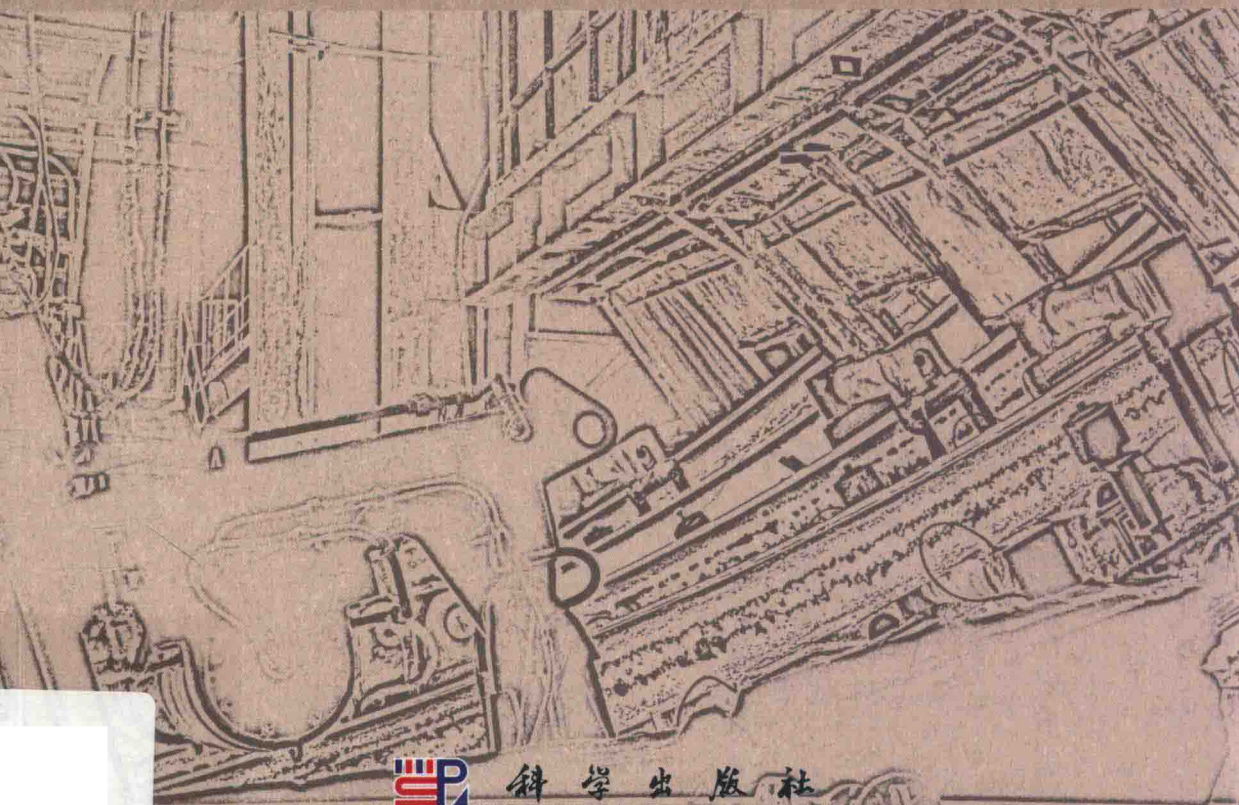


Theory and Process of Mold
Oscillation for Continuously Cast Steel

连铸结晶器振动 理论与工艺

孟祥宁 朱苗勇/著



科学出版社

连铸结晶器振动理论与工艺

孟祥宁 朱苗勇 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

连铸是钢铁生产的主要手段,而连铸结晶器的合理振动对连铸工艺和铸坯质量有直接的影响,是保证连铸顺利进行的关键环节。全书分为9章,介绍了连铸结晶器振动工艺概述、连铸保护渣基础、连铸保护渣功能与应用、正弦振动的参数研究与同步控制模型、非正弦振动波形构造及参数研究、非正弦振动参数优化及铸坯质量、连铸结晶器内界面行为及振痕形成机理、钢的浇铸工艺与连铸机设备和连铸结晶器振动装置等。

本书对振动理论与工艺的说明深入浅出,言简意赅,可作为从事连铸结晶器振动技术研究的科研人员、相关专业的本科生及研究生的参考用书,还可为从事连铸生产的工程技术人员及管理人员提供理论指导。

图书在版编目(CIP)数据

连铸结晶器振动理论与工艺/孟祥宁,朱苗勇著. —北京:科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-055688-2

I. ①连… II. ①孟… ②朱… III. ①结晶器-振动理论-研究 IV. ①TQ051.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第292543号

责任编辑:张震 姜红/责任校对:杜子昂
责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencecp.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:370 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

