

# 首钢大型高炉技术进步与展望

马泽军 陈辉 张卫东 宋静林 张贺顺 武建龙 李东涛 裴元东 徐萌 青格勒  
(首钢技术研究院)

**摘要** 以 5500m<sup>3</sup>高炉为中心的京唐炼铁,在炼焦配煤、烧结厚料层和闭环控制、低硅含镁球团、高炉综合鼓风、高煤气利用率、高炉专家系统和全干法布袋除尘等技术方面取得了进步。投产 5 年来,京唐炼铁主要经济技术指标达到了较高水平(利用系数 2.3 t/(m<sup>3</sup>·d),燃料消耗 490kg/t 铁左右,固体废弃物基本零废弃),炼铁整个过程向“高效、低耗、优质、清洁、环保”的方向稳步发展。

**关键词** 大型高炉 环保 长寿 燃料消耗 技术进步

## 1 引言

按照循环经济理念,以工艺现代化、装备大型化、生产集约化、资源和能源循环化、经济效益最佳化为发展目标,首钢京唐炼铁厂设计装配有两座 5500m<sup>3</sup>高炉,两台烧结面积为 550 m<sup>2</sup>的烧结机、一台焙烧面积为 504 m<sup>2</sup>的球团带式焙烧机,四座高度为 7.63 m 的焦炉,28 万 m<sup>2</sup>的大型原料场和 22 万 m<sup>2</sup>的大型原煤场。现已形成年产铁水 890 万吨、烧结矿 1100 万吨、球团矿 400 万吨、焦炭 420 万吨的生产规模。

坚持“自主研发、集成优化”的设计思路,京唐高炉通过炉型参数的优化、耐材选择与科学配置、全冷却炉体结构和完备的炉体监测系统等技术措施,为一代炉役实现 25 年长寿命提供了设计基础。投产运行 5 年来,京唐炼铁在低硅含镁球团开发,厚料层和烧结闭环控制技术、炼焦配煤,高炉高利用系数、低燃料消耗等技术取得了长足进展。高炉运行稳定顺行,利用系数 2.3 t/(m<sup>3</sup>·d),燃料消耗 490kg/t 铁左右,固体废弃物基本零废弃,京唐炼铁走上了以“高效、低耗、优质、清洁、环保”为特点的可持续发展之路。

本文将重点阐述首钢京唐 5500m<sup>3</sup>高炉在超大型高炉操作运行技术方面取得的进展,并对今后的炼铁技术发展方向进行展望。

## 2 关键技术介绍

首钢炼铁密切关注世界炼铁技术发展的动向,以资源条件相近的日本、韩国的先进炼铁厂为跟踪目标,不断寻找差距,持续对标改进,努力提高实际操作技术水平,做到入炉原燃料的“优质”,实现了高炉冶炼的“高效、低耗和清洁”。

