

氧气顶吹 转炉炼钢

下册

R. D. 佩尔克 等著
邵康华 楼盛赫 等译校

冶金工业出版社

氧气顶吹转炉炼钢

下 册

R.D.佩尔克 等著
邵象华 楼盛赫 等译校

冶金工业出版社

内 容 提 要

《氧气顶吹转炉炼钢》是根据美国矿冶工程师协会编写、分别于1974~1977年出版的“BOF Steelmaking”一书翻译的。原书共分五册：第一册导论；第二册理论；第三册设计；第四册操作；第五册专论。为便于读者参阅，现将第一、二、三册合在一起，作为上册；第四、五册合在一起，作为下册，分别翻译出版。该书上册已于1980年5月出版。

本书为该书的下册。

氧 气 顶 吹 转 炉 炼 钢

下 册

R.D.佩尔克 等著

邵象华 楼盛赫 等译校

冶金工业出版社出版

(北京市丰台区)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 13 7/8 字数 367 千字

1982年4月第一版 1982年4月第一次印刷

印数 0,001~2,500册

统一书号：15062·3748 定价1.75元

译者序

现代世界钢铁工业中的惊人成就之一是氧气转炉的发明与发展。在大约二十五年内,世界年产钢量从2.1亿吨增加到6.7亿吨,其中氧气转炉钢从零猛增到3.3亿吨。原有的炼钢“主力”——平炉,尤其是那些较为陈旧的平炉,已经或正在陆续退出历史舞台,而被氧气转炉(还有一部分电炉)所代替。在世界四个最大产钢国家和集团之中,这个取代过程在日本已经完成,在美国和西欧还在继续;而在苏联,虽然平炉淘汰可以说尚未开始,多年来新建的大炼钢厂也都采用氧气转炉。我国六十年代以来,氧气转炉也有显著发展,在今后钢铁工业的发展中,无疑将起非常重大的作用。

在平炉的黄金时代,美国矿冶工程师协会曾组织全国各有关方面有声誉的学者和工程师,编写了《碱性平炉炼钢》一书(我国有译本)。随着氧气转炉的发展,这本书的较近版本增加了关于氧气转炉的章节。二十多年来,该书在美国和其他国家的炼钢界都被广泛引用,在工业上和学术上起了比较显著的作用。最近该会仍采用集体编写的方法,分别于1974~1977年出版了“BOF Steelmaking”(《氧气顶吹转炉炼钢》)专著,内容包括氧气顶吹转炉发展过程、理论基础、设计原理、工艺操作等方面的比较详尽的内容。我们认为这本书对于我国的炼钢工作者有参考价值,因此将它译出。

原书共分五册:第一册导论;第二册理论;第三册设计;第四册操作;第五册专论。为便于读者参阅,现将第一、二、三册合在一起作为上册,第四、五册合在一起作为下册,分别翻译出版。

关于本书的内容作如下几点说明:

一、虽然书中有相当大的部分对于各种氧气转炉炼钢法都是

适用的，特别是第二篇理论（原书第二册）的极大部分内容甚至对于一切炼钢法都是适用的，但原书的主要对象是氧气顶吹转炉。关于美国已开始采用的氧气底吹转炉谈得不多。

二、全书文字、公式和图表中凡用美制单位表示的数值或项目，都已换算为公制单位。

三、有些科技名词国内还未统一。遇到这样情况时，我们主要考虑名词本身的合理性，也尽可能照顾到习惯。但这两方面的判断都不能不受到我们自己的业务水平、工作经历，甚至所在地区的限制和影响，所以不见得都恰当。欢迎读者提出不同意见，以便有机会时做必要的改正。

