

连续铸钢与电磁搅拌技术

毛 斌

(中国科学院力学研究所)

我自**20**世纪八十年代初进入连续铸钢这一领域，主要从事连续铸用电磁搅拌技术的研发与推广应用，至今仍在做一些力所能及的工作。回顾**30**多年来主要做了三件事：

1， 推动我国电磁搅拌技术水平的提高和推进国产化的进程

原冶金部殷瑞钰付部长在**2014**年**7**月在唐山召开的中国金属学会学术会议的主旨报告中对我国电磁搅拌技术的现状作了评价：

“上世纪九十年代之前电磁搅拌装置主要依靠引进，**新世纪以来**这种情况有了根本性转变，**我国电磁搅拌技术已全面赶上并领先国际主要厂商，国内市场占有率已超过90%**，即全国在线应用的**3500**台的电磁搅拌器中，国产的已超过**3100**台。”

干勇院士（时任中国工程院常务付院长）为“专著”作序对我在这一领域工作作了评价：

“本书主要作者毛斌教授从**20世纪80**年代初开始就致力于连铸电磁搅拌技术的研发和推广工作，用技术支持了国内大多数连铸电磁搅拌器制造企业和应用单位，在学术期刊和连铸技术著作、手册中撰写电磁搅拌文章，并在多次连铸电磁搅拌技术专题学习班上讲授电磁搅拌知识，为推动我国连铸电磁搅拌技术的普及与提高做了大量卓有成效的工作。”

2, 推动湖南中科电气股份有限公司（简称中科电气）自主研发成中间包八字形通道感应加热与精炼装置

基于九十年代以来我国中间包等离子体加热技术的应用未成气候，自**2007**年以来，在四个学术会议、三份期刊上刊文呼吁开展中间包通道式感应加热技术的研发。

2009年推动中科电气与邢台钢厂合作自主研发“连铸中间包八字形通道感应加热与精炼技术”，并于**2011**年底研发成功，**2012**年投入工业应用。目前已有**5**家钢厂**6**个项目签约，产值在**1**亿多元，另外还有几家钢厂在洽谈中。这一技术不仅成为中科电气经济技术的新的生长点，而且也成为我国连铸领域的新亮点

3, 主编 “连续铸钢用电磁搅拌的理论与技术” 专著

2010年中与昆明理工大学张桂芳教授和湖南中科电气股份有限公司李爱武高工、易兵高工等三位作者一起编写了一本“连续铸钢用电磁搅拌的理论与技术”专著，历时一年半。全书共十一章**58**万多字，我写了八章约**46**万多字。该专著已于**2012**年**2**月由冶金出版社出版。

第一篇

连续铸钢与电磁搅拌

1.1 何谓“连续铸钢”？

连续铸钢简称**连铸**是钢锭模浇铸的一项革命性变革。简言之，**连铸**是钢水在其**运动**过程中连续凝固成一定横断面的铸坯，见图1。

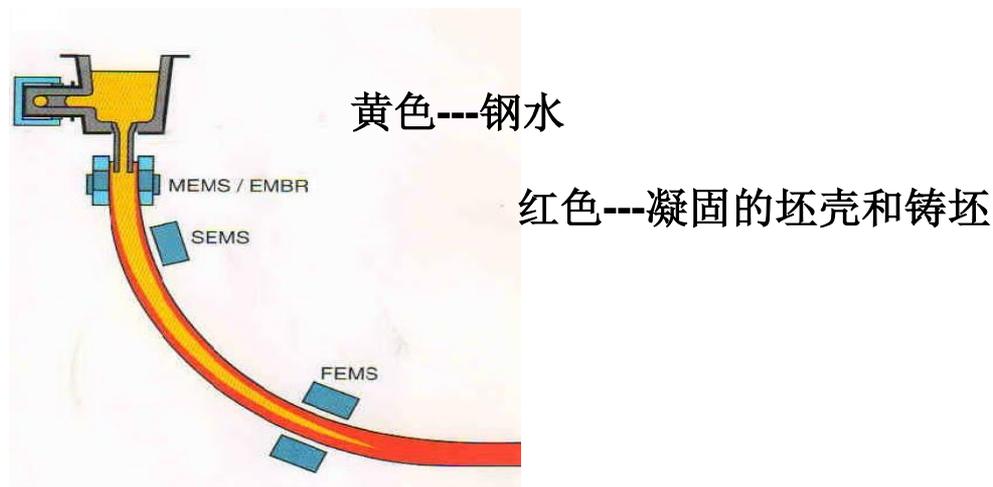


图1 连续铸钢过程和电磁搅拌器配置示意图

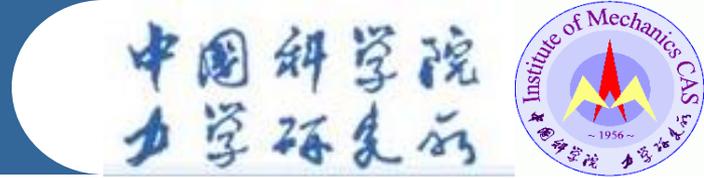
动画



动画



1.2, 国内外连铸技术发展历程



(1) 国外连续铸钢技术的发展历程

国外连铸技术的发展始于**20**年代，历经了**70**年的发展历程：

40年代的试验开发

50年代开始步入工业生产

60年代弧形连铸机的出现奠定了连铸技术的基础

70年代能源危机推动连铸技术的大发展

80年代技术日趋成熟

90年代及以后又面临一场新的变革。

(2) 我国连铸技术发展历程

我国连铸技术的发展始于**50**年代中期，是研究、应用连铸技术较早的国家之一

50年代中期开始研究和发展的

60年代曾掀起一股开发和应用热潮

70年代后期引进国外先进技术，促进我国连铸技术的发展与提高

80年代改革开放以来几次连铸热：

1981年~**1988**年小方坯连铸

1985年~**1994**年 超低头板坯连铸

1995年~**2005**年 高效连铸；

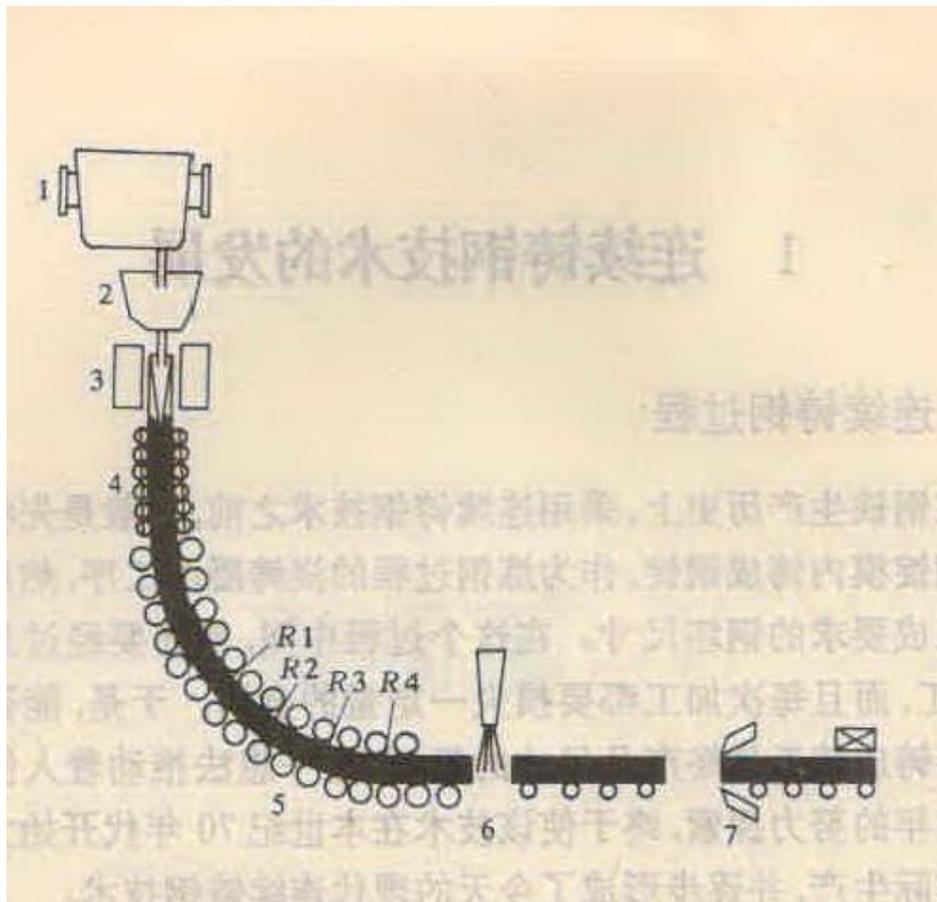
1998年~**2009**年 薄板坯连铸；

2006年~现在 异形坯、圆坯、大方坯、大板坯等等。

(3) 何谓连铸比

- 连铸比是衡量一个国家钢铁工业发展水平的重要指标。定义为合格的铸坯重量除以合格的钢水重量的百分比，简言之，有多少钢水是用连铸方法成坯的百分比。
- 连铸比 = $\left(\frac{\text{合格的铸坯重量}}{\text{合格的钢水重量}} \right) \times 100\%$
- 2013年我国粗钢产量7.7904亿吨；连铸坯产量7.6622亿吨，连铸比98.35%，几乎趋于饱和。

1.3, 连铸机是什么模样?



1—大包

2—中间包

3—结晶器

4—二次冷却区和铸坯导向装置

5—拉坯校直装置

6—火焰切割装置

7—出坯装置

图2 弧形连铸机示意图

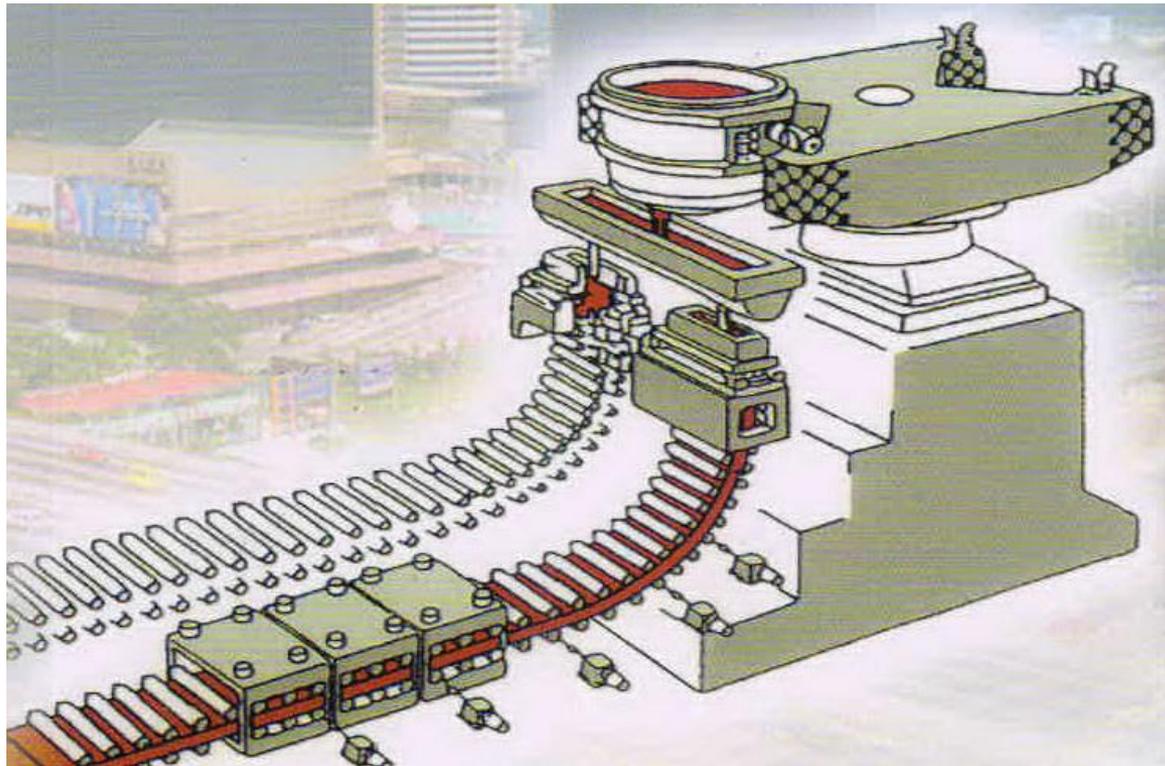


图3 两流板坯连铸机的三维图

1.4, 连铸机的分类

(1) 连铸机机型的分类

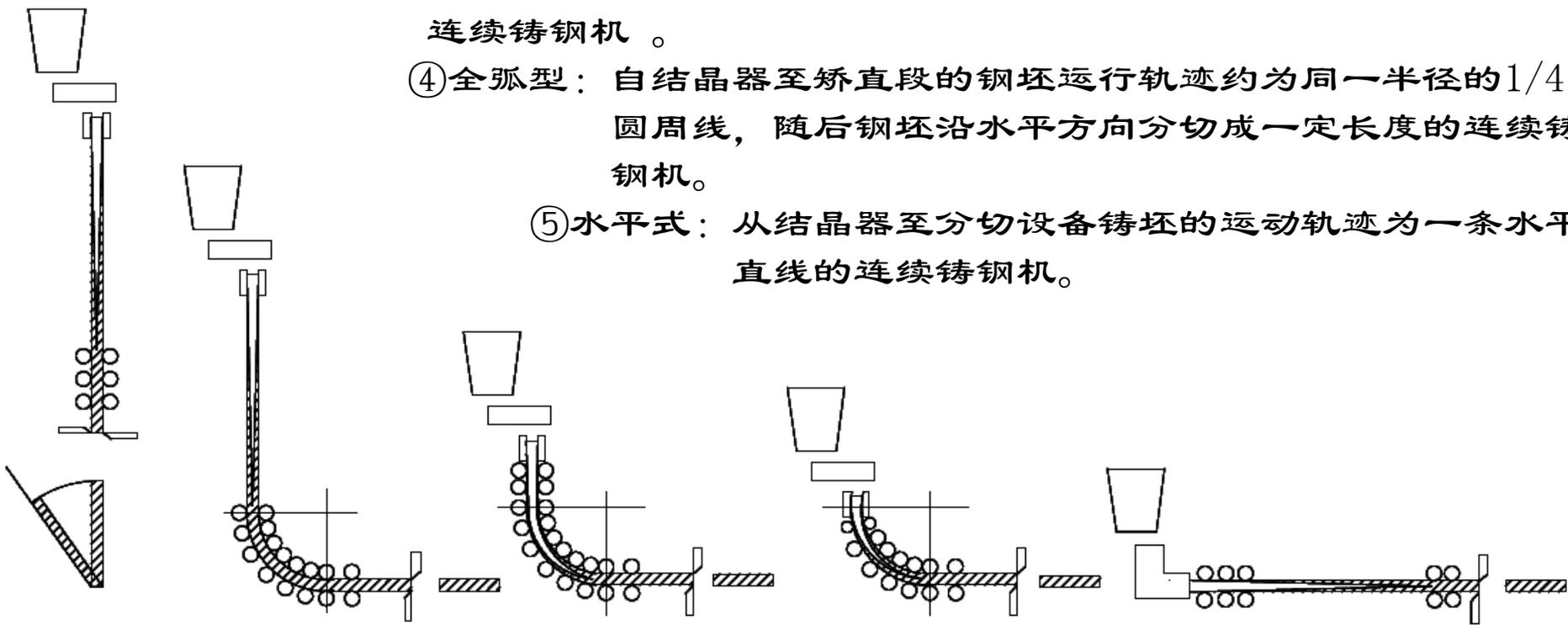
①立式：自结晶器至分切设备的钢坯运行轨迹为铅垂线的连续铸钢机。

②立弯式：自结晶器至完全凝固的钢坯运行轨迹为铅垂线，随后被弯曲、矫直、沿水平方向分切成一定长度的连续铸钢机。

③直弧形：自结晶器至初始部分扇形段的钢坯运行轨迹为铅垂线，随后未完全凝固的钢坯被弯曲、再经矫直、沿水平方向分切成一定长度的连续铸钢机。

④全弧型：自结晶器至矫直段的钢坯运行轨迹约为同一半径的1/4圆周线，随后钢坯沿水平方向分切成一定长度的连续铸钢机。

⑤水平式：从结晶器至分切设备铸坯的运动轨迹为一条水平直线的连续铸钢机。



(2) 我国各类连铸机分布

中国科学院
力学研究所



截止到2010年我国各类型连铸机分布情况

截止2010年全国连铸机情况		
连铸机分类	台数	流数
小方坯连铸机	288	992
大方坯连铸机	328	1311
圆坯连铸机	105	427
水平连铸机	11	14
异形连铸机	5	16
板坯连铸机	203	255
薄板坯连铸机	19	20
合计	959	3035

