

现代 高炉粉煤喷吹

王国雄 王铁 沈峰满 杨佳龙 编著

冶金工业出版社



XDGLFMP C

现代高炉粉煤喷吹

王国雄 王 铁 编著
沈峰满 杨佳龙

内 容 提 要

本书较为系统地介绍了现代高炉喷煤技术，其内容主要包括：煤粉的制备与贮存、煤粉的输送与分配、煤粉的自然与着火、煤粉的爆炸行为及其防护、煤粉的气化与燃烧、煤粉的富氧综合喷吹、煤粉的强化喷吹、喷煤操作与高炉炉况调节、高炉喷煤的监测与控制，等等。

本书可供从事炼铁工作的工程技术人员、研究人员及高等院校有关专业师生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代高炉粉煤喷吹/王国雄等编著. -北京: 冶金工业出版社, 1997. 11

ISBN 7-5024-2105-X

I. 现… II. 王… III. 高炉炼铁-粉煤-喷吹 (冶金炉) N. TF53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 16199 号

出版人 鞠启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京市梨园彩印厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1997 年 11 月第 1 版, 1997 年 11 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 9.875 印张; 263 千字; 307 页; 1-1500 册

19.00 元

前 言

世界炼铁业普遍面临着焦炉老化、焦煤短缺及生产环境恶化等问题。高炉喷吹煤粉技术的发展为解决这些问题提供了经济而有效的途径。这一于 60 年代初就成功地进行了工业实践的技术,在最近十几年里得到了飞速发展。它不仅体现在传统喷吹工艺的完善和装备的现代化上,而且还表现在氧煤喷吹等新工艺技术的工业化上。尤其是以西欧和日本为代表的发达国家高炉喷煤技术的发展历程,充分展示了这一技术在经济和社会发展方面的巨大潜力。

中国是最早开发和应用高炉喷吹煤粉技术的国家之一。长期以来虽然积累了许多有益的经验,但工艺技术、喷吹能力、检测控制等仍不及发达国家。随着国民经济的发展,大力推广和发展高炉喷吹煤粉技术已经成为中国钢铁工业发展的一个重大课题。

本书正是基于上述考虑而编写的,目的在于推广与总结近年来国内外有关高炉喷吹煤粉技术的研究成果和工业实践经验,为炼铁专业工程技术及研究人员提供借鉴与参考。全书共 11 章,内容涉及煤粉加工与输送、喷吹安全防护、煤粉强化燃烧、新的喷吹工艺、喷煤操作及检测控制等工艺技术。其中第 1, 3, 4, 5, 7, 9 章由王国雄博士撰写,第 2, 6 章由杨佳龙、沈峰满博士撰写,第 11 章由王铁撰写,第 8, 10 章由王国雄、杨佳龙合作撰写。王铁、杨佳龙对全书进行了编纂、整理。东北大学李永镇教授在百忙中对本书的编写作了悉心指导,黄琳基、钟宏德及武汉冶金科技大学的罗庭和教授、曾小宁先生对本书的出版给予了大力支持,在此一并深表谢意。

作 者

1996. 11

目 录

1	高炉喷煤概况	(1)
1.1	绪论	(1)
1.2	高炉喷吹用煤的特点	(10)
1.3	喷煤工艺的基本流程	(16)
	参考文献	(23)
2	煤粉的制备与贮存	(25)
2.1	原煤的贮运	(25)
2.2	制粉工艺	(26)
2.3	主要制粉设备	(28)
2.4	煤粉的贮存	(36)
	参考文献	(36)
3	煤粉的输送与分配	(37)
3.1	煤粉的输送方式	(37)
3.2	煤粉的输送特性	(38)
3.3	煤粉在管道中的运动	(42)
3.4	煤粉输送管道的压力损失	(51)
3.5	煤粉输送的最佳气流速度	(59)
3.6	煤粉的流态化	(60)
3.7	煤粉的浓相输送与分配调节	(64)
	参考文献	(71)
4	煤粉的自燃与着火	(72)
4.1	煤粉的自燃与着火过程	(72)
4.2	煤粉着火特征的描述	(75)
4.3	煤粉着火特性的测量	(77)
4.4	煤粉着火的影响因素	(81)

