

LIANZHUPI ZHILIANG KONGZHI

连铸坯 质量控制

■ 蔡开科 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

连铸坯质量控制

蔡开科 著

北 京
冶金工业出版社
2010

内 容 简 介

本书分为三篇。第一篇分 10 章介绍炼钢—精炼—连铸过程钢洁净度控制, 主要包括炼钢过程终点氧含量控制、钢中氧的转换、夹杂物形态控制及去除、浇注过程钢水二次氧化、中间包钢水和结晶器流动控制等。第二篇分 6 章介绍连铸坯凝固过程铸坯表面缺陷控制, 主要包括铸坯表面纵裂纹、横裂纹、网状裂纹、渣类缺陷以及形状缺陷的形成与防止。第三篇分 5 章介绍连铸坯内部缺陷的形成与控制, 主要包括连铸坯凝固结构与控制、连铸坯中心缺陷和内部裂纹的形成与防止、电磁搅拌技术和凝固末端轻压下技术等。本书从理论和实践结合角度阐明连铸坯质量控制原理、连铸坯缺陷形成机理、影响缺陷形成的因素, 进而提出防止铸坯缺陷产生应采取的技术对策。

本书可供钢铁企业从事炼钢连铸的相关工程技术人员参考, 也可供从事炼钢连铸科研的研究人员和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

连铸坯质量控制/蔡开科著. —北京: 冶金工业出版社,
2010. 5

ISBN 978-7-5024-5220-9

I. ①连… II. ①蔡… III. ①连铸坯—质量控制
IV. ①TG249. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 067971 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 尚海霞 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5220-9

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2010 年 5 月第 1 版, 2010 年 5 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 23 印张; 555 千字; 353 页

69.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

经过三十多年的改革发展，我国钢产量已居世界首位，连铸比进入世界产钢国家的领先行列。目前，我国连铸机可以生产小方坯、大方坯、圆坯、异形坯用以轧制各类长材产品，也可以生产厚板坯、中厚板坯、薄板坯用以轧制各类板管带产品，钢的品种、规格和产品质量都在不断满足国民经济各部门建设对钢材多样性和苛刻性的需求。

众所周知，只有提供高质量的连铸坯，才能轧制高品质的产品。连铸坯质量（或缺陷）主要包括：铸坯洁净度（夹杂物数量、类型、尺寸、分布）；铸坯表面质量（表面裂纹、夹渣、气孔等）；铸坯内部质量（内部裂纹、夹杂物、中心疏松、缩孔、中心偏析等）；铸坯形状缺陷（鼓肚、菱形）。

连铸坯质量缺陷会影响连铸机生产率、成材率、最终产品性能以及生产成本。因此，在炼钢生产流程中，生产无缺陷铸坯或不影响终端产品性能可容忍缺陷铸坯是冶金工作者的重要任务。

从生产工艺流程来看，铸坯质量的控制原则是：

(1) 铸坯洁净度取决于从出钢到钢水注入结晶器过程的各工序（炼钢、精炼、浇注、中间包冶金、结晶器冶金）；

(2) 铸坯表面质量取决于钢水在结晶器中的凝固进程（结晶器冷却、振动、浸入式水口、保护渣等）；

(3) 铸坯内部质量取决于带液芯铸坯在二冷区的凝固过程（二冷水强度、铸坯支撑系统、弯曲、矫直等）。

从冶金传输和凝固理论来看，铸坯质量的控制原则是：

(1) 铸坯的洁净度取决于传递过程中钢水流动现象（单元操作、搅拌等）；

(2) 铸坯裂纹取决于沿液相穴长度固液界面把液体转变为固体的热量释放、传递、凝固、冷却、相变、质点析出、应力应变等；

(3) 铸坯内部缺陷取决于带液芯的铸坯沿液相穴热量释放、凝固结构、溶质再分配、应力应变等。

随连铸技术发展，国内外冶金工作者在开发和应用连铸技术方面做了大量研究工作，生产高品质铸坯的连铸机设备和连铸工艺技术已在生产上广泛应用，并取得了良好效果。

本书分为三篇。第一篇为连铸坯洁净度控制（共10章），第二篇为连铸坯表面缺陷控制（共6章），第三篇为连铸坯内部缺陷控制（共5章）。作者力图从理论和实践结合的角度来阐明连铸坯质量控制原理、连铸坯缺陷形成机理、影响缺陷形成的因素以及防止铸坯缺陷产生应采取的技术对策。作者希望本书对从事炼钢连铸生产、科研、设计和教学人员等有所裨益。

