱磷或炉外喷粉还原法脱磷。为取得良好的效果，应先用铁水预处理脱硫、脱磷后再进行冶炼。钢中 [C] 有促进磷降低冲击韧性的作用，所以在冶炼高碳钢时，应将磷控制得更低些。

钢中的 [P] 含量允许范围：非合金钢中普通质量级钢 $w_{[\text{P}]} \leq 0.045\%$ ，优质级钢 $w_{[\text{P}]} \leq 0.035\%$ ，特殊质量级钢 $w_{[\text{P}]} \leq 0.025\%$ ；普通低磷钢 $w_{[\text{P}]} \leq 0.010\%$ ，超低磷钢 $w_{[\text{P}]} \leq 0.005\%$ ，极低磷钢 $w_{[\text{P}]} \leq 0.002\%$ 。但有些钢种如炮弹钢、耐腐蚀钢等，则需要加入磷元素。

3) 脱氧

炼钢是氧化还原过程。在吹炼过程中，向熔池吹入了大量的氧气，到吹炼终点，钢水中含有过量的氧，如果不进行脱氧，则将影响之后的浇铸操作。而且在钢的凝固过程中，氧以氧化物的形式大量析出，钢中也将产生氧化物非金属夹杂，降低钢的塑性和冲击韧性，使钢变脆。为此，要将钢水按不同钢种要求脱氧。采取的方法有三种：沉淀脱氧、扩散脱氧和真空脱氧。

一般测定的钢中氧含量是全氧，包括氧化物中的氧和溶解的氧，在使用浓差法定氧时，才测定钢液中溶解的氧（氧的活度）；在钢锭坯、材中取样时是全氧样。

4) 去气（氢、氮）

（1）钢中氢。

炼钢炉料带有水分或空气潮湿，都会使钢中的含氢量增加。氢是钢中的有害元素。在钢的热加工过程中，钢中含有氢气的气孔会沿着加工方向被拉长而形成发裂，从而引起钢材的强度、塑性以及冲击韧性降低，这种现象称为氢脆。在钢的各类标准中，对氢一般不作数量上的规定，但过量的氢会使钢产生白点（发裂）、疏松和气泡缺陷。

白点是钢的致命缺陷，标准中规定有白点的钢材不准交货。在 100 mm 的坯上取打断口样，其纵断口上呈圆形或椭圆形的白色亮点（直径为 1~10 mm）称为白点（实为交错的细小裂纹）。白点产生的主要原因是钢中 [H] 在小孔隙中析出的压力和钢相变时产生的组织应力的综合力超过了钢的强度。一般白点产生的温度小于 200℃。低温下钢中氢的溶解度很低，相变应力也最大。生产铁素体钢、奥氏体钢等无相变钢时不易产生白点。在生产实践中发现，高速钢（有相变）也不易产生白点，因为它需进行多火锻造，故在加热过程中会使氢扩散到大气中，致使氢含量降低。产生白点的另一重要原因是浇铸后钢锭凝固过程中产生了偏析，使局部区域或中心区域氢含量很高，降低了钢的塑性和韧性。

脱氢量和加热温度有关，但在没有脱气设备进行真空处理的情况下，对一些断面比较大、白点敏感性强的钢件，可用扩散退火的方法处理，但这种脱氢方法是不经济的。

钢坯中氢气向外扩散的数量和钢中成分有关，与氢亲和力大的 Ti、Zr 等元素含量增高时，析出的氢就少。

因此，冶炼易产生白点等缺陷的钢种时，要特别注意原材料（尤其是石灰）的干燥清洁，且冶炼时间要短。要求严格的钢种应充分发挥炉内脱碳的去气作用，再经炉外吹 Ar 或真空处理，甚至采用真空熔炼的方法，使钢中氢降到很低的水平。

（2）钢中氮。

氮由炉气进入钢中。氮在奥氏体中的溶解度较大，而在铁素体中的溶解度很小，且溶解度随温度的下降而减小。当钢材由高温较快冷却时，过剩的氮由于来不及析出便溶于铁素体中，随后在 200℃~250℃ 加热，将会发生氮化物的析出，使钢的强度、硬度上升，塑性大大降低，这种现象称为蓝脆。钢中的氮以氮化物的形式存在，氮化物的析出速度很慢，逐渐改变着钢的性能。氮含量高的钢种，若长时间放置，将会变脆，这一现象称为“老化”或“时效”（即时效脆性）。

