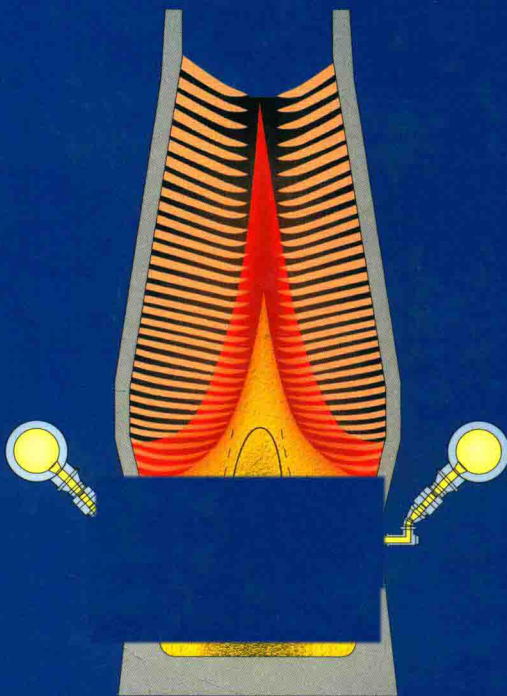


马丁·戈德斯
瑞纳德·谢尼奥
伊万·库若诺夫
奥斯卡·林格阿迪
约翰·瑞克凯特斯

现代高炉炼铁

(第3版)

沙永志 译



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

马丁·戈德斯
瑞纳德·谢尼奥
伊万·库若诺夫
奥斯卡·林格阿迪
约翰·瑞克凯特斯

现代高炉炼铁

第3版

沙永志 译

北 京
冶金工业出版社
2016

Translation from English language edition;

Modern Blast Furnace Ironmaking (Third edition, 2015)

by Maarten Geerdes, Rénard Chaigneau, Ivan Kurunov, Oscar Lingardi, John Ricketts

Copyright©2015 The authors and IOS Press.

All Rights Reserved.

The English language publication is available at IOS Press through

<http://www.iospress.nl/book/modern-blast-furnace-ironmaking-2/>.

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2016-4987

版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代高炉炼铁 = Modern Blast Furnace Ironmaking / (荷) 马丁·戈德斯等著；沙永志译. —3 版. —北京：冶金工业出版社，2016. 7

ISBN 978-7-5024-7270-2

I. ①现… II. ①马… ②沙… III. ①高炉炼铁 IV. ①TF53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 130353 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 杜婷婷 美术编辑 彭子赫 版式设计 杨 帆 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7270-2

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；中煤（北京）印务有限公司印刷

2016 年 7 月第 1 版，2016 年 7 月第 1 次印刷

169mm × 239mm；13.25 印张；255 千字；198 页

120.00 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 yjgybs.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

序

首先祝贺《现代高炉炼铁》一书中文版面世。

《现代高炉炼铁》一书是由以马丁·戈德斯博士为首的多位国外著名炼铁专家，根据自己常年现场工作的积累，撰写的一本既有实践经验、又有深入理论分析的高炉炼铁佳作。该书英文版曾两次再版并被翻译成多种文字，在世界各国广受欢迎。2015年戈德斯博士以此书为蓝本在国内举办两次技术讲座，获得国内炼铁专家的一致好评。

感谢沙永志教授等多位业界同仁认真细致地研究此书的英文原版，以扎实的专业知识和良好的外语能力，高质量地完成了本书的翻译和出版工作，译文流畅，风格清新。本书中文版包含了原版的全部内容，尤其在关键环节和技术精髓上完整准确地表达了原著的技术思想。

近十多年来，我国炼铁工业迅速发展，产量已达7亿吨，约占世界总产量的60%，各项技术经济指标有了很大的进步。然而，应当清醒认识到，我国高炉生产的整体技术水平还有许多改进的空间，尤其是在日益严峻的形势下，需要不断更新理念，提高对高炉炼铁工艺技术的掌控能力。

