坚持理想，做好当下

--卡卢金热风炉在中国的工业实践

北京卡卢金热风炉技术有限公司　总经理 王长春

摘要：热风炉高风温可实现高炉生产低焦比，新建卡卢金热风炉已经全面推行1250℃风温。卡卢金热风炉采用了一系列先进技术和工艺，获得了热风炉长期高风温运行的工程经验，其中，在中国、日本和俄罗斯的大高炉上卡卢金热风炉已经稳定运行10年，这些宝贵的工程经验指导着新一代卡卢金热风炉在高风温、长寿命、低成本方面继续发展。在新建1000m³-2000m³级炉容的高炉上卡卢金热风炉设计风温达到1250℃，新建2000m³-3000m³级高炉上卡卢金热风炉设计风温达到1250℃-1300℃，卡卢金热风炉的先进技术和工艺帮助用户在建设高风温卡卢金热风炉的同时降低工程投资。

关键词：高炉 热风炉 热风管道 格子砖 风温

Development and Application of Kalugin's shaftless hot blast stove in China

Wang Changchun [1]

（ Beijing Golden Bridge Metallurgical Equipment & Technical Co.,Ltd.,Beijing,100055 ）

Now Kalugin's shaftless hot blast stove is recognized as a" high temperature blast, low investment, long life" of shaftless hot blast stove structure, The Kalugin's shaftless hot stove makes heating of BF blast up to 1300-1400°C possible when ordinary refractory materials (silica, multycorundum, and fireclay) are applied and provide high economic and ecological values. This construction is fast spreading at the blast furnaces of 250-5500 m³ capacity in several countries (China, Russia, Ukraine, India, and Japan). Some technologies in China copied and imitated Kalugin's shaftless hot blast stove have begun to appear the operating accidents, a new generation technology of Kalugin's shaftless hot blast stove can create significant benefits for Chinese users with middle and small BF. Kalugin's shaftless hot blast stove can be used for structure transformation of various hot blast stove, saving construction financing, and improving the blast temperature greatly, which to be beneficial to reduce the blast furnace operation cost.

Key words: blast furnace, BF hot stove, burner system, checker, blast temperature.

目录

1 引论 3
2 卡卢金热风炉在中国的应用概况 3
2.1 主要工程业绩 3
2.2 技术研发、合作和创新 4
3 卡式热风炉燃烧器结构改进和优化 5
3.1 结构改进和优化 5
3.2 长寿研究 5
3.3 低氮技术 5
4 坚持推动高风温运行的工业实践 6
4.1 卡式热风炉在初期发展阶段的高风温实践 6
4.2 卡式热风炉技术在中国本地化的工业实践 6
4.3 大高炉卡式热风炉的技术发展和工业实践 7
4.4 小孔格子砖卡式热风炉高风温、低投资技术优势 8
5 提高热风管道稳定性的综合技术 9
5.1 带竖管的热风管道结构 9
5.2 带斜管的热风管道结构 9
5.3 将顶燃式热风炉热风主管标高降低到与围管等标高的管道结构 10
5.4 先进热风管道结构的关键技术 11
5.4.1 热风管道与围管等标高 11
5.4.2 提高热风管道钢壳刚性 11
5.4.3 提高热风管道内衬绝热性能，推广“咬砌”方式 11
5.4.4 消除热风管道三岔口内衬容易掉砖的事故隐患 11
5.4.5 热风管道拉杆 12
5.4.6 热风管道补偿器 12
5.4.7 热风管道支座 12
5.5 全面推广先进热风管道结构的应用技术 13
5.5.1 主要工程问题 13
5.5.2 主要解决方案 13
5.5.3 在中小高炉热风炉工程中推广更稳定的热风管道技术。 13
6 内燃式热风炉和外燃式热风炉改造 13
6.1 推动内燃式热风炉改造的必要性和工程问题 14
6.2 推动外燃式热风炉改造的必要性和工程问题 14
6.3 合作是推动热风炉技术发展的动力 15
7 结论：卡式热风炉高风温综合技术具有良好的经济效益 16
7.1 卡式热风炉的可靠性让用户避免损失 16
7.2 卡式热风炉提高长期运行风温让用户降低炼铁生产成本 16
7.3 小孔格子砖卡式热风炉的性价比优势为用户降低投资 17

1 引论

提高热风温度是在高炉生产中降低焦比和喷煤量的重要条件，同时，入炉风温的高低也影响着高炉的产能[1]。中国第一座现代卡卢金顶燃式热风炉建成投产时，国内很多炼铁行业的工程技术人员已经意识到：这种创新结构的炉型将为节省投资、提高风温、降低焦比的工业实践打开一扇门。

现在，现代卡卢金热风炉（即“小球顶”卡卢金热风炉，简称卡式热风炉）在中国已经走过了 17 个年头，截止到 2019 年 10 月，国内共有超过 150 座卡式热风炉在运行（或建设中），有 10 座炉容 4000m^3-5500m^3 的特大高炉使用正版卡式热风炉，并创造了长期运行最高风温的世界记录。

在这期间，卡式热风炉坚持不懈地推广高风温技术、坚持质量优先原则，稳步开展小孔格子砖技术工业实践，完成了一系列世界瞩目的重大工程。例如，日本 JFE 钢铁公司福山工厂 2009 年启动 4300m^3 高炉和 5000m^3 高炉外燃式热风炉不停产改造为卡式热风炉工程，俄罗斯北方钢厂 2011 年到 2017 年完成了 5580m^3 高炉外燃式热风炉不停产改造为卡式热风炉工程，其中最早完成技改的卡式热风炉已经运行 10 年，这进一步证明卡式热风炉在技术和稳定性方面已经达到一个新高度。

现在，国内类似卡式热风炉的小球顶形式顶燃式热风炉数量之多已经得不到准确的统计数字，出现了很多自称是“卡卢金改进型”顶燃式热风炉；另外，有一些钢铁企业建设了大球顶形式的顶燃式热风炉，但这种“大帽子”顶燃式热风炉的耐材用量比小球顶式热风炉多 30%，另外，在国内申请的涉及大球顶形式的顶燃式热风炉发明专利已经被宣布无效，国家专利局经过复审后认为那些专利并没有创新性。

2 卡卢金热风炉在中国的应用概况

2.1 主要工程业绩

下表为卡卢金热风炉在中国 17 年的工程业绩：

卡卢金热风炉在中国业绩（截止到 2019 年 10 月）						
高炉炉容	1000m^3 以下	1000m^3 -2000m^3	2000m^3 -3000m^3	3000m^3 -4000m^3	4000m^3 -5500m^3	合计
卡卢金热风炉数量	33	48	20	20	40	161 座卡式热风炉
项目数量（高炉数量）	11	16	6	6	10	49 座高炉

