

国内外高炉喷煤技术现状及发展趋势

于勇 王立 李京社 杨世山
(北京科技大学)

摘要 概述了推广高炉喷煤技术的必要性,介绍了国内外高炉喷煤技术现状以及对煤的质量要求,展望了高炉喷煤的发展前景。

关键词 高炉 喷煤 现状 前景

PRESENT STATE AND DEVELOPMENT TREND OF BF PULVERIZED COAL INJECTION TECHNOLOGY AT HOME AND ABROAD

Yu Yong Wang Li Li Jingshe Yang Shishan
(University of Science and Technology Beijing)

ABSTRACT The necessity of promoting BF coal injection technology is outlined. The present state of BF pulverized coal injection technology and quality requirement for coal are introduced. The prospects for the technology is put forward.

KEY WORDS Blast furnace Pulverized coal injection Present state Prospects

0 前言

高炉生产离不开焦炭。由于焦炭短缺,加之价格昂贵,因而是钢铁工业中急待解决的问题。喷吹燃料,尤其是喷吹煤粉代替部分焦炭,就成了高炉冶炼继续生存并与其他炼铁方法竞争的重要技术,高炉喷煤愈多,取代的焦炭越多,经济效益越高,就越能维持长久的高炉生产。从2002年国内重点钢铁企业炼铁技术指标来看,国内大部分高炉喷煤量均在130kg/t铁左右,而国际先进水平的高炉喷煤比可达到200kg/t铁以上。因此,如何经济有效地达到200kg/t铁的煤比,是一个急待解决的问题。

1 国外高炉喷煤现状

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,世界最早的工业应用即是根据这一设想于1840~1845年间在法国博洛涅附近的马恩省炼铁厂实现的。但此后的100多年,高炉喷煤技术发展却相对缓慢,基本无进展;直至20世纪60年代初,欧洲及中国、美国的一些工厂才陆续开始在高炉上试验喷煤。70年代末,第二次石油危机的出现,加快了高炉喷煤技术的研究和发展,特别是欧洲和日本更是在实际应用上取得了重大突破。到90年代初,欧洲和日本已有小部分高炉月均喷煤比超过了200kg/t铁大关^[1]。

1.1 高炉喷煤主要流程

1)德国Kuttner流程:煤粉罐、中间罐、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。近十多年来,Kuttner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Amco流程:煤粉仓→并列喷吹罐→总管→分配器→支管→常规喷枪。与新Kuttner流程不同的是Amco流程使用3个喷吹罐,一根总管、一个分配器;不仅总管要变径,局部也要变形。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,其控制和设备组成均较复杂。

4)日本川崎流程:煤粉罐、中间罐、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流程:历史上PW公司与Kuttner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一些出入。如老流程中PW用旋转给料器代替了Kuttner的流化小罐;新流程中用声纳管代替了阴损管,用流化喷嘴代替了流化罐,并增设泄压气回收装置等。

6)混合型流程:煤粉罐、中间罐、喷吹罐三罐串接→总管→分配器→支管→喷枪。这是在上述一些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、中间罐、喷煤泵三罐串接→总管→分配器→支管→喷枪,其主要特点是用喷煤泵代替了传统的喷吹罐,中间罐与喷煤泵之间使用圆顶阀联接。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。斯肯索普安娜女王号高炉及克里夫兰4号高炉采用的即是典型的粒煤喷吹流程。其中,克里夫兰4号高炉的设计喷煤比竟高达400kg/t铁,是迄今为止喷煤比最高的设计。