今天，《现代高炉炼铁》中文版的出版，给我国广大读者提供了一个了解和学习国外高炉炼铁生产经验和技术的机会，这将有助于我国炼铁工业的持续健康发展。

北京科技大学教授
中国金属学会炼铁分会主任委员

杨天钧

2016年6月

译者的话

非常荣幸得到《现代高炉炼铁》一书作者马丁·戈德斯博士等的信任，将该书 2015 年英文第 3 版翻译成中文出版。

初次接触该书是于 2011 年 5 月，随中国金属学会炼铁代表团访问位于荷兰的 Danieli – Corus 研究中心时，获赠该书的英文版第 2 版。阅读发现该书新颖独特，与实际生产结合紧密。书中对一些高炉的内部现象和控制方法，如高炉“悬料”“崩料”机理、煤气流控制、理想料面形状等，分析阐述图文并茂，简洁清楚，提出的解决方案和技术措施客观准确，可操作性强。后来曾引用其中的内容和观点在会议上与国内同行分享，得到大家的认可。

2015 年 5 月在美国参加第 7 届世界炼铁科技大会时，巧识戈德斯博士并获赠该书第 3 版。2015 年 11 月，特邀戈德斯博士以该书为蓝本，来华进行了两次技术交流和培训，包括首届现代高炉炼铁操作研修班和梅钢炼铁技术培训。两次技术交流的效果大大超过预期。国内专家同行对该书内容和戈德斯博士在高炉操作方面的造诣给予了充分肯定，对其在一些高炉复杂问题上的思维方式和处理方法给予高度评价。

《现代高炉炼铁》一书除了英文版已再版两次外，还被翻译成西班牙文、葡萄牙文、意大利文、保加利亚文、斯洛伐克文、俄文以及荷兰文出版。该书也已被列入路透社索引目录。出于对我国炼铁生产进步的尊重和敬意，戈德斯博士希望该书也能翻译成中文出版，这也正是本人所期待并愿意承担的工作。相信基于上述国内专家和同行对该书的评价，该书的翻译出版定会为我国炼铁生产技术人员提供有价值的指导和帮助。

诚然，作为一本针对国外高炉炼铁生产实践所总结的著作，该书未能涵盖我国全部生产条件和状况，某些处理方法也可能并非完美无瑕或完全适合国内生产情况。正如该书作者在前言中所说“我们通过分享知识来学习”。作者和本人都非常盼望国内的炼铁专家同仁在阅读该书时，指出书中存在的

不足并提出真知灼见，使该书不断丰富完善。

本书翻译出版得到了中国钢研科技集团、中国金属学会炼铁分会、冶金工业出版社等多家单位的大力支持和帮助。刘克明博士在整个过程中做了大量细致工作，刘小峰编辑对翻译文字进行了全面修改，莱钢刘元意厂长对该书专业术语和专业内容进行了认真校对，杨天钧教授亲自为本书作序。在此一并致谢！

由于本人专业水平和翻译能力所限，书中的翻译不妥之处，敬请批评指正！

沙永志

2016 年 5 月

前言

《现代高炉炼铁》第3版是由高炉炼铁方面的国际专家组完成的。我们由衷地感谢本书前两版的合著者科·范·德·弗利特先生和希斯科·托克索普奥先生对本书的贡献，他们同意将本书的再次出版交给新的专家团队。托克索普奥先生希望看到本修订版，但他在本书出版前不幸辞世。

出版本书的目的是分享我们的感悟，即高炉生产的最佳化不仅要基于“最好实践的传递”，而且要求从原理上理解为什么某一措施在某些情况下有效，但在其他情况下无效。换言之，高炉操作的改进不仅要基于知道如何做，而且要基于知道为何做。

对比第2版，我们在本书中增加了高炉喷吹天然气及煤—天然气混喷、专家系统、碱金属循环、死料堆以及高炉操作挑战等内容更详细的描述。

我们感谢许多一起工作的同事。感谢詹妮弗·亚历山大和蒂姆·范德。他们分别主要在第2版第10章和第4章中作出了贡献。吉姆·普罗吉与我们分享了他的观点和基准数据。伊格·恩格尔对本书进行了编辑，并设计了色彩丰富、表达清晰的插图。