台数：在连铸生产中共用一个钢包同时浇铸一流或多流铸坯的一套连铸设备。

流数：对每台连铸机同时浇铸的铸坯总根数叫连铸机的流数，国内一台连铸机最多流数为**12流**。

(3) 连铸坯断面

目前国内连铸机的铸坯断面：

方坯：最小— $70\text{mm} \times 70\text{mm}$ 最大— $400\text{mm} \times 500\text{mm}$ ；

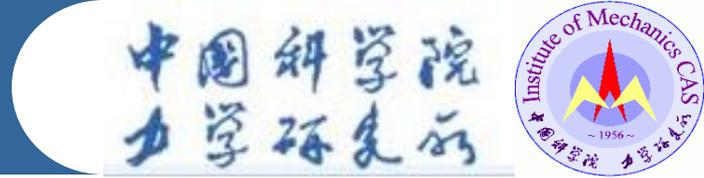
圆坯：最大— $\Phi 800 \sim 1000\text{mm}$ ；

板坯：最薄— 50mm 最厚— 420mm 最宽— 3250mm

如： $450 \times 2600\text{mm}$ ； $320 \times 2800\text{mm}$ ；

薄带： $1 \sim 2\text{mm}$ 。

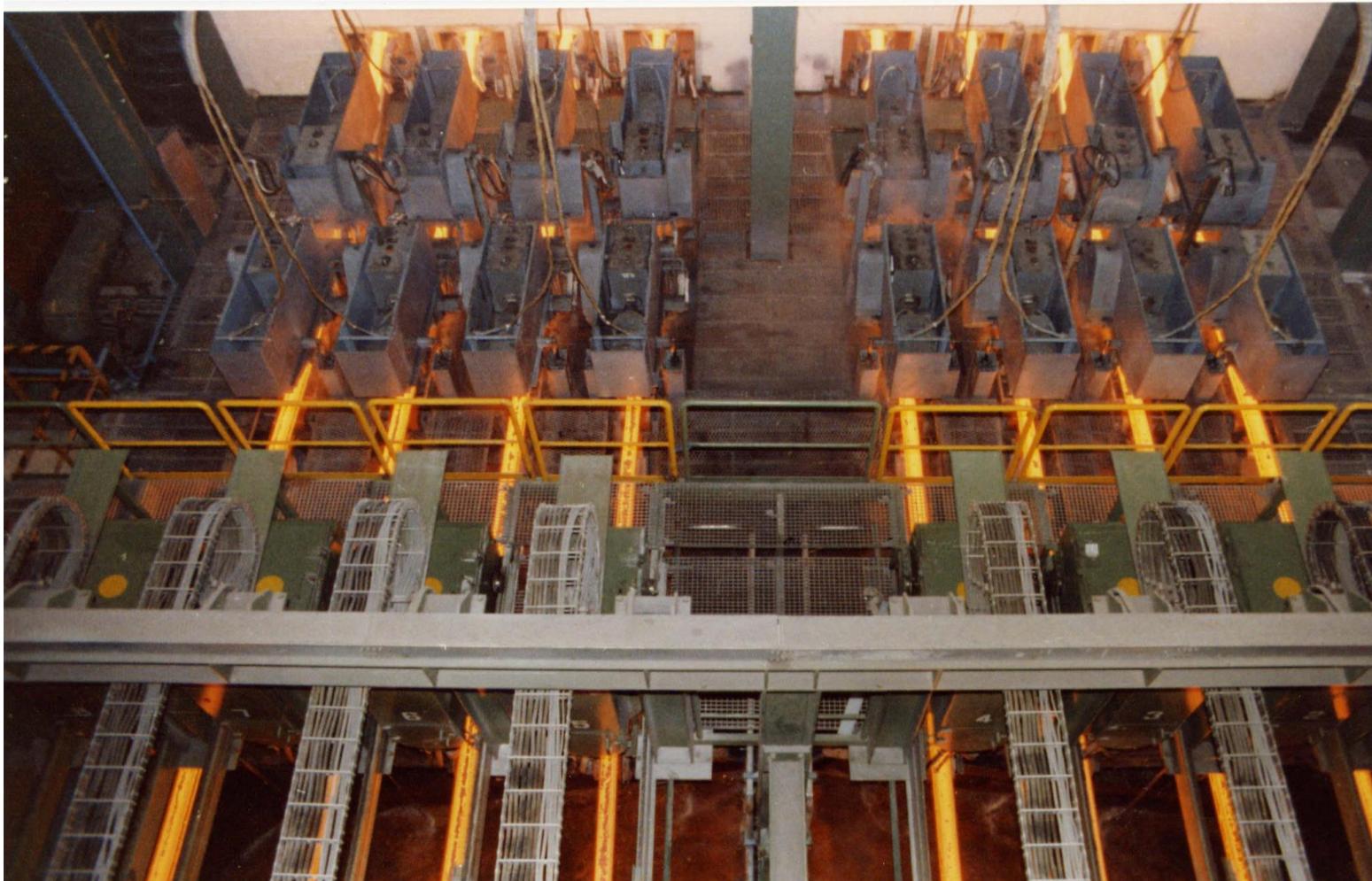
(4) 连铸平台的现场操作照片



照片1 八流方坯连铸机的操作平台



- 照片2 八流方坯连铸机的八条钢流



照片3 双流板坯连铸机拉坯工况



- 照片4 单流板坯连铸的火焰切割



照片5 三流圆坯连铸机拉坯工况



1.5, 连续铸钢有哪些优越性

中国科学院
力学研究所



连续铸钢的主要技术经济优势表现在以下几个方面：

① 简化生产工序

省去初轧开坯工序、缩短了从钢水到成坯的时间；

可浇铸接近成品尺寸的铸坯，更可简化轧钢的工序。

② 提高金属收得率**10 ~ 15%**

③ 节约能量消耗**70 ~ 80%**，一吨连铸坯综合节能约**130kg**标准煤

④ 基建投资减少**30 ~ 40%**，占地面积减少**30%**左右

⑤ 易于实现机械化、自动化，大大改善劳动强度

⑥ 产品均一性好、铸坯质量提高

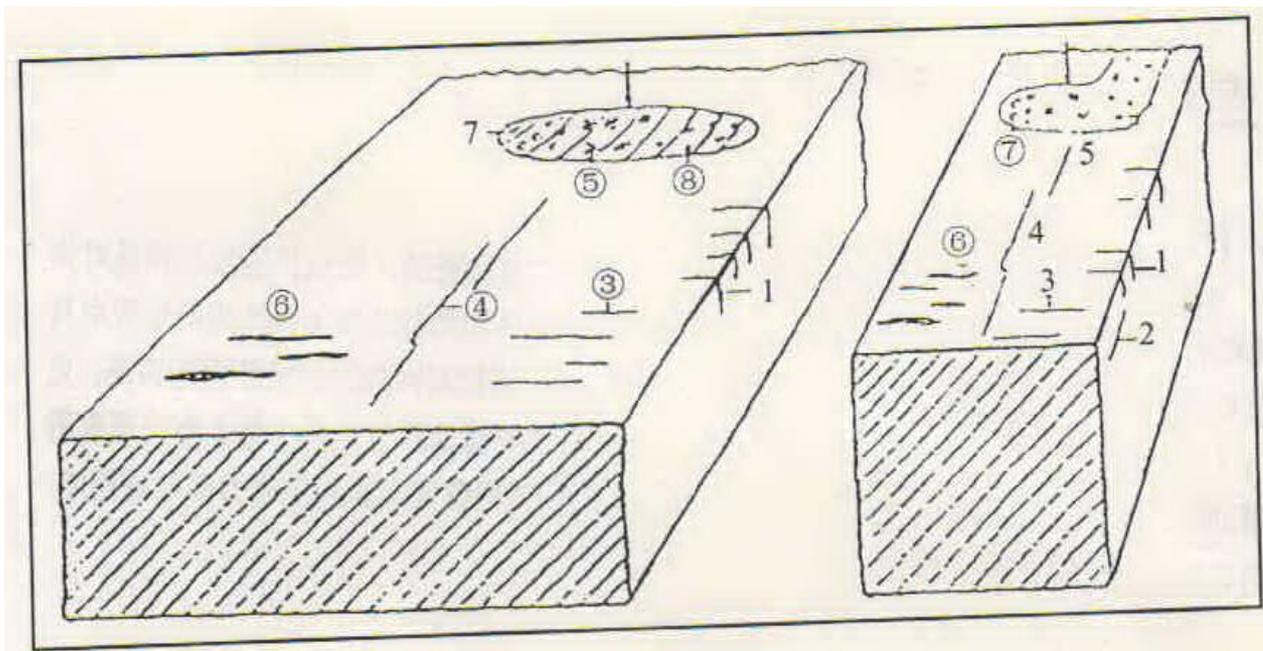
⑦ 扩大连铸钢种。 **目前几乎所有钢种都可用连铸生产，而且连铸坯质量也日益提高。**

1.6, 连铸坯存在哪些缺陷?

在连铸坯中存在三种缺陷：表面缺陷、内部缺陷和形状缺陷：

(1)表面缺陷：

出现在铸坯表面或皮下2~10mm内的缺陷称表面缺陷，见图3

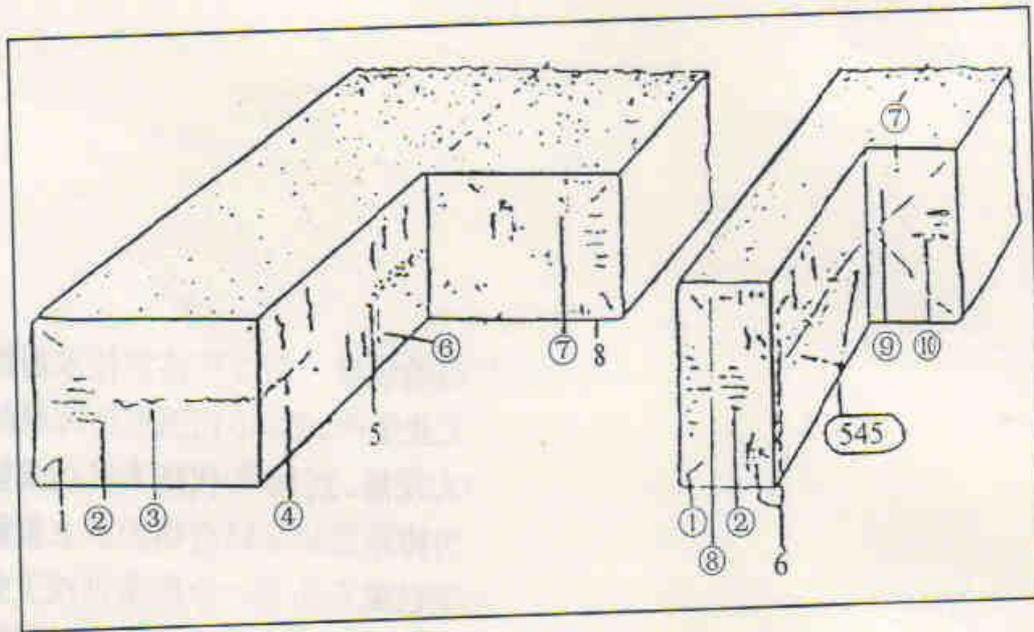


- 1—横向角裂；
- 2—纵向边裂；
- 3—横向裂纹；
- 4—纵裂；
- 5—网状裂纹；
- 6—振痕；
- 7—气泡；
- 8—保护渣型夹渣

图3 表面缺陷示意图

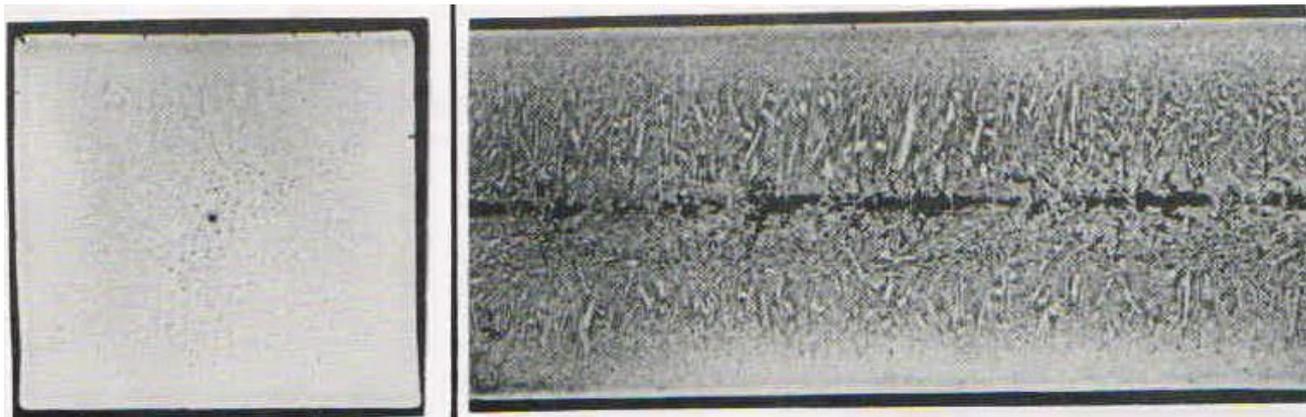
(2)内部缺陷:

出现在铸坯内部和中心的缺陷，见图4。



- 1—角部裂纹;
- 2—中间裂纹;
- 3—中心裂纹;
- 4—中心偏析;
- 5—中心缩孔;
- 6—簇状裂纹;
- 7—非金属夹杂物;
- 8—皮下偏析带;
- 9—轴向裂纹(网状);
- 10—气泡

图4 内部缺陷示意图



照片6 铸坯内部缺陷的实例

(3)形状缺陷

形状缺陷大致有两类：菱形变形（脱方）和鼓肚变形

① 菱形变形（脱方）



照片7 菱形变形

② 鼓肚变形

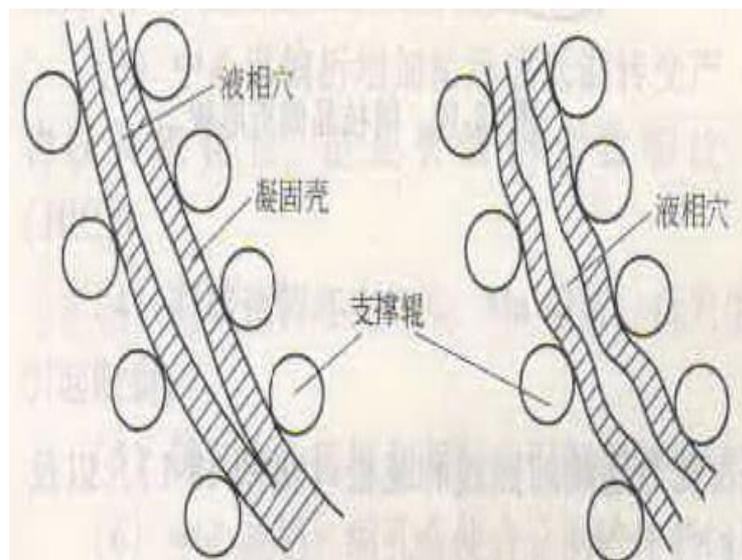
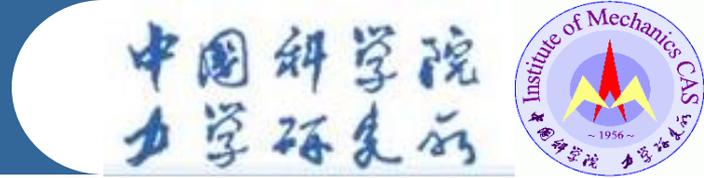


图6 鼓肚变形示意图



(1)连铸电磁搅拌技术的意义

连铸电磁搅拌技术的意义对于**提高连铸坯质量、稳定操作、扩大品种范围**等均起到了独特的、不可替代的作用，因而越来越受到连铸界的重视。目前，连铸电磁搅拌技术已成为改善连铸坯质量的**重要技术手段**，电磁搅拌器也已成为连铸机的**规范配置**

