



高炉矿焦混装空气动力学 基础研究及应用

GAOLU KUANG JIAO HUN ZHUANG
KONGQI DONGLIXUE
JI CHU YAN JIU JI YING YONG

宫峰 著

SPM

南方出版传媒

广东经济出版社

高炉矿焦混装空气动力学 基础研究及应用 >>

GAOLU KUANG JIAO HUN ZHUANG
KONGQI DONGLIXUE

JI CHU YAN JIU JI YING YONG

宫峰 著

SPM

南方出版传媒

广东经济出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

高炉矿焦混装空气动力学基础研究及应用 / 宫峰著. —广州 :
广东经济出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-5454-3335-7

I. ①高… II. ①宫… III. ①高炉-矿焦混装-空气动力学-研究 IV. ①TF542

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第075311号

出版 发行	广东经济出版社 (广州市环市东路水荫路11号11~12楼)
经销	全国新华书店
印刷	虎彩印艺股份有限公司 (东莞市虎门镇北栅陈村工业区)
开本	889毫米×1194毫米 1/32
印张	5.75
字数	175 000字
版次	2014年6月第1版
印次	2014年6月第1次
书号	ISBN 978-7-5454-3335-7
定价	38.00元

如发现印装质量问题,影响阅读,请与承印厂联系调换。

发行部地址:广州市环市东路水荫路11号11楼

电话:(020)38306055 38306107 邮政编码:510075

邮购地址:广州市环市路水荫路11号11楼

电话:(020)37601980 邮政编码:510075

营销网址:<http://www.gebook.com>

经济出版社常年法律顾问:何剑桥律师

· 版权所有 翻印必究 ·

致 谢

本书的完成自始至终是在导师杜鹤桂教授的悉心指导下进行的。东北大学王文忠教授、李永镇教授、邓守强教授、杨兆祥教授、虞蒸霞教授都对本论文的完成给予了大量的指导帮助。炼铁教研室及实验室的各位老师也给本书的完成提供了诸多方便。感谢我的硕士导师李殷泰教授、辽宁科技大学的领导及同事在自己的成长过程中所赋予的爱护和帮助。感谢济南铁厂的领导及同志在本书的工业实验过程中所提供的方便。感谢同窗黄岩博士、童小燕博士、韩恩厚博士为本书的计算工作给予的帮助。

最后，感谢我的父母对自己的多年养育。感谢妻子马明坤高级工程师为本人多年来学习工作所给予的支持及付出的辛苦。

摘 要

为了保证稳定的高炉生产，最大限度地降低生产成本，改善炉料的冶炼特性及分布状态，维持最佳的煤气流分布是极其重要的。高炉矿焦混装是目前世界炼铁领域重点研究的新课题之一，它打破了传统的高炉冶炼工艺，旨在进一步提高冶炼强度的同时，大幅度降低高炉焦比，提高高炉生产率并延长一代高炉寿命。近年来，随着人们对高炉冶炼过程认识的提高，高炉布料、高炉空气动力学研究工作的不断深入，以及高炉现场布料规律和大量冶炼效果的考查，发现传统的层装布料工艺存在着许多难以克服的弊端，甚至成为高炉进一步增产降焦的限制性环节。特别是在目前世界范围内能源紧张、冶金焦大幅度提价并且日益供不应求的今天，开展对高炉传统工艺的改革及新工艺的探索就更显得意义深远了。

本书围绕着高炉矿焦混装的发展过程及其对高炉行程产生的影响，从高炉空气动力学理论上及实验室大量试验、现场工业试验等多方面进行了系统的研究，肯定了矿焦混装的优势。实验室高炉空气动力学模型试验表明，在一定的操作条件下，采用矿焦混装的冶炼工艺可不同程度的降低高炉上部块状带的压差。通过改变试验条件，首先讨论了单一因素对矿焦混装料柱透气性的影响。对料批批重、烧结矿与焦炭的粒度、入炉矿焦比、烧结矿粉末含量、鼓风流量等因素的影响进行了较详尽的分析。一般来说，随着料批批重的增加，层装料柱的单位压差逐渐升高，而混装料柱的单位压差却略有下降。随着入炉料矿焦比的增加，无论是层装还是混装其料柱的阻力损失都是递

增的，但层装比混装增加的幅度要大。在同样的矿焦比情况下，不仅混装的压差比层装的小，而且混装的稳定性比较好，在由于操作条件意外变化时，不会引起炉况的急剧波动。由于混装布料可把焦炭的骨架作用分散作用于透气性不好的矿石层中间，因而对于矿石含粉较多的炉料来说，混装的优势更为明显。

