

# 炼铁热风炉技术发展与碳减排（一）

王长春（北京卡卢金热风炉技术有限公司）

## 一、概况

习近平总书记自 2020 年 9 月 22 日在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表讲话至 2021 年 3 月 28 日以来，共 7 次在重大国际场合发表重要讲话，强调“中国力争于 2030 年前二氧化碳排放达到峰值、2060 年前实现碳中和”。今年 2 月份，钢铁行业协会还发布了倡议书，呼吁钢铁行业努力在‘十四五’期间提前实现“碳达峰”，钢铁行业将是率先落实“碳达峰”、“碳中和”的重要行业。

在这种大形势背景下，回归到很具体的专业领域，热风炉工艺技术能不能实现大幅度的碳减排？

高炉热风炉技术在中国最近这一阶段的变革起始于 20 年前，卡卢金顶燃式热风炉技术进入中国的时候同时带来了“高风温、长寿命、低投资”的全新概念，早期建设、且现在仍然运行的卡卢金热风炉已经超过 15 年。现在，顶燃式热风炉在国内已经普遍应用，并且已经建设了一些“内燃式改为顶燃式”热风炉工程，“外燃式改为顶燃式”热风炉工程也在建设中，顶燃式热风炉技术取得的主要成果包括：相比内燃式、外燃式热风炉而言大幅度降低了工程投资，已经应用在 5500m<sup>3</sup> 特大高炉工程中，长期运行（连续超过 2 年）运行风温达到 1270℃，氮氧化物满足当前超低排放标准等。

顶燃式热风炉技术在国内快速普及应用的过程中，一些共性问题也凸显出来，比如：热风炉倾向于大冗余设计，越建越大的热风炉大量消耗了

建设材料、增加了建设成本；自动化控制技术落后导致能耗高、排放高；粗糙技术、低劣材质和粗放管理导致热风炉寿命大幅度缩减等。

这些共性问题除了人员和能源的消耗外，大量的材料消耗和损耗不仅导致资源浪费，也因为这些耐火材料和钢材都需要煅烧冶炼，在生产制造过程中造成大量 CO<sub>2</sub> 排放。

高炉热风炉工艺实现碳减排的关键抓手在于大幅度降低从设计、建造到运行全环节的材料消耗，用创新思维、创新技术、创新材料打通高炉热风炉节能降耗的工艺流程。

本文以一家之言提出顶燃式热风炉技术发展与碳减排的一些思路，抛砖引玉，为“碳达峰”、“碳中和”献计献策。

## 二、顶燃式热风炉技术成果和主要问题的解决方案

与内燃式热风炉、外燃式热风炉相比，顶燃式热风炉具有明显的降低投资、提高风温的优势，因此这项技术从诞生伊始就受到用户青睐，除了俄罗斯外，2002 年中国第一座卡卢金热风炉投产（750m<sup>3</sup>），2004 年乌克兰第一座卡卢金热风炉投产（“内改卡”，1513m<sup>3</sup>），2006 年印度第一座卡卢金热风炉投产（350m<sup>3</sup>），从 2009 年到 2011 年，中国（5500m<sup>3</sup>高炉）、俄罗斯（5580m<sup>3</sup>高炉）、日本（5000m<sup>3</sup>）先后建设了一批大高炉卡卢金热风炉，之后在中国、日本又陆续建设了一批 4000m<sup>3</sup> 以上大高炉卡卢金热风炉工程，国内 4350m<sup>3</sup>高炉、5050m<sup>3</sup>高炉卡卢金热风炉至今保持连续生产（连续 2 年以上）高温记录（1270℃），采用 37 孔格子砖（20 毫米孔径）的 5500m<sup>3</sup>高炉卡卢金热风炉于 2019 年 4 月投产。

### 1、 热风炉工艺革命性技术

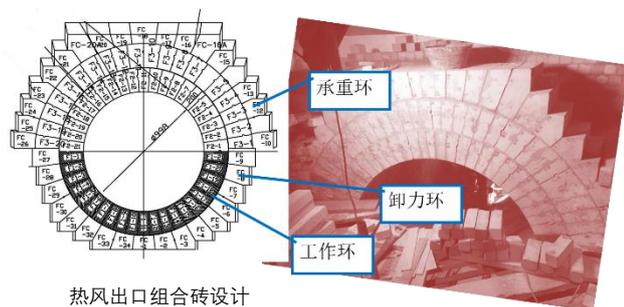
与早期内燃式、外燃式热风炉相比，卡卢金顶燃式热风炉彻底取消了高大的燃烧竖井，技术突破主要在于：彻底消除了内燃式热风炉难以克服的隔墙弯曲、漏风等问题，以及竖井耐火砖容易因蠕变损坏等缺陷；彻底解决了热风炉“脉冲燃烧”问题；改善了烟气沿格子砖上表面分布均匀性；独特的空煤气预燃室结构保证空煤气“先预混再燃烧”，从而实现了煤气完全燃烧和低氮排放。

