

大高炉高风温热风炉安全运行策略（一）

王长春

一. 概况

随着这一轮钢铁行业改造升级，国内大高炉建设进入到新的发展阶段。根据公开资料，国内已经投运的炉容 2000m³ 以上大高炉超过 120 座，其中包括内燃式热风炉、外燃式热风炉和顶燃式热风炉，而今后两年则是在建的一批大高炉的集中投产期，这些大高炉无一例外地采用了顶燃式热风炉形式；另外，今后两年还有一批典型的大高炉“内改顶”、“外改顶”的热风炉改造工程陆续完工，为新一轮大高炉热风炉改造工程拉开序幕。

顶燃式热风炉技术是高风温热风炉技术发展的趋势，大型高炉采用顶燃式热风炉技术可以取得可观经济效益，根据国内工程技术人员介绍，相比其它结构，仅热风炉本体炉壳散热比较，2 座 5000m³ 级别高炉采用顶燃式热风炉年节约成本达 2430 万元[1]。

大高炉热风炉本身具有尺寸大、材料用量大的特点，建设过程存在施工难度大、质量控制难等困难，设计技术参差不齐，施工队伍良莠不齐的问题突出。总体来说，一大批大高炉顶燃式热风炉集中建设和投运的现象，凸显了大高炉热风炉安全运行策略的重要性。

本文就卡卢金在大高炉高风温热风炉工业实践中推行的安全运行策略进行了初步探讨，希望抛砖引玉，邀请更多的工程技术人员参与研究讨论，去伪存真，为大高炉顶燃式热风炉安全运行献计献策，促进顶燃式热风炉技术发挥更好的降本增效作用。

二. 大高炉热风炉安全运行策略的基本内容

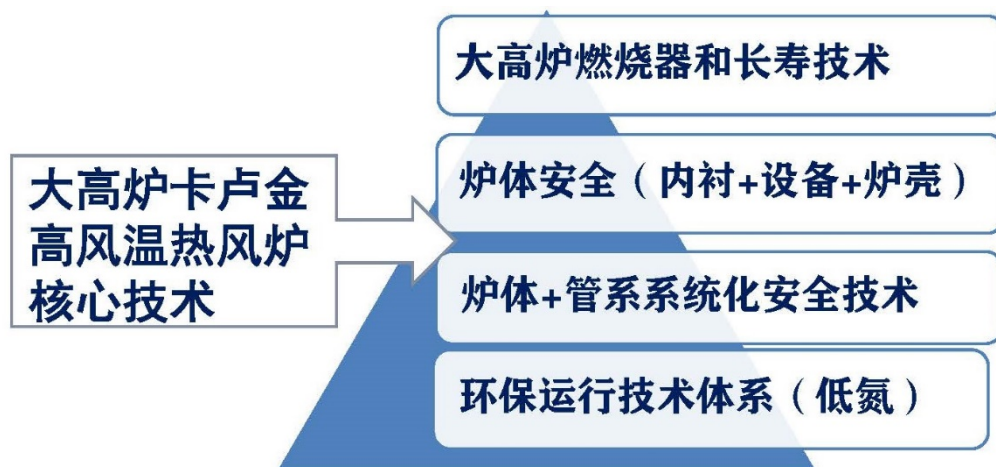


图1 大高炉卡卢金高风温热风炉核心技术

与中小高炉热风炉不同，大高炉高风温热风炉在燃烧器设计、炉体和管系方面的安全运行技术面临新的挑战。根据我们的认识，中小高炉热风炉的设计和工艺技术不能照搬到大高炉高风温热风炉工程中，甚至一些工程经验也没有共享价值，简单地说，在中小高炉热风炉上不是普遍发生的问题，在大高炉热风炉工程中就可能成为重要的安全隐患。

国外大型内燃式和外燃式热风炉工程的建造时间早，应用经验多，但对于大型顶燃式热风炉来说，国内外发展过程几乎是同步的，例如：2009年卡卢金为国内第一座 5500m³高炉设计的大型顶燃式热风炉投产，2010年卡卢金首次为日本 JFE 公司设计的 5000m³高炉外燃式热风炉改造工程投产；2017年俄罗斯北方钢厂 5580m³高炉第四座外燃式热风炉改造为卡卢金热风炉投产，2019年卡卢金为国内第三座 5500m³高炉设计的大型顶燃式热风炉投产……。在这种情况下，加强对大高炉高风温顶燃式热风炉安全运行策略的研究和研讨、共享工程经验，将有利于推动现代顶燃式热风炉技术全面进步和发展，成为二十一世纪高炉热风炉领域降本增效和科技环保的主流技术。

1. 大高炉热风炉大功率燃烧器技术

与中小规模热风炉不同，因为大高炉热风炉预燃室空腔尺寸大，预燃室里空煤气旋流的混合能力已经不能满足工程要求，简单说就是随着预燃室尺寸加大，预燃室里的空煤气旋流将不能完全混合。为此，卡卢金专门为 3000m³ 以上大高炉研究设计了新型大功率顶燃式热风炉燃烧器，解决了大尺寸预燃室里空煤气旋流充分混合的问题，同时