钢中氮能使其强度略微增加，可用氮代替镍生产耐热钢。高质量的高铬钢（如 27% Cr）中 $w_{[N]+[C]} < 0.02\%$ 时，才能在常温下具有高的韧性，利于冷加工。因此，降低钢中氮含量是提高钢性能的主要途径之一。

在低碳钢中增大氮含量，会降低冲击韧性，产生老化现象（碳含量越低，影响的程度就越大）。氮是表面活性物质，因此降低了钢液的表面张力，使氮容易析集在晶界，降低了钢抗热裂纹的性能。

通常靠脱碳沸腾、吹氩搅拌去气及真空下去气的方法降低钢中的氮。由于氮的原子半径比较大，在铁液中扩散较慢，所以不如 $[H]$ 的去除效果好。钢中残余的 $[N]$ 可用 Ti、Nb、V、Al 结合生成氮化物，以消除影响。细小的氮化物有调整晶粒、改善钢质的作用。

氮作为“合金元素”的应用技术已被人们接受，并由此开发了许多含氮钢种，其不仅对于生产钒氮合金化的Ⅲ级钢筋是一种节省钒铁的途径，也是使不宜控轧控冷的低碳长条钢发挥钒的强化作用的方法。

通过铁水预处理和炼钢过程控制，再结合炉外精炼，可使钢的洁净度达到较高的水平。按钢材使用的具体要求，采用不同洁净度的钢质水平，如 D 级高强度造船钢板，一般质量水平就可安全使用，X70 级以下的管线用钢则要求洁净钢水平，而汽车用 IF 钢板则应达到超洁净钢的水平，见表 1-2。

表 1-2 现代钢的洁净度控制水平

水平	$w_{[S]}/\%$	$w_{[P]}/\%$	$w_{[N]}/10^{-6}$	$w_{[O]}/10^{-6}$	$w_{[H]}/10^{-6}$	$\Sigma/10^{-6}$
一般质量水平（通用型）	≤ 0.005	≤ 0.010	60	40	2	≤ 250
洁净钢水平（经济型）	≤ 0.002	≤ 0.005	40	10	1	≤ 120
超洁净钢水平（超级型）	≤ 0.0005	≤ 0.001	20	5	0.2	≤ 50

5) 控制残余有害元素

Cu、Sn、As、Sb 等残余有害元素对钢的质量和性能所造成的危害主要有：恶化钢坯及钢材的表面质量，增加热脆倾向；使低合金钢发生回火脆性；降低连铸坯的热塑性，在含氢气气氛中引起应力腐蚀；严重降低耐热钢持久寿命及引起热应力腐蚀；严重恶化 IF 钢深冲性能等。

国内外一些钢厂对钢中残存有害元素含量的限制标准见表 1-3。

表 1-3 钢中残存元素的实际含量和允许含量

%

元素	“工业纯”钢实际含量	“高纯”钢实际含量	允许含量	
			一般用途钢	深冲和特殊用途钢
Cu	0.08 ~ 0.21	0.018	0.250	0.100
Sn	0.010 ~ 0.021	0.001	0.050	0.015
Sb	0.002 ~ 0.004	0.001	—	0.005
As	0.010 ~ 0.033	0.002	0.045	0.010
Pb	—	—	0.001 4 ~ 0.002 1	—
Bi	—	—	0.000 1 ~ 0.000 15	—
Ni	< 0.06	—	—	0.100

现代化高性能新钢种对钢中有害元素的控制已不止限于 S、P、O、H、N，而且还考虑

Ni、Cu、Pb、Sn、As 等残余有害元素的影响。首先要针对其具体用途和钢种制定不同“标准”，合理安排组织生产。在资源条件及成本允许的情况下，可用生铁、DRI 等废钢代用品对钢中残余元素进行稀释处理。在资金允许的前提下，应采用废钢破碎、分离技术进行固态废钢预处理。钢液脱除技术是最适于大规模生产的残余有害元素处理方法，可与炼钢过程同步进行，简便易行，但这种方法尚需进一步研究与探讨。

6) 控制非金属夹杂

在冶炼和浇铸过程中产生或混入钢中，经加工或热处理后仍不能消除而且与钢基体无任何联系而独立存在的氧化物、硫化物、氮化物等非金属相，统称为非金属夹杂物，简称为夹杂物。

钢中的非金属夹杂物主要是铁、锰、铬、铝、钛等金属元素与氧、硫、氮等形成的化合物。其中氧化物主要是脱氧产物，包括未能上浮的一次脱氧产物和钢液凝固过程再次发生脱氧反应形成的脱氧产物。