钢铁材料是人类社会的基础材料之一，它推动着社会的发展。无论在国家经济建设方面还是人们日常生活中钢铁所发挥的作用都无可替代。随着世界经济的发展、工业和基础建设的加速，钢铁工业也相应地得到发展。连续铸钢（简称连铸）的发展尤为迅速，它是钢铁工业发展过程中继氧气转炉炼钢后的又一项革命性技术，在钢铁工业生产流程的变革、产品质量的提高和结构优化等方面发挥了非常重要的作用，且当今世界连铸比已高达 95%。连铸技术的发展适应钢的品种开发和质量进一步提高的主题，高效连铸是连铸生产的重要方向。高效连铸技术就是以高拉速为核心，以高质量、无缺陷的铸坯生产为基础，实现高连浇率、高作业率的连铸系统技术。高效连铸技术的开发，应主要从提高连铸机生产率和提高铸坯质量两方面着手。

在钢铁冶金生产过程中，连铸技术作为承上启下的生产工序在钢铁产品制造过程中具有重要地位，而连铸结晶器因具有高效传热、凝固成型、净化钢液和质量控制等重要功能，被称为“连铸机心脏”。高温钢液在连铸结晶器内源源不断地消除过热度并推进凝固进程，发生着复杂的流动、传热、凝固、溶质再分配和受力等行为，且各行为之间相互影响、相互作用，极易引发铸坯表面质量缺陷。而生产过程中，铸坯质量的好坏与其在连铸结晶器内部的变化行为有直接关系。连铸结晶器振动作为重要的控制手段之一，对于减少铸坯缺陷、提高铸坯质量具有重要意义。

连铸结晶器振动是连铸技术的标准操作。连铸过程中，连铸结晶器以一定的规律振动，可使连铸结晶器内壁与连铸保护渣，以及连铸保护渣与钢液之间获得良好的润滑条件；可减少摩擦，防止钢水和连铸结晶器内壁黏结，进而影响着坯壳的生长和脱模以及铸坯的表面质量。一旦钢水与振动器发生黏结，振动可以强制脱模，及时将黏结消除。同时连铸结晶器振动产生的泵吸作用，可使钢液上表面连铸保护渣液渣层被抽吸到连铸结晶器内壁与凝固坯壳间隙之中，起到改善铸坯润滑和控制连铸结晶器传热等作用。连铸结晶器振动技术已成为连铸的先决条件，连铸结晶器的各种冶金功能只有伴随连铸结晶器振动工艺过程才能实现。随着连铸技术发展，连铸结晶器振动方式（速度曲线）经历了矩形、梯形、正弦和非正弦的发展过程。

当前常见的振动方式主要有正弦和非正弦两种。正弦振动过程中存在负滑动，

有利于脱模，且加速度较小，利于振动机构平稳运行。但正弦振动波形完全取决于振频和振幅两个参数，对振动波形的调控范围有限。非正弦振动引入了非正弦振动因子，增加了控制波形的独立参数，提高了波形的调节能力。工业生产实践表明，连铸结晶器非正弦振动可以增大连铸保护渣的消耗量，从而提高铸坯和连铸结晶器壁之间的润滑效果，降低最大上振速度，减少连铸结晶器作用在初凝坯壳上的应力，减轻铸坯表面振痕深度，提高铸坯质量，获得了较为成功的应用。在构造非正弦振动波形时，既要满足非正弦振动的特征，又要保证振动装置具有良好的动力学特性。避免产生刚性冲击与柔性冲击，对连铸结晶器的平稳运行和使用寿命造成影响。通过对连铸结晶器振动方式的控制，可有效提高铸坯的质量和金属收得率，降低生产成本，节约资源和能耗。

目前，关于连铸结晶器振动理论与连铸保护渣的润滑和传热、铸坯表面质量形成等的机理阐述仍显得分散和片面，没有一本通用的著作。本著作中，作者在吸收了前人在该领域的理论研究成果的基础上，结合工业实时数据及作者多年的教学体会和科研心得对连铸结晶器振动理论与工艺进行了深入的系统探讨研究。

本书结构安排如下：第1章论述连铸结晶器振动工艺的发展史和工艺要求；第2、3章论述连铸保护渣的基础、润滑作用、性能、工艺参数匹配、对铸坯质量的影响和应用等；第4~6章介绍正弦振动参数和同步控制模型、非正弦振动波形构造法及参数研究、非正弦振动参数优化及铸坯质量；第7章对连铸结晶器内界面行为进行深入探讨，研究连铸结晶器内传热、摩擦、钢液流动、钢渣界面行为，以及振痕的形成机理和控制技术等；第8、9章概括性地论述钢的浇注工艺、连铸机设备与结晶器振动装置等。