4.5	烟煤—无烟煤混合煤粉的着火过程	(85)
4.6	煤粉的着火行为与高炉安全高效喷吹	(87)
	参考文献	(88)
5	煤粉的爆炸行为及其防护	(89)
5.1	煤尘爆炸的基本条件	(89)
5.2	煤尘爆炸的一般原理	(90)
5.3	煤尘爆炸参数及其测定	(93)
5.4	对喷吹现场煤粉爆炸性的检测	(98)
5.5	煤尘的爆炸及其防护	(100)
5.6	高炉安全喷吹烟煤的实践	(108)
	参考文献	(115)
6	煤粉的气化与燃烧	(116)
6.1	煤粉燃烧的一般规律	(116)
6.2	单一颗粒煤粉的燃烧行为	(118)
6.3	单一颗粒煤粉的燃烧机理和提高燃烧率的方法	(125)
6.4	高炉条件下的煤粉燃烧	(134)
6.5	高炉回旋区煤粉燃烧的模拟模型	(141)
	参考文献	(147)
7	煤粉的富氧综合喷吹	(148)
7.1	富氧喷煤方法、特点与效果	(148)
7.2	富氧综合鼓风时煤粉流的传热传质过程	(155)
7.3	富氧鼓风与风口前煤粉燃烧	(161)
7.4	富氧喷煤技术的实施	(168)
7.5	富氧喷煤的工业实践	(172)
	参考文献	(176)
8	氧煤强化喷吹	(178)
8.1	局部富氧及氧煤喷吹的试验研究	(178)
8.2	氧煤喷吹过程中氧煤混合及燃烧	(187)
8.3	氧煤枪的结构设计	(190)

8.4	氧煤枪的改进与优化	(198)
8.5	氧煤枪枪体温度的计算	(203)
8.6	氧煤喷吹的管网设计	(210)
8.7	氧煤喷吹操作	(211)
8.8	氧煤喷吹的工业试验及实践	(213)
	参考文献	(223)
9	喷煤技术的多样化	(224)
9.1	喷煤系统功能的扩展与变革	(224)
9.2	配煤混合喷吹	(226)
9.3	矿煤复合喷吹	(235)
9.4	粒煤喷吹	(241)
	参考文献	(247)
10	喷煤操作与高炉炉况调节	(249)
10.1	喷煤高炉的煤气流运动特征	(249)
10.2	未燃煤粉的行为	(253)
10.3	高炉喷煤的极限问题	(257)
10.4	喷煤高炉的炉况调节	(261)
	参考文献	(264)
11	高炉喷煤的监测与控制	(265)
11.1	喷煤系统的安全检测及控制	(265)
11.2	煤粉流量的测量与控制	(278)
11.3	高炉喷煤过程控制模型简介	(287)
	参考文献	(306)

1 高炉喷煤概况

1.1 绪 论

喷吹辅助燃料技术是现代高炉炼铁生产广泛采用的新技术，它也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，喷吹煤粉日益受到世界各个国家或地区的高度重视。这项技术在近十几年中取得了明显的进步，而且，在相关的炼铁新工艺（如熔融还原）中，也不断地得到了推广应用。

1.1.1 高炉喷煤技术的发展背景

冶金煤炭资源的经济合理地利用，客观上对高炉喷煤技术的开发与应用提出了最为迫切的要求。尤其是在经历了 1973 年和 1979 年两次世界性石油危机之后，这方面的压力就更大了。世界各国都注意到高炉喷煤在调整高炉能源结构中的重要作用，即高炉采用喷煤技术后可以节约冶金焦炭，促进冶金煤炭资源的合理利用。