为了能把高炉操作因素对混装效果的影响，统一用数学模型来进行描述，本书用二次旋转组合设计的方法，建立操作条件对混装料柱透气性影响的数学模型，并对其进行了较详细的解析讨论，给出了各影响因素的操作曲线及各因素之间的二维等高线图，为操作因素的合理选取提供了方便。

模型试验结果表明，并不是所有条件下的混装布料都比层装的阻力损失小。混装并非乱混，是有一定的条件和限制的。为了对混装与层装布料进行详尽的分析，了解它们之间的内在联系，本书又给出了描述混装相对于层装透气性改变量与相关操作因素之间关系的数学模型，讨论了不同操作条件对混装与层装压差变化的影响。根据所建立的数学模型，提出了混装与层装方案选择判断的新观点，给出了数学表达式及实际高炉原料条件方案选择的实例分析。

通过矿焦混装料柱结构的理论分析，及混装料柱的孔隙度测定，分析讨论了混装可改善料柱透气性的基本原因。建立了高炉不同断面上煤气流动的伯努利方程，推导出了高炉料柱内矿焦交接层所造成的煤气阻力损失的计算公式。为了能在高炉空气动力学方面对矿焦混装冶炼工艺给予理论分析，本书首次提出了高炉料柱散料体内煤气流动的附面层理论，导出了适用于高炉煤气运动的附面层微分方程式和积分方程式，并对高炉内矿焦混装及层装煤气运动的附面层特性进行了细致的分析。认为混装与层装料柱内煤气运动的实质区别，在于各自的附面层特性不同，导致了煤气在料柱内的绕流和由于附面层的分离产生了旋涡尾流区。根据压强梯度矢量场性质的分析，影响高

炉内煤气运动的基本力学因素，不是煤气压强的绝对值和总压差，而是压强梯度矢量场的性质。因此，在生产中高炉总压差的升高，可能不会引起难行、悬料等炉况失常现象的发生，而当炉内某一局部的压强梯度足以抵制该处的炉料下降时，便是高炉发生难行、悬料的真正原因所在。通过煤气运动的附面层理论分析，矿焦层装的布料工艺最易产生局部的压强梯度过大，对诱发悬料提供了基本条件，影响了高炉的进一步强化。

X-射线透视法是研究铁矿石在高温区域行为的一种较新方法，它可直接显示铁矿石在加热还原过程中，其软融滴落过程的清晰图像和一系列的变化情况。而对矿焦混装高炉软融区域的研究是解决混装工艺能否在生产中实施的关键一环。因此，本书采用较为先进的X-射线透视法研究了混装炉料的高温软融特性，并对矿焦比、烧结矿粒度、碱度、富矿比等因素的影响做了深入的研究。

为了把矿焦混装的理论和实践结合在一起，在冶金部有关领导的大力支持下，在实验室大量实验基础上，我们课题组在济南铁厂100米³高炉上进行了矿焦混装工业实验，取得了较为可观的冶炼成果，并荣获冶金部科技进步二等奖。

STUDIES ON MIXED BURDEN CHARGING AND ITS AERODYNAMICS OF BLAST FURNACE

ABSTRACT

In order to ensure stable operation and minimize production cost of the blast furnace, it is important to maintain optimum gas flow as well as to improve the properties and distributions of burden materials. Technological developments in ironmaking area enabled remarkable progress to be made in the operation of high – productivity low-fuel-rate blast furnace with low thermal load on the walls to ensure longer campaign. Until recent years, it has been assumed generally that only layered charged blast furnace burden distribution is suitable for ironmaking operation. The purpose of this dissertation is to present a new idea about burden charging process, the mixed burden charging manner, which is a focus subject studied in the ironmaking area, especially in the situation of energy shortage in the world and the cost of metallurgical coke is risen increasingly.

This dissertation gives the study results about blast furnace aerodynamics and the experiments of mixed burden charging process carried out in laboratory, and also presents the smelting experience of mixed burden charging manner in Jinan ironmaking works, states clearly that mixed burden charging process has some advantages compared with layered one at certain operation conditions and lowers the resistance of the gas flow. The influence of burden batch, sizes of coke and sinter, powder content of the sinter, the ratio of sinter and coke, blast volume and some other factors have been de-

scribed in detail. Generally speaking, with the increasing of burden batch, the resistance of gas flow in layered bed rises gradually, while it drops a little in mixed burden volume, especially the influence of powder content is remarkable. The advantage of mixed burden charging process is notable in the condition that the burden materials is bad.

