

◎ 刘云彩 著

现代高炉操作



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

现代高炉操作

刘云彩 著

北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本书以降低高炉炼铁成本、提高竞争力为目标,系统讲解高炉操作的原则和方法,总结成功经验和失败教训,追求高炉操作的科学性。

本书可供高炉炼铁生产人员、科研人员、设计人员、管理人员、教学人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代高炉操作/刘云彩著. —北京:冶金工业出版社,
2016.5

ISBN 978-7-5024-7233-7

I. ①现… II. ①刘… III. ①高炉炼铁 IV. ①TF53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 084721 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 刘小峰 美术编辑 吕欣童 胡 雅 版式设计 杨 帆

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7233-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 5 月第 1 版,2016 年 5 月第 1 次印刷

169mm×239mm;23.25 印张;456 千字;358 页

69.00 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

2000年初，中国金属学会李静安先生要我为高炉技术竞赛写一本小册子《高炉操作》，一年内完成，我当即答应。当时以为，高炉操作讲稿积累不少，写起来不会很困难。同年四月，草拟写作提纲，征求意见，得到我国几位高炉操作专家的许多宝贵启发：张寿荣院士指示，书的“指导思想从追求规模指标走向集约化”“集约化的目标是降低成本，提高竞争力”；徐矩良教授指出，要强调“高炉操作的科学性，不应不切实际的盲目追求”。我在写作中，努力遵循这些指示。写了两章草稿，感到困难很多，恰在此时收到美国高炉专家 Arthur Cheng 应我要求寄来的部分论文、讲稿及美国的高炉操作资料。我在重新思考后，知道这是一个艰巨任务，短期无法完成。我向李静安先生说明确实无法兑现，而且也说不准何时完成。15年过去了，终于了却此心愿。

本书是按个人理解和经历，系统讲解高炉操作的原则和方法，写出成功经验和失败教训的专著。书中讲解我们的经验，包括我的合作者、同事及共同讨论的高炉工作者的经验。

1956年8月我从学校毕业，分配到石景山钢铁厂（首都钢铁公司前身）炼铁部，炉长刘万元是我高炉操作的启蒙导师。我劳动实习几天后进值班室，先后做过代理副工长、副工长、工长、技术室的技术员、工程师、副厂长、厂长，期间工作虽多变动，但始终围绕高炉转，还做过两年多高炉炉前工。20世纪60年代以后，有机会到兄弟厂学习、交流，有时参与处理高炉操作问题，或协助工作，或讨论高炉操作。在这些活动中，我和这些厂的高炉工作者，促膝讨论，受益良多。又曾在1990年由中国金属学会主办的“高炉学习班”及冶金工业部主办的“炼铁厂厂长学习班”（1986年、1991年）讲过高炉操作；两次为首钢“高炉工长、炉长高炉操作培训班”主讲高炉操作。上述活动，积累了一些高炉操作讲稿。因此，这本书中也包括兄弟厂的高炉操

作经验，如有不当之处，是我理解有误，欢迎提出批评，以便修正。

在高炉操作中经常遇到难题，除和同事讨论外，也经常查阅文献，了解他人的经验和思路。感谢首钢当年的领导，要求、鼓励技术人员阅读文献，不仅提高处理问题能力，同时也了解炼铁生产动态。这一习惯，受益一生。

书中所引的文献，有原文也有译文，为便于查阅，凡有中文译文的，也一并列出。

感谢徐矩良、王筱留、韩汝玢、王维兴、于仲洁、张建良、汤清华、由文泉、刘征建、黄琳基和刘小峰等诸位老友，他们为审查初稿内容和观点花费了宝贵的时间和精力，有的逐段、逐字修改，有的删除错误、补充图表，有的提出坦率意见，刘小峰编辑在每页原稿上都留下了修订痕迹。他们为本书改进做出的贡献，终生难忘！

杨天钧教授和张建良教授多方关心、支持本书写作，经常了解写作中遇到的困难，提供具体帮助。没有他们真诚的鼓励和帮助，很难完成此项工作。他们的助手刘征建老师、祁成林老师，以及他们的博士生李峰光、焦克新、代兵，多次为我查找文献、编制程序，在此一并致谢！