四、原书有若干笔误和错排的地方，我们已做更正。有些地方怀疑有误，也已注明。

五、原书中有关氧气顶吹转炉专利案件纠纷的一段，已删去。

本书下册十一至十八章翻译者的分工如下：

第十一章：王明超

第十二章：张梦亭

第十三章：姚锡仁

第十四章：楼盛赫

第十五章：张德铭

第十六章：钟雨芳

第十七章：张梦亭

第十八章：楼盛赫

审校：邵象华

前言

炼钢物理化学委员会，现称美国采矿冶金石油工程师协会钢铁学会工艺部，出过一些钢铁冶炼工艺方面的书籍。其中最早的一本是1944年出的《碱性平炉炼钢》第一版。该书在1951年经过修订，成了钢铁工业内部以及学术界和有关部门人员在平炉炼钢方面的一本权威参考书，后来，炼钢物理化学委员会又筹划和组织了两卷本的《电炉炼钢》的写作工作，并于1962年出版。1969年在该委员会的支持下又出版了《高炉理论和操作》。要写一部氧气顶吹转炉炼钢方面的书的想法，六十年代初就在该委员会内开始酝酿了。

氧气顶吹转炉及其操作从1952年林茨的第一个厂开始，1954年在密执安州特伦顿建美国最早的厂，到1968年在美国产量超过总钢产量的一半，这个发展过程清楚地表明氧气转炉炼钢是炼钢工业的一个主力，它的工艺引起了炼钢物理化学委员会的充分重视。1968年6月，当时该委员会的主席T.E.丹西组织了一个研究小组对写作这样一部书的计划提出建议。小组的主持者是密执安大学的R.D.佩尔克，其成员还有当时在琼斯-劳林钢铁公司工作的W.F.波特和伯利恒钢铁公司的R.F.厄本。该小组后来变成了本书的编委会。根据炼钢物理化学委员会一些会员的建议，小组制定了把本书分为五册编写的一个计划。此计划提交炼钢物理化学委员会的指导委员会，得到了批准。按此计划，这部书分为五册，包括了氧气顶吹转炉炼钢的各个方面。编好一册就出一册，使书中提供的资料可以尽快得到利用，而不是等最后章节完成之后才出全书。

1968年10月4日，炼钢物理化学委员会的指导委员会接受研究小组的建议，建立了一个由小组三个成员组成的，以R.D.佩尔克任主任的编委会，编写这部书的工作正式开始了。此时指导委员会

征求对写作氧气炼钢各章的作者的提名。同时大家感到需要有一个得力的技术编辑来帮助编委协调《氧气顶吹转炉炼钢》一书各部分的写作工作。

编委会很庆幸，不久前退休的J.M.盖恩斯同意担任这项在当时称为助理编辑的工作。然而，由于他对这项工作的热心，他的强烈献身精神和技术能力，他很快就被任命为编委会成员，然后为本书编辑。他的努力成了完成本书的强大动力，使出书速度大为加快。编委会的其他成员对盖恩斯的这个主要贡献都非常感谢。

到1970年初，大多数作者已经决定，各章的内容也已商定，于是开始了写作。全书分为五册：导论、理论、设计、操作和专论。编委会采取了和《冶金汇刊》相似的审稿制度，由一名编委任主要审稿人，此外，对全书的每一章由另一名编委和两名外部专家担任审稿。此法不仅保证了全书各章之间的连贯性和一致性，而且还提供了机会，使书中每一部分都能从外部审稿人的见识和经验得到好处。但最后定稿权仍归原作者本人，他们在临出版前对底稿进行最后的校正。

本书的每一章由一个作者或几个作者合作写成。由于作者人数很多，书中就可能有遗漏和重复的地方，甚至会有互相矛盾的观点。出现矛盾观点也不足为奇，因为氧气顶吹转炉炼钢本来就有不同的工艺方法，并且随着时间的推移，对氧气顶吹转炉炼钢的实践和认识也在不断地变化。

如果没有工矿企业、学术机构和其他组织的充分合作，允许他们的成员担任作者，花费许多时间和精力来从事写作，这部书就不可能出。对此，将在各册中分别致谢。

原炼钢物理化学委员会对写书计划给了持续的支持和鼓励。

钢铁学会纽约办事处，特别是其执行秘书和出版经理起了不可缺少的作用。

其他还有一些人，其中许多不知姓名，帮助审查了稿子和提供了专门资料，编委会对他们所作的努力表示感谢。

出这部书的目的是，为那些与炼钢工艺有关的人员提供一本可以从中找到关于氧气顶吹转炉炼钢的知识的参考材料，作者的名单就说明了这一点。编委会真诚地希望本书将有助于炼钢生产的进一步发展。

