

冶金保护材料 理论与实践

王兆达 编著

YEJIN BAOHU CAILIAO
LILUN YU SHIJIAN



NEUPRESS
东北大学出版社

冶金保护材料理论与实践

王兆达 编著

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 王兆达 2005

图书在版编目 (CIP) 数据

冶金保护材料理论与实践 / 王兆达编著. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2005.8

ISBN 7-81102-161-7

I. 冶… II. 王… III. 熔炼—辅助材料—研究 IV. TF044

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 048987 号

内容提要

本书从冶金保护材料属于材料科学的一个新兴的、特定的分支这一视角出发, 尝试从组成、结构与物性的相互关系和变化规律着手研究冶金辅料; 强调冶金辅料工作者必须树立一种全新的概念——充分利用钢铁工业的固体废弃物——绿色资源新概念。全书共分十三章及附录, 包括钢铁产品的质量控制, 组成和结构对冶金辅料物性的影响, 保护渣生产中的若干问题及其优化途径, 喷雾造粒法生产冶金辅料, 冶金辅料的热特性及其检测, 碱性钢包覆盖剂, 无碳预熔中空型碱性中间包覆盖剂, 保温型微碳电厂灰复合保护渣 (CB 渣), 电弧炉脱磷泡沫渣, 铬矿粉含碳冷固球团和高铬铁水脱磷, 无氟、低钠连铸结晶器保护渣, 直接还原铁 (DRI) 的初步分析, 冶金辅料中二次资源的利用及附录 (冶金辅料产品及相关参数汇集) 等内容, 全书五十余万字。书中较为系统地论述了冶金保护材料的基础理论和实践要素。本书可供高等院校钢铁冶金、环保和材料专业的本科生、研究生作为参考教材; 也可供钢铁企业和冶金辅料企业从事冶金辅料生产、开发和应用的科技工作者以及高等院校相关专业的师生作为参考书。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳农业大学印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm × 260mm

印 张: 19.25

字 数: 505 千字

出版时间: 2005 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2005 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 张德喜

责任校对: 张明丽

封面设计: 王兆平

责任出版: 杨华宁

定 价: 68.00 元

序

我国人均资源不足,仅为世界人均水平的 1/2;且原料资源利用率低,属资源消耗型发展经济。社会需要的最终产品仅占原料的 20%~30%,即 70%~80%成为废物。我国历年堆放的各种黑色金属冶金渣约 2 亿多吨,占地近 2 万亩,每年仍有近 1000 万吨的新渣弃置渣场,与农业争地。有人将固体废弃物称为“放错地方的资源”或“人工制造的矿产”。目前,我国“再生资源”流失造成的直接经济损失每年达 300 亿~400 亿元。开发利用固体废弃物,实现无害化、减量化、资源化已刻不容缓。

我国钢铁工业固体废弃物的处理和资源化取得了可喜的进展,但与日本(如新日铁固体废弃物利用率达 100%)等先进国家相去甚远。我国钢铁业目前存在的主要问题之一是资源短缺及能源消耗较高,这与传统的“大量生产、大量消费、大量废弃”的增长模式有关。循环经济是对传统增长模式进行根本的改革。

冶金辅料业是一个朝阳产业,目前我国年需求量约 400 多万吨。随着我国纯净钢、超纯净钢的增长,钢铁冶金新工艺、新装备的增加,高速连铸的迅猛发展,都需要更多新型的冶金辅料产品。

冶金辅料生产中需要消耗大量的非金属矿产品(如萤石、石墨等),而一次资源日益短缺,需要寻找新的原料和替代品。钢铁生产过程中产生大量固体废弃物——钢渣、尘、泥等——二次资源,它们是冶金辅料生产中不可多得的上乘原料(如转炉渣属预熔料、碱度高等)。从环保和循环经济的要求出发,将钢铁工业产生的固体废弃物转化成冶金辅料的原材料,使之周而复始,不仅大有前途,也是我国由钢铁大国向钢铁强国迈进的必由之路。

《冶金保护材料理论与实践》一书,是作者二十多年来从事冶金保护材料(简称冶金辅料)理论研究和生产实践经验的结晶,也是冶金辅料研究开发和生产使用的系统总结。不仅为冶金辅料业的研制、生产和使用者提供了一本很好的参考书,更是冶金辅料这一新兴学科的一份好教材。

《冶金保护材料理论与实践》的问世,不仅丰富和完善了冶金保护材料的基础理论,而且为冶金辅料生产企业由粗放型向集约型转变;冶金辅料的使用功能由单一型转化为多功能型;冶金辅料用基料由一次资源向二次资源过渡提供了有益的借鉴和思路。

冶金辅料专业要成为一门完善的新兴学科,从理论到实践还有很长的路要走,尤其是二次资源——绿色资源——在冶金辅料中的开发应用,更是任重而道远。

作者数十年如一日,理论联系实际、孜孜不倦做学问,深谙聚沙成塔、滴水穿石的哲理。进入 21 世纪后已申报了八项国家发明专利,并引领课题组获得了两项上海市 A 级高新技术成果。至今仍在潜心为冶金辅料事业的开拓贡献余力,这正是一位老知识分子的事业心和责任感的真实写照,也是我愿为之作序、推荐本书的初衷。