特别感谢硕士研究生杨青山和周建川在本书出版过程中所做的整理和修改工作，感谢杨杰博士、林仁敢硕士和汪宁硕士为本书所做的相关研究工作。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足，诚望读者批评、指正。

孟祥宁

2017年7月15日于沈阳

目 录

前言

第 1 章 连铸结晶器振动工艺概述	1
1.1 连铸技术发展及趋势	2
1.2 高效连铸简介及其关键技术	6
1.2.1 高效连铸简介	6
1.2.2 高效连铸关键技术	7
1.3 连铸结晶器振动模式的发展	8
1.3.1 同步振动	10
1.3.2 负滑动振动	10
1.3.3 正弦振动	10
1.3.4 非正弦振动	11
1.3.5 连铸结晶器振动的弊端	11
1.4 连铸结晶器振动工艺要求	12
1.4.1 连铸结晶器内的摩擦力	13
1.4.2 初始裂纹形成的力学影响	22
参考文献	23
第 2 章 连铸保护渣基础	26
2.1 连铸保护渣概述	26
2.1.1 连铸保护渣的发展历史	26
2.1.2 连铸保护渣的发展方向	27
2.1.3 连铸保护渣的类型	28
2.1.4 连铸保护渣的冶金功能	31
2.2 连铸保护渣的理化性能	32
2.2.1 连铸保护渣的碱度	33
2.2.2 连铸保护渣的黏度	35
2.2.3 连铸保护渣的熔化温度	39
2.2.4 连铸保护渣的熔化速度	41
2.2.5 连铸保护渣的结晶性能	43
2.2.6 连铸保护渣的界面性质	46

2.2.7	熔渣吸收夹杂的能力	48
2.2.8	熔渣的密度及热度	55
2.3	炭质材料在连铸保护渣中的作用	55
2.3.1	连铸保护渣常用炭质材料的类型	56
2.3.2	连铸保护渣常用炭质材料的物理性质	56
2.3.3	炭质材料的作用	57
2.3.4	炭质材料的选择	57
2.3.5	炭质材料的配入量	58
	参考文献	60
第3章	连铸保护渣功能与应用	62
3.1	连铸保护渣的润滑作用	62
3.1.1	连铸保护渣在连铸结晶器内的分布	62
3.1.2	浸入式水口连铸保护渣浇铸的润滑过程	63
3.1.3	连铸结晶器渣道润滑机理	64
3.1.4	连铸保护渣渣膜的形成及厚度	66
3.1.5	液态渣消耗机制	70
3.1.6	相关参数对渣耗量的影响	72
3.1.7	浇铸参数对渣道润滑的影响	75
3.2	连铸保护渣性能与工艺参数的匹配	76
3.2.1	连铸保护渣性能与连铸结晶器断面形状及尺寸的匹配	76
3.2.2	连铸保护渣性能与不同钢种的匹配	77
3.2.3	连铸保护渣性能与铸坯拉速的匹配	78
3.3	连铸保护渣对铸坯质量的影响	80
3.3.1	铸坯表面裂纹	80
3.3.2	铸坯表面凹陷	81
3.3.3	铸坯表面及皮下夹杂	82
3.3.4	黏结漏钢	83
3.3.5	表面增碳	83
3.4	连铸保护渣在不同类型连铸结晶器的应用	85
3.4.1	宽厚板坯连铸保护渣	86
3.4.2	薄板坯连铸保护渣	89
3.4.3	方坯连铸保护渣	90
3.4.4	合金钢连铸保护渣	91
3.4.5	连铸保护渣实例	94

参考文献	98
第 4 章 正弦振动的参数研究与同步控制模型	100
4.1 正弦振动规律	100
4.1.1 正弦振动的基本参数	101
4.1.2 正弦振动的工艺参数	101
4.2 正弦振动基本参数的确定	104
4.2.1 负滑动时间曲线	104
4.2.2 负滑动率等值曲线	105
4.2.3 负滑动时间比等值曲线	106
4.2.4 负滑动时间曲线的特点	106
4.2.5 振幅的确定	106
4.2.6 频率的确定	107
4.2.7 振幅和频率应满足连铸保护渣消耗量的要求	107
4.3 正弦振动同步控制模型种类	108
4.3.1 $f = av_c$ 控制模型	109
4.3.2 $f = av_c + b$ 控制模型	109
4.3.3 $f = b$ 控制模型	109
4.3.4 $f = -av_c + b$ 控制模型	110
4.4 正弦振动同步控制模型的建立	110
参考文献	112
第 5 章 非正弦振动波形构造及参数研究	113
5.1 非正弦振动的波形特点	114
5.2 非正弦振动波形的构造方法	115
5.3 构造非正弦振动波形	118
5.3.1 振动形式描述	118
5.3.2 确定振动波形参数	121
5.3.3 确定振动过程参数	123
5.3.4 振动波形动力学性能分析	125
5.4 确定振动参数	126
5.4.1 振动参数选取原则	126
5.4.2 振动参数计算	127
参考文献	130
第 6 章 非正弦振动参数优化及铸坯质量	132
6.1 振动参数对振动效果的影响	133