本书内容除引用近年来国内外发表的有关连铸坯质量文献资料外，主要内容是作者多年来所指导的研究生在钢厂和实验室针对连铸坯质量控制进行的试验研究的工作总结。这些研究成果在加深对连铸过程的认知、为工艺和设备的改进提供依据和指导、提高连铸坯质量等方面发挥了积极作用。

与作者合作共同完成连铸坯质量研究课题的硕士、博士研究生有：邵璐、陈伟强、赵克文、李建新、陈素琼、胡勤东、李冀英、万晓光、杨素波、朱立新、张立峰、刘中柱、吴巍、方东、张彩军、艾立群、杨吉春、樊晨、郭艳永、魏军、田志红、严国安、李桂军、袁伟霞、韩志强、杨阿娜、赵国燕、柳向椿、赵长亮、倪有金、张琳、徐涛、秦哲、孙彦辉、韩传基等。作者对他们在学习期间的积极进取、勤奋努力、刻苦钻研、团结合作、有所创新的精神表示赞赏和钦佩。同时，对在工厂进行试验工作时厂校合作的钢厂（宝钢、武钢、攀钢、济钢、安钢、韶钢、涟钢、川钢、邯钢、酒钢、石钢等）的领导和工程技术人员所提供的经费资助和技术支持表示衷心的感谢！

在本书编写过程中，得到倪有金、秦哲、刘华、钱宇婧、李啸磊在文字录入、图表编排等方面的帮助，特此致谢。

本书的出版得到了冶金工业出版社的大力支持，在此表示衷心感谢！

作者谨以本书献给从事连铸技术工作的人们。这是作者告别所从事专业技术工作而画上的一个句号。由于作者水平所限，书中有不足之处，敬请专家和读者指正。

蔡开科

于北京科技大学冶金与生态工程学院

2010年2月

目 录

第一篇 炼钢—精炼—连铸过程钢洁净度控制

1 钢洁净度概论	1
1.1 钢洁净度概念	1
1.2 钢中夹杂物的类型、特点和来源	2
1.2.1 钢中夹杂物的类型	2
1.2.2 连铸坯中夹杂物的特点和来源	3
1.3 钢中夹杂物评价	4
1.3.1 钢中总氧法	4
1.3.2 钢中非金属夹杂物评级法	6
1.3.3 硫印法	6
1.3.4 X 射线透射法	7
1.3.5 超声波扫描仪分析法	8
1.3.6 电解法	9
1.3.7 金相显微镜观察法	10
1.3.8 图像分析法	13
1.3.9 电子探针分析法	14
1.3.10 钢中酸溶铝含量和总铝含量比	16
1.4 钢中夹杂物对钢材品质的不利影响	17
1.4.1 钢中夹杂物对深冲用冷轧薄板品质的影响	17
1.4.2 钢中夹杂物对中厚板品质的影响	20
1.4.3 钢中夹杂物对长材产品品质的影响	21
1.5 钢中夹杂物对钢材品质的有利影响	24
1.6 热加工对钢中夹杂物形态的影响	26
1.6.1 铸态钢中夹杂物形态	26
1.6.2 轧制过程中夹杂物变形	26
1.7 对高品质钢洁净度的基本要求	27
2 炼钢过程终点氧含量控制	30
2.1 转炉冶炼低碳钢终点氧含量控制	30
2.1.1 转炉吹炼终点氧含量的影响因素	30
2.1.2 转炉终点氧含量对 RH 脱碳结束氧含量的影响	32

