

洁净钢

— 洁净钢生产工艺技术

IIISI Study on Clean Steel

**State of the Art and Process Technology in
Clean Steelmaking**

国际钢铁协会 编
中国金属学会 译



冶金工业出版社

<http://www.cnmip.com.cn>

洁 净 钢

——洁净钢生产工艺技术

国际钢铁协会 编
中国金属学会 译

北 京
冶金工业出版社
2006

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2006-4165 号

IISI Study on Clean Steel

Originally Published by International Iron and Steel Institute

Copyright© 2004 by Secretary General International Iron and Steel Institute

All Rights Reserved

内 容 简 介

本书的原著是由国际钢铁协会组织国际上知名专家收集近年来有关全球范围的洁净钢生产技术和研究进展的材料撰写而成的,是我国加入国际钢铁协会后,第一次引进的相关技术资料,文献资料较新。本书内容包括导论、相关文献调研、世界范围内的工业实践等,阐述了近年来全球范围的洁净钢研究的最新进展以及洁净钢工业生产方面的情况,同时还介绍了国际钢铁协会所属会员国在洁净钢研究方面的动态。

本书可供国内钢铁企业从事冶炼研究人员、工程技术人员阅读,也可供高等院校钢铁冶金专业的教师和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

洁净钢:洁净钢生产工艺技术/国际钢铁协会编. 中国金属学会译. —北京:冶金工业出版社,2006.10

书名原文:State of the Art and Process Technology in Clean Steelmaking

ISBN 7-5024-4106-9

I. 洁… II. ①国… ②中… III. 低碳钢—炼钢
IV. TF761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 120691 号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 张 卫(联系电话:010-64027930;电子信箱:bull2820@sina.com)

刘小峰 王雪涛 张爱平 美术编辑 李 心

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2006 年 10 月第 1 版,2006 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 24 印张; 577 千字; 368 页; 1—3500 册

65.00 元

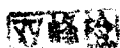
冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定 价
冶金流程工程学	65.00 元
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	188.00 元
现代冶金学(钢铁冶金卷)	36.00 元
钢铁冶金学(炼铁部分)(第2版)	29.00 元
钢铁冶金学(炼钢部分)	35.00 元
冶金传输原理	40.00 元
传输过程基本原理	26.00 元
冶金物理化学	39.00 元
冶金热力学数据测定与计算方法	28.00 元
实用无机物热力学数据手册(第2版)	178.00 元
冶金过程动力学导论	45.00 元
冶金试验研究方法	29.00 元
冶金工程实验技术	39.00 元
冶金工艺工程设计	20.00 元
铁合金生产实用技术手册	149.00 元
高炉炼铁生产技术手册	118.00 元
炉外精炼及铁水预处理实用技术手册	146.00 元
中国电炉流程与工程技术文集	60.00 元
现代电炉——薄板坯连铸连轧	98.00 元
薄板坯连铸连轧(第2版)	45.00 元
薄板坯连铸连轧工艺技术实践	56.00 元
冶金设备液压润滑实用技术	68.00 元
金属电磁凝固原理与技术	20.00 元
金属凝固过程中的晶体生长与控制	25.00 元
感应炉熔炼与特种铸造技术	29.00 元
新材料概念	89.00 元
中间包冶金学	35.00 元
相图原理与冶金相图	20.00 元
感应炉熔炼与特种铸造技术	29.00 元
钢铁冶金及材料制备新技术	28.00 元
转炉溅渣护炉技术	25.00 元
氧气顶吹炼钢工艺与设备(第2版)	29.80 元
转炉炼钢问答	29.00 元
转炉炼钢生产	58.00 元
新编连续铸钢工艺及设备	20.00 元



