

早期顶燃式热风炉与现代卡卢金热风炉

----“大帽子”顶燃式热风炉的局限

作者 王长春

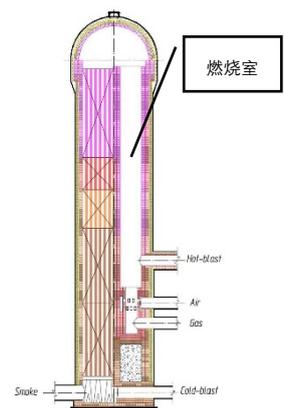
1 前言

鼓风加热是高炉炼铁工艺的一个重要参数，它决定了高炉工艺的经济性。在现代卡卢金热风炉之前的几十年的工业实践中，全世界最高水平的热风温度一直没有突破 1200°C - 1250°C ，这显示内燃式和外燃式热风炉的能力是有限的。但同时，冶炼技术进步和研究成果都表明，高炉炼铁工艺可以应用温度达 1300°C - 1400°C 的热风并具有良好的经济效益〔1〕。因此，可以认为是技术进步催生了新结构热风炉出现。

2 内燃式和外燃式热风炉及其缺陷

高炉炼铁热风炉技术的前代历史可以认为是内燃式热风炉的技术发展史，内燃式热风炉的主要特征是高大的燃烧室，并且燃烧室和蓄热室在一个炉壳里。前苏联时代工程技术人员（以卡卢金博士等主导）在上世纪七十年代对各式内燃式热风炉开展了全面的研究，发现内燃式热风炉长期的运行会突出地暴露出几方面的缺陷，主要包括：“短路”、“香蕉效应”、耐材高温蠕变、燃烧物不均匀分布、脉冲燃烧，以及温度波动容易导致耐火材料损坏等。所以，内燃式热风炉的燃烧室成为热风炉最弱的部分，限制了长期运行中的热风温度很少超过 1200°C ，且需要频繁维修。

作为当时的新结构之一，外燃式热风炉的燃烧室被放置在独立的金属壳内，消除了“短路”和“香蕉效应”两个缺点，提高了结构可靠性，但设备的成本提高30%，而且需要占用更多空间，外燃式热风炉通常在大高炉工程中应用，长期运



内燃式热风炉

行的最高风温能达到 1250℃，但同时也受到蓄热室和燃烧室两个金属壳体连接部位的可靠性限制。

总的来说, 各种带有高大燃烧室的热风炉结构已经在增加热风风温方面耗尽了潜能，

继续提高热风风温会降低使用寿命，或者增加维修费用〔1〕。



3 最初的顶燃式热风炉及第一代卡卢金热风炉

燃烧室并不是热风炉必要的基本部分，如果燃烧室被适当地移除，就可以消除带燃烧室热风炉的主要缺点。因此，早在热风炉诞生之时，冶金界就有一种取消燃烧室、在拱顶部位燃烧煤气的思想，例如 H.Schmitz, V.E.Grum-Grzhimaylo, A.N. Ramm 和许多其他技术人员，他们在很久以前就建议过这种结构。

顶燃式热风炉在结构可以分成两大基本类型：即在拱顶部布置燃烧器和在拱顶下部侧墙上布置燃烧器；顶燃式热风炉燃烧器的结构又可以分为两类：第一类是利用拱顶空间燃烧煤气的燃烧器，第二类是带预燃室的燃烧器（预燃室是指煤气空气在燃烧之前先充分混合的空腔，带预燃室的燃烧器可以彻底燃烧煤气）。

顶燃式热风炉及其研发过程详见卡卢金博士所著《顶燃式热风炉和卡卢金热风炉的研发过程》〔2〕。

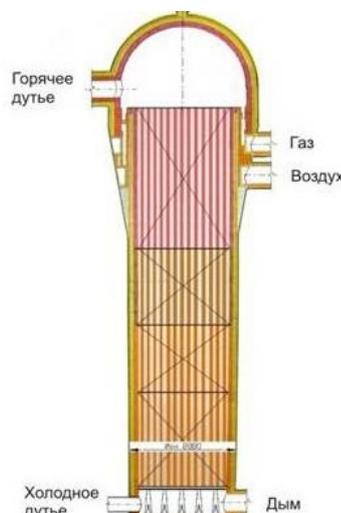
第一座实际用于高炉 (1327m³) 冶炼的顶燃式热风炉于 1979 年 12 月在首钢公司投产〔3〕〔4〕，首钢公司顶燃式热风炉在拱顶上安装了 4 个带切断阀的金属燃烧器和位



于外部的煤气和空气收集器。该炉型的主要问题是收集器和燃烧器里的空煤气分布不均匀，不能实现煤气彻底燃烧，因而容易导致拱顶砌体损坏，尤其是热风出口部位。首钢公司后来又在几座 2000m³-3000m³ 高炉工程中建设了这样结构的一些顶燃式热风炉，但在其他钢铁公司并没有大范围应用。