2.1.3	降低终点氧含量的措施	33
2.1.4	转炉冶炼低碳钢终点氧预报模型	35
2.2	转炉冶炼中碳钢终点氧含量控制	36
2.2.1	终点氧含量的影响因素	36
2.2.2	转炉终点氧含量统计预测模型	38
2.3	转炉冶炼高碳钢终点氧含量控制	39
3	钢中氧的转换——脱氧和夹杂物生成	40
3.1	硅镇静钢脱氧	40
3.2	硅铝镇静钢脱氧	42
3.3	铝镇静钢脱氧	44
3.3.1	加铝方法	44
3.3.2	钢水中 Al_2O_3 夹杂物的形成与去除	44
3.3.3	Al_2O_3 夹杂物的不利影响	47
3.4	细晶粒钢脱氧	47
4	夹杂物形态控制——钙处理	49
4.1	钙处理的热力学基础	49
4.2	氧化物夹杂形态控制	50
4.2.1	重钙处理	51
4.2.2	轻钙处理	53
4.3	硫化物夹杂控制	55
4.4	超微细夹杂物控制	56
4.5	钙处理夹杂物变形效果	57
4.6	钙的加入方法	58
5	钢水中夹杂物的去除——钢包精炼	61
5.1	夹杂物去除机制	61
5.2	钢包渣冶金控制	62
5.3	LF 精炼钢水中夹杂物的去除	64
5.3.1	低碳铝镇静钢 LF 精炼	64
5.3.2	管线钢 LF 精炼	70
5.3.3	高碳钢 LF 精炼	72
5.3.4	LF 精炼软吹搅拌去除夹杂物	77
5.3.5	LF 精炼钢水总氧含量预测模型	78
5.4	RH 真空精炼钢水中夹杂物的去除	78
5.4.1	RH 精炼过程的操作模式	78
5.4.2	RH 处理过程钢水中夹杂物变化	79
5.4.3	影响 RH 脱氧夹杂物去除的因素	82

5.4.4 RH 处理超低碳铝镇静钢总氧含量预报模型	84
6 浇注过程钢水二次氧化	92
6.1 二次氧化定义	92
6.2 浇注过程中二次氧化源	93
6.2.1 钢水与空气的二次氧化	93
6.2.2 钢水与炉渣、钢包顶渣、中间包覆盖剂的二次氧化	96
6.2.3 钢水与耐火材料的二次氧化	100
6.3 非稳态浇注对二次氧化的影响	101
6.3.1 浇注过程中下渣、卷渣现象	101
6.3.2 浇注过程非稳态浇注的二次氧化现象	102
6.4 二次氧化对中间包钢水夹杂物的影响	106
6.5 中间包钢水总氧含量预测模型	107
6.6 防止二次氧化的措施	110
7 中间包钢水流动控制	111
7.1 中间包操作过程的钢水流动现象	111
7.1.1 中间包钢水流动描述	111
7.1.2 钢包注流冲击区	112
7.1.3 注流卷入空气	113
7.1.4 旋涡	113
7.1.5 流动不稳定性和波的形成	113
7.2 中间包钢水夹杂物的去除	114
7.3 中间包流动形态控制	118
7.3.1 中间包无控制流动	118
7.3.2 中间包控制流动	118
7.4 中间包控制装置的冶金效果	119
7.5 非稳态浇注对中间包钢水洁净度的影响	122
7.5.1 非稳态浇注	122
7.5.2 中间包卷渣	122
8 结晶器流动控制	125
8.1 结晶器钢水流动与铸坯表面缺陷	125
8.2 板坯结晶器钢水流动模式控制	125
8.3 结晶器卷渣	128
8.4 结晶器液相穴夹杂物上浮	131
8.5 浸入式水口结构对液相穴夹杂物上浮的影响	134
8.6 板坯结晶器使用电磁制动	135
8.7 浸入式水口堵塞物是铸坯中夹杂物的来源	137