### 2.1 原料准备技术

#### 2.1.1 气煤和弱粘结煤资源在炼焦配煤中的应用技术

京唐焦化在岩相配煤研究的基础上,掌握了配煤岩相反射率分布图的最佳形状特征、碱指数与焦炭质量间的关系,为稳定焦炭质量、降低炼配煤成本提供了技术保障。

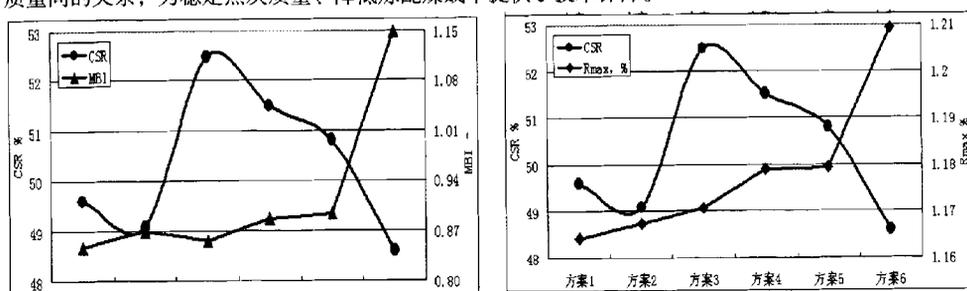


图1 炼焦配煤反射率、碱指数与焦炭反应后强度间的关系

一般而言,随配煤反射率增加,焦炭反应后强度(CSR)亦增加;而研究表明(图1)随配煤反射率(R<sub>max</sub>)的增加,焦炭CSR并没有增加。对配煤碱指数MBI的调查表明:碱指数MBI对焦炭反应后强度有负面影响,如方案1至方案6配煤的反射率逐渐升高,而方案2、方案4、方案5和方案6配煤碱指数增加,焦炭反应后强度呈现出下降的趋势。

以配煤反射率和碱指数为控制参数的配煤技术为京唐气煤和弱粘结煤的应用提供了技术支撑,7%气煤资源或5%弱粘结煤资源在焦炭生产中应用,并做到了应用期间焦炭质量稳定,冷强度M<sub>40</sub>在90%左右、M<sub>10</sub>在6%以下,热强度CRI在20%~23%之间,CSR在68%~71%之间,平均粒径在50mm以上。

2.1.2 厚料层烧结和智能闭环控制技术

(一)厚料层烧结

为充分发挥两台550m<sup>2</sup>烧结机产能,达产提质,研究提出了厚料层烧结梯形布料技术。烧结布料厚度设计750mm,在实施梯形布料技术后达到800mm。厚料层烧结使固体燃料消耗降低1.23kg/t,煤气消耗降低1.07m<sup>3</sup>/t,电力消耗降低7.54kW·h/t。

(二)2009年7月,京唐烧结(550m<sup>2</sup>烧结机)实现了烧结生产过程的智能闭环控制。京唐烧结智能闭环控制技术要点包括。①烧结矿碱度(R<sub>2</sub>)、FeO为主要指标的质量闭环控制系统,②烧结机宽度方向上燃烧一致性的控制技术,③以烧结温度上升点和烧结终点为判断依据的烧结终点精确控制技术(图2所示)。

烧结终点控制是在对风箱废气温度进行四次曲线拟合的基础上,采用直接控制BRP(烧结温度上升点)进而间接控制BTP(烧结终点)的方法,烧结终点稳定率达到98%以上(自85.3%到98.2%)。

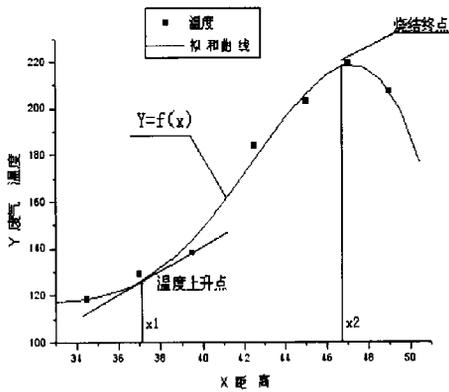


图2 温度上升点BRP和烧结终点BTP曲线拟合图

烧结厚料层和智能闭环控制技术在京唐烧结实施后,烧结终点温度和上升点温度准确率达到99%以上,烧结矿FeO稳定率由82.6%提高到91.7%,碱度稳定率由82.5%提高到96.3%,转鼓指数提高1.34个百分点,烧结返矿率和高炉槽下返矿率分别降低2.8和2.5个百分点,工序能耗降至50.6kgce/t,劳动生产率达到16.67万t/年。

2.1.3 低硅球团生产技术

针对京唐球团用铁矿粉SiO<sub>2</sub>低(1.1~1.7%)、含有钾钠等碱金属易导致还原膨胀率高的问题,研究了调整球团中MgO含量对低硅球团还原膨胀率改善的影响机理。2012年11月开发了低硅球团生产技术,并生产出低硅(SiO<sub>2</sub>以3%以下)含镁(MgO在1.7%左右)球团矿。

