

特殊钢丛书

现代电弧炉炼钢

李士琦 李伟立 刘仁刚 等编著

原子能出版社

047457

特殊钢丛书

现代电弧炉炼钢

李士琦 李伟立 刘仁刚 等编著

原子能出版社

内 容 简 介

《现代电弧炉炼钢》是由中国金属学会特殊钢专业学会组织编写的“特殊钢丛书”之一。本书结合我国电弧炉炼钢的现状和经验,追踪国际发展动态,主要内容包括当代电弧炉炼钢技术和生产的发展、钢铁原料、炼钢工艺、废钢铁处理、辅助能源、水冷炉壁、无渣出钢、底吹电炉、供电和运行参数、直流电弧炉、竖炉—电弧炉、工艺数模、计算机应用、智能电弧炉、环境保护、电弧炉炼钢—薄板坯连铸流程的发展和炼钢厂工艺流程设计等。本书可供从事有关电弧炉炼钢生产、科研、设计、教学和管理等的科技人员和有关院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电弧炉炼钢/李士琦等编著. —北京:原子能出版社,
1995. 10

ISBN 7-5022-1407-0

I. 现… II. 李… III. 电弧炉—炼钢—技术 IV. TF741.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 13079 号



原子能出版社出版发行

责任编辑:杨 妹

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

北京昌平百善印刷厂印刷 新华书店经销

开本:850×1168mm $\frac{1}{32}$ 印张 $11\frac{3}{16}$ 字数 285 千字

1995 年 11 月北京第 1 版 1995 年 11 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000

定价:25.00 元

《特殊钢丛书》编辑工作委员会

(按姓氏笔划为序)

主任委员 刘嘉禾 杨 栋

委 员 马绍弥 王建英 王洪发
 关玉龙 刘福魁 那宝魁
 杨昌乐 范小媛 林慧国
 侯树庭

秘 书 长 林慧国

《现代电弧炉炼钢》卷主编 李士琦

序

特殊钢是钢铁工业的一个重要领域。特殊钢的品种繁多，性能各异，质量要求高，应用范围广，从经济建设、国防建设到日常生活用品都与特殊钢有密切关系，因而通常把特殊钢品种、质量、产量作为衡量一个国家钢铁工业科学技术和工业化水平的重要尺度。

当前，我国的四化建设和改革开放正向深广方向发展，中共中央和国务院作出关于加强科学技术进步的决定，广大职工积极要求掌握科学技术专业知识。在这样的形势下，中国金属学会特殊钢专业学会发起并组织编写一套具有自己特色的《特殊钢丛书》，是有时代意义的。

本套丛书将分卷撰写，陆续出版。由中国金属学会特殊钢专业学会及其15个专业学术委员会组织国内冶金与材料界的知名专家教授参加编写这套《特殊钢丛书》，因此具有一定的权威性。编写这套丛书是为了介绍中国特殊钢工业的发展情况和科学研究成果以及国外在这方面的进展情况，总结和整理国内老一辈专家们的丰富学识和实践经验。这套《特殊钢丛书》将重点介绍特殊钢的现代生产工艺技术、特殊钢各大钢类钢种的性能特点和应用指南。为特殊钢生产、科研和使用部门的科技人员在职学习提供素材，为有关大专院校师生提供教学参考。

组织编写特殊钢方面的系列图书，在国内尚属首次，在国外也不多见，难免存在疏漏和不足之处，欢迎指正。期望这套《特殊钢丛书》能在普及提高科学知识、合理生产和合理使用钢材方面发挥积极作用。

《特殊钢丛书》编委会

前 言

电弧炉炼钢已有近百年的历史，最近30年来发展尤为迅速。在超高功率电弧炉炼钢技术思想的指导下，工艺、装备、供电、节能、原料等各方面技术都有许多进步和发展，电弧炉炼钢的生产效率提高了数倍，目前先进的指标是：出钢—出钢时间缩短至1小时以内，每吨炉容量的年产钢量正在逼近1万吨。与此相应的是，电弧炉炼钢流程的技术经济优势日益明显，电弧炉炼钢技术和生产正处于大发展之中。

这本《现代电弧炉炼钢》是《特殊钢丛书》之一，由特殊钢专业学会特钢冶炼学术委员会组织编写。为了更好地反映现代电弧炉炼钢技术的进展，结合我国的现状和经验，本书采取了邀请多位专家各写一章或几章的方式编写。因此在各章之间并不一定有直接的逻辑关系，而且对一些重要的技术关键作者们详细地阐述了自己的研究心得和体会。