6.1.1	振动频率对振动效果的影响	133
6.1.2	振幅对振动效果的影响	135
6.1.3	非正弦振动因子对振动效果的影响	137
6.2	振动参数对坯壳受力的影响	138
6.2.1	振动频率对坯壳受力的影响	139
6.2.2	振幅对坯壳受力的影响	141
6.2.3	非正弦振动因子对坯壳受力的影响	142
6.3	非正弦振动因子对工艺参数的影响	143
6.3.1	对负滑动时间的影响	144
6.3.2	对正滑动时间的影响	145
6.3.3	对负滑动时间比的影响	146
6.3.4	对负滑动率的影响	146
6.3.5	对负滑动量的影响	147
6.3.6	对正滑动速度差的影响	147
6.4	振动同步控制模型	148
6.5	振动参数优化	151
6.6	铸坯质量	154
6.6.1	铸坯纯净度	154
6.6.2	铸坯表面质量	159
6.6.3	铸坯内部质量	166
6.6.4	铸坯形状缺陷	171
6.7	铸坯质量研究	173
6.7.1	钢锭和铸坯质量的比较	173
6.7.2	板坯连铸拉速提高对铸坯质量的影响	175
6.7.3	板坯连铸拉速变化对铸坯质量的影响	179
6.7.4	连铸结晶器振动对铸坯表面质量的影响	183
	参考文献	184
第7章	连铸结晶器内界面行为及振痕形成机理	185
7.1	连铸结晶器内传热行为	185
7.1.1	钢水凝固热量释放	185
7.1.2	连铸结晶器内凝固传热	186
7.1.3	连铸保护渣传热	190
7.1.4	影响连铸结晶器传热的因素	191
7.1.5	连铸结晶器内传热行为的检测	194

7.1.6 连铸结晶器传热的数值模拟	196
7.2 连铸结晶器内摩擦行为	197
7.2.1 铸坯与连铸结晶器间摩擦力	197
7.2.2 连铸结晶器摩擦力监测作用及应用潜力	199
7.3 连铸结晶器内钢液流动及钢渣界面行为	199
7.3.1 连铸结晶器内钢液流动行为及影响因素	200
7.3.2 连铸结晶器内钢渣界面行为与铸坯质量的关系	206
7.4 振痕形成机理及控制技术	207
7.4.1 振痕形成的模型	207
7.4.2 振痕形成机理	213
7.4.3 振痕形貌控制技术	215
参考文献	217
第 8 章 钢的浇铸工艺与连铸机设备	220
8.1 钢的浇铸工艺	220
8.1.1 模铸概述	220
8.1.2 连铸优越性	222
8.2 连铸机设备	224
8.2.1 连铸机主要设备组成及工艺流程	224
8.2.2 连铸机分类及特点	225
8.2.3 弧形连铸机的几个重要参数	229
8.2.4 钢包及钢包回转台	234
8.2.5 中间包及中间包车	238
8.2.6 连铸结晶器	243
8.2.7 二次冷却系统	248
8.2.8 拉坯矫直装置	250
8.2.9 引锭装置	252
8.2.10 辊缝测量装置	252
8.2.11 铸坯切割装置	253
8.2.12 出坯系统的各种设备	253
8.2.13 连铸车间工艺布置	253
参考文献	256
第 9 章 连铸结晶器振动装置	257
9.1 连铸结晶器振动装置结构型式及功能特点	257
9.1.1 长臂振动机构	257