In order to describe the influence of different factors on the permeabilities of blast furnace thoroughly, an attempt has been made in the dissertation to propose a mathematical model by means of regression rotation design. The effects of sinter and coke ratio, sizes of coke and sinter and the powder content in the burden materials on the permeability of layered column and mixed burden bed have been described in the model, so that the suitable parameters for blast furnace operation could be chosen easily, also gives the new idea about criterion of charging manner for the correct selection of burden distribution, and an example of scheme design is given.

The Bainuly equation at different column section has been developed, the resistance calculation for the connect boundry has also been stated.

A new point of view has been put forward for first time in the dissertation. Explains the reason why mixed burden charging process is better than layered one, that is the superficial phenomenon of the burden materials. Develops the differential equations and the integral equations of superficies. Analyses the properties of gas flow in packed bed using the new view point. Brings out the conclusion that the crux of the matter is that layered and mixed column result in different superficial gas flow—wind flow and vortex flow.

目 录

摘 要	1
英文摘要	4
第一章 文献信息	1
§ 1.1 高炉装料制度的发展	1
§ 1.2 高炉矿焦混装布料的提出及研究状况	11
§ 1.3 高炉空气动力学的历史回顾及其发展	22
第二章 高炉矿焦混装块状带空气动力学模型试验研究	33
§ 2.1 模型 I (静态) 试验及讨论分析	33
§ 2.1.1 试验装置及方法	33
§ 2.1.2 试验结果及分析	34
§ 2.1.3 模型内的压力分布测定及分析	38
§ 2.2 模型 II (动态) 试验及讨论分析	40
§ 2.2.1 试验装置和方法	40
§ 2.2.2 试验结果及讨论	41
§ 2.3 小粒度炉料和不同风量的混装试验	44
§ 2.3.1 试验装置和条件	44
§ 2.3.2 试验结果与讨论	44

§ 2.4 小结	48
第三章 矿焦混装改善高炉块状带透气性的理论分析	50
§ 3.1 矿焦混装料柱孔隙度的测定	50
§ 3.2 层装料柱伯努利方程的建立	50
§ 3.3 矿焦混装改善料柱透气性的附面层理论	55
§ 3.3.1 附面层概念的引出	55
§ 3.3.2 附面层微分方程式的导出	55
§ 3.3.3 附面层积分方程式的建立	56
§ 3.3.4 高炉煤气运动的附面层分析	59
第四章 矿焦混装块状带透气性变化的数学模型	66
§ 4.1 数学模型的建立	66
§ 4.2 试验设计和数据	67
§ 4.3 不同操作因素对混装料柱压差的影响	70
§ 4.3.1 混装压差与矿焦比和焦炭粒度的关系	70
§ 4.3.2 混装压差与矿焦比和烧结矿粒度的关系	71
§ 4.3.3 混装压差与焦炭粒度和烧结矿粒度的关系	72
§ 4.3.4 混装压差与矿焦比和烧结矿粉末含量的关系	74
§ 4.3.5 混装压差与烧结矿粒度和烧结矿粉末含量的关系	74
§ 4.4 二维等高线图的绘制与分析	78
§ 4.5 数学模型的预报	83
§ 4.6 小结	86
第五章 高炉矿焦混装与层装透气性改变量的数学描述	88
§ 5.1 数学模型的建立	88
§ 5.2 不同操作因素对混装改善料柱透气性效果的影响	89

§ 5.2.1 压差降低与入炉矿焦比和焦炭粒度的关系	89
§ 5.2.2 压差降低与焦炭粒度及烧结矿粒度的关系	91
§ 5.2.3 压差降低与烧结矿粒度和矿焦比的关系	93
§ 5.2.4 压差降低与烧结矿中粉末含量及焦炭粒度的关系	94
§ 5.2.5 压差降低与矿焦比和烧结矿粉末含量的关系	96
§ 5.3 透气性改善情况的二维等高线图绘制及分析	98
§ 5.4 矿焦混装与层装方案选择的判据	105