也使燃烧室（拱顶）的高温区进一步远离炉壁（图 2），这项技术成果首先应用在俄罗斯新库茨涅兹克 3000m³ 高炉内燃式热风炉改造工程中，之后应用在俄

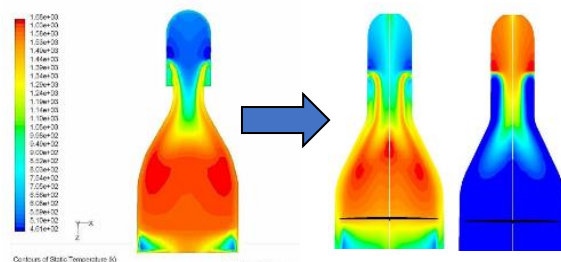


图 2 改进后的大高炉卡卢金高温热风炉燃烧器

罗斯新利佩茨克 3800m³ 高炉卡卢金热风炉工程中，卡卢金为国内第一座 5500m³ 高炉设计的顶燃式热风炉，以及后续建设的大高炉卡卢金顶燃式热风炉工程都采用了这项关键技术。

卡卢金顶燃式热风炉燃烧器技术已经完全解决了砌体稳定性问题，但若其长寿仍取决于耐火砖抗热震性能。国内有机构仅仅在烧嘴部位使用抗热震耐火砖[3]，但卡卢金一直坚持的技术方案是燃烧器整体使用同一种抗热震耐火砖，现在更是把燃烧器烧嘴砖和其它异型砖都定标为大型压力机机制成砖、切割成形（图 3），国内新建 5500m³ 高炉、5050m³ 高炉卡卢金热风炉都采用了这种燃烧器长寿方案，燃烧器耐火砖抗热震指标提高到 100 次以上（加热到 1100℃后水冷）。



图 3 压力机成砖切割成形烧嘴砖等

2. 大高炉热风炉炉体安全策略

早期国外大型顶燃式热风炉投运后都经过了较长时间的考核期：2011年卡卢金为日本 JFE 公司福山工厂设计的 4300m³高炉（3 号高炉）外燃式热风炉（3#热风炉）改造工程投产（图 4），但直到 2017 年，JFE 福山工厂才陆续开始 3 号高炉另外三座外燃式热风炉改造工程；2011 年俄罗斯北方钢厂

5580m³高炉 2#外燃式热风炉改造为卡卢金热风炉投产（图 5），但之后陆续到 2017 年第四座热风炉改造工程才完工。用户往



图 4 日本 JFE4300m³高炉库伯式外燃式热风炉改造为卡卢金热风炉

图 5 俄罗斯北方钢厂 5580m³高炉（俄罗斯最大高炉）帝德式外燃式热风炉改造为卡卢金热风炉（全部采用 20 毫米孔径格子砖）

往从工程设计开始就全面参与制定炉体安全计划，包括炉壳安全、炉底结构、管道布置、炉体砌筑，甚至参与了无托梁独立支撑炉算子边缘分流板技术开发定型（日本 JFE）。首座大型卡卢金热风炉投运后即进入若干年的运行安全考核期，除了有常规工程计划的因素外，用户主要是关注大型顶燃式热风炉长期运行的综合安全指标和环保指标，俄罗斯用户更关注烧炉运行和送风风温，日本 JFE 用户进行的环保考核内容主要指低氮运行指标。

在国内，大高炉顶燃式热风炉工程中炉体安全问题更多地表现在炉壳安全和砌炉质量方面。

3. 大高炉热风炉炉体+管系的系统化安全策略

卡卢金在俄罗斯和日本设计的大高炉热风炉是服务于外燃式热风炉改造工程，用户长期使用大型外燃式热风炉，在炉体+管系的系统化安全方面具有数十年的成熟经验，为搭建卡卢金热风炉炉体+现有外燃式热风管道的整体安全体系提供了有益帮助，通过这些工程，卡卢金初步形成了大型顶燃

式热风炉+热风管道安全技术体系，完成了 10 年实践验证和功能考核。主要内容包括：

- 热风管道独立于本体，热风管道和炉壳之间不采用任何拉杆连接；
- 保证本体炉壳、尤其是拱顶炉壳具有足够的抗应力疲劳能力。
 - 保证拱顶炉壳在工作期间“自由呼吸”，尽量不采用拱顶环箍结构；
 - 消除拱顶炉壳应力集中现象，严格控制“T”形焊缝位置的缺陷；

国外大高炉顶燃式热风炉炉壳都采用了常规热风炉炉壳材质，国内有两座 4000m³ 以上大高炉卡卢金热风炉（在拱顶炉壳）采用了不锈钢复合钢板（904L+Q345C）。

4. 低氮运行技术策略

日本 JFE 热风炉改造工程目标之一就是顶燃式热风炉实现低氮运行，在结构上消除外燃式热风炉混风管钢壳腐蚀和拱顶炉壳腐蚀现象。卡卢金和用户共同研究了混风管钢壳腐蚀机理，将混风管由顶混风方式改为垂直段侧混风方式，改造后的卡卢金热风炉运行至今，没有发生过混风管钢壳腐蚀问题。

