



“十四五”职业教育国家规划教材



融媒体图书



“双高”建设规划教材

转炉炼钢生产

■ 主编 黄伟青 韩立浩 曹磊



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

校企合作开发，理论与实践并重
线上线下融合，助力信息教学



扫码体验更多
冶金工业出版社精彩阅读

ISBN 978-7-5024-8752-2



9 787502 487522 >

定价42.00元
销售分类建议:冶金工程



“十四五”职业教育国家规划教材



“双高”建设规划教材

转炉炼钢生产

主 编 黄伟青 韩立浩 曹 磊

副主编 闫炳强 高云飞 石永亮



扫一扫获取全书

数字资源

北 京

冶金工业出版社

2024

内 容 提 要

本书为冶金技术专业核心课程“转炉炼钢生产”的配套教材,系统地阐述了炼钢过程的基本理论与工艺。主要内容包括:转炉炼钢生产概述、转炉炼钢基本理论、转炉炼钢生产原材料、铁水预处理、氧气顶吹转炉炼钢工艺、氧气底吹转炉炼钢、顶底复合吹炼转炉炼钢、转炉炉衬与长寿技术、转炉车间主要设备、转炉炼钢的环境保护、安全生产与事故处理。本书内容注重应用性和新颖性,理论与实际相结合,有效地融入信息技术,配有大量的微课视频、生产视频和演示动画,可以帮助读者更好的掌握相关知识和技能。

本书可作为高等职业院校、职业本科冶金技术专业及应用型本科冶金工程专业的教学用书,也可供从事钢铁生产的工程技术人员、管理人员和相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

转炉炼钢生产/黄伟青,韩立浩,曹磊主编. —北京:冶金工业出版社, 2021.3 (2024.1重印)

“双高”建设规划教材

ISBN 978-7-5024-8752-2

I. ①转… II. ①黄… ②韩… ③曹… III. ①转炉炼钢—教材
IV. ①TF71

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第043179号

转炉炼钢生产

出版发行	冶金工业出版社	电 话	(010)64027926
地 址	北京市东城区嵩祝院北巷39号	邮 编	100009
网 址	www.mip1953.com	电子信箱	service@mip1953.com

责任编辑 卢 敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 郑小利

责任校对 李 娜 责任印制 窦 唯

三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2021年3月第1版,2024年1月第4次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17印张; 379千字; 259页

定价 42.00 元

投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmip.com.cn

营销中心电话 (010)64044283

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)

目 录

模块一 走进转炉炼钢	1
任务 1.1 转炉炼钢发展历程	1
1.1.1 现代炼钢法的发展历程	1
1.1.2 我国钢铁工业的发展	2
1.1.3 我国钢铁工业的发展战略	3
任务 1.2 炼钢的基本任务	7
1.2.1 钢与生铁的区别	7
1.2.2 炼钢的基本任务	8
任务 1.3 钢的分类	14
1.3.1 按用途分类	14
1.3.2 按化学成分分类	15
1.3.3 按显微组织分类	15
1.3.4 按品质分类	15
任务 1.4 现代钢铁生产工艺流程	15
任务 1.5 转炉炼钢主要技术经济指标	18
思考题	20
模块二 转炉炼钢基本理论	21
任务 2.1 炼钢熔渣	21
2.1.1 熔渣的来源	21
2.1.2 熔渣的作用	21
2.1.3 熔渣的化学性质	22
2.1.4 熔渣的物理性质	24
任务 2.2 炼钢熔池中元素的氧化	26
2.2.1 杂质元素氧化方式	26
2.2.2 熔池元素氧化次序	27
任务 2.3 硅和锰的氧化	27
2.3.1 硅的氧化	27
2.3.2 锰的氧化	28
任务 2.4 碳的氧化	28
2.4.1 碳氧反应的作用	28
2.4.2 碳氧反应的热力学	29