2002 年，第一座卡式热风炉（750m^3 高炉）在莱钢投产，这是卡卢金公司第一次以实际工程向中国用户展示卡卢金热风炉，除了这种热风炉与当时常见的内燃式、外燃式热风炉明显不同的炉型结构特征外，卡卢金发明的“带涡流喷射式预燃室的燃烧器”、无托梁独立支撑炉箅子等技术也是第一次在中国应用。

莱钢 3 号 750 立-卡卢金热风炉，2002 年投产

截止到 2019 年 10 月，卡卢金在中国为 49 座高炉设计了 151 座卡式热风炉，为国内 22 座 2580m^3-5500m^3 大高炉设计了 80 座卡式热风炉，其中包括 10 座 4000m^3-5500m^3 特大高炉工程，并且创造了连续超过两

年以上运行风温达到 1270℃-1280℃的世界先进业绩。

卡式热风炉技术在 1280m³-3200m³ 高炉热风炉市场还有很强的发展潜力，在这个级别的高炉热风炉工程中，目前卡式热风炉风温＞1200℃（配置 4 座热风炉风温 1250℃），但同时工程量小于其它类似的顶燃式热风炉。

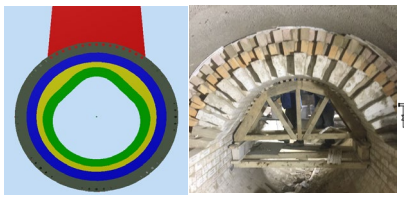
2.2 技术研发、合作和创新

卡式热风炉在中国发展的 17 年，也是卡卢金与国内工程技术人员合作发展顶燃式热风炉应用技术的 17 年，是中外技术人员合力推动了顶燃式热风炉技术进步。

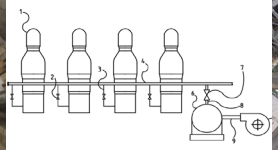
在这期间，卡卢金与首钢技术人员联合开发了“梨形热风管道内衬”，这项技术缩小了热风管道上部内衬弧径，热风管道通径为上小下大的“梨形”，其效果是提高管道上部耐火砖稳定性，同时，双方还合作引进了卡卢金热风炉自动化控制程序，这是国内大高炉顶燃式热风炉首次采用卡卢金自动化控制技术；

在这期间，卡卢金引进了带垂直热风支管结构的热风管道系统技术，将顶燃式热风炉的热风主管标高降低到围管标高，这项技术的意义在于提高热风管道稳定性；

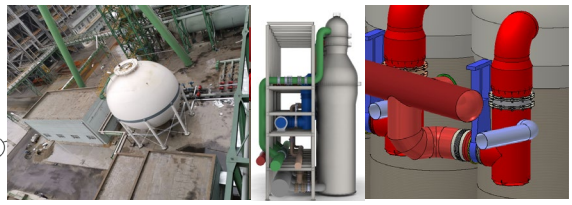
在这期间，卡卢金与国内技术人员合作开发了完整的“外均压”系统技术，这项技术的突出价值在于将高炉鼓风与热风炉均压换炉彻底分离，消除了热风炉均压操作可能引起的高炉压力波动，同时有效降低高炉鼓风能耗，缩短热风炉均压时间。



“梨形管道内衬”



“外均压”充压装置



垂直热风支管结构

2014 年，卡卢金与马钢技术人员合作在国内首次对内燃式热风炉（高炉炉容 907m³）进行“不停产改造”（新建 1 座卡式热风炉，不停产改造 2 座内燃式热风炉为卡式热风炉），改造后风温提高 100℃；同一年，卡卢金与济源钢铁公司技术人员合作首次完成了一座球式热风炉（高炉炉容 505m³）不停产改造，这些采用“不停产改造”的典型工程为国内众多的内燃式、球式热风炉技改升级提供了样板业绩。

（我们注意到有些技术人员在内燃式热风炉改造工程中采用了将内燃式热风炉燃烧室用做热风管道的方法，因为炉壳内部的隔墙仍然存在，所以这种方法与内燃式热风炉原型重建的效果相差不大，长期运行时隔墙两侧温差会导致隔墙受损，热风在炉内停留时间多于常规的顶燃式热风炉，烟气排放中 NOx 也会增加。）

马鞍山 907m³ 高炉内燃式热风炉不停产改造为卡卢金热风炉

河南济源 505m³ 高炉球式热风炉不停产改造为卡卢金热风炉

3 卡式热风炉燃烧器结构改进和优化

3.1 结构改进和优化

卡卢金发明的带涡流喷射式预燃室的燃烧器，是一种结构创新、能实现空煤气完全燃烧的陶瓷燃烧器，之前国内从未有过认识和充分研究。现在，虽然有一些早期的生产图纸被流散，国内也有技术人员进行了针对性研究，但是这些针对性的研究进程在一定程度上还是落后于这种燃烧器的技术进步，因为卡卢金对这种燃烧器结构也一直在进行改进和优化，最重要的内容之一是这种燃烧器功率已经从炉容 3000m³ 以下高炉提高到 5000m³ 级别大高炉工程，另外一项研究成果是完成了对预燃室结构的优化，成功地将热烟气对拱顶内衬的热载荷降低了 15%，这些成果已经应用到实际工程中。

3.2 长寿研究

卡卢金一直在坚持探索提高这种带涡流喷射式预燃室的燃烧器的稳定性及其使用寿命的方法。这些年来，卡式热风炉燃烧器一直整体采用高抗热震耐火砖，并且持续提高耐火砖性能，抗热震指标从最初的 50 次到现在超过 100 次。这项技术发展的成效是非常显著的，很多卡式热风炉投运时间已经达到或者超过 10 年，材质符合卡卢金设计要求的燃烧器都能够保持完好，完全不需要维修。

但是，我们也注意到其它机构设计的类似卡卢金燃烧器结构，一部分燃烧器耐火砖已经采用了低成本的材质。

3.3 低氮技术

2009 年完成的日本 JFE 公司外燃式热风炉改造为卡式热风炉工程，首次向世界展示了卡式热风炉低氮排放的技术特征。卡卢金对许多运行中的卡式热风炉进行了长期跟踪检测，都证明卡式热风炉可以满足欧盟和中国的超低排放政策。

卡卢金的研究成果表明：在多个热风炉排放 NOx 的成因中，其中有两个不可忽视的重要因素，即高温烟气在炉内停留时间和煤气完全燃烧程度，高温烟气在炉内停留时间越长、以及煤气燃烧不完全，都会导致烟气中 NOx 激增情况。与内燃式、外燃式热风炉相比，卡式热风炉在这两方面都具有明显优势，即高温烟气在炉内停留时间最少，卡式热风炉“带涡流喷射式预燃室的燃烧器”可以将煤气完全燃烧。