本书在内容选取方面力图体现系统工程的思路，其特点是：
① 重视全面的综合介绍，如特意安排了当代电弧炉炼钢技术和生产的发展、钢铁原料、环境保护等内容；
② 强调生产流程方面的内容，如电弧炉炼钢—薄板坯连铸流程的发展、电炉钢厂工艺流程设计等；
③ 对重要的技术进步专设立一章进行介绍，如炼钢工艺、供电和运行参数选择、废钢铁处理、氧燃辅助能源、水冷炉壁、无渣出钢、底吹、工艺数模、过程计算机应用等；
④ 对电弧炉的新的发展也设立一章专门介绍，如直流电弧炉、竖炉—电弧炉、智能电弧炉等。

本书共17章，由李士琦、李伟立、刘仁刚统稿。各章执笔者是：

第1章 李伟立（冶金部钢铁研究总院）

第2、4章 林 纲（北京科技大学）

第3章 张孟亭（冶金部钢铁研究总院）

- 第5章 沈颐身 (北京科技大学)
第6章 范光前 (北京科技大学)
第7章 李京社 (北京科技大学)
第8章 何平 (冶金部钢铁研究总院)
第9、12、13、14章 李士琦 (北京科技大学)
第10章 傅杰 (北京科技大学)
第11章 孔祥茂 (北京科技大学)
第15章 嵇美华、徐连达、高世逵 (北京钢铁设计研究总院)
第16章 田乃媛 (北京科技大学)
第17章 刘仁刚 (冶金部规划研究院)

全书由关玉龙、赵玉祥、董学经、吴林舛审稿。

在本书的编写过程中，关玉龙教授给予许多有益的指导和建议，太原钢铁公司及林企曾总工程师给予了大力支持，特殊钢专业学会林慧国秘书长、马绍弥副秘书长给予许多帮助，《钢铁研究学报》编辑部的王征林、陈菡等同志做了许多工作，在此谨致以衷心的感谢。

由于作者们水平有限，加之电弧炉炼钢技术正在日新月异地迅速发展，本书不当之处在所难免，并望广大读者批评指正。

主 编

1994年5月

目 录

前 言

第 1 章 当代电弧炉炼钢技术和生产的发展	1
1.1 当前世界钢铁工业概况	1
1.2 主要炼钢工艺流程的技术经济特征	6
1.3 电弧炉炼钢技术的发展	15
1.4 小钢厂和短流程钢厂	19
参考文献	27
第 2 章 电弧炉炼钢用钢铁料	28
2.1 废钢铁管理	28
2.2 杂质元素及其去除	38
2.3 直接还原铁	42
2.4 碳化铁	48
2.5 脱碳粒铁	53
参考文献	54
第 3 章 现代电弧炉炼钢工艺	55
3.1 概述	55
3.2 原料	56
3.3 装料	60
3.4 废钢预热	62
3.5 熔化、升温与冶炼	62
3.6 无渣出钢和留钢操作	80
3.7 炉体维护	82
参考文献	84
第 4 章 废钢铁处理	86
4.1 废钢铁加工	86
4.2 废钢预热技术	92

参考文献	104
第5章 电弧炉炼钢氧燃辅助能源技术	105
5.1 概述	105
5.2 氧-燃烧嘴的助熔原理	106
5.3 氧-燃烧嘴	109
5.4 富氧操作	116
5.5 典型氧-燃烧嘴的使用效果	119
参考文献	122
第6章 电弧炉水冷挂渣炉壁	123
6.1 耐火材料炉衬的损耗规律	124
6.2 水冷挂渣炉壁的传热	126
6.3 水冷挂渣炉壁的结构	131
6.4 电弧炉水冷炉盖	134
6.5 水冷挂渣炉壁的设计计算	135
参考文献	143
第7章 电弧炉无渣出钢技术	144
7.1 概述	144
7.2 偏心炉底出钢电弧炉	148
7.3 偏心炉底出钢电弧炉的出钢过程	151
7.4 偏心炉底出钢电弧炉的冶炼工艺	152
7.5 偏心炉底出钢电弧炉的操作效果	152
参考文献	159
第8章 底吹电弧炉炼钢技术	160
8.1 概述	160
8.2 熔池搅拌与传热、传质	161
8.3 电弧炉底吹技术	162
8.4 底吹电弧炉的类型	166
8.5 国内外底吹电弧炉发展状况	169
8.6 电弧炉底吹搅拌的冶金效果	171
8.7 底吹电弧炉经济效益分析	174

