

高炉喷煤理论与 关键技术研究

Key Technologies and Theories of
Pulverized Coal Injection into Blast Furnace

贵永亮 宋春燕 张 伟 胡宾生 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

高炉喷煤理论与关键技术研究

Key Technologies and Theories of Pulverized Coal Injection into Blast Furnace

贵永亮 宋春燕 张 伟 胡宾生 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书结合作者近年来在高炉喷煤领域的理论和应用研究成果,介绍了高炉喷煤理论和关键技术的最新研究进展。全书共分7章,包括高炉喷煤技术概况、高炉喷吹用煤及其性能、煤中氯元素在高炉中的行为、氯元素在煤粉燃烧过程中赋存状态的变化、高炉煤气中HCl的脱除、煤粉喷吹的流态化过程、煤粉的输送性能等主要内容。

本书内容新颖、翔实,可供冶金工程专业和煤加工领域的技术人员参考,也可以作为冶金工程及其相关学科领域的专家学者、高校教师和研究生的科研参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高炉喷煤理论与关键技术研究/贵永亮等著. —北京:
冶金工业出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-5024-7250-4

I. ①高… II. ①贵… III. ①高炉炼铁—喷煤
IV. ①TF538. 6

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第118836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 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 吕欣童

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7250-4

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6月第1版,2016年6月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 8.25印张; 203千字; 121页

43.00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

高炉喷煤技术自应用以来，在高炉炼铁工艺中一直起着非常重要的作用。通过风口喷入高炉的煤粉不仅可以替代焦炭起到提供热量和还原剂的作用，从而降低焦比和生铁成本，同时还会引起炉内煤气成分和煤气量发生变化，进而影响高炉内部的各种物理化学反应。随着高炉炼铁技术的进步，高炉大喷煤已经成为炼铁生产不可或缺的技术，并且其经济效益、社会效益和环境效益也日益突出。

喷吹煤粉作为高炉炼铁领域一个相对独立的领域，需要煤化学、粉体科学、煤燃烧学、流体力学、冶金技术及自动监测与控制等多学科的高度交叉。国内外对煤粉的燃烧、喷煤对高炉冶炼过程的影响及未燃煤粉的行为已经进行过大量的研究，也都形成了比较明确的理论，为相关技术和理论研究奠定了基础。近年来，高炉内微量元素的危害变得越来越明显，已经引起了广泛关注，其中由煤粉所带入的微量元素也不可忽视。此外，随着高炉喷煤量的逐渐增加和浓相输送技术的发展，煤粉长距离输送过程中也逐渐暴露出一些问题。在这些方面，除了公开发表的文献外，比较系统性的相关书籍资料较少。

本书结合作者近年来在高炉喷煤领域的理论与技术研究成果，介绍了高炉喷煤的基本概况、高炉喷吹用煤及其性能、高炉喷煤过程中微量元素 Cl 的行为、煤粉的输送性能等研究内容和成果，具有一定的基础性、实用性和先进性。

全书共分为 7 章。第 1 章主要介绍了高炉喷煤技术的发展，重点介绍了高炉喷煤的发展及意义、高炉喷煤的工艺构成及流程、高炉喷煤的关键技术措施及喷吹用煤的资源供应。第 2 章介绍了高炉喷吹用煤及其性能，主要包括煤的分类及性能检测方法，尤其是与高炉喷煤密切相关的煤的冶金性能的评价标准与方法。第 3 章是煤中氯元素在高炉中的行为，介绍了煤中氯元素的含量及测定方法、煤中氯元素对高炉的危害特征、氯元素对煤粉在风口前燃烧过程的影响。第 4 章介绍了氯元素在煤粉燃烧过程中赋存状态的变化，尤其是氯元素的燃烧转化和分异规律。第 5 章介绍了高炉煤气中 HCl 的脱除，包括高炉煤气中 HCl 生产和脱除的热力学计算，以及 HCl 脱除的实验研究。第 6 章则是煤

粉在流化喷吹罐内流态化过程的研究成果，对比了理论临界流态化速度和实际临界流态化速度，总结了煤粉的流态化的三个阶段。第7章系统论述了煤粉的输送性能，提出了煤粉输送性能的特征方法，分析了各种工艺条件对煤粉输送性能的影响规律，介绍了作者在煤粉输送性能方面的研究成果。

本书部分研究成果得到了国家自然科学基金（项目编号：51274080）的支持，在此表示感谢。同时，研究生胡桂渊、张波、谢春帅在本书编写和校对过程中给予了许多帮助，在此感谢他们的辛勤劳动和付出。

由于作者水平所限，书中疏漏和错误在所难免，敬请读者批评、指正。

作 者
2016年2月

目 录

1 高炉喷煤技术概况	1
1.1 高炉喷煤技术的发展	1
1.2 高炉喷煤的意义	1
1.3 高炉喷煤的工艺构成	2
1.4 高炉喷煤的基本流程	3
1.5 高炉大喷煤的技术措施	4
1.6 高炉喷吹用煤的资源供应	5
1.6.1 高炉喷煤的技术经济效应	6
1.6.2 高炉喷吹用煤的供应特点	6
1.6.3 高炉喷吹用煤的供应现状	7
1.6.4 高炉喷吹用煤的未来需求	7
1.7 高炉喷煤关键技术	8
1.8 高炉喷吹粒煤技术	10
参考文献	11
2 高炉喷吹用煤及其性能	12
2.1 煤的分类	12
2.2 煤的元素组成	16
2.3 煤的显微组分分析	19
2.4 煤的工业分析	20
2.4.1 煤中的水分	20
2.4.2 煤的灰分	21
2.4.3 煤的挥发分	22
2.4.4 煤的固定碳	22
2.5 煤的发热量	23
2.5.1 发热量的单位	23
2.5.2 煤的各种发热量名称的含义	24
2.5.3 煤的各种发热量的计算	25
2.6 煤的比表面积	25
2.7 煤的可磨性	26
2.8 煤的燃点	27
2.9 煤的反应性	28

