

# 我国高炉工艺设计的技术进步

吴启常

(中冶京诚工程技术有限公司)

**摘 要** 对我国高炉工艺设计的技术进步进行了阐述,认为在高炉大型化、高富氧高风温大喷煤、高效长寿高炉技术、高风温热风炉、高炉煤气干式布袋除尘、高炉煤气压力能回收、高炉设备和耐火材料国产化等方面取得了长足的发展,并指出了我国高炉生产面临的问题。

**关键词** 高炉 工艺设计 技术进步

## Technological Progress in Blast Furnace Process Design of China

WU Qi - chang

(Capital Engineering & Research Incorporation Limited)

**Abstract** The paper expounds the technological progress in blast furnace process design in China, these progresses concentrate on enlargement of blast furnace volume, highly oxygen enrichment, high blasting temperature, high ratio of pulverized coal injection, high efficient and long campaign technology of blast furnace, hot air stove with high blasting temperature, dry dedusting of blast furnace gas, TRT, sinicization of blast furnace equipment and refractory material. Additionally, the paper also points out some problems in blast furnace production in China.

**Key words** blast furnace process design technological progress

近年来,我国高炉产能增长极快。与此同时,我国高炉设计力量也日趋壮大,创新能力不断增强。直至目前,我国的高炉建设不再是完全依靠引进或消化国外技术,而是依靠自主创新,形成完整的具有中国特色的高炉设计体系。

### 1 高炉操作指标逐年改善

表1所列是我国近年来生铁产量、操作指标和工序能耗的情况。从表中可以看到,近年来生铁产量不断上升,操作指标逐年改善。

表1 近年来我国炼铁高炉的技术经济指标

项 目	2004	2005	2006	2007	2008	2009
总产量,万 t	25185	33040	40416	46605	46929	54375
利用系数, $t/(m^3 \cdot d)$	2.516	2.624	2.675	2.677	2.607	2.615
燃料比, kg/t	543	536	530	529	531	519
入炉焦比, kg/t	427	412	395	392	396	374
喷煤比, kg/t	116	124	135	137	135	145
热风温度, $^{\circ}C$	1074	1084	1100	1125	1133	1158
入炉品位, %	58.21	58.03	57.78	57.71	57.32	57.62
工序能耗, kg 标准煤/t	466.20	456.79	433.08	426.84	427.72	410.65

### 2 高炉大型化

我国到底有多少座高炉?谁也说不出一个准确的数来,因为许多小高炉无法统计。根据几年前半官方的数字说,约有1300多座。随着近年来产业政

策的实施,高炉大型化的进程加快,总的高炉座数肯定减少了。根据作者对于有关资料进行整理的结果,至2010年3月底我国在役和正在建设的1000 $m^3$ 以上高炉情况见表2。

表2 我国1000 m<sup>3</sup>以上高炉的情况

项 目	1000 ~ 1500 m <sup>3</sup>	1500 ~ 2000 m <sup>3</sup>	2000 ~ 3500 m <sup>3</sup>	> 3500 m <sup>3</sup>	总计
座数	73	37	77	16	203
容积, m <sup>3</sup>	86182	67752	203795	71691	429420

注:统计范围内高炉的平均容积为2115.4 m<sup>3</sup>;统计时间截至2010年3月底。

特别值得一提的是沙钢5800 m<sup>3</sup>、首钢京唐5500 m<sup>3</sup>高炉以及近年来建设的一批大型高炉的投产,为我国高炉设计增了光。这些功能完善的高炉投产后,迅速达产并获得了良好的技术经济指标,标志着我国高炉设计整体技术已经达到可以与强国竞争的水平。

关于高炉大型化的问题,以下问题可能是令人感兴趣的。

(1)高炉大型化的速度如何?表3表示我国高炉大型化的进展情况。显然,我国高炉大型化的进展是比较快的。从2006年至2010年3月,3年多的时间里,>1000 m<sup>3</sup>的高炉增加了82座,高炉总容积和平均容积都有较大幅度的增加。