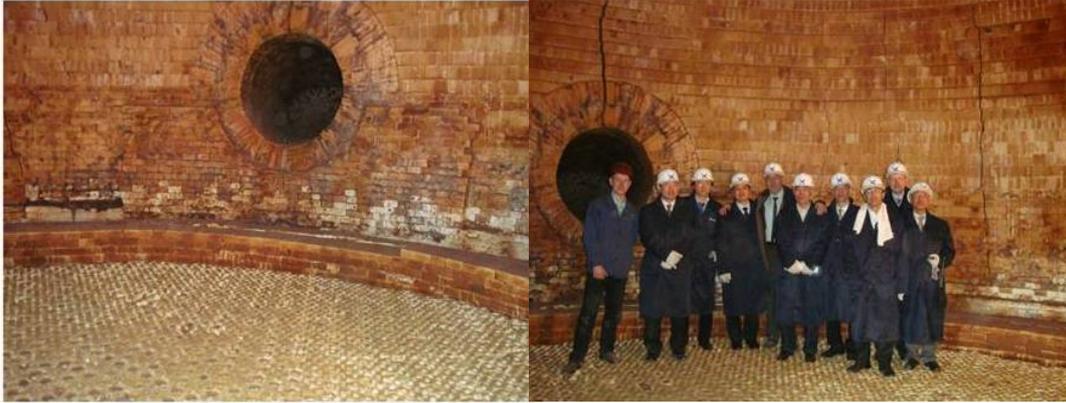
后来在国内发展的球式热风炉可以视为这种顶燃式热风炉的另外一种发展型结构，仍然在拱顶上方布置 2-3 个金属燃烧器，蓄热室是采用球形蓄热体（耐火球）和锅形炉箅子，一般用在小高炉工程上。

几乎是同期，由卡卢金博士领导的技术团队在俄罗斯下塔吉尔（Nizhny Tagil）钢铁厂设计建造了一座具有不同燃烧器形式的顶燃式热风炉（高炉炉容 1513m³），下塔吉尔顶燃式热风炉（第一代卡卢金热风炉）的拱顶采用了硅砖，在拱顶底部设置了环形预燃室，预燃室下部配置了几十个由耐火砖砌筑而成的陶瓷烧嘴。煤气和空气从炉壳下的环形收集器里供给燃烧器，在预燃室里混合后的煤气和空气可以完全燃烧，没有脉冲现象；热风炉在试生产阶段的拱顶温度是 1450℃，风温一度达到 1350℃，之后这座热风炉和其他两座普通内燃式热风炉一起，以 1200℃-1250℃风温无大修运行了 27 年，2010 年由于高炉停产被拆除。



1982 年在俄罗斯下塔吉尔钢铁厂投产的顶燃式热风炉（1500m³）的发明著作权证明，热风炉配砖图和热风炉运行照片。

这是全世界第一座配置了带有环形预燃室的陶瓷燃烧器的顶燃式热风炉，它在1200°C 风温下运行 27 年无大修并且情况良好，其运行效果显示了这种结构的顶燃式热风炉具有 30 年运行无大修的可能。



2010 年卡卢金博士陪同新日铁代表团查看第一代卡卢金顶燃式热风炉内部

卡卢金博士带领的研究团队在分别在该热风炉运行 4、10 和 16 年后，利用高炉休风进行了凉炉检查，历次的检查结果表明其状况良好。2010 年，在下塔吉尔顶燃式热风炉拆除之前，日本新日铁代表团在卡卢金博士陪同下进入到这座热风炉内部，查看了历经 27 年无大修运行后的蓄热室、拱顶、热风出口和燃烧器结构，发现所有部位均完好无损，例如，五十多个燃烧器均没有经过维修，没有采用组合砖的热风出口是完好的，没有格子砖堵塞现象等。



下塔吉尔顶燃式热风炉运行 9 年、27 年的硅质格子砖



下塔吉尔卡卢金顶燃式热风炉运行 27 年的燃烧器和格子砖

在近四十年前，顶燃式热风炉的成功运行充分验证了无燃烧室结构的设计思想的正确性，尤其是下塔吉尔顶燃式热风炉（第一代卡卢金热风炉），采用带预燃室的陶瓷燃烧器技术实现了煤气完全燃烧，因而大大提高了炉体稳定性，创造了拱顶、燃烧器、热风出口关键部位运行 27 年无维修记录。该炉型在技术上取得的突破还包括：(1) 硅质格子砖在高风温下运行 27 年无堵塞、(2) 无托梁炉箅子运行 27 年无变形损坏、(3) 使用普通耐火材料（硅砖、莫来石、粘土砖等）制成的炉体内衬可以长期耐受 1200℃ 风温等等。

