

## 首钢顶燃式热风炉冷风、烟气匹配技术

钱 凯                      胡雄光                      韩 庆  
(首钢技术质量部)      (首钢技术中心)          (首钢炼铁厂)

**摘 要** 针对首钢顶燃式热风炉,采用送风期冷风流场与燃烧期烟气流场相匹配的技术,提高热风炉格子砖加热面积的利用效率,从而提高热风温度 20~25℃。该技术已在首钢 12 座顶燃式热风炉上投入使用,效果明显,经济效益显著。

**关键词** 顶燃式热风炉 冷态模型 冷风及烟气匹配 热风温度

### THE FLOW FIELD MATCHING TECHNOLOGY ON COLD AIR AND GAS IN THE HOT-BLAST STOVE IN THE CAPITAL IRON&STEEL COMPANY'S IRON-MAKING PLANT

Qian Kai Hu Xiongguang Han Qing

**Abstract** Aim at the top-combustion hot-blast stove in the Capital Iron&Steel company, adopt the fluid field matching technology on cold air and gas based on the character of air feeding and combustion phase, improve the efficiency of the heating area of cheeks and increase the hot air temperature 20~25℃. The technology has been used in twelve top-combustion type hot-blast stoves in Capital Iron&Steel company.

**Keywords** top-combustion type hot-blast stove cold model flow field matching hot air temperature

随着高炉喷吹和冶炼技术的不断进步,对热风温度的要求不断提高,西方发达国家高炉的热风温度基本上达到了 1200℃ 以上,且呈不断提高的趋势,我国宝钢的热风温度也超过 1200℃,鞍钢新建的两座 2500m<sup>3</sup> 高炉的热风温度也达到了 1150℃,实际能力可达 1200℃<sup>[1]</sup>。

首钢炼铁厂 95, 96, 97 年的风温水平是 913℃, 968℃, 1005℃。风温的提高对炼铁厂降低能耗和生产成本起了较大的作用,并取得一定的经济效益,但与发展喷煤的要求仍相距很远。风温问题是制约进一步提高喷吹量和强化高炉冶炼的主要因素,也是进一步降低生产成本所要解决的关键问题之一。

首钢炼铁厂热风炉除 5 高炉外全部为顶燃式结构,占地面积狭窄,技术改造困难,且现有的 16 座热风炉投产时间均不长,立即进行结构较大的改造是不现实的。针对首钢实际情况,本文作者认为通过挖掘热风炉本身的蓄热潜力,增强热风炉的换热效率,从而提高风温水平是最经济、有效的途径。首钢炼铁厂与首钢技术中心联合研究了首钢顶燃式热风炉的冷风及烟风合理匹配问题,并通过工业实验确定最佳方案。通过此项研究,改善了目前首钢热风炉的冷风及烟风的匹配状况,在一定程度上提高了热风炉的风温,提高幅度达到了 20~25℃,为进一步提高煤比,降低生产成本打下了基础。

#### 1 冷态实验的方法

冷态实验以首钢顶燃式热风炉为对象,设计并制作热风炉模型,以冷态实验测试流场,掌

握热风炉的冷风及烟风分布情况；再通过一些气流扰流装置改变冷风及烟气气流的走向，从而实现冷风及烟风的流场匹配。

### 1.1 热风炉模型设计

根据几何相似及动力相似原理，采用 1:10 的比例制作冷态模型，格子砖孔按当量直径用约 200 根有机玻璃管代替。由于热风炉的流动介质在送风及加热期间分别为冷风和烟气，在冷态实验时全部用冷风模拟，因此设计时根据不同的实验情况进行相似计算来确定不同的送风量和烟风量。

以首钢四高炉为例，单座热风炉冷风流量  $Q=2250\text{m}^3/\text{min}$ ，根据格子砖的流通面积折算，当量直径  $D=4.69\text{m}$ ，格子砖孔的平均流速  $v=2.17\text{m/s}$ ，考虑温度修正，其 Reynolds 数为：

