

# 大型高炉高余压发电技术的实践

李军

朱锦明

(北京科技大学) (宝山钢铁股份有限公司宝钢分公司)

**摘要** 对宝钢大型高炉在强化冶炼生产条件下的高余压发电技术进行了总结分析。认为,通过采取高顶压操作、适当增加煤气发生量、加强发电设备改造和维护等措施,可以努力增加余压发电的能力,达到节能和降低吨铁成本的目的。

**关键词** 大型高炉 TRT 节能

## 1 概述

从钢铁生产流程的特点来看,高炉炼铁工序是钢铁生产流程的最大能耗工序。通常情况下高炉炼铁能耗占整个流程能耗的70%~80%,因此,实现高炉炼铁工序节能降耗至今仍然是钢铁企业降本增效的主要形式。高炉炼铁在耗能的同时又是产生可利用能源的主要单元,如化学能、热能和压力能等等。如何有效地回收利用这些数量可观的二次能

源,成为了当前钢铁企业节能研究的主要方向。利用高炉煤气行程中的压力变化,来实现功能转换(即余压发电),成为了高炉炼铁工艺中比较成熟的高效回收能源的新技术。

富氧大喷煤技术是当前高炉炼铁生产技术的主要发展方向,同时也是高炉炼铁过程得到高速发展的节能技术。余压发电的动力来源是必须具备一定压力和速度的流体介质,如正常生产中的煤气除尘

炉况顺行。表5为八钢A高炉合理热负荷对应的

炉底热电偶温度和铜冷却壁壁体热电偶温度。

表5 八钢A高炉合理热负荷对应的热电偶温度

项目	炉底	炉体1区	炉体2区	炉体3区	炉体4区
热负荷, MJ/h	80~110	2000~2500	2000~2500	2000~2500	2000~2500
对应热电偶温度, °C	400	45~80	45~80	45~80	45~80

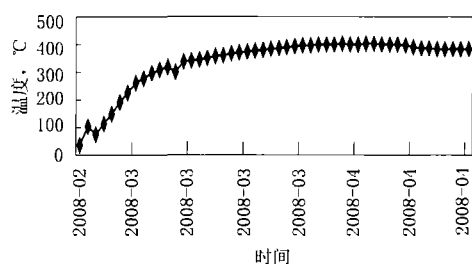


图9 八钢A高炉炉缸压浆后温度(TE1129)变化趋势

## 5 结语

(1)八钢A高炉的中套和小套冷却系统的安全保障存在瑕疵,无法在极端断水条件下,对中小套起到完全的保护。

(2)八钢A高炉的热负荷影响因素有多种,主

要是布料方式和送风量的影响。

(3)八钢A高炉特殊的串联冷却结构,对高炉炉体分段热负荷监控影响较大。热负荷超过警戒与否,主要依据铜冷却壁壁体热电偶温度检测。

(4)强化冷却是A高炉冷却壁长寿的措施之一。

(5)准备细化A高炉炉体热负荷分区和分段的补充监测仪表方案,不断改进高炉热负荷管理工作。

联系人:许晓兵 电话:0991-3907101

(830022)新疆乌鲁木齐新疆八一钢铁(集团)有限责任公司高炉分厂

收稿日期:2008-08-20

管道中的煤气等。富氧鼓风作为一种高炉强化冶炼技术会导致煤气发生量的相对减少,而大喷煤技术在引起高炉煤气发生量增加的同时又会减少未燃物对设备能力的下降影响。

由于宝钢高炉采取的是湿法除尘工艺,高炉余压发电所产生电量占系统总消耗电量偏低。通过提高高炉炉顶压力、适当增加煤气发生量、优化高炉喷吹煤的配煤技术和进行发电设备的特殊维护技术等措施,高炉余压发电效率明显得到了提高,余压发电所产生电量占系统总消耗电量的比例由 25% 提高到 35%,节能效果明显。有关宝钢 2 号高炉 TRT 发电状况的变化情况如图 1 所示,宝钢高炉 2006 年主要生产指标情况见表 1(其中本体电耗是指除鼓风机电耗外的所有高炉工序电耗)。