编委会主任 R.D.佩尔克

目 录

第四篇 操 作

第十一章 耐火材料	1
一、引言	1
二、氧气转炉操作及耐火材料的环境	1
三、转炉耐火材料的发展	3
四、耐火材料的类型	7
五、耐火材料的性能	9
六、砌炉衬操作	23
七、炉衬的维护	35
八、炉衬使用条件	38
九、炉衬的经济学	45
参考文献	50
第十二章 原料	54
一、引言	54
二、铁水	54
三、废钢	66
四、造渣材料	76
五、氧气供应	86
六、结束语	87
参考文献	88
第十三章 质量平衡和能量平衡	89
一、引言	89
二、质量平衡	95
三、绝热条件下的能量平衡	111
四、热损失	125
五、每吨钢的炉料和产物计算	135
六、结语	140

附录	141
参考文献	153
第十四章 工艺操作	155
一、引言	155
二、典型氧气顶吹转炉操作概述	155
三、装料操作	157
四、废钢	160
五、铁水	170
六、吹氧和造渣操作	177
七、倒炉和校正操作	189
八、出钢操作	192
九、脱氧操作	198
十、熔炼记录	205
十一、超低碳硅钢的生产	215
参考文献	215
第十五章 顶吹转炉的控制	219
一、引言	219
二、背景	221
三、终点控制方法	230
四、静态模型	231
五、气体分析和动态控制	241
六、检测枪控制	248
七、吹炼控制方法	254
八、结语	257
参考文献	259

第五篇 专 论

第十六章 辅助燃料	262
一、引言	262
二、顶吹转炉使用的固体燃料	264
三、用天然气和氧气预热废钢	281
四、用燃料油和氧气预热废钢	291

五、氧—油吹炼	312
六、结语	314
参考文献	316
第十七章 氧气顶吹转炉炼不锈钢	318
一、引言	318
二、热力学和动力学	320
三、热平衡和物料平衡	330
四、原料	341
五、不锈钢生产	356
参考文献	385
第十八章 今后发展和技术动向	389
一、引言和摘要	389
二、氧气顶吹转炉炼钢的产量规模——过去和现在	393
三、氧气顶吹转炉炼钢的产量规模——将来	410
四、氧气顶吹转炉炼钢面临的挑战	421
参考文献	430

第四篇 操 作

第十一章 耐火材料

一、引 言

本世纪五十年代中期第一座氧气转炉在美国投产时开始了一场耐火材料革命。氧气转炉炼钢能够被迅速采纳的关键因素之一是炉衬砌筑及其维修所用的耐火材料的单位消耗和成本显著降低。与构造复杂（具有炉门、长而浅的耐火材料熔池、许多支撑拱和顶、高炉墙、笨重的蓄热室、以及许多连接烟道）的平炉相比，氧气转炉只是一个简单的、砖砌的大嘴钢“瓶子”。

在平炉上，为了砌筑巨大的工作炉膛、蓄热室、烟道和烟囱，需要各种类型的耐火材料；而氧气转炉的工作室一般只要设计成能容纳和控制炼钢过程那样大小就够了。氧气转炉不仅换衬费用低，而且修理费也很低。无需“热修队”。对转炉，劳动费用在换衬和修理费中只占10~20%，而平炉则达50~60%。

耐火材料消耗的戏剧性降低和对炉衬材料质量要求的变化，改变了耐火材料工业及其工艺的整个想法。为氧气转炉创制的镁质和白云石质新型焦油结合砖、轻烧砖以及沥青浸透烧成砖的需求日益增加，而平炉用的硅砖、铬镁砖以及碱性散状补炉耐火材料的市场正在减小。