参考文献	175
第 9 章 电弧炉的供电和运行参数的选择	176
9.1 超高功率电弧炉	176
9.2 运行电气特性	181
9.3 运行工作点的选择和设计	189
9.4 对电网的干扰及防护	193
9.5 高阻抗电弧炉和其它进展	199
参考文献	205
第 10 章 直流电弧炉技术	206
10.1 直流电弧炉的发展与现状	206
10.2 直流电弧炉的优点	209
10.3 直流电弧炉设备特点	212
10.4 直流电弧炉炼钢工艺特点	220
参考文献	223
第 11 章 竖炉—电弧炉	224
11.1 背景	224
11.2 Sheerness 的竖炉—电弧炉	225
11.3 双竖炉—电弧炉	232
11.4 复式竖炉—电弧炉	233
11.5 未来的电弧炉	234
参考文献	235
第 12 章 超高功率电弧炉炼钢过程工艺模型	236
12.1 建立工艺模型的基础和依据	236
12.2 冶金模型	246
12.3 热模型	251
参考文献	254
第 13 章 电弧炉炼钢过程计算机应用	255
13.1 概况	255
13.2 过程计算机的应用功能	257
13.3 电弧炉炼钢过程计算机系统	260

13.4	钢包炉精炼过程计算机系统	263
13.5	电弧炉炼钢厂的计算机系统	265
13.6	钢铁企业的计算机集成制造系统	266
	参考文献	271
第 14 章	智能电弧炉的发展	272
14.1	概况	272
14.2	人工智能和神经网络技术简介	273
14.3	IAF TM	276
14.4	IAF TM 的控制特征	277
	参考文献	281
第 15 章	电弧炉炼钢厂的环境保护	282
15.1	电弧炉炼钢各工序对环境造成的污染	282
15.2	污染的控制措施	288
15.3	环境保护设施投资	301
	参考文献	301
第 16 章	电弧炉炼钢—薄板坯连铸流程的发展	303
16.1	近终形状连铸工艺的提出	303
16.2	薄板坯连铸工艺现状和发展预测	305
16.3	ISP 技术简介	309
16.4	CSP 技术简介	315
16.5	ISP 与 CSP 的比较	320
16.6	CPR 技术及其试验情况简介	320
	参考文献	322
第 17 章	电弧炉炼钢厂工艺流程设计	323
17.1	概述	323
17.2	工艺设计中电弧炉炼钢技术的选择	326
17.3	电弧炉炼钢厂工艺布置	338
17.4	电弧炉炼钢厂的环保措施	344
17.5	电弧炉炼钢厂的废钢加工	345

第 1 章 当代电弧炉炼钢技术和生产的发展

1.1 当前世界钢铁工业概况

地壳中铁的资源较丰富，约占 5%。在铁矿石中铁主要以氧化物和碳酸化合物形式存在，因铁和氧的亲合力不很强，所以较容易被还原出来，生产成本较低。同时铁和碳及其它元素形成各种合金，具有能满足当代机械、建筑、运输等工业部门要求的性能，因此钢材一直是国民经济各行业的重要原材料，钢铁工业也是国民经济的基础工业之一。

钢材的主要用户是建筑业、机械工业、汽车工业、运输业等。图 1-1 是 1987 年日本普通钢用户消费钢材的比例，图 1-2 是 1985 年日本特殊钢用户消费钢材的比例。这种比例在各国都有所不同，主要取决于经