低硅球团生产技术在京唐带式焙烧机的应用后,球团矿SiO<sub>2</sub>自3.73%降至3%以下,抗压强度高于2700Pa/球,品位稳定在65.5%以上,球团工序能耗降至16kgce/t左右,并且成功解决了还原膨胀率高的问题,满足了高炉生产对球团性能的要求。

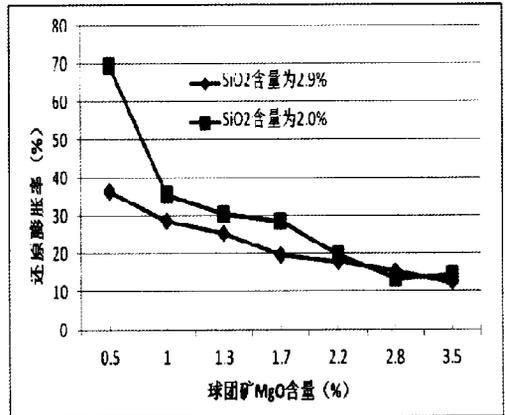


图3 球团矿SiO<sub>2</sub>和MgO含量与还原膨胀率的关系

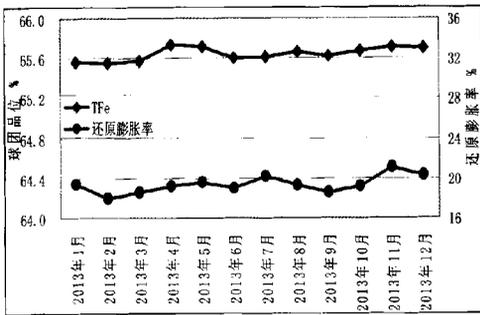


图4 球团矿 SiO<sub>2</sub> 和 MgO 含量与还原膨胀率的关系

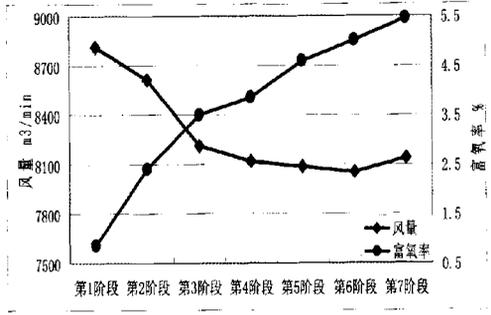


图5 京唐高炉风量与富氧率匹配实践

## 2.2 高炉操作运行技术

京唐高炉运行效果可概括为：(1) 炉况运行稳定，作业率高于 98.5%；(2) 较高的煤气利用率，50.5% 左右；(3) 较高的生产效率，年均利用系数 2.25  $u/(m^3 \cdot d)$  左右，月最高利用系数达到 2.37  $u/(m^3 \cdot d)$ ，如表 1 所示。

表1 京唐高炉运行指标情况

项目	入炉品位 %	系数 $u/(m^3 \cdot d)$	焦比 kg/t	燃料比 kg/t	风温 °C	富氧率 %	煤气利用率 %
设计指标	61	2.3	290	490	1300	5.5	—
2010年3月	60	2.37	306	481	1300	3.5	52.3
2012年	58.9	2.25	337	485	1253	5.5	50.8

### 2.2.1 综合鼓风技术

综合鼓风包含的主要内容是对风量、风温、富氧、湿度、风压和喷吹燃料的调整与控制，京唐高炉以风口理论燃料温度和吨铁热收入稳定为条件，1250℃以上的高风温与 5.5% 的高富氧率操作是京唐高炉综合鼓风的主要特点。

风温：采用煤气和助燃空气双预热及前置预热炉方式，在全烧高炉煤气情况下能稳定地提供 1250℃ 以上的热风。在热风炉烧炉方面，开发了热风炉自动燃烧系统，在同等风温条件下，可节约 3%—5% 的煤气量消耗量。风温作为高炉送风制度日常调节的主要参数之一，年均 1250℃ 以上的高风温对降低焦比、燃料比和减少 CO<sub>2</sub> 排放的效果明显。