2.10 煤的灰熔点	29
2.11 煤的结渣性	30
2.12 煤的黏结性和结焦性	31
2.12.1 胶质层指数	32
2.12.2 罗加指数	34
2.12.3 黏结指数	35
2.12.4 奥-阿膨胀度	36
2.12.5 坩埚膨胀序数	37
2.12.6 格-金干馏试验	38
2.13 煤的爆炸性能	39
3 煤中氯元素在高炉中的行为	41
3.1 绪言	41
3.2 煤中氯元素的含量及分布	41
3.3 煤中氯元素的测定方法	43
3.3.1 煤中氯元素的直接测定方法	44
3.3.2 煤中氯元素的间接测定方法	44
3.4 煤中氯元素在高炉中的危害特征	44
3.4.1 煤中氯元素对高炉风口的影响	45
3.4.2 煤中氯元素对煤气管道的影响	45
3.4.3 煤中氯元素对 TRT 的影响	46
3.4.4 煤中氯元素对热风炉的影响	46
3.5 氯元素对煤粉在高炉风口区燃烧过程的影响	47
3.5.1 研究方法及设备	47
3.5.2 研究方案	49
3.5.3 煤中氯元素对燃烧率的影响	49
参考文献	52
4 氯元素在煤粉燃烧过程中赋存状态的变化	53
4.1 煤中氯元素的赋存状态	53
4.2 煤中氯元素的释放特性	54
4.2.1 温度对煤中氯元素释放的影响	54
4.2.2 燃烧气氛对煤中氯元素释放的影响	55
4.2.3 煤的变质程度和粒度对煤中氯元素释放的影响	55
4.3 HCl 测试分析方法的研究	56
4.3.1 实验设备及方法	56
4.3.2 实验用煤	56
4.3.3 HCl 的离子色谱法分析	56
4.4 煤中氯燃烧过程中燃烧转化及分异规律	58

4.4.1 煤中氯燃烧过程中燃烧转化	58
4.4.2 煤中氯燃烧过程中分异规律	58
4.5 研究结果及分析	59
参考文献	60
5 高炉煤气中 HCl 的脱除	62
5.1 高炉煤气中 HCl 的危害	62
5.1.1 高炉煤气中的 HCl 对管道及设备的影响	62
5.1.2 高炉煤气中的 HCl 对干法除尘过程的影响	63
5.1.3 高炉煤气中的 HCl 对环境的影响	64
5.2 应对高炉煤气中 HCl 腐蚀的方法	64
5.3 高炉煤气中 HCl 生成和脱除的热力学计算	66
5.3.1 热力学计算所用 HSC 软件简介	66
5.3.2 高炉煤气中 HCl 生成热力学计算	70
5.3.3 高炉煤气中 HCl 脱除热力学计算	72
5.4 高炉煤气中 HCl 脱除的试验研究	74
5.4.1 试验方法及设备	74
5.4.2 脱氯效果的评价指标	76
5.4.3 单组分脱氯剂的研究	76
5.4.4 工艺参数对脱氯效果的影响	78
5.4.5 脱氯剂的可循环利用特性	82
5.4.6 新型复合脱氯剂的研究	83
参考文献	85
6 煤粉喷吹的流态化过程	87
6.1 绪言	87
6.2 煤粉流态化过程的研究方法	87
6.3 理论临界流态化速度	88
6.4 试验结果及分析	89
6.5 煤粉的流态化过程	91
参考文献	91
7 煤粉的输送性能	93
7.1 绪言	93
7.2 煤粉输送技术的发展	94
7.2.1 粉体输送技术	94
7.2.2 粉体的流动性	94
7.2.3 高炉喷煤浓相输送技术	95
7.2.4 煤粉的粉体特性	96

7.2.5 煤粉的输送性能	97
7.3 试验用煤及其分析	97
7.4 试验用设备	98
7.4.1 煤粉输送性能测定装置	98
7.4.2 煤粉输送性能测定的试验参数	99
7.5 煤粉输送性能测定试验过程	99
7.6 煤粉输送性能测定试验方案	100
7.7 煤粉安息角的研究	101
7.8 煤粉输送性能的提出	103
7.9 煤种对煤粉输送性能的影响	103
7.10 煤粉安息角与煤粉输送性能的对比	104
7.11 煤粉粒度组成对煤粉输送性能的影响	105
7.12 煤粉水分含量对煤粉输送性能的影响	108
7.13 无烟煤对比对煤粉输送性能的影响	110
7.14 固气对比对煤粉输送性能的影响	112
7.15 输送介质对煤粉输送性能的影响	113
参考文献	114
附录 不同煤在不同条件下的输送过程失重曲线	116