多年的操作实践体会到，把高炉操作建立在科学的基础上，不是就事论事，减少对经验的依赖和束缚、减少操作的盲目性，是推动高炉操作所必须的。我依走过的路写这本书，是否合适，请读者评阅。

刘云彩

2015年12月28日

目 录

绪论——炼铁过去和现在	1
0.1 炼铁的起源和发展	1
0.1.1 块炼铁——古老的炼铁方法	2
0.1.2 高炉的发明——炼铁生产的第一次革命	5
0.1.3 高炉起源于炼铜炉	5
0.2 高炉冶炼的发展	6
0.2.1 战国到西汉，高炉容积扩大期	6
0.2.2 强大的生产组织和质量管理	7
0.2.3 鼓风设备和椭圆高炉的发明	9
0.2.4 熔剂的使用	11
0.2.5 我国公元以前年代铁的化学成分	12
0.2.6 东汉到明朝——新技术创造期	14
0.3 我国古代炼铁和欧洲炼铁比较	18
0.3.1 我国高炉炼铁的重要创造	19
0.3.2 欧洲高炉发展	19
0.3.3 欧洲炼铁水平后来居上	21
0.3.4 高炉生产水平的变迁	22
0.3.5 高炉最早出现在中国的原因	24
0.4 直接还原——块炼铁的“复活”	24
0.4.1 直接还原铁生产的主要国家	24
0.4.2 直接还原铁生产的主要方法	25
0.4.3 转底炉法	27
0.5 熔融还原——炼铁二次革命	28
0.5.1 Corex 法	28
0.5.2 Finex 法	29
0.5.3 Hismelt 法	30
0.6 结语	31
参考文献	31
1 高炉生产概论	35
1.1 炼铁在钢铁企业中的地位	35

1.2 决定高炉生产水平的条件	35
1.3 高炉操作的任务	37
1.3.1 高炉顺行、稳定	37
1.3.2 合理使用炉料	38
1.4 高炉顺行、稳定的前提	38
参考文献	41
2 活跃炉缸	42
2.1 焦炭燃烧区与鼓风动能	43
2.1.1 焦炭燃烧区	43
2.1.2 鼓风动能与回旋区	45
2.1.3 鼓风动能与风速	47
2.2 下部调剂	47
2.2.1 风量水平	48
2.2.2 风速或鼓风动能的确定	49
2.2.3 风速、鼓风动能和冶炼强度的关系	50
2.2.4 回旋区长(深)度	51
2.2.5 回旋区的作用	54
2.2.6 风口长度	55
2.2.7 风口角度	56
2.2.8 堵风口操作	57
2.2.9 理论燃烧温度	57
2.3 合适风速(鼓风动能)的经验判断与调剂	58
2.4 风口烧损和预防	58
2.4.1 风口烧损的原因	60
2.4.2 风口破损的处理	61
2.5 炉缸堆积和预防	62
2.5.1 炉缸堆积的征兆	62
2.5.2 炉缸堆积的主要原因	64
2.5.3 炉缸堆积的处理原则和方法	70
2.5.4 预防炉况失常的措施	76
参考文献	77
3 料柱结构与控制煤气分布	79
3.1 高炉料柱结构	80
3.1.1 炉料特征	80
3.1.2 高炉布料的作用	81