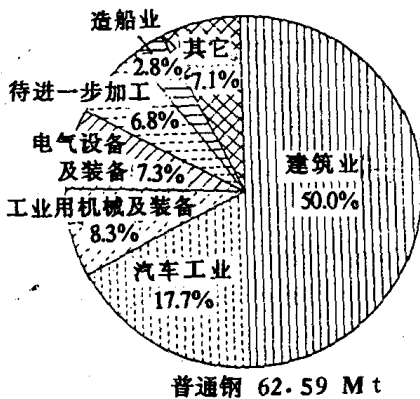


图 1-1 1987 年日本普通钢用户总消费量及比例

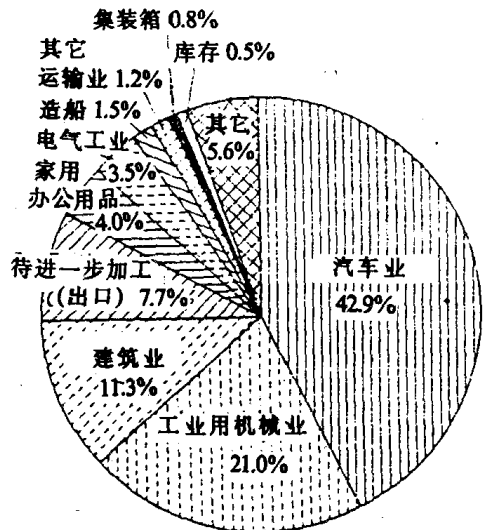


图 1-2 1985 年日本特殊钢用户消费量比例

济发展水平。在发达国家，汽车工业消费的钢材占很大比例，但发展中国家的建筑业钢材消费占很大比例。

在本世纪内，世界钢铁工业中心，由英国转向美国、前苏联，目前日本钢铁工业则处于领先地位。

随着科技的发展，出现了许多具有竞争力的新材料，如有色金属合金、陶瓷材料、塑料、复合材料等。在某些方面，这些材料能在一定程度上取代钢材。但由于钢材具有较全面、较良好的使用性能，与其它材料相比，钢材价格上升的趋势相对缓慢，所以钢材还是主要原材料之一。例如，在德国家用电器中铁基金属和其它材料(有色金属、合成材料、高分子材料等)消费量之比为1:0.7，而在汽车工业中此比为3:1。

第二次世界大战以来世界粗钢产量的变化见图1-3。可见，从世界范围看，70年代以前，钢铁工业有了高速发展，年增长率平均达6.3%左右，而此后，进入了停滞阶段。但是，只要钢铁作为重要原材料的地位不变，它仍有广大的市场。

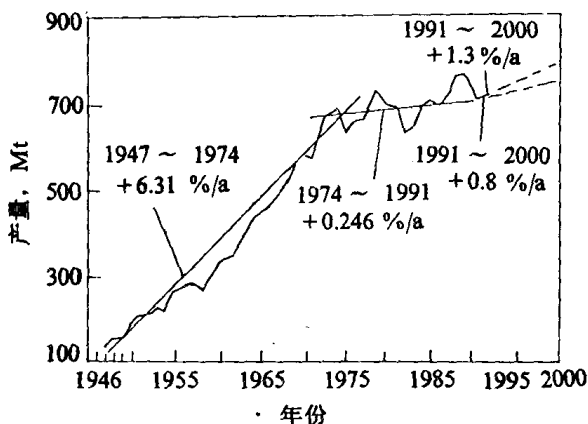


图1-3 第二次世界大战以来世界粗钢产量的发展情况

目前世界粗钢产量已渐近平衡，原因是发达国家的钢产量已达到社会所需的饱和值，人均钢材消费量日趋平衡(见图1-4)，而且发达国家的建筑、汽车、轻工产品中的钢材单位耗量有所下降，所以人均钢材消费量还有下降趋势。与此同时，发展中国家(包括新兴国家)的国民经济发展正方兴未艾，不可避免地要大力

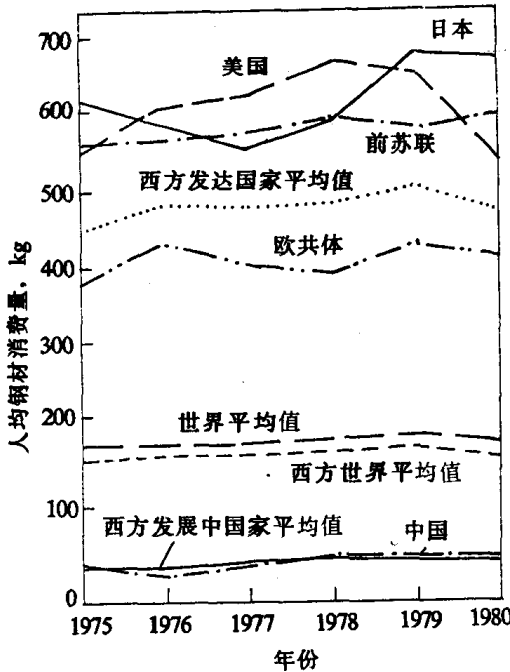


图1-4 1975~1985年世界人均钢材消费量的变化

发展钢铁工业，以满足经济发展的需要，而人均钢材消费量还远远低于世界平均水平，这说明钢铁工业在这些国家里会大大发展(见图1-5)。根据这一指数，发达国家与发展中国家的分界线似乎在200kg上下。还有一个很能说明问题的指数是钢产量力度(Steel Intensity)，它是全国钢铁消费量与国民经济总产值之比。此钢产量力度与