8.7.1 水口堵塞的危害	137
8.7.2 浸入式水口堵塞的原因分析	137
8.7.3 铝镇静钢水口堵塞	138
8.7.4 硅镇静钢水口堵塞	140
8.7.5 含钛不锈钢堵水口	141
8.7.6 防止水口堵塞的措施	142
9 连铸坯中夹杂物	144
9.1 连铸坯中夹杂物分布特征	144
9.2 连铸坯中夹杂物的来源	148
9.3 连铸坯洁净度的评价	150
10 炼钢—精炼—连铸过程钢中夹杂物控制技术	154
10.1 转炉终点控制	154
10.2 防止出钢过程下渣	154
10.3 炉渣改性	154
10.4 脱氧夹杂物控制	155
10.5 钢包精炼	155
10.6 保护浇注	155
10.7 中间包钢水夹杂物上浮去除	155
10.8 非稳态浇注过程中防止下渣、卷渣	157
10.9 结晶器冶金	157
10.10 连铸机机型	158
参考文献	159

第二篇 连铸坯凝固过程铸坯表面质量控制

11 连铸坯凝固过程裂纹形成宏观分析	163
11.1 连铸坯裂纹类型	163
11.1.1 连铸坯表面裂纹	163
11.1.2 连铸坯内部裂纹	164
11.2 连铸坯裂纹产生机理	164
11.3 凝固过程外力作用对连铸坯裂纹产生的影响	165
11.3.1 结晶器坯壳与铜板摩擦力	165
11.3.2 钢水静压力产生鼓肚力	166
11.3.3 热应力	169
11.3.4 铸坯弯曲或矫直力	170
11.3.5 支撑辊不对中产生的附加应力	171

11.3.6 相变应力	172
11.4 钢的高温性能	172
11.5 冶金工艺性能	176
11.6 设备性能	176
12 铸坯表面纵裂纹的形成与防止	177
12.1 包晶钢概念	177
12.2 板坯表面纵裂纹的形成	178
12.2.1 板坯表面纵裂纹的宏观形貌	178
12.2.2 纵裂纹产生的位置	179
12.2.3 表面纵裂纹的微观形貌	180
12.2.4 结晶器坯壳生长的不均匀性	182
12.2.5 表面纵裂纹形成的原因	186
12.3 影响板坯表面纵裂纹形成的因素	189
12.3.1 钢水成分	189
12.3.2 钢水温度	191
12.3.3 拉速	191
12.3.4 结晶器冷却	192
12.3.5 二冷区冷却水量	196
12.3.6 结晶器液面波动	196
12.3.7 浸入式水口结构	198
12.3.8 结晶器保护渣	199
12.3.9 结晶器锥度	205
12.3.10 二冷区铸坯的支撑和对中	207
12.3.11 结晶器振动	207
12.3.12 结晶器电磁制动	207
12.4 防止纵裂纹产生的措施	208
13 铸坯表面横裂纹的形成与防止	209
13.1 铸坯表面振痕的形成	209
13.2 铸坯表面横裂纹的形成	210
13.2.1 铸坯表面横裂纹的宏观形貌	210
13.2.2 厚板坯横裂纹的微观形貌	211
13.2.3 CSP 薄板坯表面横裂纹的形貌	213
13.2.4 铸坯横裂纹的形成机理	216
13.3 影响铸坯横裂纹形成的因素	217
13.3.1 钢水成分	217
13.3.2 结晶器振动	218
13.3.3 钢中第二相质点析出	221

