

冲天炉熔炼理论 与实践

〔日〕石野 亨 著 吴炳尧 译

南京工学院出版社

キ
ユ
ポ
ラ

232.1

冲天炉

熔炼理论与实践

[日] 石野 亨 著

吴炳尧 译

W92 114

南京工学院出版社

1988.6



B- 529358

特约编辑 赵敏生
责任编辑 施 恩
责任校对 吕 崑

冲天炉熔炼理论与实践

〔日〕石野 亨 著 吴炳尧 译

南京工学院出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 江苏省大丰县印刷二厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 13.5印张 字数312千字

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

印数 1—5000册

ISBN 7-81023-110-3

TH·2

定价: 3.15 元

著 者 序

我自1943年10月始曾在早稻田大学理工学部应用金属学科就读三年。当时，该校校长是田中穗积先生，理工学部部长是山本忠兴先生。

师长们的音容笑貌至今犹在。记得讲授铸造学的石川登喜治先生讲课时老擦鼻子，他使用的是G. Tammann和H. Schenck著的德语教本；给我们讲授令人头痛的金属物理学的是田崎正浩先生；讲授难懂的理论化学的是鹿岛次郎先生，他还从事铸件粘砂机理的研究工作；指导我们生产实习和制图设计的是年轻而富有热情的加山延太郎和叶山房夫两位先生。

早稻田大学的铸造研究所创建于1938年，同年在理工学部创设了应用金属学科。作为创建人的石川先生兼任研究所所长和应用金属学科主任。记得我们应用金属学科的学生每天都要走过座落在大学校园附近土坡上的铸造研究所，而且曾几次参观当时铸造生产兴旺发达的“冲天炉街川口”。就这样，大学生生活中的大部分活动与铸造联系在一起。

1984年7月，近畿大学的校友曾为我在大阪皇家饭店举行了庆祝六十寿诞的盛会，铸造业各界人士云集一堂。席间，新日本铸锻造协会百理理事长希望我为纪念花甲之年作点贡献，这就是促使我出版本书的起因。

我对学生时代铸造研究所的气氛深铭难忘，加之从那以后有幸始终从事铸造业工作，所以我决心根据所收集的数据、资料，编写出一本有关冲天炉的专著。

要在半年左右的时间内，利用讲课和研究工作之余，整理堆积如山的资料并完成初稿，无疑是件相当艰难之事。

在阅读众多有关论文的过程中，当出现疑点或准备选用某种装置和结构的照片时，往往急忙联络甚至深夜告扰，有时甚至再三询问和请求。

在此，向承允摘引其论文的著者以及提供资料照片的各方人士深表谢意。

在阅读第三次校印稿的过程中，深感有必要进行增补和订正，同时需调整之处亦不少。我要向欣然接受我的拙作并出版该书的竹谷忠彦氏，自始至终给予我鼓励和帮助的新日本铸锻造协会百理理事长和各方面的负责人，以及笔者所在研究室的米田博幸讲师表示感谢。

封面是请我所在单位的同事——建筑学科的楠田一夫先生设计的，在此谨致谢意。

1985年元旦

石野 亨

译者序

冲天炉是铸铁车间熔炼高温、优质、低耗铁水的关键设备。近年来,我国在冲天炉熔炼理论和新技术开发方面虽都有所进展,但系统介绍近代冲天炉熔炼技术的专著很少。为了满足这方面的需要,翻译了日本近畿大学教授石野亨的这本著作。

石野亨教授从事冲天炉研究三十余年,曾发表过数十篇有关冲天炉方面的论文,在国际上享有盛誉。他曾于1984年7月应邀来华讲授铸铁熔炼技术,受到国内同行们的一致好评。所讲授的内容均收录在这本书中。

译本原著系1985年4月出版,包括三大部分。第一部分系统论述了冲天炉熔炼的冶金和热工过程基本理论;第二部分详细介绍了各种冲天炉(包括特种冲天炉)的构造和操作方法,以及预热、富氧、脱湿送风等强化熔炼措施及其最新进展;第三部分讲述原材料控制、节能和环保等问题。书中收集了各国熔炼工作者近期的研究成果,代表了当前国际上冲天炉熔炼技术的发展水平。其特点是内容有新意,理论有深度,实践有侧重。

为了节省篇幅,译本中略去了原著的序言和第一章日本冲天炉发展史,调整了少量图表。对个别与我国不尽相同的概念或定义均在注释中作了必要的说明,以便于读者对照。限于译者业务和外文水平,译本中谬误与不当之处实属难免,敬请读者不吝指正。

吴炳尧

1986.5.