编 者

Prof. Dr.-Ing. Klaus Wünnenberg

Dr Stuart Millman

Michele Nadif

Christian Marique

Morihiro Sumida

Dr.-Ing. Hans-Jörn Weddige

译 者

王新华 等

审 校

姜钧普 王福明

序 言

近些年来,国际钢铁协会(IISI)及其技术委员会(TECHCO)组织开展有关洁净钢生产工艺技术的研究早有耳闻。去年,仲增墉博士从国际钢铁协会得到了该书的英文版,并送我处一阅,以供参考。简要阅读之后,感到此书对中国钢铁界有很高的参考价值,于是建议中国金属学会组织有关专家译成中文,以利中国广大钢铁冶金工作者更方便地共享国际上的成果。

经过仲增墉博士等人的努力,国际钢铁协会允许在中国发行中译本,而且免去版权费,真是太好了。在此作为一名中国冶金工作者,我感到应该向国际钢铁协会(IISI)及其技术委员会(TECHCO)的慷慨和卓有成效的工作,表示由衷的感谢。我为此书的中译本出版而感到欢欣,并向钢铁界同行推荐此书。同行专家们,看一看吧,您将有所收获;同行企业家们,读一读吧,您的企业将会得到新的竞争力。

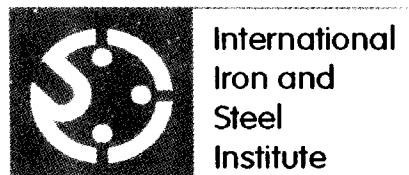
关于洁净钢的定义,此书虽然指出没有“固定的定义”,然而细看之后,此书仍然给出了一个很好的定义,指出:“洁净钢应定义如下:当钢中的非金属夹杂物直接或间接地影响产品的生产性能或使用性能时,该钢就不是洁净钢;而如果非金属夹杂物的数量、尺寸或分布对产品的性能都没有影响,那么这种钢就可以被认为是洁净钢。”这一定义是恰当的,因为不同钢种,在不同生产过程和使用过程中,对其所要求达到的洁净度是不同的。同时,也应该说,洁净钢的概念不是为了制备样品,也不是一味追求纯净,而是为了高效率、低成本地生产出成批可满足用户要求的优质商品钢材。

此书是一本理论与生产实际结合的书,既有文献调研,又有工业实践,而且指出,洁净钢现存最大的问题是生产过程中的非稳定现象,这些现象与我国的现状是极其相似的。因此,如果仔细阅读并能认真地联系各钢厂生产过程中工艺、装置(从铁水预处理、炼钢、二次冶金直到连铸等)的实际问题,相信会对钢厂的发展战略和方向,对技术进步乃至基础研究的方向和目标的选择,都会有所裨益。

仲增墉

2006年6月25日于北京

Foreword



Clean Steel is a topic of high importance in our industry. By cleanliness we understand the absence of any unwanted constituents in our steels' composition and a very homogeneous distribution across the melts and solidified products. The cleanliness of our products determines their properties through our ability to engineer desired microstructures. This challenging task does not only concern nano-scale microstructures, but involve many hundred tons of molten steel in one charge being brought to the desired composition.

IISI as the strategy forum for the world steel industry has addressed clean steel several times, as it remains an important topic in enterprises around the world.

This publication presents findings of an IISI Working Group "Clean Steel-State of the Art and Process Technology in Clean Steelmaking" active between 2001 and 2004. It was chaired by Prof. Dr. Klaus Wünnenberg, then Mannesmann Forschungsinstitut, and combined experts from IISI member companies around the world. Together they compiled an excellent overview of current knowledge, both in academia and industry, and hence contributed to advancing and diffusing knowledge in the IISI Membership and the steel industry in general.

We have been honoured that the Chinese Society for Metals (CSM) has taken such a strong interest in the current IISI study, and has offered to translate it into Chinese. We are pleased that this study now reaches an even wider audience in our profession and expect it to benefit the industry as a whole.

We may expect that clean steel will be revisited soon again in order to capture the ongoing progress in the industry and its technology. We are confident that our Chinese IISI members, and notably CSM amongst them, will then be included as fully participating contributors.