孟光斌

2005 年 8 月 8 日

前 言

冶金辅料是钢铁生产中不可或缺的重要材料,更是冶炼纯净钢、超纯净钢必不可少的精炼材料,要提高钢的洁净度,必须采用相应的、高净化能力的冶金辅料才能实现。

冶金辅料专业不仅是一门新兴的交叉学科,也是方兴未艾的朝阳产业。按 2003 年我国钢产量达 2.1 亿吨,2004 年达 2.6 亿吨(据报道,2005 年我国钢产能达 3.3 亿吨)计,从炼铁、炼钢、二次精炼到连铸,约需各种冶金辅料 420 万(2003 年)~460(2004 年)万吨(不包括普通造渣剂)。

冶金辅料品种繁多,按成型方法分类,有粉状、实心颗粒状和中空球状;按炉种分类,有高炉铁水用、转炉、电弧炉用和二次精炼、连铸用;按使用功能分类,有脱硫剂、脱磷剂、脱氮剂、消泡剂、钙质复合脱氧剂、泡沫渣、增碳剂、精炼渣、钢包覆盖剂、中间包覆盖剂、(方坯、矩形坯、板坯、异形坯、薄板坯等)连铸保护渣……按基料特性分类,有非预熔型、部分预熔型和预熔型……

凡新工艺、新装备问世,必然有相应的冶金辅料新品出现。如铁水预处理(三脱)工艺,就有铁水脱硅剂、脱磷剂、脱硫剂(或同时脱硫脱磷剂)、消泡剂、稀渣剂、防溅剂等;又如超高功率偏心炉底直流电弧炉(UHP-EBT-DC-EAF)的应用,就有高效脱磷泡沫渣、特种引流砂等;LF 精炼炉出现后,就有 LF 炉脱硫渣、LF 炉埋弧渣、预熔型精炼渣等;高效连铸和近终形连铸的发展,就有高速连铸结晶器保护渣、超低碳钢用连铸结晶器保护渣、不锈钢连铸结晶器保护渣、发热型连铸结晶器保护渣、薄板坯连铸结晶器保护渣、异型坯连铸结晶器保护渣等。

冶金辅料专业涉及炼铁学、炼钢学、冶金物理化学、冶金反应工程学、材料学、无机材料热物性学、钢铁工艺岩相学、冶金辅料热特性检测技术、冶金辅料制造工艺和专用制造装备、中间包冶金学乃至结晶器冶金学、冶金辅料冶金学等。

冶金辅料属于材料科学的一个新兴的、特定的分支,研究冶金辅料应从组成、结构与物性的相互关系和变化规律着手,进而渗透至冶金辅料的制备和加工工艺,使之能预测并最终设计出符合要求物性的冶金辅料;同时可指导发掘二次资源用于冶金辅料基料的潜能。

我国已经是钢铁大国,然而还不是钢铁强国。要实现钢铁强国的愿望,必须大力发展纯净钢和超纯净钢;而发展纯净钢和超纯净钢,除了装备和工艺技术条件外,开发高效、多功能、高净化能力的冶金辅料,是其必备条件之一。

“炼钢就是炼渣”一语中的。脱氧、脱氢、脱氮、脱硫、脱磷、脱碳等反应,除形成气体产物外,其余反应均在渣-钢界面进行,因而冶金辅料的成渣性能、熔渣的流动性、反应能力(吸附非金属夹杂物的能力)至关重要。对冶金辅料测定其熔点、熔速、黏度、表面张力和凝固点等,使之符合钢种要求特定的目标值(范围),是确保冶金辅料使用质量稳定的基本保证。

选材的重要性已经为理论和实践所证实,2004 年我国铁矿石进口量已超过总用量的

60%，我国所谓的“物博”已不复存在，按传统习惯大多以矿产品作为冶金辅料基料之路将越走越窄。我国钢铁工业存在的资源短缺及能源消耗较高等问题，与传统的“大量生产、大量消费、大量废弃”的增长模式有关。钢铁工业固体废弃物——各类钢铁渣、尘泥——的合理应用，为冶金辅料的发展开拓了新路。冶金辅料与钢铁生产相伴相随，冶金辅料产业是依附于钢铁工业的支柱产业。我国年耗各类冶金辅料达400余万吨(尚不包括普通造渣剂)，常规情况下，需消耗大量非金属矿产品作为原料，不少产地矿源(如萤石、石墨等)几近枯竭。而钢铁工业固体废弃物(如钢渣、尘、泥等)则泛滥成灾，不仅严重污染环境，还直接影响我国钢铁工业可持续发展。

转炉钢占全国钢产量的70%以上，转炉钢渣约占转炉钢产量的10%~11%，每年转炉钢渣数量达2500余万吨。首先，转炉钢渣属预熔料，这是得天独厚的优势；二是碱度高($R>4$)，可开发相应多种冶金辅料产品；三是成本远低于高炉水渣，可进一步降低冶金辅料产品成本，提高其市场竞争能力。

