

连铸保护渣 理论与实践

Theories and Application of
Continuous Casting Mold Fluxes

朱立光 王杏娟 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

连铸保护渣理论与实践

朱立光 王杏娟 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2015

内 容 提 要

本书内容主要涉及保护渣的性能、行为、设计、生产、应用等五个方面,结构编排上分为理化性能篇;冶金行为篇;成分、性能设计篇;生产技术及应用篇。理化性能篇中对保护渣熔化特性等十个重要的理化性能的基本概念、冶金作用、影响因素、影响规律及调控技术进行了详细阐述;冶金行为篇中对保护渣的润滑行为等六个方面的冶金行为的机理、规律及对连铸顺行和铸坯质量的影响进行了数值分析;成分、性能设计篇中对保护渣设计的理论基础、设计原则及不同工艺条件和钢种、断面对保护渣性能要求,以及与之相适应的性能设计思路和具体技术路线进行了重点论述;生产技术及应用篇中主要阐述了保护渣原料、生产制造工艺和产品性能检测,并且以应用实例的形式对保护渣的设计、选择和应用进行了详尽的分析。

本书读者对象为钢铁企业工程技术人员、一线操作的岗位工人,从事保护渣研制、生产、销售人员,以及高等院校相关专业师生。

图书在版编目(CIP)数据

连铸保护渣理论与实践/朱立光,王杏娟著. —北京:
冶金工业出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5024-7036-4

I. ①连… II. ①朱… ②王… III. ①连铸保护渣—
研究 IV. ①TF111. 17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 237090 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp. com. cn

责任编辑 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7036-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015 年 10 月第 1 版, 2015 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 22.25 印张; 538 千字; 340 页

79.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

结晶器保护渣是连铸过程中非常重要的功能材料，对连铸工序的顺利进行和铸坯表面质量的提高起着至关重要的作用。自 1963 年采用浸入式水口保护渣浇铸技术至今，连铸保护渣技术已由当初的初步开发和探索应用阶段发展到今天的理论进一步成熟和制造技术飞跃发展阶段。结晶器保护渣在连铸工艺中的重要地位得到各国连铸工作者的高度重视，已经成为一项专门技术。

从我国目前连铸保护渣的研究水平和生产现场情况来看，虽然已取得了长足发展，但并未满足连铸生产日益发展的要求，和先进国家相比，还存在一定的差距。生产现场要求根据不同钢种、铸坯断面及拉速设计各种专用保护渣，使保护渣性能指标与连铸工艺相匹配，从而更好地服务于生产实际。

朱立光教授自 1993 年师从我国著名保护渣专家金山同先生以来，一直从事连铸保护渣领域相关技术与开发工作，在连铸保护渣理论、冶金行为及性能优化、成分设计等方面取得了一系列重要成果。以此为基础，建立了不同连铸工艺、不同钢种、不同断面下保护渣的评价体系，开发了系列连铸保护渣设计与生产技术，解决了唐钢、邢钢、邯钢、天钢、国丰、津西及建龙等诸多钢铁企业的铸坯表面质量问题。

鉴于此，我们按照“瞄准学术前沿，服务工程实践”的科技创新工作理念，整理归纳多年来研究成果，广泛查阅了国内外大量的相关文献，结合自身现场应用实践经验，编写了《连铸保护渣理论与实践》一书。全书力求体例新颖，内容系统完整，从基础理论到生产实际，涵盖了保护渣性能、行为、设计、生产及应用多个方面，便于读者参阅和查询。全书分为四篇，共计 21 章，由华北理工大学朱立光、王杏娟著，全书由

朱立光统稿。本书的初稿得到华北理工大学朱新华、孙立根及韩毅华等多位老师的审阅，并提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

本书汇集了作者在连铸保护渣领域长时间的研究成果和实践经验，专业性强、涉及面宽，可作为钢铁冶金专业教学及科研用书，也可作为从事连铸生产、设计工程技术人员的参考用书。希望通过此书，能够为钢铁冶金行业连铸技术的进步贡献一点力量。