我们通过分享知识来学习，希望我们亲爱的读者也是如此。

马丁·戈德斯，瑞纳德·谢尼奥，伊万·库若诺夫，
奥斯卡·林格阿迪，约翰·瑞克凯特斯

2015年2月

符号和缩写词清单

B_2, B_3, B_4	basicity, ratio of two, three or four components 碱度, 分别为二元碱度、三元碱度、四元碱度
CRI	coke reactivity index 焦炭反应性指数
CSR	coke strength after reaction 焦炭反应后强度
HGI	hard grove index 哈氏可磨系数
HMG	harmonic mean size 调和平均粒度
HOSIM	hoogovens simulatie (blast furnace simulation) 霍戈文模拟 (高炉模拟)
HV	high volatile 高挥发分
ISO	International Organisation for Standardization 国际标准化组织
JIS	Japanese Industrial Standard 日本工业标准
LV	low volatile 低挥发分
PCI	pulverized coal injection 粉煤喷吹
RAFT	raceway adiabatic flame temperature 回旋区绝热火焰温度
RR	replacement ratio 置换比
Standard Coke	标准焦炭, 含碳 87.5% 的焦炭
STP	standard temperature and pressure 标准温度和压力 (标准状态)
tHM	tonne hot metal 吨铁水
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute 德国矿冶协会
VM	volatile matter 挥发分

目 录

符号和缩写词清单

1 高炉工艺简介	1
1.1 全球钢材消费量	1
1.2 工艺简述	2
1.3 炉内料层结构	4
1.4 设备	6
1.5 本书概观	12
2 高炉内物料和煤气流	13
2.1 煤气生成和煤气流动	13
2.2 高炉效率	17
2.3 渣铁液排放	18
2.4 高炉内煤气流和物料举例	18
3 含铁炉料：烧结矿、球团矿、块矿	22
3.1 引言	22
3.2 铁矿石	23
3.3 高炉炉料质量要求	24
3.4 烧结矿	28
3.5 球团矿	31
3.6 块矿	35
3.7 金属料和压块	35
3.8 炉料间的相互作用	36
3.9 炉料的化学成分控制	37
4 焦炭	39
4.1 引言：焦炭在高炉内的功能	39
4.2 炼焦配煤	41
4.3 焦炭质量概念	42
4.4 焦炭粒度分布	46
4.5 焦炭强度	46

4.6	焦炭死料堆	49
4.7	国际焦炭质量指标综述	52
5	喷煤、喷天然气、喷油	53
5.1	煤、油、天然气的特性	53
5.2	喷煤	56
5.3	喷天然气	63
5.4	煤—天然气混喷	66
5.5	喷吹物完全燃烧	67
6	炉料计算和物料平衡	69
6.1	简介	69
6.2	炉料计算：起始点	69
6.3	炉料计算实例	69
6.4	工艺计算：简化的质量平衡	71
6.5	直接还原评估	75
7	炉料下降和煤气流控制	77
7.1	炉料下降：空隙在哪里产生？	77
7.2	炉料下降：垂直力	79
7.3	炉内煤气流	81
7.4	流态化和管道	87
7.5	炉料分布	87
7.6	焦炭层	92
7.7	矿层厚度	93
7.8	高炉仪器仪表	96
7.9	日常高炉操作控制	97
8	高炉生产率和效率	100
8.1	生产率	100
8.2	效率	101
8.3	炉内煤气变化	103
9	铁水和渣	117
9.1	铁水和渣的形成	117
9.2	高炉铁水	122
9.3	铁水和钢厂	126
9.4	渣	127

