

冶金科学技术普及读物

现代炼钢-连铸质量控制新技术

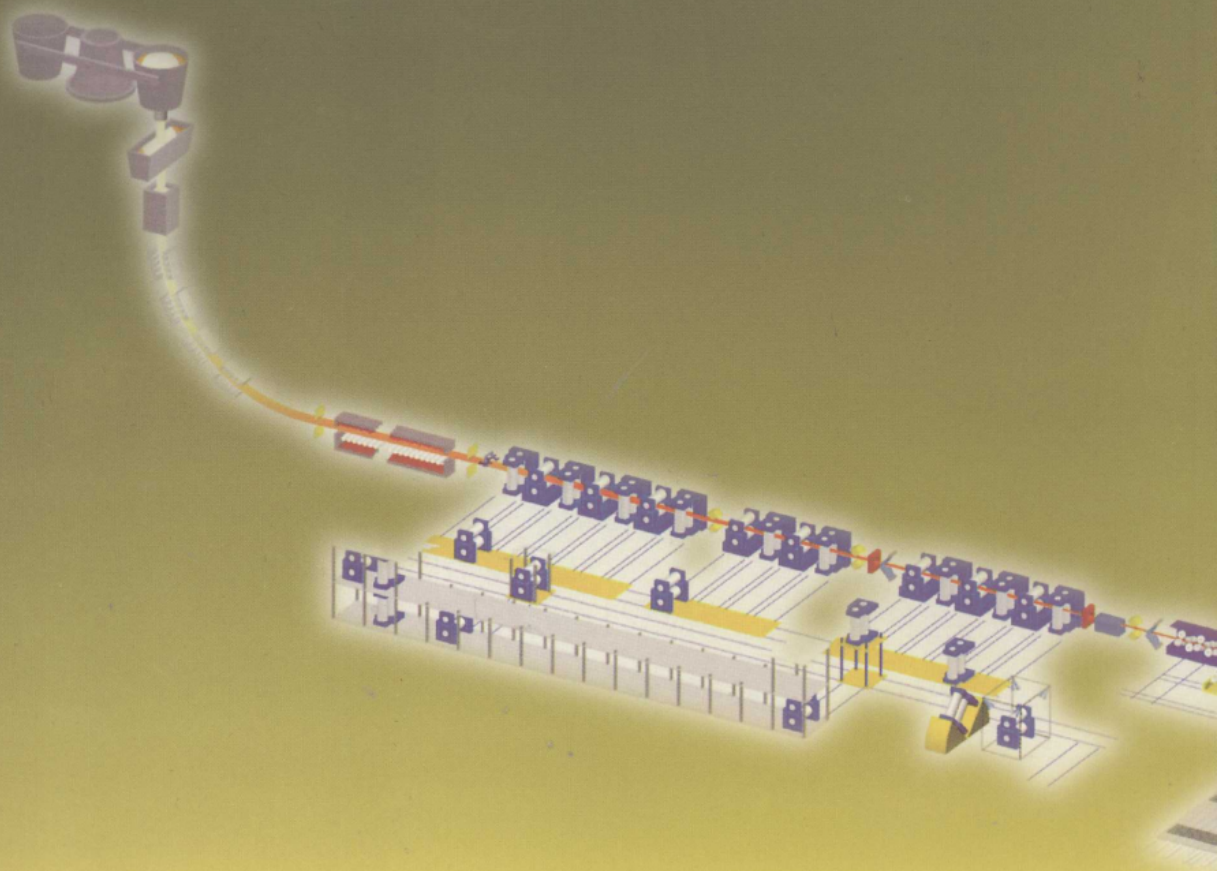
# 连铸电磁搅拌 600问

张森林 陈伟庆 主编



中国科学技术出版社

责任编辑: 夏杰生 周晓慧 许 慧 刘加军  
责任校对: 张苓苓 杨晶华  
责任印制: 王 沛  
封面设计: 陈晓莉



ISBN 978-7-5046-4626-2



9 787504 646262 >

定价: 43.00元

要 容 内

冶金科学技术普及读物

现代炼钢 连铸质量控制新技术

# 连铸电磁搅拌 600 问

张森林 陈伟庆 主编

图书在版编目(CIP)数据

连铸电磁搅拌 600 问 / 张森林, 陈伟庆主编. — 北京:

中国科学技术出版社, 2007. 3

ISBN 978-7-304-44026-2

I. ①连... ②磁... ③连铸铸造—

IV. TC249.7-44

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第019836号

自 2006 年 4 月起本行图书封面印刷均采用 100% 环保油墨印刷

中国科学技术出版社出版

北京市西城区右安门内大街 16 号 邮政编码: 100021

科委普及出版社发行部发行

电话: 010-6441867 传真: 010-6441826

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

北京北方印刷厂印刷

开本: 887 毫米 × 1092 毫米 1/16 印张: 12 字数: 310 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

中国科学技术出版社

ISBN 978-7-304-44026-2 · C · 13

· 北 京 ·

(凡购买本社的图书, 如有缺页、错页、漏页、损坏等, 本社发行部负责调换)

# 内 容 提 要

本书共有十二章,第一章至第三章分别是连铸及连铸电磁搅拌的一般介绍、连铸坯的质量问题、产生质量问题的原因,特别是可以用电磁搅拌控制的一些因素;第四章至第七章分别是方(矩)坯连铸结晶器电磁搅拌器、大(小)方坯凝固末端电磁搅拌器、二冷区电磁搅拌器和板坯连铸电磁搅拌器;第八章内容为电磁搅拌器专用的变频电源及控制系统;第九章内容为电磁搅拌器的基本原理及工程设计原则;第十章内容为连铸电磁搅拌器的工作环境及水冷系统的要求;第十一章内容为连铸电磁搅拌器的材料、工艺及维护和使用;第十二章内容为连铸坯检测及冶金效果分析。