非金属夹杂物的存在破坏了钢基体的连续性，造成钢组织不均匀，并对钢的各种性能都会产生一定的影响，如降低钢的强度、塑性、冲击韧性、抗疲劳性和热加工性能等。由于非金属夹杂对钢的性能会产生严重影响，因此，在炼钢、精炼和连铸过程中，应最大限度地降低钢液中夹杂物的含量，控制其成分、形态及尺寸和分布。

2. 调整钢的成分

为保证钢的各种物理、化学性能，应将钢的成分调整到规定的范围之内。

1) 钢中碳

在炼钢过程中要氧化脱除多余的碳，以达到规定的要求。用生铁炼钢时脱碳量大（ $>3\%$ ），而用电炉氧化法炼钢时脱碳量较小（ $>0.20\%$ ）。多余的碳脱除后被氧化成 CO，通过钢液的 CO 有较好的脱气作用。所以在大气下炼钢时，脱碳也作为脱气的一种手段。从钢的性质看，碳也是重要的合金元素之一，它可增加钢的强度、硬度。在不同的热处理条件下，[C] 可以改变钢中各组织的比例，使钢强度增加的同时略微降低韧性指标。

2) 钢中锰

锰的冶金作用主要是消除 [S] 的热脆倾向，改变硫化物的形态和分布，以提高钢质。钢中 [Mn] 是一种弱脱氧元素，只有在 [C] 含量非常低、[O] 含量很高时才有脱氧作用，其主要是协助 [Si]、[Al] 脱氧，提高它们的脱氧能力和脱氧量。锰可略微提高钢的强度， $w_{[Mn]}$ 每增加 1%，可使钢强度 σ_b 提高 78.5 MPa，并可提高钢的淬透性能，且价格便宜。它可稳定并扩大奥氏体区，常作为合金元素制造奥氏体不锈钢（代 Ni）、耐热钢（与 [Mo] 共同代替 Ni）和无磁护环钢（大电机用）。当 [Mn] 含量为 13%、[C] 含量为 1% 时，可制造耐磨钢，使用过程中可产生加工硬化，以减少钢的磨损。

3) 钢中硅

硅是钢中最基本的脱氧元素。普通钢中含硅 0.17% ~ 0.37%，是冶炼镇静钢的必要成分。该脱氧剂价格较低，当硅含量为 0.17% ~ 0.37% 在 1450℃ 左右钢凝固时，能保证与钢中 [Si] 相平衡的氧小于和 [C] 平衡的氧，以防止在凝固过程中产生 CO 气泡。生产沸腾钢时， $w_{[Si]}$ 为 0.03% ~ 0.07%， $w_{[Mn]}$ 为 0.25% ~ 0.07%，硅只能微弱地控制 [C] 和 [O] 反应。硅还能提高钢的力学性能，在 $w_{[Si]} < 1\%$ 时，每增加 0.1% 的 [Si]，则会使 σ_b 约提高 9 MPa。

4) 钢中铝

在炼钢生产中,铝是强脱氧元素,大部分钢均采用铝或含铝的复合脱氧剂脱氧。铝作为强脱氧元素,对钢材性能的影响是强烈缩小 γ 相。它与氧、氮有很大的亲和力,首先表现为固氮作用;其次,当铝加入钢中时,奥氏体晶粒会减小抑制碳钢的时效,提高钢在低温下的韧性。

加入钢中的铝一部分形成 Al_2O_3 或含有 Al_2O_3 的各种夹杂物,另一部分则溶入固态铁中,以后随加热和冷却条件的不同,或者在固态下形成弥散的 AlN ,或者继续保留在固溶体(奥氏体、铁素体)中;通常将固溶体中的铝(包括随后析出的 AlN)称作酸溶铝,而氧化铝则以大小不等的颗粒状夹杂形态存在于钢中,称作酸不溶铝。正由于铝在钢中有着特殊的作用,因此各钢铁厂在生产中均对钢中的酸溶铝进行控制,但钢中酸溶铝含量应控制在什么范围,厂家意见也不一致,有文献认为是 $0.005\% \sim 0.008\%$ 。蔡开科教授认为不同钢种对 $[\text{Al}]_s$ 的工艺要求是有区别的。含锰合金结构钢易产生晶粒粗化,要求钢中残铝大于 0.02% ;含Cr、Ti、Nb的合金钢,铝含量也可适当高一点;而其他合金元素多的合金钢,铝含量则可低一点。对于低碳钢,在能满足连铸要求的前提下,钢中 $[\text{Al}]_s$ 可控制在 $0.010\% \sim 0.020\%$;中、高碳钢则可适当再低一些。这样可以在有效地降低钢中夹杂总量的同时,提高钢材的性能。

