

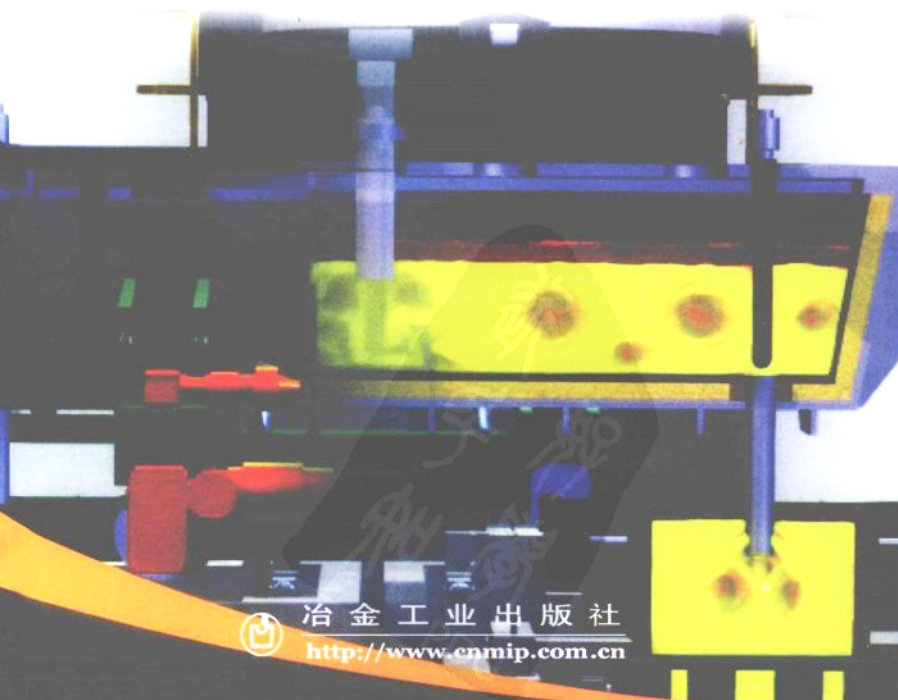
洁净钢生产的中间包技术

TUNDISH TECHNOLOGY FOR CLEAN STEEL PRODUCTION

[美] Yogeshwar Sahai 美国俄亥俄州立大学

[日] Toshihiko Emi 中国江苏沙钢钢铁研究院

朱苗勇 译 东北大学



冶金工业出版社

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

洁净钢生产的中间包技术

Tundish Technology for Clean Steel Production

[美] Yogeshwar Sahai 美国俄亥俄州立大学

[日] Toshihiko Emi 中国江苏沙钢钢铁研究院

朱苗勇 译 东北大学

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2009

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2009-0524 号

Tundish Technology for Clean Steel Production/by Yogeshwar Sahai ·
Toshihiko Emi

Copyright © 2008 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

Simplified Chinese translation arranged with World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.

图书在版编目(CIP)数据

洁净钢生产的中间包技术/(美)沙哈依(Sahai, Y.); (日)江见俊彦著;
朱苗勇译. —北京:冶金工业出版社, 2009. 5

书名原文: Tundish Technology for Clean Steel Production

ISBN 978-7-5024-4518-8

I. 洁… II. ①沙… ②江… ③朱… III. 连续铸钢 IV. TF777

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 019117 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 白 迅 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4518-8

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

2009 年 5 月第 1 版, 2009 年 5 月第 1 次印刷

169mm × 239mm; 14 印张; 2 彩页; 272 千字; 212 页; 1-2500 册

39.00 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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

Preface to the Chinese Edition

Worldwide steel production has increased each year at a very fast pace in the past 5 to 10 years. At the same time, steel production in China is growing very rapidly since 1990s. China's current steel production is more than one third of the total steel produced worldwide. Along with the steel production, China has also increased the fraction of steel which is continuously cast, and is now reaching the levels of other industrialized countries of the world. Over 95% of the steel produced in China is continuously cast. The emphasis and need of the clean steel production in China has also grown significantly in the past decade or so. This is obvious from the international conferences and symposia taking place in China on this subject in the recent past. Thus the role of tundish technology in producing clean steel can not be over emphasized. The authors very quickly realized that it will be convenient to the readers in China if the book is translated and also published in the Chinese language. The authors are extremely grateful to Professor Miaoyong Zhu of the Northeastern University in China for undertaking the task of translating it to the Chinese language.