(2) 连铸过程中电磁搅拌技术的应用

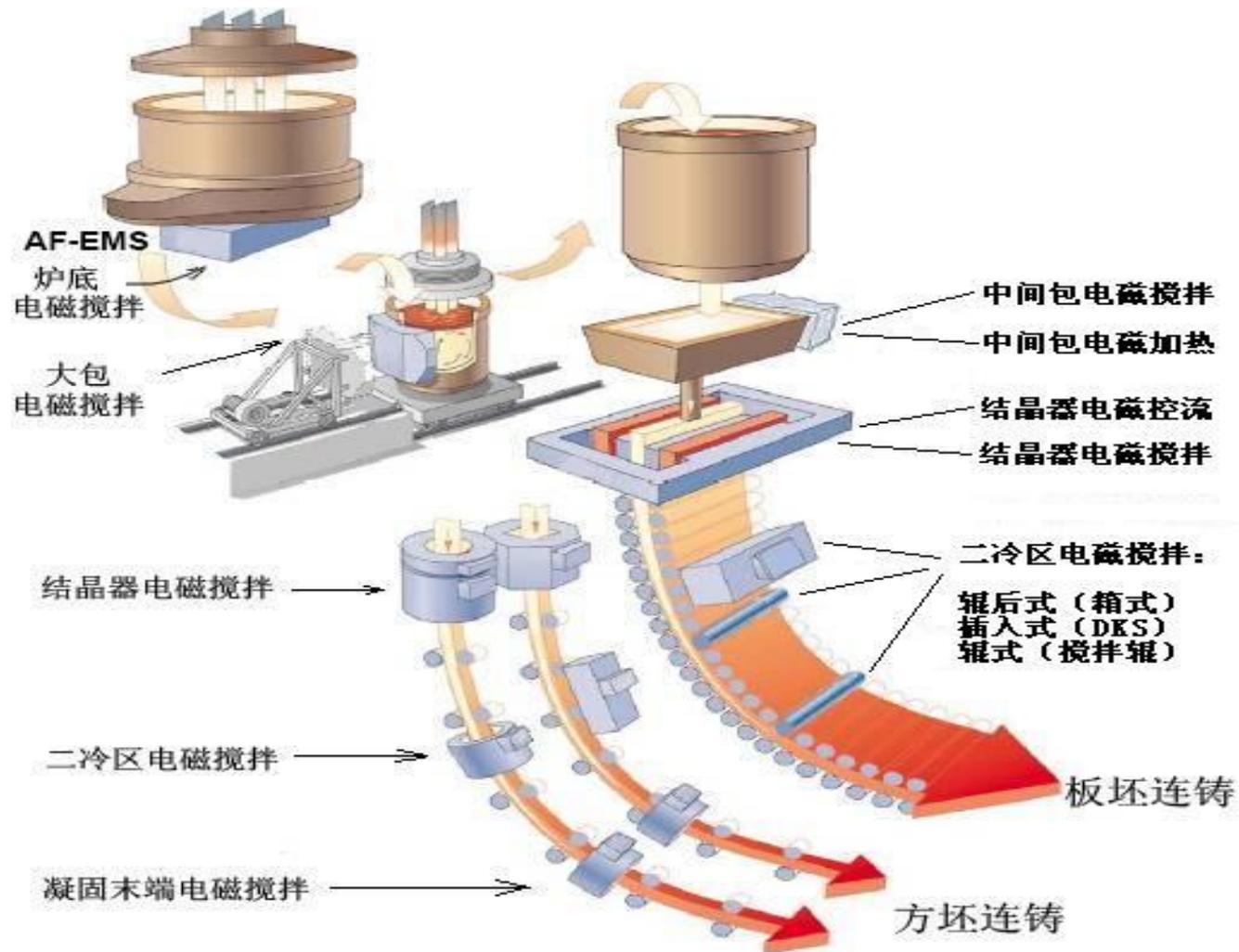


图7 连铸过程电磁搅拌配置示意图

(3) 我国连铸电磁搅拌技术的发展历程

我国连铸电磁搅拌技术的发展历程大致经历三个发展阶段：

第一阶段从**1970**年代末到**1980**年代中，是实验室研发和工业试用阶段

。

第二阶段从**1980**年代末至**1990**年代末，是引进技术消化、吸收和再开发阶段，当时国内电磁搅拌器市场引进装置占主导地位，几乎垄断国内市场。价格高达每台**15**万美元（约**120~150**万人民币）

第三阶段从**21**世纪初至今，是提高和创新阶段。国产电磁搅拌成套装置逐渐在国内市场显露头角，目前已占主导地位，达到**90%**以上的市场份额，并开始参与国际市场的竞争。

如湖南中科电气研发的电磁搅拌器已全面超越国际主要厂商，其中板坯连铸用辊式电磁搅拌器的技术水平已大大领先国际水平！

1.8, 电磁搅拌（简称EMS）的实质是什么

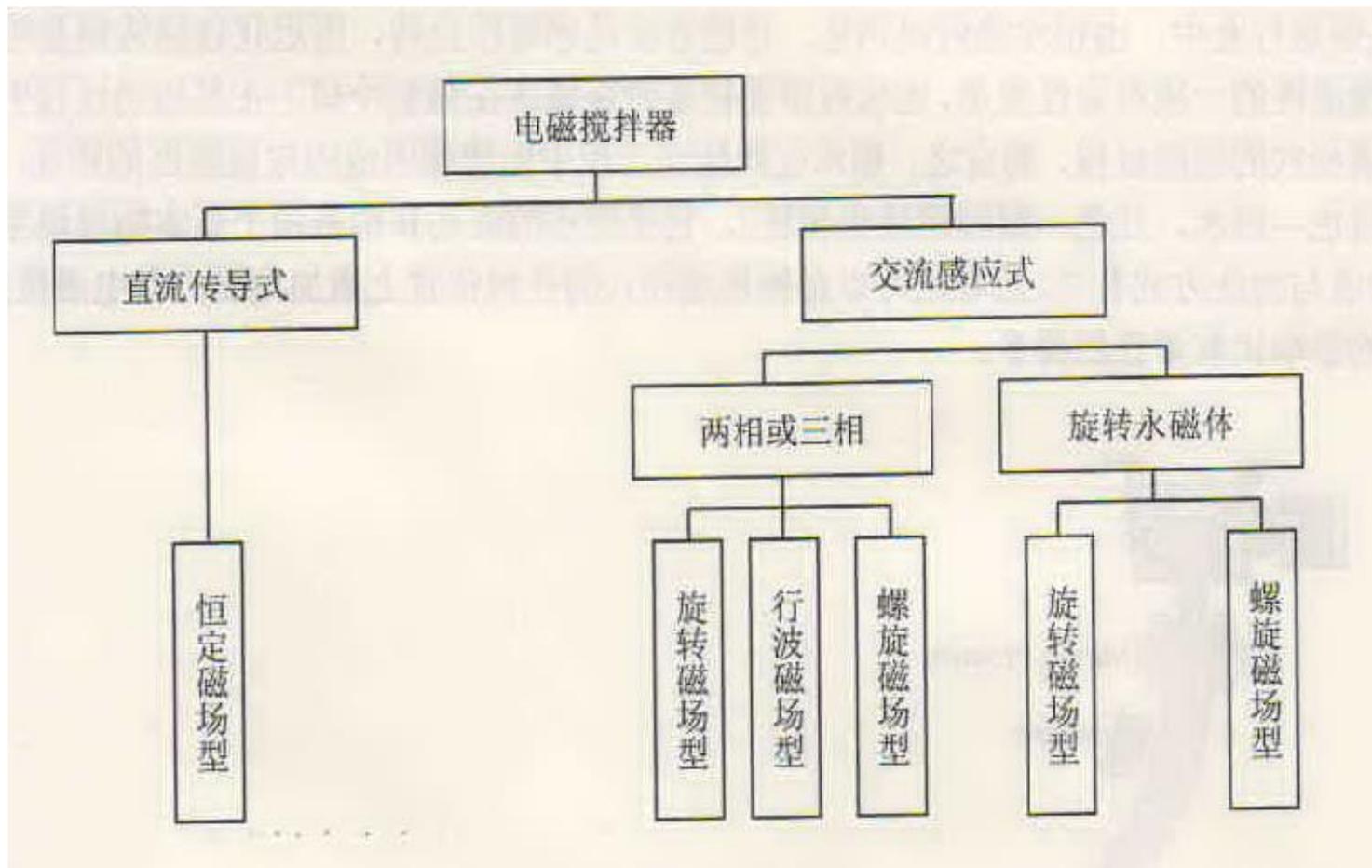
中国科学院
力学研究所



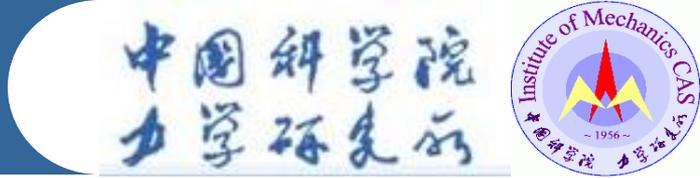
电磁搅拌简单地说，是借助在铸坯液相穴内感生的电磁力强化液相穴内钢水的运动，由此强化钢水的对流、传热和传质过程，从而控制铸坯的凝固过程。

1.9, 方坯连铸电磁搅拌技术 有哪几种类型?

为清晰起见, 将电磁搅拌器分类列表如下:



1.10, 电磁搅拌的工作原理



简单地说，电磁搅拌工作原理类似于普通异步电机。电磁搅拌器相当于异步电机的定子，钢水相当异步电机的转子，它们都遵循两个基本规律：

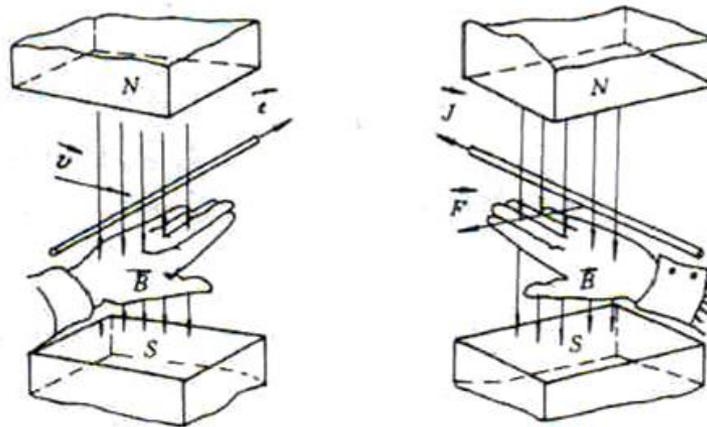
① 电磁感应定律 见图6(a)

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{V} \times \mathbf{B}$$

\mathbf{V} —磁场运动速度与钢水流速之差

②电磁相互作用定律见图6(b)

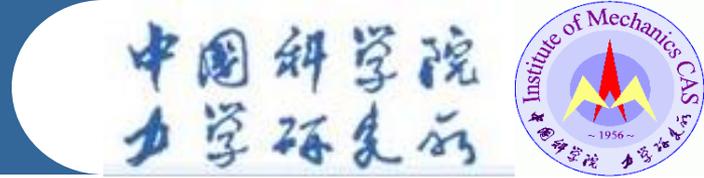
• $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = \sigma (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$



(a) 右手定则 (b) 左手定则

图6 电磁搅拌基本原理的示意图

1.11, 电磁搅拌技术有何特点?



电磁搅拌是借助电磁感应将电能转换成钢水的动能，其优越性简单地说是“五高”，即高能量密度、高清洁性、高可靠性、高可控性和高自动化。

(1) 与其他搅拌钢水方法（如振动、吹气）相比较，电磁搅拌有如下的特点

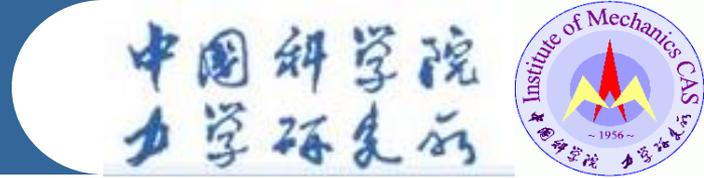
- ①通过电磁感应实现能量的无接触转换，不和钢水接触就可将电磁能直接转换成钢水的动能。也有部分转换成热能。
- ②电磁搅拌器激发的磁场可以人为控制，因而电磁力也可以人为控制
- ③搅拌参数（频率、电流强度）调节范围宽且操作方便简单。

(2) 与异步电机的比较

- ① 电磁搅拌器的气隙很大，因而漏磁现象十分严重。
- ② 因为钢水是一个连续导体，在钢水中感生的感应电流可以在其中自行闭合，因而在磁场作用区内所产生的旋转电磁力要比电机小得多。
- ③ 与同尺寸的异步电机比较，其激磁电流大，输出功率也大。

因此，与异步电机相比较，电磁搅拌器具有**高出力、高感抗、低效率和低功率因数**等特点。

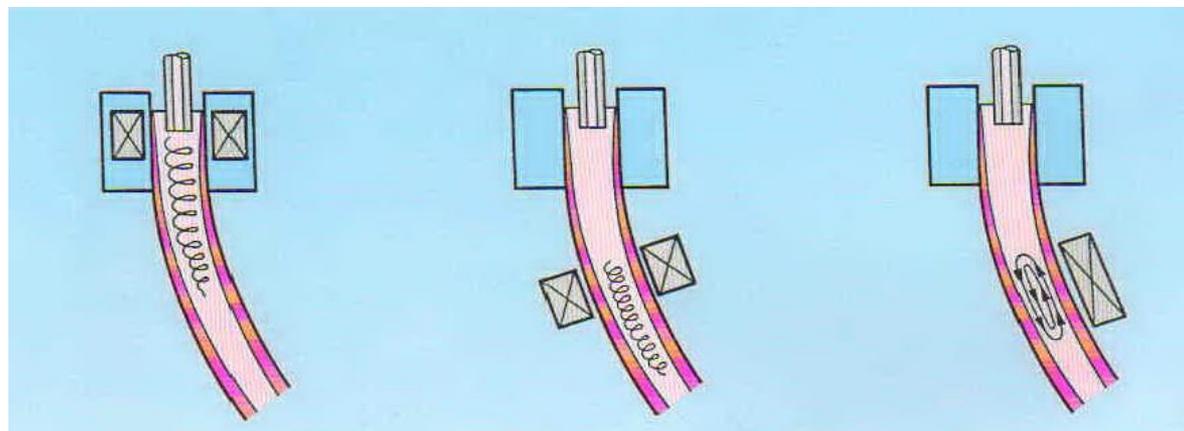
1.12 电磁搅拌技术的配置模式



根据电磁搅拌器在连铸机冶金长度上的不同位置及其不同组合方式，电磁搅拌技术具有以下几种模式：基本模式和多段组合模式：

(1) 基本模式或称一段模式

电磁搅拌技术的基本搅拌模式或称一段搅拌模式，见图7。



结晶器电磁搅拌
MEMS

二冷区电磁搅拌
SEMS

凝固末端电磁搅拌
FEMS

目前最常用的是MEMS，

FEMS除与其他模式组成多段组合搅拌外，一般不单独使用

图7 基本模式或称一段搅拌模式

(2)多段组合搅拌模式

对中、高碳钢及难于连铸的钢种或者在一些特殊的浇注条件如高拉速、高过热度、小断面等条件下，要产生更好的铸坯质量，仅采用一段搅拌是不够的，需要根据钢种、铸坯断面和质量要求以及电磁搅拌冶金机理，对单一搅拌进行不同组合，见图8。

目前最常用的是M+F

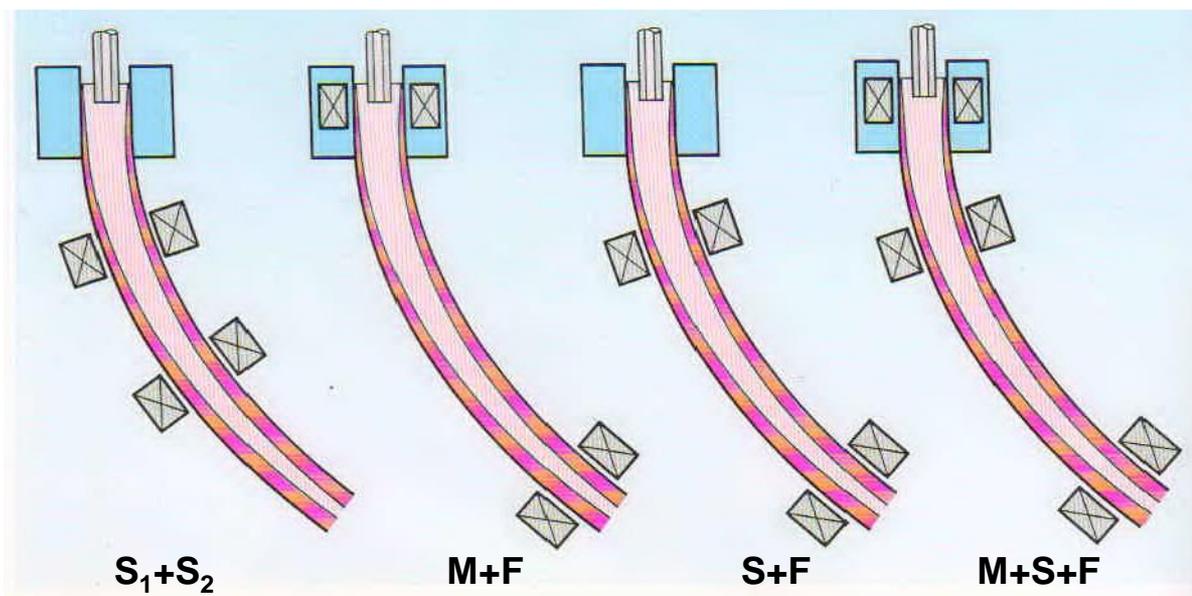
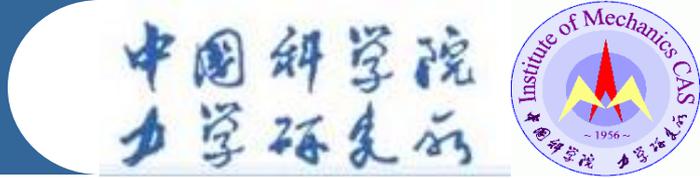