目 录

第一章 冲天炉熔炼机理

1—1 焦炭燃烧反应.....	1
1—2 铁料被氧化的时间和位置	5
1. 铁水中的氧(溶解氧和氧化物).....	5
2. 炉内各元素的氧化.....	8
3. 氧化物的还原.....	9
4. 铁料被氧化的时间和位置——总结.....	11
1—3 含碳量的变化.....	11
1. 早期研究结果.....	13
(1) 废钢在炉内增碳的位置和数量.....	13
(2) 焦炭的性质和增碳的关系.....	13
2. 炉内废钢增碳位置及增碳量.....	14
(1) 冲天炉冷冻实验.....	14
(2) 插钢丝实验.....	15
(3) 炉缸内增碳实验.....	17
3. 低碳金属炉料炉内增碳机理.....	17
(1) 固态金属料块从加料口到底焦顶面的增碳.....	18
(2) 处于熔融变形状态的废钢在底焦面附近的增碳.....	19
(3) 液滴从底焦顶面至炉缸的增碳.....	19
(4) 铁水在炉缸内的增碳.....	19
4. 影响冲天炉铁水含碳量的因素.....	22
5. 含碳量的变化——总结.....	22
1—4 含硫量的变化.....	22
1. 炉内硫的分配和变化概况.....	23
2. 固态金属料块的增硫.....	24
3. 铁水的增硫.....	26
1—5 冲天炉内热量的平衡(热平衡计算问题).....	27
1. 铸铁熔化的热效率.....	28
2. 炉内热平衡计算.....	30
(1) 与炉内热收入和热支出有关的因素.....	30
(2) 热收入的计算(Q_{in}).....	31
(3) 热支出的计算(Q_{out}).....	33
3. 冲天炉热平衡计算图.....	35

第二章 冲天炉结构和操作法基础

2—1 冲天炉各部分结构的比例和尺寸.....	38
-------------------------	----

1. 结构概述和基本尺寸	38
2. 炉径和熔化速度	38
3. 有效高度	39
4. 风口	42
(1) 风口形状	44
(2) 风口排数与个数	45
(3) 风口倾角	46
(4) 风口比	46
(5) 风口结构	50
5. 风箱	51
6. 炉缸	53
7. 炉底	54
8. 基础	55
9. 出铁、出渣方式和 前炉	55
(1) 间歇出铁、出渣和固定式前炉	55
(2) 连续出铁、出渣	56
(3) 回转前炉	58
10. 鼓风机	58
2—2 基本操作方法	61
1. 某些操作工艺因素与炉况、铁水性能的关系	61
(1) 焦炭	61
(2) 风口比	62
(3) 批料层(金属炉料与层焦)厚度	62
(4) 金属炉料(铸铁和废钢)入炉次序	65
(5) 炉渣的作用	67
2. 操作方法	73
(1) 修炉	73
(2) 配料	74
(3) 底焦高度、焦耗、批料重量	76
(4) 送风量的确定	79
(5) 操作步骤	81
2—3 操作管理	82
1. 管理项目	82
(1) 修炉	82
(2) 开炉前的准备	83
(3) 熔炼操作	83
(4) 熔炼结束	84
(5) 炉前检验	84
(6) 检测仪表和设备	87
2. 管理方法	87
(1) 频数分布	88

