

超声波钢包精炼 应用基础

CHAOSHENGBO GANGBAO JINGLIAN
YINGYONG JICHU

© 亢淑梅 沈明钢 李成威 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



辽宁科技大学学术专著出版基金资助

超声波钢包精炼应用基础

亢淑梅 沈明钢 李成威 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 提 要

本书系统地介绍了大功率变幅杆式超声波钢包精炼实验方法,阐述了超声波群空化气泡的形成,生长运动行为变化的规律,分析了变幅杆式超声波钢包精炼水模型内声场分布的形成原因,以及群空化气泡促进超声搅拌机理;首次阐述了不同空化气泡运动状态,即稳态空化与瞬态空化去除微小夹杂物机理,其结果表明不仅稳态气泡可促进夹杂物上浮,瞬态空化气泡崩溃后,由于气泡直径变小,数量增多,吸附面积增大,对于微小尺寸夹杂物上浮排出的效果会更好。

本书内容精炼,理论与实践并重,实用性很强。本书可供从事超声冶金和新材料开发、超声波设备设计与制造等工作的科技人员及高校、科研院所的相关研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

超声波钢包精炼应用基础/亢淑梅,沈明钢,李成威著. —北京:冶金工业出版社,2014.10

ISBN 978-7-5024-6733-3

I. ①超… II. ①亢… ②沈… ③李… III. ①超声波—应用—钢包精炼 IV. ①TF769.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 236899 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6733-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京佳诚信缘彩印有限公司印刷

2014 年 10 月第 1 版,2014 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm;12 印张;232 千字;178 页

36.00 元

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

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

序 言

超声波是一种频率高、波长短的可压缩纵波，具有束射性强和易于集中能量的特点，它可在液体传播中传递很强的能量，在反应界面产生强烈的冲击和空化作用；它也与声波一样会产生反射、干涉、叠加和共振等现象。目前超声波的应用十分广泛，不仅可以探测固体内部缺陷，也是全面探索固体和液体内部世界的有力工具，如测量固体材料强度、硬度、晶粒和内部组织，液体的黏度、密度、流量、温度等特性参数。此外，作为一种能量手段，广泛应用于清洗、焊接、切割、粉碎、钻孔、乳化、凝聚、雾化、去气、萃取、颗粒弥散、凝固控制等。可见超声波的发展和应用潜力巨大。随着我国冶金工业的高速发展和对金属材料性能要求的不断提高，开发新工艺、新技术已成为当务之急，超声波在冶金中的应用越来越受重视。

超声波在冶金中的应用主要涉及高温废气除尘、燃料燃烧、液态金属的超声雾化、金属凝固组织控制、液态金属除气、夹杂物去除等方面，国内外有不少的研究性论文发表，但是目前尚未有较为系统的著作出版。该书作者从事超声波在冶金中的应用研究多年，书中总结了他们的研究成果，对超声波钢包精炼去除夹杂物研究及应用，进行了全面系统的阐述。

该书的理论部分介绍了超声空化和超声传播的基本概念和原理、空化气泡运动过程的计算方法、精炼钢包内声场的数值模拟，对重点和难点引入了一些推导和数据，引人入胜，为读者的深入研究提供了思路。此外，对超声处理器的设计、声场强度的测定方法等内容进行了详细介绍，系统阐述了相似原理及气泡去除夹杂物的基本原理。

该书的实验研究部分主要介绍了超声波钢包精炼水模型声场，空

化气泡行为与规律,超声波与底吹气水模均混时间,以及超声波去除夹杂物实验及机理。作者详细介绍了实验方法和实验条件,为超声波应用研究提供了参考和借鉴。超声波在精炼过程中的应用,由于使用材料及大功率发生装置的限制,目前的研究主要集中在低熔点合金、钢液中的研究尚处于实验室及数值模拟阶段。作者对超声波在铝合金、镁合金及钢方面的研究现状进行了阐述,对超声设备在高温条件下工具头材质的选择、换能器的设计等进行了分析,为今后超声波在钢中的实际应用提供了借鉴。此外,作者还介绍了超声波在金属材料加工方面的应用。

该书的特点是系统性好,逻辑性强,文字精炼,图文并茂,是一本超声波应用研究方面难得的好书,可作为相关专业本科生及研究生的参考书,也可供研究院所的相关技术人员参考,对超声波设备设计与制造单位的科技人员也有较高的参考价值。



