

# 连续铸钢前沿技术的工程化

干勇

(钢铁研究总院, 北京 100081)

**[摘要]** 论述了具有我国自主知识产权的高效连铸和薄板坯连铸工程化关键技术的特点; 介绍了连续铸钢领域轻压下、液压非正弦振动、电磁连铸等前沿技术的开发现状; 阐述了传统连铸技术超高效率、高品质化及近终形连铸、电磁连铸开发的研发方向。

**[关键词]** 连续铸钢; 高效连铸; 薄板坯连铸; 轻压下; 电磁连铸

**[中图分类号]** TF777 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)09-0012-07

20世纪下半叶以来, 世界钢铁工业的技术经济面貌发生了革命性变化, 出现了两轮大规模的创新高潮(现代转炉炼钢、连续铸钢), 推动了工业发达国家从钢铁产品数量扩张到结构优化的战略转移。突出的贡献之一在于连续铸钢技术的工业化, 取代了用钢锭模铸钢、初轧机开坯的第一代钢液成形技术, 从而使从炼钢到轧制成材的工艺生产线连续化成为可能。而今, 随着相关行业科学技术的进步, 特别是控制技术的发展, 传统连铸技术已无竞争能力可言, 即将为以高效连铸、近终形连铸为代表的新一代连铸技术所代替<sup>[1]</sup>。目前, 连铸技术水平的高低已成为一个国家钢铁工业技术水平的重要指标之一。

## 1 连续铸钢在现代钢铁工艺流程中的重要作用及生产现状

### 1.1 连续铸钢技术的发展历程

连续铸钢技术的发展大致可分为四个阶段<sup>[2]</sup>:

第一阶段(1840—1930年)为连续浇铸金属液思想的启蒙阶段。最早(1887年)提出与现代连铸机相似的连铸设备建议的是德国人 R. M. Daelen, 在其开发的设备中已包括了上下敞开的结

晶器、液态金属注入、二次冷却段、引锭杆和铸坯切割装置等。

第二阶段(1940—1949年)是连续铸钢特征技术的开发阶段<sup>[3]</sup>。其代表人物是现代连铸之父德国人 S. Junghans, 1943年在德国建成了第一台试验连铸机<sup>[4]</sup>, 提出的振动水冷结晶器、浸入式水口、结晶器保护剂等技术原理(如图1所示), 奠定了现代连铸机结构的基础。结晶器振动已成为连铸机的标准操作。

第三阶段(1950—1976年)为传统连铸技术的成熟阶段<sup>[5]</sup>。连续铸钢技术以惊人的速度得到了发展, 出现了5000多个有关连铸的专利, 其中, 具有代表性的技术有钢包回转台、浸入式水口浇注、中包塞棒控制、电磁搅拌、结晶器在线无级调宽、渐进弯曲矫直技术等。

第四阶段(20世纪80—90年代), 传统连铸技术的优化发展阶段, 即高效、近终形连铸发展阶段。以连铸技术优化发展为契机, 带动传统钢铁生产流程向紧凑化、连续化、高度自动化方向发展。

### 1.2 连续铸钢的重要作用及我国连铸生产现状

从原材料角度看, 20世纪堪称为钢铁世纪, 钢铁产品总量逐年增加, 质量逐步提高, 品种趋于

多元化。1900 年全球粗钢产量约  $3\ 000 \times 10^4$  t<sup>[6]</sup>，到 2001 年已超过  $8 \times 10^8$  t。与此同时，连铸比也由 1990 年的 59.5% 迅速提高到 2001 年的 85.4%。