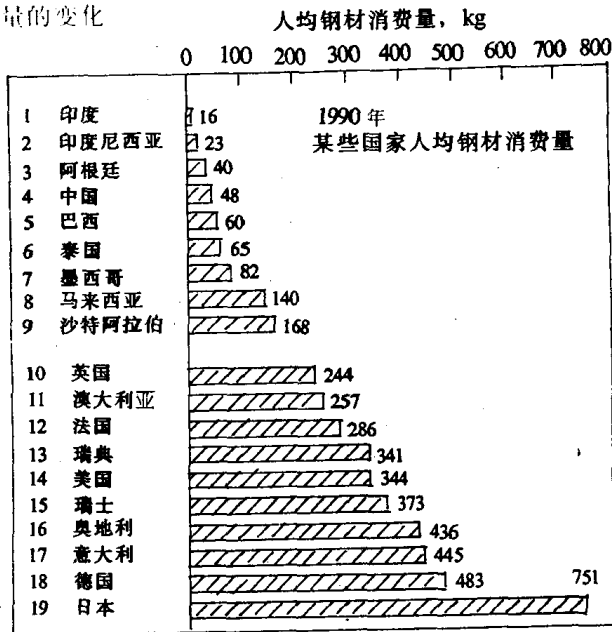


图1-5 1990年某些国家人均钢材消费量

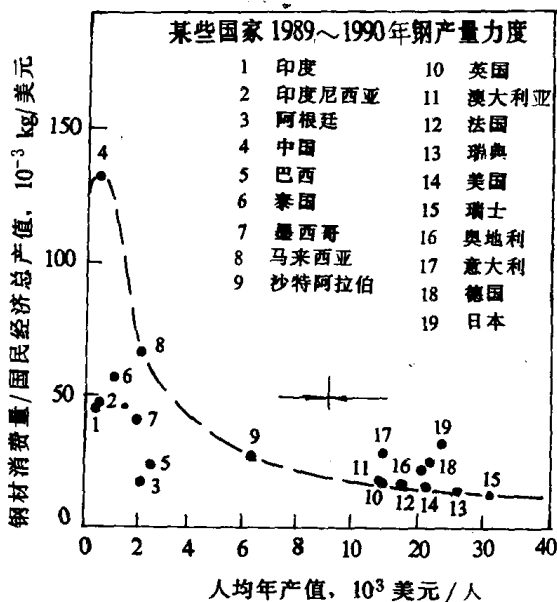


图 1-6 某些国家 1989~1990 年钢产量力度

人均年产值之间有某种关系，见图 1-6。

一般说来，每个国家都要经过图中虚线表示的过程，首先此力度在工业化过程中迅速上升，然后由于向生产高附加值产品转移而逐步下降。按这个指数，发展中国家与发达国家的分界线在人均年产值 9000 美元，钢产量力度为 $25 \times 10^{-3} \text{kg/美元}$ 左右。这从另一角度说明，发展中国家随人

均年产值的增加，钢产量力度会增加。

1991 年世界粗钢产量为 734Mt，与 1990 年相比，下降了 4.6%，其中发达国家的总产量下降 2.6%，而美国粗钢产量下降了 10.7%，亚洲国家的粗钢产量上升了 9%，独联体及东欧各国因政局动荡，经济衰退，这些国家的粗钢产量下降 18%，这都是影响世界粗钢产量的重要因素。

可以预测，随着世界形势的缓和，发达国家因建筑业、汽车制造业、造船业等相对萧条，对普通钢的需求有限，而发展中国家也在发展民族钢铁工业，所以对这些国家的出口会越来越困难。航空工业、石油工业等高科技领域所需高水平的工程用钢，既具有更高的价值，又是发展中国家尚不能参与竞争的领域，这将是发达国家钢铁工业的主要目标。因此发达国家的钢铁总产量可能继续有所下降，虽然普通钢产量减少，但因产品向高水平工程用钢及高附加值产品转移以适应消费结构的变化，其销售额仍