Secretary General
International Iron and Steel Institute

Project Leader Clean Steel
International Iron and Steel Institute

中译本序

洁净钢是钢铁工业的一个重要课题。我们对洁净度可理解为在钢中要尽可能地去掉有害组元,在冶金熔体、铸坯和钢材中要求有非常均匀的分布。有了钢材的高洁净度才能获得令人满意的微观组织,进而保证钢的使用性能。当今钢铁工业所面临的挑战不仅是纳米级的微观结构,也包括一炉几百吨的钢水能否具有一个理想的组成。

国际钢铁协会(IISI)作为世界钢铁工业的战略论坛已多次强调过洁净钢的重要性,因为对于全世界钢铁企业来说这始终是一个重要课题。

这本书集中了2001~2004年间IISI洁净钢工作组在“当代洁净钢生产工艺技术”方面的研究体会。该项工作是由德国曼内斯曼公司研究院负责,联合会所属成员单位的专家一起完成的。专家们对当今有关洁净钢方面的知识不仅在学术上,而且在工业实践方面都做了精彩的综述。该书对进一步发展洁净钢技术与IISI成员之间的相互交流以及对全世界钢铁工业都做出了有益的贡献。

中国金属学会(CSM)对此书的浓厚兴趣并将此书翻译出版是我们的一大荣幸。我们非常高兴地看到在我们的行业里有更多的同行对本书感兴趣,这会对全世界钢铁工业有所裨益。

我们也期待着本书不久能够修订、再版,以便能了解到最新的工业技术进步。我们坚信,中国金属学会作为IISI的成员单位也能全力加入到这项工作中并做出自己的贡献。

Ian Christmas

Secretary General

International Iron and Steel Institute

国际钢铁协会秘书长

爱恩·克瑞斯特马斯

Dr. Hans-Jörn Weddige

Project Leader Clean Steel

International Iron and Steel Institute

国际钢铁协会洁净钢项目负责人

汉斯·约翰·维迪格博士

译者的话

《洁净钢——洁净钢生产工艺技术》一书,由中国金属学会常务副理事长仲增墉博士从国际钢铁协会(IISI)得到,并征得学会领导同意,决定翻译出版。国际钢铁协会秘书长 Ian Christmas 先生和洁净钢项目负责人 Hans-Jörn Weddige 博士非常支持本书在中国的出版,专门为本书撰写了中译本序。中国工程院殷瑞钰院士特地为本书写了序言。

本书分为4个部分,它的出版对当前实现我国钢铁工业建设“高效、低成本洁净钢生产产品”的目标有重要的推动作用。

北京科技大学王新华教授指导和组织博士生郝宁、黄福祥、赵和明、季晨曦、袁方明、姜敏进行全书翻译,并进行了初校。姜钧普教授和王福明教授对全书进行了终审校核。姜钧普教授审校了第一章、第二章的2.1~2.5节,第三章以及附录;王福明教授审校了第二章的2.1.2~2.6节。中译本序言由姜钧普教授翻译。中国金属学会国际部黄洁同志负责对外联系和整个出版的组织工作,他们为本书能在短时间内出版做出了重要的贡献。

本书可供钢铁科技工作者研究、开发洁净钢的有关理论与生产技术,以及进行国际交流作参考。原著中有一些图表和文字表述不清,无法详细正确地翻译,已分别加了注解,请读者注意。因水平所限和时间较紧,书中不妥之处恳请大家批评指正。

中国金属学会

2006年9月

目 录

1 导论	1
1.1 引言	1
1.2 国际钢铁协会关于洁净钢研究概述	1
1.2.1 背景及目的	1
1.2.2 总结和展望	1
1.2.3 洁净钢	2
1.2.4 研究方法	2
1.2.5 文献调研	2
1.2.6 世界范围内的工业实践	2
1.2.7 工作组	4
1.3 相关的文献综述	4
1.3.1 洁净钢——基本特征和加工工艺	4
1.3.2 钢包冶炼	5
1.3.3 洁净钢生产过程中渣的乳化现象	6
1.3.4 钢液二次氧化和水口堵塞的控制	7
1.3.5 中间包冶金	9
1.3.6 结晶器内流场控制	10
1.3.7 铸坯中夹杂物的数量和分布	13
1.3.8 洁净钢冶炼模拟	15
1.3.9 钢中氧化物洁净度的测定方法	15
1.3.10 (短流程钢厂)薄板坯连铸连轧/薄带铸机工艺产品中的氧化物夹杂	16
1.4 国际钢铁协会关于洁净钢研究的介绍	16
1.4.1 目的和内容	16
1.4.2 洁净钢	17
1.4.3 项目背景	18
1.4.4 国际钢铁协会洁净钢工作组	18
1.4.5 项目历史	18
1.4.6 结构和结果	20
1.4.7 国际钢铁协会	21
2 相关文献调研	22
2.1 文献调研介绍	22
2.1.1 结构	22