3.2 炉料分布和煤气分布	82
3.2.1 炉料分布和软熔带	82
3.2.2 软熔带高度	84
3.3 观察与判断煤气流分布	86
3.3.1 径向煤气流速和煤气温度	86
3.3.2 直接观察	88
3.3.3 仪表综合判断	89
3.3.4 由非正常炉况判断煤气分布	91
3.4 适应高炉冶炼条件的煤气分布	91
3.4.1 选择适应冶炼条件的煤气分布	91
3.4.2 确定相应的炉料分布	92
3.4.3 料线和批重	92
3.4.4 利用装料制度改善顺行	94
3.4.5 提高煤气利用率——由Ⅱ型煤气分布变Ⅲ型	95
3.5 炉料分布计算	99
3.5.1 布料落点计算公式	99
3.5.2 布料落点计算程序使用说明	100
3.6 边缘气流与中心气流调控	104
3.6.1 边缘煤气分布的危害	104
3.6.2 中心煤气流控制	105
3.6.3 取消中心加焦	107
3.7 渣皮脱落	108
3.7.1 渣皮脱落的特征	108
3.7.2 渣皮脱落与边缘管道	111
3.7.3 铜冷却壁与渣皮脱落	112
3.7.4 渣皮脱落的危害	112
3.8 上下部调剂相适应	113
参考文献	115
4 稳定炉温	117
4.1 铁水特性	117
4.1.1 铁水的熔点	117
4.1.2 温度对碳溶解度的影响	118
4.1.3 不同元素对碳溶解度的影响	118
4.1.4 现代高炉铁中含碳量	119
4.1.5 铁水中的微量元素	120
4.2 铁水在炉缸的状态	121

4.2.1 实测炉缸铁水状态	121
4.2.2 铁水成分波动	121
4.2.3 铁水成分波动幅度的确定	123
4.3 控制炉温	123
4.3.1 判断炉温的指标	123
4.3.2 炉温判断	124
4.3.3 影响炉温的主要参数	125
4.3.4 各参数的作用时间	127
4.3.5 炉温控制的方法	128
4.3.6 料速变化	129
4.4 喷煤操作	129
4.4.1 我国的喷煤	129
4.4.2 煤粉的作用	132
4.4.3 煤粉燃烧	133
4.4.4 喷煤对冶炼周期的影响	134
4.4.5 用煤粉调剂炉温	134
4.5 低硅铁冶炼	136
4.5.1 低硅铁生产	136
4.5.2 我国的实践	139
4.6 炉缸冻结及处理	139
4.6.1 炉缸冻结的原因及类型	140
4.6.2 称量错误导致的炉缸冻结	141
4.6.3 炉缸冻结的处理方法	145
4.6.4 净焦量	146
4.7 改铁操作	146
4.7.1 炼钢铁改铸造铁	146
4.7.2 铸造铁改炼钢铁	148
4.7.3 改铁总结	149
4.8 调剂炉温的专家系统	149
4.8.1 高炉过程自动控制的开发研究	149
4.8.2 高炉专家系统	152
参考文献	153
5 控制炉渣成分	155
5.1 铁水质量控制	156
5.1.1 铁中硫的危害	156
5.1.2 硫的分布及计算公式	156

5.1.3 炉渣碱度	160
5.1.4 硫分配系数的比较	161
5.2 稳定的炉渣和黏度	164
5.2.1 稳定的炉渣	164
5.2.2 MgO 对炉渣黏度的影响	165
5.2.3 McCaffery 黏度图分析	166
5.2.4 炉渣中 Al_2O_3 和 MgO 比例的确定	168
5.3 特殊功能炉渣	169
5.3.1 清理结瘤	170
5.3.2 利用炉渣排出碱金属	171
5.3.3 利用炉渣处理贫矿	174
参考文献	177
6 出铁出渣	179
6.1 高炉上推力	180
6.1.1 上推力的作用	180
6.1.2 保持高炉上推力稳定	180
6.2 出铁	181
6.2.1 铁水在炉缸的运动	181
6.2.2 出铁速度	182
6.2.3 铁水黏度	183
6.2.4 连续出铁	184
6.3 出渣	185
6.3.1 炉渣在炉芯带内的流动	185
6.3.2 不放上渣	185
6.3.3 稳定上推力	186
6.4 出铁过程排出的气体	188
6.5 深刻的教训	189
参考文献	190
7 高炉基本操作	191
7.1 炉料下降运动	192
7.2 直接观察和操作曲线识别	194
7.2.1 高炉工长的贡献和作用	195
7.2.2 合理追求, 务实操作	195
7.2.3 把握时机, 当机立断	198
7.3 管道	199