2014年5月

前 言

功率超声处理是通过超声能量对物质的作用来改变或加速改变物质的一些物理、化学和生物特性或状态的技术。最常用的频率范围从几千赫到几百千赫，功率由几瓦到几万瓦。强超声在媒质中传播时会产生一系列的效应，如力学效应、热效应、化学效应和生物效应等。因此，在工业、农业、国防和医药卫生、环境保护等部门得到越来越广泛的应用。目前超声技术在冶金中的应用主要涉及超声液态金属除气，超声细化晶粒，超声制备超细金属粉末，超声去除夹杂物等方面。在金属材料加工方面主要有超声加工、超声焊接、超声淬火、超声钻孔等方面。随着高温条件下新材料的研究日趋成熟，功率超声应用在冶金领域正激起人们越来越多的关注。

超声波能量足够高时，就会产生“超声空化”现象。对于钢液中空化现象的表征主要包括水模实验研究和数值模拟方法，主要从机理上说明超声在液体中的空化行为。对于低熔点合金熔体及钢液的超声波处理方面，诸如改善钢的凝固组织，均匀成分，改善夹杂，从而提高钢的力学性能研究，由于超声波工具杆材质，辐射功率等条件尚不够成熟，仍然处于实验室小规模研究阶段。除超声波探伤外，在钢液中的实际应用有待进一步深入。目前尚未有全面系统介绍超声波在冶金中的应用著作，作者结合已有的高温下的研究成果与工作编写了《超声波钢包精炼应用基础》一书，希望可为超声波的研究工作者提供参考。

全书共分 10 章，第 1 章为超声波应用概述，介绍超声波基本概念，超声波应用进展及炉外精炼的相关知识；第 2 章介绍超声传播的基本理论；第 3 章介绍针对应用于冶金中超声处理器设计的相关知识；

第4章和第5章介绍超声空化的相关理论,声场测量方法,空化气泡的生成、运动直至崩溃行为研究,并对水中及钢液中空化气泡的运动行为进行了数值模拟;第6章应用 **Fluent** 流体力学软件对底吹氩钢包精炼水模内流场,超声搅拌钢包精炼水模内的声场和流场进行了数值模拟研究和对比;第7章通过测定钢包精炼水模均混时间,对底吹气搅拌,超声搅拌及超声-底吹气联合搅拌效果进行了对比;第8章讨论了微小夹杂物的去除与声场参数的关系及超声场下微小夹杂物的去除机理。

教育部长江学者、特聘教授,国家杰出青年基金获得者,东北大学材料与冶金学院朱苗勇教授在百忙之中,为本书执笔作序,在此表示最诚挚的谢意。

本书内容涉及物理、声学、冶金及材料加工等诸多学科,且这些学科发展迅速,由于时间、篇幅所限,难免有疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

亢淑梅

2014年5月8日于鞍山

目 录

1 超声钢包精炼概述	1
1.1 超声波概述	1
1.2 洁净钢冶炼概述	2
1.2.1 转炉冶炼中夹杂物的控制	3
1.2.2 精炼过程中夹杂物的控制	3
1.2.3 连铸中间包夹杂物控制	4
1.3 功率超声	6
1.3.1 功率超声概述	6
1.3.2 超声技术的产生和发展	9
1.3.3 超声与物质的相互作用	10
1.3.4 功率超声的导入	11
1.3.5 超声波技术应用的基础分类	12
1.4 超声空化概述	13
1.4.1 空化现象的发展	13
1.4.2 单个空化气泡发展概况	17
1.4.3 群空化气泡发展概况	18
1.5 超声波在冶金中的应用	19
1.5.1 超声波高温废气除尘应用	20
1.5.2 超声波燃料燃烧应用	21
1.5.3 超声波液态金属处理应用	22
1.5.4 超声波在金属去夹杂中的应用	24
1.5.5 超声探伤	28
2 功率超声应用的理论基础	29
2.1 描述超声的基本物理参数	29
2.2 超声空化及其效应	30
2.2.1 空化泡的主要参数	30
2.2.2 超声波作用下空化泡的运动	32
2.2.3 混响场的超声空化	34