(2) Pareto 图	88
(3) 管理图	88

第三章 冲天炉结构与操作方法的改进

3—1 预热送风	89
1. 预热送风的效果	90
(1) 炉内温度分布和铁水温度	90
(2) 预热送风对铁水成分和性能的影响	91
2. 预热送风装置 I (外燃式)	96
3. 预热送风装置 II (利用冲天炉排放废气的余热)	99
(1) 安装在炉体上部换热器的构造	100
(2) 将冲天炉排放的废气导入换热器中的预热送风构造	102
4. 热风操作举例	104
(1) 炉体上部安装换热器的小型冲天炉	104
(2) 用具有弯管和双层套管结构换热器的小型冲天炉	104
(3) 炉体上部安装换热器的水套式水冷冲天炉	104
3—2 脱湿送风	106
1. 湿度的影响	108
2. 去湿装置	110
3. 脱湿操作实例	114
(1) 4吨/小时冲天炉	114
(2) 5吨/小时冲天炉	115
(3) 30吨/小时冲天炉	116
3—3 富氧送风	117
1. 富氧的效果	118
2. 富氧装置	121
3. 富氧操作举例	126
(1) 5吨/小时冲天炉	126
(2) 6吨/小时冲天炉	126
3—4 炉壁水冷和无炉衬结构以及长时间封炉操作	127
1. 日本小型冲天炉的水冷结构	127
(1) 采用水冷结构的炉况和热平衡计算结果	127
(2) 标准结构	130
(3) 事故及处理方法	131
2. 大型无炉衬水冷冲天炉的构造和长时间封炉操作实例	133
3—5 双层送风(2次燃烧)冲天炉的结构	136
1. 双层送风结构的开发经过	136
2. 双层送风时的炉况	137
3. 双层送风的效果	139
4. 双层送风的结构和操作实例	142
(1) 小型炉(熔化速度2吨/小时)的上排风口位于预热带时	142
(2) 中型炉(熔化速度3.5吨/小时)的上排风口位于熔化带时	143

(3) 大型炉(熔化速度30吨/小时)的上排风口位于熔化带时.....	143
3—6 喷吹固体粉料.....	146
1. 喷粉效果.....	146
2. 喷粉装置.....	148

第四章 特殊结构的冲天炉

4—1 燃气冲天炉.....	150
1. 燃气冲天炉的开发经过.....	150
2. 各国研制的燃气冲天炉构造和使用效果.....	151
(1) 苏联.....	151
(2) 美国.....	153
(3) 英国.....	154
(4) 联邦德国.....	156
4—2 竖炉炉体和反射炉组合式燃气冲天炉.....	156
4—3 添加流体燃料的冲天炉(清洁型特殊化铁炉).....	158
1. 特征和构造.....	158
2. 使用效果.....	161
4—4 中央送风冲天炉.....	162
4—5 附加电热器的冲天炉.....	163
4—6 底焦高度保持不变的冲天炉.....	163
4—7 鼓风下行式冲天炉.....	164

第五章 原 材 料

5—1 生铁.....	167
5—2 钢屑、废铁、回炉料.....	171
5—3 合金铁.....	171
5—4 还原铁和铁矿石.....	176
1. 还原铁的制作方法产量.....	176
2. 炉料中配入还原铁或铁矿石进行冲天炉熔炼的试验.....	176

第六章 燃料和耐火材料

6—1 燃料.....	182
1. 焦化工艺及设备.....	182
2. 焦炭性能.....	184
3. 液化石油气(LPG)、重油、煤油.....	184
6—2 耐火材料.....	189
1. 耐火材料的分类.....	189
2. 耐火材料的规格.....	193

第七章 公害与环境保护

7—1 各国对冲天炉排放物的规定标准.....	196
1. 各国制定标准概况.....	196
2. 各国冲天炉排放物的规定标准.....	197

(1) 法国.....	197
(2) 英国.....	197
(3) 联邦德国.....	198
(4) 瑞典.....	198
(5) 南斯拉夫.....	199
3. 日本的标准.....	199
7-2 冲天炉排放物.....	200
1. 种类和性状.....	200
(1) 冶金烟气.....	200
(2) 碳质烟气.....	200
(3) 粉尘.....	201
. 烟尘排放量及粒度分布.....	201
(1) 排放量.....	201
(2) 粒度大小及分布.....	201
(3) 成分.....	202
3. 排放炉气的成分(特别是硫化物).....	202
7-3 冲天炉除尘装置.....	202

第一章 冲天炉熔炼机理

冲天炉结构比较简单，呈圆筒形。金属料块入炉后在下行过程中与焦炭接触，同时吸收焦炭燃烧释放的热量，从而被预热、熔化和过热。

炉气的主要成份是鼓风中的 N_2 和 O_2 ，以及焦炭的燃烧产物 CO_2 和 CO 。此外还包括焦炭中硫分的氧化产物（主要是 SO_2 ）和焦炭与空气所含水分高温汽化分解产生的 H_2 和 O_2 ，还包括氮的氧化物（ NO_x ）和炉料中石灰石熔剂的分解产物 CO_2 等。