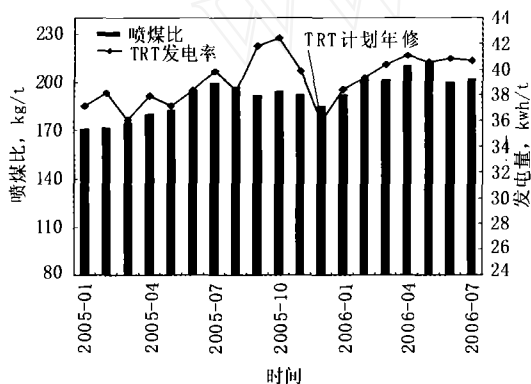


图 1 宝钢 2 号高炉高煤比下 TRT 发电水平变化实绩

表 1 宝钢高炉 2006 年主要生产指标状况

项目	喷煤比 kg/t	富氧率 %	本体电耗 kWh/t	TRT 发电量 kWh/t
1 号高炉	204.07	2.43	58.80	33.52
2 号高炉	188.80	2.49	46.35	40.58
3 号高炉	204.76	4.56	43.58	36.30
4 号高炉	224.40	4.13	69.58	36.96

## 2 余压发电设备的功能转换机理

TRT 在高炉区域的安装位置与高炉调压阀组并联。当 TRT 处于运行状态时要求高炉调压阀组基本处于全闭状态,高炉煤气将流经入口蝶阀、入口截流阀、紧急切断阀、透平机、除雾器、出口截止阀和消音器,最终进入煤气管网流向用户。当 TRT 设备停止运行时,高炉煤气将从高炉减压阀组经消音器后直接进入煤气管网,并送往用户。目前,宝钢高炉所使用的 2 种 TRT 类型的主要性能参数见表 2。

高炉煤气流经透平机的过程也是实现功能转换的过程,即将高炉煤气的压力能转换成透平机

表 2 宝钢高炉所使用的 2 种类型的 TRT 主要性能参数

性能	湿式余压透平机	干湿两用余压透平机
透平机出力, kWh/t	17440	26500
静叶调节形式	手动	自动
调节炉顶压力设备	调速阀	静叶
年发电量, $1 \times 10^6$ kWh/t	140	210

转轴的机械能并带动发电机发电。

首先,余压发电过程基本接近于绝热过程。按照热力学第一定律:

由  $\delta q = du + \delta w$  得知

当  $q \approx 0$  时,  $\delta w = -du$ ,

从而可以推导得到  $w = \frac{RT_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$  (1)

式中  $T_1$ ——透平机入口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$P_1$ ——透平机的入口压力, kPa;

$P_2$ ——透平机的出口压力, kPa;

$k$ ——过程变化指数。

从公式(1)可以看出,适当提高透平机入口温度和提高透平机压差是提高 TRT 发电能力的有效措施。

其次,余压发电过程也是煤气等容转变过程。由气体经过透平机过程的动量守恒方程、伯努利方程和连续方程得知:

TRT 静叶前后的压差变化:

$$\Delta p = \left( 1 - \frac{A_1 \cos \theta}{A_2} \right)^2 \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

式中  $A_1$ ——静叶面积,  $\text{m}^2$ ;

$A_2$ ——管道截面积,  $\text{m}^2$ ;

$\theta$ ——静叶与煤气流向之间的夹角,  $^{\circ}$ ;

$\rho$ ——煤气的密度,  $\text{kg} / \text{m}^3$ ;

$v$ ——煤气的流速,  $\text{m} / \text{s}$ 。

从公式(2)可以看出,静叶夹角的调整和煤气特性发生变化均会直接引起静叶的压差变化,从而影响 TRT 发电能力。

## 3 提高余压发电能力的主要措施

### 3.1 采用高顶压操作

虽然高炉使用高炉炉顶压力作为高炉一项强化冶炼技术在近几年得到了迅速的发展,但是高炉所能够使用的炉顶压力高低又与高炉炉况的接受能力和设备承受能力密切相关。首先是高炉提高炉顶压力后最直接的效果是提高了 TRT 静叶前端的压力,从而达到提高 TRT 发电能力的目的。由于宝钢 4

座高炉的设计炉顶压力存在一定的差别,在 0.230 MPa 到 0.280 MPa 之间,高炉日常生产过程中以长期稳定保持炉顶设计压力为目标。有关宝钢 4 座高炉的炉顶压力使用状况见图 2。

其次是高炉提高炉顶压力会降低高炉料层中的煤气流速,高炉料层透气性明显得到改善,为高炉增加风量创造了有利条件。正常生产中的高炉炉内平均煤气流速为:

$$v = \frac{V_{BG}}{60 \times \varepsilon \times S} \times \frac{(T+273)}{273} \times \frac{1033}{(P+1033)} \quad (3)$$

式中  $V_{BG}$ ——炉腹煤气量,  $m^3/min$ ;