7.3.1	形成管道的原因	199
7.3.2	管道的处理	200
7.3.3	罕见的真实管道	200
7.3.4	管道的类别和特征	200
7.3.5	管道与偏尺	203
7.4	塌料与悬料	205
7.4.1	管道与塌料	205
7.4.2	悬料机理	207
7.4.3	料尺分类	209
7.4.4	悬料的处理与教训	210
7.4.5	难行状态下的加风	217
7.4.6	难行亏尺或坐料后亏尺的加料	218
7.5	操作教训	219
7.5.1	控制放风	219
7.5.2	坐料后的放风	219
7.5.3	低炉温时的坐料	219
7.6	高炉顺行指数	220
7.6.1	顺行的炉况	220
7.6.2	利用顺行指数比较本厂高炉的顺行水平	222
7.7	异常炉况的专家系统	223
	参考文献	224
8	高炉烧穿的预防和处理	226
8.1	炉缸烧穿是一个过程	226
8.1.1	炉缸在哪里经常烧穿?	226
8.1.2	“突然”烧穿的原因	229
8.1.3	减少象脚型侵蚀	229
8.1.4	出铁速度	232
8.1.5	重点检测哪里?	232
8.2	炉缸烧穿及处理	233
8.2.1	炉缸烧穿前的征兆	233
8.2.2	侵蚀速度	234
8.2.3	减小烧穿损失	237
8.2.4	烧穿后的修复	238
8.3	炉底烧穿	240
8.3.1	事故经过	240
8.3.2	合理的炉底结构	242

8.3.3 铅渗透和炉底冷却装置的破坏	243
8.3.4 炉底冷却装置的检查	245
8.4 陶瓷杯结构	245
8.4.1 陶瓷杯的实践	246
8.4.2 我国专家对陶瓷杯结构的争议	249
8.4.3 陶瓷杯炉底炉缸结构的优势	251
8.5 补炉操作	252
8.5.1 对预防烧穿操作方法的评价	252
8.5.2 用含钛炉料补炉的历史	253
8.5.3 钛回收率	255
8.5.4 钛化物在炉缸的形成与沉积	256
8.5.5 为什么补炉后依然烧穿?	260
8.5.6 含钛炉料补炉效果	264
8.5.7 补炉操作的优点和缺点	264
8.6 炉体膨胀和炉皮开裂	265
8.6.1 炉皮开裂	265
8.6.2 开裂原因	266
8.6.3 避免开裂的措施	267
8.6.4 膨胀导致的炉皮开裂	267
8.7 灌浆、压入和喷涂造衬	267
8.7.1 灌浆	268
8.7.2 热面灌浆	268
8.7.3 硬质料压入造衬	269
8.7.4 喷涂造衬	269
8.8 预防炉体破损	271
8.8.1 高炉结构决定高炉寿命	271
8.8.2 炉衬材质	271
8.8.3 冷却系统	272
8.8.4 施工质量	272
8.8.5 控制有害元素入炉量	273
8.8.6 补炉操作	273
8.8.7 争取时间的临时措施	273
8.8.8 合理烘炉	274
8.8.9 完善、严格检测制度	274
参考文献	274
9 高炉结瘤	277
9.1 结瘤的征兆	278

9.1.1	结瘤部位的隔热	278
9.1.2	结瘤改变炉料分布	280
9.1.3	结瘤对炉缸的影响	283
9.1.4	结瘤后的操作特点	283
9.1.5	结瘤特征	284
9.2	炉瘤的组织结构和形成过程	285
9.2.1	炉瘤的组织结构	285
9.2.2	炉瘤的物理特性	286
9.2.3	炉瘤中粘结相的作用	286
9.2.4	炉瘤的形成	287
9.3	炉瘤位置的判断	288
9.3.1	探孔法	288
9.3.2	传热计算法	289
9.3.3	降料面观察法	289
9.4	结瘤的处理	289
9.4.1	高炉炉瘤是运动的,能增长,也能脱落	290
9.4.2	洗炉	291
9.4.3	降料面法处理炉墙结瘤	295
9.4.4	爆破除瘤	297
9.5	预防结瘤	301
	参考文献	305
10	开炉操作	307
10.1	开炉前的准备工作	307
10.1.1	人员配备与培训	307
10.1.2	设备试车与验收	307
10.1.3	炉料和备品、备件准备	307
10.1.4	上下工序的状况调研	308
10.2	烘炉	308
10.2.1	热风炉烘炉	308
10.2.2	高炉本体烘炉准备	309
10.2.3	烘炉温度控制	311
10.2.4	烘炉结束与凉炉	312
10.2.5	严格操作,杜绝事故	313
10.3	开炉的冶炼指标和配料计算	313
10.3.1	开炉总焦比和开炉料的选择	313
10.3.2	计算方法	314