表3 近年来我国高炉大型化的进展情况

项 目	2004 年	2005 年	2006 年	2010 年 3 月
>1000 m <sup>3</sup> 高炉总座数	77	110	121	203
>1000 m <sup>3</sup> 高炉总容积, m <sup>3</sup>	142661	203245	230258	429420
>1000 m <sup>3</sup> 高炉平均容积, m <sup>3</sup>	1852.7	1847.7	1903.0	2115.4

### 3 富氧-高温-喷煤

由于铁矿石、焦炭价位攀升,我们面临着生铁成本大幅度上升的局面。在生铁的可变成本中,矿石费用是难于控制的。但是,尽可能降低燃料和动力费用,最大限度地以廉价的动力煤代替昂贵的冶金焦以及提高二次能源的利用效率,我们是有所作为的。最大限度地采用富氧-高温-喷烟煤技术是应对当前局面的重要措施之一。

近年来,我国高炉出现了富氧鼓风热。“热”表现在两个方面:一是高炉无论大小,采用富氧鼓风遍地开花;二是部分高炉的富氧率提高到了6%~7%以上。

高炉喷吹煤粉的同时采用富氧鼓风的正确性是毋庸置疑的。高炉喷吹煤粉后,冶炼行程主要发生了两方面的变化:一是风口前燃烧带的温度降低,二是炉腹煤气量增加。富氧鼓风既可以提高高炉风口前燃烧带的温度,又可以减少炉腹煤气量。因此,采用富氧鼓风便有效地补偿了喷吹燃料给高炉行程带来的负面影响。与此同时,富氧鼓风还给高炉的能源利用带来了良性循环的效果。由于高炉煤气发热

(2)我国高炉偏离产业政策的产能有多大?根据表2的数据,我国>1000 m<sup>3</sup>高炉总容积已经达到429420 m<sup>3</sup>,如果按利用系数2.3计算,它们的生产能力约为3.457亿t/a,只占我国2009年的生铁总产量(5.437亿t)<sup>[1]</sup>的63.58%。这就是说,按照国家产业政策的要求,还有36.42%的产能属于需要进行技术改造的范畴。最近,工业和信息化部公布的《钢铁行业生产经营规范条件》规定,2009年普钢企业粗钢产量100万t以上的钢铁企业才具备准入条件,并且还规定了污染物的具体排放标准:钢铁企业污水排放量≤2 m<sup>3</sup>/t钢,粉尘排放量≤1 kg/t钢,SO<sub>2</sub>排放量≤1.8 kg/t钢。所以,继续加快高炉大型化的进程势在必行。

值升高,有利于提高热风炉鼓风加热温度,这样,便为进一步增加喷煤量提供了更加良好的条件。因此,采用富氧鼓风不仅技术上是合理的,在当前的市场条件下,经济上也是有利可图的。大幅度增加喷煤量的结果,不但缓解了焦煤供应紧张的困难,而且减少了CO<sub>2</sub>的排放量。

近年来,高炉喷吹煤粉取得了很大的成绩,2009年全国高炉平均喷煤量达到145 kg/t。按2009年生铁产量计算,当年喷入高炉的煤粉量达到约7884万t。但是,我们还应该清醒地认识到,根据2003年的统计,我国煤炭的探明储量为1145亿t,位居美国、俄罗斯之后,炼焦用煤仅占其中的27.58%,优质炼焦煤尤为短缺。从2006年起,我国已经成为炼焦煤的进口国<sup>[2]</sup>。

从资源利用和减少CO<sub>2</sub>排放量的角度出发,我们在今后的设计中,既要努力增加喷吹烟煤的数量,又要提高它的置换比。由此可见,摆在我们面前的任务何等艰巨。