10 炉前作业	133
10.1 目标	133
10.2 炉缸内液态铁和渣	133
10.3 通过铁口排出渣铁液	134
10.4 典型出铁管理	136
10.5 开口机和泥炮	138
10.6 炉缸液位	138
10.7 延迟出铁	140
10.8 无渣出铁	141
10.9 单边出铁	142
10.10 未净出铁	144
10.11 炉缸出净的判断	145
10.12 吹氧	146
10.13 出铁数据记录	146
11 操作实践与挑战	148
11.1 炉料	148
11.2 炉料下降	153
11.3 碱金属和锌的循环	155
11.4 圆周均匀性	158
11.5 风口	162
11.6 休风和复风	165
11.7 炉前作业的挑战	172
11.8 温室气体排放	174
附录	175
附录1 词汇表	175
附录2 推荐深入读物	176
附录3 计算举例的起始点	177
附录4 经验值	178
附录5 炼焦煤的种类	179
附录6 焦炭质量检验	181
附录7 专家系统和模型	184
附录8 Rist 操作线	189
参考文献	194
索引	196

1 高炉工艺简介

1.1 全球钢材消费量

钢的生产有两个不同的工艺流程：高炉炼铁 + 氧气炼钢流程和电炉炼钢流程。采用哪种流程取决于生产的钢产品种类和能够使用的原料。高炉炼铁 + 氧气炼钢流程主要生产板材，而电炉流程主要生产长材。前者使用焦炭和煤作为主要还原剂（燃料），使用烧结矿、球团矿及块矿作为含铁料。而后者使用电能来熔化废钢。目前的趋势是电炉也生产板材。然而，高炉炼铁 + 氧气炼钢流程是世界钢材生产的主要方法：大约 70% 的钢材消费量是通过此流程生产的，如图 1.1 所示。

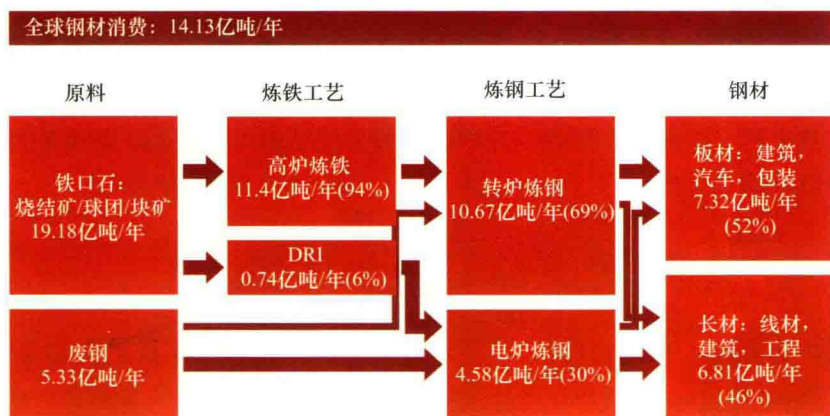


图 1.1 炼钢流程及原料

(国际钢铁咨询，基于 2012 年 IISI 钢铁统计年鉴的数据和
国际钢协的流程图——不计 Corex 和平炉)

从地域角度，可看到世界钢材消费区域的主要变化。图 1.2 是 2012 年的地区钢材消费量。2012 年，中国的钢材消费量达到 6.46 亿吨，而在 2000 年，只有 1.24 亿吨。世界钢的生产能力增加更多，因为中国已成为主要的钢出口国。