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{2.17 \times 4.69}{5.6 \times 10^{-5}} = 1.817 \times 10^5 \quad (1)$$

格子砖的绝对粗糙度按混凝土管取下限平均值  $\Delta=1.0\sim 1.65$ ，则其相对粗糙度  $\Delta' = \Delta/D = 0.022\sim 0.037$ ，则进入第二自模化区的临界 Reynolds 数  $Re_k$  为

$$Re_k = 4160(2\Delta')^{-0.85} = 4 \sim 6 \times 10^4 \quad (2)$$

比较  $Re$  及  $Re_k$  可以看出，热风炉格子砖中的冷风流场已进入第二自模化区。故而，在冷态模型中，只要其格子孔空气流场的 Reynolds 数  $Re' > Re_k$ ，即为满足二者之间的动力学相似条件，换言之，冷态实验的结果就基本反映了实际的流体动力状况。

### 1.2 实验设备

图 1 为冷态实验装置的设备及仪器安装示意图。风机供风，分别进入燃烧室和支柱空腔，二者通过风机后的截止阀进行切换。图中两个入口前的 U 型压力计分别用于测量进入支柱空腔及燃烧室的冷态模拟介质—空气的压力，而皮托管则用于计量二者的入口速度值以便通过入口前的阀门来调节工作状态。测试点 1,2 分别用于测试烟气及冷风分布情况。

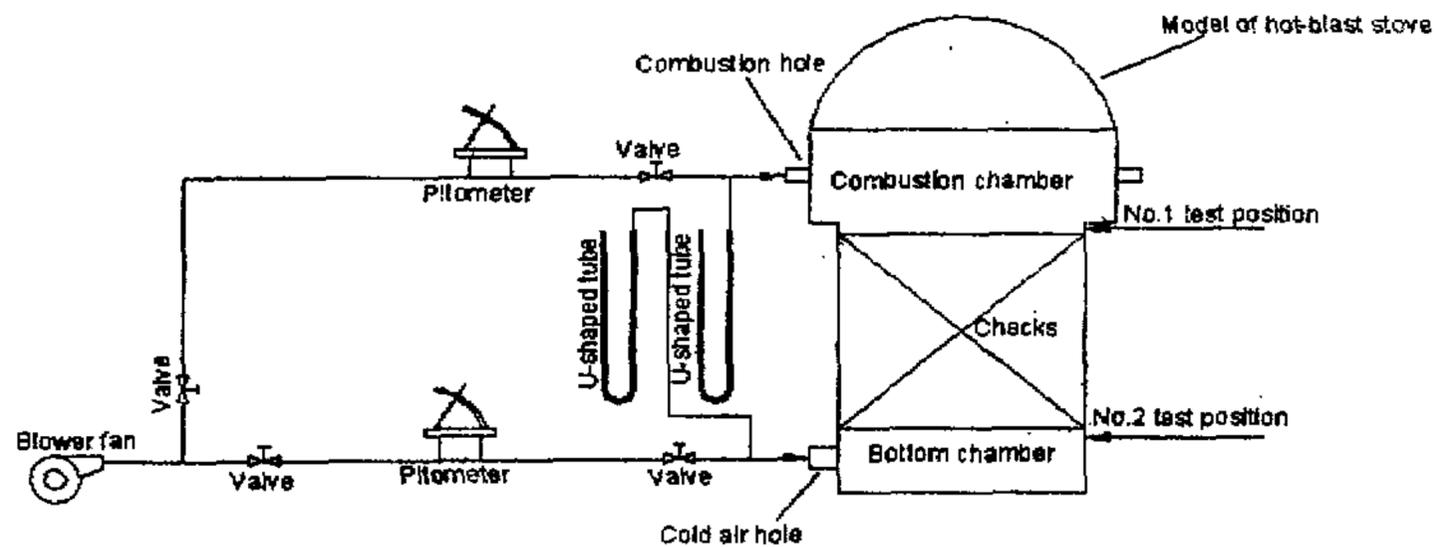


图 1 冷态实验装置示意图

测试流速采用 TSI 8388-M-GB 型热线风速计，测量精度为  $0.02\text{m/s}$ ，流速范围  $0\sim 50\text{m/s}$ ，测量温度范围  $-10\sim 60^\circ\text{C}$ ，速度响应时间  $200\mu\text{s}$ ，温度响应时间  $8\text{s}$ 。