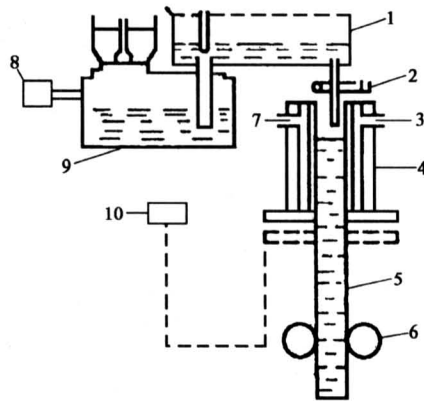


图 1 S. Junghans 专利原理

- 1—中间包；2—保护剂加入装置；3—进水口；
- 4—结晶器；5—铸坯；6—拉辊；7—出水口；
- 8—压缩机；9—钢包；10—振动机构

Fig.1 Continuous casting principle described by S. Junghang patent

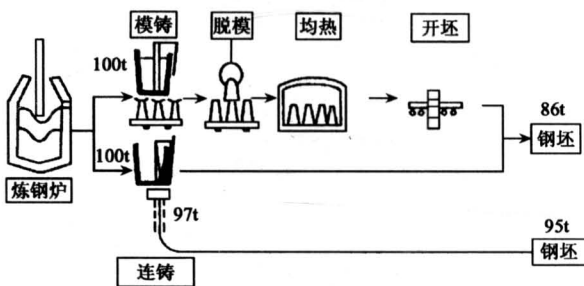


图 2 钢液模铸与连铸工艺流程对比<sup>[1]</sup>

Fig.2 Comparison between ingot process and continuous casting process of steel

与模铸工艺相比（图 2），连续铸钢工艺具有如下优点：

- 1) 简化了铸坯生产的工艺流程，省去了模铸工艺的脱模、整模、钢锭均热和开坯工序；
- 2) 生产流程基建投资可节省 40%，占地面积可减小 30%，操作费用可节省 40%，耐材消耗可减少 15%，能量消耗降低 1/4~1/2，金属收得率提高 9%；
- 3) 使钢铁生产流程趋于高效化、集约化，产品品种生产专业化、优质化；
- 4) 提高了生产过程的机械化、自动化水平，可进行企业的现代化管理升级，流程生产管理趋于科学化、合理化。

1990 年至 2001 年，我国连铸生产持续增长，推动了钢铁生产快速发展（如图 3）。

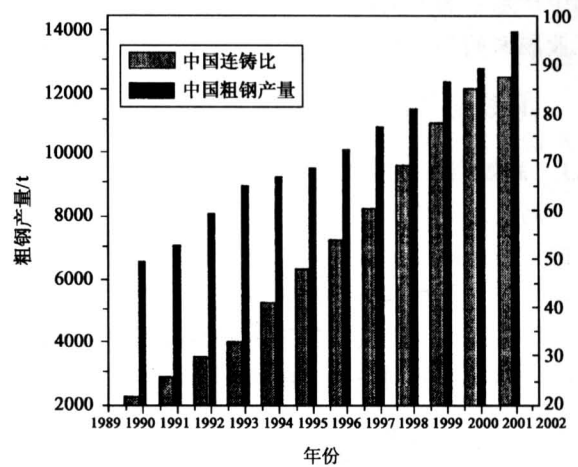


图 3 1990—2001 年我国连铸比及粗钢产量的增长情况

Fig.3 Ratio of continuous casting and crude steel production growth from 1990 to 2001

1990—2001 年，我国钢产量年均增加约  $670 \times 10^4$  t；连铸比由 1990 年的 22.66% 提高到 2001 年的 87.5%，年均增长约 4.7%，与发达国家增长最快时期的速度相近。可以毫不夸张地说，连铸生产的高速增长已成为我国钢铁工业快速发展的最主要原因之一。

同时，连续铸钢技术的发展，促进了冶炼、精炼、轧制工序的技术革新，各项生产技术指标大幅提高，如图 4 所示。

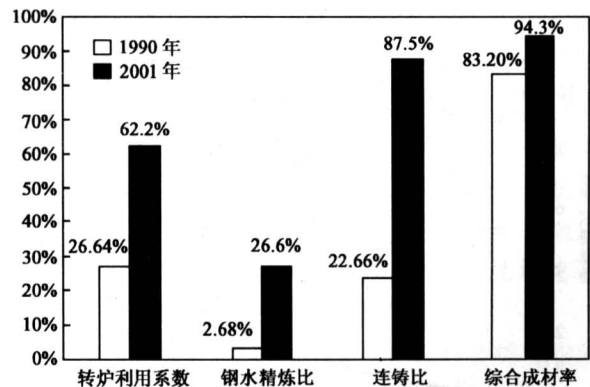


图 4 1990 年及 2001 年我国钢铁生产技术指标统计

Fig.4 Technologic index of iron and steel production in 1990 and 2001 in China

特别是采用高效连铸和近终形连铸技术后，使我国钢铁工业仅用10年时间完成了行业总体流程和生产水平的历史性技术改造任务，步入了中后期工业国家的先进行列。

## 2 高效连铸及薄板坯连铸技术的研发

### 2.1 高效连铸技术的开发及应用

高效连铸技术是20世纪80年代中后期发展起来的，是连铸技术优化发展的方向。所谓高效连铸通常是指比常规连铸生产效率更高，以高拉速为核心，以高质量、无缺陷铸坯生产为基础，实现高连浇率、高作业率的连铸系统技术。其核心是高拉速技术。