随着热风炉风温提高，卡式热风炉采取的另一项重要技术措施是控制拱顶温度不超过 1400℃，这也有利于控制燃烧过程中出现 NOx 激增情况[1]。

4 坚持推动高风温运行的工业实践

前苏联和俄罗斯、以及世界炼铁行业长期的研究成果都说明：提高鼓风风温有利于降低炼铁焦炭用量，因此可以降低炼铁生产成本，同时这也有利于推行高炉生产整体的碳减排规划，但是，除了炼铁工艺技术的限制外，提高热风炉送风风温与工程经济性之间仍然存在一个市场可以接受的平衡性问题。

4.1 卡式热风炉在初期发展阶段的高风温实践

什么才是具有高风温的热风炉？毫无疑问，高风温技术的价值在于热风炉长期稳定地在高风温下运行。

卡卢金在中国采用逐步发展的方式进行了大规模的高风温热风炉工业实践：早期在国内设计的数十座卡式热风炉的风温水平为 1150℃-1200℃，这已经明显高于当时大部分的内燃式热风炉。卡卢金采取的主要技术措施包括：

- “带涡流喷射式预燃室”的燃烧器；
- 符合欧洲标准的卡式热风炉本体设计技术；
- 硅质格子砖热风炉技术；
- 高效小孔格子砖技术（30 毫米孔径）；
- 无托梁独立支撑的耐高温炉箅子。

这一系列先进技术保证了卡式热风炉故障率大幅度降低，已经达到了免维修水平，另外，卡式热风炉的低投资优势也很明显，其建设费用明显低于当时常见的内燃式热风炉，越来越多的国内用户认识到卡式热风炉的经济性，因此国内新建内燃式热风炉的数量也随之明显减少，这种情况一直持续发展到 2010 年，国内就已经很少再建设内燃式热风炉了。

4.2 卡式热风炉技术在中国本地化的工业实践

从国内第一座卡式热风炉建设开始，卡式热风炉所有的材料和设备都在中国本地生产，由卡卢金在设计中提供耐火材料的成分和指标，提供热风炉系统主要设备工艺参数要求等，卡卢金采用委派专家进行砌筑指导的方式保证热风炉砌筑质量满足工艺要求。

在这个过程中也出现了一些工程问题，例如，一些项目的热风出口位置的内衬出现掉砖等。卡卢金为此采取了一系列技术措施加以改善，包括全新设计热风出口组合砖、热风短管采用低蠕变高铝耐火砖、制定组合砖砌筑规范等等，到 2008 年，新建卡式热风炉已经比较彻底地消除了热风出口内衬失稳的问题，这也说明类似热风出口掉砖问题并不是卡式热风炉固有缺陷，而是俄罗斯技术本地化过程中可以解决的工程技术问题。

卡式热风炉在推动国内热风炉设备和耐火材料生产进步方面起到了一定的促进作用，引导性地明确了顶燃式热风炉内衬配置规范和划分标准，对顶燃式热风炉炉壳、预燃室耐火砖、顶燃式热风炉用耐火材料、炉箅子材料等技术标准做了本地转化。

卡式热风炉推荐采用刚性炉底技术，但是根据用户要求，也设计了一些采用“锅形炉底”的卡式热风炉。常规的卡式热风炉炉箅子材质采用 RTCr2，但也接受用户要求设计了一些采用 Si4Mo 材质的炉箅子。

4.3 大高炉卡式热风炉的技术发展和工业实践

从 2008 年开始，卡式热风炉进入一个全面发展的新阶段。最重要的标志是开启了炉容 4000㎥以上大高炉卡式热风炉的工业实践。

大高炉卡式热风炉的使用寿命超过 30 年，因此提高稳定性、提高风温是大高炉卡式热风炉最重要的技术发展目标。大高炉卡式热风炉的主要核心技术包括：

- 大功率“带涡流喷射式预燃室”燃烧器；
- 大高炉卡式热风炉系统工艺设计技术；
- 高风温热风管道设计技术；
- 高效小孔格子砖技术（30 毫米孔径格子砖和 20 毫米孔径格子砖）；
- 带边缘分流板的无托梁独立支撑炉箅子。

在这 10 年的时间里，卡卢金为国内 10 座炉容 4000㎥以上的大高炉设计了 1300℃风温的卡式热风炉，现在最高的长期运行风温达到 1270℃-1280℃，最长运行时间达到 10 年。

目前，全球钢铁行业正走向集中化，环境保护要求越来越严格，这些都在促使炼铁高炉向大型化、高效化、清洁化发展，国外高炉大型化进程已经走过四五十年，但国内大高炉（炉容 4000㎥以上）发展路程仅有十年，很多实际的工程问题都是在发展中出现、在发展中解决。例如，有几座大高炉的卡式热风炉炉壳在最近几年出现了不同程度的焊缝开裂，这个问题引起卡卢金和国内工程技术人员的高度重视，根据技术分析，在大高炉热风炉炉壳设计中，尤其应特别注意减除对热风炉本体的任何刚性约束，应避免设计完整的大抱箍、紧贴炉壳的平台框架等结构，保证热风炉炉壳在工作中“自由呼吸”，计算和工程实践都证明：在热风炉长期工作中，额外的约束应力容易对大尺寸的炉壳造成损害，国内没有采用炉壳抱箍结构的大高炉卡式热风炉炉壳都在安全运行；另外，大尺寸炉壳施工应提高施工质量规范，设法消除较高的焊接应力和安装应力。除此之外，卡卢金和国内工程技术人员对炉壳材质的改进做了一些探索，例如局部采用更高等级材料，或者采用复合钢板，复合钢板有利于降低炉壳内部焊接缺陷，同时复合钢板能够有效抵抗可能的晶间应力腐蚀，已经投运的采用复合钢板的大高炉卡式热风炉运行情况良好。

曾有建议将卡式热风炉炉壳加“外保温”，但外保温会提高炉壳和耐材温度，却不会降低气态酸在炉壳内侧的凝结，而且外保温层会影响工程人员及时发现炉壳的过热和发红现象，可能对炉壳造成意外损坏[1]。经过反复论证后的结论是：卡式热风炉不需要对炉外做“外保温”，卡卢金在日本完成的外燃式热风炉改造工程使工程技术人员相信，卡式热风炉炉壳不需要外保温，因为运行至今（10 年）还没有明显证据表明卡式热风炉拱顶受到晶间应力腐蚀损坏。在中国，除了几座大高炉卡式热风炉出现不同程度的炉壳焊缝开裂情况外，其它的包括运行时间超过 10 年的卡式热风炉都没有出现炉壳开裂情况。