2.4.3 碳氧反应的动力学	31
2.4.4 氧气转炉炼钢的脱碳速度曲线	35
任务 2.5 钢液脱磷	36
2.5.1 氧化性脱磷反应	36
2.5.2 脱磷动力学	39
2.5.3 回磷现象	39
2.5.4 还原脱磷	40
任务 2.6 钢液脱硫	41
2.6.1 渣-钢间的脱硫反应	41
2.6.2 气化脱硫	42
2.6.3 脱硫反应动力学	42
任务 2.7 钢液脱氧与非金属夹杂物	43
2.7.1 脱氧的目的和任务	43
2.7.2 各元素的脱氧能力和特点	44
2.7.3 脱氧方法	48
2.7.4 脱氧产物的上浮与排除	51
2.7.5 钢中的非金属夹杂物	52
任务 2.8 钢中的气体	56
2.8.1 钢中气体的来源及影响	56
2.8.2 转炉中的钢液脱气	58
2.8.3 降低钢中气体的措施	59
思考题	60
模块三 转炉炼钢生产原材料	62
任务 3.1 金属料	62
3.1.1 铁水	62
3.1.2 废钢	64
3.1.3 生铁块	66
3.1.4 铁合金	66
任务 3.2 造渣材料	67
3.2.1 石灰	67
3.2.2 萤石	69
3.2.3 白云石	69
3.2.4 合成造渣剂	69
3.2.5 菱镁矿	69
任务 3.3 常用气体	69
3.3.1 氧气	70
3.3.2 氮气	70
3.3.3 氩气	70

任务 3.4 冷却剂	70
任务 3.5 增碳剂	71
任务 3.6 保温剂	71
任务 3.7 铁水预处理	71
3.7.1 铁水预脱硫	72
3.7.2 铁水预脱硅	76
3.7.3 铁水预脱磷	77
思考题	85
模块四 转炉炼钢工艺与设备	86
任务 4.1 转炉炼钢炉内反应及工艺特点	86
4.1.1 氧气顶吹转炉炉内反应及特点	86
4.1.2 氧气底吹转炉炉内反应及特点	88
4.1.3 顶底复吹转炉炉内冶金反应及特点	93
任务 4.2 装入制度	97
4.2.1 装入量的确定	97
4.2.2 废钢比	98
4.2.3 装料顺序	98
4.2.4 装入制度类型	99
4.2.5 装料操作	99
4.2.6 转炉炉体设备	100
任务 4.3 供氧制度	109
4.3.1 气体射流与熔池的相互作用	109
4.3.2 供氧系统设备	120
4.3.3 供氧工艺参数	128
4.3.4 氧枪操作	134
4.3.5 吹损和喷溅	137
4.3.6 返干	139
任务 4.4 造渣制度	140
4.4.1 熔渣的要求	141
4.4.2 炉渣的形成和石灰的溶解	141
4.4.3 成渣路线	143
4.4.4 泡沫渣	145
4.4.5 造渣方法	146
4.4.6 确定渣料加入量	147
4.4.7 渣料加入时间	149
4.4.8 转炉渣况判断	150
4.4.9 石灰石造渣技术	152
4.4.10 散状材料供应设备	153

任务 4.5 转炉炼钢温度控制	154
4.5.1 温度控制的重要性	154
4.5.2 出钢温度确定	155
4.5.3 热量来源及支出	156
4.5.4 冷却剂的冷却效应	157
4.5.5 生产中温度控制	159
4.5.6 物料平衡和热平衡计算	161
任务 4.6 复吹转炉底部供气制度	171
4.6.1 复吹转炉工艺类型	171
4.6.2 复合吹炼底吹气体	172
4.6.3 复合吹炼底部供气元件	173
4.6.4 复吹转炉底部供气制度	177
任务 4.7 转炉炼钢终点控制	177
4.7.1 终点的标志	177
4.7.2 终点控制方法	178
4.7.3 终点的判断	179
4.7.4 自动控制	183
任务 4.8 出钢	192
4.8.1 红包出钢	192
4.8.2 挡渣出钢	192
4.8.3 挡渣方法及效果	193
4.8.4 钢包顶渣改质	198
4.8.5 覆盖渣	198
4.8.6 摇炉操作	199
4.8.7 开堵出钢口操作	201
任务 4.9 脱氧合金化	201
4.9.1 不同钢种的脱氧	201
4.9.2 合金的加入原则	203
4.9.3 合金化原则及加入顺序	203
4.9.4 脱氧操作	204
4.9.5 合金加入量计算	204
4.9.6 合金元素的收得率影响因素	207
4.9.7 铁合金供应设备	209
任务 4.10 转炉少渣冶炼技术	210
4.10.1 少渣炼钢工艺路线	210
4.10.2 工艺制度调整	211
思考题	212