从环保和循环经济要求出发，冶金辅料的原料采用二次资源(固体废弃物)替代一次资源(矿产品)不但可能(已经开发，用于中、高档冶金辅料产品)，而且是必然趋势；冶金辅料正在向直接还原/熔融还原(含碳冷固球团)延伸；更为重要的是研发冶金辅料使用后的再生处理技术(如转炉渣高温碳热还原脱磷后重新利用)，这些都是冶金辅料领域利国利民的前沿技术，必须予以高度重视。

冶金辅料产业必须摆脱低水平反复循环的格局，解决好冶金辅料单耗高、功能单一；高铬钢水脱磷保铬；无氟冶金辅料；充分利用二次资源及其使用后的再生处理技术等难题，强调理论和实践的密切结合，注重选材和热特性的检测，系统归纳和总结前人的经验，用科学的方法和手段(包括连铸保护渣性能的人工神经网络模型预测及连铸渣在结晶器中熔融行为的计算机仿真)来指导高净化能力冶金辅料的开发工作至关重要。

全书编著过程中，贯穿了二次资源循环利用的基本观点，强调冶金辅料工作者必须树立一种全新的概念——充分利用固体废弃物——绿色资源新概念，挖掘钢铁渣预熔料的潜能，使之周而复始，绽放出璀璨的硕果。本书可供高等院校钢铁冶金和材料专业的本科生、研究生作为参考教材；也可供钢铁企业和冶金辅料企业从事冶金辅料生产、开发的科技工作者及高等院校相关专业的师生作为参考书。

鉴于至今未见“冶金保护材料”的专著，本书是结合作者从事冶金保护材料工作二十余年的成果和积累，并参考大量文献编著，仅以此书抛砖引玉。在编写过程中，得到宝钢炼钢厂、宝钢综合开发公司和盘龙公司的关心和支持，并由原宝钢综合开发公司总经理孟光斌专为本书作序，在此一并致谢。

囿于作者才疏学浅，书中如有不当和疏漏之处，还望不吝指正。

王兆达

2005年8月于宝钢综合开发公司

目 录

第 1 章 钢铁产品的质量控制	1
1.1 我国纯净钢水平	1
1.2 电渣浇注 YOCr18Ni9 易切钢	5
1.3 提高 40Cr 钢力学性能的途径——全程碳控制	9
1.4 日本、韩国开发动向	16
1.5 少渣炼钢工艺(ZSP)的发展	19
1.6 电炉转炉交变操作全能炼钢系列工艺	20
1.7 从电炉走向转炉的聚合吹氧	22
1.8 巴登钢厂等创冶炼新纪录	23
1.9 山阳特钢改进洁净钢生产工艺	24
1.10 IMEXSA 钢厂使用 100% 还原铁的效果	25
1.11 用在 ORI Martin 能源和石墨电极消耗的减少	26
参考文献	30
第 2 章 组成和结构对冶金辅料物性的影响	32
2.1 石墨渣、粉煤灰渣基料的结构与物性	32
2.2 粉煤灰保护渣熔渣玻璃体结构理论	38
2.3 粉煤灰保护渣各组分中各种氧化物的结晶学特性	39
2.4 相图及固渣工艺岩相	42
2.5 连铸保护渣的结晶矿相	45
2.6 保护渣渣膜结构的分析	48
2.7 结 语	51
参考文献	52
第 3 章 保护渣生产中的若干问题及其优化途径	53
3.1 保护渣生产中的若干问题	53
3.2 提高保护渣生产质量的途径	55
3.3 二次资源在冶金辅料中的开发应用	59
3.4 结 语	62
参考文献	63
第 4 章 喷雾造粒法生产冶金辅料	64
4.1 喷雾干燥技术	64

4.2 冶金辅料专用喷雾造粒机的选择	67
4.3 喷雾造粒法生产冶金辅料的优点	71
参考文献	74
第5章 冶金辅料的热特性及其检测系统	76
5.1 冶金辅料的热特性	76
5.2 化学成分与热特性的关系	81
5.3 高速连铸保护渣对热特性的要求	82
5.4 热特性检测系统	84
5.5 结 语	92
参考文献	93
第6章 碱性钢包覆盖剂	95
6.1 酸性钢包覆盖剂	95
6.2 关于钢包粘渣	100
6.3 碱性钢包覆盖剂	103
参考文献	109
第7章 无碳预熔中空型碱性中间包覆盖剂	111
7.1 中间包覆盖剂现状	111
7.2 中间包操作和中间包覆盖剂	115
7.3 碱性中间包覆盖剂的功能	117
7.4 TB-P 无碳预熔中空型碱性中间包覆盖剂的研制开发	118
参考文献	124
第8章 保温型微碳电厂灰复合保护渣(CB渣)	125
8.1 复合渣应用现状	125
8.2 保温型微碳电厂灰复合保护渣(CB渣)	136
8.3 不锈钢模铸复合型固体保护渣的研制和应用	142
8.4 关于中心增碳问题的归纳	151
8.5 结 语	152
参考文献	153
第9章 电弧炉脱磷泡沫渣	155
9.1 氧化脱磷的一般概念	156
9.2 泡沫渣的定义	158
9.3 泡沫渣的作用	161
9.4 影响泡沫渣的因素	161
9.5 泡沫渣的控制	165
9.6 关于第二固相悬浮质点	166