第六章 矿焦混装炉料在炉喉处的分布

及其上部调剂手段的选择	107
§ 6.1 混装炉料在钟式炉顶及炉喉处的分布	107
§ 6.2 可调炉喉在混装布料中的应用	109
§ 6.2.1 矿焦混装炉料在双钟布料过程中的分布状况	109
§ 6.2.2 小粒度烧结矿与大粒度烧结矿的混装配合	113
§ 6.2.3 可调炉喉在混装布料中的效果	115
§ 6.3 用混装来调剂混装概念的引出	118
§ 6.3.1 不同粒级烧结矿混装的相互调剂	118
§ 6.3.2 不同矿焦比混装炉料的相互调剂	120

第七章 用 X 一射线透视法研究矿焦混装炉料的高温

软融滴落行为	123
§ 7.1 问题的引出	123
§ 7.2 实验设备及方法	124
§ 7.3 试验结果及讨论	126
§ 7.3.1 矿焦比对混装炉料软融滴落的影响	126
§ 7.3.2 碱度对矿焦混装炉料高温性能的影响	130
§ 7.3.3 烧结矿粒度对混装料柱高温软融特性的影响	132

§ 7.3.4 富矿比对混装高温试验的影响	134
§ 7.4 小结	135
第八章 高炉矿焦混装工业试验	137
§ 8.1 试验方案的制定及混装工艺流程	137
§ 8.2 各阶段工业试验炉况变化	138
§ 8.2.1 基准期 II 试验	138
§ 8.2.2 第一阶段工业试验 (混装比例 10% ~ 20%)	139
§ 8.2.3 第二阶段工业试验 (混装比例 40%)	139
§ 8.2.4 第三阶段工业试验 (混装比例 60%)	140
§ 8.2.5 第四阶段工业试验 (混装比例 80%)	141
§ 8.2.6 第五阶段工业试验 (混装比例 100%)	141
§ 8.3 矿焦混装工业试验结果分析	142
§ 8.3.1 对高炉顺行的影响	142
§ 8.3.2 改善了高炉煤气利用	142
§ 8.3.3 矿焦混装降低了直接还原度	144
§ 8.3.4 矿焦混装对高炉焦比的影响	145
§ 8.3.5 矿焦混装对高炉冶炼强度的影响	145
§ 8.3.6 矿焦混装对高炉产量及利用系数影响	146
§ 8.3.7 矿焦混装对炉渣脱硫能力的影响	147
§ 8.4 矿焦混装工业试验高炉操作线变化分析	149
§ 8.4.1 高炉操作线绘制及基本计算公式简述	149
§ 8.4.2 不同混装比例时炉身工作效率的变化 及各试验期的理论最低焦比	150
§ 8.5 采用矿焦混装冶炼技术的经济效益估算	151
§ 8.5.1 高炉提高产量带来的经济效益	151
§ 8.5.2 降低高炉焦比带来的经济效益	151

第九章 结论	153
结束语	158
参考文献	159

第一章 文献信息

§1.1 高炉装料制度的发展

炉喉内炉料的分布情况，在很大程度上决定着煤气在料柱中的分布。为了最大限度地利用煤气中的热能和化学能，保证炉料的顺利下降，以及为进一步强化高炉冶炼创造条件，都要求煤气与炉料的充分接触。因此，怎样使炉料在炉喉内得到合理的分布，是高炉冶炼中一个非常重要的研究课题。

在过去很长一段时间内，高炉炉顶是敞开式的，以便于人工加料，而煤气则全部放散于大气中。其能量的利用率和对环境的污染是可想而知的。随着科学技术的发展，经过长时间的探索，人们逐步实现了高炉装料的机械化。为充分利用高炉煤气和改善劳动条件，人们又开始研究使用封闭式炉顶。炉顶装料装置的完善过程主要是为了满足以下几项基本要求。

1. 保证将炉料合理地分布到炉内；
2. 保证严格的密封，以防煤气泄漏；
3. 结构力求简单而坚固，以便抵抗炉料的撞击、磨损以及坐料、崩料、煤气爆炸等作用；
4. 能抵抗急剧的温度变化及高温作用；
5. 工作应全部自动化，并且当任何部位损坏时，能很快地给予更换。