### 4 高效长寿高炉技术

高炉生产实现高效与长寿的统一,一直是人们

关注的课题。但是,21 世纪之前,我国高炉的实际状况是高效的高炉不长寿,长寿的高炉不高效。

为了实现高效与长寿的统一,经过几代人的共同努力,形成了我国一整套高效长寿高炉的技术。包括:先进的冷却技术、合理的炉体结构以及优质的耐火材料。

(1) 延长炉身下部寿命的出路。我们总结了长期的高炉生产实践经验,得出了这样的结论,延长炉身下部寿命的根本出路在于建立一个在高炉冶炼条件下无过热的冷却体系。所谓无过热的冷却体系就是在高炉达到峰值热流强度的条件下,可以保证冷却设备的最高工况温度不会超过允许使用温度。

为此,有必要研究以下两个问题。一是现代高炉峰值热流强度是多少? 根据文献资料<sup>[3]</sup> 介绍,高喷煤比的现代高炉炉身下部的峰值热流强度约为  $250 \text{ kW/m}^2$ 。根据达涅利公司对采用冷却板冷却和高比例球团矿操作的高炉炉身下部的砖衬热面温度进行了测定<sup>[4]</sup>,测定数据表明,仅在数分钟内其温度变化可以从  $150^\circ\text{C}$  上升至  $1000^\circ\text{C}$  以上,其热流强度值——正常平均值  $25 \text{ kW/m}^2$ ; 最大值  $75 \text{ kW/m}^2$ ; 局部峰值  $220 \text{ kW/m}^2$  (6 块冷却板),  $500 \text{ kW/m}^2$  (1 块冷却板)。设计采用的峰值热流强度  $500 \text{ kW/m}^2$ 。二是冷却壁材料的允许使用温度多高? 根据文献资料<sup>[3]</sup> 的介绍,不同冷却壁材料的允许使用温度——普通灰铸铁  $400^\circ\text{C}$ , 球墨铸铁  $760^\circ\text{C}$ , 压延紫铜板  $250^\circ\text{C}$ , 铸铜板  $150^\circ\text{C}$ 。上述数据表明,高炉炉身下部峰值热流强度可能达到  $250 \sim 500 \text{ kW/m}^2$ , 只有采用压延紫铜板钻孔冷却壁才能达到无过热状态。

从 2000 年起,我们在炉腹、炉腰和炉身下部推广应用了压延紫铜板钻孔冷却壁,不仅大幅度延长了炉身寿命,而且节约了大量的优质耐火材料,使得高炉投产后快速达产,并长期维持良好的操作指标,实现了高效与长寿统一的目标。

总结我国近年来高炉使用铜冷却壁的实践经验,以下问题仍然值得注意<sup>[5]</sup>。① 设计的观念应改变。高炉采用铜冷却壁之后,炉身寿命的延长主要依靠冷却设备长期可靠的工作,而不是像铸铁冷却壁那样还要依靠高质量的耐火材料。只要保持必要的冷却强度,铜冷却壁不被烧坏,炉身寿命的延长就可以得到保证。因此,在炉身下部使用质量过高、厚度过大的砖衬便是没有必要的了。② 高炉内型设计要作相应修改。炉身结构的设计观念发生变化以后,取消了这一部位砖衬的支撑结构而形成了薄壁

炉身。薄壁与厚壁高炉内型相比,它们的炉缸直径、炉喉直径、各部位的高度以及有效高度等的要求大体是相同的。特别要关注的是薄壁高炉的炉腰直径,炉身角以及炉腹角,要对它们作相应的修改。③ 薄壁的区域应界定。采用铜冷却壁的高炉,风口区的砖衬必须保持必要的厚度。在我国一些高炉设计中,风口区的厚度甚至减薄到炉腹冷却壁被回旋区冲刷的地步,这显然是不行的。这一不合理的结构将给高炉操作带来灾难性的困难。这一问题的解决并不难,国内外高炉的设计中有许多成熟的经验可以借鉴。④ 铜冷却壁渣皮脱落的问题值得研究。大量的生产实践表明,铜冷却壁的工作是十分可靠的。但是它存在着一个值得思考的问题,设置铜冷却壁燕尾槽的目的是为了挂渣,而实际高炉的状况表明,在炉腰和炉身下部铜冷却壁热面上挂的渣皮是不稳定的。这就是说,为设置燕尾槽花费了大量的铜料消耗为代价,却没有取得稳定挂渣的预期效果。这是一件非常不合算的事情。