本书可供钢铁企业的工程技术人员、设备管理人员、现场操作人员参考,也可作为大专院校冶金工程专业学生的参考书,还可为设计制造电磁搅拌设备、配件及相关技术服务的工程技术人员和营销管理人员提供参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

连铸电磁搅拌 600 问/张森林,陈伟庆主编,一北京:

中国科学技术出版社,2007.3

ISBN 978-7-5046-4626-2

I. 连... II. ①张...②陈... III. 连续铸造 - 电磁振荡 - 问答 IV. TG249.7-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 019836 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

科学普及出版社发行部发行

电话:010-64441867 传真:010-64441856

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

北京北方印刷厂印刷

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:12 字数:310 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

印数:1-6000 册 定价:43.00 元

ISBN 978-7-5046-4626-2/TG·13

---

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换)

# 《连铸电磁搅拌 600 问》

## 编辑委员会名单

- 主 编** 张森林 (原岳阳起重电磁铁厂常务副总工程师, 岳阳天力电磁设备有限公司电磁搅拌技术总顾问、高级工程师)
- 陈伟庆 (北京科技大学冶金与生态工程学院 教授 博士研究生导师)
- 编 委** 牛基仁 (首钢长白结晶器公司搅拌器分厂总工程师 高级工程师)
- 许德海 (首钢长白结晶器公司搅拌器分厂厂长 高级工程师)
- 李永东 (首钢技术研究院副院长 教授级高工)
- 王庆贤 (青岛钢铁有限公司副总工程师 技术中心副主任)
- 刘 澄 (青岛钢铁有限公司第一炼钢厂厂长 高级工程师)
- 苏 旺 (青岛钢铁有限公司第一炼钢厂副厂长 高级工程师)
- 侯 雷 (青岛钢铁有限公司第二炼钢厂厂长 高级工程师)
- 段贵生 (安阳钢铁集团公司技术中心 高级工程师)
- 王冠军 (安阳钢铁集团公司第一炼轧厂副厂长 高级工程师)
- 王玉昌 (包头钢铁集团公司炼钢厂副总工程师)

# 前 言

电磁搅拌器产生的旋转磁场或行波磁场,是推动钢水运动的原动力,受控钢水在结晶器内的运动,可加快传热,使过热度加速散失,有利于抑制柱状晶的生成,增加等轴晶的比率,改善铸坯内部质量;钢水的受控运动,使夹杂物按我们设想的路径运动,最后得以大部分排出,有利于改善铸坯表面和皮下质量;在铸机二冷段和凝固末端设置搅拌器,能控制铸坯后阶段凝固,对有些钢种是很重要的,特别是浇铸高碳钢和高要求合金钢时,凝固末端搅拌器就显得特别重要,它能有效地控制中心偏析、疏松、缩孔和裂纹。

电磁搅拌器的影响区是有限的,对于冶金长度大于10米的连铸坯的凝固过程,想通过一台搅拌器来控制,排除铸坯所有缺陷,是做不到的;配置搅拌器还必需认真考虑铸机的条件和运行成本。因此,我们应当了解每一种搅拌器的特征和功能,作出合理的选择。

不管是国产的还是进口的电磁搅拌器,长期以来,都属于非标准生产,其工作环境特别恶劣。因此,应当了解其制作材料、工艺和使用维护方法。

知道了每种搅拌器的特征和功能,就有合理的选择,就有检验的目的。运用正确的试验方法和检验标准,可使项目有正确的评价结果,就能收到良好的经济效益。

近几年与国内几十家连铸企业进行过电磁搅拌技术方面的交流,深深感到连铸电磁搅拌已经在连铸机上普遍使用,而连铸现场工作者们亟需全面地了解 and 掌握电磁搅拌的相关技术,本人就努力收集资料、积累试验数据,于2004年完成了《连铸电磁搅拌技术》一书的初稿。

《中国冶金报》记者夏杰生先生建议,把书编成问答方式出版,更有利于连铸现场的技术人员、操作工人阅读,因而对原稿又进行了重编,并将此书定名为《连铸电磁搅拌600问》。

近六年来,本人和陈伟庆教授合作,解决了沙钢润忠公司连铸机F-EMS、青钢二炼钢厂、青钢一炼钢厂连铸机F-EMS、承德建龙M-EMS等项目中的技术难题,合作的过程一方面使本人能更深入地将搅拌器和连铸

机、连铸工艺及冶金效果相接合；另一方面陈教授的严谨的科学态度，使我受益匪浅。陈教授为本书的编写提供了大量资料，编写了一些重要的章节，认真、反复地审阅和修改了全书，在百忙中，实属不易。

张裕后、钱新恩教授对本书的编写也提供了热情的帮助。牛基仁总工编写了第八章。有关 M-EMS、F-EMS 的大部分内容，特别是试验部分的数据和结论，是与其他编委共同做出来的。编委们认真审阅了书稿，提出了很好的修改意见。

要把适合不同铸机上使用的搅拌器试验都做一次，是不可能的，因而本书较多地引用了国内外学者、专家过去的研究和试验的结果，在此对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。

还是初稿刚开始动笔的时候，就得到首钢长白机械有限责任公司的领导、特别是张树发董事长的鼓励，本书能尽早地和读者见面，是与他的大力支持分不开的。我向张树发董事长致以衷心的感谢！

还要感谢近几年来与我一同在连铸现场共同奋斗的同事们，包括岳阳天力电磁设备有限公司的专家、教授、工程师、工艺师，是他们为炼钢-连铸生产提供了良好的产品、优质的服务，从而为本书的出版奠定了坚实的基础。