9.7 现代电弧炉炼钢技术和泡沫渣	169
9.8 我国泡沫渣的应用现状	171
参考文献	173
第 10 章 铬矿粉含碳冷固球团和高铬铁水脱磷	175
10.1 BaO 渣系的脱磷机制	176
10.2 铬矿粉含碳冷固球团	185
10.3 高铬铁水脱磷	192
参考文献	194
第 11 章 高速连铸和无氟、低钠连铸结晶器保护渣	196
11.1 高效连铸	196
11.2 高速连铸结晶器保护渣	198
11.3 无氟连铸结晶器保护渣	208
11.4 低钠连铸结晶器保护渣	213
参考文献	215
第 12 章 直接还原铁(DRI)的初步分析	217
12.1 国内外概况	218
12.2 DRI 工艺和技术	223
12.3 国内生产现状	227
12.4 直接还原铁(DRI)的应用	230
12.5 有利和不利因素初步分析	242
12.6 尚需开展的前期工作和几点建议	243
参考文献	244
第 13 章 冶金辅料中二次资源的利用	246
13.1 炉渣的定义和物化特性	246
13.2 二次资源在冶金辅料中的应用	251
参考文献	273
附录 冶金辅料产品及相关数据汇集	275
附表 1 冶金辅料常用原料及特种原料性能参数	275
附表 2 钢包覆盖剂理化性能	276
附表 3-1 中间包覆盖剂理化性能(1)	277
附表 3-2 中间包覆盖剂理化性能(2)	278
附表 3-3 中间包覆盖剂理化性能(3)	278
附表 4 国内外使用引流剂及生产条件	279
附表 5 泡沫渣技术参数	280
附表 6-1 复合及低 N 增碳剂原料技术指标(1)	281

附表 6-2 复合及低 N 增碳剂原料技术指标(2)	282
附表 6-3 复合及低 N 增碳剂原料技术指标(3)	283
附表 7 有参考价值的连铸结晶器保护渣配方	284
附表 8 普碳、低合金、20g, 45 [#] , 60Si ₂ Mn 板坯、方坯、矩形坯经典连铸结晶器保护渣	285
附表 9-1 连铸中空颗粒保护渣及其使用范围(1)	286
附表 9-2 连铸中空颗粒保护渣及其使用范围(2)	286
附表 10 板坯连铸结晶器保护渣及配套中间包覆盖剂理化性能	287
附表 11 大生产使用的、以硅灰石为基料的(含 B ₂ O ₃)方、矩形坯连铸结晶器保护渣	287
附表 12 大生产使用的、以熟料为基料的连铸结晶器保护渣	288
附表 13 大生产使用的、以水泥熟料为基料的、中空球形连铸结晶器保护渣	289
附表 14-1 板坯连铸保护渣系列表(1)	290
附表 14-2 板坯连铸结晶器保护渣系列表—适用钢种(2)	290
附表 15-1 板坯连铸结晶器保护渣(1)	291
附表 15-2 板坯连铸结晶器保护渣(2)	292
附表 16 超低碳钢板坯用连铸结晶器保护渣	293
附表 17-1 不锈钢连铸及模铸渣(1)	294
附表 17-2 不锈钢连铸及模铸渣(2)	295
附表 17-3 不锈钢连铸渣及模铸渣(3)	296
附表 17-4 不锈钢连铸渣及模铸渣(4)	297
附表 18 特殊钢连铸结晶器保护渣设计成分及相关参数	298

第 1 章 钢铁产品的质量控制在

随着现代化工业的高度发展,对钢材质量的要求愈来愈高。如深冲钢、管线钢、不锈钢及超低磷、超低硫钢等。钢铁产品的质量主要反映在表面质量和内在质量两个方面,一是有害元素(S, P, H, O, N, 甚至 C)和痕量元素(如 As, Sn, Sb, Se, Cu, Pb 及 Bi)含量低;二是非金属夹杂物(尤其是脆性夹杂物)含量低。

目前国内外大规模生产的 IF 洁净钢中 C, S, P, N, H 质量分数及 $T[O]$ 之和不大于 100×10^{-6} , 不少冶金学家将超洁净钢界定为 C, S, P, N, H 质量分数及 $T[O]$ 之和不大于 40×10^{-6} , 诸如超低硫钢要求 $w(S) \leq (5 \sim 10) \times 10^{-6}$, 超低磷钢 $w(P) \leq 20 \times 10^{-6}$, 低氮钢中 $[N]$ 含量不大于 20×10^{-6} , 显微夹杂钢要求钢中夹杂物尺寸不大于 $20 \mu m$ 等。零非金属夹杂钢为钢中夹杂物高度弥散、夹杂物尺寸不大于 $1 \mu m$ 的钢^[1]。采用中频感应炉冶炼, 真空感应炉初精炼, 真空凝壳炉或真空电子束熔炼深精炼可使超洁净钢中的 $w(Al_{sol}) < 10 \times 10^{-6}$, $w(S) < 10 \times 10^{-6}$, $T[O] < 2 \times 10^{-6}$, $[N]$ 含量小于 15×10^{-6} 。应针对不同钢种和用途, 应用相应的精炼技术, 达到超洁净钢对纯净度的要求。