1.1 高炉喷煤技术的发展

高炉喷吹辅助燃料是现代高炉炼铁生产广泛采用的新技术，同时它还是现代高炉炉况调节所不可缺少的重要手段之一。喷吹的燃料可以是重油、煤粉、粒煤或天然气，其中，喷吹煤粉日益受到各个国家或地区的高度重视。这项技术在近几十年中取得了明显的进步，而且在相关的炼铁新工艺中，也不断得到了推广和应用。

高炉喷吹煤粉是从高炉风口向炉内直接喷吹磨细了的无烟煤粉或烟煤粉或两者的混合煤粉，以替代焦炭起提供热量和还原剂的作用，从而降低焦比和生铁成本，它是现代高炉冶炼的一项重大技术革命。追求经济效益、降低生铁成本，是高炉喷煤技术发展的另一个重要原因。由于焦炭和煤粉的差价越来越大，因此，喷煤所取代的焦炭越多，经济效益就越好。喷吹煤粉也是高炉技术进步的合理选择，而且应当将高风温、富氧鼓风和喷吹煤粉有机结合起来后，不仅节焦和增产两方面同时获益，而且这种有机结合也成为一种不可缺少的高炉下部调剂手段。

高炉喷煤技术始于 1840 年 S. M. Banks 关于喷吹焦炭和无烟煤的设想，但此后的一百多年时间里，在工业应用方面几乎没有实质性进展。20 世纪 60 年代初，美国、中国及前苏联的一些机构开始研发高炉风口喷粉的新工艺，我国鞍钢、首钢的高炉工作者也先后在高炉上进行了工业性试验。可以看出，我国的高炉喷吹煤粉技术起步较早，始于 20 世纪 50~60 年代之间，起点也比较高。只是由于众所周知的煤粉爆炸的原因，我国的高炉喷煤技术发展出现了一段停滞期。

高炉喷煤在得到工业性、大面积推广应用的半个世纪以来，随着国内钢铁产能的日益增大及高炉煤粉喷吹关键技术的不断进步和完善，市场需求逐渐扩大，特别是随着中国优质炼焦煤资源的日渐匮乏，高炉喷吹煤在钢铁冶炼工艺环节的地位日益提高，在节约钢铁行业冶炼成本等方面，正在扮演着越来越重要的角色。其实高炉喷吹煤作为冶金用途而问世的初衷即决定了这样的趋势：以煤粉部分替代冶金焦炭，使高炉炼铁焦比降低、生铁成本下降。调剂炉况热制度及稳定运行。喷吹的煤粉在高炉风口前气化燃烧降低理论燃烧温度，为维持较高的 $T_{理}$ ，需要进行温度补偿，这就为高炉使用高风和富氧鼓风创造了条件。喷吹煤粉替代部分焦炭，一方面可节约焦化投资，少建焦炉，减少焦化引起的空气污染；另一方面可大大缓解炼焦煤供求紧张的状况^[1]。

1.2 高炉喷煤的意义

高炉喷吹煤粉是炼铁系统结构优化的中心环节，是国内外高炉炼铁技术发展的大趋势，也是我国钢铁工业发展的重要技术之一。高炉喷煤对现代高炉炼铁技术来说是具有革

命性的重大措施,它是高炉炼铁能否与其他炼铁方法竞争,继续生存和发展的关键技术,其意义具体表现为:

(1) 以价格低廉的煤粉部分替代价格昂贵而日趋匮乏的冶金焦炭,使高炉炼铁焦比降低,生铁成本下降。

(2) 喷煤是调剂炉况热制度的有效手段。

(3) 喷煤可改善高炉炉缸工作状态,使高炉稳定顺行。

(4) 喷吹的煤粉在风口前气化燃烧会降低理论燃烧温度,为维持高炉冶炼所必需的動力,需要进行温度补偿,这就为高炉使用高风温和富氧鼓风创造了条件。

(5) 喷吹煤粉气化过程中放出比焦炭多的氢气,提高了煤气的还原能力和穿透扩散能力,有利于矿石还原和高炉操作指标的改善。

(6) 喷吹煤粉替代部分冶金焦炭,既缓和了焦煤的需求,也减少了炼焦设施,可节约基建投资,尤其是部分运转时间已达30年需要大修的焦炉,由于以煤粉替代焦炭而减少焦炭需求量,需大修的焦炉可停产而废弃。

(7) 喷煤粉代替焦炭,减少高炉炼铁对焦炭的需求,从而减少焦炉座数和生产的焦炭量,进而可以降低炼焦生产对环境的污染。同时,也可以缓解我国主焦煤的短缺,优化炼铁系统用能结构,炼焦配煤一般需要配50%以上的主焦煤,以满足高炉炼铁对焦炭质量方面的要求。喷吹煤粉的煤种广泛,可以不使用主焦煤,这既缓解了我国主焦煤的短缺,也降低了炼铁系统的购煤成本。

1.3 高炉喷煤的工艺构成

一个完整的高炉喷煤工艺流程应包括原煤储运系统、制粉系统、煤粉输送系统、喷吹系统、供气系统和煤粉计量系统,最新设计的高炉喷煤系统还包括整个喷煤系统的计算机控制系统。