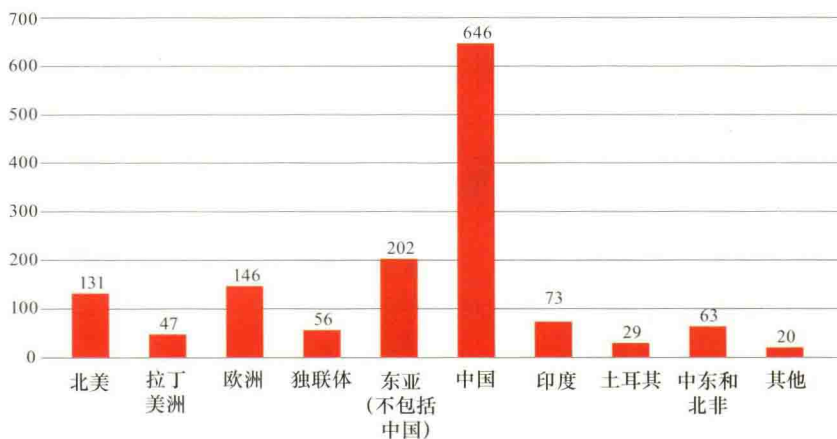


图 1.2 钢消费区域分布

本书论述高炉炼铁生产过程。铁水由高炉生产，然后以液态的形式运输到炼钢厂。在炼钢厂完成去除某些元素（如硫、硅、碳、锰、磷等），使铁水转变成钢的精炼过程。

在高炉工艺中，通过消耗“还原剂”（焦炭、煤和天然气），以块矿、烧结矿及球团矿形式存在的铁矿被转变成铁水。来自矿石炉料中的脉石和焦炭及煤中的灰分形成炉渣。铁水与炉渣不相溶，二者保持分离，渣漂浮在密度更大的铁上面。在出铁场实现渣铁分离。

本章论述工艺的基本原理、高炉内部的分层结构，以及高炉炉型和冷却系统等高炉设计的主要内容。

1.2 工艺简述

高炉的输入和输出如图 1.3 所示。高炉由焦炭层和铁矿石炉料层交替填充。热风是压缩的空气，通过风口鼓入高炉。风口是带冷却的锥形铜喷嘴。小高炉的风口数量为 12 个，大高炉的风口数量则可达 42 个。预热的空气（1000 ~ 1300℃）通过风口吹入高炉。

热风使焦炭和其他通过风口喷吹的碳基物料得到气化。这些碳基物料主要是煤，还有天然气和/或油。在这个过程中，热风中的氧转变成气态的一氧化碳。生成的煤气具有高达 1900 ~ 2300℃ 的火焰温度。在风口前面的焦炭被消耗掉，由此产生了空间。高炉内的驱动力如图 1.4 所示。