富氧率：采用鼓风机前兑入氧气与氧煤枪套管兑氧相结合的方式，设计富氧率为 5.5%。以风量和富氧量为主要调整参数的综合鼓风技术，在京唐高炉做了大量探索工作（图 5 所示），开炉初期风量达到 8800m<sup>3</sup>/min 以上，富氧率较低（低于 1%）；随着富氧率提高（3.5%），风量水平逐渐降至 8100m<sup>3</sup>/min 左右；根据高炉强化的要求，风量水平基本稳定，大幅提高富氧率至 5.5% 水平。

2013 年以来，京唐高炉实际富氧在 5.5% 以上（最高达 6%），用氧期间，利用系数达到 2.35  $u/(m^3 \cdot d)$ ，煤气利用率达到 51%。需要指出的是：高富氧操作技术在大型高炉的成功应用，为优化大型高炉风机选型、降低运行成本，具有明显的效果。另外，基于高富氧率操作的炉内煤气还原气氛（CO 浓度）提高，也将有助于低还原性含铁炉料的处理能力。

### 2.2.2 高煤气利用率

煤气利用率反映出高炉冶炼过程中煤气化学能的利用程度，提高煤气利用率、降低燃料消耗是高炉操作者追求的主要目标之一，较高煤气利用率是京唐高炉冶炼的基本特点之一。

为了获得高的煤气利用率，炼铁工作者坚持“稳定边缘、打开中心、稳定中心、照顾边缘”的煤气控制方针，确保高炉稳定顺行；研究开发了高炉炉料分布的仿真模型，实现了对炉料分布的精确控制；在实际操作过程中，努力提高冶炼强度，焦炭负荷长期稳定在 5.3 以上。

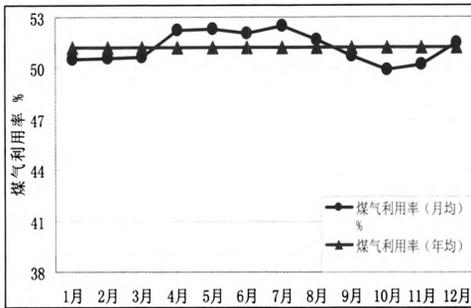


图6 2012年京唐高炉煤气利用率推移图

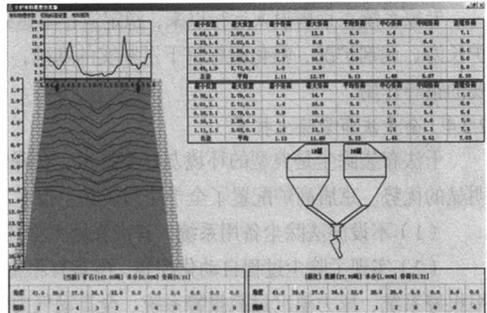


图7 高炉炉料分布的仿真模型

综合鼓风技术和高煤气利用率获得技术是京唐高炉获得“高效、低耗”目标的主要支撑技术。

### 2.2.3 高炉专家操控系统

高炉专家系统是炼铁工作者对炼铁理论系统把握和实践认知详细总结的结晶，集炉况监测、预报，模型推演，实际的高炉操作控制于一体的操作系统，反映了炼铁工作者对高炉操作与控制的能力和水平。

2002年，首钢着手准备开发高炉专家系统。2005年首钢公司组织了经验丰富的冶炼及计算机专家攻关团队，在借鉴国外系统优势的基础上，结合国内高炉特点，开发了拥有自主知识产权的首钢高炉专家系统（图8所示）。