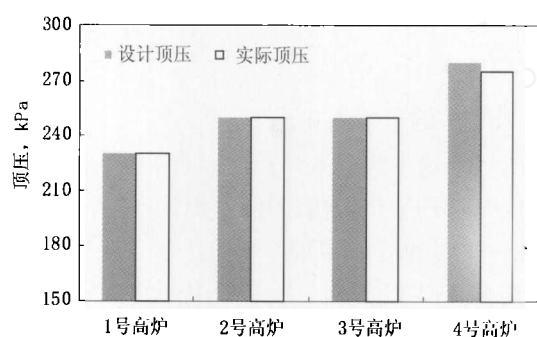


图2 宝钢4座高炉顶压的设计能力与实绩水平的比较情况

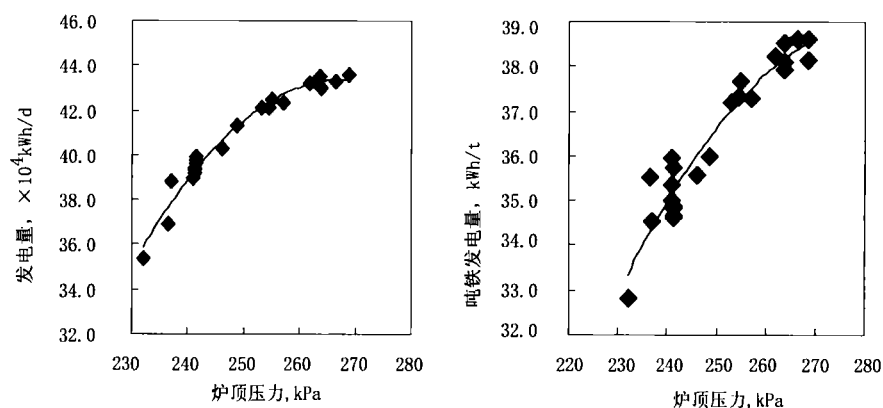


图3 宝钢高炉使用高顶压与发电能力的关系

### 3.2 保持高炉炉况稳定的基础上适当提高煤气发生量

根据在富氧喷煤条件下炉腹煤气量的计算公式:

$$V_{BG} = \frac{224}{12} C_{燃} + (V_B - V_Y)(0.79 + 0.21f) + b_{输} \times y(f + N_{输}) + V_Y \times N_Y + 11.2 \times H_{吹} + \frac{224}{18} \times H_2O_{吹} + 0.8 \times N_{吹} \quad (4)$$

式中  $V_B$ ——风量,  $m^3/min$ ;

$\varepsilon$ ——炉内平均空隙指数, %;

$S$ ——风口面积,  $m^2$ ;

$T$ ——炉内的平均温度,  $^{\circ}C$ ;

$P$ ——炉内的平均压力,  $kPa$ 。

对于宝钢大型高炉而言,在正常生产过程中尽量保持稳定、合理的风速是确定高炉下部送风制度的关键参数。一般情况下,宝钢高炉的风速基本维持在 260 ~ 270 m/s 之间,高炉炉况的稳定性比较好。此外提高高炉炉顶压力引起炉内平均压力升高,同时炉腹煤气量因压力作用会有所缩小,此时为了维持相同的风速,高炉需要适当增加送风量。实际结果来看,炉顶压力上升 1 kPa 可以提高吨铁发电量 0.135 kWh。炉顶压力从 235 kPa 提高到 270 kPa,增加了 35 kPa,从对应的关系看,约可以增加吨铁发电量 4.725 kWh/t (见图 3)。

最后在提高炉顶压力引起炉内煤气流速降低的情况下,煤气在料层中的滞留时间得到相应延长,煤气中夹杂的未燃煤粉在高温和高压作用下将继续还原和燃烧,煤粉置换比得到一定成提高的同时炉顶煤气发生量也将有所增加,从而提高了 TRT 的发电能力。

$V_Y$ ——氧量,  $m^3/min$ ;

$C_{燃}$ ——风口前燃烧的焦炭量,  $kg/t$ ;

$f$ ——鼓风湿分, %;

$b_{输}$ ——输送煤粉的载气量,  $m^3/kg$ ;

$N_{输}$ ——输送煤粉中的 N 含量,  $m^3/m^3$ ;

$y$ ——煤比,  $kg/t$ ;

$V_Y$ ——氧量,  $m^3/t$ ;