1.2 国外喷煤现状

世界范围的高喷煤比指标大多产生在20世纪90年代中后期。尽管英国钢铁公司克里夫兰厂4号高炉(600m³)的一套试验装置,曾在1991年6月短期喷吹出318kg/t(粒煤)的世界最好成绩,但公认的世界纪录却是由日本福山厂3号高炉(3223m³)在1998年6月创造的,当月的月均吨铁喷煤量为266kg/t,焦比289kg/t,喷煤率47.9%。在此前后,还有过加古川厂1号高炉(4550m³)1997年12月230kg/t,1998年3月254kg/t,霍戈文厂7号高炉(4363m³)1998年5月220kg/t的报导。虽然这些高炉获得了较高的喷煤比,但焦比仍居高不下,喷煤率基本徘徊在38%~42%。从能够获得的资料来看,由于经营方面的原因,世界上一些大型高炉并没有一味追求高喷煤比,而是依据本厂的具体情况确定喷煤量,但新建的喷煤装置通常都选取较高的设计喷煤比。

目前的喷煤世界先进水平为180~220kg/t(喷煤率35%~40%),世界一流水平应为220~240kg/t(喷煤率40%~45%)。世界上已经建成的吨铁设计喷吹量为250kg/t的喷煤装置大约有几家:施韦尔根2号高炉(1993年)、艾莫伊登6号高炉(1996年)、敦克尔刻4号高炉(1996年)、福山2号高炉、3号高炉(1998年)、福山5号高炉(2000年)、武钢4号高炉、5号高炉(2002年)、宝钢2号易地大修高炉(2005年)。

2 我国高炉喷吹煤现状

我国是世界上较早采用高炉喷煤技术的国家之一,由于我国国内煤炭资源较为丰富,因此在近些年我国高炉喷煤技术得到迅速发展。从20世纪60年代开始高炉喷煤到70年代,我国高炉喷煤技术以其资源广、喷吹量大、效益高而受到国际钢铁界的关注,高炉喷煤普及率和喷煤量在国际上一度处于领先水平。80年代后期,由于受配煤设备、自动化计量手段以及煤炭质量较差等问题影响,我国高炉平均喷煤比在50~60kg/t。90年代以来,高炉喷煤技术纳入国家科技攻关计划,大型高炉全部设置喷煤装置,喷煤高炉不断增加,喷煤工艺改造步伐加快,大喷吹成为我国高炉炼铁技术的主流。从1995年起,我国高炉煤比逐步提高,1995年重点企业平均喷煤比仅为58.5kg/t,到上世纪末已经达到118kg/t,2002年达到了125kg/t。全国高炉喷煤总量2002年达到了1400万t以上^[2]。

在我国四大钢铁企业中,目前首钢平均煤比为130kg/t,武钢平均喷煤比为120kg/t,鞍钢为135kg/t,宝钢喷煤起步较晚,1992年才开始实验在2号高炉喷煤但发展迅速。从1999年至今,3座高炉平均喷煤已连续四年稳定在200kg/t以上的水平,其中1号高炉喷煤比平均230kg/t,最高月达260kg/t,居世界领先水平。在大中型钢铁企业逐年扩大喷煤量的同时,一些中小高炉特别是300~380m³高炉喷煤量也在迅速提高。“十五”期间我国钢铁行业提出的喷煤比奋斗目标是:大中型高炉达到150kg/t,小高炉普遍开始喷煤,平均达到100kg/t。许多企业在新增和改造设备,扩大喷煤能力,并通过提高风温、富氧和改善炉料质量等措施,以增加喷煤量。

3 高炉喷吹煤的质量要求以及煤种的选择

3.1 质量要求

在喷吹煤粉化学成分及工艺性质的级别要求上,我国钢铁企业对煤种选择特别重视以下八个方面的指标和性能:

1)灰分。灰分越高,置换比越低,灰分每提高1%,高炉燃料比升高2%,因此灰分至少要比高炉用焦炭灰分低2%。

2)硫分。硫在煤中是一种较为有害的元素,在燃烧中形成SO₂和SO₃两种有害物质,同时还会影响生铁和钢的质量。随着铁水预处理技术的发展,高炉对硫负荷的要求适当放宽,但一般应小于1%。

3)固定碳。这是煤种选择的主要依据之一,对高炉而言,碳比氢价值高,因为含碳高的无烟煤分解吸热低于烟煤,而含氢高的烟煤其氢以碳氢化合物或水的形态进入高炉,分解吸收大量热量;在高炉风