由于理论水平和实践经验有限，书中不足之处，诚请读者指正。

作 者

2015年6月

目 录

第一篇 连铸保护渣理化性能篇

1 熔化特性	3
1.1 熔化温度	3
1.1.1 保护渣成分对熔化温度的影响	4
1.1.2 Li_2O 对熔化温度的影响	4
1.2 熔化速度	5
1.2.1 炭黑和石墨对保护渣熔化速度的影响	6
1.2.2 单独引入碳化硅对保护渣熔化速度的影响	6
1.2.3 炭黑、石墨和碳化硅两两复合加入对保护渣熔化速度的影响	7
1.2.4 碳酸盐对保护渣熔化速度的影响	8
1.2.5 保护渣的熔化温度对熔化速度的影响	8
1.2.6 结晶器内的条件对熔化速度的影响	8
1.3 分熔倾向	9
1.3.1 分熔和分熔度	9
1.3.2 分熔度的数学模型	9
1.3.3 分熔度的测试方法	10
1.3.4 不同基料的分熔特性及优化选配	11
1.3.5 熔化均匀性	12
1.4 熔融结构	12
1.4.1 熔融结构模型	12
1.4.2 熔化过程	13
参考文献	14
2 凝固特性	16
2.1 凝固温度	16
2.2 组分对保护渣凝固温度的影响	16
2.2.1 碱度对保护渣凝固温度的影响	17
2.2.2 Na_2O 含量对保护渣凝固温度的影响	17
2.2.3 CaF_2 含量对保护渣凝固温度的影响	17
2.2.4 MnO 含量对保护渣凝固温度的影响	18
2.3 渣膜状态	18

2.3.1 结晶器内渣膜结构	18
2.3.2 渣膜厚度	19
参考文献	21
3 黏度特性	23
3.1 黏度基本概念	23
3.2 保护渣黏度的测定	24
3.3 保护渣黏度的影响因素	25
3.3.1 碱度对保护渣黏度的影响	25
3.3.2 主要组分对保护渣黏度的影响	26
3.3.3 温度对保护渣黏度的影响	28
3.4 连铸保护渣黏度特性的设计原则	28
3.5 转折温度	29
3.6 流变性	31
参考文献	32
4 结晶特性	33
4.1 结晶温度	33
4.2 析晶率	33
4.3 保护渣熔体结晶过程	34
4.3.1 均匀核化	34
4.3.2 非均匀核化	36
4.4 保护渣结晶性能的影响因素	37
4.4.1 碱度对保护渣结晶性能的影响	37
4.4.2 CaF_2 对保护渣结晶性能的影响	38
4.4.3 MgO 、 Na_2O 等对保护渣结晶性能的影响	39
4.4.4 Al_2O_3 对保护渣结晶性能的影响	40
4.4.5 Li_2O 对保护渣结晶性能的影响	40
4.4.6 MnO 对保护渣结晶性能的影响	40
4.4.7 B_2O_3 、 TiO_2 、 ZrO_2 对保护渣结晶性能的影响	41
4.4.8 其他相关研究综述	41
4.5 保护渣结晶的热力学条件	42
4.6 保护渣结晶的动力学条件	42
4.7 保护渣结晶的化学条件	43
4.8 研究保护渣结晶性能的主要方法	44
4.8.1 差热分析法	45
4.8.2 黏度-温度曲线法	45
4.8.3 热丝法	46
参考文献	48