但有些情况还是值得引起技术人员注意：国内采用较多进口矿的高炉，应特别注意氯离子腐蚀作用，这些腐蚀不仅会对热风炉炉壳产生较大影响，对热风管道也是非常不利的。

总之，中国的大高炉冶炼技术水平正在整体提高，在中外技术人员的共同努力下，大高炉卡式热风炉已经具有了在高风温下长期稳定运行的工程经验，新建大高炉卡式热风炉在工程技术方面做了很多有益改进，着重提高钢结构和内衬稳定性，在大高炉热风炉自动化操作技术方面也有创新进步，因此，我们有理由相信：中国未来大高炉热风炉技术水平能够继续开创佳绩，稳居世界前列。

4.4 小孔格子砖卡式热风炉高风温、低投资技术优势

因为 37 孔格子砖的蓄热面积比 19 孔格子砖（48㎡/㎥）增加 33%，因此，采用 37 孔格子砖设计的卡式热风炉尺寸更小，耐火材料重量降低，提高了竞争性；卡卢金具有 37 孔格子砖热风炉设计的核心技术，长期工程实践证明：采用 37 孔格子砖的卡式热风炉不会因为短暂的除尘设备损坏而导致格子砖堵塞。

随着高炉炉容增加、热风炉设计风温持续提高，相比采用 30 毫米孔径（19 孔）或者 25 毫米孔径格子砖，20 毫米孔径格子砖（37 孔）的单位体积蓄热面积最高（64㎡/㎥），格子砖耐火材料利用率最高，所以，采用 37 孔格子砖的卡式热风炉尺寸更小、投资更低、供热能力更强，因此性价比更高。

卡式热风炉使用寿命 30 年（两代炉龄），考虑到高炉冶炼技术水平持续提高的可能性，热风炉需要具备一定的能力冗余，这已经成为近代热风炉设计的趋势，但是，提高热风炉供热能力和控制工程投资之间需要得到平衡，37 孔格子砖热风炉正是解决这个平衡的最有效措施。

根据卡卢金设计，两种不同孔径格子砖的热风炉阻损几乎是一样的（＜5kpa），对热风炉正常工作制度没有影响，格子砖材料主要是硅质、低蠕变粘土和粘土，在实际工程中，根据用户的要求，有一部分卡式热风炉采用高铝材质（DRL-60）的格子砖替代部分硅质格子砖，通过增加格子砖砖重提高热风炉蓄热能力。

从 2004 年国内第一座 37 孔格子砖卡式预热炉开始，卡卢金一直在稳步推动 37 孔格子砖卡式预热炉和卡式热风炉的工业实践，积累了丰富的设计经验和工程经验。现在，虽然根据用户要求以及工程要求，卡卢金仍然在设计一些 19 孔格子砖（30 毫米孔径）热风炉，但 37 孔格子砖热风炉已经逐步被更多的用户接受和认可。

截止到 2018 年 1 月，卡卢金在中国为 450㎥-4150㎥高炉设计了 37 孔格子砖卡式热风炉，在俄罗斯、捷克、哈萨克斯坦、印度等国新建和改造热风炉工程中都采用了 37 孔格子砖卡式热风炉，全世界共有超过 160 座卡卢金热风炉和预热炉（运行中和建设中）使用了 37 孔格子砖，最长的运行时间超过 15 年，从未有被堵塞的事故，最小为 250㎥高炉卡式热风炉工程（叙利亚），最大为 5580㎥高炉卡式热风炉工程（俄罗斯北方钢厂 5#高炉）。

2019 年，国内采用 37 格子砖卡式热风炉技术的 5500㎥高炉顺利投产，目前风温已经达到 1260℃，国内现在正在建设的 2500㎥高炉、2580㎥高炉、1280㎥高炉三项工程都采用了 37 孔格子砖卡式热风炉技术，设计风温达到 1220℃-1300℃。历经近十余年，卡卢金在国内已经完成了炉容 450㎥-5500㎥高炉 37 孔格子砖热风炉技术的应用实践，这些业绩工程让越来越多的用户相信，与采用 30 毫米孔径（19 孔）和 25 毫米孔径格子砖的热风炉相比，采用 37 孔格子砖的卡式热风炉技术是成熟可靠的，同时具有更高的性价比。

卡卢金 20 毫米孔径格子砖（37 孔）热风炉应用于

日本 JFE450m³ 高炉（2011），　国内 1780m³ 高炉（2008） 3200m³ 高炉（2010） 4150m³ 高炉（2014） 5500m³ 高炉（2019）

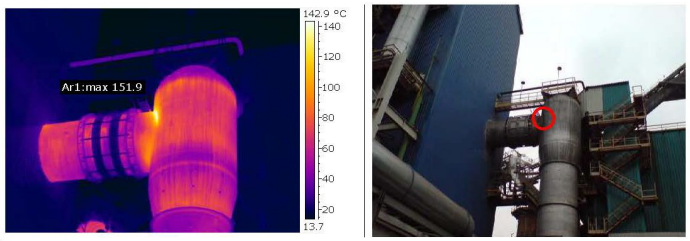
5 提高热风管道稳定性的综合技术

顶燃式热风炉的特征之一是燃烧器位于蓄热室上部，因此，从拱顶引出的热风短管标高一般都高于高温围管标高。在研究如何提高热风管道稳定性的时候，不能忽视的一个重要技术问题，就是处于较高位置的热风短管和较低标高的高炉围管如何连接才更安全更长寿？

伴随高风温热风炉的技术发展，出现了几种将顶燃式热风炉热风主管与高炉围管连接的技术方案。

5.1 带竖管的热风管道结构

在国内早期建设的卡式热风炉工程中，卡卢金通常只提供热风管道基本设计，基本方案是热风支管水平布置并与热风主管水平对接，热风管道采用固定的竖管形式降低高度并与高炉围管连接，这种结构实际上是将热风管道一分为二，两段不同标高的热风管道分别与固定的竖管连接。



俄罗斯利佩茨克钢厂卡卢金热风炉竖管（运行 10 年）

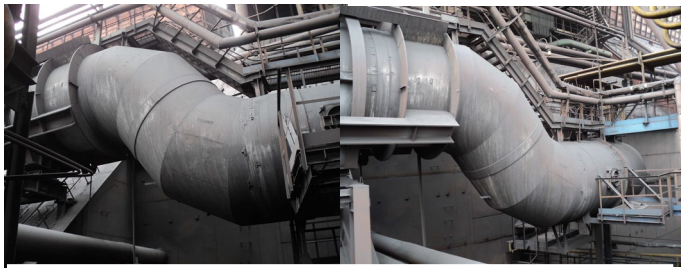
这一基本形式被国内一些同行承续下来，并且进行了一系列研究发展，例如增加了热风支管大拉杆，为了消除来自围管的热膨胀，在两段热风管道末端都增加了补偿器等。

经过长期应用实践，国内一些带竖管的热风管道结构取得了稳定运行的成功经验，但是，有比较多的热风管道在运行中出现了的一些问题，主要包括：竖管拱顶过热（内衬掉砖），热风管道与竖管交接位置出现过热、内衬掉砖等，问题主要集中在竖管本体和三岔口位置。