口前碳燃烧生成 CO , 当 CO 还原铁矿石中铁氧化物时是微放热过程, 而氢还原铁氧化物时是吸热过程; 再者高炉内氢的利用率比碳低, 仅有一半左右。

4) 灰熔点。高炉喷煤应选择高灰熔点煤, 煤的灰熔点高, 不易在风口结渣, 有利于煤粉燃烧。

5) 可磨性。煤的可磨性对高炉喷吹效果虽然没有直接影响, 但 HG 较小, 表明煤的硬度大, 会给制粉工艺带来一定困难, 增加动力消耗, 同时使喷吹设备, 特别是喷枪寿命降低。一般来说, 可磨性指数在 60~95 为宜, 但可磨性指数在 90 以上的烟煤磨机内容易产生粘结现象。

6) 燃烧性。煤粉在高炉风口前是否燃烧完全直接关系到置换比的高低和喷煤量的扩大。粉煤燃烧既受风温、煤量、富氧、粒度等的影响, 又受煤粉本身的组分、煤质等影响, 因而不同高炉会存在不同情况, 但一般来说, 随着煤比的提高, 煤粉的燃烧率降低, 未燃煤粉增多会降低炉内透气性, 使炉渣粘稠, 并增加了悬料的可能性, 同时, 过多的未燃煤粉随炉渣及炉顶煤气排出, 会导致煤焦置换比降低。

7) 反应性。这是个很重要的性能, 是表示煤中未燃碳与 CO_2 的作用能力。在高炉中上部有大量 CO_2 存在, 它们与下降的焦炭发生气化反应, 消耗焦炭中的碳, 降低焦炭强度。在大幅度喷煤时, 作为料柱骨架的焦炭已大大减少, 形成的未燃碳活性高, 粒度细且反应性好的未燃煤粉将优先被气化, 从而减少焦炭的气化反应, 使焦炭有较高强度。因此高炉喷吹要选择反应性好的煤。

8) 爆炸性。煤的爆炸性与煤的可燃基挥发分高低及煤粉粒度大小有关。煤的可燃基挥发分小于 10% 时, 煤粉没有爆炸性。当挥发分大于 10% 时, 有一定爆炸性; 当挥发分大于 25% 时, 就有很强的爆炸性, 爆炸性与煤粒度大小成反比。

3.2 煤种的选择

从上个世纪 80 年代末至今, 我国和世界上大多数国家在高炉喷吹选用煤种上走出了不同的路径。

1) 国际上, 从提高喷煤效率出发, 正由单一喷吹烟煤向实行混合喷吹转移, 且在大幅提高低挥发分煤混合比。由于世界上无烟煤等低挥发分煤炭资源分布不均匀, 欧盟各国、亚洲日本、韩国等主要产钢国高炉喷吹起步时大多采用挥发分极高的廉价气煤, 但高挥发分气煤容易降低置换比, 因而钢厂经过多年喷吹实践, 普遍希望采用混合喷吹的方式, 把挥发分降到 20% 左右, 以提高喷煤效率。加之这些国家都较好地掌握了富氧、高风温喷吹技术, 所以随着煤比的提高, 从合理性选择的角度出发, 近年来纷纷

推行混合喷吹, 增加了低挥发分煤喷吹比例。

2) 在我国, 从煤炭比价出发, 正由单一喷吹无烟煤向实行混合喷吹方式转移, 且在提高烟煤喷吹比例。鞍钢、首钢是我国最早试验喷吹煤粉的两个钢厂, 1963 年鞍钢喷吹烟煤发生了爆炸, 而首钢在 1964 年喷吹无烟煤却获得了成功, 受其影响在此后近 20 年的时间内, 大多数高炉都采用无烟煤喷吹, 并且其技术设备比较简单, 安全性好, 效果较为明显。最近 10 年来, 随着我国高炉喷吹实践经验日渐丰富, 喷吹工艺和装备明显得到改善, 一些小高炉为提高企业效益, 才开始试验喷吹烟煤, 并逐步形成了一整套烟煤喷吹安全技术, 一些大钢厂如宝钢, 从国外引进了先进的喷吹装置和技术, 又把烟煤喷吹在我国高炉的应用大大向前推进了一步。