模块五 转炉炉衬与长寿技术	214
任务 5.1 炼钢常用耐火材料	214
5.1.1 耐火材料的种类	214
5.1.2 耐火材料的性质	215
5.1.3 镁炭砖	216
任务 5.2 转炉炉衬	217
5.2.1 转炉内衬用砖	217
5.2.2 出钢口用砖	218
5.2.3 复吹转炉底部供气用砖	218
5.2.4 对炉衬砖的砌筑要求	219
5.2.5 炉衬砖的更换与维护	219
任务 5.3 炉衬寿命	223
5.3.1 炉衬损坏的原因	223
5.3.2 炉衬砖的蚀损机理	223
5.3.3 提高炉衬寿命的措施	224
任务 5.4 溅渣护炉	225
5.4.1 溅渣护炉机理	226
5.4.2 溅渣护炉工艺	228
思考题	238
模块六 转炉炼钢产品处理	239
任务 6.1 烟气净化及回收处理	239
6.1.1 转炉烟气烟尘的特征	239
6.1.2 净化回收系统主要设备	241
6.1.3 净化回收系统简介	248
6.1.4 转炉煤气回收工艺技术操作	249
6.1.5 转炉车间的除尘	250
6.1.6 烟气及烟尘的综合利用	252
任务 6.2 钢渣处理与操作	253
6.2.1 钢渣处理系统	253
6.2.2 钢渣处理工艺技术操作	254
任务 6.3 含尘污水处理系统	256
思考题	257
参考文献	259

反应的速度，可避免大喷发生。兑铁水先加冷料就是这个道理。

4.8.7 开堵出钢口操作

- (1) 开出钢口。准备工具有撬棒、短撬棒、榔头、氧气管等。
 - 1) 接到炉长准备出钢命令后，由摇炉工将炉子摇至 -75° 左右，定位在开出钢口的操作位置。
 - 2) 由一人握短撬棒，对准出钢口中心位置，捅开出钢口。
 - 3) 若上述办法捅不开，则数人共握长撬棒，将长撬棒中心线对准出钢口中心线，合力捅开出钢口。
 - 4) 若上述办法仍无效，则由一个人手握撬棒，对准出钢孔，另一人用榔头敲打短撬棒将出钢口凿通。
 - 5) 若仍不见效，可使用氧气管烧开出钢口。
 一般情况下一人即可开好出钢孔，后几种情况较少使用。
- (2) 堵出钢口：
 - 1) 出钢完毕，将炉子摇起至 -75° 左右，定位在出钢口位置。
 - 2) 取一团拌好的火泥并根据出钢口大小确定火泥的用量，捏成圆锥状。
 - 3) 将火泥放于右手掌中，使锥底平面放在掌上，瞄准出钢口的位置，用推铅球的姿势，把火泥团投到出钢口上。
 - 4) 用顶棒将出钢口上的火泥推紧孔口，封死出钢口。
 - 5) 对较大的出钢口，所用的火泥团较大，可将它置于铁锹上，由一人执锹送至出钢口处，另一个用顶棒将火泥推进孔口内，完成堵出钢口操作。
 - 6) 检查出钢口是否封严。

任务 4.9 脱氧合金化

4.9.1 不同钢种的脱氧

目前，氧气转炉绝大多数采用沉淀脱氧，对一些有特殊要求的钢种还可以配合以钢包内扩散脱氧（合成渣洗）和真空碳脱氧（真空处理及吹 Ar 搅拌）等。加入脱氧剂的方法、数量、时间、地点、顺序等都直接影响脱氧效果和钢水成分的命中率。



微课-脱氧
合金化

4.9.1.1 镇静钢的脱氧

转炉镇静钢的脱氧操作通常有两种方法。

- (1) 采用炉内脱氧方式。即炉内加 Si、Mn 合金和 Al（或铝铁）预脱氧，钢包内加锰铁等补充脱氧。在炉内脱氧因脱氧产物容易上浮，残留在钢中的夹杂物较少，钢的洁净度较高；而且，预脱氧后钢水含量显著降低，可提高和稳定钢包内加入合金的收得率，特别是对于易氧化的贵重元素如 Ti、V 等更有实际意义，并可减少钢包内合金含量。缺点是占炉子作业时间，且炉内脱氧元素收得率低，回磷量较大。
- 有时在冶炼优质合金钢的情况下，采用这种炉内脱氧方法。其操作要点是：到



课件-脱氧
合金化



达终点后,倒出大部分炉渣,再加少量石灰使渣稠化,以提高合金收得率和防止回磷;加入脱氧剂后可摇炉助熔,加入难熔合金时可配加 Si-Fe 及 Al 等吹氧助熔。钢包内的脱氧剂应在出钢至 $1/4 \sim 1/3$ 时开始加,到 $2/3 \sim 3/4$ 时加完,以利于钢水成分、温度的均匀化和稳定合金收得率。