13.3.4	结晶器液面波动	228
13.3.5	保护渣消耗	228
13.3.6	二冷强度	228
13.3.7	连铸机维修	229
13.3.8	矫直辊水平度管理	229
13.3.9	结晶器锥度	230
13.4	减少铸坯横裂纹产生的措施	230
14	铸坯网状裂纹的形成与防止	231
14.1	铸坯表面网状裂纹的特征	231
14.1.1	表面网状裂纹的宏观特征	231
14.1.2	网状裂纹的微观特征	231
14.2	铸坯表面网状裂纹形成的原因	236
14.3	影响铸坯表面网状裂纹形成的因素	237
14.3.1	钢中碳	237
14.3.2	钢中锰硫比	238
14.3.3	钢中铝和氮	238
14.3.4	钢中微合金元素	238
14.3.5	二冷强度	239
14.3.6	结晶器材质	240
14.4	钢中第二相质点析出行为	240
14.4.1	钢中微合金元素沉淀物（析出物）的析出	240
14.4.2	微合金元素析出物对钢裂纹的敏感性	244
14.5	连铸坯网状裂纹的控制	247
14.5.1	连铸冷却的控制	247
14.5.2	连铸机热工作状态	250
15	铸坯表面渣类缺陷的形成及防止	251
15.1	铸坯表面渣类缺陷的类型及形成	251
15.2	影响铸坯表面卷渣的因素	253
15.2.1	结晶器流动卷渣	253
15.2.2	浸入式水口结构	255
15.2.3	结晶器液面波动	256
15.2.4	非稳态浇注的干扰	258
15.3	防止铸坯夹渣缺陷产生的措施	258
16	连铸坯形状缺陷与防止	260
16.1	方坯菱形（脱方）	260
16.1.1	菱形定义	260

16.1.2 菱变产生的原因	261
16.1.3 影响方坯菱变的因素	263
16.2 圆坯的形状缺陷	267
16.3 板坯鼓肚	267
参考文献	269

第三篇 连铸坯内部缺陷的形成与控制

17 连铸坯凝固结构与控制	273
17.1 连铸坯凝固进程	273
17.2 连铸坯凝固结构	275
17.3 连铸坯低倍结构控制	278
17.3.1 凝固结构对产品性能的影响	278
17.3.2 凝固结构控制方法	279
18 连铸坯中心缺陷的形成与影响因素	283
18.1 连铸坯中心缺陷概述	283
18.1.1 连铸坯中心缺陷的形貌	283
18.1.2 连铸坯中心缺陷评价	283
18.1.3 连铸坯中心缺陷的危害	287
18.2 连铸坯中心缺陷的形成	288
18.2.1 连铸坯显微偏析	288
18.2.2 连铸坯中心宏观偏析	289
18.2.3 连铸坯中心区 V 形偏析	292
18.2.4 连铸坯中心疏松缩孔	293
18.2.5 铸坯中心缺陷形成的机理	297
18.3 影响连铸坯中心缺陷形成的因素	299
18.3.1 钢水过热度	299
18.3.2 铸坯低倍结构	299
18.3.3 拉速	300
18.3.4 冷却强度	301
18.4 防止铸坯中心缺陷产生的对策	301
18.4.1 工艺参数优化	301
18.4.2 铸坯中心缺陷最小化设计	303
19 连铸坯内部缺陷控制——电磁搅拌技术	305
19.1 连铸电磁搅拌冶金原理	305
19.1.1 打碎树枝晶，加速柱状晶向等轴晶过渡	305

19.1.2	加速凝固传热和过热度消除	306
19.1.3	改善铸坯洁净度	308
19.1.4	改善铸坯固液界面溶质再分配,减轻中心偏析	308
19.1.5	改善铸坯表面质量	308
19.2	结晶器的电磁搅拌 (M-EMS)	308
19.3	方坯二冷区电磁搅拌 (S-EMS)	311
19.4	板坯二冷区电磁搅拌 (S-EMS)	312
19.4.1	不锈钢、硅钢板坯二冷区电磁搅拌	312
19.4.2	碳钢板坯二冷区电磁搅拌	314
19.5	凝固末端电磁搅拌 (F-EMS)	316
20	连铸坯内部缺陷控制——凝固末端轻压下	320
20.1	轻压下概念	320
20.2	轻压下分类	320
20.3	轻压下冶金效果	321
20.4	轻压下数学模型解析	325
20.4.1	铸坯凝固传热数学模型	325
20.4.2	凝固过程溶质偏析模型	326
20.4.3	坯壳应变分析模型	327
20.4.4	压下力模型	327
21	连铸坯内部裂纹的形成与防止	330
21.1	连铸坯内部裂纹的类型	330
21.2	连铸坯凝固过程中内部裂纹的形成	330
21.2.1	连铸坯内部裂纹的形貌	330
21.2.2	连铸坯内部裂纹的形成	331
21.2.3	连铸坯内部裂纹产生的原因	332
21.3	连铸坯产生内部裂纹的力学判据	335
21.3.1	临界应力	335
21.3.2	临界应变	336
21.4	连铸坯凝固过程坯壳应变分析	339
21.4.1	鼓肚应变	339
21.4.2	矫直应变	341
21.4.3	支撑辊不对中应变	342
21.4.4	板坯凝固前沿所承受的总应变分析	343
21.4.5	铸坯凝固前沿总应变与内部裂纹	344
21.5	连铸坯内部裂纹的形成与防止	344
21.5.1	内部裂纹产生的位置	345
21.5.2	连铸坯内部裂纹产生的原因及防止措施	345
21.6	连铸坯内部裂纹的形成机理	349
	参考文献	351