张森林 2006 年 9 月 青島

E-mail: Zhangsenlin200200@163.com

# 目 录

## 第一章 连铸电磁搅拌技术综合评述

1. 学术上把电磁搅拌技术归入哪个学科和门类,它有什么特殊性? ..... (1)
2. 我国科学家什么时候开始研究电磁搅拌技术? ..... (1)
3. 我国搅拌器制造技术在什么时候有了实质性的突破? ..... (1)
4. 连铸技术是怎样发展起来的? ..... (1)
5. 我国连铸技术是怎样发展起来的? ..... (2)
6. 电磁热流体力学包含了哪些内容? ..... (3)
7. 研究等离子体和上述三个分支磁流体力学问题时,用到哪些物理知识? ..... (3)
8. 三个守恒定律如何表示? ..... (3)
9. 热力学的两个定律如何表示? ..... (3)
10. 电磁场的四个基本定律是什么? ..... (4)
11. 电磁冶金学是如何建立起来的? ..... (4)
12. 连铸电磁搅拌技术发展史是怎样的? ..... (5)
13. 早期(20世纪80年代前)国外哪些连铸企业使用电磁搅拌设备? ..... (6)
14. 我国早期的研究开发工作是如何进行的? ..... (8)
15. DJ70和DJ80电磁搅拌器的研制过程是怎样的? ..... (8)
16. DJ70和DJ80电磁搅拌器项目研究的内容有哪些? ..... (8)
17. 近年来我国的电磁搅拌技术达到了什么水平? ..... (9)

18. 电磁搅拌器按磁场形态分类有哪些? ..... (9)
19. 电磁搅拌器按安装位置分类有哪些? ..... (9)
20. 组合电磁搅拌(KM)技术常用组合方法有哪些? ..... (9)
21. KM技术有何作用,如何应用? ..... (10)
22. 编写本书的目的是什么? ..... (10)

## 第二章 连铸坯产生质量问题的原因

23. 什么是连铸坯的质量问题? ..... (11)
24. 铸坯质量问题主要有哪些? ..... (11)
25. 连铸坯中非金属夹杂物有哪些类型? ..... (11)
26. 如何区分夹杂物的大小? ..... (11)
27. 连铸坯中夹杂物来自哪里? ..... (11)
28. 弧形连铸机铸坯内夹杂物聚集有何特点? ..... (12)
29. 按影响成品加工性能分,夹杂物有哪些类型? ..... (12)
30. 裂纹的种类有哪些? ..... (12)
31. 表面纵裂纹有什么危害? ..... (13)
32. 表面纵裂纹产生的原因有哪些? ..... (13)
33. 电磁搅拌对表面纵裂纹有什么影响? ..... (13)
34. 表面横裂纹产生的原因及防止方法有哪些? ..... (13)
35. 表面网状裂纹和铸坯角部裂纹产生的原因有哪些? ..... (13)
36. 连铸坯的内部裂纹有哪些? ..... (13)



37. 连铸坯皮下气泡是如何产生和受控的? ..... (14)
38. 连铸坯的内部质量主要指哪些? ..... (14)
39. 影响连铸坯内部质量的主要原因有哪些? ..... (14)
40. 钢液冷却过程释放的热量包括哪些? ..... (14)
41. 钢液冷却的动力是什么? ..... (14)
42. 在结晶器区段内, 传热有几个渠道? ... (14)
43. 结晶器壁传热过程是怎样的? ..... (15)
44. 凝固壳的传导传热是怎样进行的? ..... (15)
45. 钢液与铸坯凝固壳界面的对流传热是怎样进行的? ..... (15)
46. 二冷区传热有什么特点? ..... (15)
47. 什么是二冷区传热效率? ..... (15)
48. 空冷区传热如何计算? ..... (15)
49. 连铸二次冷却工艺控制与电磁搅拌有什么关系? ..... (15)
50. 铸坯初生结晶形成有什么特性? ..... (16)
51. 结晶还可能出现哪些缺陷? ..... (16)
52. 什么是连铸坯中心偏析? ..... (17)
53. 如何分析偏析? ..... (17)
54. 为什么偏析与连铸坯组织特点有关? ..... (17)
55. 对偏析不利的工艺条件有哪些? ..... (18)
56. 如何简要地描述偏析生成现象? ..... (18)
57. 钢的成分对偏析有什么影响? ..... (18)
58. 碳、硫、磷、锰的偏析有什么关联? ... (18)
59. 柱状晶宽度和中心偏析区宽度有什么关系? ..... (19)
60. 过热度对偏析有什么影响? ..... (19)
61. 拉速对偏析有什么影响? ..... (20)
62. 连铸工艺研究得出的最佳拉速是多少? ..... (20)
63. 铸坯断面尺寸对偏析有什么影响? ..... (21)
64. 连铸坯鼓肚对偏析有什么影响? ..... (21)
65. 为什么研究中心线偏析及 V 状偏析的定性模型很重要? ..... (21)
66. 产生中心线偏析的成因有哪些? ..... (21)
67. V 状偏析的生成机理是怎样的? ..... (21)
68. 大方坯、凝固区间大的钢种的凝固模型是怎样的? ..... (22)
69. 控制中心偏析的方法及 EMS 的作用有哪些? ..... (22)
70. 为什么要采用 F-EMS 来控制中心偏析? ..... (23)
71. 为什么要重视连铸坯中心疏松和缩孔? ..... (23)
72. 连铸坯的凝固收缩是怎样发生的? ..... (23)
73. 过热度如何影响缩孔? ..... (23)
74. 末端(二冷第四段)采用强冷如何影响缩孔? ..... (24)