(1) 原煤储运系统。为保证高炉喷煤作业的连续性和有效性,在喷煤工艺系统中,首先要考虑的是建立合适的原煤储运系统,该系统应包括综合煤场、煤棚、储运方式。为控制原煤粒度和除去原煤中的杂物,在原煤储运过程中还必须设置筛分破碎装置和除铁器。筛分破碎既可以控制磨煤机入口的原煤粒度,又可以去除某些纤维状物质。而除铁器则主要用于清除煤中的磁性金属杂物。

(2) 制粉系统。煤粉制备是指在许可的经济条件下,通过磨煤机将原煤加工成粒度和含水量均符合高炉喷吹需要的煤粉。制粉系统主要由給料、干燥与研磨、收粉与除尘几部分组成。在烟煤制粉中,还必须设置相应的惰化防爆抑爆及监测控制装置。

(3) 煤粉输送系统。煤粉的输送有两种方式可供选择,即采用煤粉罐装专用卡车或采用管道气力输送,而气力输送连续性好、能力大且密封性好,是高炉喷煤中最普遍采用的煤粉输送方式。依据粉气比 μ 的不同,管道气力输送又分为浓相输送($\mu > 40\text{kg/kg}$)和稀相输送($\mu = 10 \sim 30\text{kg/kg}$)。国内广泛采用的是稀相输送。浓相输送不仅可以降低喷煤设备费用和能量消耗,而且有利于改善管道内气固相的均匀分布,有利于提高煤粉的计量精确度,是煤粉输送技术的发展方向。

(4) 喷吹系统。喷吹系统由不同形式的喷吹罐组和相应的钟阀、流化装置等组成。煤粉喷吹通常是在喷吹罐组内充以压缩空气,再自混合器引入二次压缩空气将煤粉经管道和

喷枪喷入高炉风口。其中,喷吹罐组可以采用并列式布置,装煤与喷煤交替进行;也可以采用重叠式布置,底罐只作喷吹罐,装煤则通过上罐及其均排压装置来完成。

(5) 供气系统。供气系统是高炉喷煤工艺系统中不可缺少的组成部分,主要涉及压缩空气、氮气、氧气和少量的蒸汽。压缩空气主要用于煤的输送和喷吹,同时也为一些气动设备提供动力。氮气和蒸汽主要用于维持系统的安全正常运行,如烟煤制粉和喷吹时采用氮气和蒸汽惰化、灭火等,系统防潮采用蒸汽保温等。而氧气则用于富氧鼓风或氧煤喷吹。

(6) 煤粉计量系统。煤粉计量结果既决定着喷煤操作及设备配置的形式,同时又受喷吹工艺条件的影响。它是高炉操作人员掌握和了解喷煤效果,并根据炉况变化实施调节的重要依据。煤粉计量水平的高低,直接反映了高炉喷煤技术的发展水平。煤粉计量主要有两类,即喷吹罐计量和单支管计量。喷吹罐计量,尤其是重叠罐的计量,是高炉实现喷煤自动化的前提;而单支管计量技术则是实现风口均匀喷吹或根据炉况变化实施自动调节的主要保证。实现煤粉计量的连续化和提高煤粉计量的准确性是煤粉计量技术的发展方向。

(7) 计算机控制系统。随着喷煤量的增加,喷煤系统的设备启动频率增高,操作间隙时间减少,喷吹操作周期缩短,手动操作已不能适应生产要求,尤其是当高炉喷吹烟煤或采用多煤种配煤混合喷吹时,高炉喷煤系统广泛采用了计算机控制和自动化操作。根据实际生产条件,控制系统可以将制粉与喷吹分开,形成两个相对独立的控制站,再经高炉中央控制中心用计算机加以分类控制;也可以将制粉和喷吹设计为一个操作控制站,集中在高炉中央控制中心,与高炉采用同一方式控制。

1.4 高炉喷煤的基本流程

根据制粉装置到高炉距离的远近、煤粉仓和喷吹罐安放位置的差异、喷吹管路的粗细、喷吹压力的高低、输送浓度的大小以及喷枪形式的不同,高炉喷煤可以分为直接喷吹、间接喷吹;串罐喷吹、并罐喷吹;总管喷吹、多支管喷吹;高压喷吹、常压喷吹;浓相喷吹、稀相喷吹和氧煤枪喷吹、常规枪喷吹等各种形式的喷吹^[2]。目前比较成熟的生产流程有以下几种。

(1) 德国 KüTTNER 流程。煤粉罐、中间包、喷吹罐三罐串接→流化小罐→喷吹支管→喷枪;支管上装有流量计和二次风入口,安装位置前者靠近喷吹罐出口,后者靠近高炉。近年来,KüTTNER 公司又推出了一种新流程:煤粉仓→并列喷吹罐→流化小罐→总管→分配器→支管→氧煤喷枪,并得到了更多的推广。新流程为双罐、双总管和双分配器形式,仍然使用氮气加压、流化,采用浓相输送。

(2) 美国阿姆科 (ARMCO) 流程。煤粉仓→并列喷吹罐→总管→分配器→支管→常规喷枪。与新 KüTTNER 流程不同的是 ARMCO 流程使用 3 个喷吹罐,一根总管、一个分配器;总管既变径,局部还要变形,为确保足够的分配精度,分配器必须置于高炉炉顶,所有支管也必须等径、等长、等形状。加压、流化使用氮气,因为是稀相输送,所以还需添加压缩空气。