众所周知, 炼钢就是炼渣。要大力发展纯净钢, 务必通过加入对应的各种冶金辅料, 将钢水中的杂质元素(S, P, H, O, N, C)和非金属夹杂物(变性或)去除。为此, 必须同步开发高净化能力、多功能的冶金辅料。此外, 我国钢铁企业要进入世界五百强, 首先要实现高效节能、清洁生产。推广少渣炼钢已是不争的事实^[2](宝钢三座 300 吨转炉已采用少渣炼钢工艺生产超低磷钢数千炉, 可比常规工艺减少钢渣三分之二)。顺应少渣炼钢开发新型高效冶金辅料已迫在眉睫。如何应对, 令人深思。

1.1 我国纯净钢水平

纯净钢中杂质元素单体控制水平发展趋势^[3]见表 1-1; 国内外连铸坯中 $T[O]$ 水平见表 1-2; 纯净钢中杂质元素单体控制水平变化曲线见图 1-1; 国内外先进钢铁厂各工序钢中吸氮情况^[4]见表 1-3。

表 1-1

纯净钢中杂质元素单体控制水平发展趋势

$\times 10^{-6}$

项 目	1960 年	1970 年	1980 年	1990 年	1996 年	2000 年
$w(C)$	200	80	30	10	5	4
$w(S)$	200	40	10	4	5	0.6
$w(P)$	200	100	40	10	10	3
$w(N)$	40	30	20	10	10	6
$w(H)$	3	2	1	0.8	<1	0.5
$T[O]$	40	30	10	7	5	2

表 1-2

国内外连铸坯中 $T[O]$ 水平 $\times 10^{-6}$

厂名	新日铁 八幡厂	NKK	住友	川崎 千叶厂	德国迪 林格厂	英国钢 公司	加拿大 Dofasco 厂	巴西 Usiminas 厂	奥地利 Linz 厂	浦项	中钢 公司	宝钢	武钢
总氧量	26	20	22	20	15	<10	13	13~20	16	<10	12	16~30	38

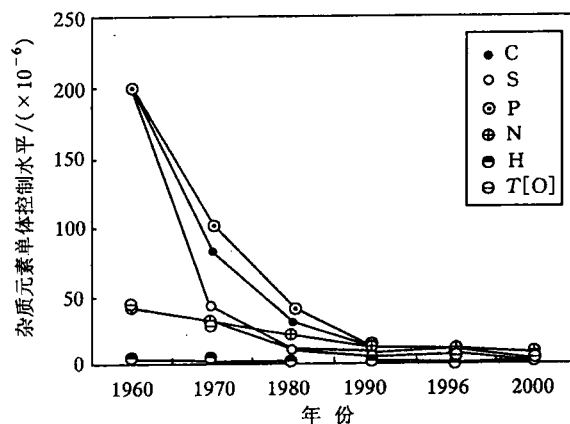


图 1-1 纯净钢中杂质元素单体控制水平变化曲线

表 1-3

国内外先进钢铁厂各工序钢中吸氮情况/ $\Delta[N]$ $\times 10^{-6}$

钢 厂	工 艺	[N]	时 间
多法斯科钢公司	钢包—中间包	<1	
	中间包—结晶器	1.8	1992 年
	中间包—结晶器	0.3	
威尔顿钢公司	中间包—结晶器	0.52	1995 年
	钢包—结晶器	4~10	1993 年前
威尔顿钢公司	中间包—结晶器	<5	1993 年后
	中间包—结晶器	2	1993 年
阿姆克钢公司阿什兰厂	中间包—结晶器	3	1990 年
内陆钢公司 4 号 BOF	中间包—结晶器	4	1995 年
美钢联费尔菲尔德厂	钢包—中间包	7.5	1995 年前
法国索拉克钢公司	钢包—中间包	0.5~1.3	1995 年
敦刻尔克厂	中间包—结晶器	1	1992 年
	钢包—中间包	3	1995 年前
	中间包—结晶器	9	1988 年
墨西哥钢公司	钢包—结晶器	5	1996 年
德国迪林格厂	钢包—中间包	5	1993 年
	钢包—结晶器	5	1993 年
中国宝钢	钢包—中间包	1.5	1995 年
中国武钢	钢包—结晶器	3.8~9.3	1995 年

1.1.1 我国属钢铁大国，但非钢铁强国

发达国家精炼比大于 95%，我国精炼比约 30%；进口量呈上升趋势(见表 1-4，表 1-5)，2002 年钢铁进口加大、出口减少，钢铁价格上升，可能会使我国的外汇流出达到 130 亿美元以上(相当于三峡工程的总投资)。据统计，按现行汇率计算，2003 年我国的单位产出能耗比美国高出 2.3 倍，比日本高出 5.1 倍，即使与人均 GDP 水平相当的国家相比，我国单位产出能耗也比菲律宾高出 1 倍以上，比埃及高出 44%。按照现行的发展模式，我国资源产出率低，而环境污染状况日益严重。2003 年，我国 GDP 约占世界的 4%，但重要资源消耗占世界的比重却很高(如钢铁为 27%)。目前，我国重要资源对外的依存度不断上升。2003 年，50% 的铁矿石和氧化铝、60% 的铜资源、34% 的原油依赖进口。与此同时，一些主要矿产资源的开采难度越来越大，开采成本增加，供给形势相当严峻^[5]。