金属料块在炉内不仅吸热而且受焦炭及炉内气氛的影响发生增碳（或脱碳）、增硫。其余化学成分也因氧化或炉衬耐火材料的还原作用而改变。

本章论述炉内焦炭燃烧，炉料氧化、增碳、增硫等化学反应以及由此产生的成分变化，同时讨论炉内热交换和热平衡问题。

1-1 焦炭燃烧反应

自冲天炉底部到熔化带下沿全部充满着焦炭（第二章将说明，所谓底焦充填高度是从底排风口平面算起，一般为炉径的 1.5 倍。熔化过程中，小型炉的底焦高度一般保持在风口平面以上 600 毫米处，大型炉的底焦高度一般保持在风口平面以上 800 毫米处）。

自风口鼓入的空气首先与底焦中的炭发生燃烧反应：



生成 CO_2 。该反应伴有放热效应，每一摩尔碳放热 97.8 千卡，每公斤炭约放热 8080 千卡。

自风口鼓入的空气中的氧在焦炭表面附近与碳反应也可能先生成 CO ，即



然后 CO 又与附近的 O_2 反应生成 CO_2 ：



因此从风口送入的氧与焦炭中碳的反应最终只用式 (1) 说明就可以了。

该反应所放出的热量 (8080 kcal/kg(C)) 与炉料的预热、熔化、过热、造渣以及氧化物的还原等密切相关。在略高于风口平面的位置燃烧反应最为剧烈，实测炉气温度达 1700~1800℃。

当鼓风中的氧全部反应生成 CO_2 时，炉内温度最高。随着 CO_2 和 N_2 气体的上升， CO_2 与焦炭接触转变成 CO 气体。即



式 (4) 与式 (1)~(3) 不同。该反应每摩尔碳要吸收 37.4 千卡的热量，即每公斤碳约吸收 3265 千卡热。

由于式(4)为吸热反应,因此炉温越高,反应越易进行。同时因反应吸热,炉温将逐渐降低。考虑到常温炉料和焦炭投炉后的预热以及焦炭所含水份的蒸发,石灰石分解等吸热因素的影响,当 CO_2 气体上升到不能提供进行反应(4)所必需的热量位置时,则反应(4)终止。从该位置开始,直至加料口附近,炉内氧化性气氛强度的炉气成分比率均保持不变,当炉温大约为 1000°C 时,该反应十分缓慢近乎终止。在加料口下沿连续测定炉气中 CO 和 CO_2 的含量,以了解炉料大部分仍为固态的预热带内的炉气成分,该方法对于冲天炉熔炼过程的控制极为重要。(后面将谈到炉气的氧化性强弱对铁水氧化质量有很大影响)。

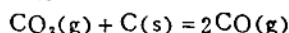
炉气中氮气只起携带热量的作用,不妨称之为载气。然而,鼓风中氮和氧的比例改变,则燃烧反应的速度和位置将相应改变。从氮气对铁水性质的影响和环境保护的角度分析,排出废气中含氮氧化物的数量也是一个问题。这些将在有关富氧操作,公害环保问题的章节中再行讨论。

图1为空气中的 O_2 按式(1)与碳反应生成 CO_2 ,然后按式(4)反应生成 CO 这一过程中 CO_2 、 CO 与 N_2 含量的比率关系。

在密闭的反应室内,若只通入 CO ,并保持一定的温度,则 CO 将分解为 CO 和 C :



反之,在密闭的反应室内置入 C 和 CO_2 ,则有 CO 生成:



这说明,在反应室内保持一定温度条件下,只通入 CO 气体时,既存在正向反应 $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$,又存在逆向反应 $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ 。同理,只通入 CO_2 和 C ,则反应 $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ 与反应 $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ 亦同时存在。当两个互逆反应速率相等时,则保持动态平衡。其动态平衡定量关系如图2所示。被称为Boudouard反应。从等压平衡图可见,当温度高于 1000°C 时,几乎只有 CO 存在。但是,必须看到由于金属料块在炉内滞留时间很短,在一般正常熔炼条件下,料块经预热、熔化、过热至出炉大约需要30分钟,其中料块化成熔滴后沿底焦的缝隙滴落至炉缸内大约为1~2分钟,因此,炉内实际反应结果与上述平衡关系差别很大。实际上,在靠近炉子上部炉气温度大约为 1000°C 处反应(4)几乎停止。有些冲天炉采取增设上排风口等措施,倘若不送氧气,即使加料口下沿,炉气中 CO_2 含