5.2 带斜管的热风管道结构

根据俄罗斯的应用经验，解决竖管故障率高的一项有效措施是取消竖管、两段热风管道采用斜管方式连接。卡卢金早期为顶燃式热风炉设计了通过刚性的斜管将热风管道降低到围管标高的结构，其主旨是将热风管道设计为一体形式，提高热风管道整体稳定性。

2014 年，卡卢金首次将这种热风管道结构引入中国，为炉容 4150m^3、907m^3 高炉配套的卡式热风炉设计了带斜管的热风管道系统，两者不同的是，在 4150m^3 高炉卡式热风炉热风管道的斜管段增设了补偿器，但该补偿器因为没有大拉杆保护产生了过量变形和损坏；而在 907m^3 高炉卡式热风炉热风管道的斜管段没有增设补偿器，一直稳定运行。

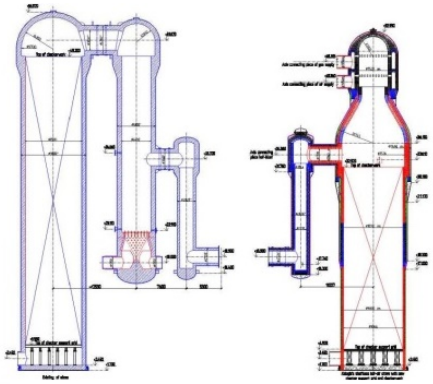

俄罗斯下塔吉尔钢铁公司卡卢金热风炉竖管（运行 15 年）

事实上，将两段热风管道采用斜管连接是一项经得起工程考验的实用技术，在俄罗斯有运行超过 15 年的工程业绩，国内技术人员对这种结构也不陌生，但斜管应是刚性结构，两段热风管道分别设置大拉杆，这样的管道结构具有很好的稳定性。

5.3 将顶燃式热风炉热风主管标高降低到与围管等标高的管道结构

在 2015 年投产的 5050m³ 高炉卡式热风炉上，出现了一种新的热风管道结构，就是将新日铁式外燃式热风炉的垂直热风支管结构与卡式热风炉进行了有机嫁接，这是在国内首次将顶燃式热风炉热风管道整体降低到与围管等标高，有效提高了热风管道整体稳定性。

2016 年，卡卢金为国内 3200m³ 高炉设计的卡式热风炉系统投产，在这个项目中，卡卢金首次采用了“L”形热风支管结构，将顶燃式热风炉热风主管高度降低到与围管相等标高，这种“L”形垂直热风支管形式取消了垂直支管上部的混风室，而是在热风支管垂直段设置了混风管。在 2009 年，卡卢金在日本 JFE 公司 4300m³ 高炉外燃式热风炉改造工程中就已经应用了这种结构，消除了原混风管易发生晶间应力腐蚀的问题。



日本 JFE 公司 4300m³ 高炉外燃式热风炉改造为卡卢金热风炉，采用垂直热风支管

从长期运行稳定性来看，卡卢金早期为内燃式热风炉改造所设计的 “U”形热风支管形式更为稳定，这种热风管道结构在上世纪八十年代就已经开始在俄罗斯应用（例如 1986 年投产的 5580m³ 高炉外燃式热风炉系统），卡卢金所做的内燃式热风炉不停产改造工程中都使用了这种“U”形热风支管结构，现在，这种热风管道形式已经为大多数俄罗斯用户所接受，新建热风炉系统也普遍采用这种热风管道结构。

“U”形热风支管的结构包括垂直段、水平段和上升段，主要特征包括：

- 热风支管垂直段下部与框架平台固定，这使得热风支管垂直段与热风炉本体钢结构事实上形成一体；
- “U”形热风支管上升段从下部与热风主管连接，彻底消除了早期结构中“三岔口”组合砖容易过热掉砖的故障隐患；
- “U”形热风支管的热风阀安装在支管水平段，位于热风出口下部，消除了热风阀漏水导致热风炉内部硅质材料损坏的事故隐患，即使出现热风阀漏水事故，也不会伤及热风出口和硅质内衬；
- 带“U”形热风支管的热风管道与围管等标高；
- 可以在热风支管垂直段设置混风管（“独立混风”）；
- 采用这种“U”形热风支管结构后，需要为热风支管水平段增设平台，因为这里布置了热风阀和用于更换阀门的补偿器。

俄罗斯下塔吉尔 2200m³ 高炉卡式热风炉采用 U 形支管 2018 年投产

国内 5050m³ 高炉、3200m³ 高炉热风管道结构对其它工程产生了较好的示范作用，其中的“独立混风”方式也为更多的顶燃式热风炉用户所接受。“独立混风”方式是相对于常规的“热风主管混风”方式而言，即在每座热风炉的热风支管上都设置了混风管，这种混风方式使得热风在经过热风阀进入主管前就已经开始混风，降低了热风管道的热载荷，有利于提高热风阀和热风主管的使用寿命。几乎所有的新日铁式外燃式热风炉都采用了这种“独立混风”方式，因此国内对这种设计并不陌生。

2019 年，卡卢金为国内 2500m³ 高炉、2580m³ 高炉、1280m³ 高炉设计的卡式热风炉系

统完整地引进了带 “U”形热风支管的卡卢金热风管道结构，将顶燃式热风炉热风主管高度降低到与围管相等标高，并且大部分都采用了独立混风方式。

5.4 先进热风管道结构的关键技术

顶燃式热风炉在国内应用已经 17 年，出现了多种热风管道结构形式，其中涉及到顶燃式热风炉热风管道的关键技术包括：管道结构设计、热风管道壳体设计、内衬设计、组合砖设计、拉杆设计、补偿器设计、支座设计等，卡卢金和国内工程技术人员总结出一些典型的热风管道的设计经验，其中的内容已经开始工业实践。

5.4.1 热风管道与围管等标高

热风炉操作者和工程技术人员都已经认识到：将顶燃式热风炉热风主管标高降低到围管标高，热风管道内衬会更稳定，有利于减少热风管道故障率。

为此，在国内已经投运（包括建设中）的项目中，有两种热风管道形式实现了将热风主管标高降低到围管标高的目标，一种是卡卢金设计的带垂直支管（“L”形和“U”形热风支管结构）的热风管道，另一种是带新日铁式热风支管的热风管道结构。

5.4.2 提高热风管道钢壳刚性

早期有一种意见认为热风管道的刚性得益于内衬和支座辅助，从成本角度考虑，管道钢壳的设计厚度只有 16mm-18mm。

但上述设计不符合俄罗斯技术规范，卡卢金认为：钢结构失稳是其内衬失稳的主要原因，因此，具有足够刚度的管道钢壳是其内衬稳定的前提，对于炉容 2000m^3 以上高炉热风管道，管道钢壳厚度不应低于 22mm，管道直径越大，钢壳厚度也应相应地增加。