YS
TE

中文版前言

最近的 5 ~ 10 年间世界钢产量每年均在快速增长，与此同时自 90 年代以来中国的钢产量增长迅猛，当前中国的钢产量已超过了世界总产量的三分之一。随着钢产量的增加，中国的连铸比也得到了不断提高，目前已达到了世界工业发达国家的水平。在中国超过 95% 的钢是通过连铸生产的。近十几年，中国也十分重视洁净钢的生产，对洁净钢的需求也在迅速增长，最近在中国举行的有关洁净钢的国际会议和国际研讨会已清楚表明了这一点。因此，在洁净钢生产中中间包技术的作用是不可以被低估和不被重视的。我们很快意识到，如果能将此书翻译成中文出版，无疑会方便广大读者。我们特别感谢中国东北大学的朱苗勇教授担当了此书的中文翻译任务。

Y. 沙哈依
江见俊彦

前 言

过去的十年，世界的钢产量迅速增长，由 1996 年的 8.5 亿 t 增加到 2006 年的 12.3 亿 t。连铸工艺已被广泛应用并成为钢铁生产中的一个重要环节。目前世界上 90% 的粗钢是通过连铸生产的。包括西欧、日本和美国等一些国家及地区，连铸比已超过了 97%。在钢产量增加的同时，面对连铸机生产能力的不断提高和产品断面尺寸的大型化，对钢产品的质量要求变得更加严格而迫切。因此，钢的洁净化和成分的严格控制以及连铸坯表面和内部质量控制已成为当今炼钢工作者最为关心的课题。

中间包是钢液流入连铸结晶器凝固之前最后需要经过的冶金容器。钢液经过中间包的过程中与耐火材料、渣和空气接触。因此，中间包的合理设计与操作对其内钢液的成分、质量和温度产生重要影响。在过去三十年左右的时间里，我们已经目睹了中间包技术在洁净钢浇铸方面的一些主要进展，并有大量的重要论文发表，但还没有一本中间包技术方面的书，涉及从基本原理到详细操作等各个方面。具体而详细探讨中间包技术在洁净钢生产中所起的重要作用，本书所展现的可以说是一种尝试。

本书的前半部分介绍中间包操作的一些基本概念所需的基本原理和理论知识，其余部分是中间包的操作方面。有一章专门介绍了最近的、已出现的和正在开发的中间包新技术。因此，本书的基础性可以作为过程冶金专业研究生的教材或作为冶金工作者的一本重要参考书。同时，本书对从事研究、开发或钢铁生产的科技工作者和工程师们理解中间包冶金过程会很有帮助。

本书作者十分感谢许多同事、朋友和学生们，他们以各种方式对该书和作者在该领域的认识和理解上做出了贡献。作者特别要感谢已故的 S. Takeuchi、已故的 M. Wolf 以及 R. Boom、Y. Kishimoto、Y. Tozaki、J. Schada、A. K. Sinha、S. Chakraborty 的贡献和从他们那里所获得的知识。

YS
TE

致谢

日本钢铁协会 (ISIJ) 和日本金属日报 (Tekko Shimbun Corportion) 对该书的出版提供了资助。

目 录

1 引言	1
1.1 钢的模铸和连铸	2
1.2 中间包在连铸生产中的作用	6
1.3 洁净钢的需求	9
1.4 小结	10
参考文献	11
2 非金属夹杂物	12
2.1 引言	12
2.2 氧化物夹杂的来源	12
2.2.1 外来夹杂物	13
2.2.2 内生夹杂物	17
2.3 夹杂物的尺寸与形状	27
2.3.1 夹杂物的尺寸分布	27
2.3.2 夹杂物的形状	29
2.4 夹杂物对钢性能的影响	31
2.5 减少夹杂物的措施	33
2.5.1 钢包精炼中最大程度去除夹杂	33
2.5.2 最大程度减少宏观夹杂	37
2.5.3 宏观夹杂在中间包中的去除	38
2.5.4 中间包的设计和夹杂物的去除	47
2.5.5 模拟要点	52
参考文献	52
3 流体流动和湍流概述	55
3.1 引言	55
3.2 流体流动类型	55
3.3 牛顿黏性定律	55
3.4 流动的维数	57
3.5 动量传输模式	58