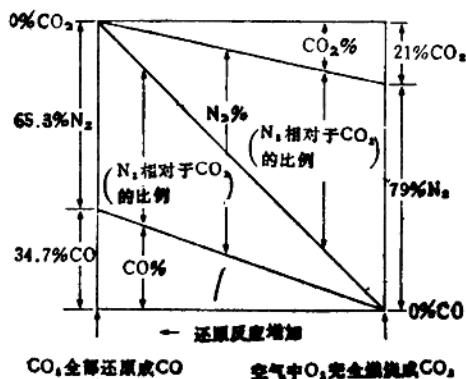


图1 空气中 O_2 与 C 反应生成 CO_2 与 CO 时各组分比率关系图

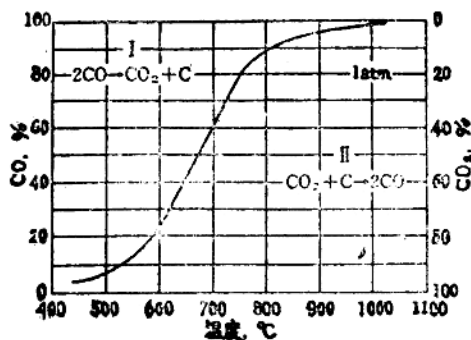


图2 1大气压下 $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$ 反应的平衡等压线(Boudouard反应)

量亦达8~13%。

P.Oberhoffer 和 E.P.wowarsky, R.Vogel 和 E.Piwowarsky, H.Jungbluth 和 H.Korschan, H.Jungbluth, S.C.Massari 和 R.W.Lindsay, D.Fleming, E.Piwowarsky 以及笔者很早就对炉内焦炭燃烧炉气成分问题进行了实测研究。笔者曾在内径 200 毫米的小型冲天炉上全面测量了炉气分布状况,结果如图 3 所示。与生产用普通冲天炉相比,这种供实验用小型冲天炉炉体上部区域的氧化性略强,但炉气成分分布的趋势还是由此可见一斑。根据更广泛的实测结果,整理出如图 4 所示的炉气分布和温度分布。

从图中可以看出:

a. 风口附近有尚未反应的空气,其成分是氧约占21%,氮约占79%,(左图 I 区)。沿径向向炉内深入以反应(1)为主, CO 数量迅速增加。

b. 在 I 区内, 反应(1)更剧烈, 氧气转化成 CO_2 的数量以及炉气温度均达到最大值。该区域内氧化性气氛特别强。

c. 炉气继续上升进入 II 区, 则反应(4)变得剧烈, CO 量逐渐增多, 炉内氧化性气氛减弱, 炉气温度也随之下降。

d. 炉气上升至 IV 区, 温度进一步下降, 反应(4)渐趋缓慢, 最后停止。

e. 反应终止后, 炉气成分至加料口下沿一直维持不变。但一般冲天炉内由于从加料口吸入了外界空气, 因此上升的炉气中有一部分 CO 在加料口附近燃烧成 CO_2 (近来, 多数冲天炉上采用在加料口下方将炉气导至外部换热器或集尘装置中的结构)。

空气中的氧与焦炭中的碳在炉内发生的上述反应首先起因于鼓风和焦炭的接触。反应进行的程度, 即反应(1)~(4)表现最剧烈的区域或者说炉气成分的不同分布状况受焦炭性质(如块度、灰分)、送风量、送风速度、送风温度以及炉壁散热条件(如水冷冲天炉)等多种因素的影响。而燃烧反应的程度又必然对铁水质量, 化学成分及铁水温度等产生影响。

冲天炉是与高炉具有基本相同结构的筒形炉。图 5 所示为两种熔炉的炉气成分和温度分布曲线。由于高炉以还原铁矿石为主要目的, 故焦炭块度按炉径考虑相对偏小, 使焦炭与氧气的接触面积增大, 有利于还原反应(4)的进行, 从而使炉内保持还原性气氛。冲天炉则不然, 它的目的是熔化和过热金属, 因此力求炉内反应(1)有较大发展, 与高炉相比, 炉内的氧化性气氛较强。

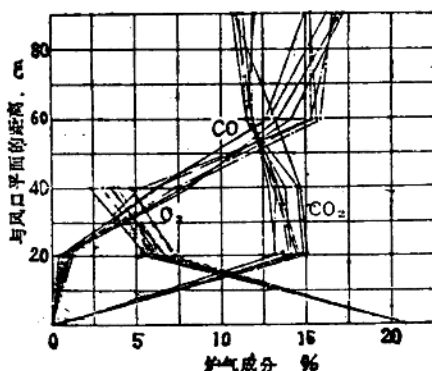


图3 炉气分布实测结果

(冲天炉内径200mm, 有效高度1000mm

风口比7)