(2) 采用钢包内脱氧方式。即将全部脱氧剂都加入钢包内。其优点是脱氧剂收得率高,回磷量较少,且有利于提高转炉生产率和延长炉龄。因此,目前转炉生产的大多数钢种都采用钢包内脱氧方式。一般情况下,直接以固态形式加入少量的易熔合金;而对难熔合金或需要大量加入的合金则可预先在炉内熔化,然后加入钢包内,这样可获得更稳定的脱氧效果。

钢包内脱氧的操作要点是:锰铁加入量较多时,应适当提高出钢温度;而硅铁加入量大时,应相应降低出钢温度。脱氧剂力求在出钢中期均匀加入(加入量大时可将 $1/2$ 合金在出钢前加在钢包底)。加入次序一般先弱后强(不是用复合脱氧剂时),即先加锰铁,而后加硅铁、硅锰和铝。这样更利于快速形成脱氧产物,加速其上浮。但需要加入易氧化元素(如钒、钛、硼等)时,应先加入强脱氧剂铝、硅铁等,以减少钒、钛等的烧损,提高和稳定其收得率。出钢时应避免过早下渣,特别是对含磷量有严格限制的钢种。钢包内应加入少量石灰,防止回磷。

应当指出,生产实践和一些研究表明,对脱氧产物上浮速度起决定性作用的不是产物自身的性质,而是钢水的运动状态。向钢包内加入脱氧剂时产生的一次脱氧产物,在有钢流强烈搅拌的情况下,绝大多数都能在 $3 \sim 5\text{min}$ 内顺利上浮排除。可见,虽然按先弱后强的次序加入合金有易于产物的上浮,但也不必苛求。

此外,各种炉外精炼技术,都可看成是钢包内脱氧的继续和发展,它们能在一定程度上综合完成脱氧、除气、脱碳(或增碳)和合金化的任务。

4.9.1.2 沸腾钢的脱氧

沸腾钢的含碳量一般为 $0.05\% \sim 0.27\%$,含锰量为 $0.25\% \sim 0.70\%$ 。为了保证钢水在模内正常的沸腾,要求根据 C、Mn 含量控制钢中的含氧量在适当的范围。钢中 C、Mn 含量高,终点钢水的氧化性宜相应强些;反之,则宜弱些。

沸腾钢主要用锰铁脱氧,脱氧剂全部加入钢包内,出钢时需加适当的铝,以调节钢液的氧化性。沸腾钢含碳越低,则加铝应该越多(C 含量小于 0.1% 时,一般加铝约为 100g/t 钢)。

应该特别注意锰铁的含硅量不应大于 1% 。否则钢中含硅量增加,将造成模内沸腾微弱,降低钢锭质量。

生产含碳量较高的沸腾钢(含碳量为 $0.15\% \sim 0.22\%$)时,为了保证钢水的氧化性,可吹炼至低碳(含碳量为 $0.08\% \sim 0.10\%$)出钢后再在钢包内增碳。

4.9.1.3 半镇静钢脱氧

半镇静钢的脱氧程度比镇静钢弱,比沸腾钢强,钢水含氧量接近于与碳平衡时的含量,即 $\Delta[\text{O}] = 0$ 。这种钢在凝固时会析出少量的气体,使其产生的气泡体积与钢水冷凝收缩的体积大致相等,因而对脱氧控制严格。半镇静钢一般用少量的硅铁

和铝脱氧, 而用锰铁合金化, 钢中含硅量 $w[\text{Si}] < 0.14\%$ 。

4.9.2 合金的加入原则

(1) 脱氧剂的选择原则。脱氧剂的选择应满足下列原则:

- 1) 脱氧元素与氧的亲合力比铁、碳大。
- 2) 脱氧剂熔点比钢水温度低, 以保证合金熔化, 均匀分布, 均匀脱氧。
- 3) 脱氧产物易于从钢水中排出。要求脱氧产物熔点低于钢水温度, 密度要小, 在钢水中溶解度小, 与钢水界面张力大等。
- 4) 残留于钢中的脱氧元素对钢性能无害。
- 5) 脱氧剂应该来源广, 价格便宜。

(2) 脱氧剂的加入顺序:

1) 普通钢 (一般钢种) 脱氧顺序是先弱后强, 具体加入顺序是 $\text{Fe-Mn} \rightarrow \text{Fe-Si} \rightarrow \text{Al}$ 。这样可使弱脱氧剂在钢水内均匀分布, 再加入强脱氧剂, 便于形成低熔点的化合物, 成为液体颗粒, 使脱氧产物易上浮而排除, 但该加入法在高氧位下使用了相对较贵的 Fe-Mn 、 Fe-Si 合金, 造成合金浪费。另外, 由于铝的密度小、氧化性强, 加入过程中在钢液表面燃烧, 造成钢中 $w[\text{O}]$ 、 $w[\text{Al}]_s$ (s 表示酸溶铝) 不稳定以及铝的浪费, 影响铸坯质量, 且当 $w[\text{Al}]_s$ 大于 0.003% 时, 可能因生成 Al_2O_3 夹杂而堵塞水口。