炼钢—精炼—连铸过程 钢洁净度控制

1 钢洁净度概论

1.1 钢洁净度概念

目前，国内外无统一的“洁净钢”（Clean Steel）或“纯净钢（Purity Steel）”的定义，但一般都认为钢的洁净度是指钢中氧化物夹杂的种类、数量、尺寸和分布；而纯净度是指钢中有害元素 S、P、N、H、O（总氧）的水平。随着炼钢原料中废钢用量的增加，有害元素还包括 Cu、Zn、Sn、Bi、Pb 等伴生元素（Tramp Elements）。不管怎么说，洁净钢或纯净钢包括两方面内容：一是钢中杂质元素含量要低；二是严格控制钢中非金属夹杂物含量、形态和尺寸^[1]。

洁净度或纯净度是一个相对概念。洁净度标准是用户与生产厂家之间的产品质量竞争的指标，它是随装备和生产工艺技术发展、钢的级别和产品性能和用途而异的。国际钢铁协会（IISI）编写的《洁净钢——洁净钢生产工艺技术》一书中指出^[2]：任何一种洁净钢的具体定义都要包括对钢种性能要求。随着产品使用厚度的减小，对钢洁净度的要求也越来越严格。因此洁净钢定义为：当钢中非金属夹杂物直接或间接影响产品的生产性能和使用性能时，该钢就不是洁净钢；而如果非金属夹杂物的数量、尺寸或分布对产品性能都没有影响，那么这种钢就可以认为是洁净钢。

钢中五大有害杂质元素 S、P、N、H、O 单独控制水平演变见表 1-1^[3,4]。

表 1-1 钢中杂质元素单独控制水平的演变

(%)

杂质元素	1960 年	1970 年	1980 年	1990 年	1996 年	2000 年	将来预计
C	0.0200 (0.0250)	0.0080	0.0030 (0.0150)	0.0010	0.0005	0.0004 (0.0020)	(0.0010)
S	0.0200 (0.0300)	0.0040	0.0010 (0.0030)	0.0004	0.0005	0.00006 (0.0010)	(0.0010)

续表 1-1

杂质元素	1960 年	1970 年	1980 年	1990 年	1996 年	2000 年	将来预计
P	0.0200 (0.0300)	0.0100	0.0040 (0.0150)	0.0010	0.0010	0.0003 (0.0050)	(0.0030)
N	0.0040 (0.0150)	0.0030	0.0020 (0.0070)	0.0010	0.0010	0.0006 (0.0030)	(0.0020)
H	0.0003 (0.0006)	0.0002	0.0001 (0.0006)	0.00008	<0.0001	0.00005 (0.0001)	(0.0001)
T[O]	0.0040 (0.0030)	0.0030	0.0010 (0.0030)	0.0007	0.0005	0.0002 (0.0010)	(0.0010)
总 计	0.0683 (0.1036)	0.0282	0.0111 (0.0436)	0.00318	0.0036	0.0016 (0.0121)	(0.0081)