9.1.2	导轨式振动机构与差动齿轮振动机构	258
9.1.3	四连杆振动机构	259
9.1.4	四偏心轮振动机构	261
9.1.5	液压振动机构	261
9.1.6	柔性体连铸结晶器振动机构	262
9.2	非正弦振动发生装置	263
9.2.1	电液伺服非正弦振动发生装置	264
9.2.2	机械驱动的非正弦振动发生装置	266
9.2.3	振动装置选择原则	268
9.3	连铸结晶器振动机构运动误差分析	268
9.3.1	连铸结晶器各点的轨迹偏差分析	269
9.3.2	振动机构运动时的瞬心偏差分析	271
9.3.3	各种工况下运动轨迹偏差及瞬心偏差的计算与分析	272
9.3.4	振动机构实际运动误差	273
9.3.5	短臂四连杆振动机构误差分析实例	274
9.4	机械驱动非正弦振动装置动力学分析	277
9.4.1	非正弦振动波形动力学特性分析	277
9.4.2	多体动力学分析的研究现状	278
9.4.3	薄板坯连铸机连铸结晶器振动装置动力学分析实例	278
9.4.4	首钢机械驱动非正弦振动装置动力学分析	281
	参考文献	282

第 1 章 连铸结晶器振动工艺概述

连铸是指将高温钢液连续地浇铸到一个或多个强制水冷的金属型腔内，凝固成形后，再经二次冷却，凝固成一定形状（规格）铸坯的工艺方法。在工厂生产钢铁过程中，有以下两种方法使钢水凝固成型：连铸法和模铸法。连铸技术的应用，彻底改变了钢铁冶炼车间的生产流程和物流控制，为车间生产的连续化、自动化和信息技术的应用，以及为大幅度改善炼钢环境和提高产品质量提供了条件，因此，各国争相发展连铸相关技术。截至 2010 年，欧洲有些国家的连铸比已几乎达到 100%，连铸比已经成为衡量一个国家钢铁工业技术水平的重要指标之一。当前连铸技术呈现出非常强劲的发展势头，其特点为：

- (1) 世界连铸比迅速增长；
- (2) 以日本为代表的一批发达国家接近或基本实现了“全连铸化”的目标；
- (3) 连铸工业化的经济效益十分显著，成为改革和振兴钢铁工业的重要技术指标；
- (4) 随着连铸和轧钢工艺更紧密地结合，铸坯热装和自接轧制技术已在日本发展并兴盛起来，欧美国家也紧跟着普遍推行，已成为连铸工艺发展的基本趋向；
- (5) 铸坯质量的改善取得了重要的突破性进展，无缺陷铸坯的生产技术和生产体制日趋成熟，且已在工业生产中确定和普及，成为扩大品种、提高质量的坚实基础。

现阶段，能源、环境等都对连铸提出了更高的要求，形成了连铸技术发展的最新方向，即近终形连铸、高质量钢液浇铸和高效连铸。三个新方向之间相互关联，在发展进程中逐渐发展为优质、高效和经济三者兼顾的生产技术体系。

近终形连铸是当代世界钢铁技术的一次大变革，是当前具有强竞争力的短流程钢厂采用的主要工艺。近终形连铸力求浇铸尽可能接近最终产品的铸坯，以便进一步减少中间加工工序，节省能源、减少储存和缩短生产时间。其与传统工艺相比，具有流程短、效率高、建设投资小、生产成本低等优点，受到世界钢铁界的高度重视。

高质量钢液浇铸，主要包括保证铸坯的纯净度、表面质量和内部质量。它满足对高质量产品的不断追求，能有效减少产品成型加工过程，是连铸技术向高水平发展的标志。

高效连铸, 就是连铸机实现高拉速、高作业率、高温出坯、高连浇炉数及低拉漏率, 生产无表面缺陷铸坯, 本章将详细介绍。

1.1 连铸技术发展及趋势

19 世纪 40 年代, Sellers、Lainy 和 Bessemer 等学者已提出一些有关连续浇铸液态金属的设想, 但连铸的概念是由英国学者 Bessemer 提出的, 最开始的连铸结晶器是静止不动的, 拉坯过程中坯壳极易与连铸结晶器发生黏结, 导致出现拉不动或漏钢事故^[1]。1886 年, 美国学者 Atha 首次采用底部敞口、垂直固定的厚壁铁质结晶器与中间包配合实现了间歇式拉坯^[2]。随后, 1887 年德国学者 Daelen 开创了连续浇铸的早期尝试, 他提出了与现代连铸相似的连续浇铸方案, 其方案中所具备的设备有上下口敞开的结晶器、二次冷却段、水冷装置、引锭杆、夹辊以及铸坯切割装置等, 但在其后的很长一段时间内, 连续浇铸技术仍主要应用在有色金属冶金领域, 立式固定的结晶器和低的连续浇铸速度是此时连铸机的主要特征, 铸坯液相穴也很少能超出结晶器^[3]。为避免初凝坯壳与结晶器壁黏结导致拉不动或漏钢事故、获得较高的拉速和稳定生产过程, 1933 年德国学者 Junghans 在浇铸黄铜时, 使结晶器先与铸坯同步行进一定距离, 随后以较快的速度反向返回至初始位置, 首次将结晶器振动引入连续浇铸, 并获得了优于固定式结晶器的浇铸效果。以此为基础, 铝合金的连续浇铸于 1936 年取得了成功, 从而开始了有色金属连续浇铸的工业化生产, Junghans 也因此被称为现代连续浇铸之父^[4]。