卡卢金热风炉燃烧器是一种带预混功能的大功率低氮燃烧器，大型热风炉低氮运行的主要措施是（在高风温下）控制拱顶温度不超过 1400℃，实际运行 10 年验证上述技术措施是有效的，JFE 福山工厂 3 号高炉（4300m³）和 4 号高炉（5000m³）改造后的卡卢金热风炉都没有出现过拱顶炉壳腐蚀开裂现象，氮氧化物排放符合日本标准。

三. 大高炉热风炉“本体+热风管道系统安全策略”的研究和实践

国内大高炉热风炉本体安全问题主要集中在炉壳安全和建设规范方面，

需要引起业主和设计、建设单位的足够重视，很多问题在中小规模热风炉上表现不明显，但在大高炉热风炉上就可能成为关键问题。

1. 炉壳材质可靠性

(1) 热风炉炉壳材质选择

热风炉炉壳不同于高炉炉壳，热风炉工况是交变应力，材质强度与抗疲劳性能是优选考虑项。

俄罗斯热风炉炉壳材质是 17Г1С 和 09Г2С-15/ГОСТ 12981-89，日本炉壳采用 SM 490A（高炉炉壳）/ SM 400B（热风炉炉壳）/ JIN G 3106，与之对应最接近的中国牌号是 Q345-C GB/T 1591-2008；与国内高炉炉壳 BB503-E Q 和外燃式热风炉炉壳 BB41-BF Q/WTBO25-2008 对比，Q345-C GB/T 1591-2008 在材质成分和强度指标、使用温度等方面都没有明显的缺陷，并且在中国有最多的应用业绩；建议大型热风炉炉壳选用 Q345-C GB/T 1591-2008，其中 Mn、Cr、Ni 含量取高值，交货状态为正火或调质，可以满足大型热风炉炉壳的使用要求。

(2) 拱顶区域炉壳材质选择

顶燃式热风炉拱顶的圆弧过渡带及邻近带是复合应力（弯曲/拉伸）集中或者高值部位，拱顶上还有热风出口、人孔等容易产生应力集中的部位，因此可以考虑采用强度级别更高的 Q390-(GJCZI5、D)，根据技术人员的研究，这种钢可以满足高炉及配套热风炉炉壳在承受热疲劳和压力方面的要求[4]。不锈钢复合钢板(904L+Q345C)已经应用在 4350m³高炉卡卢金热风炉(2013年投产)[5]和 5500m³高炉卡卢金热风炉工程中，这一技术方案投资比较高，但内壁不锈钢焊接要求较高，焊接缺陷少、焊接应力小、抗腐蚀能力强。

2. 炉壳施工可靠性

(1) 焊接施工规范

大型热风炉炉壳焊接施工应严格执行技术规范，所有纵缝不允许高空焊接，必须进行 100%全长度无损探伤检查。大高炉卡卢金热风炉炉壳的对接焊缝、热风炉炉壳与管道连接处的焊缝应符合《炼铁工艺炉壳体结构技术规范》(GB50567-2010)中一级焊缝的要求；管道短管的对接焊缝，应符合《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205-2001)中一级焊缝的要求。技术规范还要求对拱顶区域内壁的焊缝余高打磨到与母材齐平，目测没有裂纹、砂眼、坑洞等焊接缺陷。

(2) 退火消应

残余应力集中并在运行过程中不断释放是影响承压装备开裂、失效的原因之一，对退火前焊缝的残余应力检测（图 6）结果表明：现场焊接存在局部区域焊接残余应力高的事实。对退火前后的残余应力检测结果表明：退火可以消除近 70%以上的残余应力，因此，退火消应是一个有效消除焊接残余应力的方案[6]。



图 6 对 5500m³高炉热风炉现场炉壳焊缝进行残余应力检测

(未完待续)

参 考 文 献

- 【1】 《大型高炉热风炉技术的比较分析》，<钢铁>第 46 卷第 10 期 2011 年 10 月，作者：钱世崇,张福明,李欣,银光宇,毛庆武
- 【2】 《高炉热风炉闷炉的危害性分析》，<炼铁技术通讯> 2009(000)006 孟凡双
- 【3】 《5100m³高炉热风炉的设计》<工业炉>第 41 卷第 1 期 2019-09-24 作者：刘华平 况维良 刘红军 宋绍强
- 【4】 《高炉及配套热风炉炉壳用钢拓展性研究》<钢结构> 2009 年 07 期 作者：但泽义 李业绩 薛尚铃 陈卿 邓玉孙 段斌

- 【5】 《超高温免维护高炉热风炉和热风管道工业实践》<冶金报> 作者：向宏宇
- 【6】 《热风炉焊接残余应力周向分布与消除》<第十二届中国钢铁年会论文集-1.炼铁与原料2019年>，作者：陈辉 孙健 王伟 梁海龙 熊军 王长水 王建 要志超