2.2.4	空化强度的测量	34
2.3	超声的传播	35
2.3.1	声波传播的普遍特性	35
2.3.2	超声的反射和折射	36
2.3.3	超声的衰减	36
2.3.4	超声的散射和绕射	37
2.3.5	超声的干涉	37
3	超声处理器设计	39
3.1	超声处理器概述	39
3.1.1	电声系统	39
3.1.2	机声系统	40
3.2	功率超声的产生原理	41
3.3	超声装置的类型	42
3.4	功率超声发生器的设计与改造	43
3.4.1	超声波频率的选择	44
3.4.2	超声波换能器的选择	44
3.4.3	功率的确定	45
3.4.4	材质的选择	45
3.4.5	转换器恒温处理	45
3.5	功率超声发生器的调试	46
3.5.1	声功率的测定和换能器效率的计算	46
3.5.2	声强的计算	47
4	超声空化气泡数值模拟	49
4.1	超声空化机理	49
4.1.1	空化核	50
4.1.2	空化气泡的运动	51
4.1.3	空化气泡的闭合与反跳	53
4.1.4	空化的基本效应	55
4.2	空化强度测量方法	58
4.2.1	碘释放测量法	58
4.2.2	金属薄膜腐蚀法	60
4.2.3	电学法	62
4.2.4	晶体显色法	62

4.2.5 染色法	63
4.2.6 水听器法	63
4.3 超声空化泡的数值模拟方法	65
4.3.1 模型的建立	65
4.3.2 气泡壁运动方程的推导	66
4.3.3 气泡壁运动方程的数值计算	67
4.4 水溶液中空化气泡影响因素	68
4.4.1 液体若干物理参数的影响	69
4.4.2 声场参数的影响	70
4.4.3 空化气泡本身的影响	73
4.4.4 环境压力对空化气泡运动的影响	77
4.5 钢液中空化气泡计算	77
4.5.1 超声声压幅值对钢液空化气泡运动过程的影响	78
4.5.2 空化气泡初始平衡半径对钢液内空化气泡运动过程的影响	80
4.5.3 超声频率对钢液空化气泡运动过程的影响	82
4.5.4 空化气泡中的气体种类对钢液空化气泡运动过程的影响	84
5 精炼钢包内空化行为表征	87
5.1 水模实验方法	87
5.2 声场分布测量方法	89
5.3 变幅杆式超声波声强测量	90
5.3.1 精炼水模内变幅杆式超声波声场分布	90
5.3.2 声场分布理论分析	91
5.3.3 工具杆底端声场分布的实验验证	93
5.3.4 超声波清洗槽声场测量	94
5.4 超声波钢包精炼空化气泡运动行为	96
5.4.1 空化气泡观测过程	97
5.4.2 声场特性分析	98
5.4.3 精炼钢包模型内空化气泡的生长运动行为	103
6 超声流场数值模拟方法	108
6.1 Fluent 软件介绍	108
6.1.1 Fluent 概述	109
6.1.2 基本控制方程	111
6.1.3 离散化方程	113

6.1.4	数值计算算法分析	114
6.1.5	求解策略	117
6.2	底吹气搅拌流场的数值模拟	117
6.2.1	模型的建立及求解	117
6.2.2	流场计算结果分析	119
6.3	超声波搅拌流场的数值模拟	121
6.3.1	模型的建立及求解	122
6.3.2	流场计算结果分析	125
6.4	超声搅拌与气体搅拌结果对比	133
7	钢包精炼水模型超声搅拌	135
7.1	底吹气搅拌水模型	135
7.1.1	原理和装置	135
7.1.2	均混时间测定	136
7.2	超声波钢包精炼水模型	138
7.2.1	实验方法	138
7.2.2	超声波搅拌均混时间测定	139
7.3	超声波-底吹气联合搅拌水模型	142
7.3.1	实验方案	142
7.3.2	联合作用均混时间	143
8	超声波在去除夹杂物中的应用	147
8.1	气泡去除夹杂物机理分析	149
8.1.1	通过炉渣去除	149
8.1.2	通过炉衬耐火材料去除	150
8.1.3	通过气泡漂浮去除	150
8.2	夹杂物模拟粒子的选择	156
8.3	超声去除夹杂物方法	158
8.4	超声波去除夹杂物影响因素	159
8.4.1	两种空化运动状态的判定	159
8.4.2	超声波去除夹杂物因素分析	161
8.5	超声波去除夹杂物机理分析	163
8.5.1	超声波作用下夹杂物长大行为分析	163
8.5.2	超声波去除夹杂物微观机理分析	168