### 第三章 连铸坯质量要求及控制方法

75. 高碳钢连铸小方坯有何质量要求? ..... (25)
76. 连铸硬线钢的用途及要求是什么? ... (25)
77. 为什么我国大部分为高线厂提供连铸坯的炼钢厂在连铸机上都装备有 M-EMS? ..... (25)
78. 我国硬线钢存在什么样的质量问题? ..... (25)
79. 国外连铸小方坯生产高级线材采取了哪些措施? ..... (26)
80. 产品质量指标怎样? ..... (26)
81. 怎样比较和认识连铸小方坯和大方坯质量? ..... (26)
82. 连铸小方坯生产高级线材的市场前景如何? ..... (27)
83. 深冲薄板钢的质量有何要求? ..... (27)
84. IF 汽车薄板的质量有何要求? ..... (27)
85. 厚板的质量有何要求? ..... (27)
86. 重轨钢的质量有何要求? ..... (28)
87. 易切削钢连铸有何要求? ..... (28)
88. 轴承钢连铸要注意什么问题? ..... (28)

89. 硅钢连铸有哪些特点和要求? ..... (28)
90. 对圆坯质量有何要求? ..... (29)
91. 不同钢种对钢材纯净度有何要求?  
..... (29)
92. 采取什么措施来提高钢水纯净度?  
..... (29)
93. 结晶器液面波动对钢水纯净度  
有什么影响? ..... (29)
94. 结晶器电磁搅拌器(M-EMS)在排渣中  
有什么作用? ..... (30)
95. 电炉电磁搅拌有什么作用? ..... (30)
96. 近年我国钢结构和成品钢材结构  
有什么变化? ..... (31)
97. 连铸技术有什么不足? ..... (31)
98. 连铸新技术的发展应用及前沿技术  
的开发有哪些新情况? ..... (31)
- 第四章 方(矩)坯连铸  
结晶器电磁搅拌器**
99. 结晶器搅拌器有什么位置特征? ..... (33)
100. 结晶器搅拌器有什么结构特征?  
..... (33)
101. 结晶器搅拌器有什么磁电结构特征?  
..... (33)
102. 内置式搅拌器有什么优点? ..... (33)
103. 内置式搅拌器存在哪些问题? ..... (33)
104. 什么是双水冷却内置式  
结晶器搅拌器? ..... (34)
105. 外置式搅拌器有哪些优点? ..... (34)
106. 外置式搅拌器有哪些缺点? ..... (34)
107. 两相两极方式哪些企业应用? ..... (34)
108. 如何评价两相两极搅拌器? ..... (34)
109. 双线圈外置式电磁搅拌器  
有什么特点? ..... (35)
110. 实际使用双线圈搅拌器的  
效果如何? ..... (36)
111. 为什么采用安装于结晶器出口和足辊  
之间的外置式电磁搅拌器? ..... (36)
112. 如何描述连铸方(矩)坯结晶器搅拌器  
的主要物理特征? ..... (37)
113. 结晶器内电磁推力是如何产生的?  
..... (37)
114. 在平均时间内的磁力密度值  
如何表示? ..... (38)
115. 结晶器铜管对磁通量分布和衰减  
有什么影响? ..... (38)
116. 结晶器搅拌器铁芯参数的选用  
原则是什么? ..... (38)
117. 搅拌是如何引起结晶器内流场变化的?  
..... (38)
118. 结晶器搅拌器的最佳工作频率与什么  
因素有关? ..... (39)
119. 搅拌速度与频率有什么关系? ..... (39)
120. 搅拌速度对铸坯针孔有什么影响?  
..... (39)
121. 钢水夹杂及其在结晶器内运动  
行为是什么? ..... (40)
122. 搅拌速度与排除夹渣能力有什么关系?  
..... (40)
123. 旋转搅拌力影响夹杂物作向心运动的  
数学模型是怎样的? ..... (41)
124. 夹杂物迁移速度的数学模型是怎样的?  
..... (41)
125. 宏观夹杂是怎样聚合的? ..... (42)
126. 宏观夹杂是怎样排除的? ..... (42)
127. 弯月面附近夹杂物怎样分散? ..... (43)
128. 欧洲国家早期应用 M-EMS 对改善  
铸坯纯净度的成果有哪些? ..... (43)
129. 欧洲国家早期应用 M-EMS 对改善  
铸坯针孔的试验结果如何? ..... (46)
130. 欧洲国家早期应用 M-EMS 对改善  
铸坯表面夹杂的试验结果如何?  
..... (46)
131. 欧洲国家早期应用 M-EMS 试验得出  
夹杂物迁移有哪些相关条件? ..... (46)
132. 怎样看待钢液的离心运动产生的排除  
夹杂的冶金效果? ..... (47)
133. M-EMS 加快传热、加速凝固能使  
组织均匀吗? ..... (47)