可维持不变或稍有上升。钢铁企业间的竞争会很激烈，迫使企业降低成本，提高质量，调整产品结构，以适应市场变化，在这些方面做得不好的企业就可能被淘汰。所以，发达国家有人认为，钢铁工业已是“夕阳”工业。

表 1-1 1993~2000 年钢材消费预测, Mt

地区或国家	消费量		年增长率 %	消费量		年增长率 %
	1993	1994		1990	2000	
美国	88.3	90.7	+2.7	96.4 ^①	99.0 ^①	+0.3 ^①
欧共体	95.1 ^②	98.1 ^②	+3.2 ^②	115.4 ^③	112 ^③	-0.3 ^③
日本	76.5	73.7	-3.7	92.6	85.0	-0.9
其它发达国家	37.4	38.9	+4.0	30.4	35.0	+1.4
拉丁美洲	27.3	28.9	+5.9	22.5	35.0	+4.5
亚洲(除日本、中国)	85.6	91.0	+6.3	70.2	120.0	+5.5
近东	11.0	11.7	+6.4	11.8	15.0	+2.4
非洲	10.8	10.5	-2.8	8.6	11.0	+2.5
中国	82.0	80.0	-2.4	54.6	100.0	+6.2
东欧	15.9	16.3	+2.5	25.1	22.0	-1.3
前苏联	75.0	65.0	-13.3	121.1	80.0	-4.1

注: ① 包括加拿大; ② 前德意志民主主义共和国除外; ③ 前德意志民主主义共和国在内。

正是这种竞争，促进发达国家钢铁工业更新装备，革新工艺流程，使其具有全新面貌，这是充分利用新技术使工艺流程不断优化过程，也是应用自动化技术和信息技术来武装的过程。

发展中国家的情况就截然不同。钢铁工业是其经济的支撑工业之一。据预测，钢材消费量的增长率会达到 3% 以上。首先，普通钢棒线材、小型材的需求量增长最大，以满足城市建设、工业设施的需要。因此，在发展初始阶段一般是以建筑钢材为主。

当经济建设进行到一定水平，国内机械工业已有一定规模，作为机械工业重要金属原料的低合金钢、工程用钢逐步形成稳定的市场需求，而本国钢铁工业对普通钢达到一定生产能力及技能后，也具有生产这些钢材的可能性，于是就会着手生产低合金

钢、工程用钢。这可以认为是第二台阶。

随着国民经济的进一步发展，本国机械工业可能会发展汽车制造业、造船业等部门，或是根据自身资源等条件，要参加国际竞争，就会发展板材、管材的生产，这就是钢铁生产在品种、质量意义上的第三台阶，当然也包容产量的含义。

目前，在发展中国家中出现了一些较发达的地区和国家，也有称之为新兴国家的。这些国家或地区的经济建设的发展速度较快，其钢铁工业具有一定特色，在不同程度上已跨上第二、甚至第三台阶，并已能向发达国家出口一定数量的普通钢材。例如，日本于1991年自韩国、巴西、中国、土耳其、罗马尼亚等国进口了钢材。

这种情况使国际钢铁贸易出现了变化。日本、西欧的钢铁出口量会下跌，发展中国家会逐步增大钢铁出口。而在相当一段时期内，独联体和东欧各国会是一个不确定因素，但可以肯定的是将会出口较大量的初、中级钢铁产品。

1.2 主要炼钢工艺流程的技术经济特征

目前，主要炼钢工艺流程是高炉—顶吹(复吹)氧气转炉—炉外精炼—铸(锭)坯；废钢—电(弧)炉—炉外精炼—铸(锭)坯两种。1985～1990年世界(中国除外)粗钢总产量中不同炼钢方法生产的数量和所占比例见表1-2。图1-7是1950年以来几种炼钢方法产钢量比例的变化。可见，氧气转炉炼钢工艺及设施在50年代中后期成熟后，很快以高生产率(出钢—出钢时间约40min，大型转炉容量约300t)、高质量(氮含量可低至20～30ppm)取得了对平炉及空气转炉炼钢的绝对优势。目前平炉钢还占有一定比例的主要原因是一些国家的技术改造因种种原因进展较慢，以致还以平炉为主要的炼钢手段之一。独联体的平炉钢比例最高，1988年为52.5%，1992年虽有所下降，也还占44%。某些东欧国家、中国的平炉钢比例也较高。某些发达国家，如美国还有一些平炉钢，但所占比例要小得多。图1-8为