参考文献	172
------------	-----

1 超声钢包精炼概述

近年来,大量的研究证明高强度超声波可以应用于各种高温技术中。本书阐述了最近的研究成果,包括高强度超声波在火法冶金学和其他相关领域中的应用。这些成果有力地说明了超声波在一些领域中发挥了较大的作用,如高温废气除尘,改善燃油的燃烧效率,控制空气污染物的排放,工业纯铁质量的提高,金属粉末和铸件复合材料的生产。

超声波可在气体、液体和固体中传播,因此具有冷却系统的超声波处理器为高温条件下材料的处理提供了一个独特的工具。如高温条件下利用超声波控制界面反应速率,这是其他任何方法所无法取代的。超声波发生器与传感器成本相对较低,在工业上,超声波技术的应用更加广泛。在未来的研究中预计会发展新的耐热波导材料,并且将超声波装置与目前的高温条件下的工业设备连接在一起。本书将作者已有的工作成果进行了详细介绍。

1.1 超声波概述

超声波通常指 1s 内振动 20000 次以上的高频声波(即频率大于 20kHz 的波)。超声波频率高、波长短,具有束射性强和易于集中能量的特点。在强度较低时可以作为探测负载信息的载体与媒介的超声波,称为检测超声;当其强度超过一定值,可以与传声媒质相互作用,影响、改变以至破坏传声媒质的状态、性质及结构的超声波,称为功率超声。本书所涉及的是功率超声。功率超声处理是通过超声能量对物质的作用来改变或加速改变物质的一些物理、化学和生物特性或状态的技术。最常用的频率范围是几千赫到几百千赫,而功率由几瓦到几万瓦。无线电雷达在空间目标探测方面有着神奇的作用,而超声波技术恰恰在无线电雷达不能起作用的固体、液体和生物体中发挥着不可比拟的作用。随着科学技术的发展,超声波技术已经不仅仅是简单的固体内部缺陷探测手段,而是全面探索固体和液体内部世界的有力工具。目前在工业上超声波有着广泛的应用。作为一种检测手段,超声波不仅可以测量固体材料强度、硬度、晶粒和内部组织,而且还可以测量液体的黏度、密度、流量、温度等几十种表征物体特性的参数。作为一种能量手段,功率超声在改变物质的性质和状态方面也有相当广泛的应用,如超声清洗、焊接、切割、粉碎、钻孔、乳化、凝聚、雾化、去气、萃取、颗粒弥散、凝固控制等。目前人们认为功率超声主要有五个基本作用:

(1) 线性的交变振动作用, 它是由于媒质在一定频率和声强的超声作用下做受迫振动, 而媒质的质点位移、速度、加速度以及应力等分别达到一定数值而产生的一系列超声效应。

(2) 振幅声波在媒质中传播会形成锯齿形波面的周期性激波, 在波面处造成很大的压强梯度, 因而能产生局部高温高压等一系列特殊反应。

(3) 振动的非线性会引起相互靠近的伯努利力, 由黏度的周期性变化引起的直流平均黏滞力等等, 这些直流力可以说明一些定向作用、滑聚作用等力学效应。

(4) 声空化作用, 这是只能在液体媒质中出现的一种重要的基本作用。在液体中, 当超声强度超过液体的空化阈值时, 液体中会产生大量的气泡。小气泡将随超声振动而逐渐生长和胀大, 然后突然崩溃和分裂, 分裂后的气泡又不断地长大和溃灭, 这一物理现象称为声空化。小气泡迅速崩溃时在气泡内产生高温高压, 并且由于气泡周围的液体高速冲入气泡而在气泡附近的液体中产生强烈的局部激波, 也形成了局部的高温高压, 从而产生了一系列的效应。虽然这只是在局部范围内的瞬时作用, 但由于波动频率很高, 那么它对整个系统也势必产生显著作用。

(5) 声流作用, 超声在液体中传播时产生有限振幅衰减使液体内从声源处开始形成一定的声压梯度, 导致液体的流动, 在超声情况下, 当声压幅超过一定值时, 液体中可以产生一个流体的喷射。此喷流直接离开超声变幅杆的端面并在整个流体中形成环流, 这便是声流。声流是环流与紊流的结合, 因此声流不仅可明显提高温度场的均匀性, 而且对颗粒具有微观的搅拌作用。