冶金焦炭是传统高炉炼铁的主要燃料。随着炼铁生产规模的扩大和生铁需求量的增加；随着现有焦炉的老化，环境污染严重，难以再用新建焦炉的办法增加焦炭产量。冶金焦炭的供应日趋紧张，其价格不断上涨。更主要的是，作为冶金焦炭生产的唯一原料——炼焦煤不仅供不应求，而且储量也非常有限。因此，如同增加产量一样，降低消耗、节约焦炭、避免全焦操作是现代高炉生产的另一个中心任务。

中国是煤炭生产大国，焦炭资源同其他国家相比还算是比较丰富的。但最近的矿产资源调查表明：中国煤炭总储量约 8000 亿 t，其中焦煤储量仅 2000 亿 t 多，而且主要分布在山西、山东、内

蒙等少数几个地区。可以预测，到下个世纪末，可供选择的冶金焦煤资源将出现严重短缺。

为了改变这种不利局面，人们尝试了包括天然气和重油在内的各种辅助燃料的高炉喷吹方法，而终因资源条件的限制和价格方面的原因，又将注意力大多集中到了喷吹煤粉或粒煤上。从图 1-1 所示的煤与重油价格变化的对比来看，煤的价格相对低且平稳，这是高炉喷煤技术得以发展的一个重要原因。

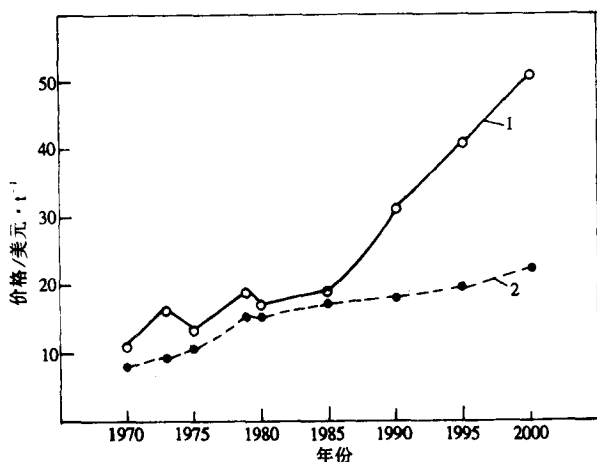


图 1-1 煤与重油价格的变化

1—重油；2—煤

高炉操作调剂及其相关技术的发展，也促进了喷煤技术的发展。远在 60 年代末期，随着烧结技术的发展，高炉原料的综合冶金性能有了明显的改善。与此同时，高炉容积不断增大，高风温、高压及富氧等相关技术逐渐得到完善。尤其是在 70 年代中期，配合采用高炉喷油技术，世界各地的高炉操作整体上已经达到了比较高的水平。如在日本，当时的风温水平已可达 1200℃，富氧鼓风和脱湿鼓风作业也相当普遍。

然而，在 1979 年第二次石油危机的冲击下，重油价格暴涨，迫使许多喷油高炉不得不采用全焦操作。由于缺乏喷煤调剂手段，高炉停止喷油后，风口前理论燃烧温度得不到有效控制，经常引起炉温的大幅度波动，造成炉况不顺。为了保持高炉的稳定顺行，全焦操作的高炉普遍被迫采取降低风温、停止富氧鼓风、增加鼓风湿度等措施，结果导致高炉焦比升高，生铁产量下降。