高炉在操作过程中,渣皮脱落不仅将造成短时间内热流强度骤然加大,增加了高炉的热量损失,与此同时,铜冷却壁也将出现激烈的温度波动。在由此而引起的温度应力作用下,铜冷却壁本体会产生不可逆的塑性变形。尽管变形量是很小的,但每次的温度波动造成的塑性变形都将积累下来。这样,频繁的渣皮脱落对于铜冷却壁的工作也是不利的。

因此,如何避免铜冷却壁渣皮频繁脱落是值得研究的课题。

(2) 延长炉底、炉缸部位寿命的基本理念<sup>[1]</sup>。对于高炉炉底、炉缸部位的设计,建立了这样的理念,为了延长这一部位的寿命,必须采用优质炭砖和良好冷却相结合,二者缺一不可。这一设计理念的建立,获得了良好的效果。

直至今日,人们对于炉缸、炉底结构的认识有两个问题是值得研究的。① 怎样认识优质炭砖标准? 近 10 多年来,我们学会了用传热学的理论来指导炉缸、炉底结构的设计,这对于高炉设计来说无疑是一个极大的进步。但是,现在应该注意的倾向是选用炭砖时把炭砖的热导率提得过高,而不注意抗铁水冲刷和溶蚀性能。其结果是制造厂为了达到热导率的要求,加入了过多的石墨而降低了炭砖的抗铁水冲刷和溶蚀性能。只从传热学原理来考虑炉缸结构失败的典型实例是美钢联 Gary14 号高炉。该高炉炉缸用两环炭砖砌筑,热端为小块炭砖,冷端为石墨

砖。从传热学原理来说,不能不说是合理的,但操作近4年炉缸却烧穿了。近年来,一些高炉把UCAR公司生产的MND砖移植到炉缸和铁口区使用也是值得商榷的。②何谓良好的冷却?所谓良好的冷却是要保证1150℃等温线尽可能推往炉内。炉缸冷却要加强,在国内的认识是统一的。但一部分人认为,炉底、炉缸部位采用铸铁冷却壁即可;另一部分人则认为,在“象脚”侵蚀部位和铁口区应该采用铜冷却壁,以保证它们寿命与炉身同步。这些认识的差异,有待今后在实践中不断总结,实现统一。

## 5 高温热风炉

提高高炉鼓风温度将带来良好的经济效益。它不仅可以降低高炉冶炼的燃料消耗,而且有利于增加喷煤量。因此,它对于降低高炉生产的能耗和成本都是有着深远意义的。首钢1号高炉在1958年5月平均风温就达到了大约1027℃<sup>[6]</sup>,但直到2005年,我国重点企业平均的高炉风温还在1000~1080℃的水平上徘徊。热风炉燃料化学热不足,高温热源供应短缺是造成我国热风炉温度长期徘徊的主要原因之一。

现代高炉冶炼技术的进步,给热风炉提高风温带来了高温热源供应短缺的困难。它主要体现于两方面:一方面是由于入炉焦比的降低,每吨生铁产出的焦炉煤气量减少了,使得许多企业严重短缺高热值煤气,热风炉燃料只能依赖高炉煤气;另一方面是高炉煤气随着燃料比的降低日趋贫化。现在,操作良好的高炉,其煤气发热值还不足3000 kJ/m<sup>3</sup>。

为了获得高温风温,保证热风炉的拱顶温度达到足够高的水平是完全必要的。以掺烧高热值煤气的途径来提高拱顶温度虽然是最简单易行的办法,但在我国绝大多数企业内已成为不可能。只能以100%的高炉煤气作为热风炉燃料,通过预热煤气和助燃空气的办法来提高拱顶温度。与此同时,生产实践又告诉我们,在许多现役热风炉上燃烧末期最高的拱顶温度与送风温度之间的差值存在着很大的差距。在传统的以格子砖为蓄热体的热风炉上这一温度差达到180~200℃,而在许多小型的以耐火球为蓄热体的热风炉上却只有80~100℃。在分析大量操作数据的基础上,结合我国国情,确定了热风炉以下设计目标<sup>[5]</sup>,以100%高炉煤气为燃料,在尽可能提高拱顶温度的同时,强化热风炉的换热过程,缩小最高拱顶温度与送风温度之间的差值,改善操作制度,实现热风炉向高炉供给1250±50℃风温的目