图8 多段组合搅拌模式

1.13, 电磁搅拌器的基本类型



目前处于实用的电磁搅拌器大致形成两种基本类型：旋转磁场搅拌器和行波磁场搅拌器。

(1) 旋转磁场搅拌器

- 旋转磁场搅拌器类似于普通异步电机的定子，见图9。仅适用于方圆坯和矩形坯连铸。

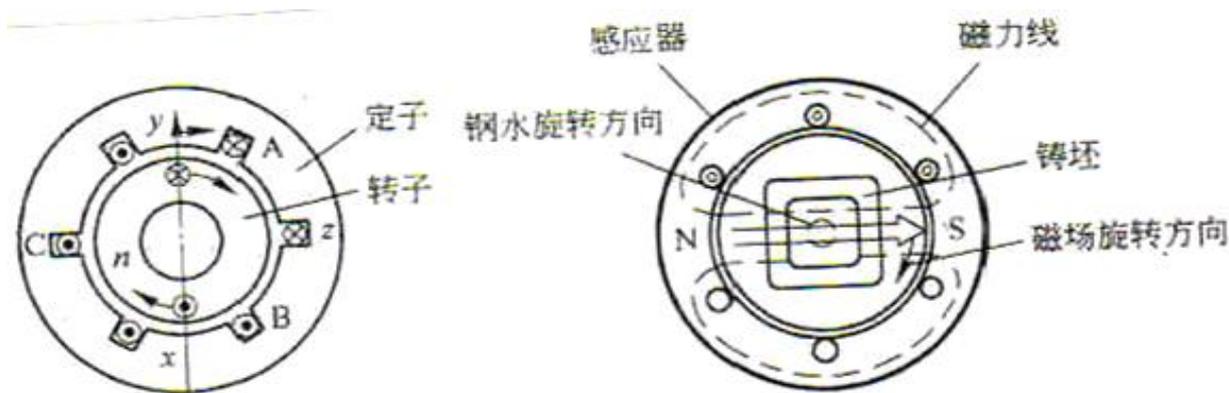
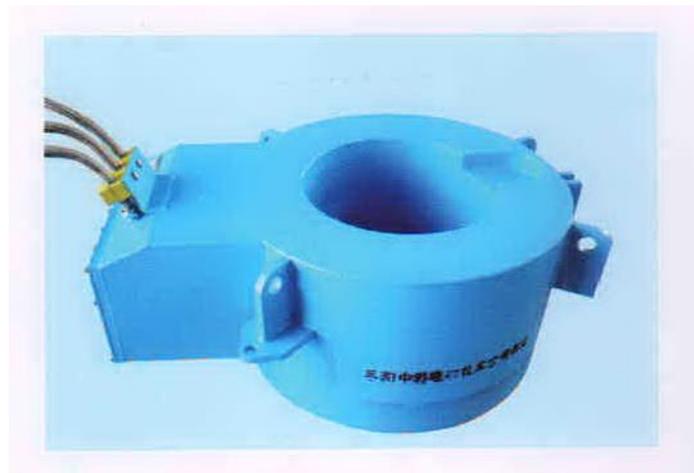


图9 旋转电机演变成电磁搅拌器

照片7 表示旋转磁场搅拌器的实物



结晶器电磁搅拌器 和二冷区电磁搅拌器



凝固末端电磁搅拌器

(2) 行波磁场搅拌器

行波磁场搅拌器俗称直线搅拌器，类似于直线电机。它们都由普通异步电机的定子演变而来，设想将异步电机定子的一侧沿轴向剖开并展平即成行波磁场搅拌器。适用于板坯连铸，偶而也用于大方坯特别是宽厚比大的矩形坯连铸。

1984年我所与首钢、岳磁共同研制成国内第一台行波磁场搅拌器，用于首钢试验厂矩形坯连铸。这也是我所参与研发的第一台电磁搅拌器。

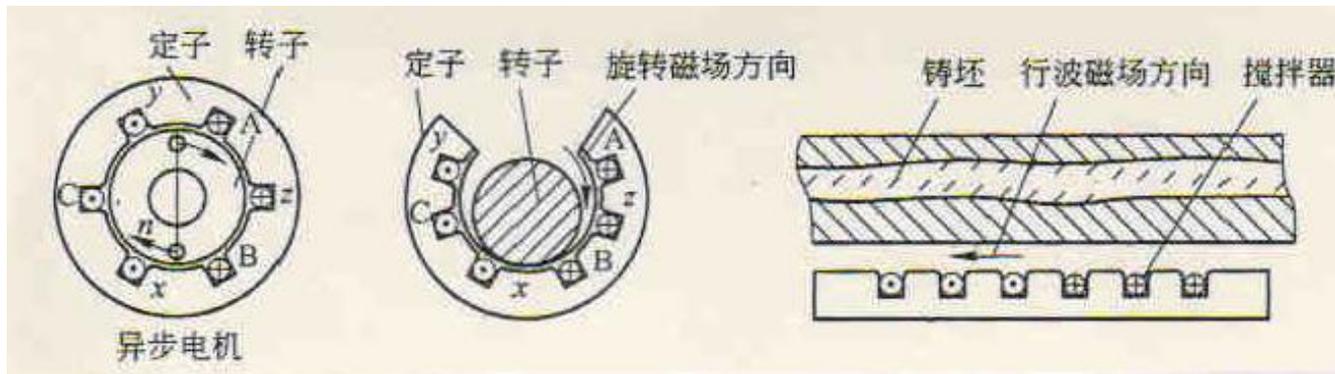


图10 旋转电机演变成行波磁场搅拌器

照片8 行波磁场搅拌器的实物

中国科学院
力学研究所



(a) 单边行波磁场搅拌器



(b) 双边行波磁场搅拌器



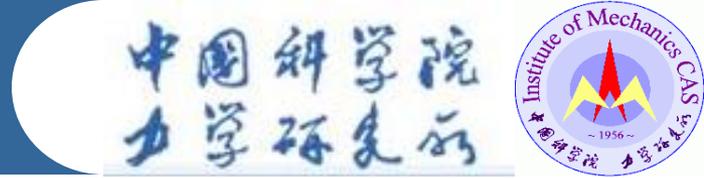
(c) 辊式行波磁场搅拌器

(2) 国产各类电磁搅拌器台数

据不完全统计，截止到**2010**年国产的各类电磁搅拌器台数（
单位：台）

搅拌器位置	M	S	F
方 坯	970	6	181
板 坯		26	

1.14, 电磁搅拌器的基本结构

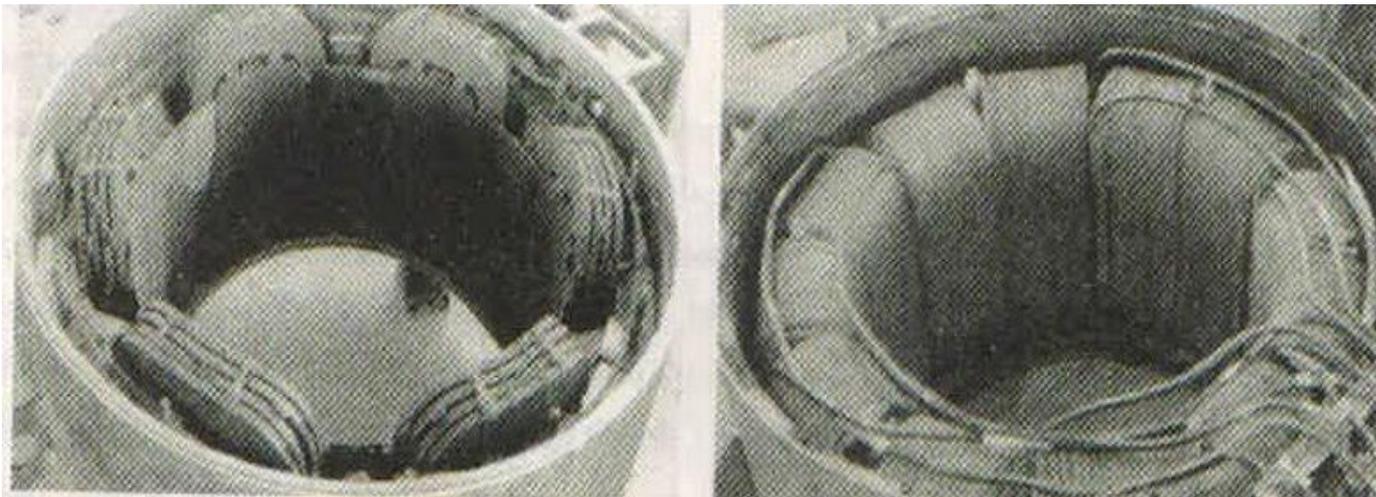


(1) 基本结构

无论哪种类型的电磁搅拌器，其基本结构都由两部分组成：感应器和壳体。

① 感应器：由铁芯和绕组组成，铁芯通常由硅钢片迭成，绕组通常由带绝缘层的扁铜带或中空铜管绕制。用于激发磁场。

② 壳体：由非磁不锈钢制成，用于保护感应器和热的防护及冷却。



凸极式

环形式

照片8 旋转磁场搅拌器的基本结构

(2)电磁搅拌器的电磁力的模拟测量

①电磁力随电流强度的变化

图17表示在一定频率下，电磁力随电流强度的变化。由图可见，电磁力随电流强度增加而增大，基本符合理论分析的平方规律

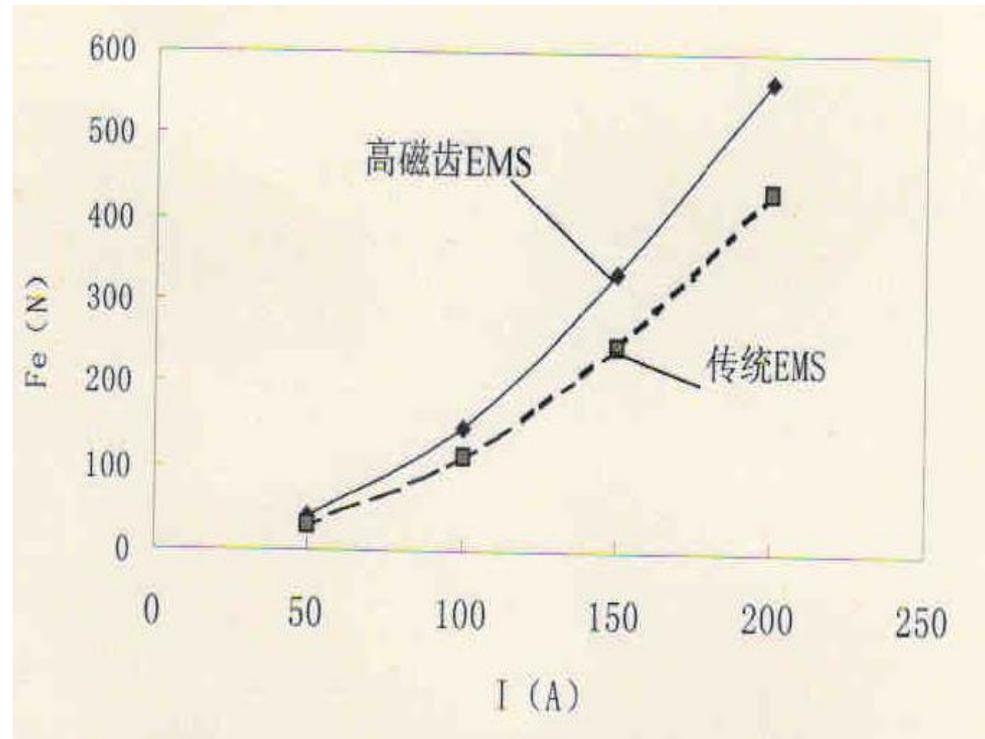


图17 电磁力随电流强度的变化
断面：150mm×150mm， $f=3\text{Hz}$

②电磁力随频率的变化

图18表示在一定电流强度下电磁力随频率的变化

由图可见：

- 1) 实测的电磁力 F_{θ} 随频率 f 的变化不是单调的，而是有个幅值，相应地有个最佳频率 f_m
- 2) 在最佳频率的左侧，电磁力 F_{θ} 随频率 f 的变化比较陡，而在其右侧则比较平缓，所以使用频率 f 应取在最佳频率 f_m 的右侧