2.1.2 资料来源	22
2.1.3 研究方法	23
2.2 洁净钢的基本特点和工艺实践	23
2.2.1 洁净钢的基本特点	23
2.2.2 内生夹杂物	24
2.2.3 外来夹杂物	25
2.2.4 二次氧化	25
2.2.5 夹杂物的去除	26
2.2.6 操作实际	29
2.2.7 炼钢过程	29
参考文献	37
2.3 钢包操作	38
2.3.1 洁净钢生产工艺特征	39
2.3.2 夹杂物的去除	40
2.3.3 精炼设备的特点	41
2.3.4 洁净钢生产对钢包精炼过程的要求	45
参考文献	45
2.4 洁净钢冶炼实践中的炉渣乳化现象	46
2.4.1 连铸结晶器内的卷渣	46
2.4.2 小结	52
参考文献	53
2.5 钢液二次氧化和连铸结晶器水口堵塞的控制	54
2.5.1 二次氧化程度的量化	55
2.5.2 渣中 FeO 含量和厚度的检测	56
2.5.3 结论	100
参考文献	101
2.6 中间包冶金	111
2.6.1 中间包的容量和设计	112
2.6.2 防止钢液氧化和渣、耐火材料的污染	113
2.6.3 中间包钢水加热	115
2.6.4 促进夹杂物的分离	115
2.6.5 中间包内电磁搅拌	119
2.6.6 小结	119
参考文献	120
2.7 结晶器内流场控制	124
2.7.1 弯月面处液面波动及其控制	125
2.7.2 结晶器内卷渣	128
2.7.3 电磁控制	131
2.7.4 小结	138

参考文献	138
2.8 铸坯中夹杂物的数量和分布	140
2.8.1 圆坯、大方坯和小方坯	140
2.8.2 板坯连铸	153
参考文献	176
2.9 洁净钢冶炼模型	180
2.9.1 二次精炼	181
2.9.2 中间包	182
2.9.3 浸入式水口(SEN)和结晶器	183
参考文献	185
2.10 钢中氧化物洁净度的确定方法	188
2.10.1 洁净度的特殊要求	189
2.10.2 确定洁净度时的一般问题	189
参考文献	215
2.11 薄板坯或直接连铸薄带的氧化物洁净度(小型工厂)	218
2.11.1 薄板坯洁净度	220
2.11.2 TSHR 工艺产品评级	223
2.11.3 结论	224
2.11.4 直接连铸带钢洁净度的研究	225
参考文献	227
2.12 文献综述	228
3 世界范围内的工业实践	230
3.1 简介	230
3.1.1 研究方案的范围及调查分析的任务	230
3.1.2 重要问题	230
3.2 反馈问卷评估方法	231
3.2.1 调查问卷	231
3.2.2 数据收集和评估策略	231
3.2.3 评估过程与结果的表述	234
3.2.4 分布以及反馈信息分析	235
3.3 超低碳和低碳钢种	237
3.3.1 超低碳钢	237
3.3.2 低碳钢种	256
3.3.3 结论	257
3.4 管线钢	258
3.4.1 目标洁净度质量	260
3.4.2 需要控制的元素和工艺参数	261
3.4.3 质量评估	272