2) 目前发展趋势是脱氧剂的加入顺序是先强后弱 (拉碳较低钢种), 或前强中弱后强, 例如: $\text{Al} \rightarrow \text{Fe-Si} \rightarrow \text{Fe-Mn}$, 这样可提高硅和锰的收得率, 而且使收得率稳定。这种脱氧方法提高了脱氧产物中稳定氧化物组成, 减少了钢水的相互作用, 有利于夹杂物的排除; 有利于提高钢的成分合格率和纯净度。为防止加铝过多, 发生二次污染, 此法应采用保护性浇注。

4.9.3 合金化原则及加入顺序

为了使钢获得一定的物理、化学性能, 在出钢过程中需要向钢水中加入适量的各种有关的合金元素以调整钢水成分, 使之符合所炼钢种成分的要求, 从而保证获得所需的物理、化学性能。这种工艺操作称为合金化。

(1) 钢液合金化基本原则:

- 1) 在不影响钢材性能的前提下, 按中、下限控制钢的成分以减少合金的用量。
- 2) 合金的收得率要高。
- 3) 溶在钢中的合金元素要均匀分布。
- 4) 不能因为合金的加入使熔池温度产生大的波动。

(2) 合金加入顺序:

1) 以脱氧为目的合金元素先加, 而以合金化为目的合金元素后加, 保证合金元素有高而稳定的收得率。

2) 易氧化、贵重的合金元素应在脱氧良好的情况下加入。

例如 Fe-V 、 Fe-Nb 、 Fe-B 等合金应在 Fe-Mn 、 Fe-Si 、铝等脱氧剂加入后钢水已经良好脱氧时加入, 可以提高这些贵重元素的回收率; 但也不可太迟, 以免造成成

分不均匀。

3) 难熔及不易氧化的合金 (如 Fe-Cr、Fe-W、Fe-Mo、Fe-Ni 等) 可以先加。

4.9.4 脱氧操作

目前大多数钢种采用钢包内脱氧,即在出钢过程中,将全部合金加到钢包内。合金加入时间,一般在钢水流出总量的 1/4 时开始加入,到流出 3/4 时加完。为保证合金熔化和搅拌均匀,合金应加在钢流冲击的部位,或同时钢包吹氩搅拌。出钢过程中应避免下渣,还可在钢包内加一些干净的石灰粉,以避免回磷。其后,应静置数分钟,再进行浇注操作。如果脱氧生成物分离不好,会作为非金属夹杂物残留在钢材中,使钢材性能降低。

生产高质量的钢种时,脱氧合金化是在出钢时钢包中进行预脱氧及预合金化,在精炼炉内 (包括喂线) 进行终脱氧与成分精确调整 (合金化)。为使精炼过程中成分调整顺利进行,要求预合金化时被调成分不超过规格中限。

对于特殊钢种,如果采用真空精炼方法,对于加入量大的,难熔的 W、Mn、Ni、Cr、Mo 等合金可在真空处理开始时加入,对于贵重的合金元素 B、Ti、V、Nb、RE 等可在真空处理后期或处理完毕再加,一方面能极大地提高合金元素吸收率,降低合金的消耗;另一方面也可以减少钢中氢的含量。

4.9.5 合金加入量计算

各种铁合金的加入量可按式 (4-29)~式 (4-31) 计算:

$$\text{合金加入量} = \frac{\text{钢种规格中限} - \text{终点残余成分}}{\text{铁合金中合金元素含量} \times \text{合金元素吸收率}} \times 1000 \quad (4-29)$$

$$\text{钢种规格中限} = \frac{\text{钢种规格上限} + \text{钢种规格下限}}{2} \quad (4-30)$$

$$\text{合金增碳量} = \frac{\text{合金加入量} \times \text{合金碳含量} \times \text{碳吸收率}}{1000} \times 100\% \quad (4-31)$$

4.9.5.1 沸腾钢合金加入量确定

沸腾钢只加 Fe-Mn,并用铝调整钢水氧化性。

例 4-3 冶炼 Q235A·F 钢,用高碳 Fe-Mn 脱氧,计算 1t 钢锰铁加入量和锰铁的增碳量。已知条件见表 4-30。

表 4-30 钢种及原料成分

项 目	w/%		
	C	Si	Mn
Q235A·F	0.14~0.22	<0.07	0.30~0.60
高碳 Fe-Mn	7.0		70
$\eta/\%$	90		70