$N_Y$ ——N 含量,  $m^3/m^3$ 。

通过分析公式(4)可以看出,风量、风口前端碳

的燃烧率、富氧量、喷吹物的输送载气和喷吹物的特性等均将影响炉腹煤气量的大小,其中高炉风量是最大的影响因素。图4中显示的高炉正常生产过程中的风量与炉腹煤气量的对应关系也有利地说明了高炉风量变化对炉腹煤气量的影响程度。在高炉稳定接受风量的前提下适当提高入炉风量能够提高TRT的发电量。

此外,在目前高炉浓相输送煤粉的条件下,改变喷吹煤粉的特性也将影响到炉腹煤气量的大小。在过去喷吹无烟煤的基础上实现烟煤和无烟煤的按一定比例混合后进行喷吹,无烟煤在混合煤中的比例由1.0逐步降低到0.5。烟煤的高挥发分特性既可以实现一定程度上改善煤粉的燃烧性,又可以通过挥发分的燃烧和还原进一步增加了炉腹煤气量。

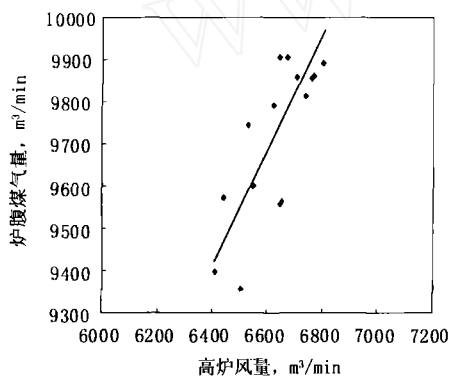


图4 宝钢高炉风量与炉腹煤气量的对应关系

### 3.3 余压发电设备的改造与强化维护措施

考虑到高炉煤气除尘新技术的发展和生产中煤气除尘效率的不断提高,TRT机组除回收流动煤气的压力能实现发电外,对于静叶自动调节炉顶压力的功能需求越来越受到用户的青睐。于是通过相关技术的持续创新,使TRT静叶叶型不断得到了优化。目前,宝钢高炉所使用的TRT二级静叶形状如图5所示。

高炉TRT是高炉煤气处理管网末端的降压装置。在高炉富氧喷煤条件下始终存在一定的未燃煤粉会随煤气排出并流经TRT设备,所以采取措施降低TRT静叶在运行过程中的“黏灰”现象成为了当前提高TRT发电量的技术发展方向。宝钢炼铁厂通过20多年的发展及有关TRT维护技术的开发和

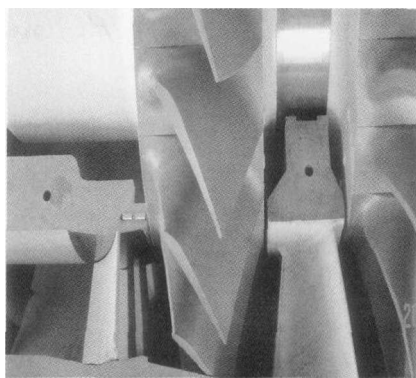


图5 宝钢高炉TRT中的二级静叶形状

集成,现在通过对静叶采取周期性的涂层技术有效降低了TRT静叶的积灰现象,从而使高炉TRT机组在一个计划检修周期中发电量的下降率由过去的10%逐步降低到2%左右。

### 4 结语

(1)高炉炉况长期保持稳定是实现高余压发电的基本条件,同时也是实现高炉强化冶炼并提升余压发电能力的基础;

(2)采用炉顶高顶压操作不仅可以直接提高TRT的发电量,而且也通过减少煤气中的未燃物含量来间接提高TRT的发电量;

(3)富氧喷煤技术可以明显提高煤粉的燃烧率,改善高炉压差,为高炉增加风量创造有利条件,同时改变全无烟煤喷吹为混合喷吹提高了炉腹煤气量,从而增加了TRT发电量;

(4)TRT设备技术的不断革新,尤其是通过对静叶叶型的优化有效提高其发电能力的同时通过TRT自动调节炉顶压力最大减少了煤气压力能的损失。采取对TRT静叶的周期行涂层防护技术也有效地降低了能量消耗,相应提高了TRT的发电能力。

### 5 参考文献

- 1 周传典. 高炉炼铁生产技术手册. 北京:冶金工业出版社,2002: 323

联系人:李 军 工程师 电话:021-26647416

(200941)上海市宝山区宝山钢铁股份有限公司宝钢分公司炼铁厂

收稿日期:2008-09-05