5.4.3 提高热风管道内衬绝热性能，推广“咬砌”方式

随着风温提高，热风管道内衬的稳定性对维护高炉正常生产意义重大，几乎所有的故障都来自于内环重质砖，尤其是位于管道上部 120° 区域的重质砖。

卡卢金推荐内环砖采用低蠕变高铝砖（AI_2O_3 含量 75%以上），国内有一种方案是采用莫来石红柱石材质，但符合理化指标的莫来石红柱石耐火砖价格更高一些。

为了提高砌体稳定性，防止管道内衬“串风”导致钢壳过热，一些用户提高了轻质砖理化指标，目的是在重质砖砖缝漏风的情况下轻质砖不会烧损，一般会选用低铁莫来石材质或其它耐火度较高的轻质砖，但这些轻质砖价格都比较高。卡卢金推行“咬砌”方式，重质砖和轻质砖都采用错位砌筑。相比“环砌”方式，因为消除了内外贯通灰缝，“咬砌”的施工方法可以提高热风管道内衬稳定性，但砌筑施工复杂一些。

5.4.4 消除热风管道三岔口内衬容易掉砖的事故隐患

在三岔口位置，热风支管内衬应以较小直径插入热风主管内衬中，所有的组合砖都应采用压力机机制成型。

国内有一种组合砖设计方案是加大单体组合砖尺寸，在三岔口位置也有采用整体浇注料的方案，但尚没有或者很少有新建热风管道采用浇注施工的案例。

卡卢金则推荐“U”形热风支管结构，热风支管的上升段从下部接入热风主管，因此完全消除了三岔口组合砖掉砖的故障隐患。

5.4.5 热风管道拉杆

热风管道梁式拉杆

国内目前常见的热风管道拉杆形式是圆棒式拉杆（两端配大螺母），但这种拉杆自身可能存在热胀冷缩现象。卡卢金推荐采用梁式拉杆，即采用“工”形框架梁做热风主管整体拉杆，梁式拉杆两端与热风主管焊接在一起，可以更有效约束主管钢壳。

卡式热风炉一般不设置热风支管大拉杆，实际上，并不是任何情况下都需要在热风支管上设置大拉杆，例如，当热风主管三岔口位置已经设置了固定支座时，热风支管大拉杆可能对热风炉或者热风主管产生额外的结构应力；另外，如果热风支管安装的是约束型补偿器，补偿器自身带受力拉杆，这种情况下也不需要在设置支管大拉杆；再者，在一些工程中为了固定拉杆而在炉壳上设置了整圈抱箍，这种抱箍也可能对热风炉炉壳产生额外的不利应力。

5.4.6 热风管道补偿器

顶燃式热风炉热风管道补偿器的主要设计方案已经基本得到确定，即：

（1） 热风主管补偿器的设置。在热风炉每个三岔口之间设置压缩补偿器，当热风主管不能吸收高炉围管热膨胀的时候，在热风主管末端设置拉伸补偿器，但因为每个项目的差异性，各个补偿器的应力载荷、变形等参数都应进行计算校核。

（2） 热风支管补偿器的设置。因为顶燃式热风炉热风支管形式不同，有多种方式设置热风支管补偿器：当热风支管采用与热风主管水平对接时，最普通的方式是设置一个万向补偿器，如果采用约束型补偿器（自带受力拉杆），一般情况下就不需要设置热风支管大拉杆。如果采用垂直热风支管，一般的做法是在支管的垂直段设置轴向补偿器，在水平段设置轴向补偿器，不需要设置热风支管大拉杆。

5.4.7 热风管道支座

在热风主管每个三岔口位置（或附近）设置固定支座，其余为滑动支座；或者，在补偿器的一端设置固定支座，另一端设置滑动支座。

总的来说，经过长期工程实践，顶燃式热风炉常规热风管道的设计方案已经基本成熟，但所有的设计方案都应基于合理、严谨的计算，一些比较常见的事故，例如三岔口掉砖、热风出口掉砖、补偿器受损等，都与未经计算校核导致参数选型不合理有一定关系，另外一些因素是缺失质量管理。

对于顶燃式热风炉来说，与常规热风管道的设计方案相比，将热风管道标高降低到围管标高的方案优势明显，例如：

（1） 缩短了热风管道长度，提高了热风管道内衬稳定性；

（2） 将热风炉和热风管道工作期间的钢结构变形做了有效隔离，在结构设计上基本上消除了热风出口和三岔口结构不稳定的问题；

（3） 杜绝了热风阀漏水损坏热风炉内衬的可能性；

（4） 成熟的设计技术可以避免垂直热风支管失稳。

5.5 全面推广先进热风管道结构的应用技术

总的来说，随着高风温热风炉技术的发展，很多用户都提高了对提高热风管道稳定性的重视，因为热风管道的长寿与热风炉长寿同等重要，会直接影响高炉作业率。

上述大部分热风管道结构在俄罗斯都有过应用，但并不是所有在国外已经成功的设计技术在国内就一定会成功，在 2010 年以后，卡卢金开始在国内推行先进热风管道技术，历经波折，逐步确立了能够解决用户问题的技术方案。

5.5.1 主要工程问题

国内钢企用户非常关心如何解决顶燃式热风炉热风出口掉砖、热风管道三岔口掉砖、热风管道补偿器寿命短等常见故障。在国内，带竖管的热风管道结构有非常成功的案例，但大部分采用这种管道结构的用户都或多或少地出现了上述事故。

5.5.2 主要解决方案

根据长期工程实践检验，将热风管道标高降低到围管标高是最有效的消除现有故障隐患的工艺方案。

目前已经具有成熟应用经验的是带新日铁式垂直热风支管结构的热风管道，以及卡卢金带 “U”形垂直支管结构的热风管道，这两种形式的热风管道消除了早期极易出现的热风出口和三岔口掉砖的故障隐患，可以认为是目前最全面的热风管道解决方案。

与新日铁式垂直热风支管结构相比，卡式“U”形垂直支管的内衬设计简化，没有非常复杂的混风室，一些运行较长的工程业绩已经超过一代炉龄。由于热风垂直支管底部与平台框架固定，投产后的热风支管垂直段（到热风阀）与热风炉成为一体，热风支管垂直段的内衬和热风炉本体内衬不会受到来自钢结构变形的影响，因此比较彻底地消除了热风出口和三岔口掉砖的事故隐患。