二、氧气转炉操作及耐火材料的环境

就耐火材料的选择和使用效果而言，转炉有两个与平炉明显不同的特点，即炼一炉钢的时间短，和还原气氛为主。由于转炉炼钢时间缩短到40~50分钟，每炉钢耐火材料的暴露时间减少到

了平均冶炼时间最短的氧气顶吹平炉的六分之一至八分之一。耐火材料的侵蚀取决于暴露时间，因此如果温度和化学环境等因素大体不变，单是时间缩短就能降低耐火材料消耗。就炉中气氛来说，化学环境恰恰变得对减轻耐火材料磨损更为有利，而这也正是影响转炉耐火材料选择的最重要的一个因素。

氧气炼钢的主要热化学反应是铁水中的碳被吹入的氧气氧化。碳和氧之间的反应进行得很快，而且在大部分吹氧时间里，炉中保持高浓度一氧化碳的气氛。在吹氧平炉中，有大量的燃烧空气来源和漏入空气，迅速将一氧化碳氧化，因此还原气氛持续时间较短。虽然平炉耐火材料在使用中对还原和氧化气氛都能碰到，但应采用在氧化气氛条件下效果最好的耐火材料。在氧气转炉中并不供给燃烧空气，而且因为炉衬是包在一个钢壳里的，漏入空气很少。因此，炉内气体含有90%左右的一氧化碳^[1]。还原气氛有利于采用含碳的炉衬耐火材料。

早期的底吹碱性贝氏麦炉即托马斯炉^[2]，一向选用沥青作为镁砂和白云石的粘结剂。这可能是因为考虑到还原气氛或者低成本，以及耐火材料颗粒需要有抗水化的保护层。但经验表明，沥青结合剂在使用中焦化，所产生的炭保留在炉衬耐火材料颗粒之间。而且，它的氧化很缓慢，因而能减少渗进炉衬的熔渣量和降低磨损速率。炉渣侵蚀的物理和化学机理将在后面一节中讨论（读者也可参考第四章和第五章，其中讨论了炼钢反应的热力学和动力学问题，以及也适用于炉渣和耐火材料的理论）。

虽然氧气转炉炼钢的冶金基础与吹氧平炉无甚区别，但转炉反应时间短，在过程中更难达到平衡。尽管这样，最终的转炉渣仍为碱性渣，这是指渣中氧化钙对二氧化硅的重量百分比。一般说，这个比值为1.87（代表硅酸二钙的氧化钙、二氧化硅的比例）或超过1.87的炉渣，都算作“碱性”渣。该比值低于1.87的炉渣算作是“酸性”渣。此比值中有时也考虑到其它的炉渣成分。三氧化二铝、二氧化钛以及五氧化二磷是酸性组分，氧化镁有时算作碱性组分。然而，对冶金学来说，最重要的炉渣组分是二氧化

硅和氧化钙。因为炉渣的性质必须是碱性的，所以炉衬耐火材料也必须是碱性的（采用与炉渣相同的化学定义）。最丰富的碱性耐火材料原料是镁砂和白云石。如何选择这种材料的配合和纯度，取决于相对成本。镁砂成本比白云石高，而且随纯度的提高成本增高。

炭是转炉耐火材料的有用组分。通常用于平炉的从镁砂和铬矿制成的“碱性砖”则不合用，因为含铬和铁的尖晶石结合剂在含沥青转炉炉衬的强还原气氛中将被减弱。然而，在卡尔多转炉（见第一章）和在顶吹转炉生产低碳电器用钢的特殊情况下，因为两者都是强氧化过程，侵蚀条件严重，炭结合砖就不如熔铸镁铬耐火材料成功，虽然熔铸砖成本为一般耐火材料的二至三倍。

在美国，转炉炉衬主要分两大部分：贴在炉壳上的永久层和与熔体接触的工作层。永久层通常是用烧成镁砖构成的，有时也用沥青浸透，并且卡死在焊在炉壳上的固定板上。永久层一般只需要作有限的更换。另一方面，每个炉役之后须将工作层完全拆掉。工作层用沥青结合砖、沥青结合轻烧砖或沥青浸透烧成砖砌成。其成分有从纯白云石质到镁质的多种不同。