134. 加速钢液过热度散失对中心偏析有什么影响? ..... (47)
135. 加速钢液过热度散失对等轴晶率有什么影响? ..... (47)
136. 影响柱状晶的因素及其受控机理是什么? ..... (49)
137. 怎样利用柱状晶形态来检验搅拌强度? ..... (50)
138. 如何利用钢液过热散失的试验来说明电磁搅拌的作用? ..... (50)
139. 影响铸坯元素偏析而与 M-EMS 有关的连铸工艺有哪些? ..... (51)
140. 钢的成分与传热速率有什么关系? ..... (51)
141. 中间罐过热度对柱状晶有什么影响? ..... (51)
142. M-EMS 搅拌强度对柱状晶长度有何影响? ..... (52)
143. 阻止柱状晶生长的条件是什么? ... (52)
144. 中间罐温度变化和电磁搅拌对碳偏析有什么影响? ..... (52)
145. 拉速变化并在电磁搅拌后对碳偏析有什么影响? ..... (52)
146. 理论研究和 M-EMS 实际应用效果表现在哪些方面? ..... (52)
147. M-EMS 使用不当时,对表面纵裂纹有什么负面影响? ..... (53)
148. M-EMS 使用不当时,对皮下含碳损失有什么负面影响? ..... (54)
149. M-EMS 使用不当时,对中心线夹杂有什么负面影响? ..... (54)
150. M-EMS 使用不当时,对提高拉速有什么影响? ..... (54)
151. 国内连铸机某些规格内置式 M-EMS 的技术参数有哪些? ..... (55)
152. 国内连铸机某些规格双水冷却内置式 M-EMS 的技术参数有哪些? ... (55)
153. 国内连铸机某些规格外置式 M-EMS 的技术参数有哪些? ..... (55)
154. 国内连铸机某些规格空心铜管外置式 M-EMS 的技术参数有哪些? ... (56)
- 第五章 大、小方坯凝固末端电磁搅拌器**
155. 凝固阶段如何区分? ..... (57)
156. 一次冷却区冷却的数学模型是什么? ..... (57)
157. 二次冷却区冷却的数学模型是什么? ..... (58)
158. 三次冷却区的冷却特点是什么? ... (58)
159. 如何用数学方法计算冶金长度? ... (58)
160. 如何选取小方坯连铸机的综合凝固系数? ..... (58)
161. 如何用实验方法来确定冶金长度? ..... (58)
162. 经典理论是如何计算凝固末端电磁搅拌器安装位置的? ..... (59)
163. 液芯固相率计算公式是什么? ..... (59)
164. 固相率与钢液流动性有什么关系? ..... (59)
165. 如何利用凝固率来计算安装位置? ..... (59)
166. 选定 F-EMS 安装位置的实用方法有哪些? ..... (59)
167. 多断面、多钢种、变拉速时如何处理? ..... (59)
168. 多断面、多钢种、变拉速时还有其他处理办法吗? ..... (60)
169. 对末端搅拌的基本要求有哪些? ... (60)
170. 如何选择搅拌时机? ..... (60)
171. 什么时间采取线性搅拌和交替搅拌? ..... (60)
172. 什么时间采取旋转搅拌? ..... (60)
173. 搅拌时间长度取决于什么? ..... (60)
174. 在搅拌条件下钢水的运动速度取决于什么? ..... (60)
175. 末端搅拌时钢水合适的速度是多少? ..... (60)
176. 末端搅拌器的哪些工艺参数

- 应认真选择? ..... (60)
177. 频率的选用原则是什么? ..... (60)
178. 频率和搅拌强度之间有何关系? ... (61)
179. 频率和连铸坯中心磁通密度之间有何关系? ..... (61)
180. 线圈电流和搅拌速度之间有何关系? ..... (61)
181. 合适的搅拌速度对磁场强度有何要求? ..... (61)
182. 搅拌强度和中心疏松有什么关系? ..... (62)
183. 高碳钢、小方坯连铸机 F-EMS 的研究是怎么回事? ..... (62)
184. 高碳钢、小方坯连铸机 F-EMS 的研究对象的情况如何? ..... (62)
185. 高碳钢、小方坯连铸机 F-EMS 研究的目的是什么? ..... (62)
186. 参与上述研究工作的连铸机有什么问题? ..... (62)
187. 试验中,改变铸坯拉速,其冶金长度有什么变化? ..... (62)
188. 试验中,改变浇注过热度,其冶金长度有什么变化? ..... (62)
189. 不同高碳钢钢种的固相、液相线温度差怎样? ..... (63)
190. 上述研究中,第一阶段做了什么试验? ..... (63)
191. 第一阶段 4 次试验使用了哪些工艺参数? ..... (63)
192. 第一阶段 4 次试验的低倍组织结果如何? ..... (63)
193. 第一阶段 4 次试验的碳偏析结果如何? ..... (63)
194. 第二阶段试验是怎样进行的? ..... (64)
195. 第二阶段试验使用了哪些工艺参数? ..... (64)
196. 第二阶段第一次试验横向取样碳偏析结果如何? ..... (64)
197. 第二阶段第一次试验纵向取样碳偏析结果如何? ..... (64)
198. 第二阶段第一次试验低倍缩孔与疏松结果如何? ..... (64)
199. 第二阶段第一次试验低倍等轴晶结果如何? ..... (64)
200. 第二阶段第一次试验低倍 V 状偏析结果如何? ..... (64)
201. 第二阶段第一次试验结果有何结论? ..... (64)
202. 第二阶段第一次试验结果横向偏析有何改善? ..... (64)
203. 第二阶段第一次试验结果纵向偏析有何改善? ..... (64)
204. 第二阶段第一次试验结果低倍效果说明了什么问题? ..... (64)
205. 第二阶段第一次试验结果成品材金相效果有何改善? ..... (65)
206. 验证性试验使用了什么工艺参数? ..... (65)
207. 验证性试验低倍结果如何? ..... (65)
208. 验证性试验碳偏析结果如何? ..... (65)
209. 如何看待验证性试验结果? ..... (65)
210. 前两个阶段试验得出什么结论? ... (65)
211. 工业运行试验的条件有何改变? ... (65)
212. 工业运行试验的工艺参数如何? ... (65)
213. 工业运行试验的碳偏析结果如何? ..... (65)
214. 工业运行试验时低倍缩孔结果如何? ..... (65)
215. 工业运行试验时成品材力学性能改善如何? ..... (66)
216. 工业运行试验时成品金相组织改善如何? ..... (66)
217. 该试验研究解决了什么问题? ..... (66)
218. 关于安装位置有何新结论? ..... (66)
219. 这项研究对传统理论的搅拌器安装位置有何更改? ..... (66)
220. 小方坯上安装 F-EMS 后,拉速是否可提高? ..... (66)
221. 在液芯很小的搅拌位置,高碳钢铸坯能否出现白亮带? ..... (66)