注：表中（ ）中数据来自文献 [4]，其余数据来自文献 [3]。

随着钢制造技术的发展，人们预测 21 世纪钢中五大有害元素含量的总和能达到不超过 0.0050% 的水平，其中 [C] 0.0005% ~ 0.0006%、[S] 0.0001% ~ 0.0005%、[P] 0.0008% ~ 0.0010%、[N] 0.0010% ~ 0.0014%、[H] 0.00002%、[O] 0.0004% ~ 0.0005%。需要指出，对不同用途的钢种的杂质元素的概念也是不同的，所容许杂质元素的含量也是有差别的。典型的如硫在一般钢中都视为杂质元素，但在易切削钢中为有益元素；在 IF 钢中碳、氮是杂质元素，而一般钢中是必不可少的强化元素。因此，杂质元素的界定取决于人们对钢中溶质元素所起作用的认识，以及不同钢种在不同用途中所希望的是利用其有利的一面还是避免不利的一面。

1.2 钢中夹杂物的类型、特点和来源

钢中夹杂物的类型和来源是紧密与生产流程相关的，是一个复杂的物理和高温化学反应过程。

1.2.1 钢中夹杂物的类型

按夹杂物来源分，钢中夹杂物可分为内生夹杂物 and 外来夹杂物。内生夹杂物包括脱氧产物、凝固再生夹杂物；外来夹杂物包括二次氧化产物、夹渣、耐火材料的侵蚀物等。

按夹杂物尺寸分，钢中夹杂物有不同的分法。一般认为可分为超显微夹杂物、显微夹杂物和大型夹杂物。超显微夹杂物是指尺寸小于 1 μm 的夹杂物，包括氮化物、氧化物及硫化物等；显微夹杂物是指尺寸为 1 ~ 100 μm （或 1 ~ 50 μm ）的夹杂物，主要是脱氧产物；大型夹杂物是指尺寸大于 100 μm （或大于 50 μm ）的夹杂物，主要是外来夹杂物。

按夹杂物组成成分，钢中夹杂物可分为简单金属氧化物、硅酸盐、钙铝酸盐和尖晶石夹杂物。简单金属氧化物包括 FeO、MnO、SiO₂、Al₂O₃；硅酸盐包括 FeO-MnO-SiO₂、Al₂O₃·SiO₂、MnO·SiO₂、复杂硅酸盐 FeO·SiO₂·MnO·Al₂O₃；钙铝酸盐包括 CaO·Al₂O₃、12CaO·7Al₂O₃、6CaO·Al₂O₃、CaO·2Al₂O₃；尖晶石夹杂物包括 MnO·Al₂O₃、MgO·Al₂O₃、MgO·Cr₂O₃。

1.2.2 连铸坯中夹杂物的特点和来源

连铸坯中夹杂物按来源可分为内生夹杂物和外来夹杂物。

内生夹杂物主要是脱氧产物，其特点是：

(1) 溶解氧含量 $[O]_{\text{溶}}$ 增加，脱氧产物增加；生成夹杂物数量取决于钢中溶解氧含量 $[O]_{\text{溶}}$ 、化学反应能力和夹杂物上浮。理论计算指出：铝脱氧钢生成 $2\mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 夹杂物达 10^{10} 个/t(钢)。

(2) 夹杂物尺寸决定于脱氧产物的形核长大，炼钢条件下，脱氧产物尺寸为 $1 \sim 5\mu\text{m}$ ，碰撞长大后尺寸可达 $5 \sim 30\mu\text{m}$ 。

(3) 在钢包精炼搅拌，大部分夹杂物上浮。试验指出，85% 的脱氧产物上浮到渣相。

(4) 钢成分和温度变化时有新的夹杂物沉淀（小于 $5\mu\text{m}$ ）。

铝镇静钢（Al-K）连铸坯中常见的内生夹杂物是 Al_2O_3 ；硅镇静钢（Si-K）连铸坯中常见的内生夹杂物是硅酸锰（ $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ）或 $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ；钙处理铝镇静钢连铸坯中常见的内生夹杂物是铝酸钙；钛处理 Al-K 钢连铸坯中常见的内生夹杂物是 Al_2O_3 、 TiO_2 、 TiN ；镁处理铝镇静钢连铸坯中常见的内生夹杂物是铝酸镁、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ；所有钢连铸坯中常见的内生夹杂物是 MnS ，它在凝固时形成，以氧化物夹杂为核心，外周有硫化物（ Mn, Ca ）S 析出。