### 1.3 模型及设备的校核

实验测得冷风格子孔的流速为  $v=3.368\text{m/s}$ ，其当量直径  $D=0.531\text{m}$ ，则 Reynolds 数为

$$Re' = \frac{v'D'}{\nu} = \frac{3.368 \times 0.531}{1.37 \times 10^{-5}} = 1.3 \times 10^5 \quad (3)$$

可见,  $Re' > Re_c$ , 本冷态实验模型亦处于第二自模化区运行状态, 满足动力相似条件, 故可认为实验设备的选型及组成是合理可行的。

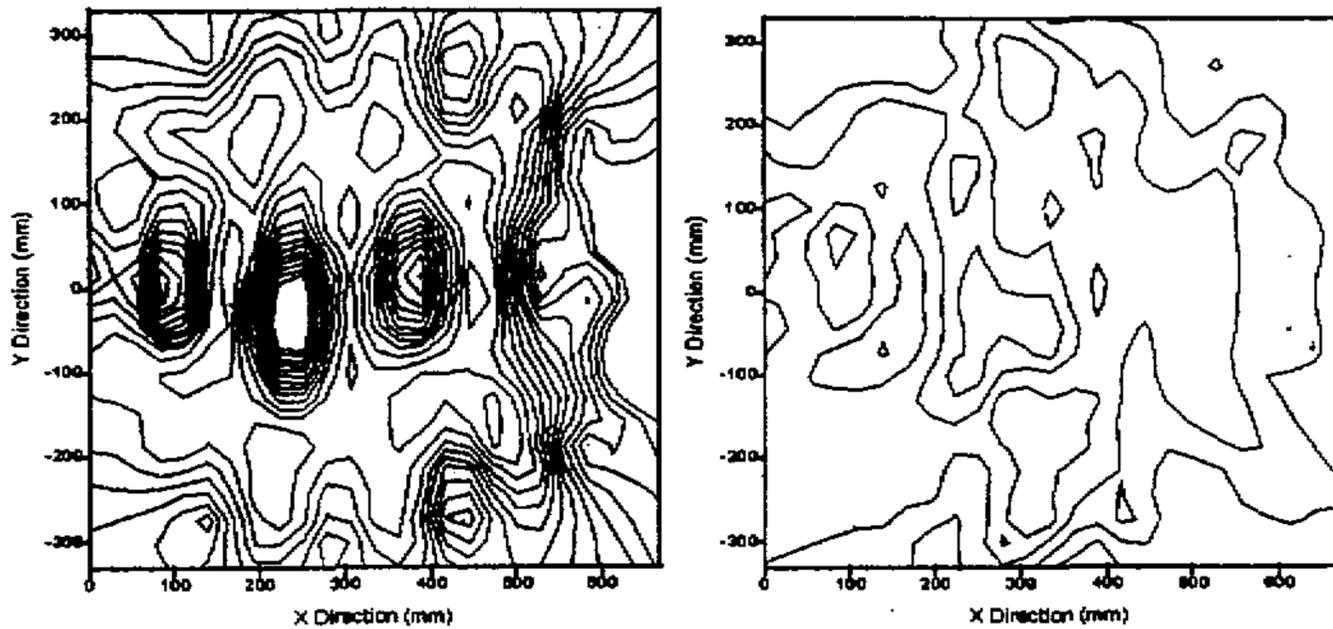
## 2 冷态实验结果及分析

实验分析中引入气体分布指数 $\zeta$ , 其值越大, 说明气体分布的均匀程度越高。表达式如下:

式中,  $\omega_i = V_i/V_{\bar{v}}$ ,  $e(\cdot)$ 为求解平均值。

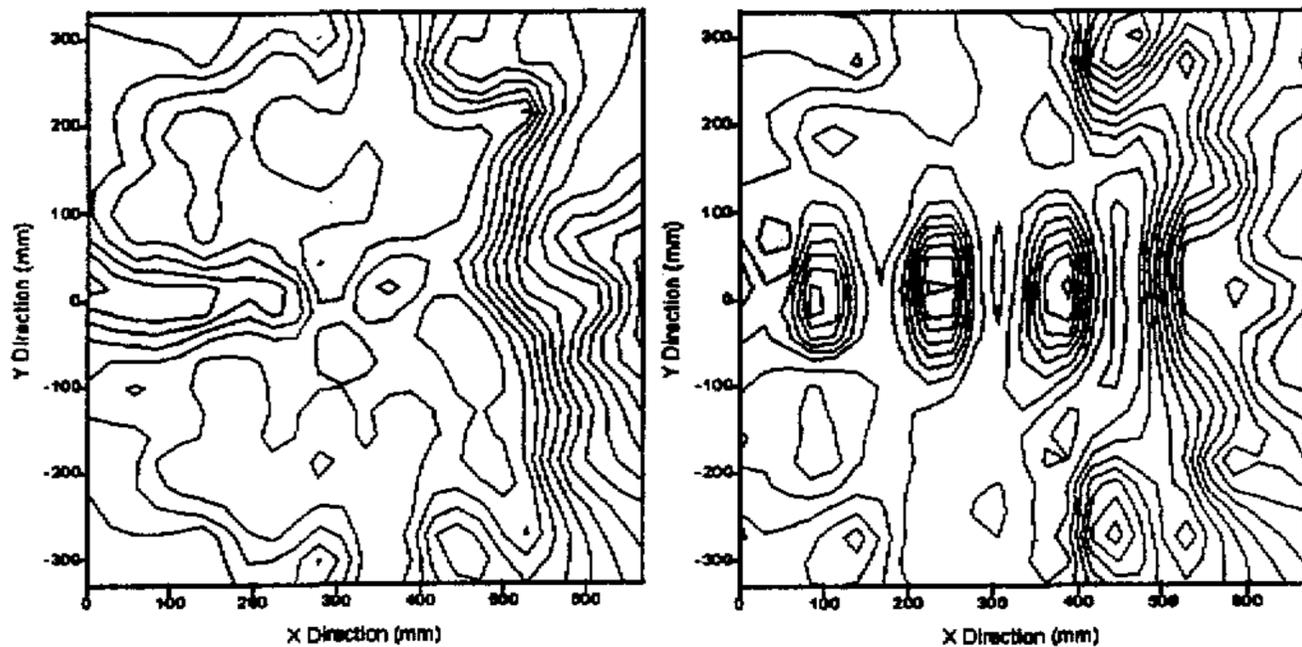
$$\zeta = 1 - \sqrt{e(\omega_i^2) - [e(\omega_i)]^2} \quad (4)$$