### 2、 顶燃式热风炉大功率陶瓷燃烧器稳定长寿设计

优化后的大功率陶瓷燃烧器（专利技术）具有稳定长寿优势，主要包括：采用全部砌体结构的燃烧器可以避免温差带来的热应力损坏，采用统一的具有高抗热震（最高大于 100 次）的耐火砖保证砌体结构同涨同缩，所有异型砖（烧嘴砖、组合砖等）均采用机制成砖、切割成形工艺；这些逐步完善的优化设计和制造技术已经普遍应用在卡卢金热风炉工程中，应用效果已经显示这些先进技术具有很高的运行稳定性和长寿前景。

### 3、 提高热风炉本体砌体稳定性

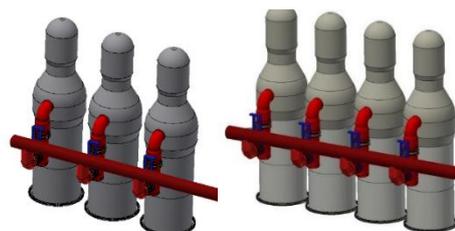
从 2005 年以后，卡卢金顶燃式热风炉在国内开始陆续推广先进的热风出口组合砖设计，这种热风出口组合砖可以保证



工作环耐火砖不受拱顶大墙砖载荷影响，灰缝要求和填充材料完全采用符合欧洲标准的砌筑规范。以热风出口为代表，砌体技术的优化设计已经基本上消除了热风炉内衬各进出风口的稳定性问题。

### 4、 提高热风管道的稳定性

从 2000 年在俄罗斯投产的“内改卡”卡卢金热风炉（3000m<sup>3</sup>高炉）开始，顶燃式热风炉就存在一种热风主管与围管等标高的结构形式（“U”形热风支管），2015 年国内建设的 5050m<sup>3</sup>高炉卡卢金热风炉组借用新日铁外燃热风管道结构首次实现了热风主管与围管等标高，2016 年卡卢金“L”热风支管首次应用在 3200m<sup>3</sup>高炉卡卢金热风炉组，从 2020 年到 2021 年，三座高炉炉容 1280m<sup>3</sup>-2580m<sup>3</sup>、采用“U”形热风支管的卡卢金热风炉工程相继投产，顶燃式热风炉热风主管终于全面降低到与围管等标高，这标志着顶燃式热风炉热风管道稳定性技术进入到新阶段。



顶燃式热风炉“U”形热风支管

“U”形热风支管不需要设置热风支管大拉杆，主要优点包括：提高热风出口钢结构稳定性（有利于热风出口砌体稳定）、消除“三岔口掉砖”事故隐患，消除热风阀漏水损伤热风炉隐患，热风主管与围管等标高，主管长度最短等。这项工程技术在国外历经数十年工业验证，证明其可以有效且全面提高顶燃式热风炉砌体和热风管道稳定性。

顶燃式热风炉诞生至今不过 40 多年，还有一些经过长期运行逐渐出现的工程问题需要逐一解决，例如应对来自燃料和环境空气的腐蚀等，但总体来说，影响顶燃式热风炉长期稳定运行的主要问题已经得到解决或者有了比较可行的解决方案，且大部分已经较长时间的工程实践验证。

### 三、高炉热风炉碳减排的途径—降低建造、运行各环节能耗

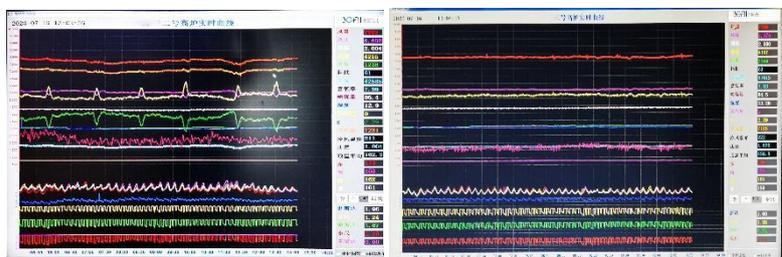
国内冶金行业以独特的形式历经十余年高速发展，将顶燃式热风炉技术迅速带动到“多点多面、高速发展”的阶段，除了卡卢金热风炉形式，还有其它形式或者类似的顶燃式热风炉技术在国内得到推广应用。

高速发展带来的问题是很突出的，例如热风炉越建越大，超规范的冗余设计造成大量建设材料的浪费，增加了建设成本；自动化控制技术落后导致能耗高、排放高；硅砖的使用虽然延长了热风炉免维护期限，但也同时造成大量的能源浪费（因为硅砖热风炉需要经常性保温），大高炉顶燃式热风炉尚面临一些工程技术问题需要攻克，另外一个与高速发展伴生的问题就是粗放型的技术、材料和建设管理导致热风炉寿命大幅度缩减。