3.4.4 结论	277
3.5 高碳长材产品和弹簧钢	278
3.5.1 洁净度质量目标	278
3.5.2 需要控制的工艺参数和元素	280
3.5.3 工艺路线	281
3.5.4 在线质量评估	283
3.5.5 结论	283
3.6 综合分析的比较结果	285
3.6.1 洁净钢的重要性	285
3.6.2 质量控制	289
3.7 世界范围的工业实践结论	290
附 录	292
附录 1 超低碳钢、低碳钢及管线钢相关数据	292
附录 2 弹簧及高碳长材用钢相关数据	334
附录 3 IISI 洁净钢工作组成员	368

1 导 论

1.1 引言^①

国际钢铁协会(IISI)及其技术委员会(TECHCO)开展了洁净钢生产工艺技术的研究。

提出“洁净钢”一词是用来标志近来钢铁冶炼发展及其应用特别是针对与氧化物夹杂相关的洁净度问题。洁净钢这一课题对于全世界的钢铁企业及其用户、大学、研究院所都是非常有意义的。

本书的特殊价值在于它既包括文献调研又包括工业生产中最优秀的工艺技术。它给读者提供了一个综合的信息资源,读者可以容易地从本书中找到所有关于洁净钢的综合信息。国际上的专家对这些信息进行了分析和评估,提供了非常有权权威性的参考意见。

作为国际钢铁协会会员,许多钢铁公司直接参与了本书的工作组或间接地提供了有关数据和信息。钢铁公司的参与和信息提供使得此项研究具有很好的价值。本书对国际钢铁工业的现状及其产品进行了深层次的分析研究。

钢铁是当今用最先进的工艺生产出的今后所需性能的先进材料,洁净钢在许多应用方面具有重要意义。尽管国际钢铁协会通过本书已经对洁净钢进行了详细和透彻的分析,但目前洁净钢生产仍然有许多重要的开发工作要做。

本书的出版是一个重要的里程碑,但过程冶金仍将向前发展,给社会提供更好性能的钢材。

1.2 国际钢铁协会关于洁净钢研究概述

1.2.1 背景及目的

国际钢铁协会(IISI)技术委员会(TECHCO)发起了一项综合的针对洁净钢生产(或制造)技术以及洁净钢研究和开发现状的国际性回顾,目的是搜集已发表的文献成果并给目前的工业实践提供一个基准。

尽管经过了数十年的深入研究并取得了重大进步,提高洁净度目前仍然是研究工作和工业生产中的主题。钢铁需求的不断增长和生产优质钢种的技术创新是这方面研究的两个主要驱动力。

1.2.2 总结和展望

洁净钢研究包括文献调研和工业实践两部分。目前在洁净钢生产和技术操作上已没有科学方面的障碍,并且也能被充分理解和应用,而现存最大的问题就是生产过程的非稳态现象,例如浸入式水口破裂等现象对洁净钢生产的影响很大。这些问题应从两方面解决,首

① J. Norman Lockington, IISI TECHCO Chairman (2000~2004), Vice President Technology, Dofasco.

先,不断优化工艺以及设备来杜绝和减少这些问题发生;第二,质检系统要检测出这些有缺陷的产品并保证它们不上市。目前先进的检测和工艺控制系统已被广泛应用。模型和模拟结果以及工艺控制改进仍有进一步发展的空间。

然而,应该指出提高洁净度不是为了洁净而洁净,它必须同客户的要求相关联,不仅仅要保证钢材的使用性能,同时顾客还得买得起。

1.2.3 洁净钢

洁净钢没有固定的定义,该研究的目的是给洁净钢下一个通用的定义,因为各个钢种所要达到的洁净度是和钢种的用途直接相关的。因此,钢种不同对洁净度的要求也不同。本书主要研究和氧化物夹杂相关的洁净度。然而,与氧化物夹杂物相关的洁净度也没有一个通用的定义,必须要和钢种的用途,夹杂物的位置、形状、分布和许多其他因素联系起来。