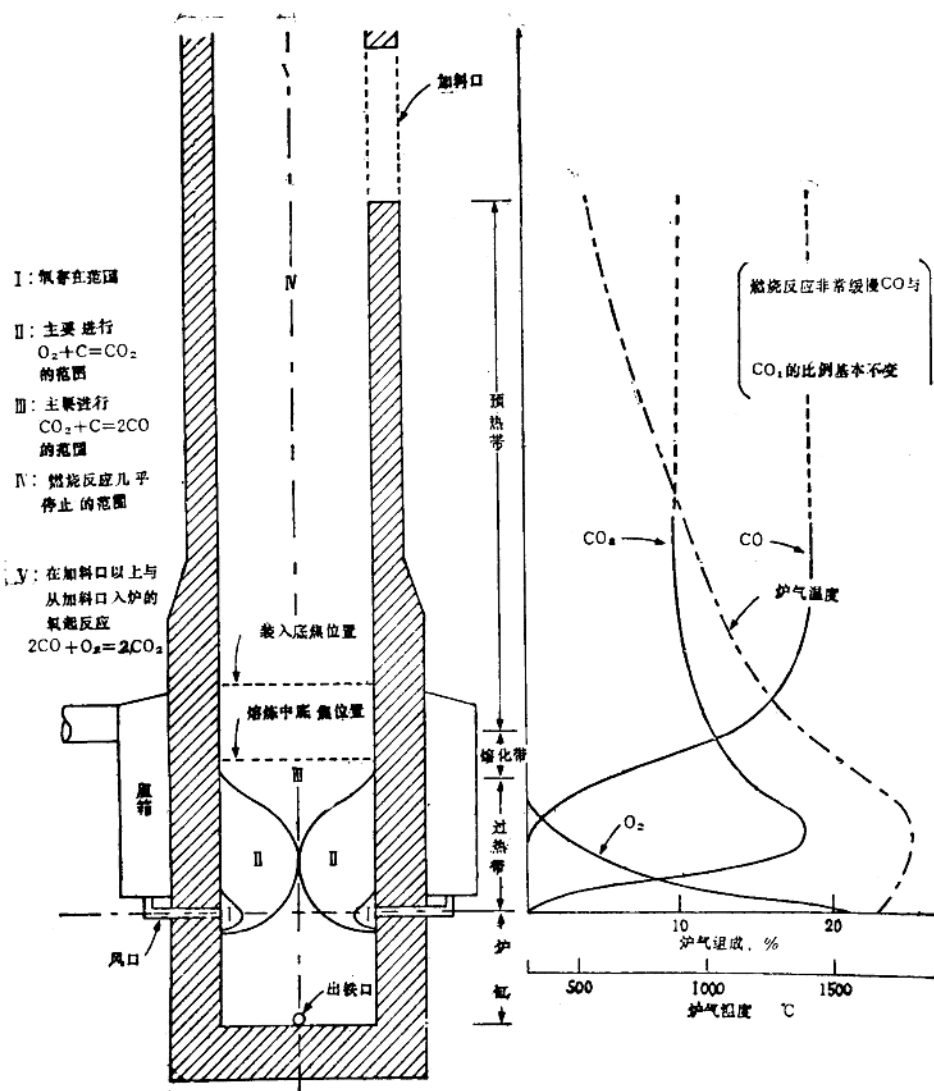


图4 冲天炉内鼓风中的氧与焦炭中的碳进行氧化还原反应的位置以及炉气的成分和温度的分布
(推定该冲天炉风口区直径约600毫米)