最初装料装置的形式是很多的。其中比较完善的是由一个固定料斗及可以开闭的料钟组成的巴利式单钟装料装置。这种设备构造简单操作方便，目前小高炉仍有采用。其缺点是在装

料时仍避免不了放走大量煤气。进一步改进的结果,发展成为双钟的装料装置。现在这种装置已广泛地应用在现代高炉上。它是由大小料斗、大小料钟和煤气封盖等部件组成的炉顶密封系统。装料时由于大小料钟的开闭是交错进行的,这样就满足了即装料又密封的要求。然而,虽然把炉料加入到炉内是高炉冶炼得以完成的第一条件,但是炉料在炉内的分布状态,特别是炉料在炉喉处的初始分布,对高炉行程的顺利完成亦起着决定性的作用。双钟料车式高炉加料装置的最大缺点就是炉料分布不均,料车只能从斜桥方向将炉料通过受料漏斗装入小料斗中,因此在小料斗内大块料比较集中,并且炉料粒度愈不均匀,料车倒料速度愈慢,这种偏析现象愈严重,这种不均匀分布在大料斗直至炉喉内仍然重复着。为了消除这种不均匀现象,人们在小料斗上增加一个旋转漏斗,或把小料斗直接改成旋转布料器。近年来,随着科学技术的发展和冶炼水平的提高,为了更有效地控制炉料在炉喉内的分布,又发明了可调炉喉和无钟炉顶布料等先进技术。采用这些手段就可以人为地把炉喉处炉料的初始分布控制在最佳状态。

很长时间以来,国内外的学者都清楚地认识到了装料制度对高炉冶炼行程的影响,纷纷展开了实验室、现场及理论方面的研究 [1~10]。其中,前苏联学者 ИлсТреHKo B. A 等为了研究装料制度对煤气负荷沿高炉截面分布的影响,根据 2000 米³ 高炉尺寸,按 1:10.8 的模数缩小建立实验模型,在该模型上进行了各种装料制度的试验。测定了各种循环料制对煤气负荷的影响,结果表明,料制 2AAKK ↓ 3KAKA ↓ 料线 ↓ 1.5 米效果最好,并通过高炉生产实践验证,CO 利用率达 48.3%,直接还原度降低 0.3% [11]。日本学者田付健二、一田守政利用二维高炉模型研究了装料条件对高炉内炉料填充及其下降行为的影响。着重研究了在炉体损伤及结瘤等特定炉壁条件下,矿石层厚分布对高炉下部填充状态和炉料下降行为的影响。研究表明:1、在炉衬呈正常剖面时,炉墙处矿石层厚度增加,

靠炉墙壁附近的下降速度在炉腹区增大；2、炉腹区有突起物时，炉墙附近产生下料停滞区，因此使热流比减小，炉墙温度上升。尤其在中间环区矿石层厚增加时，这一现象更为显著；3、在炉身下部有突起物时，在突起物下部的炉墙处形成矿焦混合层 [12]。Yoshimasa Kajiwara 等利用实尺实验装置研究了无钟布料的料流状况。通过考虑在排料口上面的流动区中颗粒速度的分布模型，发现炉料自料斗的排出行为主要是漏斗状流动，并对流动过程作了定量测定。结果表明，烧结矿比焦炭有更强的漏斗状趋势，靠求解单一颗粒流动的运动方程，成功地给出了炉料在溜槽内和溜槽外的运动轨迹 [1]。

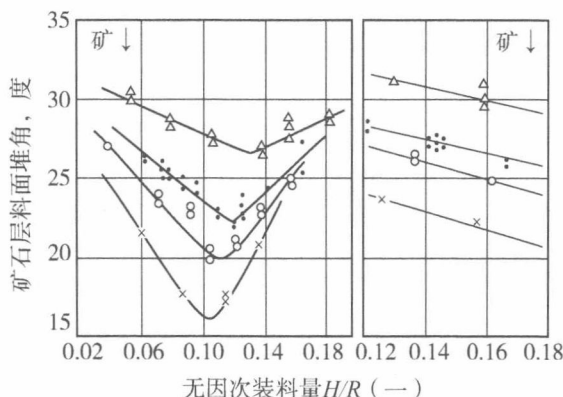


图 1-1 球团矿配比和矿石批重对矿石层面堆角的影响
球用矿配比, %; Δ -0; $\bullet$ -10; $\circ$ -60; $\times$ -100

炉料分布是指炉料入炉后最终形成的矿焦比分布、粒度分布及矿焦的混合料层分布等的总称。多年来人们一直把炉料分布的控制作为调剂炉况，提高高炉生产率的手段。因为炉料的分布状态与自下而上的煤气流分布密切相关，直接影响着炉料与煤气的接触条件，进而影响着高炉的热流比和煤气利用率。例如，就如何布料抑制边缘气流而言，不仅限于高炉操作上的考虑，从谋求减轻炉体热负荷着眼也应如此。这样才能使炉墙