以方坯为例，我国自主开发的高效连铸技术集成主要包括连续锥度结晶器、调整辅助水膜结晶

器、板弹簧异向振动、二冷动态控制、连续矫直等系列关键技术。

结晶器被视为连铸机的核心，结晶器技术是当今连铸技术优化发展的核心技术之一。我们研究开发了凝固、流动、热浮力和溶质扩散的三维耦合软件，研究了结晶器内钢液流动、传热、坯壳分布特性，在此基础上，优化设计出连续锥度内腔曲线，较好地满足了坯壳凝固收缩的要求。计算机仿真及生产实际结果表明，连续锥度结晶器能够强化初生凝壳在结晶器内边、角部位的传热，且在纵断面方向热流分布均匀（图5）。从拉坯阻力上看，连续锥度结晶器与传统单锥度结晶器相仿，摩擦阻力随着锥度的增加而增大；总锥度相同，结晶器长度相等时，连续锥度结晶器摩擦阻力较单锥度结晶器摩擦阻力小（图6）。

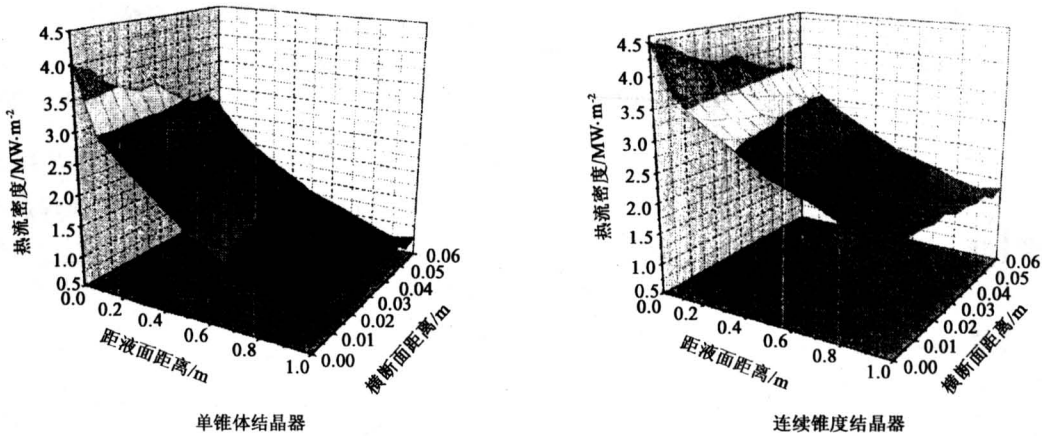


图5 连续锥度结晶器与单锥度结晶器的热流分布

Fig.5 Heat flux of the continuous-taper mold and single-taper mold

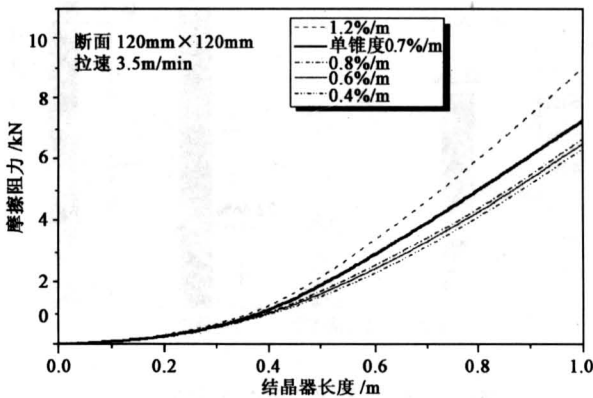


图6 连续锥度结晶器与单锥度结晶器的摩擦阻力

Fig.6 Friction resistance of the continuous-taper mold and single-taper mold

截至目前，国家连铸中心利用自主开发的高效连铸技术，新建或改造35台142流铸机取得了良好的效果。生产技术指标统计如表1所示。

表1 高效连铸与传统连铸技术指标的比较

Table 1 Comparison of technologic index between high-effective and conventional continuous casting