相对于有色金属连续浇铸, 钢铁生产因其炉容量大、浇铸温度高及钢导热性较低等, 限制了连铸技术的发展, 但受到有色金属连续浇铸技术成功应用的激励及外界经济环境的影响, 20 世纪以来关于连铸工业化的试验性研究广泛展开, 涌现出大量相关方案和专利, 取得了一系列显著成果。1943 年, Junghans 建成了第一台用于钢水浇铸的实验连铸机, 提出了水冷振动连铸结晶器、浸入式水口和在钢液面上添加保护剂等技术措施, 为实现连铸技术的发展奠定了基础, 而最具代表性的是, 1949 年 Junghans 和 Rossi 采用已获专利的 Junghans 连铸结晶器分别于德国曼内斯曼公司胡金根厂和美国约阿·勒德隆钢公司 Watervliet 厂的两台立式连铸机上成功完成了连铸炼钢的工业性实验, 1950 年曼内斯曼公司胡金根厂投产了一台浇铸能力为 5t 的立式连铸机。1953 年, 苏联成功建造了半连续式连铸机。1959 年日本在新日铁住金株式会社室兰钢铁厂成功制造了第一台连铸机。1961 年 11 月, 世界上首台弧形连铸机由德国曼内斯曼公司建成。20 世纪 70 年代, 传统连铸技术已经逐渐趋于成熟, 工业技术不断发展。连铸技术慢慢被各个主要产钢国家所采用^[5]。

连铸技术从产生时起就从未停止前进的脚步，并取得了快速的发展，至今大致经历了如下几个阶段：20世纪50年代连铸步入工业化，初期连铸设备多与电炉配合，钢种主要为特殊钢，其规模小、产量低；20世纪60年代出现的弧形连铸机，以其高生产率、低设备成本和便于安装等优点为连铸技术发展和应用奠定了基础，特别是随着转炉炼钢的迅速普及，更需要与连铸相匹配实施快节奏生产；进入20世纪70年代，连铸技术呈现出大发展趋势，相关技术不断涌现，连铸机也具备了与大型转炉配合生产的条件，旨在进一步提高连铸机产能和产品质量；连铸技术在20世纪80年代进入了发展成熟期，钢水洁净度、防氧化措施和自动化水平等的重要性被充分认识，浇铸钢种范围扩大，生产率和产品质量逐渐提升，一些国家连铸比已超过90%；20世纪90年代以来对生产率和产品质量的重视程度超过了以往任何时期，新兴技术成果得到应用，装备水平普遍提高，工业自动化程度不断完善，工艺技术更加精细，生产操作也渐趋于稳定，连铸钢材产量年平均增幅逐年攀升，至2000年底已有近40个国家实现了全连铸。连铸技术水平已成为衡量一个国家钢铁工业发展程度的重要标志，实现高效连铸、最大限度地发挥连铸机的综合经济效益已成为面向未来的新挑战。

我国在连铸方面的研究及应用起步比较早，继20世纪50年代中期率先实现有色金属连铸工业化后，1955年即着手进行连铸铸钢的实验研究，1956年研制成功浇铸直径80mm圆坯的半连铸实验装置，1957年建成了第一台工业性试验连铸机，第一台立式连铸机也于1958年在中国中钢集团公司三厂投产，20世纪60年代相继建成投产了一批弧形连铸机，1967年有一台弧形连铸机于北京首钢集团（简称首钢）投产。但这一时期我国连铸工业发展仍比较缓慢，与国际先进水平差距逐渐拉大。为改变这种落后状态，20世纪70年代后期开始注重引进外国的先进技术和设备，武汉钢铁集团公司（简称武钢）率先引进了三套板坯连铸机，并在此基础上实现了全连铸生产，其成功经验为我国连铸事业的发展树立了榜样。近20年来，我国连铸事业进入了快速发展时期，成熟生产技术的采用、新技术的开发、应用基础研究等方面都发展迅猛，连铸生产呈现稳定增长的势头，在引进和吸收国外先进技术、设备及自主开发创新的基础上，通过广大工程技术人员的不懈努力，连铸技术的发展取得了令人瞩目的成就，在相关领域均有突破性进展，连铸机保有量和铸坯产量已居世界第一。20世纪90年代中后期至今的连铸比大幅上升，2000年后我国的连铸比均高于近90%的世界平均水平，如图1.1所示，各项连铸经济技术指标也均处于全球同行业中上游水平^[6]。