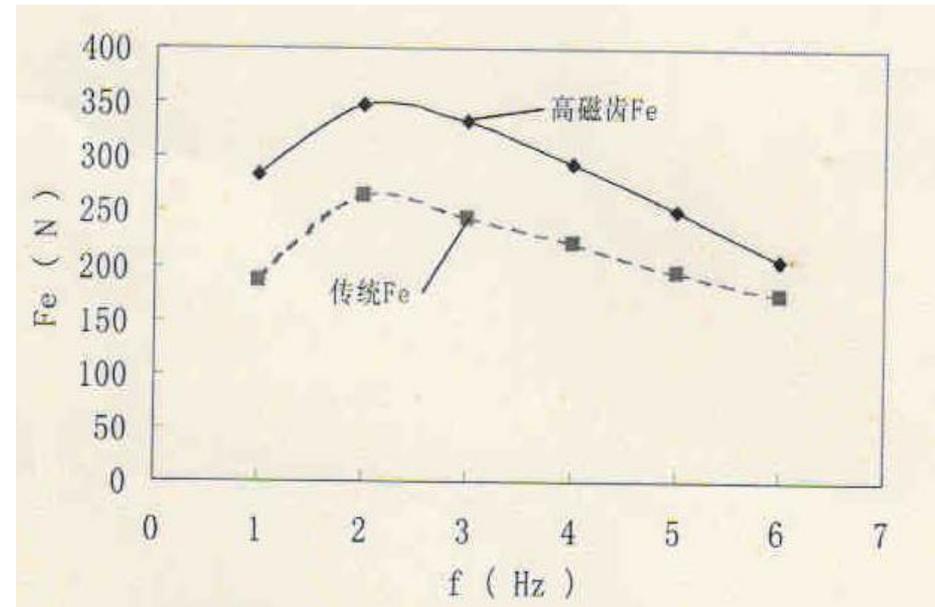


图18 电磁力随频率的变化

断面： $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ ， $I=250\text{A}$

(3)电磁力矩的模拟测量

①电磁力矩随电流强度的变化

图19表示在一定频率下使用扭矩测量仪测出的电磁力矩随电流强度变化的实测结果。由图可见，电磁力矩与电流强度的平方成正比，符合理论规律

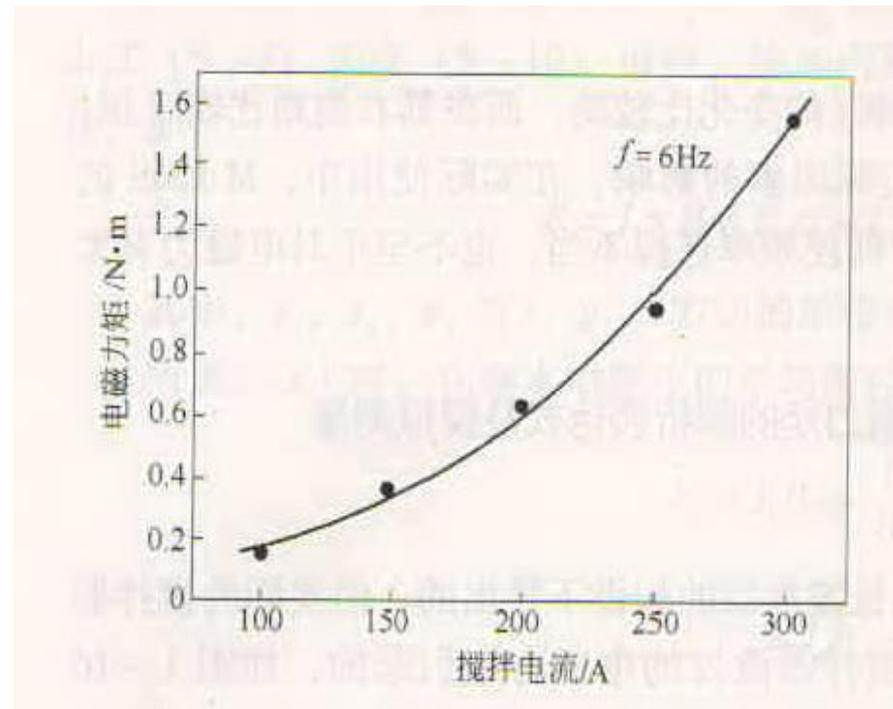


图19 电磁力矩随电流强度的变化

②电磁力矩随频率的变化

图20 表示电磁力矩随频率的变化。由图可见，电磁力矩随频率不是单调变化的，而是有个最大值，相应有个最佳频率；

在最佳频率的右侧，电磁力矩随频率 f 的变化比较陡，而在其左侧则比较平缓，所以使用频率 f 应取在最佳频率 f_m 的左侧

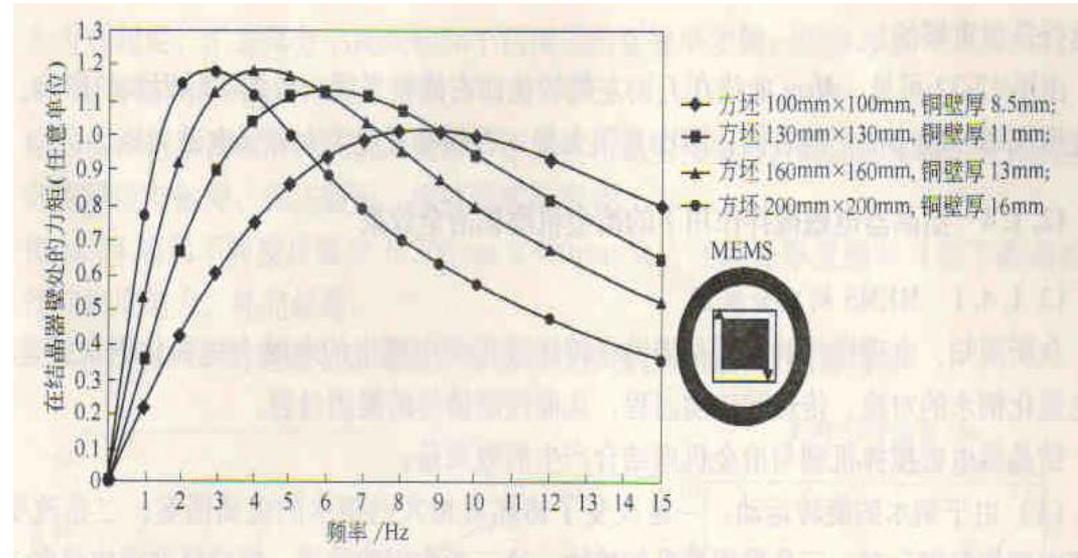
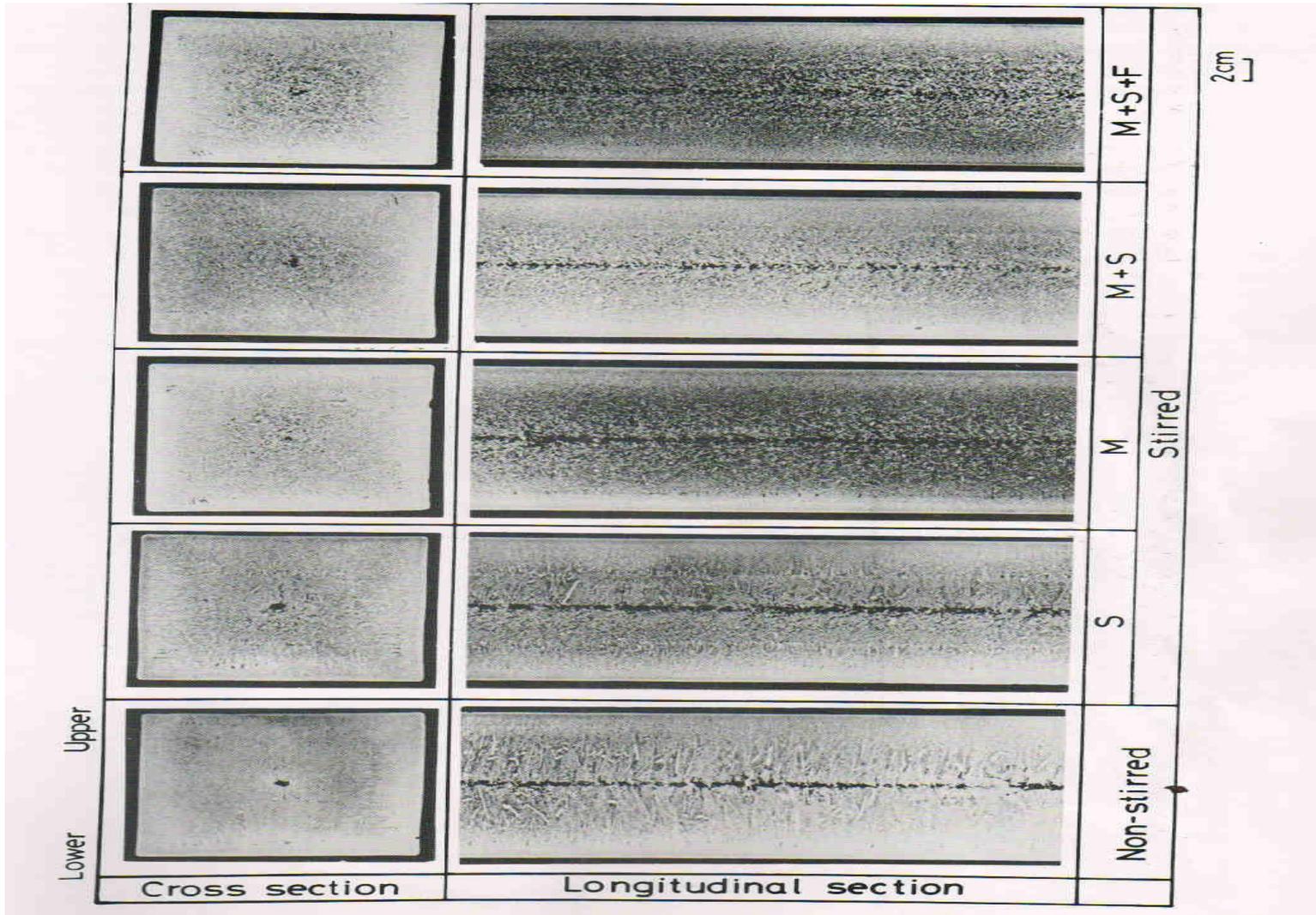


图20 电磁力矩随频率的变化

1.17, 方坯连铸电磁搅拌的冶金效果

中国科学院
力学研究所



照片9 电磁搅拌冶金效果的低倍照片

1.18, 板坯连铸结晶器电磁搅拌和电磁制动技术

(1) 板坯连铸结晶器内钢水流动形貌

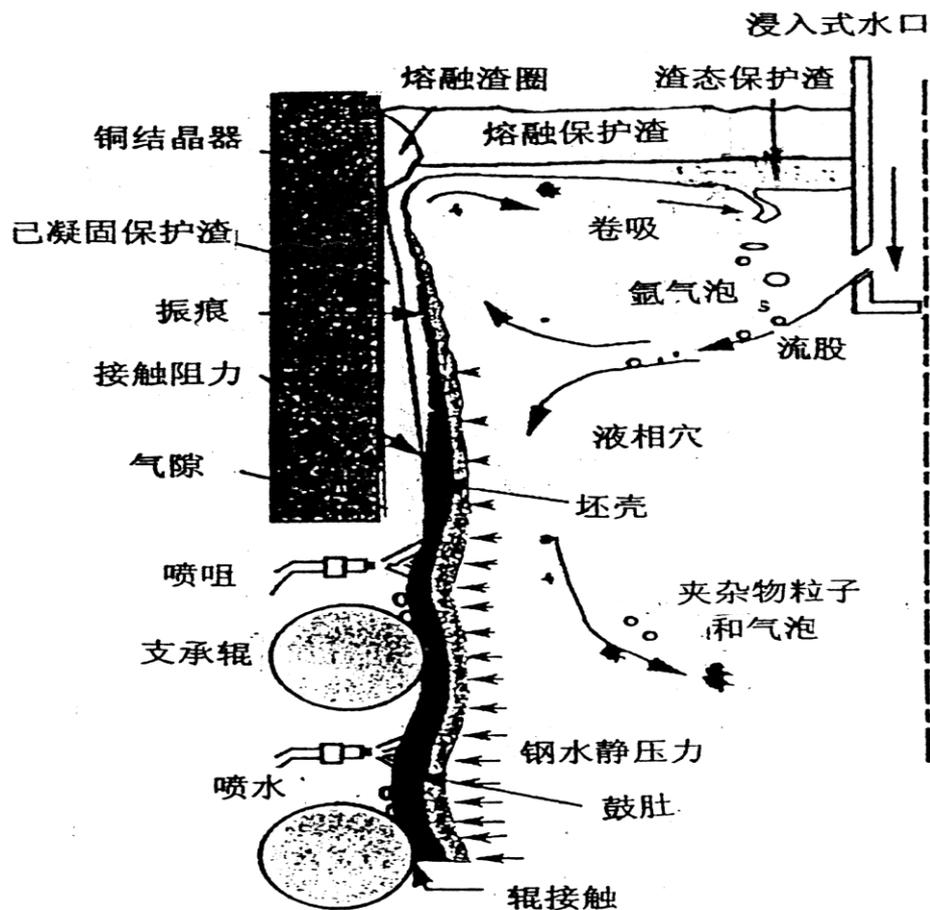


图19 板坯结晶器内钢水流动现象

实践表明，板坯连铸结晶器内钢水流动形貌制约了铸坯质量和拉速的提高，见图19。

怎么控制板坯结晶器内钢水流动？

目前处于实用的大致有两大类技术：

①利用行波磁场（**AC型**）的“**搅拌效应**”如**MEMS**和**MM-EMS**；

着眼于控制板坯的表面和皮下质量。

②利用恒定磁场（**DC型**）的“**制动效应**”如局部磁场的**EMBr**、全幅一段磁场的**LMF**、全幅二段磁场的**FCMold**。

着眼于控制板坯内部质量

我所承担原冶金部“八.五”攻关项目子项：研制成国内第一台板坯连铸结晶器电磁制动装置（**EMBr**），用于济南钢厂超低头板坯连铸机。

在原冶金部组织的鉴定会上，与会专家认为在十几个子项中完成得最好的两个子项之一。

(2) 三种板坯连铸结晶器电磁控制流动技术

① 板坯结晶器电磁搅拌技术

1) MEMS配置

图19表示基于双边行波磁场的结晶器电磁搅拌技术配置示意图

该技术适于中厚板坯连铸

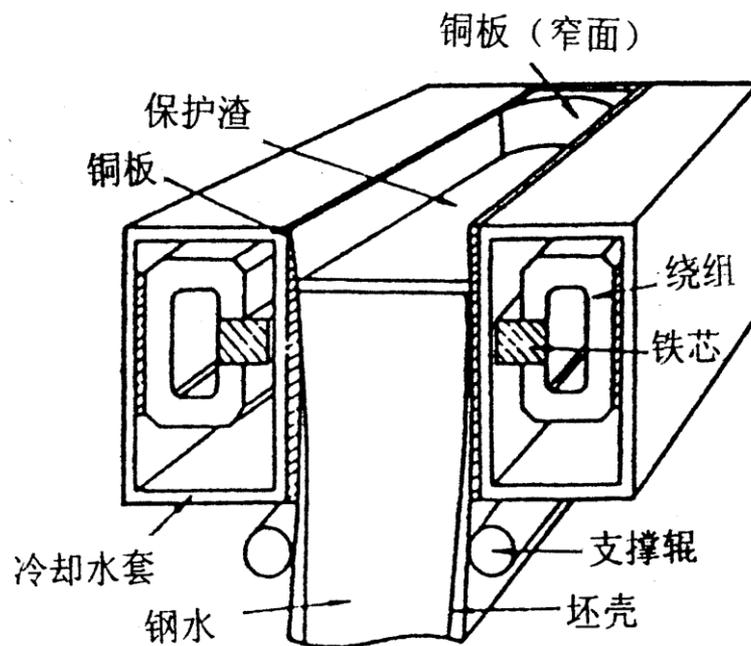
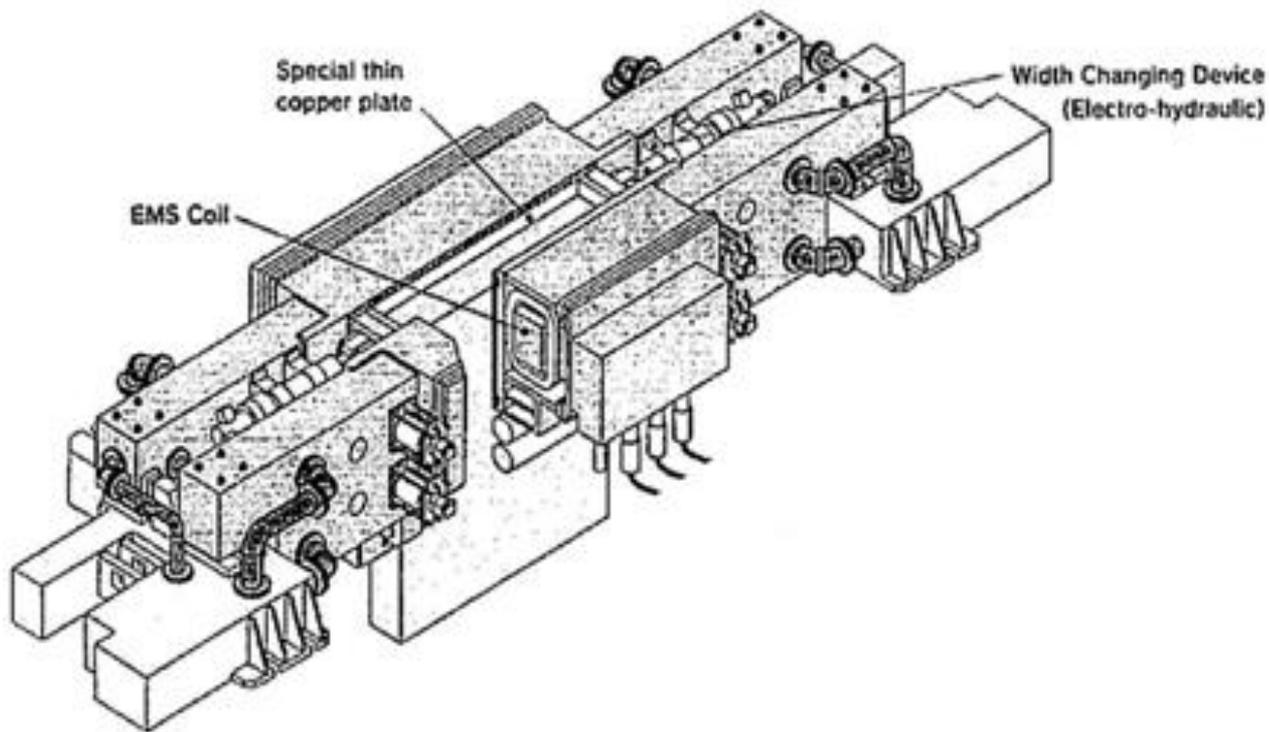


图20 板坯结晶器电磁搅拌技术

2) 图21 板坯连铸结晶器电磁搅拌装置示意图

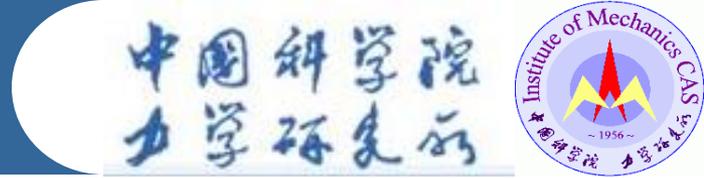


3) 照片10 双边行波磁场搅拌器实物 (MEMS的一側)

中国科学院
力学研究所



②直流磁场的结晶器电磁制动技术



1) 电磁制动装置模式

图20表示先后开发的基于直流磁场的三种电磁制动类型：

- a) 局部区域 磁场 (EMBr)
- b) 全幅一段磁场 (LMF)
- c) 全幅二段磁场 (FC mold— Flow control mold)