炼合金钢时还需要加入其他合金元素,即需要进行合金化操作。

3. 调整钢液温度

铁水温度一般只有 $1\ 300^\circ\text{C}$,而钢水温度必须高于 $1\ 600^\circ\text{C}$ 才不至于凝固。钢水脱碳、脱磷、脱硫、脱氧、去气、去非金属夹杂等过程,都需要在液态条件下进行。此外,为了将钢水浇铸为铸坯(或钢锭),也要求出钢温度在 $1\ 600^\circ\text{C}$ 以上。为此,在炼钢过程中,需对金属材料和其他原料加热升温,使钢液温度达到出钢要求。

钢水成分、温度合格后,可将钢水铸成一定形状的铸坯(或钢锭),再轧成钢材。

还应指出,在完成炼钢基本任务的同时,也应注意维护炉体,提高炉子寿命,全面完成炼钢的各项技术经济指标。

炼钢的基本任务也可以归纳为“四脱”(脱碳、氧、磷和硫)、“二去”(去气和去夹杂)、“二调整”(调整成分和温度);采用的主要技术手段为供氧、造渣、升温、加脱氧剂和合金化操作。

1.1.3 任务实施

- (1) 准确描述钢与铁的区别,说明铁—碳相图的冶金学意义;
- (2) 准确描述炼钢的基本任务;
- (3) 准确描述钢中常见元素的有益及有害作用。

任务 1.2 炼钢基本反应认知

1.2.1 任务概述

- (1) 掌握炼钢的基本反应,掌握各基本反应发生的前后顺序和条件;

- (2) 掌握 C 和 O 反应在炼钢过程中的重要作用与意义；
- (3) 掌握脱磷、硫反应的基本机理及温度和碱度要求；
- (4) 清楚炼钢后期回磷的原因及回磷的操作要点；
- (5) 了解钢中夹杂物的来源及去除方法。

1.2.2 相关知识

1.2.2.1 硅锰氧化

1. 炼钢传氧

1) 熔池内氧的来源

炼钢要完成脱碳、脱磷和硅锰氧化等反应，必须供氧。

炼钢熔池内氧的来源形式有两种：一种是气体，如氧气顶吹转炉吹入的高压氧流和炉气中的各种氧化性气体，以 O_2 、 CO_2 、 H_2O 等形式存在；另一种是固体，如矿石及废钢中的铁锈，以 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 等形式存在。

在炉内氧的存在是以气态氧 $\{O_2\}$ ，渣中氧 (Fe_2O_3)、 (FeO) ，钢中溶解氧 $[O]$ 或 $[FeO]$ 三种形态存在，这三种形态的氧，分解压按气态氧、渣中氧、钢中氧排列顺序逐渐降低，造成氧从气态向熔渣、再向钢液发生传递。

在炼钢温度下，常见氧化物的分解压排列顺序如下：

$$p\{O_2\}(Fe_2O_3) > p\{O_2\}(FeO) > p\{O_2\}\{CO\} > p\{O_2\}(MnO) > p\{O_2\}(P_2O_5) > p\{O_2\}(SiO_2) > p\{O_2\}(Al_2O_3) > p\{O_2\}(MgO) > p\{O_2\}(CaO)$$

氧化物分解压力越小，元素越先氧化，即氧化顺序为 Ca、Mg、Al、Si、P、Mn、C、Fe、FeO，但转炉内为多相反应，因此，铁水中元素的氧化顺序还与其浓度有关，即吹炼开始元素氧化顺序为 Fe、Si、Mn、P、C 等。

2) 炼钢过程传氧载体

尽管分解压不同提供了炼钢传氧的热力学条件，但若要加快传氧速度，则需要炼钢传氧的载体提供动力学条件。常见的炼钢传氧载体有：

(1) 金属液滴传氧。

转炉炼钢氧流与金属熔池相互作用，形成许多金属小液滴，并被氧化形成带有富氧薄膜的金属液滴，大部分又返回熔池成为氧的主要传递者；熔池中的金属几乎都经历液滴形式，有的甚至经历多次液滴形式，金属液滴比表面积大，反应速度很快。

金属液滴传氧过程如下：

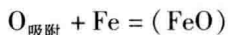
①金属液滴被包围，形成表面吸附原子氧。

$$1/2\{O_2\} = O_{\text{吸附}}$$

②被吸附的氧原子溶于金属中。

$$O_{\text{吸附}} = [O]$$

③吸附氧使金属表面氧化，产生 (FeO) 渣膜。



④溶于金属中的氧氧化后产生更多的 (FeO) 。