5 矿物特性	49
5.1 原渣的矿物组成	49
5.2 原渣的矿物组成对保护渣性能的影响	50
5.3 渣膜的矿物组成	50
5.4 渣膜矿相的微观形貌	51
5.5 渣膜的矿相结构对润滑和传热的影响	54
5.6 保护渣结晶矿相影响因素的分析	55
5.7 表面粗糙度	56
参考文献	57
6 传热特性	59
6.1 传热环节	59
6.2 结晶器保护渣传热机制	59
6.3 结晶器保护渣渣膜结构对传热的影响	64
6.3.1 保护渣结晶性能及厚度对传热的影响	64
6.3.2 保护渣渣膜表面粗糙度对传热的影响	66
6.4 热流密度	66
6.5 保护渣渣膜传热的测试方法	67
参考文献	69
7 界面特性	70
7.1 表面张力	70
7.2 表面张力的影响因素	71
7.3 界面张力	71
7.4 界面张力的影响因素	72
参考文献	72
8 导电特性	73
8.1 导电机理	73
8.1.1 熔渣的离子结构模型	73
8.1.2 熔渣中离子存在的实验根据	74
8.1.3 熔渣中的离子种类	74
8.2 保护渣导电性的影响因素	75
8.3 熔渣电导率的测量方法	76
参考文献	77
9 吸附特性	78
9.1 影响保护渣吸附夹杂物的因素	78
9.2 吸附夹杂物后保护渣稳定性的变化	80

9.3 保护渣吸附夹杂物能力与各理化性能的关系	81
参考文献	82
10 保温特性	83
10.1 保护渣保温性能的影响因素	83
10.2 提高保护渣保温性能的作用	85
10.3 保护渣保温性能的评价方法	85
参考文献	86
 第二篇 连铸保护渣冶金行为篇 	
11 润滑行为	89
11.1 连铸保护渣润滑模型	89
11.1.1 传热方程	89
11.1.2 气隙宽度计算	91
11.1.3 渣膜温度场计算	91
11.1.4 渣膜的液、固态及厚度计算	92
11.1.5 摩擦力计算	92
11.2 计算结果及讨论	92
11.2.1 熔化温度	93
11.2.2 黏度	93
11.2.3 浇铸温度	94
11.2.4 振幅	94
11.2.5 频率	94
11.2.6 拉坯速度	95
11.2.7 结晶器的倒锥度	95
11.2.8 波形偏移率	96
参考文献	96
12 流动行为	98
12.1 气隙处液渣的流动行为	98
12.1.1 数学模型	99
12.1.2 计算结果	100
12.1.3 影响结晶器与铸坯间气隙内液渣流动速度的因素	101
12.2 弯月面处保护渣的流动行为	102
12.2.1 数学模型	102
12.2.2 计算结果	104
参考文献	105

13 碳迁移	107
13.1 碳的分布	107
13.2 保护渣熔融结构的数学模型	110
13.2.1 数学模型的建立	110
13.2.2 计算结果及分析	111
13.3 增碳机理	114
13.3.1 粉渣与钢液直接接触增碳	114
13.3.2 保护渣的附着作用使铸坯表面渗碳	114
13.3.3 熔渣层中富碳层的渗碳	115
13.4 富碳层向钢液增碳的数学模型	115
13.5 抑制超低碳钢增碳的主要措施	117
13.5.1 抑制铸坯增碳	117
13.5.2 开发低碳保护渣	117
13.5.3 开发无碳保护渣	118
参考文献	120
14 吸附夹杂物及保护渣性能变化	121
14.1 Al_2O_3 含量对保护渣的影响	121
14.1.1 Al_2O_3 含量对保护渣结晶性能的影响	121
14.1.2 Al_2O_3 含量对保护渣表面张力的影响	123
14.1.3 Al_2O_3 含量对保护渣熔点的影响	123
14.1.4 Al_2O_3 含量对保护渣黏度的影响	123
14.2 保护渣吸附 Al_2O_3 数学模型的建立	124
14.2.1 数学模型的建立	124
14.2.2 模型分析及讨论	125
14.3 MnO 含量对保护渣的影响	127
14.3.1 MnO 含量对保护渣黏度的影响	127
14.3.2 MnO 含量对保护渣结晶动力学特性的影响	127
14.3.3 MnO 含量对夹杂物的影响	128
14.4 连铸过程结晶器内液态保护渣中 MnO 含量变化模型	128
14.4.1 MnO 含量变化模型	128
14.4.2 模型的分析与讨论	129
参考文献	130
15 渣道动态压力	131
15.1 计算模型	131
15.2 计算结果及分析	133
15.2.1 线性弯月面和 Bikerman 弯月面保护渣道压力的比较	133
15.2.2 保护渣黏度对保护渣渣道压力的影响	134