222. 在连铸机结构受限时如何解决安装位置的矛盾? ..... (66)
223. 和大方坯相比较,小方坯 F-EMS 有哪些特点? ..... (66)
224. 大、小方坯凝固末端形态有何差别? ..... (67)
225. 试验数据表所示液芯长度随拉速如何变化? ..... (67)
226. 通过试验,对安装位置有何新的结论? ..... (67)
227. 通过试验,关于搅拌时间有何新的结论? ..... (67)
228. 小方坯末端搅拌不能进行交替搅拌的原因是什么? ..... (67)
229. 如何控制小方坯末端搅拌的搅拌强度? ..... (68)
230. 为什么要提出磁场对中问题? ..... (68)
231. 通过这次试验研究得出了什么结论? ..... (69)
232. 末端搅拌对铸坯局部裂纹有何影响? ..... (69)
233. 感应涡流加热原理的数学表达式怎样? ..... (69)
234. 磁滞现象加热原理的数学表达式怎样? ..... (69)
235. 与涡流感应加热有关的磁场渗透深度如何表示? ..... (69)
236. 为什么说均热是改善铸坯裂纹的基本方法? ..... (69)
237. F-EMS 对铸坯局部裂纹影响的试验数据有哪些? ..... (69)
238. 怎样看待 F-EMS 抑制铸坯裂纹的效果? ..... (70)
239. 高碳钢、小方坯连铸机 F-EMS 的试验研究给了我们什么启示? ..... (70)
240. 二冷区电磁搅拌在连铸电磁搅拌技术发展中居什么地位? ..... (71)
241. 在连铸机二冷区安装电磁搅拌器有何作用? ..... (71)
242. 我国在电磁搅拌技术开发方面是从二冷区开始的吗? ..... (71)
243. 早期研制的两种二冷区电磁搅拌装置的基本情况怎样? ..... (71)
244. 国内早期应用二冷区电磁搅拌的连铸企业的情况如何(一)? ..... (72)
245. 国内早期应用二冷区电磁搅拌的连铸企业的情况如何(二)? ..... (72)
246. 一种试验用旋转型搅拌器有什么技术特征? ..... (73)
247. 试验用旋转型搅拌器的主要技术参数有哪些? ..... (73)
248. 试验用旋转型搅拌器以什么工作方式运行? ..... (73)
249. 试验用旋转型搅拌器安装在连铸机哪个位置? ..... (73)
250. 试验用旋转型搅拌器采用什么样的冷却方式? ..... (73)
251. 试验用旋转型搅拌器配置了什么电源? ..... (73)
252. 试验用旋转型搅拌器内冷水水质有何要求? ..... (74)
253. 试验用搅拌器外冷却水系统有何要求? ..... (74)
254. 试验用旋转型搅拌器气体充填系统由什么组成? ..... (74)
255. 试验用旋转型搅拌器温度及绝缘的控制系统怎样实现? ..... (74)
256. 这种试验用直线型搅拌器的主要技术特征是什么? ..... (74)
257. 试验用线性搅拌器本体特点和参数有哪些? ..... (74)
258. 试验用线性搅拌器的搅拌方式有什么特点? ..... (74)
259. 试验用线性搅拌器安装在连铸机哪个位置? ..... (74)
260. 线性搅拌器适用的铸坯尺寸是多少? ..... (74)

## 第六章 二冷区电磁搅拌器

261. 试验用线性搅拌器电源如何配置? ..... (74)
262. 旋转型搅拌器性能试验的项目有哪些? ..... (74)
263. 功率消耗与中心空载磁通密度有何关系? ..... (74)
264. 搅拌器的温升试验是什么结果? ..... (74)
265. 冷负荷试验及性能测试是什么结果? ..... (74)
266. 热负荷试验是什么结果? ..... (74)
267. 工业浇铸试验时铸机概况怎样? ..... (74)
268. 工业浇铸试验时搅拌器安装在连铸机什么位置? ..... (75)
269. 试验用连铸机连铸工艺条件怎样? ..... (75)
270. 试验中采用何种取样方法,其试样数量有多少? ..... (75)
271. 搅拌与不搅拌,等轴晶率平均值有何改变? ..... (75)
272. 强、中、弱三种搅拌强度对比,对等轴晶有何影响? ..... (75)
273. 搅拌方式和功率对等轴晶有何影响? ..... (75)
274. 搅拌功率与等轴晶率的关系如何? ..... (76)
275. 搅拌功率与白亮带的关系如何? ..... (76)
276. 过热度与等轴晶率、白亮带的关系如何? ..... (76)
277. 拉坯速度与等轴晶的关系如何? ..... (76)
278. 搅拌对铸坯裂纹有何影响? ..... (76)
279. 搅拌对铸坯中心缩孔有何影响? ..... (76)
280. 搅拌与夹杂物的关系如何? ..... (76)
281. 搅拌后横试样夹杂物分布状况怎样? ..... (77)
282. 搅拌后纵试样不同深度夹杂物的状况如何? ..... (77)
283. 夹杂物分级含量情况如何? ..... (77)
284. 搅拌对横截面中心偏析有什么影响? ..... (77)
285. 搅拌对纵截面中心线偏析有何影响? ..... (77)
286. 浇铸温度与中心偏析有何关系? ..... (77)
287. 搅拌对白亮带(负偏析)有何影响? ..... (78)
288. 国内在连铸二冷区电磁搅拌还进行了哪些试验? ..... (78)
289. 旋转搅拌和直线搅拌对比有何差异? ..... (78)
290. 在离终端 400mm 处,电磁搅拌对坯尾补缩效果试验的结果如何? ..... (78)
291. 在离终端 1500mm 处,电磁搅拌对坯尾补缩效果试验的结果如何? ..... (78)
292. 电磁搅拌对坯尾补缩试验的结论是什么? ..... (78)
293. 通过工业浇铸试验,说明电磁搅拌与拉速有何关系? ..... (78)
294. 旋转型搅拌器(及直线型搅拌器)研制及试验的结论是什么? ..... (78)
295. 早期欧洲采用二冷区电磁搅拌器有何典型例子? ..... (79)
296. 汉堡钢厂试验时连铸机状况如何? ..... (79)
297. 汉堡钢厂连铸机电磁搅拌试验使用了什么技术参数? ..... (79)
298. 汉堡钢厂试验时搅拌器安装位置在哪里? ..... (79)
299. 汉堡钢厂试验时旋转磁场搅拌器的试验条件和结果怎样? ..... (79)
300. 汉堡钢厂试验时直线型磁场搅拌器的试验条件和结果如何? ..... (80)
301. 汉堡钢厂试验的结论是什么? ..... (80)
302. 德国大方坯及小方坯连铸二冷段电磁搅拌的主要技术参数如何? ..... (80)
303. 安装位置在  $D_s = 0.5$  时的试验结果如何? ..... (80)