1.2 洁净钢冶炼概述

洁净钢的生产是一项系统工程, 并且不同钢种对洁净度要求不同, 生产者首先要确定用户要求产品达到的性能, 然后通过在生产 and 科研中积累, 进而提出生产过程控制目标。实践证明, 钢中杂质对钢的生产性能和使用性能影响极大, 因此洁净钢研究在许多应用方面都具有重要的意义。由于目前洁净钢没有固定的定义和标准, 而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。

目前洁净钢是这样定义的: 当钢中的杂质元素或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; 而如果杂质元素或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。一些专家认为, 不同用途的洁净钢中杂质元素及夹杂物应有一定的限制。

洁净钢的生产主要集中在两方面:

(1) 尽量减少钢中杂质元素的含量；

(2) 严格控制钢中的夹杂物，包括夹杂物的数量、尺寸、分布、形状、类型。

要减少所生成夹杂物的数量，首先必须降低转炉终点氧含量。合理的吹炼制度，特别是减少补吹，有助于降低终点钢水氧含量。钢包渣中 $\text{FeO} + \text{MnO}$ 含量与钢水中氧含量有正比关系，广泛采用挡渣法可减少出钢的下渣量，以及提高转炉终渣 (MgO) 含量和碱度，也有利于减少下渣。钢中含有脆性夹杂物是很多钢种出现缺陷的原因，同时脆性 Al_2O_3 夹杂也是引起浇铸过程中水口堵塞的主要原因。

一般来说，洁净度是对氧化物夹杂而言的，而氧化物夹杂物对钢的性能影响，主要与夹杂物的位置、形状、分布和许多其他因素有关。因此，洁净钢冶炼的目的是控制钢中的有害元素及夹杂物，其重点是非金属夹杂物。非金属夹杂物来源非常复杂：原料本身含有的夹杂物；未及时去除的脱氧产物和脱硫产物；钢液和熔渣、耐火材料的相互作用；大包下渣、中间包和结晶器卷渣；浇注过程中产生的二次氧化产物，并在随后的热冷加工过程中发生形态的变化。因此，夹杂物是与炼钢、精炼、连铸等工艺过程密切相关的。

1.2.1 转炉冶炼中夹杂物的控制

为了减少生成夹杂物的数量，电炉和转炉冶炼在出钢这一环节中：必须降低熔炼终点的氧含量。氧气炼钢转炉或电弧炉冶炼终点钢水的氧含量除与 $[\text{C}]$ 含量有很大关系之外，还与炉渣的氧化性、供氧参数（氧气流量、氧枪高度等）、熔池搅拌等许多因素有关。通常采取的主要措施有：

(1) 氧气顶底复吹转炉，它能保证良好的底吹搅拌效果；

(2) 炼钢终点自动控制技术，尽量提高终点控制的精度，减少过吹、后吹。

出钢时挡渣对生产洁净钢也非常关键，钢水包内存在由于钢水温度不均匀造成的自然对流和浇铸开始后引起的钢水流动。如钢水表面存在高氧化性炉渣，炉渣中 FeO 会与钢水中 $[\text{Al}]$ 、 $[\text{Si}]$ 等反应，生成的 Al_2O_3 、 SiO_2 等会由钢水流带入内部，成为钢中的非金属夹杂物。

因此，合理的冶炼制度，特别是减少转炉冶炼后期补吹有助于降低终点氧含量，尽量减少下渣量也有利于降低钢水中的氧含量，提高终渣中 MgO 含量和碱度也可减少下渣。采取的技术措施有出钢挡渣、扒渣和炉渣改质。电炉和转炉出钢过程中渣洗脱硫，降低钢水硫含量是抑制硫化物夹杂危害最直接的手段。

1.2.2 精炼过程中夹杂物的控制

钢的二次精炼可显著提高钢的纯净度，二次精炼方法有很多种，但目前最常

用的是 RH 和 LF。RH 精炼法已从当初的真空脱气为主,发展成了可进行真空吹氧脱碳、喷粉或加顶渣脱硫并进行成分微调的多功能精炼设备,在国内外得到了广泛应用,成为生产超低碳钢和洁净钢的主要手段。LF 由于具有电弧加热、炉渣精炼、吹氩搅拌和气氛可控的特点,可有效地脱硫、脱氧、去除钢中夹杂物以及精确控制成分和温度,是生产洁净钢的有效方法。连铸中间包冶金可进一步提高钢的洁净度,其主要手段包括中间包流动控制、吹氩、加热及温度控制等。在浇注过程中采用长水口、浸入式水口及气体保护,良好的结晶器保护渣,结晶器钢水流动控制,结晶器、二冷段及凝固末端的电磁搅拌均是改善钢质量的措施。