标。

在实践上述设计目标的过程中,依靠自己的力量,经过不断的努力,取得了明显的成效。从2006年开始,我国重点企业的高炉平均风温水平逐年提高,由2006年的1100℃提高到2007年的1125℃,2008年的1133℃,2009年的1158℃。

为了提高风温,确保向热风炉提供足够高的拱顶温度是完全必要的。近年来,我国高炉较为广泛地采用了下列技术。

(1)高炉采用富氧鼓风或掺烧转炉煤气,以提高热风炉燃料的化学热;

(2)利用热风炉废气的余热通过换热器对煤气和助燃空气进行预热;

(3)采用辅助热风炉强化预热助燃空气;

(4)附加燃烧炉强化预热煤气和助燃空气。

上述技术措施实施的结果,利用热风炉废气余热通过换热器对煤气和助燃空气进行预热的热风炉,获得了1200℃的风温;采用辅助热风炉强化预热助燃空气的热风炉,获得了1300℃的风温。

在这里,特别应该指出以下两点:一是不管采用任何手段,拱顶温度不要超过1420℃,因为超过此值将在燃烧过程中大量生成氮氧化物(NO<sub>x</sub>)。在热风炉条件下低NO<sub>x</sub>燃烧技术尚未得到良好的解决之前,热风炉操作以顶拱温度控制在不超过1420℃为宜。二是关注热风炉系统的热利用效率。现在控制CO<sub>2</sub>的排放量已经提到议事日程,热风炉是高炉煤气消耗的大户,减少煤气消耗量,提高热利用效率是责无旁贷的义务。

为了强化热风炉的换热过程,减小最高拱顶温度与送风温度之间的差值,采用了以下技术措施。

(1)以改进格子砖的设计为前提。开发了我国自己的格子砖系列,使得能够在维持蓄热室砖的重量不变的前提下,加大了热风炉的加热面积,强化了热风炉的换热过程。时至今日,在统计大量实践数据的基础上,形成了一套优化格子砖的设计方法。利用这一方法,可以实现格子砖的加热面积、砖重、操作制度以及制造质量的相互统一。

(2)采用耐热铸铁作为热风炉炉算子的材质,提高热风炉的废气温度。与此同时,利用较高温度的热风炉废气,通过换热器对煤气和助燃空气进行预热。控制换热器的排气温度降低到150~160℃。这样,热风炉既提高了拱顶温度,又可以维持在高热效率的状态下工作。

(3)促进气流分布均匀,提高格子砖的利用效率。在我国的现役热风炉中,内燃式、顶燃式和外燃式热风炉样样俱全。多年来,不仅对各种形式的热风炉内的热交换过程,而且对于烟气和鼓风气流的流动状况进行了深入的研究。在不少热风炉上采取了相应的保证气流分布均匀的措施,提高了格子砖的利用效率。正是由于对于热风炉的温度场和流场的深入研究,改进了热风炉的设计,基本结束了多年来对于热风炉结构形式的争论。

## 6 高炉煤气干式布袋除尘

高炉煤气净化有湿法或干法之分。高炉煤气干式布袋除尘是我国高炉设计的特色之一。

干法除尘由于其能源回收以及环境保护的优势,一直受人青睐。德国人发展干式电除尘,日本人发展干式布袋除尘,一直没有得到推广应用。20世纪70年代我国太钢3号高炉曾引进过干式布袋除尘装置,邯钢也曾于20世纪90年代初引进过干式电除尘,使用效果都不令人满意。

我国高炉煤气干式布袋除尘是在小型高炉上进行开发的,经过不断的完善和改进,近年来在大型高炉上,甚至在首钢京唐 $5500\text{m}^3$ 的高炉上得到了推广应用。