10.4 全焦开炉	315
10.5 含铁炉料的位置	317
10.6 装炉及测料面	318
10.6.1 装料前的工作	318
10.6.2 按计划安排次序加料	318
10.6.3 合理布料, 应从开炉填料时开始	318
10.6.4 测量料面	320
10.7 点火与送风	320
10.7.1 点火烘料操作	320
10.7.2 风口参数选择	321
10.7.3 点火	323
10.7.4 加料	326
10.7.5 送气	328
10.8 出铁	328
10.8.1 出铁时间的确定	328
10.8.2 出第一次铁应考虑开铁口所需时间	330
10.8.3 有些厂在开炉出铁方面的创造	330
10.9 后续操作	330
10.9.1 改变装料	330
10.9.2 加负荷条件与加负荷	330
10.9.3 降铁水含硅量速度	330
10.9.4 加风速度	331
10.9.5 加风过程与装料制度相适应	331
参考文献	331
11 停风、封炉和停炉	332
11.1 短期停风	333
11.1.1 短期停风特点	333
11.1.2 短期停风操作程序	333
11.1.3 短期停风后送风程序	333
11.1.4 停送风注意事项	334
11.2 突然停风	334
11.2.1 突发事件的停风	335
11.2.2 紧急停水	335
11.2.3 鼓风机突然停风	336
11.2.4 紧急停电	336
11.3 长期停风	336

11.3.1	停风准备工作	337
11.3.2	停风程序 (第一步)	337
11.3.3	炉顶点火	337
11.3.4	停风程序 (第二步)	338
11.3.5	长期停风注意事项	339
11.4	降料面	339
11.4.1	停气降料面的缺点	339
11.4.2	全风降料面实践	340
11.5	封炉	341
11.5.1	封炉要点	341
11.5.2	封炉实例	342
11.5.3	经验教训	344
11.5.4	封炉小结	345
11.6	停炉	345
11.6.1	安全、快速降料面	345
11.6.2	利用煤气成分变化判定料面深度	345
11.6.3	控制煤气中 H_2 、 O_2 量, 杜绝煤气爆震	346
11.6.4	放出全部残铁	348
	参考文献	351
12	高炉爆炸	352
12.1	煤气爆炸	353
12.1.1	高炉煤气爆炸的必要条件	353
12.1.2	1 号高炉炉内煤气爆炸的原因	353
12.1.3	混合形成爆炸煤气后发生的爆炸	354
12.1.4	预防煤气爆炸	355
12.1.5	炉内打水爆震和爆炸	356
12.2	铁水遇水发生爆炸	357
	参考文献	358

绪论——炼铁的过去和现在

0.1 炼铁的起源和发展

人类最早炼铁，是在近东和东地中海地区，到 1980 年止，这一地区发现的早期铁器见表 0-1^[1]。

表 0-1 早期铁器

公 元 前	陨 铁	人工冶炼	未经分析	合 计
3000 年以前	4	1	9	14
3000 ~ 2000 年	6	6	10	22
2000 ~ 1600 年	0	2	6	8
1600 ~ 1200 年	18	0	56	74
总 计	28	9	81	118

公元前 12 世纪，铁器在上述地区日渐增多，到公元前 10 世纪，已相当普遍。历史学家把铁器普遍应用时期叫铁器时代。欧洲进入铁器时代大约在公元前 8 世纪，铁器时代欧洲的铁相当贵。荷马史诗《伊利亚特》描写铁器时代的运动会，摔跤冠军得了一个三条腿的大铁锅，其价格相当 12 头公牛^[2]。