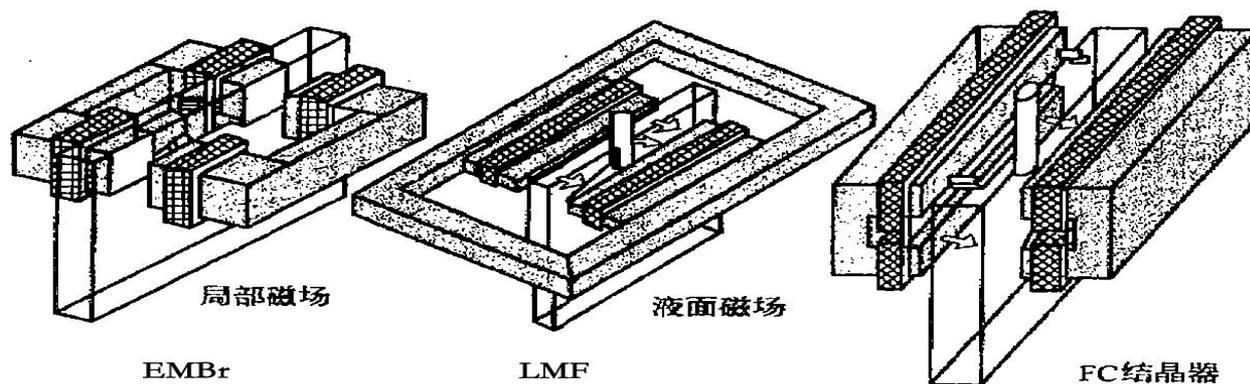
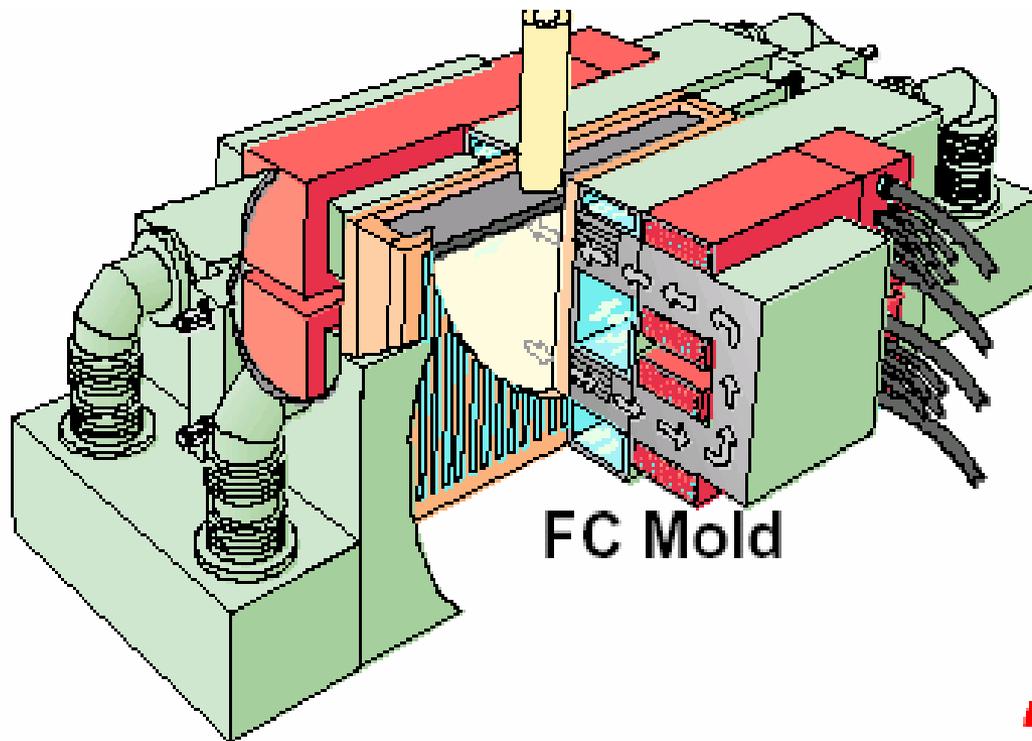


图22 板坯结晶器电磁制动装置示意图

2) 图23 全幅二段电磁制动 (FC-Flow) 配置示意图
(图中箭头是磁场运动方向)



3) 全幅一段和二段电磁制动的流动特征

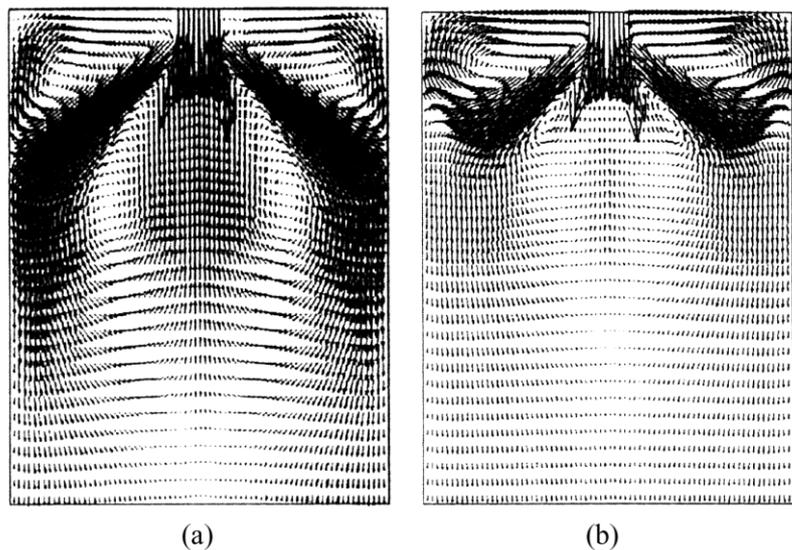


图24 EMBR-Ruler (全幅一段) 的流场特征
(a) 无电磁制动 (b) 有电磁制动

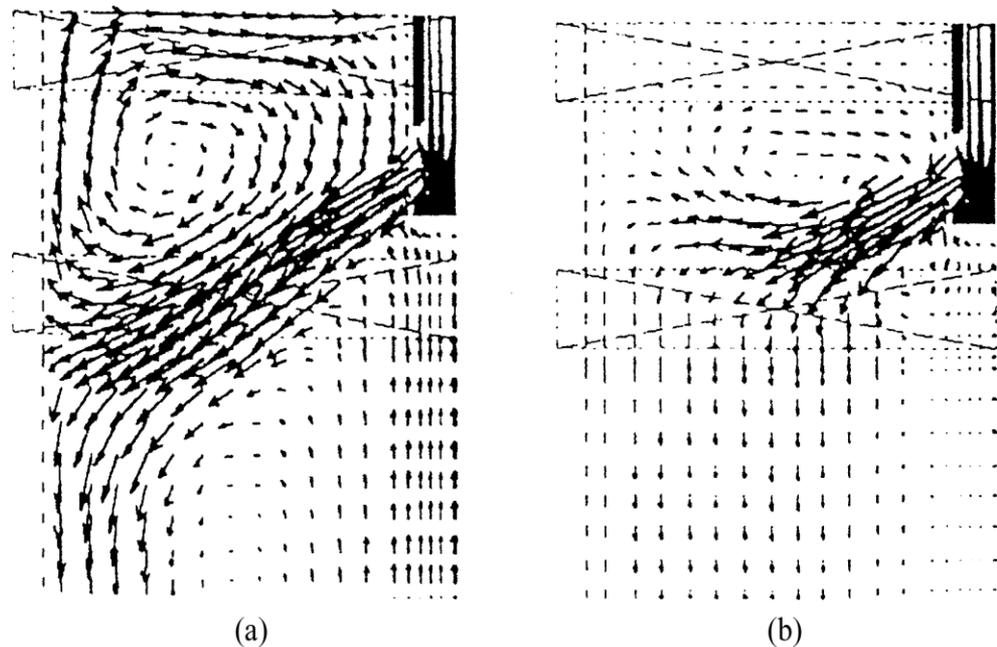


图25 FC Mold (全幅二段) 的流场特征
(a) 无电磁制动 (b) 有电磁制动

图25是我所承担的原冶金部“九五”攻关项目子项：攀枝花钢厂板坯连铸结晶器电磁制动技术研发的内容之一：板坯结晶内流场的数值模拟

③多模式电磁搅拌技术

中国科学院
力学研究所



图26 表示 基于四个行波磁场搅拌器的多模式流动控制技术:

- 1) 减速的电磁水平稳定器 (EMLS)
- 2) 加速的电磁水平加速器 (EMLA)
- 3) 多模式电磁搅拌技术 (MM—EMS)

该技术适用于厚板坯连铸

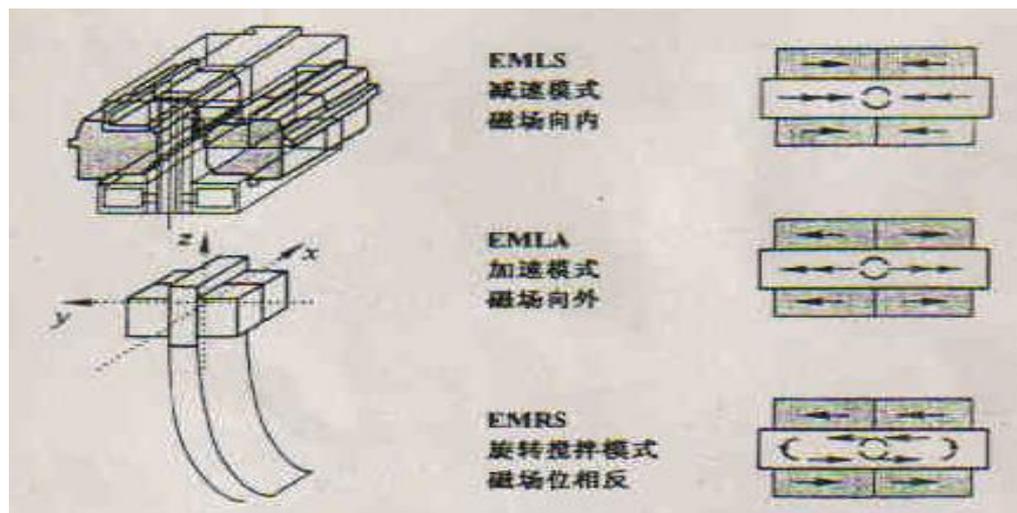


图26 板坯结晶器多模式电磁搅拌技术

1.19, 板坯连铸二冷区电磁搅拌技术

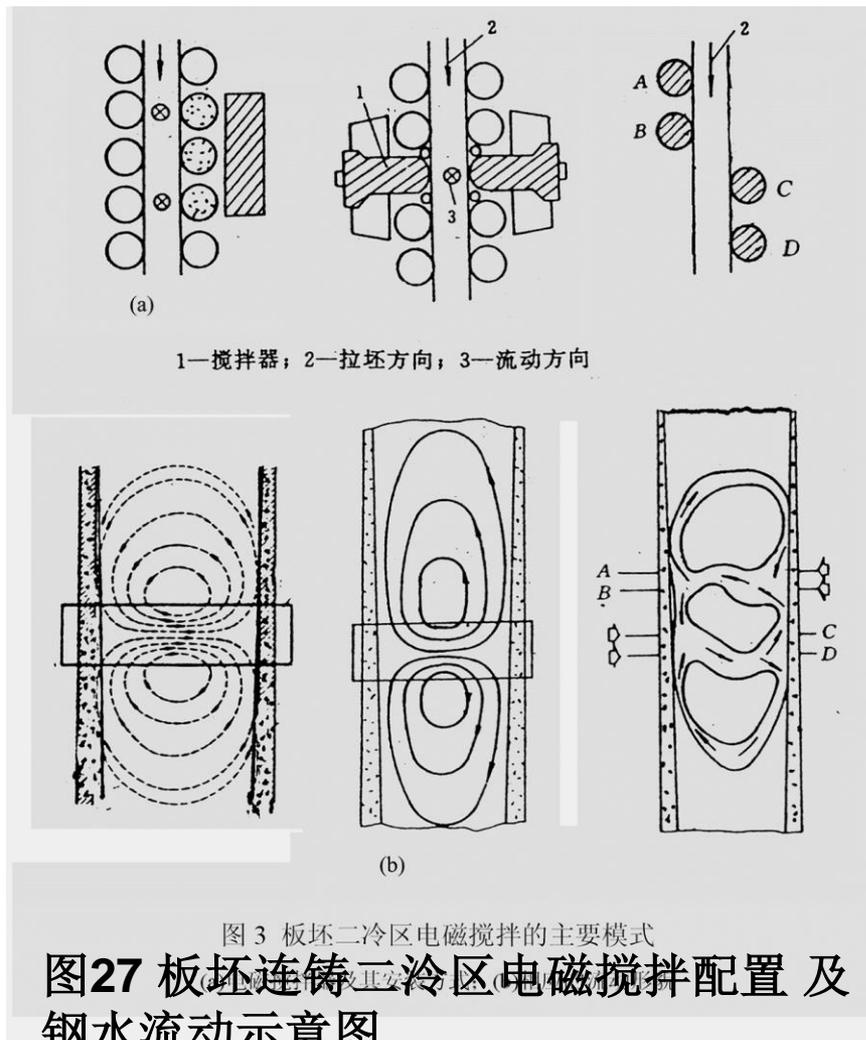
板坯连铸二冷区电磁搅拌器主要有三种模式:

(1) 辊后箱式

(2) 辊间插入式

(3) 辊式 **目前使用的**

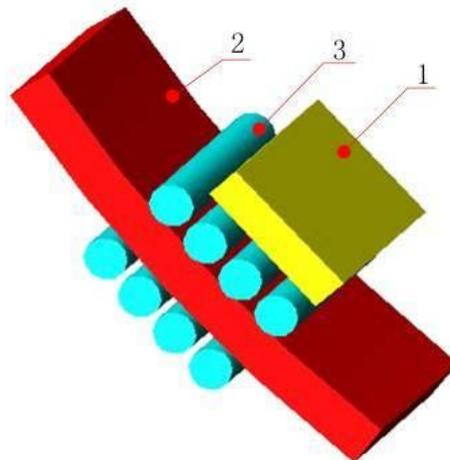
多为辊式的



(1) 辊后又称箱式SEMS

放置在支承辊后，不需改变辊列结构和辊的尺寸，但只需要改变支承辊的材质，采用高强非磁不锈钢制作；

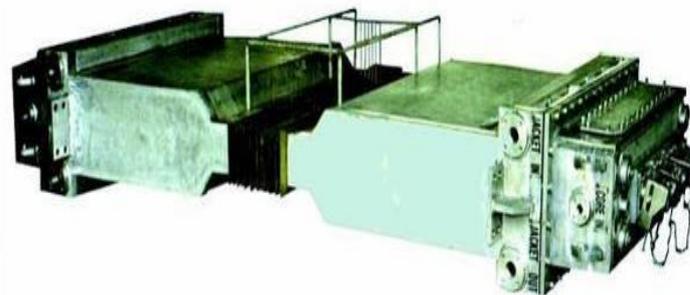
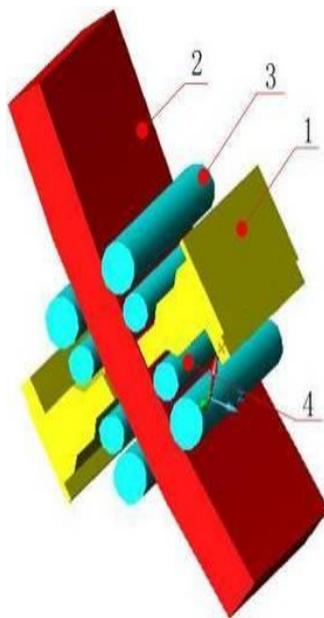
因搅拌器工作面离铸坯液心远，所需功率大，其能耗也大，激磁电流强度通常在**2000A**以上，



(2) 辊间插入式SEMS

安装在支承辊之间，贴近铸坯表面，不仅增强了电磁推力，而且减少了能耗；

安装位置处需折掉一对或两对支承辊，而后在搅拌器头部两侧采用小直径辊，以减轻铸坯鼓肚变形的风险



辊间扦入式EMS实例

中国科学院
力学研究所



我所与岳磁一起在消化吸收宝钢引进的辊间扦入式SEMS基础上，先期为宝钢研制一台备件。接着共同承担国务院“国家重大技术装备办公室”立项的“八.五”攻关项目，由我所提出设计参数，研制成我国第一台辊间扦入式SEMS，出厂验收表明，实测参数完全符合设计指标。用于舞阳钢厂厚板坯连铸。上图是研制成的我国第一台辊间扦入式SEMS的实体照片。