图 1-2 给出了日本 70 年代初期以来高炉生产的主要技术指

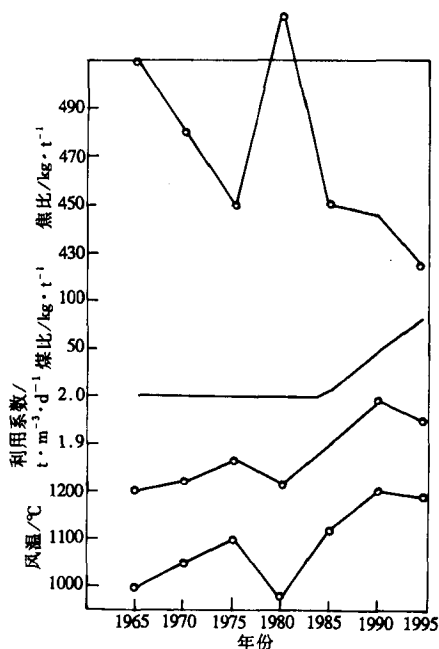


图 1-2 日本历年高炉操作技术指标

标。由于日本能源几乎完全依靠进口，因此，其高炉生产状况也与世界能源供应市场的变化密切相关。不难看出，日本高炉在 1979~1981 年间生产指标变差，焦比升高，利用系数下降。其主要原因在于采用全焦操作后，风温被迫由 1200°C 左右下降到 800~900°C，富氧作业被迫取消，而脱湿鼓风又不得不改为加湿鼓风，从而使高炉操作的整体水平倒退到 60 年代水平，高炉的运行状况

也变差了。

改变这种被动局面，充分发挥高风温技术潜力，并为高炉稳定顺行提供灵活的调控手段，只有通过采用廉价的煤粉来取代重油喷吹的方法才能实现。因此，喷吹煤粉是高炉技术进步的合理选择，而且当将高风温、富氧鼓风和喷吹煤粉有机地结合起来后，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。

追求经济利益、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。焦炭和煤粉在日本差价为 10000 日元/t 左右；在德国的差价 100 马克/t；而在中国，1991 年为 80~120 元/t，1992 年为 150~200 元/t，到 1993 年增加至 200~260 元/t。在这种情况下，如何增加喷吹量和改善喷吹效果，从而取代更多的焦炭，以降低生铁成本，已成为各种喷煤技术的开发与改进所追求的目标。鉴于不同国家的资源和运输条件存在着差异，虽然采用高炉喷煤降低生铁成本的幅度有所不同，但各国高炉生产实践表明，无论富氧与否，喷吹煤粉达到一定量后，都可以程度不同地降低生铁成本。如瑞典律勒欧(Lulea)厂高炉喷煤 60kg/t 时，吨铁成本降低了 3 德国马克；比利时西姆达(Simdar)厂高炉喷煤 100kg/t 时，吨铁成本降低 5.8 美元；意大利塔兰托厂高炉喷煤 150kg/t 时，吨铁成本降低 5%；英国斯肯索普(Scunthorpe)厂高炉富氧喷煤 200kg/t 时，吨铁成本可降低 20 英镑。

在考察高炉喷煤技术发展背景时，还必须注意到环境保护方面的因素。第二次世界大战期间，钢铁工业受到严重的破坏，工业发达国家为了尽快恢复战后经济，加速了钢铁工业的发展步伐，在五六十年代相继新建或改建了一大批焦炉，而这些焦炉中一部分炉龄迄今已近 40 年，预计到 2000 年将有近半数焦炉炉龄超过 30 年。为维持高炉的正常生产，目前这些焦炉及相关设备都需要大修或重建，这样不仅所需投资大(约为喷煤设施建设投资的 3~

4 倍),而且环境污染日益严重。迫于全球性环境保护方面的压力,更多的人主张积极发展高炉喷煤技术,大幅度降低焦炭消耗和减少焦炉的数量。

实际上,与喷吹其他燃料相比,喷吹煤粉的设备投资较大,工艺过程较复杂。喷煤技术之所以受到日益广泛的重视且得到迅速发展,主要是因为煤粉在风口前气化燃烧所消耗的补偿热量比天然气或重油的都要少。在同样的风温水平和富氧率情况下,若维持相同的理论燃烧温度,高炉所能接受的喷煤量要比天然气和重油的量多得多。因此,要想通过喷吹燃料来大量地降低焦炭消耗,以取代部分焦炭,唯有喷吹煤粉才是最合适的选择。

1.1.2 喷煤技术的发展

衡量高炉喷煤技术发展水平,除了要看喷煤设施及检测、控制等硬件的水平外,通常还主要采用下述两个指标进行评价,即:

(1) 煤比(或称喷煤量) G_m ,是指生产单位生铁所喷吹的煤粉量,单位为 kg/t ;