目前, 我国高炉对喷吹煤种的选择大致可以分为两种情况: 一是华北、东北地区的钢厂, 因所在地烟煤资源较为丰富, 有掺加烟煤喷吹增长的趋势。我国煤炭资源虽然十分丰富, 但分布并不均衡, 低挥发分贫瘦煤、无烟煤大多分布在中西部地区, 而大中型钢厂则多数分布在东部地区, 这就造成低挥发分煤从中西部向东部运输, 成本较高, 因此钢厂倾向于掺加本地廉价烟煤喷吹, 以降低综合成本。二是东部沿海地区一些钢厂, 由于当地煤炭资源短缺, 不论是烟煤或者无烟煤, 都主要依赖从中西部地区调入, 因而无烟煤、烟煤比价关系不太明显, 所以采用的喷吹方式与国际高炉界基本一致, 大多实行混喷, 且无烟煤喷吹比例高于烟煤, 如我国国内目前喷煤比最高的宝钢就是采用混合喷吹方式, 混喷比例为无烟煤: 烟煤 = 6: 4。总的来说, 我国高炉已普遍掌握了高风温、富氧喷吹技术, 烟煤喷吹技术和装备都已成熟, 加之烟煤资源相对丰富、分布广泛, 采用混合喷吹的手段, 掺加烟煤喷吹比例有增长趋势。

从理论上讲, 所有煤种都可用于高炉喷吹, 但由于焦煤、肥煤是宝贵的炼焦煤, 同时, 高炉喷吹具有结焦性的煤容易导致风口结焦, 因此, 高炉喷吹用煤主要包括无烟煤、贫煤、瘦煤和气煤。无烟煤发热量高, 理论置换比高, 我国一些高炉在喷吹实践中得出的经验数据为 100% 喷吹烟煤条件下, 煤焦置换比为 0.7~0.75; 而 100% 喷吹无烟煤条件下, 煤焦置换比为 0.8~0.9, 由此可见, 喷吹无烟煤比烟煤可多置换约 20% 的焦炭。但无烟煤燃烧性差, 尤其是在煤比较高时, 过多的未燃煤粉不仅影响高炉顺行, 还会降低置换比。目前我国单独喷吹无烟煤煤比最高的是马鞍山钢铁公司, 喷煤比为 160kg/t

烟煤燃烧性好, 可磨性 (下转第 6 页)

控制好碳氧枪和炉渣碱度,优化后 SWRH82B 的转炉终点氮含量平均降低 4×10^{-6} 。

3)出钢过程严格控制合金中的氮含量,采用弱脱氧工艺和维护好出钢口操作,采取预加电石,形成气幕,减少钢流吸氮,并采用低氮增碳剂,优化后 SWRH82B 出钢过程约减少增氮 15×10^{-6} 。

4)LF送电过程采用微正压操作,防止强烈搅拌吸气,同时降低造渣料和铁合金等炉料中的氮含量,优化后 SWRH82B 钢 LF精炼过程约增氮 6×10^{-6} ,比原来约减少增氮 4×10^{-6} 。

5)通过严格控制 VD 精炼时的真空度、处理时

间、搅拌强度等工艺参数,实现 VD 结束时钢液氮含量的目标控制,优化后 SWRH82B 钢 VD 平均脱氮率为 23%,比原来增加 3%。

6)从钢包至中间包、中间包至结晶器采用全过程保护浇注,防止浇铸过程中钢水与空气接触产生二次氧化及吸氮,使浇注过程的增氮量由原来的 20×10^{-6} 降为 10×10^{-6} 左右。

优化后 SWRH82B 成品钢中的氮含量由原来的 85×10^{-6} 左右降低为 46×10^{-6} 左右,约降低了 39×10^{-6} ,安钢 SWRH82B 优化工艺前后钢中氮含量的比较见表 3:

表 3 安钢 SWRH82B 优化工艺前后钢中氮含量的比较

钢中氮含量	转炉终点	出钢增氮	氩站	LF增氮	LF末	VD脱氮	VD末	连铸增氮	成品氮含量
优化前平均	39	27	66	15	80	16	65	20	85
优化后平均	35	12	47	6	44	10	35	10	46
平均降氮	4	15	19	4	33	-6	40	10	39

4 结论

1)对于安钢 100t电炉而言,保证足够大的铁水量(或生铁),使其兑入比例不低于 35%,并采用大的脱碳量和脱碳速度,以及合适的终点碳制度,可初步降低钢中的氮含量。

2)随着出钢口使用次数的增加,氮含量增加量(精炼炉第一个样氮含量减去竖炉末期氮含量)降低,因此出钢时,维护好出钢口,保证钢流不散乱、不细流,并在规定的时间内出完钢,可在一定程度上减少钢中的氮含量。

3)LF精炼过程弱吹氩时,由于氩气泡的真空泵作用,可脱除钢中的部分氢,但对于降低氮含量的作用并不明显,控制不当时还会增加氮含量,且从大部分炉次来看,用钢包炉精炼时钢中的氮含量增加。

4)生产过程中最终钢液中的氮由其各工序的增(脱)氮量决定。

5 参考文献

- [1] 蔡开科,张立峰,刘中柱. 纯净钢生产技术与现状. 河南冶金, 2003, 11(3): 3 - 10.
- [2] 张鉴. 炉外精炼的理论与实践. 北京:冶金工业出版社, 1993: 12 - 33.

(上接第 3 页) 指数一般比无烟煤高,有利于提高煤比,但高炉环境下,烟煤燃烧热比无烟煤低,理论置换比低,而且单独喷吹高挥发分烟煤,还存在如下不利因素:

1)回旋区不稳定,不利于高炉顺行;

2)具有爆炸性,给安全生产带来隐患;

3)风温、富氧较低的高炉大量喷吹烟煤,容易导致理论燃烧温度大幅降低,高炉下部热量不足而上部热量过剩。

鉴于上述情况,我国高炉经过多年实践后,倾向于混合喷吹,认为混煤的理论置换比等于单一煤种理论置换比的加权平均数,但燃烧率都比加权平均值高,与单独喷吹无烟煤相比,混喷在牺牲少量置换比的条件下获得了较高的煤比,降低了生产成本,因此混喷的效益要高于单一煤种。一种普遍的看法是,高挥发分、低灰分烟煤的掺配比例不超过 40%,而无烟煤的掺配比例要达到 60%~70%,当混合后的煤粉挥发分为 20%左右时,能达到最好的喷吹效果。

4 展望

未来 3~5 年,月均 240~260kg/t 的喷煤比和 50%左右的喷煤率将会成为新一轮的世界一流指标;新建或改造喷煤装置的设计喷煤比将超过 250kg/t。目前的若干种喷煤流程已经趋于成熟,短期内恐不会再有新的喷煤工艺出现,月均 240~260kg/t 的喷煤比仍将通过现有的喷煤工艺来实现。

随着高炉喷煤技术的发展,研究重点将会转移到诸如风口前煤粉燃烧状况监测、喷煤量精确计量控制以及专用设备和煤粉预热技术开发等领域上来。高炉在当前现有装备上采用混喷技术并适当放宽煤粉粒度是扩大制粉能力、增大喷煤比、降低焦比的最有效途径之一,通过高压、高风温、大富氧、改善炉料透气性、改善炉缸工作的均匀水平以及研究煤种选择、最佳制粉粒度、保证均匀安全喷吹等是进一步提高喷煤比的技术努力方向。

5 参考文献

- [1] 温大威. 世界高炉喷煤技术现状及发展. 中国冶金报, 2006. 2. 28.
- [2] 裴西平. 我国高炉喷煤现状及供求趋势分析. 炼铁, 2003, 22(5): 33 - 36.