气体搅拌是二次精炼过程最为简单的精炼方式,通过气体搅拌使钢渣充分混合,再通过向钢液中加入一些合适的合成渣可以将钢液中的磷、硫及非金属夹杂物脱除到渣中。然而,吹气量过大会使空气进入钢液,造成钢液的二次氧化,最终导致合金收得率低,吸氮及卷渣。

钢包炉精炼过程中炉渣有很高的化学活性或者能很好地吸收夹杂物可用来冶炼洁净钢。由于钢包精炼炉能精确控制钢液成分、钢液洁净度和温度,因此成为二次精炼中最常用的设备。采用高碱度、低氧化性精炼渣对钢液脱硫,精炼完毕后钢液中的硫含量可降至 10×10^{-6} 以下。

RH 技术是德国开发成功的。它将真空精炼与钢水循环流动结合起来,具有处理周期短,生产能力大和精炼效果好的特点。1980 年前, RH 技术就已经比较完善。世界上已有 130 多套 RH 设备投入工业生产。

经过精炼后钢水的洁净度是很高的,如何保持,并更进一步提高钢水的洁净度,是连铸工序操作中需要控制的重点。因此钢包—中间包—结晶器全过程保护,这一生产模式在世界各钢厂被广泛使用,这些措施的实现,避免了钢水的二次氧化,有效地减少了连铸坯中的夹杂物。其保护浇注方式为:钢包—中间包采用长水口,中间包加覆盖渣,中间包—结晶器采用浸入式水口,目前采用的技术有:中间包覆盖剂、容量和流场控制装置、套管保护、氩气保护和密封及电磁控制等。

1.2.3 连铸中间包夹杂物控制

经炉外精炼的钢水可以说是很“干净”了,在浇注过程中钢水与空气作用发生二次氧化,使钢水再次受到污染,炉外精炼的效果会前功尽弃。试验指出,从钢水到中间包由于钢水与空气二次氧化造成 $[Al]$ 损失占 60% 以上,是铸坯中夹杂物主要来源之一。因此浇注过程中钢水密封是生产洁净钢的重要操作之一。钢水中总氧量 $T[O]$ 的增加是钢水二次氧化程度的量度。

1.2.3.1 保护浇注和钢包渣检测、卷渣控制技术

从钢水—中间包—结晶器钢水中 $[N]$ 含量增加,也可作为钢水二次氧化的

指示剂，常用的保护方法有：

(1) 中间包密封；(2) 钢包—中间注流长水口 + 吹氩保护：关键是长水口与钢包下水口接头密封，使钢水吸氮量 $< 1.5 \times 10^{-6}$ 甚至为零；(3) 中间包—结晶器浸入式水口保护浇注，为防止注流二次氧化，在中间包到结晶器间采用浸入式水口与中间包连接处密封；(4) 对小方坯中间包—结晶器采用氩气保护浇注。

钢包内钢液液位降低，会发生涡流，使钢液表面的渣卷入进去，造成夹杂物增加。为了抑制钢渣卷入，通过降低钢液的流出速度来防止涡流的发生。但是，现在开始用于实际生产的一种方法，是利用钢渣和钢液的透磁率的不同电磁检测法。对防止空气氧化和防止大量出渣，它能起到良好的效果，采用长水口时，有报告认为与人工判渣相比能大幅度降低渣的流出量。前炉钢浇注结束时，流出的渣是在中间包内的钢液上部，后炉钢水浇注时与其发生搅拌，引起夹杂物的大量增加。用耐材做成的浇铸管，管内吹氩以及利用长水口，将卷渣控制在最低限度。

1.2.3.2 中间包吹氩技术

中间包吹入惰性气体不是为了增强搅拌，而是用惰性的气泡清洗钢液。最初在中间包吹惰性气体着眼于脱氢。但是中间包吹惰性气体最明显的效果是去除夹杂物。中间包吹入惰性气体的方式主要是在中间包底部某个部位通过多孔砖或多孔气管吹入微小气泡。将惰性氩气体吹入中间包，使其产生小气泡幕。气泡幕将夹杂物从钢液带到表面被表面渣吸附去除。其机理是：气泡与夹杂物碰撞吸附到一起，粒径增大，上浮速度增大，易于被钢液表面的渣层吸收。