### 2.1 冷风流场分布情况



(a) 未添加匹配扰流装置气体分布指数  $\zeta = 0.255$  (b) 添加匹配扰流装置后气体分布指数  $\zeta = 0.768$

图 2 添加匹配扰流装置前后的气流分布



(a) 无立柱上方横梁气体分布指数  $\zeta = 0.346$  (b) 有立柱上方横梁气体分布指数  $\zeta = 0.243$

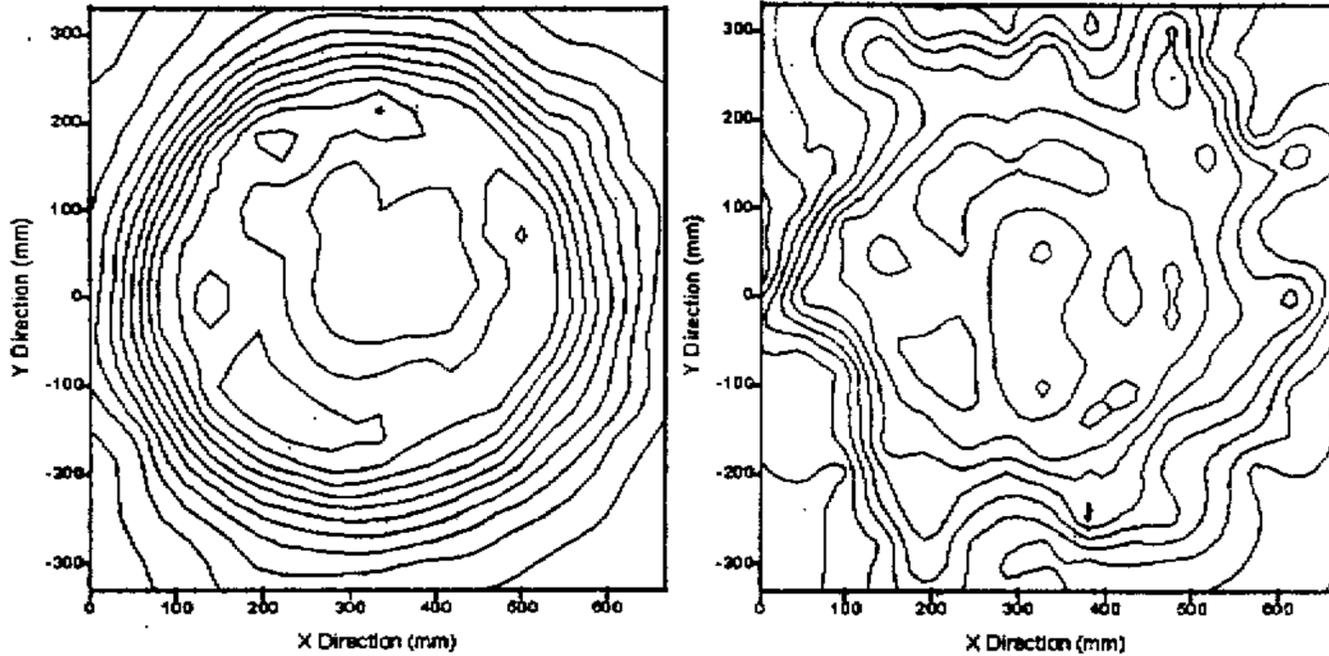
图 3 有、无立柱上方横梁时冷风气流分布

可以看出,添加冷风匹配扰流装置后,气体的分布指数有了很大的提高,提高幅度达到50%,如图2示意,在图2a中的4个明显峰值得到消除。

## 2.2 热风炉底部空腔立柱上横梁对冷风气流分布的影响

图3a为炉算子底部无横梁冷风气流分布情况,添加横梁后,从图3b中冷风分布出现了4个较为明显的峰值区,相应的气流分布指数下降,幅度为10%左右。可见,支撑横梁对气流分布的影响较大,在重新分配冷风流场并使之与烟气流场匹配时,匹配装置的结构及布置方式必须克服这一影响。

## 2.3 改变燃烧室砌砖方式后烟气流场特征



(a) 改变砌砖方式前气体分布指数  $\zeta = 0.356$  (b) 改变砌砖方式后气体分布指数  $\zeta = 0.62$

图4 改变砌砖方式前、后的烟气流场分布情况

图4a是未改变砌砖方式热风炉烟气的流场分布情况,从图可见,气流的分布呈锅底状,边缘气流量大,中心气流小,这种气流状况与实际冷风的流场特征不匹配,因此,在实际运行中,往往造成烟气在燃烧期间加热格子砖的热量不能充分地冷风在送风期内带走,即格子砖换热面积未能得到充分的利用,故应该同时将二者的流场特征予以改变,使它们能得到匹配,从而充分利用格子砖的加热面积。