3.5.1 黏性或扩散动量传输	58
3.5.2 对流动量传输	58
3.6 连续和运动方程	59
3.7 斯托克斯定律	59
3.8 湍流流动	60
3.8.1 涡流的尺谱	61
3.8.2 普朗特混合长度和有效黏度	62
3.8.3 湍流剪切应力	62
3.9 湍流的连续方程和运动方程	63
3.10 传热与传质	63
3.11 湍流模型	64
3.12 小结	65
参考文献	65
4 流体流动特性	66
4.1 引言	66
4.2 刺激响应法	66
4.2.1 阶梯输入和 F 曲线	67
4.2.2 脉冲输入和 C 曲线	68
4.3 流动体系的流动特性	68
4.3.1 活塞流	68
4.3.2 全混流	69
4.4 实际体系中的流动特性	71
4.4.1 轴向扩散模型	71
4.4.2 槽列 (串联槽) 模型	78
4.4.3 组合或混合模型	79
4.5 小结	84
参考文献	84
5 钢液流动模拟	85
5.1 引言	85
5.2 物理模拟	85
5.2.1 相似性	86
5.2.2 相似准则	87
5.2.3 等温体系	89

5.2.4	非等温体系	92
5.2.5	夹杂物去除的模拟	94
5.2.6	水模拟步骤	98
5.2.7	示踪剂密度对钢液流动特性的影响	100
5.3	数学模拟	103
5.3.1	湍流场和传热	103
5.3.2	边界条件和假设	103
5.3.3	数值求解方法	104
5.3.4	示踪剂的扩散	104
5.3.5	夹杂物传输	104
5.3.6	商用软件	105
5.4	研究实例	105
5.4.1	研究实例 1	105
5.4.2	研究实例 2	105
5.4.3	研究实例 3	110
5.5	小结	112
	参考文献	112
6	中间包操作	114
6.1	引言	114
6.2	钢包向中间包运输钢液过程的二次氧化	114
6.3	卷渣与检测技术	116
6.4	中间包容量的影响	120
6.5	流动控制的影响	125
6.5.1	中间包的流动控制	125
6.5.2	无流动控制的大中间包	129
6.6	中间包吹气	129
6.7	中间包覆盖渣的作用	135
6.7.1	渣的碱度	136
6.7.2	氧化铝的溶解速率	139
6.7.3	渣的黏度	140
6.7.4	渣的组成	140
6.7.5	中间包覆盖渣中的金属铝	140
6.7.6	没有中间包覆盖渣的中间包操作	141
6.8	加钙	141

6.9 异钢种连浇	144
6.9.1 钢种隔离器和铸坯连接器的使用	145
6.9.2 用同一中间包异钢种浇铸	147
6.10 中间包耐火材料	148
6.11 热中间包周转	150
6.11.1 渣的结晶与复合	152
6.11.2 中间包的温降	152
6.11.3 炉数和耐火材料成本	152
6.12 连浇的开始与结束	152
6.12.1 连浇开始	152
6.12.2 连浇结束	155
6.13 中间包向结晶器的钢液输运和水口堵塞	156
6.13.1 中间包向结晶器的钢液输运系统	156
6.13.2 中间包水口、滑板孔和 SEN 的堵塞	158
6.14 小结	161
参考文献	161
7 钢液温度控制	165
7.1 引言	165
7.2 钢液温度的变化	165
7.3 温度测量装置	168
7.4 过热度控制的需求	171
7.5 外加热（等离子系统）	174
7.5.1 直流弧等离子系统	174
7.5.2 移动式等离子弧系统	178
7.5.3 交流弧等离子系统	180
7.6 外加热（感应系统）	185
7.7 外冷却	188
7.8 小结	188
参考文献	189
8 中间包最新技术	191
8.1 引言	191
8.2 H 形中间包的先进性	192
8.3 离心流中间包（CF 中间包）	195