项目	高效连铸	传统连铸	备注
拉坯速度/ $m \cdot min^{-1}$	~4.2	1.8~2.3	120 mm × 120 mm
	~3.0	1.5~1.8	150 mm × 150 mm
	~1.8	0.8~1.0	厚度 > 180 mm
作业率/%	>90	~70	纯浇钢时间率
无缺陷率/%	>95	~80	普碳及低合金
综合效果	高效铸机生产能力提高1倍，铸坯质量有效改善		

### 2.2 薄板坯连铸技术的开发

我国是薄板坯连铸技术开发较早的国家之一，国家在三个五年攻关计划中立项。研制试验过多台薄板坯连铸机。在薄板坯连铸结晶器、侵入式水口、保护渣三大核心技术方面取得了重大突破。

#### 2.2.1 薄板坯连铸关键技术 连铸中心开发了双

弧形、椭圆形及锥形内腔曲面薄板坯连铸结晶器，并用于工业生产。通过商业软件，分析了不同内腔形状对坯壳变形分布的影响（如图 7 所示），与生产中结晶器的磨损情况完全一致（图 8），为薄板坯连铸结晶器内腔曲面的优化奠定了良好的基础。

#### 2.2.2 试验铸机生产 兰州 2 号薄板坯连铸半工

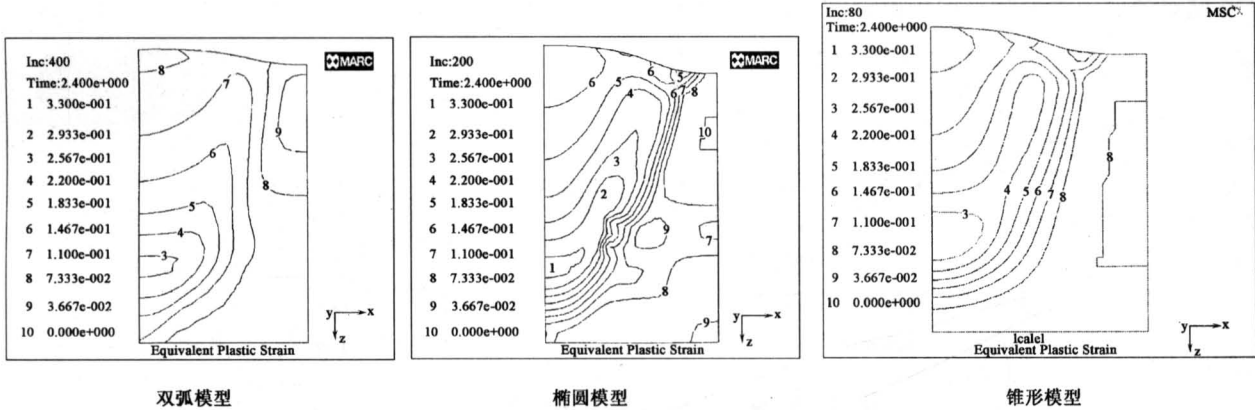


图 7 变截面结晶器内坯壳表面应力分布

Fig.7 Shell surface stress distribution of the various-section mold



图 8 锥形内腔结晶器铜板表面磨损情况

Fig.8 Surface abrasion of the copper plate of cone-shaped mold

业性生产机组在考核期间，生产铸坯 4 395.49 m，铸坯合格率大于 97%。采用试验生产的薄板坯为原料轧制的 12 mm 以下中板，1.5 mm 和 2 mm 薄板，以及 2.75 mm 壁厚焊管，质量均达国家质量标准。在大重薄板坯连铸机上成功地将 60 mm × 900 mm 的普碳钢连铸坯压缩成 (50~46) mm × 900 mm 的连铸坯，获得了轻压下技术的稳定工艺参数和良好的铸坯质量。