微课-合金
加入量计算



课件-合金
加入量计算

解：设余锰量 $w[\text{Mn}]_{\text{余}} = 0.12\%$ ， $\eta_{\text{Mn}} = 70\%$ 。

$$\begin{aligned}\text{钢种锰规格中限} &= \frac{\text{钢种锰规格上限} + \text{钢种锰规格下限}}{2} \\ &= \frac{0.60\% + 0.30\%}{2} = 0.45\%\end{aligned}$$

高碳 Fe-Mn 加入量：

$$\begin{aligned}\text{合金加入量} &= \frac{\text{钢种规格中限} - \text{终点残余成分}}{\text{铁合金中合金元素含量} \times \text{合金元素吸收率}} \times 1000 \\ &= \frac{0.45\% - 0.12\%}{70\% \times 70\%} \times 1000 = 6.73\text{kg/t}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{增碳量} &= \frac{\text{合金加入量} \times \text{合金碳含量} \times \text{碳吸收率}}{1000} \times 100\% \\ &= \frac{6.73 \times 7.0\% \times 90\%}{1000} \times 100\% = 0.042\%\end{aligned}$$

答：1t 钢加高碳 Fe-Mn 合金 6.73kg，合金增碳量为 0.042%。

由于合金的加入，增加钢水碳含量，为此终点拉碳应考虑增碳量或者用中碳 Fe-Mn 代替部分高碳 Fe-Mn 脱氧合金化。

例 4-4 冶炼 Q195A · F 钢，用高碳 Fe-Mn、中碳 Fe-Mn 各一半脱氧合金化，铁水和合金成分见表 4-31。

表 4-31 铁水和合金成分

项 目	元素含量 (质量分数)/%		
	C	Si	Mn
Q195A · F	0.06~0.12	<0.05	0.25~0.50
铁水	4.20	0.35	0.40
中碳 Fe-Mn	6.8		71
高碳 Fe-Mn	1.0		76

$w[\text{Mn}]_{\text{余}} = 0.08\%$ ，计算锰铁加入量和增碳量各为多少？

解：锰吸收率： $\eta_{\text{Mn}} = 58\%$ ，

$$\begin{aligned}\text{钢种锰规格中限} &= \frac{\text{钢种锰规格上限} + \text{钢种锰规格下限}}{2} \\ &= \frac{0.50\% + 0.25\%}{2} = 0.375\%\end{aligned}$$

高碳 Fe-Mn 加入量：

$$\begin{aligned}\text{合金加入量} &= \frac{0.5 \times (\text{钢种规格中限} - \text{终点残余成分})}{\text{铁合金中合金元素含量} \times \text{合金元素吸收率}} \times 1000 \\ &= \frac{0.5 \times (0.375\% - 0.08\%)}{71\% \times 58\%} \times 1000 \\ &= 3.58\text{kg/t}\end{aligned}$$

中碳 Fe-Mn 加入量:

$$\begin{aligned}\text{合金加入量} &= \frac{0.5 \times (\text{钢种规格中限} - \text{终点残余成分})}{\text{铁合金中合金元素含量} \times \text{合金元素吸收率}} \times 1000 \\ &= \frac{0.5 \times (0.375\% - 0.08\%)}{76\% \times 58\%} \times 1000 \\ &= 3.35\text{kg/t}\end{aligned}$$

$$\text{增碳量} = \frac{\text{合金加入量} \times \text{合金碳含量} \times \text{碳吸收率}}{1000} \times 100\%$$

高碳 Fe-Mn 增碳量:

$$\text{增碳量} = \frac{3.58 \times 6.8\% \times 90\%}{1000} \times 100\% = 0.022\%$$

中碳 Fe-Mn 增碳量:

$$\text{增碳量} = \frac{3.35 \times 1.0\% \times 90\%}{1000} \times 100\% = 0.003\%$$

总增碳量:

$$0.022\% + 0.003\% = 0.025\%$$

答: 每吨钢水加高碳 Fe-Mn 合金 3.58kg, 中碳 Fe-Mn 合金 3.35kg, 合金增碳量为 0.025%。

4.9.5.2 镇静钢二元合金加入量确定

镇静钢使用两种以上合金脱氧时, 合金加入量计算步骤如下:

- (1) 若用单一合金 Fe-Mn 和 Fe-Si 脱氧时, 分别计算 Fe-Mn 和 Fe-Si 加入量。
- (2) 若用 Mn-Si 合金、Fe-Si、Al-Ba-Si 等复合合金脱氧合金化时, 先按钢中锰含量中限计算 Mn-Si 加入量, 再计算各合金增硅量; 最后把增硅量作残余成分, 计算硅铁补加数量。

(3) 当钢中 $\frac{w[\text{Mn}]_{\text{中}} - w[\text{Mn}]_{\text{余}}}{w[\text{Si}]_{\text{中}}}$ 比值低于硅锰合金中 $\frac{w(\text{Mn})}{w(\text{Si})}$ 比值时, 根据硅含量计算 Mn-Si 合金加入量及补加 Fe-Mn 量。

例 4-5 冶炼 16Mn 钢, 若采用 Mn-Si、Al-Ba-Si、Ca-Si 合金脱氧合金化, 每 1t 钢水加 Al-Ba-Si 合金 0.70kg、Ca-Si 合金 0.65kg, 计算 Mn-Si 合金和 Fe-Si 合金加入量。各种合金成分见表 4-32。

表 4-32 各种合金成分

项 目	w/%		
	C	Si	Mn
Mn-Si	1.7	18.5	68.0
Fe-Si		75	

续表 4-32

项 目	w/%		
	C	Si	Mn
Al-Ba-Si	0.15	42	
Ca-Si	0.85	56	
16Mn	0.14~0.22	0.20~0.60	1.20~1.60
$\eta/\%$	90	80	85

设 $w[\text{Mn}]_{\text{余}} = 0.13\%$, 计算合金加入量。

解: 先计算 Mn-Si 加入量:

$$\begin{aligned} \text{Mn-Si 合金加入量} &= \frac{\text{钢种规格中限} - \text{终点残余成分}}{\text{铁合金中合金元素含量} \times \text{合金元素吸收率}} \times 1000 \\ &= \frac{1.40\% - 0.13\%}{68\% \times 85\%} \times 1000 = 21.97\text{kg/t} \end{aligned}$$

$$\text{增硅量} = \frac{\text{合金加入量} \times \text{合金硅含量} \times \text{硅吸收率}}{1000} \times 100\%$$

21.97kg Mn-Si 合金增硅量:

$$\text{增硅量} = \frac{21.97 \times 18.5\% \times 80\%}{1000} \times 100\% = 0.325\%$$

每吨钢水加入 0.70kg Al-Ba-Si 和 0.65kg Ca-Si 合金的增硅量:

$$\text{Al-Ba-Si 合金增硅量} = \frac{0.70 \times 42\% \times 80\%}{1000} \times 100\% = 0.0235\%$$

$$\text{Ca-Si 合金增硅量} = \frac{0.65 \times 56\% \times 80\%}{1000} \times 100\% = 0.0291\%$$

因 Si 量不足, 补加 Fe-Si 量:

$$\begin{aligned} \text{Fe-Si 加入量} &= \frac{\text{钢种规格中限} - \text{终点残余成分}}{\text{铁合金中合金元素含量} \times \text{合金元素吸收率}} \times 1000 \\ &= \frac{0.40\% - 0.325\% - 0.0235\% - 0.0291\%}{75\% \times 80\%} \times 1000 = 0.373\text{kg/t} \end{aligned}$$

答: 每吨钢水需加 Mn-Si 合金 21.97kg, Fe-Si 合金 0.373kg。

4.9.6 合金元素的收得率影响因素

在氧气顶吹转炉炼钢中, 合金元素的收得率受很多因素的影响, 如脱氧前钢水含氧量、终渣的氧化性及元素与氧的亲合力等。

(1) 脱氧前钢水的含氧量。脱氧前钢水的含氧量越高, 合金元素的烧损量越大, 收得率越低。例如, 用“拉碳法”吹炼中、高碳钢时, 终点钢水的氧化性弱, 收得率就更高; 反之, 吹炼低碳合金元素烧损少, 收得率高, 如果钢水温度偏高, 收得率就更高; 反之, 吹炼低碳钢时, 终点钢水的氧化性强, 合金的收得率低。