1.2.4 研究方法

本次研究有两个主要途径:深入文献调研和标准研究,结合这两种方法对未来的发展进行规划,见图 1-1。

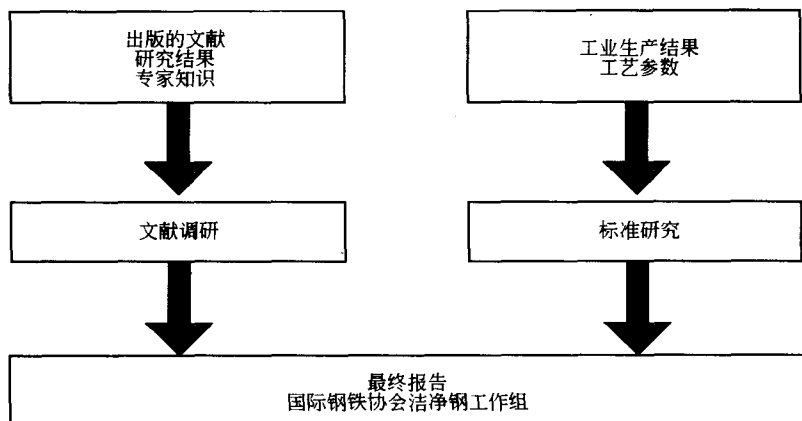


图 1-1 信息资源和研究结构

1.2.5 文献调研

文献调研工作是由每一个工作组成员来独立完成一个已指定好的研究内容。本书各章节都叙述了学术研究和工业技术的现状,都是对目前技术水平的简介与综合的概括。各国的研究内容以独立章节的形式存在并由相应的作者单独负责。

下面还有一章是对文献调研工作的总结。

1.2.6 世界范围内的工业实践

工作组指定了一份调查问卷,分发给 IISI 的分公司,搜集了 22 个国家的 42 家公司中 64 个不同工厂的数据,见图 1-2。为了确保数据的保密,在由国际专家组成的项目小组做进一步分析和评估之前,IISI 的秘书处对这些数据进行了预处理,搜集并详细分析了有关低碳

和超低碳钢、管线钢、高碳长材和弹簧钢的数据,包括它们的应用,例如车身用钢、管线或滚珠轴承。在这些章节中,主要以表格和数据的形式给出这些研究信息,见表 1-1,表 1-2。