304. 将搅拌器安装于结晶器下口后的结果如何? ..... (81)
305. 以上试验得出什么结论? ..... (81)
- ## 第七章 板坯连铸电磁搅拌器
306. 板坯连铸电磁搅拌的基本形式有哪些? ..... (82)
307. 板坯连铸结晶器电磁搅拌器(M-EMS)有何特点? ..... (82)
308. 水平旋转式 M-EMS 的结构和作用有哪些? ..... (82)
309. 上、下直线型 M-EMS 的结构和作用有哪些? ..... (82)
310. 板坯连铸二冷区电磁搅拌器 S-MES 有哪些形式? ..... (83)
311. 行波磁场搅拌器的结构是怎样的? ..... (83)
312. 辊式行波磁场搅拌器的结构是怎样的? ..... (83)
313. 恒定磁场板坯 S-EMS 的结构是怎样的? ..... (84)
314. 什么是板坯电磁制动(EMBr)? ..... (84)
315. 板坯电磁搅拌有何冶金效果? ..... (85)
316. 各段搅拌器冶金效果有何异同? ..... (85)
317. 结晶器搅拌对板坯质量有何影响? ..... (85)
318. 结晶器搅拌改善板坯表面质量的效果如何? ..... (85)
319. 结晶器搅拌减少板坯夹杂物的效果如何? ..... (86)
320. 二冷区搅拌对板坯质量有何影响? ..... (86)
321. 二冷区搅拌扩大板坯等轴晶区的效果如何? ..... (86)
322. 二冷区搅拌改善板坯中心偏析的效果如何? ..... (86)
323. 二冷区搅拌减少铸坯中心疏松和  
内裂纹效果如何? ..... (86)
324. 板坯连铸 S-EMS 位置如何确定? ..... (87)
325. 板坯连铸 S-EMS 搅拌运行方式有哪些? ..... (87)
326. 影响板坯等轴晶区宽度的因素有哪些? ..... (87)
327. 影响板坯中心偏析的因素有哪些? ..... (87)
328. 武钢二炼钢厂板坯连铸搅拌器是何机型? ..... (88)
329. DKS 的搅拌效果如何? ..... (88)
330. ORC-1600 的搅拌效果如何? ..... (88)
331. 宝钢板坯连铸机搅拌器是什么参数? ..... (88)
332. 板坯连铸结晶器电磁制动(EMBr)的结构特征是什么? ..... (88)
333. 一个在运行的 EMBr 电磁制动线圈的有关数据有哪些? ..... (89)
334. 与 EMBr 配套的整流器有哪些额定参数? ..... (89)
335. 对 EMBr 的线圈冷却水有何要求? ..... (89)
336. EMBr 机械操作部分的结构特点是什么? ..... (89)
337. 国外早期开发 EMBr 的基本情况如何? ..... (89)
338. 板坯浇注时钢液流入铸坯中会出现什么问题? ..... (89)
339. 电磁制动起什么作用? ..... (90)
340. 日本水岛厂 5 号连铸机试验时有哪些主要参数? ..... (90)
341. 有电磁制动后结晶器内凝壳的形状有何变化? ..... (91)
342. 有电磁制动后流股冲击深度有何变化? ..... (91)
343. 铸坯内弧面铝酸盐夹杂分布受到怎样的影响? ..... (91)