我国的高炉煤气干式布袋除尘系统给高炉生产带来了以下三大好处:

(1)除尘效率高,获得了与其他高炉煤气除尘系统(如湿法除尘、电除尘等)同样质量的净煤气;

(2)避免了湿法除尘煤气清洗污水处理带来的环保问题以及渣泥循环利用的复杂问题;

(3)煤气的物理热损失小,提高了余压发电和热风炉的燃烧效率。

## 7 高炉煤气压力能的回收

高炉生产过程中的压力能回收是高炉循环经济建设的重要内容。高压操作给高炉带来了压力能回收的课题,以提高炉顶压力来强化冶炼的最早设想提出是在1950年。在这里,不能不提到中国科学院化工冶金研究所叶渚沛所长,他在20世纪50年代便提出了完整的高炉冶炼“三高”理论,完成了进行“三高”冶炼试验的首钢 $17.5\text{m}^3$ 高炉建设,并进行了长期试验。但是,当时炉顶压力的提高受制于装料设备,在使用料钟的高炉上,炉顶压力不过 $0.04\sim 0.08\text{MPa}$ 。真正解决问题还是在无料钟装料设备出现之后。无料钟装料设备以其密封性能好、维修工作量小和布料手段灵活等特征,彻底解决了高炉

高压操作的一系列问题,因而,把炉顶压力提高到了 $0.25\text{MPa}$ 以上。随着炉顶压力的提高,鼓风机的能量消耗大幅度增加。这些能量在冶炼过程中没有被消耗,而是存留于高炉煤气的压力之中。因此,在高炉流程中都增加了TRT余压发电装置。

近年来,为了充分回收利用压力能,在我国小型高炉( $\leq 1000\text{m}^3$ )上较为广泛地采用了TRT与电动鼓风机相结合的BPRT机组,既回收了压力能,又节省占地和投资,取得了令人满意的效果。

## 8 高炉设备和耐火材料的国产化

高炉设备和耐火材料的国产化是冶金设备中最有成效的一部分,它有力地支撑了我国高炉的技术进步。高炉设备和耐火材料国产化的成功经验在于努力提高产品质量和功能,使它的使用性能不低于国外同类产品。高炉鼓风机、TRT、无料钟、铜冷却壁以及热风炉阀门等都证明了这一点。

## 9 结语

进入21世纪以来,高炉设计的技术进步不仅体现于对于先进高炉技术的掌握,而且体现于自己的创新。直至目前,高炉设计的整体技术已经达到可以与强国竞争的水平。尽管如此,我国高炉生产仍然面临着三大问题。

(1)不符合国家产业政策的产能过大,面临着艰巨的技术改造任务;

(2)节能减排的任务艰巨;

(3)降低生铁成本,面临着严峻的挑战。

## 10 参考文献

- [1] 杨天钧. 节能减排,低碳炼铁,实现我国高炉生产的科学发展[C]//中国金属学会炼铁分会. 2010年全国炼铁生产学术会议暨炼铁学术年会文集. 北京:中国金属学会,2010:1-7.
- [2] 韦俊贤. 抓住时机发展我国的直接还原[C]//2010年中国国际生铁行业形势研讨会文集. 2010:82.
- [3] 项钟庸,王筱留,等. 高炉设计——炼铁工艺设计理论与实践[M] 北京:冶金出版社,2007:373.
- [4] P. СТОКМАН, P. ВАН ЛААР[J]. СТАЛЬ,2003,13.
- [5] 陈 钢. 我国高炉铜冷却壁冷却技术的改进意见. [C]//中国金属学会炼铁分会. 2008年全国炼铁生产学术会议暨炼铁学术年会文集. 宁波:中国金属学会,2008:189-192.
- [6] 谢茂春,潘春山. 热风炉操作[M]. 冶金工业出版社,1958:84.

联系人:吴启常 教授级高级工程师

(100176)北京市北京经济技术开发区建安街7号中冶京城工程技术有限公司

收稿日期:2010-10-26