(2) 喷煤率 q_m ,是指煤粉在生产单位生铁所消耗的燃料(煤粉加焦炭)中所占的比例。

为考察不同国家和地区高炉喷煤技术的发展状况,一般还采用普及率 q_m 这一参数,它是指喷煤高炉占全部运行高炉的百分数。

在高炉炼铁工艺中采用喷吹煤粉技术,早在 1840 年就由 S. M. 班克斯(S. M. Banks)申请了专利,并于 1840~1845 年在法国进行了实际操作,因工艺方面的问题没有得到解决,结果未被推广应用。后来又经过了一个多世纪,到 20 世纪 60 年代初期,以北美为代表的许多地区再度试验了这一技术,其间还将原来的垂直螺旋给料改造成了水平螺旋给料,尽管如此,还是以失败而告终。最后在采用了粉体气力输送技术的基础上,喷煤才真正成为在工业上得到采用的技术。

图 1-3 给出了 1990 年全世界已实施和正在计划实施喷煤操作的高炉座数统计结果。可以发现,绝大多数高炉喷煤都是最近

十几年发展起来的，其中日本、韩国等亚洲国家和欧洲更是如此。例如，70年代末期，英国某公司曾引进我国首钢的喷煤技术，同时德国、法国也相继对采用高炉喷煤技术进行了研究，结果大大促进了欧洲喷煤技术的迅速发展。到1991年，欧洲喷煤高炉已发展到42座，普及率超过了50%。而日本新日铁公司，70年代末、80年代初从美国引进了阿姆科(Armco)高炉喷煤系统。日本1981年才有了第1座喷煤高炉（新日铁大分1号高炉），但到1992年底，全日本在生产的33座高炉中，已有27座高炉实施了喷煤操作，普及率达82%。

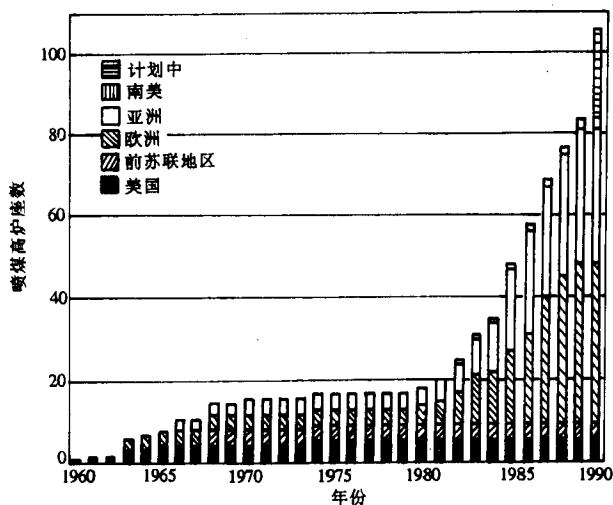


图 1-3 世界各地喷煤高炉的统计结果

另外，从喷煤量和喷煤率来看，近几年欧洲和日本的许多高炉都已达到了相当高的水平，其中有一批高炉的最高月平均喷煤量已经达到了170~200kg/t，喷煤率达到35%~40%；另有一批高炉的年平均喷煤量已经达到140~180kg/t，喷煤率达到28%~36%。其结果见表1-1和表1-2。

**表 1-1 1991~1992 年欧洲和日本一些高炉的最高
月平均喷煤量和喷煤率**

国家	工 厂	炉 号	最高月平均			时 间
			焦比 kg/t	喷煤量 kg/t	喷煤率 %	
德国	施维灵根 (Schwelgern)	1	307	201	39.5	1992.11
英国	斯肯索普厂 (Scunthorpe)	维多利亚 (Vict.)	314	201	39.0	1991.10
法国	敦刻尔克厂 (Dunkirk)	4	287	194	40.3	1992.05
日本	神户	3	313	188	37.9	1991.09

注：此外，还有几座高炉在 1990 年以前也曾达到过月平均 35% 以上的喷煤率，例如德国蒂森 (Thyssen) 公司的海姆波恩 (Hamborn) 9 号高炉，英国斯肯索普工厂的女王玛丽号 (Queen Mary) 高炉