从图4a、b对比中可看出,在热风炉顶部燃烧室内设置适当的烟气气流扰流再分配装置后,烟气的锅底状分布情况得到较大改善,气流分布指数得到提高,同时,其流场特征与同样安装匹配装置后的冷风流场特征已变得较为相似。

## 2.4 讨论

从上述的测试结果看出,首钢的顶燃式热风炉由于采用单管送风,在送风时冷风气流沿冷风入口中心线在各个格子砖孔中的分布有较大的速度梯度。同时,由于顶部燃烧器的布置方式基本为切向布置,在顶部燃烧室内形成涡旋,通过各孔的烟气气流流场分布呈现凹陷状,造成沿圆周径向上格子砖孔的受热强度不同。正是由于送风及烟气的流场分布不匹配,使加热面积没有完全地有效利用起来,因此总的表现为格子砖孔加热面积利用不够。

对比图2~图4可以看出,在冷风及烟气的流动空间中同时设置相应的气流匹配扰流装置,

二者的分布指数均有较大幅度提高,同时它们的流场分布特征较相似,通过这些措施提高了冷风及烟气的流场特征的匹配性。

冷态实验测试结果证明,本气流匹配装置对于冷风入口的阻力影响极小,安装扰流板后,阻力损失仅为  $5\text{mmH}_2\text{O}$ 。同时,对于排烟损失也极小,约为  $3\text{mmH}_2\text{O}$ 。因此,就目前的系统而言,安装本气流匹配装置,将不会对鼓风及排烟系统带来影响,无需担心额外的动力损失。

### 3 现场应用研究

1998年3、5和8月,分别在首钢总公司炼铁厂3、4和1高炉热风炉上投入使用冷风导流及烟气导流匹配技术。

从投入运行的情况来看,所有装置工作状况良好,没有加大冷风鼓风及烟气排放阻力损失,烟气温度、炉顶温度、煤气量及压力均无明显变化,热风炉的风温供应能力明显增强。

下表即为1998年6月~9月三高炉平均风温水平与1997年同期的比较:

表1 1998年6月~9月三高炉平均风温水平与1997年同期的比较 (°C)

Date (Month)	The average of hot air temperature		Increasing range
	1997	1998	
June	982	1019	37
July	1005	1042	37
August	1011	1020	9
September	1024	1050	26
Average			27.25

从表1中可以看出热风炉安装气流匹配装置后,对于提高整体风温水平有显著的作用,提高幅度平均值达到  $27.25^\circ\text{C}$ 。考虑到在生产过程中存在的各种停炉检修、炉况、高炉利用系数等不确定的因素的影响,风温水平提高幅度大约为  $20\sim 25^\circ\text{C}$ 。

### 4 结论

①冷态模拟实验的结果是可信的,反映了热风炉实际的运行情况,对于目前结构的热风炉的流体流动状态有了充分的了解。

②根据冷态模拟实验结果设计的烟气及冷风气流匹配装置能够满足现场使用要求,施工安装较为方便。

③热风炉安装气流匹配装置后,对于提高整体风温水平有显著的作用。考虑在生产过程中的停炉检修等各种不确定的因素,采用此项技术后,可综合提高热风温度水平  $20\sim 25^\circ\text{C}$ 。

④工业实验所投入的气流匹配装置工作状况良好,没有加大冷风鼓风及烟气排放阻力损失,烟气温度、炉顶温度、煤气量及压力没有变化,热风炉的风温供应能力明显增强。

首钢热风炉冷风及烟气匹配技术的研究,为进一步提高喷吹比、降低能耗和生产成本迈出了可喜的一步,有待进一步扩大工业实验并投入全面实际应用。在推广应用该项技术的同时,要进一步完善热风炉的热工操作,改善煤气质量,达到大幅度提高风温的目的,并与其它技术结合起来,使首钢热风温度达到新的水平。

### 参 考 文 献

- 1 Zhongzhou refractory material corp., *Blast Furnace High Air Temperature Proceedings*, 1992

(编辑: 王承阳 黄军涛)