(3) 辊式SEMS

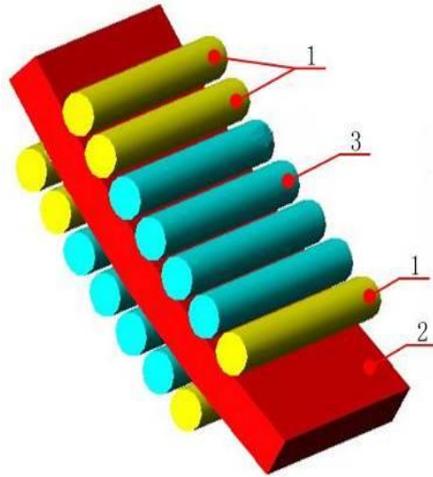
感应器置于支承辊内，不需要改动辊列结构；

受辊径大小制约，辊式S-EMS多采用双级或多级搅拌

辊径过大，容易造成鼓肚变形。

由于其外形与常规支承辊无异，安装维护方便。

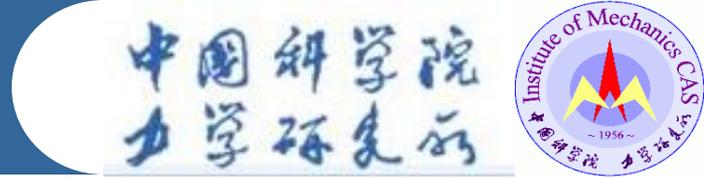
目前在线使用的多为辊式的。



第二篇

中间包通道式感应加热与精炼技术

2.1 为什么要研发通道式感应加热与精炼技术



(1) 连铸工艺要求

连铸实践表明，连铸过程钢水必须具备合适而稳定的温度，它直接影响连铸的生产率和铸坯质量以至产品质量。然而在许多连铸运行参数中间，钢水温度或过热度是最不可预测的变数之一，唯一的办法是用外部热源来调控钢水的温度，确保连铸过程的合适而稳定的温度或过热度。

(2) 中间包加热的可操作性（不影响生产节奏）

中间包是钢包与结晶器之间的中间容器，是进入结晶器的最后一道调控钢水的工序。与钢包加热如LF炉相比较，中间包的容量较小，加热设备容量也不是太大；又可在线操作不会影响生产节奏，而且还有利于提高产量。因此，采用中间包加热技术调控钢水温度，可以使钢水过热度控制在目标温度范围内。控温精度高，实践表明，在自动加热模式下，温控精度可达目标温度的 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 中间包等离子体加热未成气候

我国于**1990**年代末期先后从国外引进七套中间包等离子体加热装置，加上国内研发的两套共九套装置，由于种种原因都未能在线使用。

。

2.2 等离子体加热与通道式感应加热技术的比较

中国科学院
力学研究所



类别	中间包等离子体加热技术	中间包通道式感应加热技术
加热机理	接触式加热即通过易电离的Ar气产生的等离子弧柱使电能转换成热能，再依靠热辐射加热钢水表面，	非接触式加热即基于电磁感应原理，借助钢水中感生的感应电流，将焦耳热加于流经通道的钢水内，实现钢水保温和加热
加热方式	大部分热量约占70%加在中间包内的钢液面上，再由钢液面传递到内部钢水	感生的焦耳热几乎直接加在流经通道以及通道前后的注入室和分配室的钢水体积内
加热功能	基本上是单一的加热钢水功能	具有加热钢水功能及伴生的精炼功能即减少 $[O]_T$ 和去除夹杂物特别是小型夹杂物
温控精度	目标温度的 $\pm 5^\circ\text{C}$	目标温度的 $\pm (2-3)^\circ\text{C}$
加热效率	加热效率为60-70%，	加热效率大于90%
对钢水影响	气体的离解和电离可能导致钢水增氮	非接触式能量传输方式，无二次污染

2.3中间包通道式感应加热与精炼技术在 国外发展概况

中国科学院
力学研究所



国外采用中间包感应加热与精炼技术的以日本钢厂居多，市场普及率占**30%-40%**，其应用实例如表1所示

(1) 型式

根据通道设置不同，可以分为弧形单通式、平行双通道式和三边型通道式见图1。

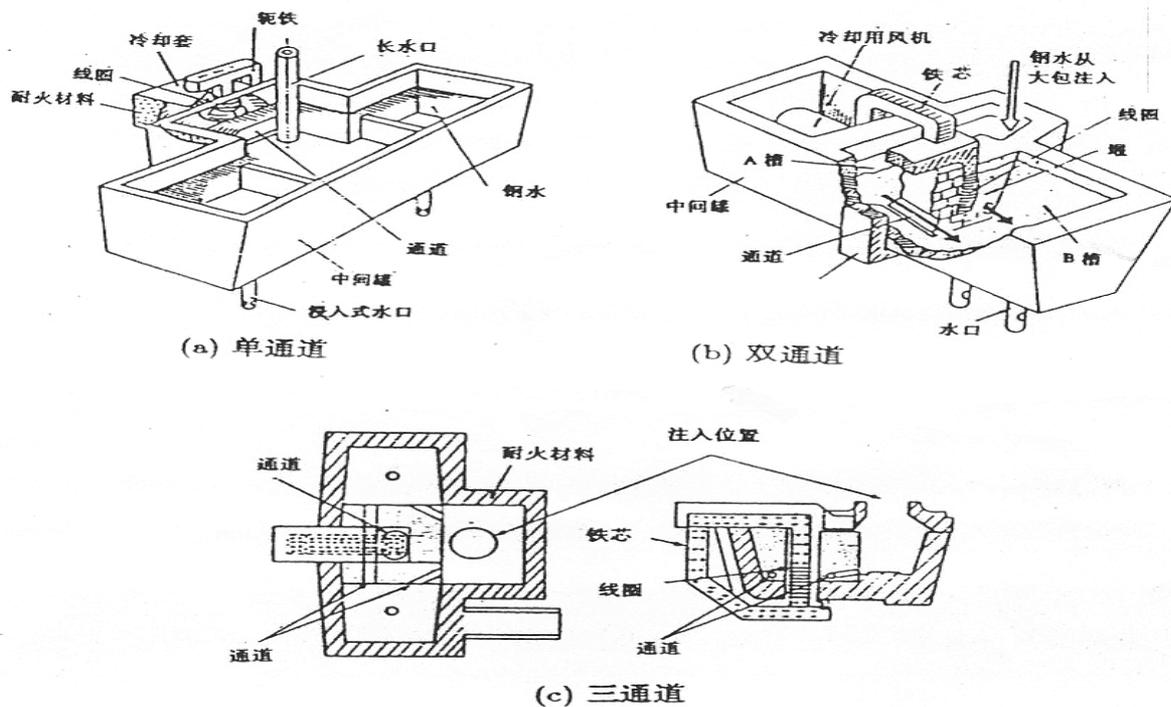


图1 国外中间包通道式感应加热装置示意图

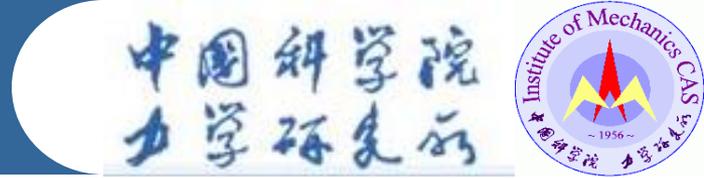
(2)日本钢厂应用情况

现将日本几大钢厂的使用情况列表如下：

序号	公司	钢种	中包容量/t	通道形式	加热功率/kw	温度控制精度/°C
1	川崎公司	SUS304、430	8	弧形单通道	1000	±2.5
2	大同特钢	汽车用低合金钢、轴承钢	20	弧形单通道	1000	±3
3	住友	高碳钢、轴承钢、渗碳钢	13	平行双通道	1000	±2
4	新日铁	低铝低硅镇静钢	30	平行双通道	1000	
5	神户公司	轴承钢	12	三边型通道	600	

另外，新日铁室兰制铁所多品种小批量生产要求在线调整钢水成分；川崎千叶制铁所在单通道感应加热装置上也进行了钢水成份调整试验。

2.4, 中间包通道式感应加热与精炼技术的基本原理



(1) 感应加热的工作原理

以双通道式为例，感应加热器和通道的配置如图2所示。就电路而言，它类似一台单相交流变压器，多匝线圈相当于变压器的一次回路，通道中流动的钢水相当于二次回路，视为一匝。

当感应器馈给中频电流时，交变的电流在铁芯的闭合磁路中建立起主磁通 Φ ，交变的磁通 Φ 就在与铁芯匝链的通道里流动的钢水中感应起电势 E ，由于流经通道内的钢水具有导电性，进而在其中形成感应电流，大环流的感应电流在钢水中产生焦耳热，从而实现钢水保温及加热的效果。

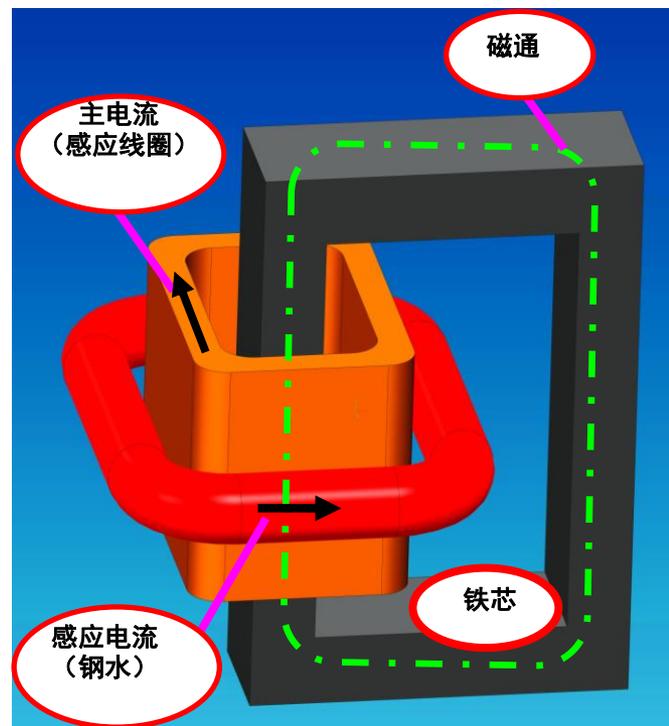


图2 通道式感应加热的原理图

(2)钢水内夹杂物的去除机理

与加热效应相伴生的是钢水的精炼效应。其机理是

①箍缩效应

在通道内的感应电流与其自身激发的感生磁场相互作用产生指向通道中心的箍缩力（图中指向中心的箭头），箍缩力是体积力，作用在钢水体积元上，使钢水名义密度增加，导致与夹杂物的密度差增大，从而使轻相夹杂物容易向通道壁泳动而被通道壁吸收、去除；

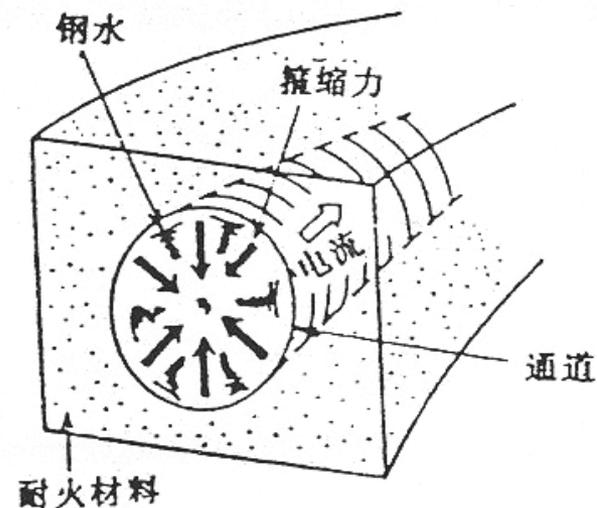


图3 箍缩效应示意图

②上升流的影响

被加热了的流动钢水借箍缩力的助推加速由通道口喷出而形成强烈的上升流，见图4。上升流促使夹杂物在上升过程中因碰撞变大而上浮到自由面，被覆盖剂吸收、去除；同时上升流也促进中间包内冷热钢水的混合而使其温度分布均匀。

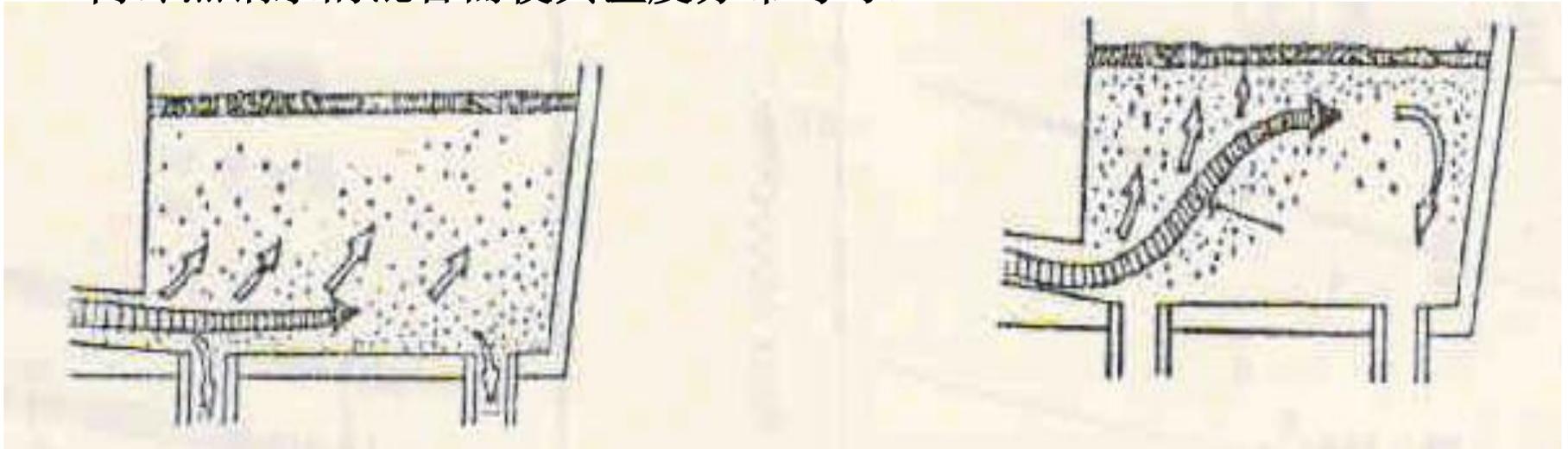
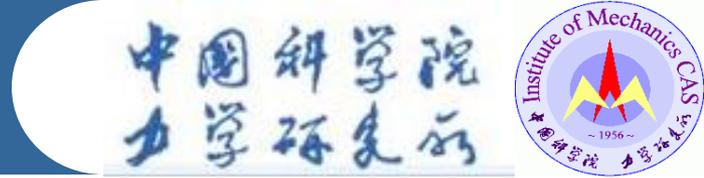


图4 中间包通道式感应加热的上升流的示意图

2.5 中间包通道式感应加热与精炼技术的研发实践



(1) 中间包采用先进高新技术具有广阔的空间

连铸技术是一项系统工程，综观连铸过程各个工序的配置：

在中间包之前，配备有各种熔炼和精炼手段，如LD、LF、RH、VD、VOD……等等；

在中间包之后，配备有结晶器液面检测与自动控制、漏钢预报、MEMS、SEMS、FEMS、二冷动态配水、动态轻压下……等等。

唯独中间包这一块还缺少高新技术的支撑，这表明中间包采用新技术具有广阔的空间。

(2)研发的前期准备

- ①从**20世纪九十年代末**开始收集国外有关中间包通道式感应加热技术文献，分析、梳理其工作原理、装置型式和构成、功能、技术特点、冶金效果等等
- ②**2007年9月**在**西宁**召开的“**特钢连铸技术研讨会**”上，作者第一次作了中间包通道式感应加热技术的文献综述；此后又在三份期刊和四次学术会议上介绍该项技术
- ③**2008年**在中冶连铸工作期间曾经提出过中间包蝶形通道感应加热装置的专利
- ④与此同时，作者也走访了一些钢厂，从反馈的情况分析：一是多数钢厂对去除夹杂物的效果更感兴趣；二是要求中间包的大包注入口和中间包的浇注口的位置不能变，而国内中间包与大包迴转台的距离都小于**2m**。这一制约条件虽为研发增加了难度，但也为自主创新提供了机遇。

研发的核心问题是**如何满足在现有连铸机上增装该装置的成套技术！**

(3) 中科电气研发的具有自主知识产权的“中间包八字形通道感应加热与精炼装置”

图5是中间包八字形通道感应加热与精炼装置的示意图。其基本配置包括：

- ① 感应加热器本体
- ② 高压变频电源和电控
- ③ 气雾复合冷却系统
- ④ 其他

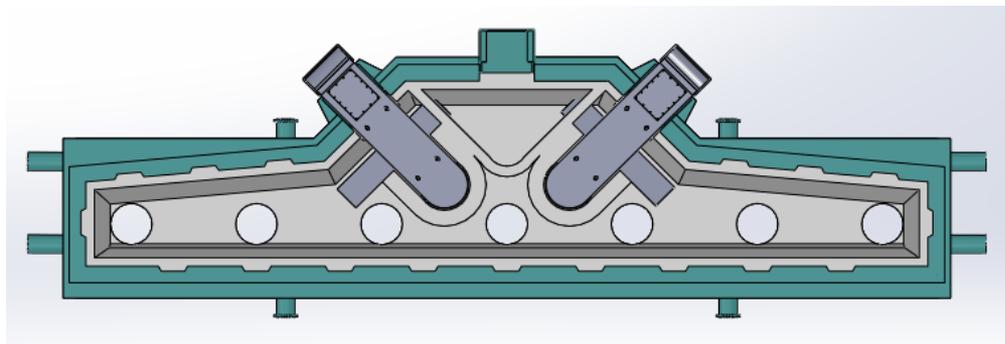


图5 中间包八字形通道感应加热与精炼装置的示意图

(4)该装置的主要特点

①八字型通道

- 1) 解决现有连铸机两口位置不能变和大包回转台与中间包间距过小的制约
- 2) 改善中间包内中间流与边流的时间和空间的温度差, 均匀包内钢水温度

②独特的机械结构和绝缘的专利技术

- 1) 保证了中间包在配置加热装置后不会对操作空间造成大幅度的制约,
- 2) 保证了钢水无泄漏和对地绝缘的安全可靠

③独特的高压中频电源与控制技术

- 1) 减小感应加热的感应器的体积, 维持现有的钢包回转台、中间包、及中间包小车的相对位置的坐标不变
- 2) 占用中间包容积小, 对中间包钢水容量的影响也小

④采用气雾冷却与独特的制冷冷却相结合的复合冷却系统, 可根据不同的加热功率调节冷却强度, 不仅冷却效果好, 而且能保证运行安全。

.....