三、转炉耐火材料的发展

1. 原料（耐火粒料）

碱性氧气转炉创始于欧洲，采用的耐火炉衬几乎全是白云石砖^[3]。在欧洲大陆上有蕴藏量丰富的白云石原料，生产成本较低。另一方面，高纯度镁砂不易得到，原料差价镁砂是白云石的四倍。这一差价在欧洲至今仍然存在，因此在那里白云石是最常用的耐火材料^[4]。欧洲的许多钢铁厂都有自己的为生产白云石砖而建造的耐火材料厂，因而就造成白云石的应用长期延续在北美洲，镁砂是作为平炉碱性耐火材料而发展起来的。从海水提取镁砂使大量生产高级镁砂成为可能，并使镁砂跟白云石的差价接近二比一。因此在北美洲镁砂比较广泛地用于转炉炉衬，虽然它的使用范围仍受经济和操作上的因素（后面将详细讨论）的限

制。

煅烧白云石的一个缺点是它容易水化，大气中的湿度就可以使白云石制品在存放过程中风化潮解^[5]。原矿中固有的或人工加入的不纯物可以降低水化趋势。平炉和电炉用6~8%氧化铁稳定化的白云石作炉底修补材料，足以满足要求。然而，氧化铁会和沥青结合砖里的炭发生反应，因此不适用于转炉耐火材料。早期用于氧气转炉炉衬的白云石砖是由氧化硅或氧化钛（较不普遍）稳定化的白云石粒制成的。但这些不纯物在砖的使用过程中增加了高温液体生成量，降低了使用寿命。在五十年代后期，大多数厂商在抗水化和抗渣性能之间求取折衷，产品性能也在两个极端之间变化。为了既降低不纯物含量而又不引起过分的水化倾向，以求改善用于制造耐火材料的白云石粒方面，曾进行大量的研究工作。现代工厂的加工步骤包括：在900~1205°C之间煅烧高纯白云石，随后（有时）加水沸化。煅烧或水化后的白云石在相当于每平方厘米212公斤的压力下压块，然后在高温下进行死烧^[6]。用回转窑烧时温度约在1650~1870°C之间，竖窑烧时，可达1927~2200°C。竖窑温度较高，能将高纯度材料烧到气孔率很低，而对材料来说，气孔率低是非常有利的。由于加工步骤的这些改善，今天在美国大部分白云石砖都是用 Al_2O_3 、 SiO_2 和 FeO 总含量小于2%的高纯度白云石粒^[7]。

镁砂也经历了一个类似的发展过程。早期的镁砂产品是用天然菱镁矿（碳酸镁）或水镁石（氢氧化镁）在较高温度下煅烧成的。这种天然原料大多含有石灰、二氧化硅、氧化镁和三氧化二铝等不纯物，使氧化镁含量降低到90%以下。多年来，通过预烧、压块、高温煅烧的多步骤操作（与白云石相似），镁砂粒的质量不断提高^[8]。从海水和含镁盐卤中提取的氢氧化镁也被加工成高品位的镁砂粒。图11-1表示过去二十年里镁砂耐火材料中的不纯物的降低情况。氧化镁含量相应提高到98%^[9]。但已发现某些不纯物，如在海水中存在的硼，会限制高温强度，因此限制砖的使用效果，而低熔点的硅酸盐相会阻碍氧化镁结合键的形成。通

过增多熟料中的氧化钙，从而提高氧化钙对二氧化硅的比例和不纯物熔点，镁砂粒的结合强度可以改善。氧化钙和二氧化硅的分子比低于二比一时会形成低熔点的镁蔷薇辉石和钙镁橄榄石相，而比例超过二比一时促使形成硅酸二钙和硅酸三钙的晶体结合物，从而改善高温性能（进一步讨论岩相，参考第四章）。加入石灰会导致熟料中氧化镁含量降低，约为92%左右，但氧化钙对二氧化硅的比例接近三比一，氧化钙加氧化镁的总量达98%左右。现有的最纯的镁砂约含98%氧化镁，氧化钙与二氧化硅的比例高，杂质少于1%，通常称作方镁石熟料。