外来夹杂物主要包括钢水与环境（空气、包衬、炉渣、水口等）的二次氧化产物、下渣和卷渣形成的夹渣。其特点是：

- (1) 夹杂物粒径大，大于 $50\mu\text{m}$ 甚至达到几百微米；
- (2) 组成复杂，多为复合夹杂物，如耐火材料、炉渣组成；
- (3) 来源广泛，包括二次氧化产物、卷渣、耐火材料侵蚀；
- (4) 偶然性分布；
- (5) 对产品性能危害最大。

生产洁净钢就是要减少钢中夹杂物，尤其是减少大颗粒夹杂物。连铸过程中氧化物夹杂的来源如图 1-1 所示。



图 1-1 连铸过程中氧化物夹杂的来源

1.3 钢中夹杂物评价

为了定量评价夹杂物数量、尺寸、形态、分布和组成,随技术发展有多种检测技术在生产科研中应用。但这些方法各有特点。夹杂物分析方法可分为直接的和间接的两种^[5]。

直接分析夹杂物的主要方法有:

- (1) 非金属夹杂物评级法;
- (2) 硫印法 (Sulfur Print);
- (3) X 射线透射法 (X-ray Photograph);
- (4) 超声波扫描仪分析法 (Conventional Ultrasonic Scanning, 即 CUS);
- (5) 电解法 (Slims-Electrolysis);
- (6) 金相显微镜观察法 (Metallographical Microscope Observation, 即 MMO);
- (7) 图像分析法 (Image Analysis, 即 IA);
- (8) 电子探针分析法 (Scanning Electron Microscopy, 即 SEM);
- (9) 电子束熔化法 (Electron Beam Melting, 即 EBM);
- (10) 激光衍射分析仪分析法 (Laser-Diffraction Particle Size Analyzer, 即 LDPSA);

间接分析夹杂物的主要方法有:

- (1) 钢中总氧法;
- (2) 钢中吸氮增量法;
- (3) 钢中酸溶铝损失法;
- (4) 氧化物夹杂示踪法。

下面介绍常用的几种方法。

1.3.1 钢中总氧法

钢中的氧以两种形式存在:溶解于钢中的溶解氧 $[O]_{\text{溶}}$ 和存在于氧化物夹杂的氧 $[O]_{\text{夹}}$ 。总氧含量^① $T[O]$ 可表示为:

$$T[O] = [O]_{\text{溶}} + [O]_{\text{夹}}$$

转炉出钢时,钢水中夹杂物氧 $[O]_{\text{夹}} \rightarrow 0$, $T[O]$ 主要是吹炼终点溶解氧 $[O]_{\text{溶}}$ ($\alpha_{[O]}$)。钢包脱氧合金化后与脱氧元素 (Al、Si) 相平衡的 $[O]_{\text{溶}}$ 很低了,如铝镇静钢,加铝脱氧后,在 1600℃ 与钢中酸溶铝含量 $[Al]_s$ (0.02% ~ 0.05%) 处于热力学平衡的 $[O]_{\text{溶}}$ 很低了 (0.0004% ~ 0.0008%),所以可用钢中总氧含量 $T[O]$ 来表示钢中氧化物夹杂的水平,用 $T[O]$ 作为洁净钢的量度。钢中总氧含量 $T[O]$ 越低,说明钢中氧化物夹杂量越少,钢就越干净。钢中夹杂物含量与钢中总氧含量 $T[O]$ 的关系如图 1-2 所示。

由于引入炉外精炼,硅镇静钢 $T[O]$ 可达 0.0015% ~ 0.0020%,铝镇静钢 $T[O]$ 可达小于 0.0010% (见图 1-3)。这说明钢很“干净”了^[6]。

① 本书中含量如无特殊说明,即指质量分数。