表 1-4 钢铁生产能力和水平

2002 年连铸坯产量	2002 年连铸比	薄板坯连铸连轧产能(厚度约 70mm)	2003 年进口钢材量	2003 年连铸坯产能	美国纽柯公司薄带坯产能(厚度 0.7/2.1mm, 宽度 2m)
1.71 亿吨	93.56 %	约 1000 万吨	4305 万吨	2.4 亿吨	1000 万吨

表 1-5 同比实质性差距

项 目	300t 转炉产能/(万 t/月)	转炉渣剂单耗/(kg/t)	人均产钢量/(t/(人·年))	吨钢销售额/(美元/t)	校正吨钢能耗/(kg 标煤/t)
国 内	25	90	786	305	1236
对比单位	日本, 70	日本, 25	浦项, 1397	浦项, 352	日本, 652
差距	- 45	+ 65	- 611	- 47	+ 584

1.1.2 质量趋势

短流程钢厂和近终形连铸兼顾；少渣炼钢与钢铁精品并举；铁精矿粉含碳冷固球团回转窑直接还原新工艺(生产的 DRI 海绵铁可直接用于电炉冶炼特殊钢和优质钢)亟待发展。近年来转炉炼钢技术经济指标的变化^[6]见表 1-6。

表 1-6 近年来转炉炼钢技术经济指标的变化

年 份	1995	2000	2001	2002	2003(上半年)	备 注
利用系数/(t/(m ³ ·d))	25.11	30.72	28.08	34.57	37.70	
钢铁料消耗/(kg/t)	1109	1114	1096	1091	1089	
炉衬寿命/次	998	2688	3526	4268	4468	
转炉工序能耗/(kg/t)		32.25	26.78	32.50	23.10	- 12.81(日 NKK2001 年)
连铸比/%	51.04	86.97	89.60	92.41	94.65	89.70(国际 2001 年)
精炼比/%	13.50	26.86	25.30	28		65.5(日 2001 年真空处理比)

注：①精炼比不含吹氩喂丝；②2002 年精炼比据不完全统计。

市场对洁净钢的需求逐年增加，除了要求降低钢中非金属夹杂物含量和控制其形态、化学成分及尺寸分布外，还要求降低钢中杂质元素(如 S, P, H, N, 甚至 C)和痕量元素(如 As, Sn, Sb, Se, Cu, Pb 及 Bi)含量。国内外先进钢铁厂生产纯净钢各工序钢中全氧量和各类钢种对钢洁净度的要求^[7]见表 1-7 和表 1-8。

表 1-7

国内外先进钢铁厂生产纯净钢各工序钢中全氧量

 $\times 10^{-6}$

钢 厂	精炼方法	钢水包	中间包	结晶器	板 坯	时 间
美 洲						
内陆钢公司 4 号 BOF	LMF	30	24	21	15	1990 年
阿姆克 Middletown 厂	RH	60/105	15/40(25)		16.9/23.8	1991 年
U.S 钢公司 Lorain 厂 BOP	真空脱气				13/17	1991 年
北美某厂		20/35		20/30	10/15	1991 年
Timken 公司 Harrison 厂				20/30		1991 年
加拿大					13	1992 年
多法斯科厂	LF+RH		19		13.2	1994 年
LTV 钢公司克力夫兰厂			21/27			1995 年
阿特莱斯不锈钢厂	气体搅拌	36/45	30/38			1995 年
美国 Weirton 炼钢车间	Dravo-RH		23 ± 10	22 ± 12		1995 年
巴西 Usiminas 厂					13	1993 年
欧 洲						
芬兰劳塔鲁基拉赫钢厂		48 ± 12	32	38	17	1993 年
芬兰 Koerhar 厂(高碳钢)	气体搅拌	32		23		2000 年
德国 Dillinger 厂			10/15	10	≤15	1994 年
荷兰霍戈文			ACAK15/32			1994 年
艾莫伊登厂	真空脱气		IF 钢 20/30			1994 年
法国索拉克 Dunkirk 厂	RH-DB		20/50			1997 年
英钢联	RH				< 10	1994 年
奥钢联林茨厂					16	1994 年
亚 洲						
川崎制铁千叶厂	RH	40			20	1989 年
川崎制铁水岛厂	KTB(R = CaO / Al ₂ O ₃)	< 25(1.8)			< 55	1996 年
		< 35(1.2)				
		< 40(0.8)				
NKK, 传统 RH	RH	17				1993 年
NKK, RH+ 喷粉	RH 喷粉	7				1993 年
NKK, 传统 VOD	VOD	33.8				1993 年
NKK, VOD+ 喷粉	VOD+ 喷粉	25.1				1993 年
NKK 京滨厂 1 号炉					< 20	1991 年
新日铁 Hachiman 厂					26	1989 年
韩国浦项钢公司	RH	25/31				1993 年
韩国浦项钢公司					< 27	1991 年
韩国浦项钢公司					< 10	1991 年
中国台湾省中钢公司	LF+RH	< 30			12	1994 年
中国宝钢集团公司	CAS-OB	172.5	93		48.8	1992 年
中国宝钢集团公司	RH	70	57	21/25	13.8/17.5	1995 年
中国武钢集团公司	RH+LF	71/73			14.7	2002 年