8.4 中间包吹氩	197
8.5 钢液流的电磁控制	198
8.6 中间包加热器	204
8.7 惰性气氛下单个中间包热周转再加热	207
8.8 钢包到中间包钢液流股的氩气保护浇铸	209
8.9 小结	210
参考文献	211

1 引 言

在现代炼钢厂，钢是通过氧气转炉（BOF）或电弧炉（EAF）生产的。转炉生产中，用氧吹炼铁水和废钢，同时添加石灰等熔剂进行脱碳、脱磷、脱硫和脱硅。现代电弧炉所进行的是熔化和冶炼废钢及其他原料，而且也采用了吹氧和添加石灰。图 1.1 示意出了一个现代化钢铁厂的炼钢和连铸设施^[1]。由转炉或电炉生产的含有溶解氧的钢液出钢后在钢包中用 Fe-Si、Fe-Si-Mn 等铁合金，和/或金属铝进行脱氧。脱氧产物如二氧化硅、硅酸镁、三氧化二铝、硅酸铝、铝酸盐和/或他们的复合物通过上浮，大部分得以从熔体中去除。脱氧后的钢液如需要时可在钢包炉（LF）进行进一步处理，以去除悬浮钢液中的氧化物颗粒，即所称的非金属夹杂或简单夹杂，降低硫含量以及调整钢液的成分和温度。在真空设备中（RH、VAD、或 VOD）对钢液进行脱气处理，降低裂纹敏感钢的氢含量和/或超低碳钢的碳含量，以满足用户的要求。

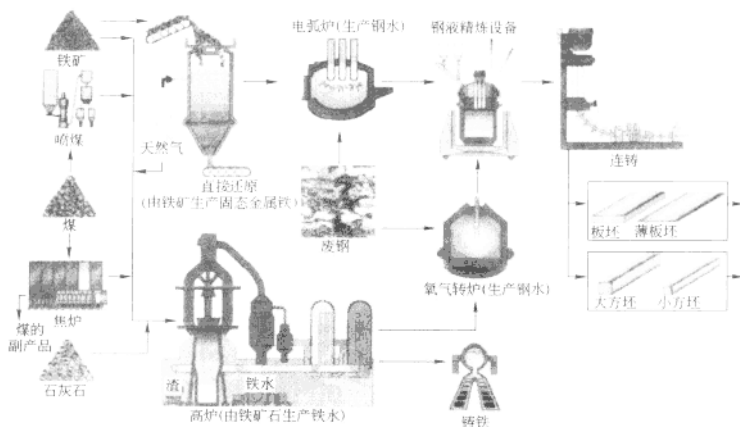


图 1.1 典型的炼钢和连铸设施^[1]

钢包精炼后的钢液通过中间包注入连铸机的结晶器内凝固成板坯、大方坯或小方坯等，如 Yoshida 等所绘的图 1.2 所示^[2]。在最近的三十年间，连铸已发展

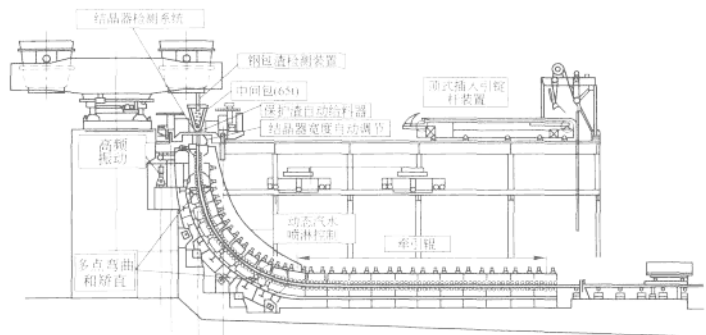


图 1.2 在钢包与结晶器之间装有中间包的连铸机布置图^[2]

成为钢凝固成型的成熟技术。今天，除大型铸件外连铸已几乎完全替代了模铸。连铸已显示出许多方面的优点：更高的金属收得率，更好的成分均匀性和更高的洁净度。在连铸过程中，中间包在连接钢包与连铸机方面起到了十分重要的作用。已发表涉及连铸技术的文献中很大一部分与中间包有关，但目前仍然欠缺从基本原理到中间包实际操作进行全面阐述的文献。