15.2.3	拉坯速度对保护渣渣道压力的影响	135
15.2.4	负滑脱时间对保护渣渣道压力的影响	135
15.2.5	保护渣渣道出口宽度对压力的影响	136
参考文献		136
16	传热行为	138
16.1	结晶器内坯壳的传热特征	138
16.2	保护渣-结晶器传热模型的建立	139
16.2.1	数学模型的建立	139
16.2.2	模型的计算条件	141
16.2.3	工艺参数及保护渣物性参数选择	141
16.3	计算结果及分析	142
16.3.1	结晶器实测热流分布及温度验证	142
16.3.2	气隙保护渣计算结果	142
16.3.3	表层保护渣计算结果	144
参考文献		144
 第三篇 连铸保护渣成分、性能设计篇 		
17	成分设计的理论基础	149
17.1	相图基础	149
17.1.1	二元相图	149
17.1.2	三元相图	151
17.2	离子模型	155
17.2.1	熔渣离子结构的依据	155
17.2.2	熔渣中离子的种类及相互作用	156
17.2.3	熔渣的离子结构模型	157
17.3	网络结构	158
参考文献		159
18	成分设计的基本思路	161
18.1	保护渣成分设计	161
18.1.1	化学成分对保护渣理化性能的影响	161
18.1.2	化学成分最佳含量确定的实验	168
18.2	渣系的选择及化学组成的设计	170
18.2.1	基本渣系选择的原则	170
18.2.2	基本渣系的设计	171
18.2.3	保护渣的类型	171
18.2.4	保护渣基料的选择	172

参考文献	173
19 性能设计	174
19.1 连铸保护渣性能设计的基本原则	174
19.1.1 不同钢种连铸保护渣设计原则	174
19.1.2 不同工艺参数的连铸保护渣设计原则	175
19.2 基于神经网络的保护渣性能设计	179
19.2.1 人工神经网络模型	180
19.2.2 保护渣性能预测神经网络的建立	181
19.2.3 网络的学习、检验及分析	183
19.3 板坯连铸保护渣性能设计	186
19.3.1 板坯连铸的特点	186
19.3.2 板坯保护渣性能分析	186
19.3.3 板坯保护渣设计应用	189
19.4 方坯连铸保护渣性能设计	191
19.4.1 方坯保护渣性能分析	192
19.4.2 方坯保护渣设计应用	193
19.5 薄板坯连铸保护渣性能设计	195
19.5.1 薄板坯连铸的特点及对保护渣的要求	195
19.5.2 薄板坯保护渣性能分析	196
19.5.3 薄板坯保护渣设计应用	198
19.6 异型坯连铸保护渣性能设计	199
19.6.1 异型坯连铸的凝固特点	199
19.6.2 异型坯保护渣性能分析	200
19.6.3 异型坯保护渣设计应用	201
19.7 圆坯连铸保护渣性能设计	201
19.7.1 圆坯连铸的凝固特点及缺陷	202
19.7.2 圆坯保护渣性能分析	202
19.7.3 圆坯保护渣设计应用	206
19.8 低碳钢连铸保护渣性能设计	206
19.8.1 低碳钢连铸结晶器保护渣性能分析	207
19.8.2 低碳钢保护渣设计应用	209
19.9 包晶钢（中碳钢）连铸保护渣性能设计	209
19.9.1 包晶钢的凝固特点及缺陷产生	210
19.9.2 包晶钢连铸结晶器保护渣性能分析	210
19.9.3 包晶钢保护渣设计应用	213
19.10 高碳钢连铸保护渣性能设计	213
19.10.1 高碳钢的凝固特点及缺陷产生	214
19.10.2 高碳钢连铸结晶器保护渣性能分析	214