(3) 日本住友流程。煤粉仓→并列喷吹罐→旋转给料器→喷吹小罐→总管→第一分配器→第二分配器→支管→喷枪。住友流程总管上装有压差式流量计与旋转给料器共同调节喷煤总量,控制和设备组成均较复杂。

(4) 日本川崎流程。煤粉罐、中间包、喷吹罐三罐串接→多支管→喷枪；喷吹罐上出料，底部设有搅拌器并在支管出口处接入二次风（压缩空气）稀释。

(5) 卢森堡 Paul Wurth (PW 公司) 流程。历史上 PW 公司与 KüTTNER 公司曾有过一段较长时间的合作，因此无论新流程还是老流程，两家的差异都不大，基本上大同小异，仅在个别设备的选用上有出入。如老流程中 PW 用旋转给料器代替了 KüTTNER 的流化小罐；新流程中用声呐管代替了阻损管、用流化喷嘴代替了流化罐、增设泄压气回收装置等。

(6) 混合型流程。煤粉罐、中间包、喷吹罐三罐串接→总管→分配器→支管→喷枪；这是在上述多支管流程基础之上的一种改良流程，也可以称作混合流程。

(7) 英钢联粒煤喷吹流程。煤粉仓、中间包、喷煤泵三罐串接→总管→分配器→支管→喷枪；主要特点是用喷煤泵代替了传统的喷吹罐，中间包与喷煤泵之间使用圆顶阀连接，同样条件下，喷煤泵工作压力通常小于传统喷吹罐工作压力，喷煤泵出口设有由变频电机驱动的旋转给料阀。

1.5 高炉大喷煤的技术措施

从风口喷吹的粉煤替代了从炉顶装入的焦炭，会使炉顶温度升高。另外，矿/焦的增加会使炉上部的压力损失增大，软融带的透气性变差，还有未燃粉煤和焦粉在风口回旋区的堆积会导致炉芯的钝化等，由此会使整个高炉的透气性变差。再者，由于煤气流向炉周围会造成炉体放热和散热的增加，使还原剂比增大。炉缸被污染后会使出铁和出渣变得不稳定，高炉操作也变得不稳定。

当煤比为 200kg/tFe 左右时，由于高煤比条件下高炉煤气发生量和矿焦比发生变化，因而高炉操作条件发生变化。为在高利用系数和低还原剂比操作下进行大量喷煤操作，需要进一步提高高炉原燃料质量和高炉操作水平^[3]。

(1) 提高焦炭的质量。高煤比时焦炭的热强度是非常重要的指标。大喷煤时，软融带透气焦窗随焦比的减小而变窄，焦炭的料柱骨架作用进一步加强；另一方面，由于煤粉代替部分焦炭在风口燃烧，使死料柱中的焦炭在高炉内停留时间延长而易粉化。因此，要求进一步提高焦炭的质量。宝钢高炉在 200kg/t 大喷煤期间，要求焦炭的反应性 $CRI < 25\%$ ；实际为 24%，反应后强度 $CSR > 67\%$ ，实际达到 69%；其入炉焦炭平均粒度保持在 25mm 以上。

(2) 提高烧结矿质量减少高炉渣比。大喷煤时，矿/焦比升高，料柱焦层中炉渣积聚量增大，如不减少渣量，将会影响料柱的透气性；同时由于焦炭的粉化加剧和未燃煤粉及焦粉量的增加，在渣量较大时，炉缸死料柱的透液性也显著降低，对风口气体流向中心区的穿透和下部气流分布产生明显的不良影响，所以在在大喷煤时应尽量减少渣量的产生，除了提高焦炭的质量外，还要提高烧结矿的品位和降低 SiO_2 含量。另外，烧结矿的强度也很重要，较高热态强度的烧结矿可减少其在高炉内粉化，可以提高高炉的透气性。

(3) 提高操作水平。提高高炉操作水平，就是通过上下部调剂形成合理的煤气流分布，改善料柱和炉缸死料柱的透气性和透液性，从而提高高炉炉况的稳定性和对大喷煤的适应能力。上部调剂方面，随着煤比提高，各高炉都采用了发展中心气流和抑制边缘气流的布料措施。下部调剂包括活跃炉缸，控制适宜的风速和鼓风动能，保持一定的循环区长

度,发展中心气流。

(4) 采用高风温、适宜的富氧量等措施。高炉喷煤增加炉腹煤气量,使风口前火焰温度降低;富氧可以减少炉腹煤气量,提高火焰温度,提高煤粉在风口的燃烧率,高风温可以增加热补偿和提高燃烧率。

目前,现场的煤粉生产及高炉操作上的一些习惯性认识和操作,直接影响到高炉喷煤的科学生产,且给高炉喷煤效益乃至生铁成本带来不良影响,应从以下几方面加以改进^[4]:

(1) 建立并科学管理储煤料场。目前,诸多钢铁企业炼铁厂的煤粉制备车间,即使有储煤场也基本上是十分狭小且不规范,管理亦未受到重视;有的甚至直接用火车、汽车或皮带等将来煤送入制粉系统。这样,处理较大块度的原煤就需在制粉系统的源头增加破碎机,脱去原煤的过高水分就要增加烘干设备,冬季原煤冻块较多还要增加解冻设备。尽管添加这些设备是必要的,但由于其没有融入一合理的原煤料场的综合管理中,则在生产管理上总给人以“临时、仓促、滞后、繁杂、无序”的感觉,更谈不上制粉用原煤的科学管理了。其解决的办法是建立一科学和合理的储煤场,只有这样,才能保证制粉系统和高炉喷吹操作建立在科学的基础上,才能保证高炉的稳定顺行、稳产高产和降低生铁成本。

(2) 建设并科学利用数据库。目前,高炉喷煤系统基本没有建立数据库。认真搞好原煤及成品煤粉相关数据库的建设,并科学地加以利用,无论是制粉系统还是高炉喷吹及高炉操作系统都将受益匪浅。建设并科学利用数据库,不但方便了生产和管理,且为喷吹用煤采购对每一种原煤的煤质及往日加工利用的效果和运输成本等情况做出客观的评价,为日后的采购和定价做出科学的决策。

(3) 寻求最佳喷煤比。在长期的炼铁生产实践中,高炉操作者往往认为只要高炉未出现异常,且制粉和喷吹系统能力足够,高炉喷煤比越高越好。实际上,它是单纯追求高煤比和降低入炉焦比,而忽略了燃料比的降低,即只注重喷煤的经济效果而忽略了喷煤的节能效果。高炉生产的一切活动都须服从一个目标,那就是追求高产、低耗和低成本。高的喷煤量若保证不了高的置换比,也就不可能在喷煤节能这一环节上使其在生铁成本中的份额降低。所以,应根据炉况的具体情况,提高操作水平,寻求适合不同炉况的最佳喷煤比。

1.6 高炉喷吹用煤的资源供应

在最初的高炉喷煤时,全部采用无烟煤做喷吹燃料,因为喷吹替代焦炭主要用到的是煤炭中的固定碳元素,100%采用无烟煤喷吹正好迎合了这样的需求和想法。后来,由于无烟煤供给的有限性及其原煤储量不断减少,市场价格也逐渐攀升,采用更廉价、蕴藏更丰富的长焰煤与无烟煤混合喷吹成为钢铁企业进一步降低冶炼成本的追求目标。经过许多研究和试验,在混合煤炭磨粉及喷吹过程中采用氮气惰化技术,从而为系统增加安全性、防止煤粉爆炸,是取得混合喷吹的关键技术。氮气保护系统的试验成功使烟煤作为喷吹燃料进入实质阶段。根据各厂系统运转的不同状况,北方多数钢厂已经将烟煤混合的比例提高到30%~50%之间,而且烟煤喷吹的加入可以活化高炉还原气氛,为高炉还原铁提供更多的氢元素。再后来,由于无烟煤资源的再度紧缺,贫瘦洗精煤也逐渐走入市场,南方武钢、马钢等将三种煤的混合比例一度稳定在1:1:1,且取得了较好的经济效应。可以预见,未来作为节约成本的关键技术,采用三种煤炭资源混合喷吹是发展方向。

高炉喷吹煤煤比呈现逐年上升的趋势,并且逐渐成为钢铁企业不可缺少的炉料之一。钢铁业经过最近几年的快速扩张,国内炼焦煤资源及冶金焦的供给正在成为“瓶颈”因素。不像前些年,高炉喷吹煤资源不足,可以多用焦炭、少喷煤,而现在变得可调整的空间和余地越来越小。按照钢铁工业协会最近几年的统计数据,国内重点大中型钢铁企业平均喷煤比2005年为114kg/t Fe,2006年达到126kg/t Fe,2007年可达130kg/t Fe以上,同时,入炉焦比呈逐年下降的趋势。

1.6.1 高炉喷煤的技术经济效应

高炉喷吹煤在生铁冶炼环节的主要作用是部分替代冶金焦,降低焦炭消耗量。另外可提高高炉风,加大冶炼强度,提高生铁产量水平。对高炉喷吹煤市场的分析应主要聚焦于对焦炭与高炉喷吹煤相互替代经济效益的判断。以北方市场各种原料煤及焦炭的采购价格为依据,粗略推算一下喷1t煤粉可节约冶炼成本的幅度:计算基础取烟煤与无烟煤的混合比例考虑的上限7:3,则1t煤粉的混合采购成本750元/t,再考虑15%的管道泄漏煤粉损失,综合采购成本860元/t,继续考虑喷吹煤置换焦炭的比例80%,同时考虑喷煤磨粉车间的人工及电力成本(150元/t),把喷吹煤成本换算至与焦炭可比,则最终喷煤与焦炭可比价格为: $(860 + 150)/80\% = 1260$ 元/t。最终喷1t煤粉置换冶金焦的经济效益可达 $2150 - 1260 = 890$ 元/t。与2006年期间相对稳定的喷吹煤与冶金焦的价格差200~300元/t扩大了700元/t之多。高炉喷吹煤与冶金焦之间相互替代的功效及价格差距大幅度扩大,为高炉喷吹煤市场稳定上行提供了有力支撑。

1.6.2 高炉喷吹用煤的供应特点

高炉喷吹用煤的供应特点如下:

(1) 宏观经济形势及政治因素左右喷吹煤供给能力。与炼焦精煤一样,由于冶金煤的原煤经过洗选灰分降低后成为精煤,而筛下产品作为电力用煤,当电力用煤供应紧张时,煤炭企业根据国家号召多卖电力用煤,不得不少卖冶金用煤,从而使得冶金煤供应量减少。2009年春节及过后一段时期南方多年罕见的暴雪灾害导致电力、电煤供求紧张,使得冶金煤市场供应量锐减就是一个例证。灾害期间山西焦煤集团曾将其精煤产量比例一度调低至20%,使炼焦煤供应受到很大程度的影响,其他以电力用煤为主导的烟煤生产企业如同煤、神华等,冶金煤生产所受的影响就更加严重。

(2) 高炉喷吹煤的供应也受到煤炭洗选企业主动缩减精煤产量,从而引起供应量变化以应对市场变动因素的影响。任何产品的供应应当都是取决于需求量,而高炉喷吹煤的需求量与入炉焦炭的质量及铁矿石品位等指标息息相关,当焦炭质量下降或铁矿品位不好时,焦炭作为高炉骨架的作用会减弱,进一步引发炉况不顺行及失稳等一系列不利于增大喷煤量的情况显现,从而导致喷煤比下降达不到计划数值,喷吹煤生产企业可以根据需求来及时改变供给,从而达到维护市场价格的目的。

(3) 对于钢铁行业来说,因为炼焦煤和焦炭已经成为约束钢铁冶炼产能继续增长的瓶颈因素,要维持目前的生铁规模,只能在有限的或者是“不再增长”的炼焦煤资源供应环境下,以改善炼焦煤或焦炭质量为前提,想方设法提高高炉喷煤水平。由市场需求引导的喷吹煤供应量应当处于一定的增长区间。

1.6.3 高炉喷吹用煤的供应现状

国内生产高炉喷吹煤的企业,无烟煤主要以北方的阳泉煤业集团、神华宁煤集团、晋城矿业集团及南方的神火永城、焦作煤业集团等为主导;贫瘦喷吹煤以潞安环能、山西焦煤集团等为主导;烟煤以同煤集团、神华本部等为主。由于近年来喷吹煤洗选技术的逐渐普及,各高炉喷吹煤产地周边也新上了众多无法列入统计的洗选项目,如果以大的煤业集团与小洗选产量之间 8:2 的比例经验来估摸,全国总体的高炉喷吹煤产能目前应当在 4000 多万吨的水平。由于对实际的供应数量缺乏确切的统计,拿市场实际需求来反证:2007 年国内重点大中型钢铁企业高炉喷吹煤比平均 135kg/t Fe,2007 年国内重点大中型钢铁企业生铁产量为 3.52 亿吨(按列入钢铁协会统计口径的 70 家重点大中型钢铁企业生铁产量占全国 75% 份额计算),则国内高炉喷吹煤消耗量大致为 4500 万吨,需求略大于供给。

从喷吹煤的供应结构来看,贫瘦喷吹煤的产量占 1/3 弱,但由于无烟煤储量及其供应能力逐渐萎缩,贫瘦喷吹煤需求及供应将逐步上升并呈现逐年放大的趋势。这种供应结构在南方市场已经初步普及,北方市场目前从煤炭运输到达距离和无烟煤实际生产能力高于南方地区的现状来看,未来一定时期内仍将保持以无烟煤和烟煤混合喷吹为主以少量贫瘦煤喷吹作辅助的供应结构。

1.6.4 高炉喷吹用煤的未来需求

高炉喷吹煤的市场需求主要取决于钢铁产能的规模、增长动态及高炉喷吹煤煤比(单耗)增长趋势两方面的因素。

首先,钢铁行业的产量规模决定高炉喷吹煤的需求规模。早在 2007 年,国内高炉喷吹煤的市场需求在 4000 万吨以上,当时国内生铁产量为 4.69 亿吨。据中商产业研究院数据统计显示,2014 年的国内生铁产量已达到 7 亿吨以上,若按喷煤比 135kg/t Fe 计算,国内高炉喷吹煤的市场需求已经接近了 1 亿吨。促使国内钢铁产量继续增长的因素有固定资产投资继续高位增长、社会主义新农村建设及国家扩大房地产供应量增长的一系列政策因素。生铁产量的增长对高炉喷吹煤需求的刺激作用主要在于以下几点:

(1) 国内大中型钢铁企业高炉大型化速度继续加快。高炉大型化在带来铁产量增长的同时,可有效降低焦炭消耗,为提高喷吹煤比创造了一定有利条件。

(2) 从近几年冶金焦及炼焦配煤“瓶颈”制约对钢铁工业的影响,未来一定时期冶金焦市场将更加向紧深化发展。在这样的前提下,全国平均喷煤水平最起码要维持上年度的水平,才能保证高炉的正常生产运行。

(3) 钢铁上游铁矿石、煤焦等产品价格持续上涨的局面,将在一定程度上对中小钢铁企业及落后钢铁产能产生成本“挤出”效应,加快落后淘汰步伐,通过市场力量提高钢铁行业集中度。大型钢铁企业市场占有加大的趋势将为高炉喷煤需求增长奠定良好基础。按照保守的估计,喷煤比的年递增幅度在 10kg/t Fe 左右,按 7 亿吨生铁的基数计算,对未来三年的高炉喷吹煤市场需求做粗略预测,喷吹煤需求年平均增长率为 7% 以上。