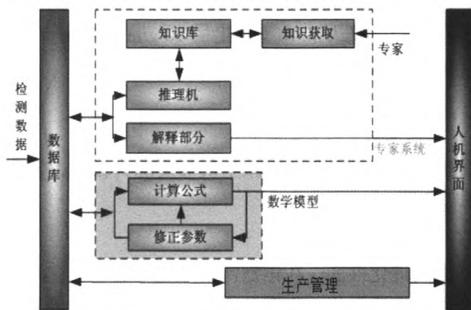


图8 专家系统软件构成

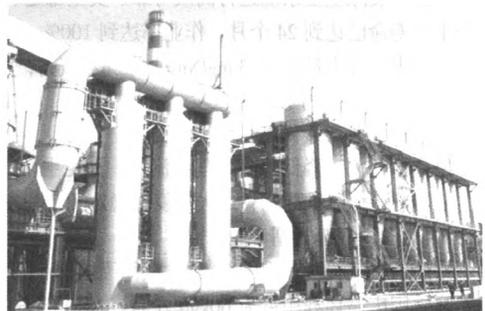


图9 京唐高炉全干法布袋除尘实景图

高炉专家系统包括异常炉况预报模型、炉缸侵蚀监控模型、炉料分布模型、出铁控制模型和炉身仿真模型等。来自炉体各个监测系统的实时数据进入高炉专家系统后，由专家系统判断炉况，并给出操作意见。

表2 高炉专家系统综合预报准确率

序号	炉况现象(分类)	对	错	不确定
1	炉料类	2	0	0
2	塌料类	127	14	11
3	空穴类	13	2	3
4	高炉热负荷类	13	5	4
5	高炉条件变化类	1	0	0
6	料线类	3	0	0
7	管道类	46	3	0
8	煤气分布类型	1	0	0
9	渣皮类	138	2	0
10	炉缸活性类	9	2	1
11	炉热趋势类	18	4	3
综合炉况预报准确率: 87.3%		371	32	22

专家系统在京唐投入运行以来,稳定运行率达到 99.5%以上,综合炉况预报准确率达到 87.3%,为高炉长寿、调剂炉况、强化指标打下了坚实的基础,且已被工长接受,对高炉的日常操作与控制发挥着重要的指导作用。

### 2.2.4 全干法布袋除尘技术

干法布袋除尘是典型的环境友好型技术,在降低新水消耗、减少环境污染、提高能源效率方面具有明显的优势。京唐高炉配置了全干法布袋除尘技术(图 8),其主要技术特点如下。

- (1) 不设湿法除尘备用系统,首次在超大型高炉配置了全干法脉冲布袋除尘技术;
- (2) 实现了除尘过程自动化控制,配备有除尘器箱体灰位检测、煤气含尘量在线监测装置、布袋破损报警系统、压力温度超载报警系统、全自动气力输灰控制、全程自动在线脉冲清灰控制以及多系统耦合的数字化控制系统;
- (3) 除尘器箱体容量大,箱体直径 6.2m,长度 24m,容积 537m<sup>3</sup>,单箱布袋数量达到 409 条,单箱过滤面积达到 1439m<sup>2</sup>,提高了单箱煤气处理量;
- (4) 具备煤气管道系统的喷碱脱氯防腐功能,为抑制煤气中氯离子对管道、波纹膨胀器、阀门、TRT 叶片的腐蚀,自主开发研制了碱液雾化喷洒装置,使其吸附煤气中存在的氯离子;
- (5) 除尘灰全程密封自动化气力输送,实现了全系统的高效低耗、节能环保;
- (6) 与超大容量 TRT 耦合匹配,提高了 TRT 发电量和能源转换效率。

干法布袋除尘全系统运行高效可靠、安全稳定、具有较高能源转换效率。京唐高炉自开炉投产以来,滤袋平均寿命已达到 24 个月,作业率达到 100%;处理煤气量达 87 万 m<sup>3</sup>/h(含尘量 10 g/m<sup>3</sup>~40 g/m<sup>3</sup>),处理后的煤气含尘量低于 3 mg/Nm<sup>3</sup>;煤气热值高,为获得高温提供了支撑。

## 2.3 固废再利用与有害元素监控

### 2.3.1 固废类副产品循环利用

以分散使用、降低风险、理顺流程、稳定生产为原则,以最大限度利用除尘灰等资源为目标,实现除尘灰等固废分品种配用,最大限度地稳定工艺和主产品质量。

#### (1) 含铁固废类副产品

京唐钢铁流程所产生的 14 种含铁固废固副产品,依据其理化性能,在钢铁流程中基本实现了循环使用,吨铁固废循环利用量为 60kg/t 左右。2012 年,由于资源品质劣化,为避免高碱、锌含量的固废对流程运行稳定性的影响,现有流程中不能消纳的含铁固废的量约为 3%左右,现正在研究高碱锌含量固废的处理工艺。