### 3 前沿技术研究

#### 3.1 液芯压下技术

在连铸机上，对铸坯进行在线压下的行为，依

据其工艺出发点的不同，存在不同的提法。主要包括轻压下技术、铸轧技术、液芯压下技术等<sup>[7,8]</sup>。这些提法的核心是利用铸机扇形段对带液芯的铸坯进行适量压下，以满足工艺要求。严格意义上讲，轻压下技术、铸轧技术是液芯压下技术的特殊表现形式。

液芯压下是融凝固与塑性变形、连铸与轧制一体的新工艺技术。具体形式有辊式轻压下技术和辊压式轻压下技术，其主要作用概括为如下四方面：在连铸坯的凝固末端进行适量压下，以减小铸坯中心宏观偏析及疏松，改善铸坯质量；在结晶器下方进行压下，以扩大结晶器容积，有利于稳定薄板坯连铸结晶器内钢液面，促进钢中夹杂的上浮；提高薄板坯连铸保护渣的润滑效果，改善铸坯表面质量；可以灵活地改变铸坯厚度，增加产品规格范围，使生产组织具有更大的灵活性。

结合国家攻关（双重）项目：板坯连铸过程轻压下及薄板坯连铸带液芯压下，开发了液芯压下过程工艺仿真软件。对薄板坯连铸带液芯压下过程进行仿真计算<sup>[9]</sup>。

仿真结果为解决薄板坯连铸铸坯宽面 1/4 处纵向裂纹缺陷指明了方向，同时也为该项技术的进一步开发奠定了理论基础。

#### 3.2 液压非正弦振动

连铸结晶器振动方式从发展历程看主要可归纳为如下四种<sup>[10]</sup>：同步振动（矩形波）、负滑振动（梯形波）、正弦振动和非正弦振动。严格地讲，除正弦振动外的所有振动方式都可称为非正弦振动；这里讲的非正弦振动是指与正弦振动相对应，具有一定偏斜的波形，如图9所示。

结晶器非正弦振动与正弦振动相比具有如下特

点：

1) 结晶器上升时间长且速度平缓，可减少初生坯壳所承受的拉伸应力；

2) 结晶器下降时间短且速度快，对初生坯壳施加了压应力，有利于脱模<sup>[11]</sup>；

3) 负滑动时间明显减少，可减少振痕深度，提高铸坯表面质量（如图10）。

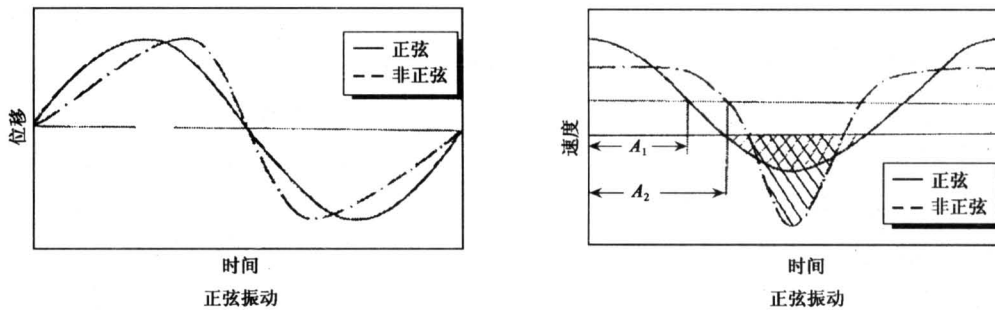


图9 结晶器正弦振动与非正弦振动波形

Fig.9 Displacement and velocity curve of mold sinusoidal oscillation and non-sinusoidal oscillation

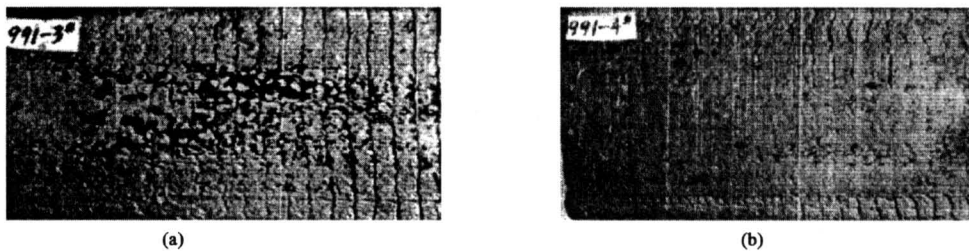


图10 正弦振动与非正弦振动铸坯表面的比较

(a) 一正弦振动，频率 120 c/min；(b) 一非正弦振动，波形偏斜率 16.87%，频率 120 c/min

Fig.10 Comparison of surface quality between sinusoidal and non-sinusoidal oscillation