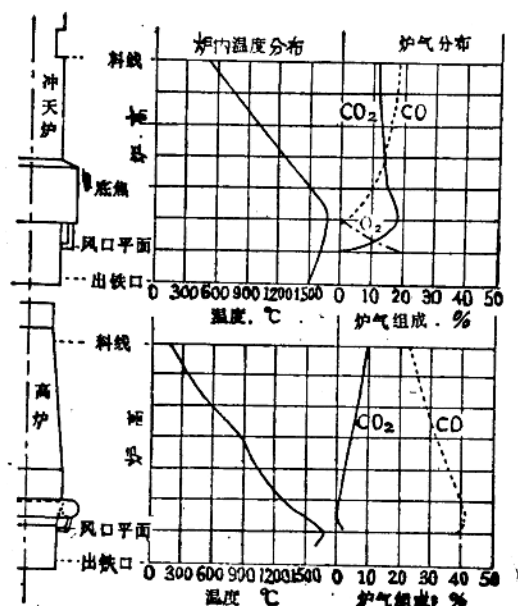


图5 冲天炉和高炉的炉内气氛与温度分布

1-2 铁料被氧化的时间和位置

1. 铁水中的氧（溶解氧和氧化物）

对于钢中的溶解氧即用 $\underline{\text{O}}$ 或 FeO 表示的氧，可以通过加 Si 或 Mn 生成 SiO_2 或 MnO 而将其分离除去。但由于这样生成的脱氧化合物固态微粒，难以自钢水中上浮分离，故设法使其成为固体硅酸盐或液态硅酸盐小球，基本上是利用比重差实现分离。很早以前，如 H. Schenck, 田崎等就曾经提出过该种基本的脱氧方法。

铸铁（按金属学科划分，以 Fe-C 系相图上奥氏体最大固溶碳含量为界，含碳量在此限度以下为钢，在此限度以上为铸铁。工业用普通灰铸铁成分范围一般为 C : 2.5~4.0%, Si : 0.5~3.5%, Mn : 0.2~1.0%, P : 0.03~0.8%, S : 0.01~0.12%）与钢相比，由于非铁元素含量高，用原子氧 $\underline{\text{O}}$ 或 FeO 表示的溶解氧与铁水中 C 、 Si 、 Mn 等元素发生反应，往往在铸铁熔化过程中就进行着与钢水脱氧相类似的反应。这种与非铁元素化合生成的氧化物往往不能被分离除去而残留在铸铁液中，但钢水脱氧后的生成物是可以与钢液分离的。

首先让我们考察一下铁水中溶解氧($\underline{\text{O}}$)的数量：

变态点

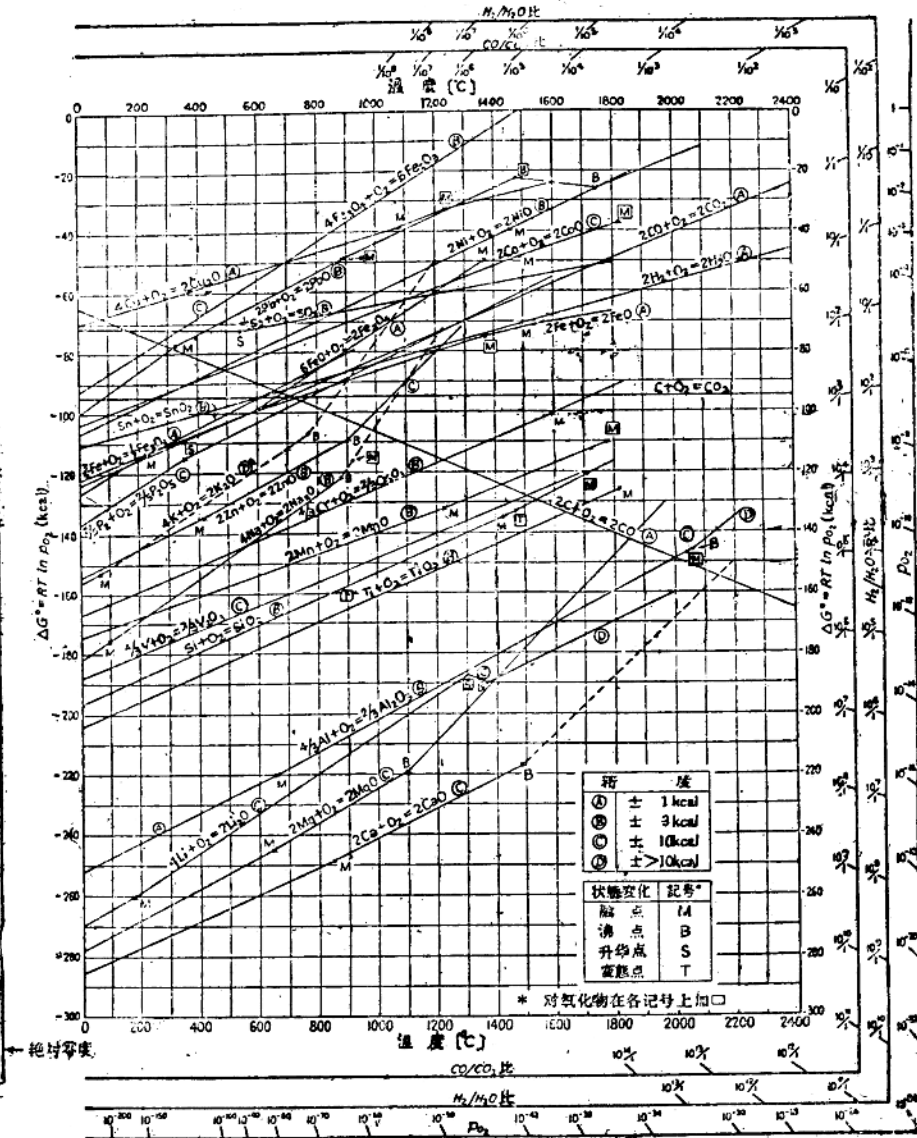
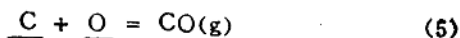
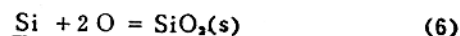