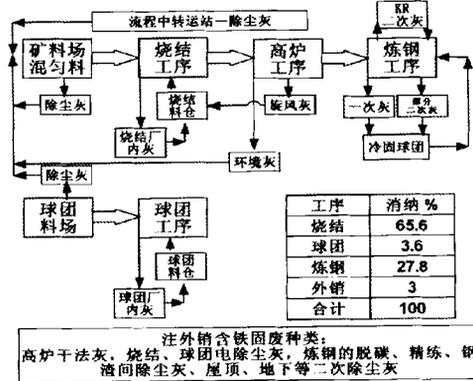


图 10 京唐公司含铁固废循环使用流程图

#### (2) 含碳固废类副产品

煤场除尘灰、焦化工序产生含碳类固废主要在烧结、焦化型煤和高炉喷吹三个工序中消纳,吨焦含

碳固废循环利用量为 31kg/t 左右,在技术和流程上实现了稳定控制。另外,含氮氰等生化有毒物质,回用率低(20%~30%),正在对焦化型煤系统改造,争取 100%回用。

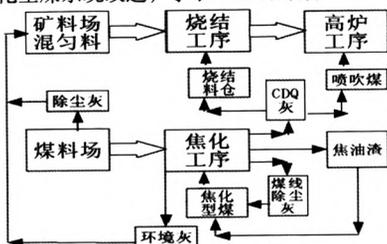


图 11 京唐公司含碳固废循环使用流程图

60 万吨/年的含铁固废、12.7 万吨/年含碳固废类副产品在京唐钢铁流程中得到循环使用,在获得良好环境效益的同时具有明显的经济效益。

### 2.3.2 有害元素的危害与控制

2012 年首钢曾因锌金属负荷高而引起炉身上部结厚,进而煤气流而控制(图 12 右);京唐高炉曾在停内检修期间在风口发现金属锌(图 12 左),也曾出现过因 Cu、As 含量高而影响品种钢冶炼等问题。

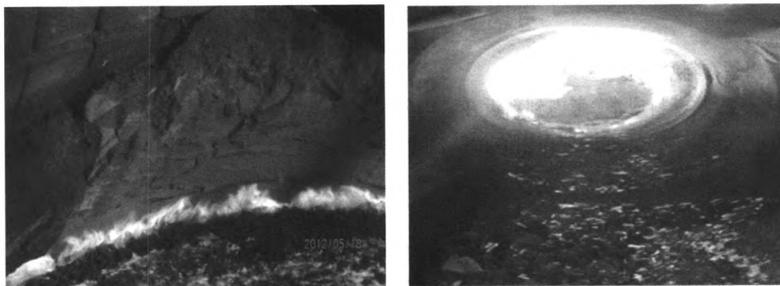


图 12 风口处的锌片

为了控制有害元素入炉负荷,要求在非主流矿应用方面实现精细化配矿,同时要对固废的循环使用量实现精细化控制。为此,研究提出了烧结-高炉流程有害元素的预测与控制模型。

#### (1) 烧结-高炉流程锌富集预测模型

$$X_{\alpha} = \frac{Q_{sd}M \times \frac{(1-\eta)}{(10^3+R)} \times \frac{\beta}{Q_d} + \frac{(1-\eta) \left( \sum_{i=1}^k (x_i q_i) \right)}{(10^3+R)}}{1 - \left( \frac{R(1-\eta)}{(10^3+R)} + \frac{Q_{sd}(1-\eta)}{(10^3+R)} \times \frac{\beta Q_s}{Q_d} \right)}$$