因此，非正弦振动更适应高拉速连铸过程<sup>[12~15]</sup>。连铸中心结合攻关工作，开发了液压及机械非正弦振动装置，建立了基于三角函数的振幅、频率在线可调的二级匹配控制模型，并成功用于工业生产，取得了良好的使用效果。

### 3.3 电磁连铸

电磁技术在连续铸钢工艺中有着广泛的应用，概括地讲可以分为如下几个方面：电磁学特性的利用，如注流约束、电磁制动、电磁搅拌、电磁软接触等；电磁热特性的利用，如中间包感应加热等；电磁物理特性的利用，如电磁下渣检测、液面检测等。目前，利用电磁技术改善连铸坯质量的研究工作也取得了很大进展，已被用于工业生产的电磁冶金技术主要是电磁制动和电磁搅拌。

电磁制动的目的是改变凝固过程中的流动、传热和溶质的分布，进而影响连铸坯的凝固组织。与常规连铸相比，电磁制动能够降低结晶器内钢液向下冲击的深度，促进凝固前沿非金属夹杂物的上浮，稳定弯月面的波动，促进保护渣的均匀分布（如图11）。

电磁搅拌的目的是强化液芯内钢水的对流运动，均匀钢液过热度，打碎树枝晶，促进非金属夹杂物和气泡的上浮，促进等轴晶的形成，减轻中心偏析、中心疏松和缩孔。

连铸中心基于大型商业软件，开发了用于磁流体计算的软件平台，并针对企业实际情况，进行了电磁搅拌装置的工业设计，搅拌器使用效果与国外先进水平相当。



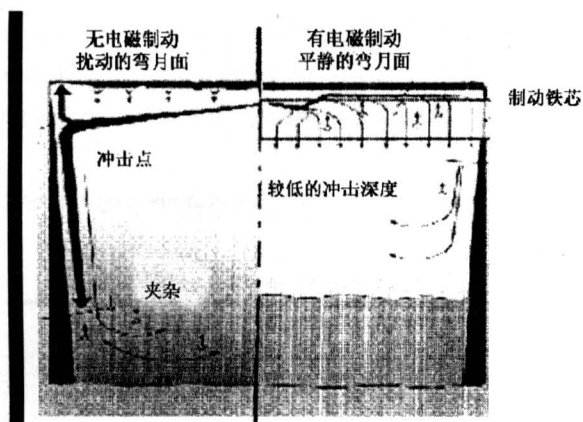


图 11 电磁制动的原理图

Fig.11 Principle of electromagnetic braking

## 4 连续铸钢技术展望

随着连续铸钢过程本质的认识以及相关技术的发展，特别是超导技术和现代控制技术的飞跃发展，传统连铸机将向着超高效率、高品质方向发展；新型连铸机向着近终形、电磁连铸方向发展。

### 4.1 传统连铸机的超高效率和高品质化

随着软接触结晶器、非正弦振动、电磁制动、电磁搅拌、轻压下技术的成功开发以及有效集成，传统连铸生产将有望实现超高效率和高品质化，连铸钢种有望扩展至所有类别钢种，铸坯无缺陷率接近100%；单流板坯产量有望突破  $400 \times 10^4$  t/a，单流方坯产量突破  $40 \times 10^4$  t；形成单流板坯连铸机对1台大型连轧机，单流方坯连铸机对1台小型连轧机的生产流程。

### 4.2 近终形电磁连铸机的开发

随着动态结晶理论的发展以及技术的开发，以双辊薄带为代表的动态结晶装备将会成功地用于工业生产，并有望实现生产的超高效率化；同时，随着超导技术的开发，软接触结晶器、约束结晶器、