钢的洁净度取决于钢中非金属夹杂物的数量、形态和尺寸分布, 因钢种及其用途不同而定义不同, 如表 1-8 所示。

表 1-8 各类钢种对钢洁净度的要求

钢 种	夹杂物质量分数/ $\times 10^{-6}$	夹杂物最小尺寸/ μm
IF 钢	$w(\text{C}) \leq 30, w(\text{N}) \leq 40, T[\text{O}] \leq 40$	
汽车板和深冲钢	$w(\text{C}) \leq 10, w(\text{N}) \leq 50$ $w(\text{C}) \leq 30, w(\text{N}) \leq 30$	100
DI 罐	$w(\text{C}) \leq 30, w(\text{N}) \leq 30, T[\text{O}] \leq 20$	20
压力容器用合金钢	$w(\text{P}) \leq 70$	
合金钢棒材	$w(\text{H}) \leq 2, w(\text{N}) \leq 10 \sim 20, T[\text{O}] \leq 10$	
抗 HIC 钢(酸性介质油气管)	$w(\text{P}) \leq 50, w(\text{S}) \leq 10$	
管线钢	$w(\text{S}) \leq 30, w(\text{N}) \leq 35, T[\text{O}] \leq 30$	100
连续退火薄板	$w(\text{N}) \leq 20$	
焊接厚板	$w(\text{H}) \leq 1.5$	
轴承钢	$T[\text{O}] \leq 10$	15
轮胎钢芯线	$w(\text{H}) \leq 2, w(\text{N}) \leq 40, T[\text{O}] \leq 15$	10
晶粒未取向电磁钢板	$w(\text{N}) \leq 30$	
厚板	$w(\text{H}) \leq 2, w(\text{N}) \leq 30 \sim 40, T[\text{O}] \leq 20$	单个夹杂: 13; 夹杂物簇: 200
线材	$w(\text{N}) \leq 60, T[\text{O}] \leq 30$	20

1.2 电渣浇注 YOCr18Ni9 易切钢^[8]

1.2.1 电渣浇注特点

电渣浇注是在电渣重熔的基础上发展起来的新工艺,主要用于生产大型锻造用钢锭,工艺过程为将熔炼合格的钢水直接铸入装有过热液渣(1600~1700℃)的水冷结晶器(或锭模)中,随着浇注的进行,同时用自耗或非自耗电极进行电渣加热,直至浇注完毕,然后在钢锭头部继续加热一定时间充分补缩,最后冷凝成电渣浇注钢锭。电渣浇注将合成浇注、液渣保护浇注和电渣重熔三者结合为一体,兼备三者特点,从而发展成为一种生产高质量钢锭的新工艺。电渣浇注示意图见图 1-2,电渣浇注现场照片见图 1-3。