**表 1-2 1991~1992 年西欧和日本一些高炉的
年平均喷煤量和喷煤率**

国家	工 厂	炉 号	年 平 均			时 间
			焦比 kg/t	喷煤量 kg/t	喷煤率 %	
德国	施维灵根	1	320	179	35.9	1992
德国	海姆波恩	4	350	145	29.3	1992
德国	海姆波恩	9	357	143	28.6	1992
德国	鲁尔区厂 (Ruhrtort)	6	360	146	28.9	1992
法国	敦刻尔克厂	4	309	170	35.5	1992
英国	斯肯索普厂	维多利亚	332	165	33.2	1991.07~1992.06
英国	斯肯索普厂	安妮	356	142	28.5	1991.07~1992.06
日本	神户	3	323	175	35.7	1991

我国 1964 年便开始在鞍钢进行了高炉喷煤试验。60 年代末至 70 年代中期，我国喷煤技术发展较快，到 70 年代末，高炉喷煤普及率和喷煤量在世界上几乎都是领先的。但由于工艺落后，设备简单、监控水平低等多方面原因，致使目前我国的高炉喷煤技术相对于欧洲和日本等发达国家已完全失去了优势，甚至于在许多方面都已落后了。

1991 年的统计资料表明，我国重点企业高炉中有 61 座实施

了喷煤,普及率为75%,年平均喷煤量为51.1kg/t;而地方骨干企业有60座高炉喷煤,普及率46.5%,年平均喷煤量仅25.35kg/t。

图1-4给出了我国重点企业高炉历年来年平均喷煤量和国外高炉年平均喷煤量的比较结果。可以看出,我国高炉与日本、韩国的相比,不仅喷煤量低,而且近年来还有所下降。目前除首钢等为数不多的高炉年平均喷煤量可达到100kg/t的水平外,大部分高炉的喷煤水平仅60~80kg/t。造成这种差异的主要原因是后者设备老化,煤质低劣,喷吹煤种单一(主要是无烟煤),风温、富氧水平不高等。

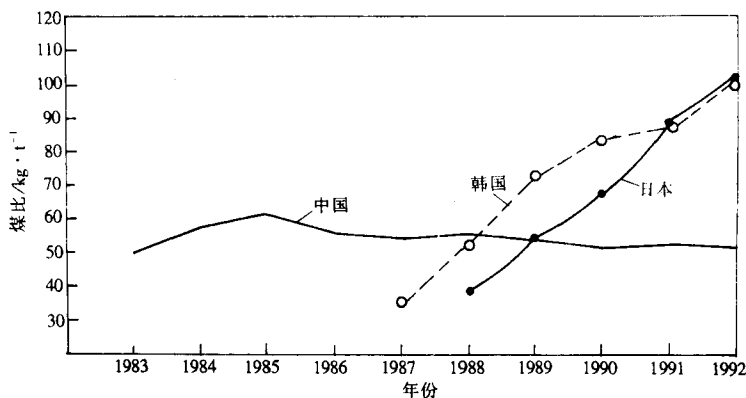


图1-4 中国、日本、韩国高炉喷煤年平均量变化情况

1.1.3 喷煤技术的最新研究成果

经过最近十来年的研究和实践,高炉喷煤技术水平日益提高,获得了一大批研究成果。

1.1.3.1 富氧喷煤技术得到普遍应用

富氧鼓风不仅操作简便,而且还可以充分利用炼钢余氧资源,提高风口前理论燃烧温度,增加喷煤量和生铁产量。尤其是在目前风温水平难以进一步大幅度提高的情况下,富氧喷煤已经成为

许多高炉增铁节焦的重要手段，且技术成熟，操作简单、运行费用低，因而应用相当普遍。

目前的发展趋势是，随着喷煤量的增加，鼓风富氧率也要求相应地提高，如前苏联曾进行过氧含量（体积）为 35% 的鼓风富氧喷煤试验；日本钢管公司鹿岛 2 号高炉曾在单风口富氧喷煤试验中采用了 85% 最高氧浓度操作；英国也计划进行氧含量达 50% 的富氧煤粉综合喷吹。目前的问题是，采用如此高富氧率的富氧鼓风后，高炉内氧和煤的平衡条件是否能得到满足？高炉顺行是否因为大量喷煤后炉内矿焦比显著升高而遭到破坏？这些问题都有待于进一步探索和研究。