电磁激震装置的工业化将成为可能，完全可能实现连铸过程的无模、无振动、铸坯断面形状的可任意组合的连铸机。

### 参考文献

- [1] 殷瑞钰. 继续大力发展连铸, 推动钢铁工业结构优化, 促进两个根本转变[A]. 冶金工业部第六次全国连铸工作会议文集[C]. 北京, 1996
- [2] 蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- [3] Wolf M. 连铸技术的最新进展[M]. 北京: 中国金属学会连续铸钢学会, 1988
- [4] Hoffken E. 连铸技术的现状[A]. 中国金属学会连续铸钢学会编译. 第四届国际连铸会议文集[C]. 1988
- [5] 王浦江. 小方坯连铸[M]. 北京: 中国金属学会连续铸钢学会, 1998
- [6] 国际钢铁协会. 钢铁统计年鉴[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- [7] Itoyama S. Effect of casting conditions on oscillation mark depth[J]. CAMP-ISIJ, 1992, (5): 225~228
- [8] 鈴木干雄, 宮原忍. 高速铸造時の铸型伝熱と潤滑運動[J]. 鉄と鋼, 1992, 78(1): 113~120
- [9] 陈栋梁. 薄板坯连铸过程轻压下机理研究[D]. 北京: 钢铁研究总院博士论文, 1997
- [10] 干 勇, 仇圣桃. 连铸过程数学物理模拟[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [11] 水上秀昭, 川上公成, 北川融, 等. 铸型と铸片間の潤滑現象と高速铸造時の最適铸型振動[J]. 鉄と鋼, 1986, 72(14): 1862~1869
- [12] 汪兴富. 高速连铸的关键技术[J]. 重型机械, 1995, (6): 3~6
- [13] 史宸兴. 对开发高速连铸技术的思考[J]. 连铸, 1996, (2): 7~10
- [14] 王新华, 赵 沛, 周荣章. 高速连铸的几项关键技术[J]. 炼钢, 1995, 11(4): 21~29
- [15] 张洪波. 高速连铸的基本工艺条件[J]. 炼钢, 1995, 11(1): 32~35

## Industrialization of the Advanced Technology in Continuous Casting of Steel

Gan Yong

(Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

[Abstract] The characteristics of key technology in high-effective and thin-slab continuous casting of steel with proprietary intellectual propertyright are discussed. The research and development status of the avanced

technologies such as soft reduction, hydraulic-driven non-sinusoidal oscillation, and electromagnetic continuous casting is introduced. The progress direction of high-efficiency and high quality of conventional continuous casting is discussed, and the development trend of near-net-shape continuous casting and electromagnetic continuous casting is given.

[Key words] continuous casting of steel; high-effective continuous casting; thin slab continuous casting; soft reduction; electromagnetic continuous casting; industrialization

## 欢迎订阅 2003 年《中国工程科学》

《中国工程科学》(月刊)是中国工程院院刊,创刊于 1999 年。其办刊宗旨是贯彻科教兴国和科学技术是第一生产力的根本方针,充分发挥全体院士和全国工程科技专家的积极性;立足于我国 30 多个工程科技领域,立足于科学发现、技术创新、研究成果、重大工程设计及典型工程经验总结、工程技术问题讨论及国家重大工程咨询调研的报道;发扬学术民主,繁荣科学技术,开发利用信息资源,促进发明,开拓创新,推动科技成果的工程化与产业化;传播前沿学科和最新工程技术成就,培育高层次工程科技人才,推动我国工程科学技术的不断进步与发展。

创刊 3 年来的实践表明,由于《中国工程科学》的文章质量是一流的,内容丰富,学科覆盖面广,其专题论述(如专题报告、院士论坛、学术论文等)水平之高,堪称国内科技刊物之最。统计结果表明,为《中国工程科学》撰稿的院士作者占 30.2%,教授、研究员作者占 52.0%,两者合计高达 82.2%。作者中的知名专家和学者占如此高的比例,在国内科技刊物中是少有的,的确是一份独具智力资源优势的学术期刊。热忱欢迎高校及科研院所图书馆、高新技术开发公司、工程中心、专业实验室及课题组订阅收藏(邮发代号 2-859)。

《中国工程科学》为大 16 开,月刊,每期 96 页,每册定价 15 元,全年 180 元。

编辑部地址:北京西直门外文兴街 1 号(邮编:100044)

电话/E-mail:010-68336805/bees@public3.bta.net.cn