19.10.3 高碳钢保护渣设计应用	216
19.11 不锈钢连铸保护渣	217
19.11.1 不锈钢的凝固特点及缺陷产生	217
19.11.2 不锈钢连铸结晶器保护渣性能分析	217
19.11.3 不锈钢保护渣设计应用	219
19.12 超低碳钢连铸保护渣性能设计	219
19.12.1 连铸过程中超低碳钢的增碳机理	219
19.12.2 超低碳钢连铸结晶器保护渣性能分析	220
19.12.3 抑制超低碳钢增碳的主要技术方向	220
19.12.4 超低碳钢保护渣设计应用	222
19.13 稀土处理钢连铸保护渣性能设计	222
19.13.1 稀土处理钢在连铸过程中遇到的问题	222
19.13.2 稀土钢保护渣的性能要求	223
19.13.3 稀土钢保护渣设计应用	224
19.14 耐候钢连铸保护渣性能设计	224
19.14.1 耐候钢在连铸过程中容易出现的问题及原因	225
19.14.2 耐候钢连铸保护渣性能分析	225
19.14.3 耐候钢连铸保护渣设计应用	226
19.15 硅钢连铸保护渣性能设计	227
19.15.1 设计硅钢保护渣时应重点考虑的问题	227
19.15.2 硅钢连铸过程碳对硅钢质量的影响	227
19.15.3 硅钢在连铸过程中增碳机理	227
19.15.4 设计硅钢保护渣时碳含量的要求	228
19.15.5 硅钢保护渣性能设计应用	229
19.16 高铝钢连铸保护渣性能设计	229
19.16.1 连铸保护渣中 Al_2O_3 的来源	230
19.16.2 钢中加铝量对保护渣成分和性能的影响	230
19.16.3 高铝钢连铸结晶器保护渣性能选择	231
19.16.4 高铝钢保护渣性能设计应用	232
19.17 弹簧钢连铸保护渣性能设计	233
19.17.1 弹簧钢的缺陷	233
19.17.2 弹簧钢连铸结晶器保护渣性能分析	233
19.17.3 选择保护渣的考虑因素	235
19.17.4 弹簧钢保护渣性能设计应用	235
19.18 易切削钢连铸保护渣性能设计	236
19.18.1 含硫易切削钢连铸时易出现的问题	236
19.18.2 含硫易切削钢的特点	236
19.18.3 含硫易切削钢连铸保护渣性能设计要求	237
19.18.4 易切削钢连铸保护渣性能设计应用	237

19.19 无氟保护渣性能设计	238
19.19.1 氟对保护渣的作用	238
19.19.2 氟的危害	238
19.19.3 无氟保护渣的研制	239
19.19.4 其他组分的选择	240
19.19.5 无氟保护渣进一步研究	241
参考文献	242