## 第八章 电磁搅拌器专用 的变频电源及控制系统

344. 电磁搅拌器用变频电源及控制系统  
包括哪些部分? ..... (92)
345. 为什么搅拌器的电源是低频电源?  
..... (92)
346. 如何为电磁搅拌器选配变频电源?  
..... (92)
347. 异步电动机变频调速是怎样发展  
起来的? ..... (92)
348. 搅拌器电源与调速变频电源  
有何差别? ..... (93)
349. 构成变频器的基本框图是什么? ... (93)
350. 变频器的主回路是怎样构成的? ... (93)
351. 变频器的整流器和滤波回路  
使用什么器件? ..... (93)
352. 逆变器的作用是什么? ..... (93)
353. 变频器的控制回路是怎样构成的?  
..... (94)
354. 运算回路的作用是什么? ..... (94)
355. 电压/电流检测回路的检测方式  
是怎样的? ..... (94)
356. 保护回路的作用是什么? ..... (94)
357. 驱动回路的基本形式是什么? ..... (94)
358. 模拟控制与数字控制各有什么特点?  
..... (95)
359. PWM 脉宽调制的调制方式有哪些?  
..... (95)
360. 什么是同步调制? ..... (95)
361. 什么是异步调制? ..... (95)
362. 什么是分段同步调制? ..... (95)
363. 变频器的控制方式指的是什么? ... (95)
364. PWM 脉宽调制过程是怎样的? ..... (96)
365. 为什么要对 PWM 模式进行优化? ... (96)
366. 什么是正弦波 PWM (SPWM)? ..... (96)
367. 什么是全电压准最优 (HVS0) PWM  
调制? ..... (97)
368. 什么是跟踪型 PWM 变频? ..... (98)
369. 电流跟踪型控制方式怎样实现? ... (98)
370. 电压跟踪型控制怎样实现? ..... (99)
371. PWM 脉冲的生成方法有哪些? ..... (99)
372. 模拟电路生成法有何优缺点? ..... (99)
373. HEF4752 专用芯片有何特点? ..... (100)
374. SLE4520 专用芯片有何特点? ..... (100)
375. SLE4520 的管脚功能是什么? ..... (100)
376. SLE4520 内部结构框图及工作原理  
是怎样的? ..... (101)
377. SLE4520 如何应用? ..... (103)
378. SA866 专用芯片有何新功能? ..... (104)
379. SA866 工作模式 S2 怎样实现? ... (104)
380. SA866 参数如何设置? ..... (104)
381. SPWM 还有哪些其他生成方法? ... (104)
382. 变频电源使用了一些什么样的电力  
电子器件? ..... (105)
383. IGBT 模块有哪些主要特性? ..... (105)
384. 续流二极管 (Free Wheel Diode—  
FWD) 有何作用? ..... (107)
385. 为什么要重视 IGBT 的开关损耗?  
..... (107)
386. IPM 模块的特点是什么? ..... (107)
387. 主回路有一些什么元件? ..... (108)
388. 怎样选择整流二极管? ..... (108)
389. 怎样选择 IGBT 模块? ..... (108)
390. 为什么电磁搅拌器变频电源输出容量  
远大于输入容量? ..... (108)
391. 要提高电磁搅拌器变频电源的功率因数,  
能否在变频器前并接电容器? ... (109)
392. 要提高变频电源的功率因数常用  
什么器件? ..... (109)
393. 在搅拌线圈侧是否可接电容器以  
改善功率因数? ..... (109)
394. 搅拌器系统的控制功能是  
怎么回事? ..... (109)
395. 工业控制计算机有何任务? ..... (109)
396. 工业控制计算机受控方式  
是什么? ..... (109)
397. 工业控制计算机实时为变频电源提供  
什么工作指令? ..... (109)



398. 系统具有怎样的多极分布式体系结构? ..... (109)
399. 流与流之间具有独立无关性的重要性是什么? ..... (109)
400. 工业控制计算机方式的硬件组成框图是怎样的? ..... (110)
401. 系统软件有何特点? ..... (110)
402. 显示主菜单系统界面图例是怎样的? ..... (111)
403. 为什么程序中间要设置密码? ..... (111)
404. 子窗口显示一些什么信息? ..... (111)
405. 还有些什么其他硬件(软件)控制方式? ..... (111)
406. VVVF 变频器有哪些特点? ..... (112)
407. 变频电源电压和电流的检测应使用哪种仪表? ..... (116)
408. 变频电源的使用环境要求如何? ..... (117)
409. 变频电源的冷却风量应如何计算? ..... (117)
410. 安装电磁搅拌电源时,配线应该注意什么? ..... (117)
411. 如何避免电磁搅拌电源,特别是搅拌器的接线端子经常发热烧坏? ..... (117)
412. 电磁搅拌电源的检查应注意哪些事项? ..... (117)
413. 变频电源的绝缘实验如何进行? ..... (117)
414. 变频电源的易损备件有哪些? ..... (118)
415. 变频电源使用强制换气时,应注意哪些问题? ..... (118)
416. 变频电源定期检查的项目是哪些? ..... (118)
417. 电磁干扰的基本途径有哪些? ..... (118)
418. 共地串扰是怎样产生的? ..... (118)
419. 电磁感应遵循什么定律? ..... (118)
420. 产生电磁辐射的条件是什么? ..... (118)
421. 电磁搅拌系统的电磁防护应注意什么? ..... (119)
422. 人体受辐射照射的建议极限是什么? ..... (119)

## 第九章 电磁搅拌器的基本原理及工程设计原则

423. 有关电磁场基本理论的著作有哪些? ..... (121)
424. 磁路由什么组成? ..... (121)
425. 与磁路有关的几个物理量之间有何关系? ..... (121)
426. 连铸圆坯旋转电磁搅拌的数值计算的基本思路是怎样的? ..... (122)
427. 在选用数学模型时要考虑什么假设条件? ..... (123)
428. 圆柱体和旋转对称的运动方程怎样表示? ..... (123)
429. 湍流模型如何表示? ..... (123)
430. 电磁力如何表示? ..... (123)
431. 三维流场的图例是怎样的? ..... (124)
432. 影响三维流场的参数有哪些? ..... (125)
433. 旋转搅拌时,切向力如何计算? ..... (126)
434. 钢水中电磁搅拌产生的磁通量(横断面)分布形态如何? ..... (127)
435. 钢水中电磁搅拌产生的磁通量(纵断面)分布形态如何? ..... (127)
436. 在设计结晶器搅拌器时如何考虑铜板(管)的影响? ..... (127)
437. 方形和矩形结晶器引起的磁通量随频率的衰减有何规律? ..... (128)
438. 电磁搅拌操作的最佳频率与什么有关? ..... (128)
439. 电源频率和搅拌工作特性有何关系? ..... (129)
440. 磁场穿透深度如何计算? ..... (129)
441. 搅拌速度怎样计算? ..... (129)
442. 一个方坯结晶器搅拌器在工程设计时应有哪些已知条件? ..... (130)
443. 设计时要考虑哪些技术要求? ..... (130)
444. 如何选取搅拌器的基本参数? ..... (130)