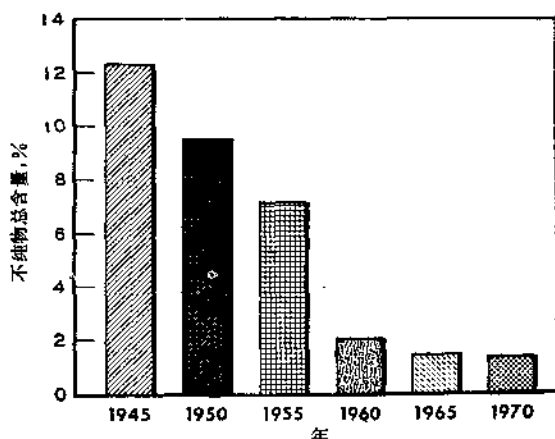


图 11-1 耐火镁砂的典型杂质含量水平

中等质量的砖是由白云石和各种品位的镁砂熟料混合制成的。有些厂商为了改善白云石制品抗水化特性，采用了细镁砂来代替混合料中的细白云石。由于白云石和镁砂之间的差价，在选择这两种材料的混合比时，也要考虑经济问题。这样，虽然基本原料只有白云石和镁砂两种，但制品的成分则有很宽的范围。此外，单是化学成分并不能决定制品的性能，因为混合的方法和熟料的粒度配比也是重要的因素。

除了前而提到过的熔铸制品外，大多数制品都是按最大堆密度要求的粒度配比配合起来的熟料颗粒的混合物。控制粒度配比

是极为重要的,因为它影响制品的气孔率。影响砖的气孔率的另一重要因素是熟料气孔率。近年来耐火材料工业取得的最大进步之一,就是降低熟料气孔率。不久前,熟料气孔率一般为14~16%。而现在,镁砂气孔率普遍达到6~8%,白云石气孔率普遍为4~6%。熟料气孔率降低使砖的密度增大,这是提高砖使用寿命的一个重要因素。

2. 沥青

沥青在转炉砖中是一个重要的组分。一般用在85~121°C软化的所谓高熔点沥青作沥青结合砖的结合剂,而用在65.5~90.5°C软化的中等熔点沥青作为真空浸透烧成砖的成分。煤焦油沥青是转炉砖沥青的主要来源,它是由几千种化合物组成的,其中只有少数几种被分离出来分别进行了研究。较为普遍的做法是把这些化合物分成组,来研究和选择沥青。不同的焦炉操作和不同的配煤都使沥青中各类化合物之间的比例发生变化。因而导致沥青性能有各种变化,极难加以分类或制定标准。一般是根据经验进行选择、并争取从同一来源取得沥青。

然而,有一些条件和试验在选择沥青时还是有用的。C-1炭是沥青中不溶于氮苯的那一部分。它是沥青中最不易起反应,但能提供较高残留炭的那个部分。残留炭是沥青在大气中在982°C以上焦化时挥发物逸出后留在砖的孔隙中的炭的数量。浸透用的沥青不希望含C-1炭,因为它有充满砖面上的气孔,从而妨碍浸透的趋势。C-2炭是不溶于苯的那一部分,它包括了C-1炭。它还包括了那些较为活性的化合物,它促进结合强度,而且是浸透砖中炭的主要来源。这些化合物可认为是能够相互键合和聚化的粗树脂。已知这些化合物和耐火材料之间存在着导致聚化的反应,但这些反应还未完全被了解。在沥青说明书上一般采用环球试验(美国材料试验协会D36试验)来表示产品的软化点。坎瑞得逊值(美国材料试验协会D2416试验)是用作沥青“残余炭”指标的一种试验。沥青的主要性质见表11-1。其他常用的项目有比重和含水量。然而沥青是非均质的,很难规定一