非常热的煤气在炉内上升。在上升的过程中完成下述一系列重要功能：

* 加热炉腹/炉腰带的焦炭。

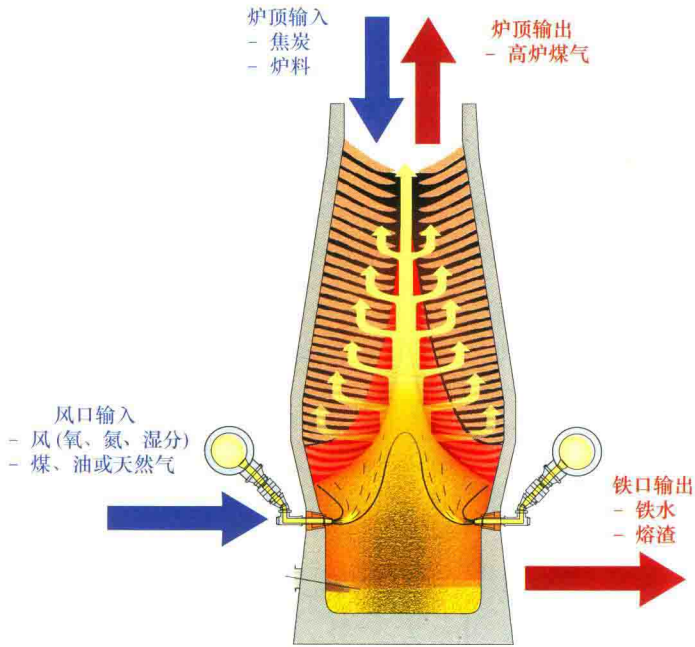


图 1.3 高炉的输入和输出

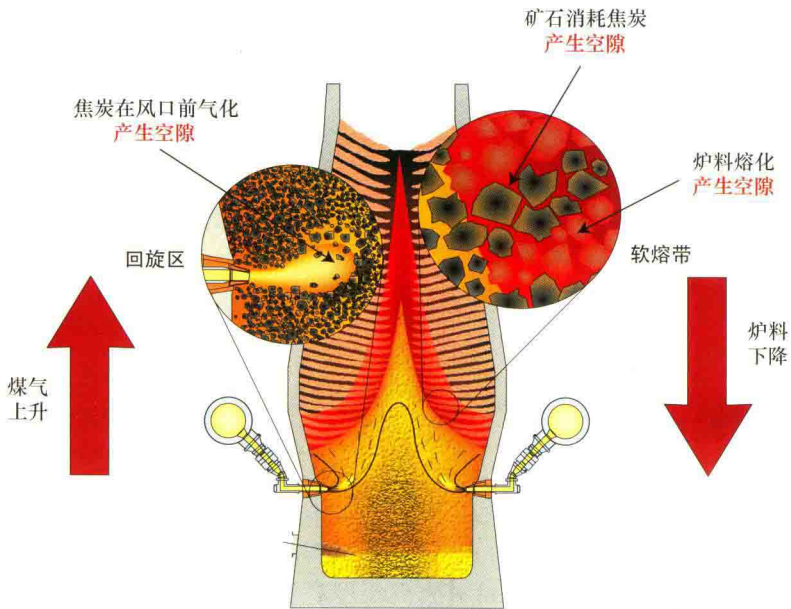


图 1.4 高炉的驱动力：逆流过程造成所示区域产生空隙，引起炉料下降

- * 熔化炉料中的铁矿，产生空间。
- * 加热炉身带的炉料。
- * 通过化学反应除去铁矿炉料中的氧。
- * 铁矿熔化产生铁水和熔渣。

铁水和熔渣向下滴落，穿过焦炭进入炉缸，最终通过出铁口出铁，排到炉外。在滴落带，铁水和渣消耗焦炭，产生空间。最后，焦炭进一步被消耗，用于铁氧化物的最终还原阶段和碳在铁水中的溶解（被称之为渗碳）。

高炉内典型的温度分布实例如图 1.5 所示。由图可见，软熔带位于 1000 ~ 1350℃ 的区域内。高炉内温度差是很大的。在本例中，水平方向的温度梯度大于垂直方向温度，其原因将在第 6 章中解释。

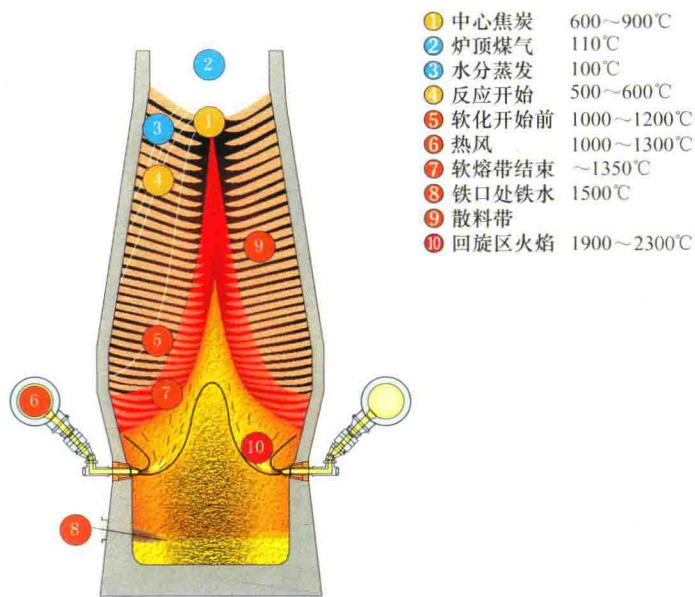
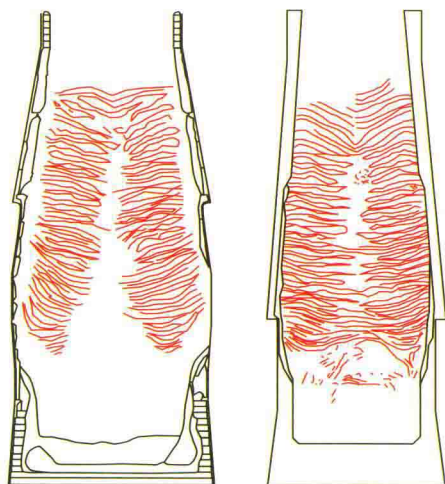