本书的目的是对作为钢铁生产过程中一个重要组成部分——中间包技术，给予一个全面的认识，尤其要强调的是它在洁净钢生产中所体现的冶金功能。书的前半部分介绍了认识了解中间包技术的基础理论方面的内容，其余部分内容涉及中间包操作方面的内容。有一章专门对中间包的最新技术作了介绍。因此，本书的基础性足以作为过程冶金专业研究生的教材或作为冶金研究人员和企业工程师的一本重要参考书。本书不包含钢包精炼和连铸工艺的讨论，涉及中间包设备方面的内容也相当有限。

第 1 章简要介绍了中间包在输运洁净钢液进入连铸结晶器过程中的重要性；第 2 章阐述了中间包内非金属夹杂物形成和去除的热力学及动力学；第 3 章介绍了影响夹杂物去除的中间包内钢液的流体流动和湍流；第 4 章阐述了中间包内钢液的流动特征；第 5 章对中间包内流体流动的物理学模拟进行了描述；第 6 章详细介绍了中间包操作；第 7 章讨论了中间包内钢液的温度控制；第 8 章涉及中间包的最新技术。

1.1 钢的模铸和连铸

连铸经历了一个时期后逐渐替代了模铸。连铸钢达到年初钢产量 50% 的时间：日本是 1978 年，意大利和联邦德国是 1980 年，韩国是 1982 年，英国是

1984 年, 美国是 1986 年。大型锻铸件和各种类型钢的小批量生产目前仍采用模铸。为了获得更高的连铸金属收得率, 已致力于提高连铸坯表面质量和内部质量方面的努力, 同时连铸的生产能力也随初钢产量有了实质性的同步增长。当前, 超过 95% 的碳钢和特殊钢是通过连铸生产的。

模铸生产中, 在铸铁底盘上放置着一方形、矩形、多边形或圆形截面的空腔铸铁模。精炼后的钢液以两种不同的方式由钢包注入钢锭模中。一种称为上注法, 即钢液由钢锭模的顶部注入; 另一种称为下注或底注法, 即通过流槽和汤道砖将钢液注到单个或多个钢锭模中。上注法和下注法的典型布置见 Eisenkolb 和 Gerling 所作的图 1.3^[3]。在上注法中, 钢液注流对空气有过分的暴露, 因而二次氧化就比较严重。当注流冲击到钢锭模内的熔体表面时, 二次氧化产物和浮渣将被带入熔体本体中而成为宏观夹杂。模铸过程中, 钢液飞溅黏附到钢锭模壁上, 在钢锭的表皮形成了表面缺陷, 这需要后续进行表面精整。底注过程中, 虽然减少了注流暴露空气的二次氧化、渣的卷吸以及飞溅, 但钢液流股与流槽及汤道砖内的耐火材料的接触时间比较长, 这将导致缘由耐火材料的夹杂物污染钢液。对于高端用途的大型钢锭, 质量是十分重要的, 因此, 在上注过程中采用了惰性气体保护或抽真空。对于高端用途的小钢锭, 普遍采用下注法。

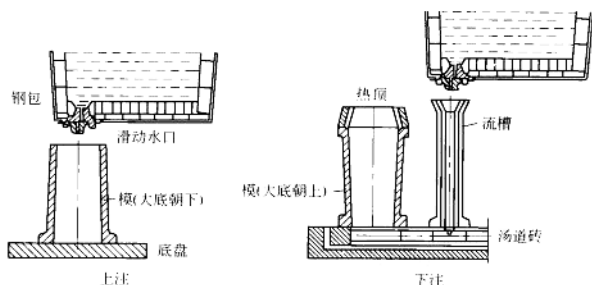


图 1.3 传统模铸中的上注和下注^[3]
(大底朝上的钢锭模用于完全脱氧的钢液)

模铸过程中, 用铝完全脱氧的钢液通常是用上大下小的热顶钢锭模浇铸的。钢锭模的热顶是通过钢锭模顶面周边放置绝热板并结合钢液表面添加发热剂和绝热保护渣。热顶技术延缓了钢锭顶部的凝固, 并将钢液由顶部向钢锭的核心部位输送以填补由钢液凝固引发的缩孔。钢锭凝固过程中, 钢锭的不同部位产生了不同类型的晶体和偏析, 见 Takenouchi 的图 1.4 所示^[4]。