5.5.3 在中小高炉热风炉工程中推广更稳定的热风管道技术

国内中小高炉顶燃式热风炉热风管道故障率较高，推行先进热风管道结构就显得更为重要和急迫，有两种已经投运多年经过验证的技术方案可以选择：

（1） 带 “U”形垂直支管的热风管道结构

（2） 带斜管的热风管道结构，这种结构适合于投资较低、热风出口标高与围管标高相差较小的情况。

（目前，有技术人员提出一种解决方案是在热风出口位置增设一段独立内衬结构，即“四段式”热风炉结构，据说其目的是避免热风炉拱顶内衬与热风出口位置的组合砖相互影响，但从更普遍的工程业绩分析，这种意见把引起热风出口掉砖的因素放大为顶燃式热风炉普遍存在的结构缺陷，其效果是大幅度增加了热风炉材料用量。实际上，当已经有可靠技术解决了热风出口内衬失稳问题的时候，采用这种“四段式”结构的必要性就降低了，因为这种“四段式”热风炉更高，材料消耗量更大。）

6 内燃式热风炉和外燃式热风炉改造

1860 年，E·A·Cowper 首次采用蓄热室热风炉为高炉加热鼓风[1]。由他研制的内燃式热风炉得到了普遍的推广，早期内燃式热风炉引进中国后，国内工程技术人员持续地做了很多技术改进，但直到现在但其基本结构也没有本质性变化。内燃式热风炉的缺陷推动了外燃式热风炉的出现（外燃式结构在 1910 年就已经提出），

1930 年建成世界第一座外燃式热风炉，目前常见外燃式热风炉形式包括新日铁式、克虏伯式、马丁式和帝德式，国内常见新日铁式和帝德式。

6.1 推动内燃式热风炉改造的必要性和工程问题

内燃式热风炉在俄罗斯和中国现存的数量众多，随着热风炉进一步强化运行，以及提高风温和工作压力，导致热风炉更加频繁地出现故障，维护费用激增、使用寿命缩短，同时，维修热风炉就意味着高炉生产成本激增和产能损失。国内实际的情况是，内燃式热风炉只有维持在较低的风温下才能稳定安全地工作。

国内一批内燃式热风炉系统已经增加了第 4 座热风炉，并且大部分都采用了更稳定的顶燃式热风炉形式，但只增加一座顶燃式热风炉无法提升风温。

在国内，很少有全面地将内燃式热风炉改造为顶燃式热风炉的工程案例，这其中一部分原因是出于用户的操作习惯，对顶燃式热风炉不熟悉；也有一部分原因来自近期建设的一些顶燃式热风炉故障率比较高，使得用户对顶燃式热风炉的技术优势心存疑虑；再有，国内“内燃改顶燃”工程中一般采用竖管方式连接顶燃式热风管道和内燃式热风风管道，这使得改造工程变得复杂；另外，采用 19 孔格子砖的顶燃式热风炉甚至比内燃式热风炉还要高，没有体现出顶燃式热风炉的低投资优势。实际工程中，采用竖管方式连接热风管道很难实现“不停产”改造，国内实施的“内燃改顶燃”工程，基本上采用在高炉大修期间新建热风管道的技术方案。

卡式热风炉最早的应用就是来自内燃式热风炉改造的需求，因此积累了大量工程经验，已经掌握了内燃式热风炉不停产改造的系统设计技术。从 2000 年开始，卡卢金就采用“U”形热风支管结构进行“内燃改顶燃”工程，卡式热风炉的热风支管可以直接与原热风支管上的热风阀对接，这样就可以实现“不停产”改造；在 20 毫米孔径（37 孔）格子砖技术成熟以后，卡式热风炉高度更低，在提升风温、降低投资方面具有显著优势。

无论是在国内还是在其它国家，习惯使用内燃式热风炉的用户对于“内燃改顶燃”都会持有一定疑虑和观望的心态，这需要卡卢金和国内工程技术人员坚持合作加强宣传，无论是从提高风温、降低成本或者是环保减排、降低投资等方面看，“内燃改顶燃”都是一种不可阻挡的技术发展趋势。

6.2 推动外燃式热风炉改造的必要性和工程问题

自从新日铁式热风炉引进中国，国内陆续建设了一批 2000m^3 以上的外燃式热风炉，目前国内还有一些大高炉帝德式外燃式热风炉在运行。外燃式热风炉一般建设 4 座，运行较内燃式热风炉更加稳定，风温也较高（1200℃左右）。近几年，一批外燃式热风炉已经到了服役末期，面临大修。

宝钢外燃式热风炉已经开始陆续大修，采用了原型重建方案，这使得其它拥有外燃式热风炉的用户对于大修方案难以决定： “外燃改顶燃”的阻力来自于技术人员比较熟悉外燃式热风炉运行特性、维护操作，国内尚没有“外燃改顶燃”先例；但另一方面，外燃式原型重建费用昂贵，维护费用也较高，原型重建大修工程给大多数用户带来较大的资金压力，并且，国内大部分外燃式热风炉风温都低于 1250℃，距离在运行中的大高炉卡式热风炉风温有较大差距。

“外燃改顶燃”可行性如何？投资如何？有长期运行业绩吗？

2009 年到 2010 年，日本 JFE 公司采用卡式热风炉技术，率先在全球对大高炉外燃式热风炉进行大修改造，改造内容包括：热风炉结构改造为卡式热风炉，提高风量（高炉扩容）、取消炉壳外保温、改造混风结构等内容，两座大高炉（4300m^3 和 5000m^3）

各完成了 1 座外燃式热风炉技改，之后进行了连续 7 年的观测和检验，2016 年，JFE 公司重启其中高炉炉容 4300m³的外燃式热风炉不停产改造工程，目前已经有 2 座热风炉改成技改，最后 1 座热风炉技改工程计划 2021 年完成。技改方案主要内容是利用外燃式热风炉蓄热室的部分炉壳改造为卡式热风炉，采用 19 孔格子砖，卡式热风炉的垂直热风支管与原支管热风阀对接。根据 JFE 方面说明，与原型重建相比，“外燃改顶燃”整体工程投资降低约 15%，工期大幅度缩短。目前，JFE 公司另外一座大高炉（4000m³）的“外燃改顶燃”大修技改工程也将启动。

2011 年，俄罗斯北方钢厂（Severstal）开启了当时欧洲最大的 5#高炉（5580m³）帝德式外燃式热风炉改造为卡式热风炉工程，到 2017 年全部 4 座帝德式外燃式热风炉都已经改造为卡式热风炉，这是全球首次全面完成的大高炉“外燃改顶燃”大修技改工程，目前运行风温超过 1250℃。技改方案是利用外燃式热风炉蓄热室的部分炉壳改造为卡式热风炉，采用 37 孔格子砖，卡式热风炉热风支管直接与原支管上的热风阀对接。与原型重建相比，卡式热风炉耐火材料用量降低 50%（热风炉蓄热室采用 37 孔格子砖取代 7 孔格子砖），“外燃改顶燃”整体工程投资降低 15%以上，并且工期大幅度缩短。