2.6在线应用的冶金效果

中国科学院
力学研究所



(1)钢厂A

①加热效果

1) 1#钢种的温度精确控制

在1#钢种的连铸过程中，在感应加热工况下钢水温度在目标温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围波动，见图6。由图可见，基本实现了低过热度的恒温浇铸。

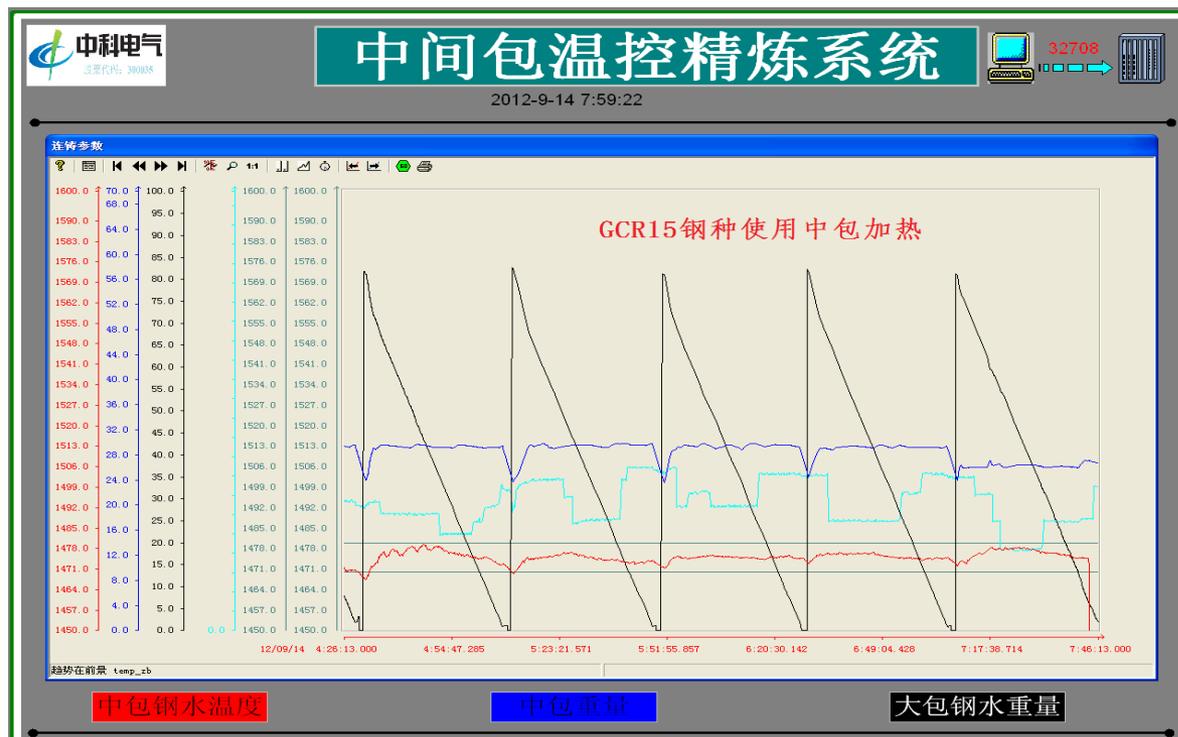
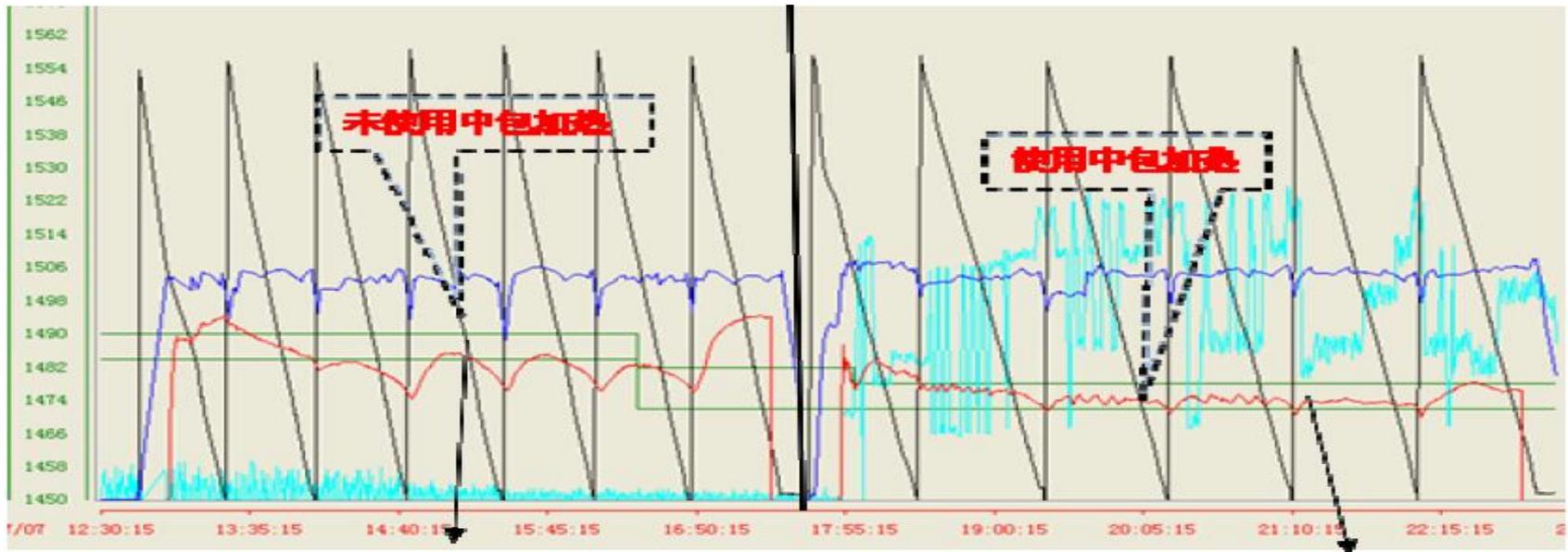


图6 在感应加热工况下1#钢种连铸的温控效果图

2) 2[#]钢种的钢水温度的精准控制

试验过程中截取了2[#]钢种在相邻两炉的现场控制曲线，见图7。由图可见，未使用感应加热的炉次，中间包钢水温度在1481~1494℃范围内波动；而使用感应加热的炉次，中间包钢水温度在1482~1488℃范围内波动，而且过程变化平稳，整个炉次的钢水温控精度在±3℃内。



图中红色线为中包温度趋势

两条绿色线是±3℃的界线

图7 在未加热与加热工况下中间包钢水温度控制精度的比较

②去夹杂物效果显著

在中间包感应加热与精炼条件下，1[#]钢种中全氧含量降低15%以上，如图8所示；全氧含量降低意味着降低了钢水中小型夹杂物。

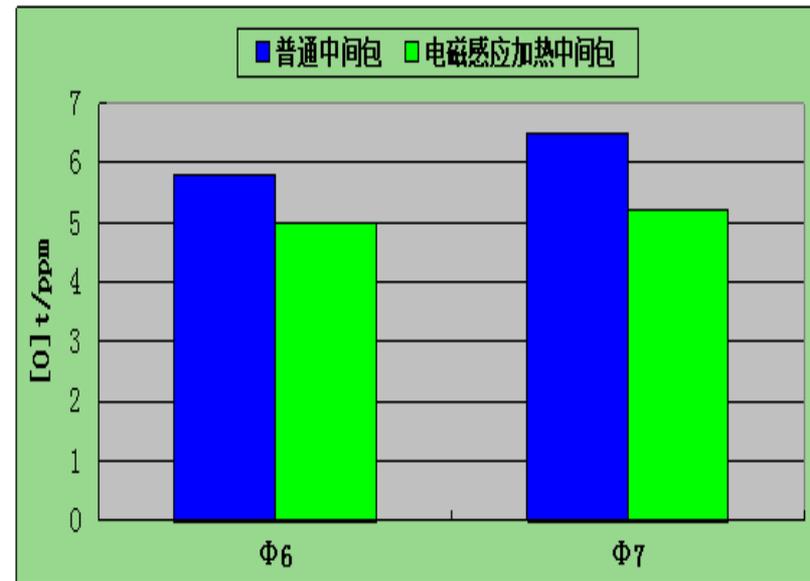
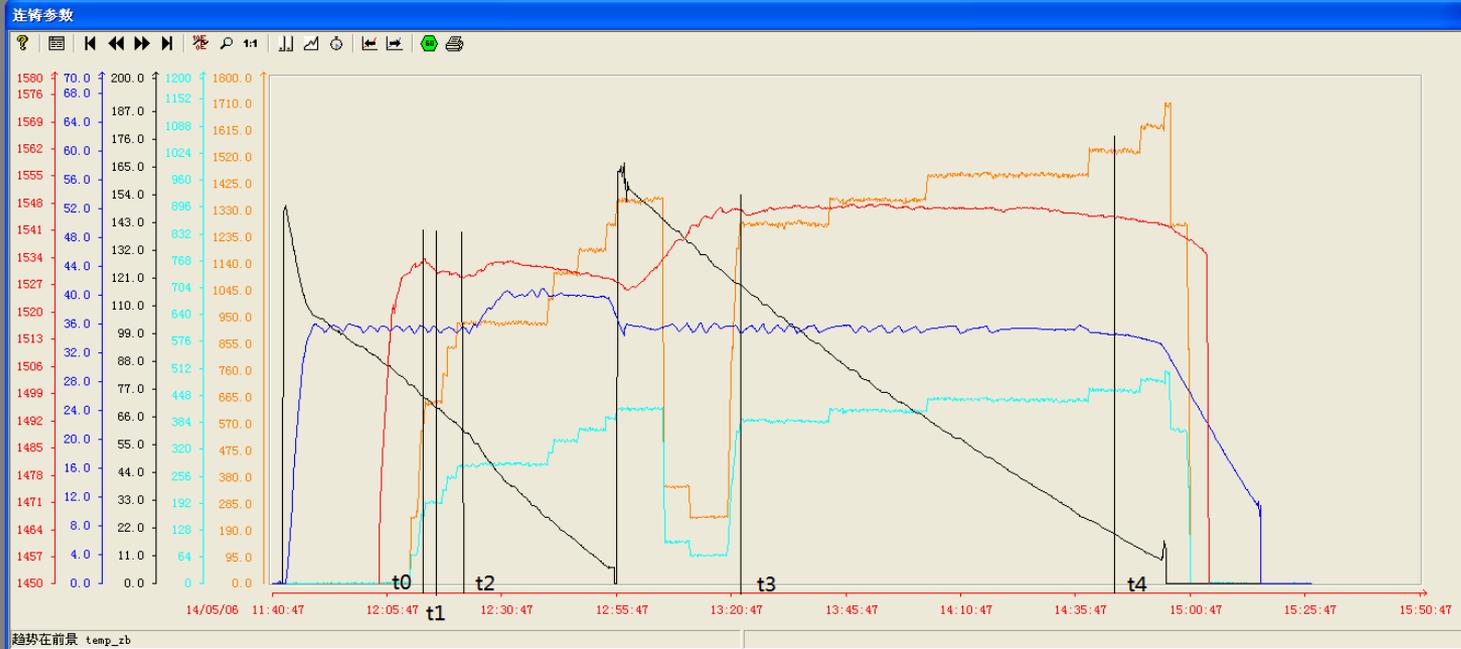


图8 在感应加热工况下1[#]钢种连铸的去氧效果

(2) 钢厂B

① 一次偶发事故考验了中间包八字形通道感应装置的加热能力

在某次运行过程中，由于偶发设备故障中间包车在中途**停留了12分钟**，当中间包车开至浇铸位后，**导致7流水口中只开浇了3流**。在这种条件下运行对常规连铸来说是不可想像的，却是对感应加热装置的一次非常大的考验。但依靠感应加热装置的加热能力，最终完成两炉连浇，**第一包150t钢水浇铸了75分钟；第二包150t钢水在120分钟内顺利浇完，浇铸时间比正常浇注延长了将近一倍；钢水过热度最低控制在9度；且温度控制非常精准，见图9。**



中包钢水温度

中包重量

大包钢水重量

运行电流

当前电压

当前频率

返回

图9 在事故工况下中间包八字形通道感应加热的温控效果图

②验证加热设备三项性能的热试:

在几次试运行基础上, 又进行了一次验证加热设备三项性能的热试:

1)长时程多炉连铸试验

此次热试钢种的液相线温度为**1454℃**, 过热度要求控制在**20-25℃**。在7流全开的工况下顺利浇完**5包750t**钢水, 实际浇铸时长共**4小时50分钟**。中间包感应加热自第一包钢水开始投用, 一直到第**5包**钢水浇完, 整个过程都按计划调试运行, 设备运行稳定可靠。

2) 自动控温模式系统的检验

热试过程主要采用在额定电流强度一半的工况下对钢水进行保温, 在浇注末期启动了自动控温模式系统, 在该模式下运行了**15min**, 钢水温度波动幅度非常小, 完全实现恒温浇铸

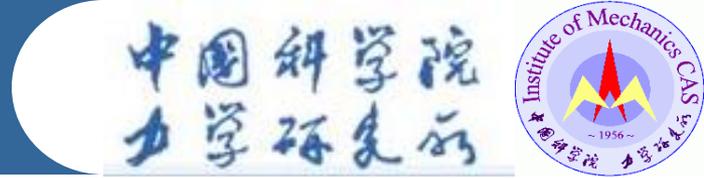
3) 在额定电流强度满负荷运行下设备的加热能力

在给定额定电流强度满负荷运行下, 钢水温度由**1478℃**升至**1485℃**, **8分钟**内钢水升温**7℃**, 名义温升速率为**0.85℃/min**。考虑当时中间包钢水温降, 实际温升速率为**1.35℃/min**, 整个浇铸过程, 中间包钢水温度恒定在**1480℃**左右

(3)推广应用情况

从**2012年9月**开始，中科电气开始向工业应用的市场推广，从目前技术咨询、交流和签约情况看，发展势头是良好的！据统计，至今已与五家钢厂的六个项目签订合同；另外还有几家正在商签中。

2.7 对连铸技术可能产生的影响



中间包通道式感应加热与精炼技术不仅使连铸人追求的低过热度恒温浇铸成为现实，而且有可能对整个连铸过程产生深刻的影响。

(1) 对中间包前——降低炼钢炉出钢温度或精炼炉上线温度和相应的耐材消耗

与炼钢炉或精炼炉相比较，中间包的容量较小，加热设备容量也不大；又可在线操作，不会影响生产节奏，因此，降低中间包前炼钢炉出钢温度**15—20℃**或降低精炼炉的上线温度是完全有可能的，同时也可相应地节约能源和耐材消耗！

(2)对中间包后——影响连铸工艺

- ① 实现低过热度恒温浇铸成为可能；
- ② 实施恒拉速浇铸也成为可能；
- ③ 由于采用该项新技术后，浇铸温度稳定了，拉速也稳定了，可以大大减轻二冷动态配水调控的压力；
- ④ 由于采用该项新技术后，浇铸温度、拉速、二冷配水等稳定了，就能比较精确确定动态轻压下的位置和调整压下量；
- 由于中间包八字形通道感应加热与精炼技术对连铸过程的良好影响随着该项新技术的推广应用并日趋成熟，期望获得更致密、更洁净的铸坯以至更高的产品质量不是奢望！

谢谢大家！