从考古遗存的铁器判断，我国新疆地区早在公元前 1000 年以前已有铁器，到 2010 年为止，中原地区约在公元前 800 ~ 900 年也有铁器出土^[3,4]。

中国文献上第一次出现“铁”字，是成书于战国中期的《左传》。它记录了公元前 513 年晋国铸刑鼎的事件：“晋赵鞅、荀寅帅师城汝滨，遂赋晋国一鼓铁，以铸刑鼎”^[5]。有的考古学家认为“一鼓铁”其意不通，应为“一鼓钟”。其实，“一鼓铁”可能是计量单位，是指炼炉的产量。春秋时期高炉较小，寿命短，从点火开炉到炉破停止鼓风，一炉炼出的铁量叫“一鼓”，这是对铁量的简练概括。现在可以从“一鼓铁”的量中做大致的推测：按吴承洛研究^[6]，“一鼓”重 16 钧，一钧为 30 斤，周朝一斤相当 0.4577 市斤，依此折合一鼓铁约 220 市斤即 110 公斤。这可能是当时一代高炉冶铁水平的反映。

20 世纪中期，我国出土的早期铁器中，很少是铸造铁，所以当时专家们怀疑春秋或以前不大可能“铸刑鼎”；到 2010 年为止，已有较多的早期铁器出土，其中就有铸件。显然，“铸刑鼎”，在当时已经可能，过去的争议也许应有新的认识。

公元前 580 年前后铸造的“齐侯钟”，铭文上有“造戔徒四千”一段文字。郭沫若指出“戔”是铁字的古写^[7]，是有道理的：“戔”字从“土”从“戈”，从“土”因可做农具破土，从“戈”因可做武器作战。在古代金属中，兼有这两种功能的只有青铜和铁。“铜”当时已有固定字义，“戔”字只能指铁，虽然还不能证明是什么铁^[8]。

班簋是西周成康时期（约公元前 1000 年）的青铜器，上面铸有 190 余字，其中有：“邦冢君、土驭、戔人伐东国”一句，郭沫若认为可能也是古铁字，也有人不同意。

中国古代第一部诗歌总集《诗经·秦风·駉“骥”》篇中的“骥”字，也与铁字有关，虽然专家们意见不同。

把上述各字按时间顺序，排成表 0-2^[9]。

表 0-2 中国古代可能的“铁”字

年代（公元前）	~1000 年	777 ~ 766 年	581 ~ 554 年	513 年
字 形	戔	駉	戔	鐵

0.1.1 块炼铁——古老的炼铁方法

早期生产铁用块炼炉（图 0-1），将铁矿石和木炭放到简陋的炉内，靠木炭燃烧将矿石中的铁直接还原出来，所以是“直接还原”炼铁。由于炉内温度较低，还原出来的铁及渣滓均呈固态，渣滓及铁混在一起，又不能流动，必须把炉子下部拆掉，将铁渣掏出来，经反复锤打挤出渣滓并渗碳，才能利用。这种铁叫块炼铁。

块炼炉在欧洲一直用到 14 世纪（图 0-2），块炼炉对欧洲以及世界许多国家、地区，作出了重要贡献。图 0-3 是世界著名的印度德里铁柱，高 7.2 米(图 0-4)，

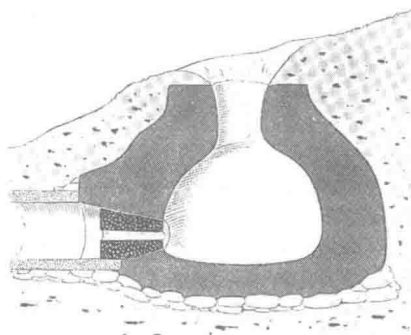


图 0-1 早期的块炼炉^[10]

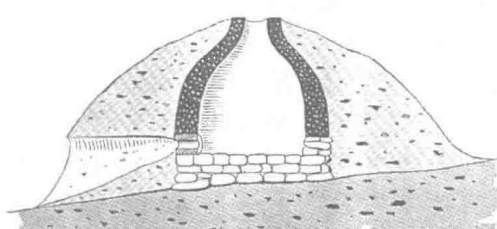


图 0-2 拉丁时期的块炼炉