$$\text{高炉极限入炉锌负荷: } L_{BF,Zn}^{\alpha} = (X_{\alpha} Q_s + M)$$

$$\text{除尘灰极限锌含量: } Y_{\alpha} = \frac{\beta}{Q_d} (X_{\alpha} Q_s + M)$$

式中参数以烧成 1 吨成品烧结矿计,  $Q_{sd}$  为配入的高炉除尘灰量 kg/t;  $\sum_{i=1}^k (x_i q_i)$  为除返矿以外所有烧结原辅料带入锌的质量, kg/t; R 为烧结返矿量, kg/t;  $\eta$  为烧结过程锌的脱除率, %;  $X_{\alpha}$  为烧结矿极限锌含量, %;  $\beta$  为高炉除尘灰排锌率, %;  $Q_d$  为高炉冶炼 1 吨铁水排出的除尘灰比, kg/t; M 为除烧结矿以外的炉料和燃料带入锌量, kg/t 铁;  $Q_s$  为烧结矿消耗量, kg/t 铁。

#### (2) 烧结-高炉流程锌控制模型

通过以下模型（图 13），根据原燃料条件固废返回烧结可采取“一返+一停”或“二返+一停”模式控制烧结矿锌含量的富集程度，保证高炉入炉锌负荷满足标准。

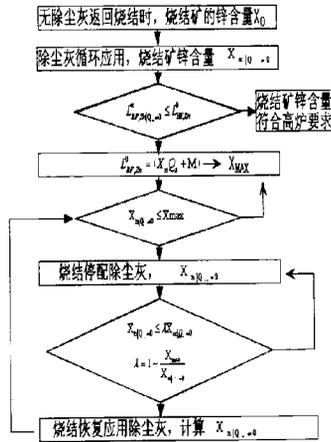


图 13 烧结—高炉流程锌控制模型

### 3 技术展望

#### (1) 多相多物料喷吹技术

为持续降低喷吹燃料成本，考虑到新近在京唐公司附近探明的石油伴生气资源（供应量约 38m<sup>3</sup>/t 铁），钢铁流程中的含碳粉尘，具有护炉作用的含铁精粉等，正在研究以提高物料利用率为目的的多相物料喷吹技术。

#### (2) 高炉高效长寿控制技术

长寿是促进铁水成本降低的重要技术对策，例如北京 3 高炉运行 17 年 7 个月（因公司搬迁调整于 2010 年 12 月关停），在不完整的炉役内利用系数达到 2.2 t/(m<sup>3</sup>·d)，单位炉容产铁量 13987 吨/m<sup>3</sup>。首钢炼铁工作者将继续探索以高效（利用系数）为前提的高炉“高效长寿”技术，

#### (3) 低耗环保的排放物控制技术

中国政府非常重视节能减排、低耗环保、达标排放工作，尤其是钢铁行业废物或有害物质排放控制技术，二氧化硫的治理已经进入实质阶段。

在关注“末端治理”的同时注重“工艺过程”控制，对尚未或即将纳入强制减排的污染物（如 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub>、重金属、Dioxins 等）储备减排技术方案。

#### (4) 固废类副产品的综合利用技术

节能减排、清洁生产已是新形势下，赋予钢铁制造流程的新使命。固废类副产品在循环使用过程中，对钢铁流程和环境的负面作用已经显现。

如何高效利用具有较高经济价值的固废类副产品已是紧迫的任务，需要对转底炉、OXYCUP 等技术进行关注。

### 4 结语

京唐 5500m<sup>3</sup> 高炉投产 5 年来，实现了铁前工序的稳定运行，获得了较高的利用系数 2.3t/(m<sup>3</sup>·d) 左右，较低的燃料消耗 480kg/tHM~490kg/tHM，在设计和运行方面为高炉大型化做出了有益的探索，使整个炼铁过程向“高效、低耗、优质、清洁、环保”的方向发展。

考虑到持续提高大型高炉的竞争力和满足社会发展的需求，今后有必要在多相物料喷吹技术、高炉高效长寿控制技术、低耗环保控制技术和固废类副产品综合利用技术等方面加大开发力度。

联系人：陈辉 E-mail: hui-chen@126.com