1.1.3.2 氧煤喷吹技术日趋成熟

氧煤喷吹技术是 80 年代末期才开始开发并得到应用的一项新技术。通过氧煤喷吹可以显著地改善煤粉颗粒在风口前的燃烧条件，显著提高煤粉的燃烧率，大幅度增加喷煤量。因此发展氧煤喷吹已经成为高炉喷煤技术的一个重要发展方向。

欧洲煤钢联组织（ECSC）从 1988 年初开始，出资 640 万英镑资助欧洲一些国家的钢铁公司，如英国钢铁公司、荷兰的荷文文厂和意大利的伊未瓦厂共同进行了氧煤喷吹技术的开发研究。1989 年已实现了 200kg/t 的高炉喷煤示范作业，1991 年 5~6 月喷煤量增加到 300kg/t，目前正在进行喷煤量目标值为 400kg/t 的探索试验。

实施氧煤喷吹的最重要手段之一，便是采用氧煤喷枪（或称氧煤燃烧器）。氧煤枪结构设计的研究是目前氧煤喷吹技术发展过程中的一项重大课题。

1.1.3.3 喷煤工艺简化，便于监控

简化喷煤工艺，完善喷煤计量和安全监控手段是近年来喷煤技术的又一重要进步，也是喷煤技术的一个发展趋势。

例如，传统的制粉系统通常采用一、二级旋风分离器加布袋除尘器，而最近设计的制粉系统多采用一级旋风分离器加布袋除尘器，或者干脆取消一、二旋风分离器而采用一级布袋分离器，并

应用新型流化技术减少排粉机的数目。又如应用新型单支管分配器配合浓相输送作业等,可大大减少工艺环节,简化设备结构,有利于密封及系统的正常维护。

此外,广泛采用新型检测传感器和计算机控制等技术,不断提高煤粉计量的精确度和诸如温度、氧浓度、CO 浓度等参数的在线监测水平,这样既能实现喷煤量的均匀调节,也能增加系统的严密安全联锁控制。

1.1.3.4 粒煤喷吹和配煤混合喷吹技术引人注目

粒煤通常指粒径在 0.2~2mm 间(平均粒度约 0.6mm)的颗粒煤。粒煤喷吹可以获得较好的经济效益,同煤粉制粉相比仅磨煤系统设备投资就可节约一半,且粒煤制备的成本也很低。英国的斯肯索普厂和法国的洛尔丰特(Lorfont)公司的高炉均采用了粒煤喷吹,其中斯肯索普厂的维多利亚号高炉,1991 年 10 月平均粒煤喷煤量高达 201kg/t,十分引人注目。

配煤混合喷吹是以煤种性能的互补性为基础,旨在改善喷吹煤粉特性如可燃性、可爆性等,以促进喷煤效果而采用的一种喷煤技术。迄今国内外许多学者都进行了配煤(包括添加剂)混合喷吹方面的基础研究,有些成果已在一些高炉喷吹实践中得到了应用,是一种具有推广价值的高炉喷吹新技术。

事实上,随着喷煤技术的不断发展,许多相关的或与喷煤并用的技术都取得了重大进展。这些技术涉及到了诸如煤粉的浓相输送技术、煤粉在高炉内气化燃烧及炉况调节等的基础研究、喷煤高炉数学模型及计算机控制等。

1.2 高炉喷吹用煤的特点

1.2.1 煤的种类及其化学组成

1.2.1.1 煤的种类

煤属于矿物质固体燃料,依据母体物质炭化程度的不同,可分为泥煤、褐煤、烟煤和无烟煤四大类。

泥煤的质地疏松,吸水性强,其化学成分中含氧量较高(28%