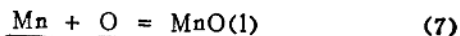
图6 金属氧化物标准生成自由能与温度的关系



$$\Delta G^\circ = -5300 - 9.48T$$



$$\Delta G^\circ = -142000 + 55.0T$$



$$\Delta G^\circ = -58400 + 25.98T$$

上述反应自由能值与温度的关系如图 6 所示。

由 ΔG° 与 T 的关系式可见,在铸铁熔化温度以上一定范围内,上述反应 $\Delta G^\circ < 0$,即进行氧化反应。除碳氧反应外,均是温度越低越易进行。也就是说元素越容易被氧化。

加山以含 C 3.3%, Si 1.8% 的铸铁为例,详细计算了溶解氧的浓度,即反应 $\underline{\text{C}} + \underline{\text{O}} = \text{CO(g)}$ 平衡时的 $[\text{O}\%]$:

$$\text{由} \quad \log K_c = \frac{-\Delta G^\circ}{4.575T} = \frac{1158.5}{T} + 2.072$$

$$\text{得} \quad \log[\text{O}\%] = -2.8155 - 1158.5/T$$

反应 $\underline{\text{Si}} + 2\underline{\text{O}} = \text{SiO}_2(\text{s})$ 平衡时的 $[\text{O}\%]$:

$$\text{由} \quad \log K_{\text{Si}} = \frac{31038}{T} - 12.02$$

$$\text{得} \quad \log[\text{O}\%] = 5.8794 - 15519/T$$

根据上述关系作出平衡氧浓度与温度的关系曲线如图 7。可见,在低温区,由 $\underline{\text{Si}}$ 和 $\underline{\text{O}}$ 的反应决定 $[\text{O}\%]$ 的数量,在高温区则由 $\underline{\text{C}}$ 与 $\underline{\text{O}}$ 的反应决定 $[\text{O}\%]$ 的数量。在图示整个温度范围内,平衡氧含量不过 1~4ppm,数量极微。

在 1-1 节中曾述及金属料块入炉后是在很短的时间内被熔化过热出炉的。因此上述反应在炉内进行时间很短暂,铁水中的氧含量不可能达到加山以平衡条件计算的如此之低的水平(约 1~4ppm)。但出炉铁水中溶解氧量并不多,显然在钢水中作为脱氧产物处理的 SiO_2 , MnO 等氧化物在铁水中残留的可能性就很大。

据此,笔者认为,由于灰铸铁

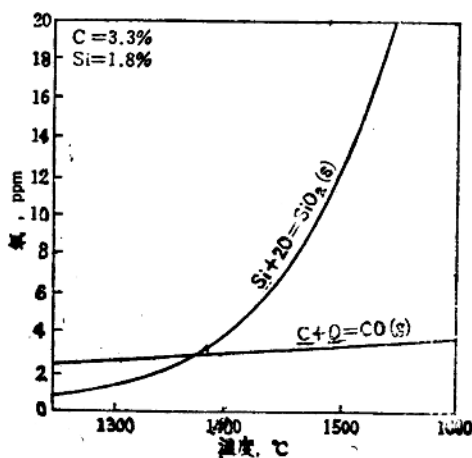


图7 铸铁液中溶解氧的限度