随着连铸新技术的不断涌现和改进，连铸发展也呈现出新的趋势，主要体现在：对洁净度和表面及内部质量要求严格钢种的连铸生产，进而提高高品质钢的生产率；采用连铸方式生产梯度复合材料，经济有效地改善钢材性能，为金属材

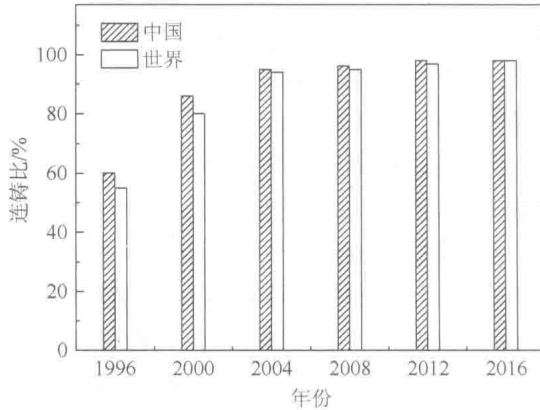


图 1.1 近年来中国与世界连铸比对比

料开发提供新的途径；近终形连铸，即薄板坯连铸、薄带坯连铸及喷雾成型技术与铸坯热送热装及直接轧制技术相配合，具有流程短、设备简单、成材率高、能耗低等显著优点；实施高效连铸，进行常规连铸的高效化改造，进而最大限度发挥连铸机的综合经济效益。

同我国钢铁工业一样，我国连铸工业的整体生产水平和技术水平与其他钢铁强国相比仍存在着不小差距，某些关键技术及装备仍明显落后，钢材品种、规格、质量等与国民经济发展需要尚不匹配，许多问题亟待解决，如应用与国外同样先进的技术装备却无法实现相同档次产品的稳定生产、连铸技术的开发与生产应用间的工程化技术综合能力相对薄弱、缺乏特有技术的整体构架和集成、连铸机实际作业率不高、技术水平较低、能耗较高、工艺结构不合理等。为加快连铸发展步伐，赶超世界领先水平，我国在增加产品品种，改善铸坯质量，引进先进成套设备和工艺，提高冶金自动化水平，强化组织管理和物流管制及近终形连铸、电磁连铸、特殊钢连铸、铸坯凝固控制和双辊薄带连铸等新技术的研究开发方面都做了大量工作，尤其 20 世纪 90 年代初提出的“高速连铸”和在此基础上于 1995 年提出的“高效连铸”的全景规划，以提高拉速、减少连铸机台数和投资、增加连铸生产率、降低生产成本、兼顾炉机匹配、高作业率、高质量无缺陷铸坯的优势，使得高效连铸的实施和常规连铸机的高效化改造已成为面对新形势和挑战时势在必行的发展方向之一^[7, 8]。

我国从第九个五年计划开始设立了“高效连铸技术”研究项目，以广州钢铁企业集团有限公司（简称广钢）的方坯和攀钢集团有限公司（简称攀钢）的板坯为依托，联合科研院所开展相关课题攻关。目前，国内引进、合作及自主研发的高效连铸机已达 50 多台，许多连铸机的最大作业率已超过 90%，自行开发的连续变化锥度结晶器、调整辅助水膜结晶器、二冷动态控制、连续矫直

等关键设备和技术已获突破性进展,并已进行系统集成与推广。方坯的高效连铸技术趋于成熟,已在许多工厂转化实施,广钢 150mm 方坯平均拉速达 2.6m/min,首钢 120mm 方坯拉速达 3.8m/min;近终形连铸作为高效连铸的特殊形式,是今后连铸生产优化和完善的发展方向,薄板坯连铸、中厚度薄板坯的国产化工作已见成效,鞍山钢铁集团有限公司(简称鞍钢)具有完全自主知识产权的 1700mm×135mm 中薄板连铸连轧短流程生产线最高拉速达 3.3m/min;板坯的高效连铸也有了一定进展,宝山钢铁股份有限公司(简称宝钢)1500mm×230mm 大板坯连铸拉速为 1.5m/min,上海梅山钢铁股份有限公司 1270mm×210mm 板坯连铸最大稳定拉速接近 2.0m/min。目前国内高效连铸机的生产能力与日本这样的钢铁强国相比差距还很明显,板坯连铸的高拉速尚有很大的上升空间,研究和推广高效连铸相关技术、深入挖掘连铸机潜能具有重大的现实意义。