随着手表制造工艺的高速发展,对表壳用钢的质量、成本等均提出

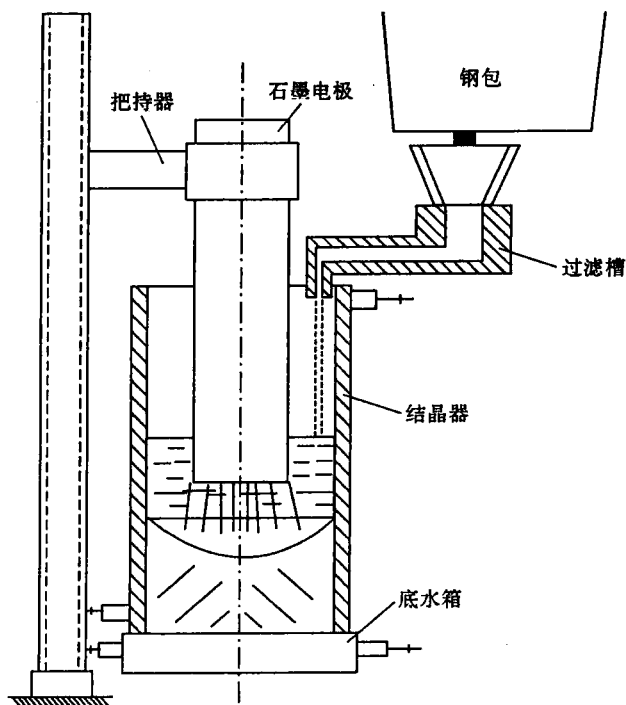


图 1-2 电渣浇注示意图

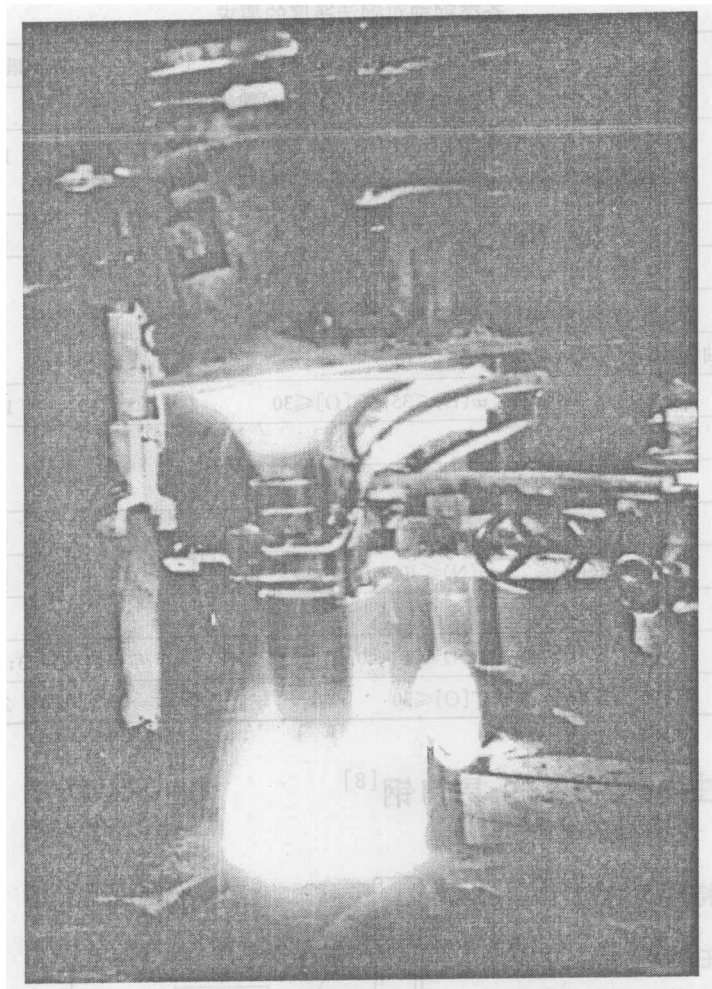


图 1-3 电渣浇注现场

更高的要求。原采用感应炉熔炼→电渣重熔→锻造开坯→250轧机一火成材。但由于重熔易切表壳用钢时，易切削元素硫的烧损大、偏析严重，且重熔时电耗高、产量低、生产成本低。为此探索采用电渣浇注 YOCr18Ni9 易切钢的可能性，并与电渣重熔工艺作一对比。

1.2.2 试验概况

(1) 试验钢号及化学成分质量分数(见表 1-9)

试验钢号及化学成分质量分数								%
$w(C)$	$w(Mn)$	$w(Si)$	$w(P)$	$w(S)$	$w(Cr)$	$w(Ni)$	$w(Mo)$	$w(Cu)$
≤ 0.08	1.5~1.8	≤ 0.8	≤ 0.035	0.065~0.12	17~19	8~11	0.3~0.6	0.25~0.3

(2) 试验设备

- ① 100kg 碱性中频感应电炉(铸造自耗电极 $\Phi 40\text{mm}$);
- ② 100kg 双臂交替式单相电渣炉;
- ③ 结晶器尺寸(见表 1-10);

表 1-10

结 晶 器 尺 寸

	上 口	下 口	高度/mm	侧锥度/%	高宽比
圆形结晶器	$\Phi 140\text{mm}$	$\Phi 120\text{mm}$	570	1.75	4.4
方形结晶器	$120 \times 120\text{mm}$	$100 \times 100\text{mm}$	1050	0.95	9.5

④浇注用流钢槽：采用模铸用短流钢砖和单孔流钢砖置于槽钢内构成，总长度为260mm，水口孔径 $\Phi 10\text{mm}$ ，流钢槽浇口孔径 $\Phi 40\text{mm}$ 。

(3) 感应炉冶炼

冶炼采用100%返回料，补加Cr, Ni, Mo, Cu, 最终用0.1% Si-Ca脱氧，硫磺粉用铜箔包裹后插入炉中、充分搅拌后出钢，出钢温度控制为1650~1680℃(热电偶)，硫的烧损按50%左右计。

(4) 电渣浇注

①电渣浇注要领。先在结晶器内用同钢种自耗电极引弧化渣，待渣温合适，将感应炉冶炼合格的钢水铸入事先预热的钢包，钢包对中流钢槽浇口后铸入钢水，铸毕用5min时间进行电渣重熔，再用2min时间封顶补缩，停电后10~12min再行脱锭。从化渣至铸毕，小锭约需25min，大锭约需52min，电渣浇注时钢温控制在1500~1510℃(热电偶)。

②电渣浇注工艺参数选择。渣制度见表1-11，浇注速度见表1-12。

表 1-11

电渣浇注渣制度

	小 锭	大 锭
渣 系	① $\text{CaF}_2 70\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 30\%$ (外加10% SiO_2) ②纯 CaF_2	同左
渣量/kg	2.4	3.5
渣饼厚度/mm	$55 \pm$	$70 \pm$
铸前渣温/℃	1580	1620
渣烘烤制度	600°C , $>8\text{h}$	同左

表 1-12

浇注速度

	铸速/(kg/s)
小 锭	0.528
大 锭	0.533

注：钢包及流钢槽均经700℃，大于8h的烘烤。

③电制度及冷却水温度控制(见表1-13)

表 1-13

电制度及冷却水温度控制

	工作电流/A	工作电压/V	结晶器出水温度/℃
引弧化渣	800	38/41	28/45
浇 铸	1600	38	60/75
重 熔	1600	38	75/55
封顶补缩	1600A→0(停电自降); (送电)→1600A; (停电自降)→0	38	55