第四篇 连铸保护渣生产技术及应用篇

20 连铸保护渣生产及检测技术	247
20.1 连铸保护渣的原料	247
20.1.1 保护渣常用原材料	247
20.1.2 保护渣原材料选择依据	247
20.1.3 保护渣用原材料的主要组成及其性能	247
20.1.4 人工合成保护渣基料	249
20.2 预熔型保护渣的生产	250
20.2.1 预熔型保护渣的特点及加工要求	250
20.2.2 预熔型保护渣配方	250
20.2.3 工艺流程及参数控制	252
20.2.4 基料的熔化	258
20.2.5 造粒与干燥	258
20.2.6 造粒用添加剂	259
20.3 保护渣的性能检测	259
20.3.1 美国连铸保护渣理化性能的测试方法及标准	260
20.3.2 国内对保护渣性能测试的研究	262
参考文献	275
21 连铸保护渣应用实例	276
21.1 板坯连铸保护渣实例	276
21.1.1 板坯保护渣性能设计与应用实例	276
21.1.2 板坯 IF 钢保护渣性能设计与应用实例	277
21.1.3 新钢板坯 Q345 保护渣性能设计与应用实例	278
21.1.4 安阳钢铁板坯 Q235B 保护渣性能设计与应用实例	279
21.1.5 梅钢板坯 H-Q235B 保护渣性能设计与应用实例	281
21.1.6 低碳钢板坯无氟保护渣性能设计与应用实例	282
21.1.7 板坯 45 号钢保护渣性能设计与应用实例	284
21.1.8 超低碳不锈钢连铸保护渣性能设计与应用实例	285
21.1.9 稀土处理钢连铸保护渣性能设计与应用实例	286

21.2 薄板坯连铸保护渣实例	288
21.2.1 薄板坯保护渣性能设计与应用实例	288
21.2.2 TG195NS 采暖散热器片保护渣性能设计与应用实例	289
21.2.3 SPA-H 耐候钢保护渣性能设计与应用实例	290
21.2.4 Q345B 保护渣性能设计与应用实例	292
21.2.5 SPHC 保护渣性能设计与应用实例	293
21.2.6 薄板坯 SS400 保护渣性能设计与应用实例	294
21.3 方坯连铸保护渣实例	296
21.3.1 易切削钢连铸保护渣性能设计与应用实例	296
21.3.2 1Cr13 不锈钢连铸保护渣性能设计与应用实例	297
21.3.3 攀钢 HRB400 方坯中低碳钢连铸保护渣性能设计与应用实例	298
21.3.4 高锰油井钢管 Q235B 连铸保护渣性能设计与应用实例	300
21.3.5 321 不锈钢保护渣性能设计与应用实例	301
21.3.6 20MnSi 保护渣性能设计与应用实例	303
21.3.7 2Cr13 不锈钢连铸保护渣性能设计与应用实例	304
21.3.8 方坯保护渣性能设计与应用实例	306
21.3.9 轴承钢连铸保护渣性能设计与应用实例	307
21.3.10 60Si2Mn 连铸保护渣性能设计与应用实例	308
21.3.11 Y15L 高硫易切钢连铸保护渣性能设计与应用实例	309
21.3.12 锰钢连铸保护渣性能设计与应用实例	311
21.4 圆坯连铸保护渣实例	313
21.4.1 PD3 保护渣性能设计与应用实例	313
21.4.2 包晶钢 12Cr1MoVG 连铸保护渣性能设计与应用实例	315
21.4.3 中碳锰钢 34Mn6 连铸保护渣性能设计与应用实例	316
21.5 异型坯连铸保护渣实例	317
21.5.1 耐候钢保护渣性能设计与应用实例	317
21.5.2 H 型钢连铸保护渣性能设计与应用实例	319
21.5.3 硅钢连铸保护渣性能设计与应用实例	320
参考文献	322
附录 1 中华人民共和国保护渣冶金行业标准	325
附录 1.1 连铸保护渣黏度试验方法 (YB/T 185—2001)	325
附录 1.2 连铸保护渣熔化温度试验方法 (YB/T 186—2001)	328
附录 1.3 连铸保护渣堆积密度试验方法 (YB/T 187—2001)	330
附录 1.4 连铸保护渣粒度分布试验方法 (YB/T 188—2001)	332
附录 1.5 连铸保护渣水分含量 (110℃) 测定试验方法 (YB/T 189—2001)	334
附录 2 保护渣专用词汇中英对照	336

第一篇

连铸保护渣

LIANZHU BAOHUZHA

LIHUA XINGNENG PIAN

理化性能篇