连铸结晶器振动是常规连铸的最基本特征,由于连铸生产的工业化要求,连铸结晶器振动应运而生。连铸结晶器是一个强制水冷的无底钢锭模,它也是连铸设备的“心脏”。它的作用就是把液态的钢水经冷却转变为固态钢坯,连铸结晶器中金属外壳内部和钢水相接触,其外部和冷却水相连,通过热传递把钢水冷却成固态。连铸结晶器的形状决定了钢坯的外形,所以可以通过连铸结晶器得到薄板坯和方坯。连铸结晶器以一定的规律振动,可使得连铸结晶器内壁获得良好的润滑条件,既能减少摩擦力又能防止钢水和内壁的黏结,同时还可以改善铸坯的表面质量。连铸结晶器振动技术已成为连铸的先决条件,连铸结晶器的各种冶金功能也只有伴随连铸结晶器振动工艺过程才能实现,可以说连铸结晶器振动是浇铸成功的先决条件,是连铸发展的一个重要里程碑。表 1.1 列出了连铸结晶器振动技术发展过程中的一些标志性成就。

表 1.1 连铸结晶器振动技术的发展

时间	研究者	国籍	研究内容	意义
1933年	Junghans	德国	矩形波	首次将连铸结晶器振动应用于黄铜连铸中
1949年	Rossi	美国	矩形波	首次将连铸结晶器振动技术应用于钢的连铸中
1953年	Hallidy	英国	负滑动	首次提出负滑动概念
1959年	Lipetsk 工厂	苏联	正弦波	首次应用连铸结晶器正弦振动技术
1984年	日本钢管公司福山厂	日本	非正弦波	首次应用连铸结晶器非正弦振动技术
1990年	德马克、阿维迪公司	德国、意大利	液压伺服传动机构	允许在浇铸期间对振动参数进行调整

1.2 高效连铸简介及其关键技术

1.2.1 高效连铸简介

连铸作为现代化钢铁企业不可或缺的连接炼钢与轧制的中间环节，其主要作用是把高温钢水浇铸成具有一定断面形状和尺寸规格的铸坯，如图 1.2 所示，由于铸坯的质量直接影响后续的轧制工序，因此围绕无缺陷铸坯生产、高效连铸机开发、高可靠性连铸设备设计和制造、先进连铸机自动化控制和软件操作、炼钢-连铸-轧钢全流程生产衔接和管理等一系列技术问题的研究、开发和改进越来越受到人们的关注。

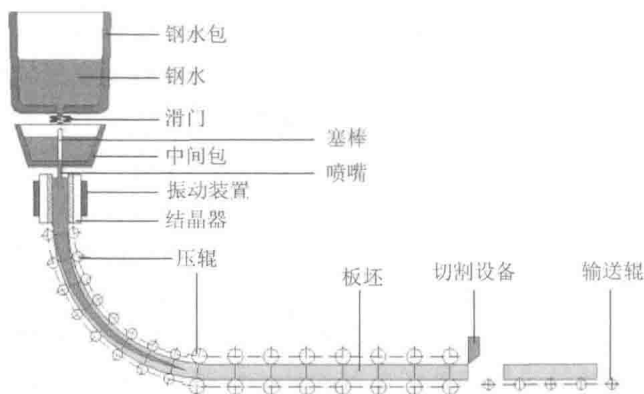


图 1.2 连铸示意图

高效连铸是一种以高经济效益（大幅度降低成本，提高综合竞争力）为目标的系统技术集成，是一系列先进技术和设备的组织和协作，是连铸发展的深化，实施高效连铸、提高连铸机综合经济效益，已成为国内外连铸发展与完善的主要方向^[9]。高效连铸的主要目的是提高连铸机自身和整个生产配套流程的工作效率及铸坯质量，与常规连铸相比，其技术特征体现在以下几方面^[10]。

(1) 高质量。确保良好的铸坯质量是实施高效连铸的前提，生产的铸坯不仅应具有尽量少的表面裂纹、内裂、偏析及夹渣等缺陷，还应尽可能减少甚至避免漏钢事故的发生。

(2) 高拉速。快速浇铸是高效连铸的核心，是提高连铸机生产率和降低能量消耗的有效措施，也是匹配快节奏生产流程的必要条件。

(3) 高作业率。增加连铸机有效作业时间（包括多炉连浇、生产顺行及低维护量）、最大限度地发挥连铸机功效是提高连铸机生产能力的重要保证，也是实施