(2) 终渣的氧化性。终渣的氧化性越强, 合金元素的收得率越低。因为终渣中

的 (ΣFeO) 含量高时, 钢水中的含氧量也高, 使合金元素收得率降低; 而且合金元素加入时, 必然有一部分消耗于炉渣脱氧, 使收得率更低。

由于氧气转炉的合金化操作多是在钢包中进行的, 所以, 出钢时出钢口或炉口下渣越早, 下渣量越大, 合金元素的收得率降低越明显。

(3) 钢水的成分。钢水的成分不同, 合金元素的收得率也不同。表 4-33 为某厂转炉钢元素收得率的经验数据。成品钢规格中元素含量高, 合金加入量多, 烧损量所占比例就小, 收得率就提高。例如, 冶炼含硅钢用硅铁进行脱氧合金化时, 硅的收得率可达 85%, 较一般钢种提高 10% 以上。

表 4-33 某转炉合金化时元素的收得率

钢种	元素收得率/%				
	Mn		Si		V
	Fe-Mn (68%Mn)	Mn-Si	Fe-Si (75%Si)	Mn-Si	Fe-V (45%V)
16Mn	85		80		
20g	78		66		
35 号	85		75		
20MnSi	85		75~80		
25MnSi	88	85~90	80	80	
45MnSiV	90		85		75
沸腾钢	终点碳 0.06%~ 0.09%	70~75			
	终点碳 0.10%~ 0.16%	75~82	85~90	80	
镇静钢	终点碳 0.06%~ 0.09%	73~78	75~80	70~75	75
	终点碳 0.10%~ 0.16%	77~83	80~85	75~80	80

同时使用几种合金脱氧和合金化时, 强脱氧剂用量增多, 则和氧亲和力小的合金元素的收得率就提高。例如, 冶炼硅锰钢时由于硅铁的加入, 可使锰的收得率从

一般钢种的 80%~85% 提高到 90%。显然, 加铝量增加时, 硅、锰的收得率都将有所提高。

(4) 钢种。沸腾钢只有含碳量和含锰量的要求, 含硅量越低越好, 所以只用锰铁进行合金化操作, 而且全部加在钢包内; 镇静钢中碳、锰、硅是常存元素, 所以需要加入锰铁、硅铁、硅锰合金等进行合金化操作, 显然沸腾钢调成分时合金元素的收得率与镇静钢合金化时的不会相同。

4.9.7 铁合金供应设备

铁合金的供应系统一般由炼钢厂铁合金料间、铁合金料仓及称量和输送、向钢包加料设备等部分组成。

铁合金由铁合金料间运到转炉车间的方式有以下两种:

(1) 铁合金用量不大的炼钢车间。将铁合金装入自卸式料罐, 然后用汽车运到转炉车间, 再用吊车卸入转炉炉前铁合金料仓。需要时, 经称量后用铁合金加料车经溜槽或铁合金加料漏斗加入钢包。

(2) 需要铁合金品种多、用量大的大型转炉炼钢车间。铁合金加料系统有两种形式:

1) 铁合金与散状料共用一套上料系统, 然后从炉顶料仓下料, 经旋转溜槽加入钢包, 如图 4-111 所示。这种方式不另增设铁合金上料设备, 而且操作可靠, 但稍微增加了散状材料上料胶带运输机的运输量。

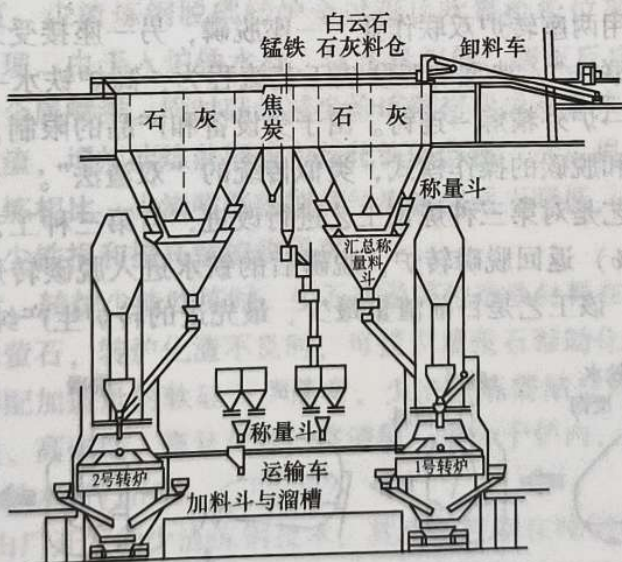


图 4-111 美国扬斯顿公司芝加哥转炉散状料及铁合金系统

2) 铁合金自成系统用胶带运输机上料, 有较大的运输能力, 使铁合金上料不受散状原料的干扰, 还可使车间内铁合金料仓的贮量适当减少。对于规模很大的转炉车间, 这种流程更可确保铁合金的供应。但增加了一套胶带运输机上料系统, 设备重量与投资有所增加。