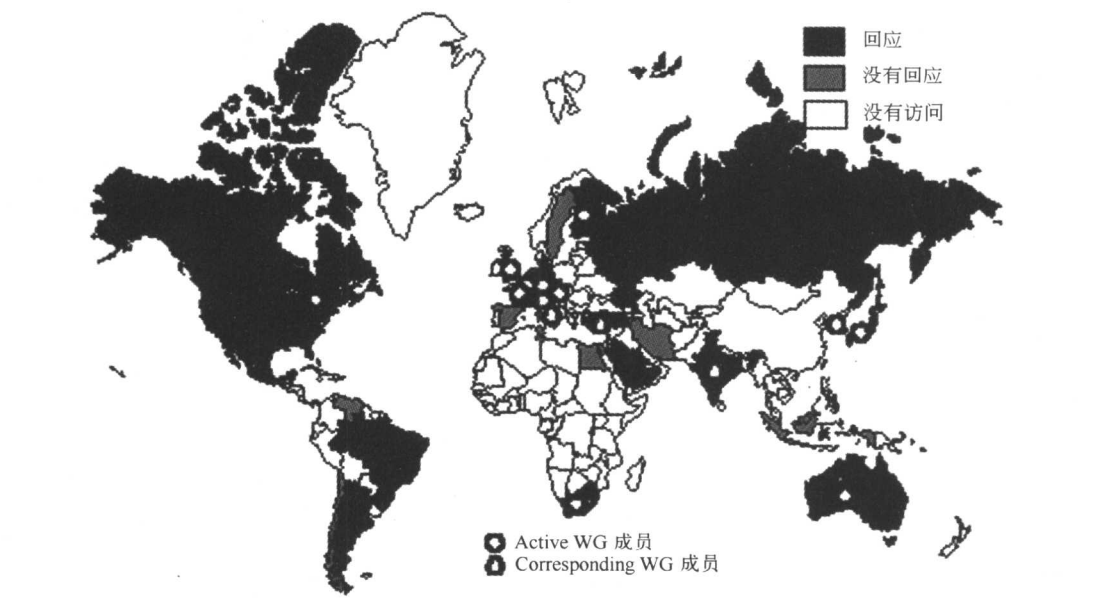


图 1-2 地理上的覆盖面积

表 1-1 调查表问卷的地理分布

项 目	国 际	公 司	车 间	数 据
发出的问卷	36	110		
收到的问卷	22	42	64	135
反馈比率/%	61	38		

表 1-2 数据回复及处理

项 目	反 馈 评 估		没有采用数据
	数 量	%	数 量
超低碳钢	24	96	1
低碳钢	26	100	0
管线钢、高强钢	21	84	4
高碳长材	14	93	1
弹簧钢	4	67	2
线 材	0	0	5
汽车用长材	0	0	5
模 铸	0	0	5
其 他	0	0	23
总 计	89	66	46

附录详细给出了一个基准数据库,包括平均值和中值还有最小值、最大值、标准偏差,还包括一些统计计数和反馈情况。

在评估栏出现的共同问题就是炼钢工艺路线对洁净钢几乎没影响。生产洁净钢的工艺路线有很多种,主要根据各个工厂的实际车间结构来选择合适的生产路线。

根据产品的性能而不是为了得到具体洁净度数值来选择和应用二次精炼工艺。

连铸工艺也是重要过程之一,因为在这个过程中,必须要保持钢液已经达到的洁净度水平。必须要避免由二次氧化、结晶器内保护渣、耐火材料或其他污染源带给钢液的污染。中间包和浸入式水口的尺寸决定了钢液的流动,它对夹杂物的上浮和去除有重要的影响。优化钢液的流动可以增大有害夹杂物的上浮分离速度。

冶金技术和工艺理论已经发展到一个较高水平。目前,最大的挑战就是在实际操作允许的条件下将操作维持在最优的水平,尤其是关于温度变化、中间包和结晶器内温度变化和液面波动、耐火材料控制以及其他一些影响操作的因素,例如浸入式水口破坏或设备故障。

1.2.7 工作组

本书给出了国际专家小组对洁净钢的研究结果。国际钢铁学会技术委员会成立于2001年,Wünnenberg教授任主席,IISI成员公司的专家们制定了一个全球化的综合基准,并对洁净钢相关文献进行了调研。

1.3 相关的文献综述

本章是IISI对洁净钢研究文献调研部分的总结。各章节研究内容概括如下:

- (1) 洁净钢——基本特征和操作工艺(1.3.1节)。
- (2) 钢包冶炼(1.3.2节)。
- (3) 洁净钢生产过程中渣的乳化现象(1.3.3节)。
- (4) 钢液二次氧化和水口堵塞的控制(1.3.4节)。
- (5) 中间包冶金(1.3.5节)。
- (6) 结晶器内流场控制(1.3.6节)。
- (7) 铸坯中夹杂物的数量和分布(1.3.7节)。
- (8) 洁净钢冶炼模拟(1.3.8节)。
- (9) 钢中氧化物洁净度的测定方法(1.3.9节)。
- (10) (短流程钢厂)薄板坯连铸连轧/薄带铸机工艺产品中的氧化物夹杂(1.3.10节)。

1.3.1 洁净钢——基本特征和操作工艺^①

任何一种洁净钢的具体定义都要包括对钢种性能的要求。随着产品使用厚度的减小,这些要求也越来越严格,因此,洁净钢应定义如下:当钢中的非金属夹杂物直接或间接地影响产品的生产性能或使用性能时,该钢就不是洁净钢;而如果非金属夹杂物的数量、尺寸或分布对产品的性能都没有影响,那么这种钢就可以被认为是洁净钢。

钢中的非金属(氧化物)夹杂物有两种:内生夹杂物(在脱氧、二次氧化或钢液冷却和凝

① Stuart Millman; 英国康力斯公司。