比液态金属重的等轴晶将沉积在钢锭的底部。它们常常捕获处于上升的宏观

夹杂物并将其带到钢锭的底部。当熔体的凝固由钢锭模壁向其中心发展时，因柱状枝晶的生长在钢锭表面周边形成了细小的激冷晶体，并且将发展成枝柱状晶体。

由于密度不同，富集溶质的熔体开始在枝状晶前沿上升，沿凝固前沿留下一倒 V 形的偏析轮廓。在钢锭的核心部分充满着来自顶部的沉积等轴晶。随着凝固的进行，核心部位的体积收缩将引发等轴晶间断下落，富集溶质的熔体填充了所产生的空隙。这一过程将导致 V 形偏析的形成，并且在钢锭的热顶熔体供应不足或核心上方钢液凝固搭桥阻塞的情况下常常伴随缩孔和疏松结构。在等轴枝晶区域溶质的富集程度和疏松结构取决于钢液的过热度、热顶钢液的供给程度、钢锭的高宽比以及钢锭的锥度。

在真空或惰性气氛下将洁净钢液注入钢锭模中可以减少宏观夹杂物。通过降低钢液中的溶质含量（P，S）和 Si 含量，阻止枝晶间熔体的上浮，以及优化钢锭模纵向锥度和高宽比，这样将倒 V 和 V 形偏析减少到最低程度。增加热顶操作可以减少 V 形偏析和疏松结构的产生。

通过认真执行这些措施，日本钢铁厂（Japan Steel Works）的 Takenouchi 已经生产出基本上无偏析或宏观夹杂的 600t 钢锭^[4]。这些钢锭已被用于要求十分苛刻的用途，如原子反应器的低压涡轮轴和高压容器。事实上，7 炉脱碳的钢液被连续注入到一 600t 的钢锭模中以稀释热顶区和等轴枝晶区的碳富集，否则这些区域将出现 V 形偏析。已经建立了减少产生倒 V 形偏析和 V 形偏析的半经验关系式，而且与实际所观测的吻合良好。然而，即便是这样十分谨慎的浇铸工艺，去除因宏观夹杂的钢锭底部和因溶质偏析的热顶（即去头去尾）已成为强制性操作。这实质上降低了钢锭的金属收得率。用大量小钢锭模进行真空下浇铸，从经济角度不具有操作性。此外，钢锭模的安装和拆卸属于既脏又差的操作。

与模铸不同，连铸生产只要在一炉役中连浇炉数超过 3 炉，其金属收得率就比较理想。在这种连续浇铸工艺中，只是开浇和浇铸结束时的很有限一小部分铸坯被处理掉。与正常的模铸相比，连铸坯的表面质量和内部质量包括偏析和宏观

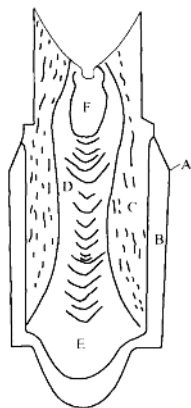


图 1.4 用上注法浇铸的 75t 镇静钢锭中晶体结构和偏析^[4]

- A—激冷层；B—柱状晶区；C—带有倒 V（或 A）形偏析的枝柱状晶区；
- D—带有 V 形偏析的等轴晶区；
- E—带有负偏析和宏观夹杂的沉积等轴晶区；F—溶质正偏析区

夹杂均要好。连铸坯拉坯方向的倒 V 形偏析和 V 形偏析通过积极的工艺措施已经被降低到很低的水平。这些措施包括：

(1) 通过降低浇铸温度，施加结晶器电磁搅拌以产生有利于等轴晶生长的形核，以及分散沉积等轴晶边界间的溶质富集熔体等手段增加铸坯内熔池末端等轴晶的沉积；

(2) 阻止在枝晶周围区域的溶质富集熔体向铸坯中心液心末端的吸析。这可以通过在连铸坯凝固末端用几对辊或一对铁砧以一合理量的轻压下（如 0.75mm/m ）来实现。