图 1.5 高炉温度分布（典型例子）

1.3 炉内料层结构

铁矿和焦炭分别以层状加入到高炉炉顶，由此向下形成更多料层。这种层状结构贯穿高炉，直到所有含铁炉料熔化。该结构源于急冷高炉的研究结果：很显然，这些铁矿层和焦炭层一直保留，直到温度高到使铁矿开始软化和熔化。急冷高炉是利用水或氮气对高炉进行“瞬间冷冻”。急冷高炉以及固化的软熔带实例如图 1.6 (a) 和图 1.6 (b) 所示。



(a)



(b)

图 1.6 加古川 1 号高炉和鹤见高炉急冷解剖图 (a)
(来自 Omori 等, 1987) 以及停炉后的软熔带 (b)

急冷高炉的解剖清晰表明焦炭和铁矿的层状结构, 进一步的分析揭示了铁矿的加热和熔化以及化学反应进程等信息。

如图 1.7 所示, 在任何时刻, 运行的高炉从上到下包括:

- * 铁矿层和焦炭层。
- * 铁矿开始软化和熔化的区域, 称之为软熔带。
- * 只有焦炭和液态渣铁的区域, 称之为“活跃焦炭带”或滴落带。
- * 死料堆或“不活跃焦炭带”, 即在炉缸的稳定焦炭堆, 向上扩展到炉腹。

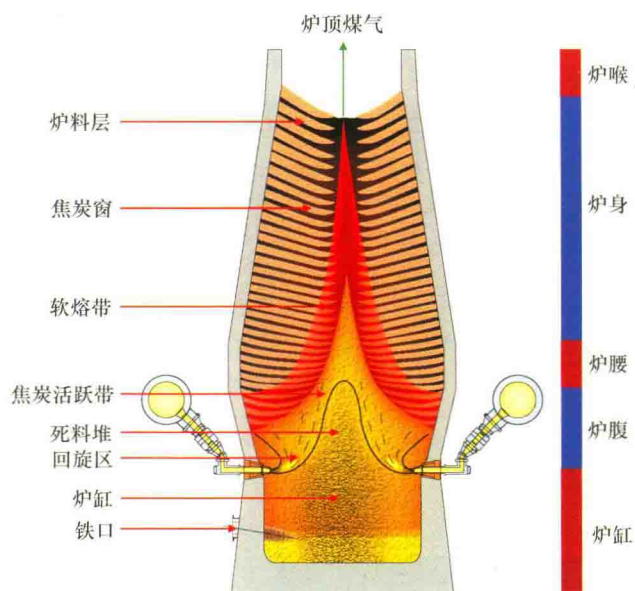


图 1.7 高炉内区域划分

高炉的形状似由两个削顶圆锥（圆台）在最宽处相接而成。高炉从上到下的分段是：

- * 炉喉，炉料表面所处位置。
- * 炉身，铁矿被加热及还原反应开始的区域。
- * 炉腹平行段或炉腰。
- * 炉腹，还原完成，铁矿熔化。
- * 炉缸，熔化的物料在此收集并通过铁口排出。

铁水和熔渣储存在炉缸焦炭块的空隙中。固体焦炭被装入炉料的重力压到炉底。

1.4 设备

1.4.1 设备概述

高炉的主要设备如图 1.8 所示，包括：

(1) 热风炉。在热风炉中将空气预热到 $1000 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 。热风通过热风主管、热风围管、热风支管和最终的风口进入高炉。热风与焦炭和喷吹物反应。高速煤