1.2.3.3 中间包容量大型化及墙和坝、过滤器

中间包容量大型化一方面有利于高速连铸；另一方面能保证钢液在中间包内停留更长时间，以利夹杂充分上浮、净化钢质、避免中间包渣卷入结晶器。采用大容量中间包是为了提高连浇时钢的清洁度，使换包时保持稳定状态，不卷渣又不必降低拉速，这在生产表面质量和内部质量要求高的产品如深冲产品和汽车板时尤为重要。为了不使钢包涡流卷渣发生，保证中间包操作最小深度是必要的。增大中间包容量使钢液在中间包内有较长的停留时间，从而有利于夹杂物的充分上浮。

中间包内设置挡墙、坝、堰是中间包冶金发展成熟，应用最普遍的技术措施。目的是控制中间包中流场形态，使流动合理，液面保持平稳，尽量减轻湍流的干扰，减少死区，增大钢水平均停留时间，有利于夹杂物去除，提高钢水清洁度。通过在中间包内设置挡墙，坝等，总趋势是可以增加钢液在中间包的平均停留时间，促进夹杂上浮，导致合理的温度场分布。对于双挡墙结构，其去除夹杂物的能力基本上随挡墙数量的增加而增加，而所选择的坝、墙、坎效果最佳。总之，有关中间包内设置附件的研究结果普遍认为坝、墙、堰的组合可以提高平均

停留时间、促进夹杂上浮。

1.2.3.4 中间包湍流控制技术

对中间包中钢液流场分析可知,盛钢桶注流对中间包内钢液有强烈的冲击作用,形成注流冲击区,在该区域由于注流的冲击,导致了部分中间包覆盖剂被卷入钢液中而形成夹杂。同时,容易卷入空气发生二次氧化,冲击包底造成包底该处耐火材料过分侵蚀,再有,对中间包出口处形成汇流漩涡也有影响。因此,有必要研究消除其涡流的措施。在盛钢桶注流冲击点放置湍流抑制器,可缓解注流的冲击。缓冲区结构简单,安装方便,容易在中间包上应用。

在圆柱形中间包外壳施加一个移动磁场,使钢水呈水平旋转运动,离心力作用密度较低的夹杂物,则从钢水中分离集中于表面被渣子吸收且干净的钢水流入结晶器。

1.2.3.5 目前洁净钢生产存在的问题和解决方向

目前在洁净钢生产和技术操作上已没有理论方面的障碍,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。一般来说,洁净钢生产主要有四个关键环节:精料—冶炼过程及终点的精确控制—钢水精炼—防止各环节的再次污染。各企业在精料的处理上大不相同,再加上冶炼过程中使用的生产设备条件和工艺的不同,因而在去除夹杂的过程中出现问题的环节就各有不同。洁净钢的冶炼是控制钢中总氧降低夹杂物含量还是控制夹杂物成分减小其对钢性能的影响是两种发展方向。

到目前为止,除最终产品为细钢丝外,其他洁净钢冶炼过程均采用铝深脱氧,通过降低钢中总氧含量来减少夹杂物数量。然而全部去除钢中夹杂物成本太高,因此成品为细钢丝的钢种采用 Si - Mn 脱氧,以及低碱度精炼渣精炼工艺以控制夹杂物成分,使夹杂物在轧制过程中变形从而减少其对钢性能的影响。

洁净钢冶炼的另外一个技术是“氧化物冶金”。即通过控制细小、弥散的氧化物的尺寸、分布组成与数量,使之成为钢凝固后析出物的核心,从而提高钢材的性能。因此,不断优化工艺以及设备来杜绝和减少这些问题发生和增加质检系统作用,准确检测出有缺陷的产品,有的放矢地找出问题所在,寻求解决办法,是目前生产优质的洁净钢的重要问题。

应该指出的是,洁净钢生产并非仅取决于冶炼和连铸过程,常常需要冶炼、连铸、压力加工,以及热处理等各道工序的正确配合,才能生产出满足用户要求的洁净钢,这种钢材才有市场竞争力。

1.3 功率超声

1.3.1 功率超声概述

功率超声是超声学的一个分支,主要研究大功率(目前特大功率达到 50kW