钢液由钢包向中间包输运过程中，通过采用长水口（钟形或直桶钢包密封水口）或密封管保护注流免遭空气的二次氧化来降低连铸坯中宏观夹杂的形成，分别见 Shade 的图 1.5^[5] 和 Yamagami 等的图 1.6^[6] 所示。

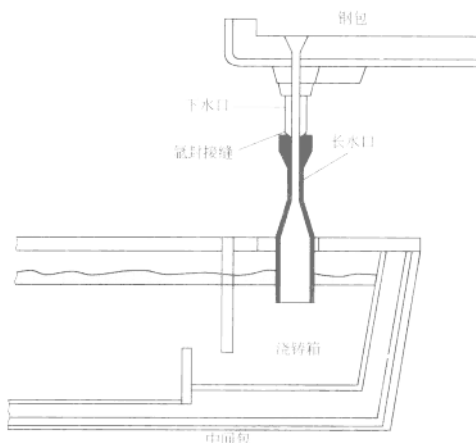


图 1.5 中间包采用长水口浇铸洁净钢液以最大程度减少宏观夹杂的污染^[5]

连铸坯的质量得到提高，而且比钢锭的质量更稳定和更易控制。连铸坯（半成品）从形状上更接近最终产品，因此在某些情况下可以取消粗轧。连铸技术的进一步发展将有可能将热坯直接送入加热炉（热装）或直接轧制。这两种工艺避免了表面处理（精整），从而减少了金属损失，节约再加热的燃料费用。因不需要对连铸坯进行表面处理，连铸机的生产能力和浇次的组织协调性得到了提高。通过一整套的措施使得较高的拉速下生产的连铸坯其质量不受影响，从而使一些

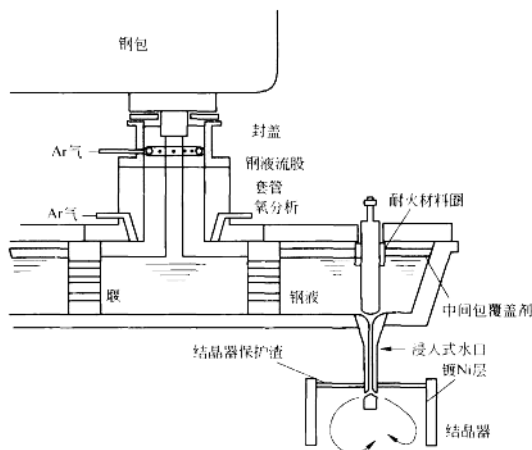


图 1.6 中间包采用密封管和各種裝置以最大程度
减少宏观夹杂的污染并促进其上浮^[6]

连铸机的生产能力得以提高，达到转炉（BOF）的水平（大约每台铸机 300 万 t/a）。尽管初期投资较大，但这些优点已足以使连铸成为比模铸更好的钢液凝固工艺。

1.2 中间包在连铸生产中的作用

为了将精炼后的钢液由钢包输运到连铸机的结晶器中，在钢包与结晶器之间采用了—个称为中间包的中间容器。如 Okimori 的图 1.7 所示，中间包是上大下小、耐火材料作内衬的矩形容器，其顶部也有一用耐火材料作内衬的盖^[7]。中间包底部有一个或多个水口，并装有控制钢流量的滑板或塞棒。中间包容器通常被划分成两个区域：入口区，常常有一注流箱，钢包中的钢液流入到此区域；出口区，将钢液注入到结晶器。坝、堰（挡渣墙）和带孔的夹板等各种控流装置安置在中间包的长度方向。各种中间包形状的俯视图见 Wolf 的图 1.8 所示^[8]。图中的点线表示中间包内的钢液从入口流向出口的路径。路径越长，越有利于延长钢液在中间包内的停留时间，促进宏观夹杂的上浮。

采用中间包的目的是将钢液以设计的流量和温度、无夹杂引发的污染、平稳地输运给结晶器。结晶器的数量通常为板坯连铸机 1 或 2 个，大方坯铸机 2~4 个，小方坯铸机 4~8 个。通过维持中间包内钢液的深度来保持注入结晶器内钢