俄罗斯北方钢厂 5580m3 高炉外燃式热风炉改造为卡卢金热风炉（2011-2017）

上述世界瞩目的技改工程堪称外燃式热风炉改造的示范样板，只是因为项目在国外，对国内冶金行业影响力不够，但这些工程已经证明“外燃改顶燃”是外燃式热风炉大修技改的优选技术方案，尤其是在降低投资、提高风温方面具有明显的先进性。

卡卢金一直在努力宣传“外燃改顶燃”的优势，并且积极和国内工程技术人员合作进行方案论证，相信在不久的将来，国内也将开启“外燃改顶燃”工程，推动国内大高炉热风炉向高风温、低投资、低排放的方向发展。

6.3 合作是推动热风炉技术发展的动力

与国外冶金领域的热风炉技改工程相比，在市场利益驱动下，国内的“内燃改顶燃”、“外燃改顶燃”工程实施并不理想，存在技术封锁、技术壁垒等现象；另一方面，前期蜂拥而上的各式顶燃式热风炉投运后效果不如预期，也影响了顶燃式热风炉技改技术的推广。

在国内，随着钢铁行业进入高速发展阶段，一时间出现了多种、各型的顶燃式热风炉，这种现象是很反常的，而 “顶燃式热风炉燃烧器由耐材厂设计”的现象更是不可思议！这种情况导致一些不同样式的顶燃式热风炉存在效果和质量低于预期的严重问题，运行 2-5 年就事故频发，甚至需要大修，用户因此受到损害。

应该说，这种现象严重限制了工程技术人员对国外先进技术发展的了解，这种情况在中小高炉工程领域尤其严重，在热风炉技改领域也是这样；从另一方面来说，这种现象也严重阻碍了卡卢金与国内工程技术人员正常的技术交流。

不符合技术发展规律的那些热风炉技术并不是创新，甚至可以认为是技术欺骗，因为那些不成熟甚至不合理的设计最终会导致用户受到损失；为了规避专利，一些热风炉的燃烧器被交给耐火材料生产工厂设计，这种做法极不可取、极不负责！这

导致国内出现了一种“热风炉投资巨大、但设计门槛极低”的不正常现象。

实际上，顶燃式热风炉技术能够存在并持续发展的基础是依赖于其技术先进性和质量可靠性，但对于全球冶金领域来说，或者相对于内燃式、外燃式热风炉来说，顶燃式热风炉仍然属于新生创新技术，在应用实践方面、尤其是长期应用经验方面还有很长的发展之路，因此，只有通过广泛的技术合作，坚持长期的技术研究，才能逐步完善顶燃式热风炉应用技术。

7 结论：卡式热风炉高风温综合技术具有良好的经济效益

自从卡式热风炉在中国出现以来，“低投资、高风温、长寿命”的顶燃式热风炉逐步成为一种高炉热风炉技术的发展趋势，并且不可阻挡。在近 10 年的时间里，国内虽然仍然建设了一些内燃式热风炉和外燃式热风炉，但顶燃式热风炉在高风温和低投资方面的优势是非常显著的。

7.1 卡式热风炉的可靠性让用户避免损失

卡式热风炉赢得国内用户信任的最重要优势是其可靠性高，卡卢金不仅是这种顶燃式热风炉的发明人，同时也是这种热风炉系统的设计者，更重要的是：卡式热风炉在俄罗斯已经应用超过二十年，在日本、欧洲、印度等地也已经广泛应用，没有不良业绩；国内目前已经有超过 150 座卡式热风炉投产（包括建设中），极少出现工程问题，并且具有对出现的工程问题提出合理解决方案的能力。卡卢金在国内主要提供设计和技术服务，与国内几乎所有的冶金设计机构有过合作，但绝大多数情况下是由最终用户指定采用卡卢金技术。

用户决定采用卡式热风炉可以避免不可预期的重大损失，因为卡式热风炉在高炉炉容 1000㎥以上级别范围里的业绩工程是最多的，应用时间也是最长的，故障率是最低的，长期运行风温是最高的；与其它的顶燃式热风炉相比，卡式热风炉具有最好的性价比，同时具有满足用户各项工程要求的技术实力。

7.2 卡式热风炉提高长期运行风温让用户降低炼铁生产成本

2008 年以后，卡卢金在国内开始全面推广 1200℃-1250℃风温的卡式热风炉，向设计院同行和用户宣讲高风温热风炉的经济效益，并在大高炉卡式热风炉工程中推广 1300℃风温。

鼓风风温对高炉生产的焦比和产量的影响：

热风温度（℃）	变动量（℃）	影响焦比（Kg）	影响产量（%）
>1100	±100	±15	±2
1100～1000	±100	±20	±4
1000～900	±100	±25	±5
900～700	±100	±30	±6

卡式热风炉高风温特征在 2000㎥以上中大型高炉热风炉工程中表现非常突出，目前国内已经投运的大多数卡式热风炉长期运行风温达到 1200℃-1250℃，在特大高炉工程中表现更加出色，正在建设的新一代大高炉卡式热风炉在表现高风温、低投资优势方面将再创佳绩。

已经投运的中小高炉卡式热风炉在国内很多地方长期处于风温领先位置，例如昆钢玉溪 1080m³高炉卡式热风炉，2011 年投产后风温一直就稳居冠军；河南济源炉容 500m³的 3 座球式热风炉不停产改造为卡式热风炉，在风温 1200℃下已经稳定运行 5 年，吨铁煤气消耗量低于 600m³，技术指标在同级别高炉热风炉中位居前列。

7.3 小孔格子砖卡式热风炉的性价比优势让用户降低投资

卡卢金在 15 年前就开始着力研发 37 孔格子砖热风炉设计技术，推动 37 孔格子砖的应用，目前，37 孔格子砖应用中的大部分问题已经得到解决，例如：37 孔格子砖堵塞问题，目前卡式热风炉有至少超过 10 年运行经验证明采用 37 孔格子砖从未出现过堵塞情况；另外，适当提高蓄热室总重量等措施可以比较有效地避免“风温甩尾”问题；现在，国内 37 孔格子砖产品合格率已经与生产 19 孔格子砖一样，产品制造成本已经没有区别。

在综合工况一样的情况下，与使用 19 孔格子砖的顶燃式热风炉相比，使用 37 孔格子砖的顶燃式热风炉耐火材料总重量减少 15%-20%，炉壳重量减少 10%-15%，炉箅子重量减少 15%左右，热风炉高度降低 10%以上。相应地，热风炉烧炉煤气消耗量也有所降低。

参考文献：

1.《高炉热风炉 （结构 原理 工作制度）》，莫斯科冶金工业出版社 1982 年，作者：费.罗.史可里亚尔，伏.马.马尔肯，斯.普.喀什丹诺娃，亚.普.卡卢金，伏.列.索维特肯。