另外,从地域的需求不同层面来看,未来一段时期将呈现煤比增长率南低北高的趋势。由于区位因素的作用,南方地区钢厂进口铁矿原料的比例高于北方钢厂,因而铁矿的

平均品位也高于北方，而且南方神火、永城等地无烟煤可磨性好于北方的太西煤和阳泉煤，为大煤比作业奠定了比较有利的基础。所以，将来全国范围的高炉喷吹煤市场将呈现南方基本饱和、稳定，而北方市场潜在需求继续扩大的趋势。随着国际能源的日益紧张，高炉喷吹煤市场将会呈膨胀式增长。

1.7 高炉喷煤关键技术

随着高炉喷煤量的不断增加，在高炉大喷煤条件下的关键技术应该关注以下几方面：

(1) 保持炉缸热量充沛技术。高炉炼铁正常生产需要炉缸有充沛的热量，以保证铁矿石还原，渣铁流动性好、易分离，炉渣脱硫率高和透气性好。炉缸热量是用炉缸理论燃烧温度来表示的。炉缸热量充沛要求炉缸的温度和热量要高。理论燃烧温度在 $(2200 \pm 50)^\circ\text{C}$ 视为合理值。煤粉喷进风口后需要吸收热量。首先是煤粉被加热，然后是挥发分燃烧和碳素燃烧。这样，每喷吹 10kg/t 无烟煤会使炉缸温度下降 $15 \sim 20^\circ\text{C}$ ， 10kg/t 烟煤会使炉缸温度下降 $20 \sim 25^\circ\text{C}$ 。喷煤量大于 100kg/t 会使炉缸温度下降 $150 \sim 250^\circ\text{C}$ 以上，高喷煤比会使炉缸温度下降幅度更大。为使炉缸温度保持在 $(2200 \pm 50)^\circ\text{C}$ 的合理范围内，就需要采取保持炉缸温度的技术措施，具体办法是：1) 提高热风温度，热风温度升高 100°C ，可使炉缸理论燃烧温度升高 60°C ，允许多喷 $30 \sim 40\text{kg/t}$ 煤粉；2) 进行富氧鼓风，富氧率提高 1% ，炉缸理论燃烧温度升高 $40 \sim 50^\circ\text{C}$ ，允许多喷煤粉 $20 \sim 30\text{kg/t}$ ；3) 进行脱湿鼓风，鼓风湿度每降低 1g/m^3 ，理论燃烧温度升高 $6 \sim 7^\circ\text{C}$ ，允许多喷 $3 \sim 4\text{kg/t}$ 煤粉。

(2) 提高煤粉燃烧率技术。煤粉在风口前的燃烧包括可燃气（煤粉受热分解而来的）分解燃烧和固态碳（煤粉分解后残留碳）表面燃烧。这些燃烧情况取决于温度、氧气含量和煤粉的比表面积和燃烧时间。宝钢测定高炉喷煤比分别为 170kg/t Fe 、 205kg/t Fe 和 203kg/t Fe 时，煤粉在风口回旋区的燃烧率分别为 84.9% 、 72.0% 和 70.5% 。这说明还有近 30% 的煤粉没有在风口回旋区燃烧，离开风口回旋区以后进入高炉上部进行燃烧、气化及参与一些化学反应。高炉内未能燃烧的煤粉将会被高速的煤气流带出高炉，致使煤气除尘灰中的碳含量增多。所以，除尘灰中碳含量多少是煤粉燃烧率高低的重要标志。

提高煤粉燃烧率的技术措施：1) 提高热风温度，喷煤比在 $180 \sim 200\text{kg/t Fe}$ 时，需要有 1200°C 以上的热风温度。2) 进行富氧鼓风，既可提高炉缸温度，又提供了氧气助燃剂，喷煤比在 $180 \sim 200\text{kg/t Fe}$ 时，需要富氧 3% 以上；在燃烧学理论上，要求要有 1.15 以上的空气过剩系数。3) 提高煤粉的比表面积，要求煤粉粒度 -200 网目 ($<0.074\text{mm}$) 要大于 85% 。采用烟煤和无烟煤混合喷煤时，烟煤中的挥发分遇高温时要分解，致使煤粉爆裂，增加煤粉比表面积。4) 进行脱湿鼓风，可以产生提高炉缸温度和鼓风中氧气含量的效果，将鼓风温度控制在 6% 左右。5) 提高炉顶煤气压力，减小煤气流速，延长煤粉在炉内燃烧的时间，降低煤气压力差。据测算，煤粉在炉缸的燃烧时间在 $0.01 \sim 0.04\text{s}$ 内，其加热速度为 $103 \sim 106\text{K/s}$ 。

(3) 提高料柱透气性技术。高炉正常操作要维持一个合理的煤气压差值，即热风压力减去炉顶压力的数值。一些高炉工作者采用炉料透气性指数来操作高炉。料柱透气性高低是由多方面因素所决定的，只有采取综合措施才能提高料柱的透气性。

1) 提高高炉入炉矿含铁品位，减少渣量。高炉内煤气阻力最大的地方是软熔带，特别是铁矿石刚开始熔化时，还原成 FeO 和形成初渣，渣铁尚未分离，尚未滴落至炉缸。如