“碳达峰”、“碳中和”的新政策引起工程技术人员对这些共性问题的警觉和思考，仅针对高炉热风炉工艺来说，坚持降耗增效是高炉热风炉工艺实现碳减排的关键抓手。

一直有用户强调高炉热风炉吨铁煤气消耗指标（该指标受到高炉生产影响，很难准确标定），未来推出一项可显著降低煤气消耗、并且可以进行量化测评的技术是很有必要的。针对热风炉运行能耗问题，人工（或半自动化）操作方式不具有降低能耗可行性，而仅仅使用“自动烧炉”技术产生的节能效果也是很有限的，只有提高全自动化控制技术水平才是最有效、也是可以量化测评的降耗措施。以 2500m<sup>3</sup>高炉热风炉工程为例，当煤气消耗有效降低 2%时，每年节省燃料费就超过 400 万元。

2019 年投产的  
5500m<sup>3</sup>高炉卡卢金热风



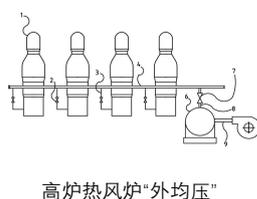
等炉容高炉操作参数曲线对比，左侧为原 2 高炉 右侧为新建 3 高炉

炉组首次采用了卡卢金原创热风炉自动化操作程序，目前还没有统计出具体的降耗数据，但其技术水平已经接近于“一键式”操作，烧炉换炉操作平稳，热风炉换炉操作对高炉鼓风压力无影响。

总体来说，减小炉体尺寸、推行全自动化操作制度是顶燃式热风炉工艺碳减排的关键抓手，也是我们当下的工作目标。

#### 四、技术路径和解决方法

2019年投产的5500m<sup>3</sup>高炉卡卢金热风炉组采用了具有重大意义的工艺技术——外均压，也就是利用独立的高压气源为热风炉充压，取代常见的用鼓风机为热风炉充压方法，



高炉热风炉“外均压”



这就使得热风炉充压换炉操作不需要受高炉生产限制。

这项技术的意义还不仅在于维护高炉生产，“外均压”技术对于热风炉工艺来说也是革命性的突破。

首先，因为换炉不需要受高炉生产限制，热风炉就可以全面推行“自动烧炉”、“自动换炉”的全自动化操作，这是实现热风炉降低煤气消耗的关键一步；其次，热风炉工作制度也有了突破空间，例如，单座热风炉不再需要设定很长的送风时间，这就有可能进一步减小热风炉尺寸。针对2500m<sup>3</sup>高炉热风炉，在同等风温下单炉送风时间从45分钟缩减到30分钟，热风炉高度则降低约5~10米，耐火材料用量可以减少15%以上。

提高风温、降低投资、减少材料用量的技术措施有很多，大量工业实践已经验证了一系列技术效果，比如双预热技术，小孔格子砖技术（蓄热

体用 37 孔格子砖取代 19 孔格子砖) 等, 当换炉技术得到突破后, 热风炉工艺才得以真正实现大幅度节能降耗、减排增效。

关于硅质材料。经过多种材料试验, 最终确定在高风温热风炉上使用硅质材料是一项重要的技术突破, 使用硅质材料的格子砖在卡式热风炉上运行 28 年无渣化无堵塞, 证明硅质材料的高温指标适合于热风炉工况。但热风炉硅砖的缺陷也很明显, 例如需要长时间烘炉, 不能快速降温等, 这造成大量热能损耗。新材料研究的方向是取代目前存在相变的硅砖, 新型材料具有硅砖的热工性能, 但不需要长时间烘炉, 也可以快速降温, 在高炉短期停产维修期间, 不需要像对待常规硅砖那样做特殊保温。

关于耐高温炉箅子。相比有托梁的炉箅子结构, 同等材质的无托梁独立支撑炉箅子技术把烟气(最高)温度从 350℃提高到 450℃, 因此降低了炉体高度, 烟气余热用于空煤气预热。但这并不是终极目标, 采用新材料制成的炉箅子可以使得烟气温度继续提高, 例如 500℃~600℃, 从而进一步降低炉体高度, 提高空煤气预热效果。

## **五、总结：研究成果和发展趋势**

顶燃式热风炉的发展速度超过了内燃式热风炉和外燃式热风炉, 但目前其工艺技术逐步优化、完善的效果并不是终极目标, 卡卢金博士提出“提高风温、降低投资”的观点, 是希望其技术可以为用户创造更大的经济效益, 现在, 我们加上“减排增效”, 并且提出可以测评的碳减排目标, 让高炉热风炉工艺进一步服务于环保钢铁。

“外均压”技术打开了阻挡在高炉热风炉工艺节能降耗的障碍, 热风炉

可以采用缩短送风时间的全新工作制度；现在，取代常规多相变硅砖的新材料研究已经取得突破性进展；已经试制成功的新型格子砖可以提高蓄热体湍流换热效果；采用新材料制作的炉箅子可以进一步提高烟气（最高）温度，同时提高空煤气预热温度；热风炉系统真正实现“一键式”操作，显著降低煤气消耗。

高炉热风炉工艺技术将很快进入新的发展阶段，其核心是围绕着“碳减排”目标，在设计、建造、运行全环节实现更高水平的节能降耗和减排增效，为钢企用户降低二氧化碳排放做出可测评的实际贡献，同时为用户创造更大的经济效益。

2021-05

（全文完）