4 早期顶燃式热风炉的局限

尽管第一代卡卢金热风炉的结构很成功，但是它仍然存在一些严重缺点：

(1) 无法实现对现有热风炉组中的旧热风炉进行依次改造，原因是旧热风炉的占地面积和空间不足以安放这种热风炉宽大的拱顶。这一点是促使卡卢金博士的研究团队转而继续研发在拱顶上部布置燃烧器的新结构。

(2) 带环形预燃室的五十多个陶瓷燃烧器环形布置在拱顶底部，需要很高的制造和建造水平才能保证这五十多个陶瓷燃烧器有良好的一致性，否则，因为燃烧器的燃烧强度不均会造成拱顶砌体损坏。



第一代卡卢金热风炉

(3) 宽大的拱顶结构造成热风炉材料用量较大。

(4) 热风出口位于拱顶燃烧器上方，这使得热风管道也需要架设很高。

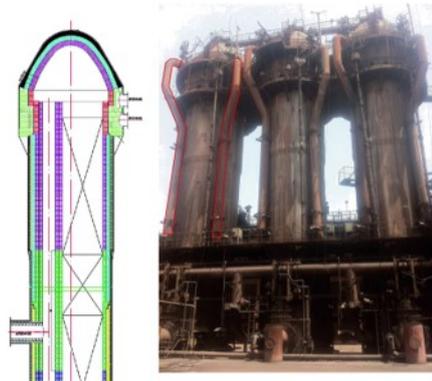
5 国内“大帽子”顶燃式热风炉

以第一代卡卢金热风炉技术为模板，国内在近十年建设了一批与之类似的顶燃式热风炉工程，在国内称之为“大帽子热风炉”（注：“大帽子”热风炉的相关技术专利已经被中国国家专利局审核无效），这可能是一种比较独特的技术多元化现象。



中国建设的“大帽子”顶燃式热风炉

一些新建“大帽子”顶燃式热风炉采用了悬链式拱顶，这种冗余设计（尤其是针对中小高炉热风炉工程）造成拱顶结构更加巨大，耗材更多。这批“大帽子”热风炉的常见问题是拱顶损坏，这与燃烧器建造质量不均有很直接的关系。



利用“大帽子”热风炉技术改造的内燃式热风炉

最近国内有一种利用“大帽子”顶燃式热风炉技术改造内燃式热风炉的工程方法（右图），就是利用内燃式热风炉的燃烧室作为顶燃式热风炉的热风管道，这种设计仅在小高炉工程里使用过，并且没有长期运行验证。在这种设计里，无论是烧炉阶段还是送风阶段，热风管道（原燃烧室）与蓄热室仍然存在巨大温差的情况，这种设计虽然可能会节省技改投资，但其炉体结构与内燃式热风炉结构并没有本质区别，长期运行时隔墙故障隐患并没有彻底消除；除此之外，受现有炉壳限制加进去的环形预燃室和燃烧器，不一定能够和顶燃式热风炉生产能力匹配，因此，不建议在大高炉工程中采用这种方法。

6 现代卡卢金热风炉与早期顶燃式热风炉对比

第一代卡卢金热风炉属于在拱顶下部侧墙布置带预燃室陶瓷燃烧器的顶燃式热风炉结构的代表，但这种炉型在投资经济性、建造技术要求等方面有发展局限，解决这些问题的途径是在拱顶上部布置新型燃烧器，同时通过发展小孔格子砖技术，在提升风温的同时降低热风炉高度。右图是 2000 年在 3000m³ 高炉热风炉维修工程中采用现代卡卢金热风炉改造内燃式热风炉的实际工程，技术改造取得了巨大成功，该热风炉运行至今无大修，显示出现代卡卢金热风炉不仅提升了风温、提高了可靠性，而且具有显著的投资经济性。

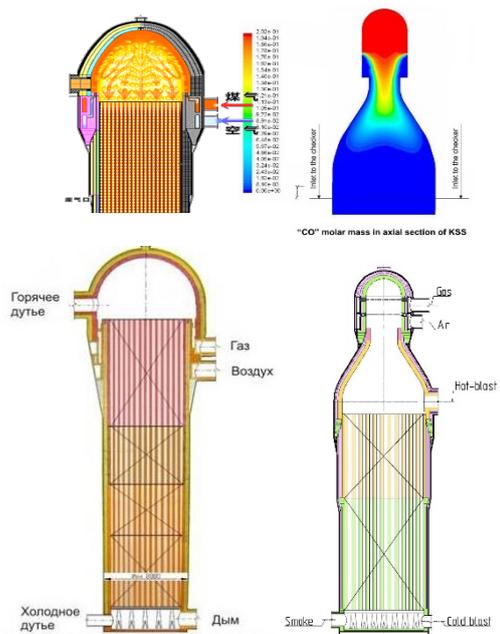


现代卡卢金热风炉与早期顶燃式热风炉对比，主要进步包括：

(1) 燃烧器结构形式和工作方式。

----第一代卡卢金热风炉（高炉炉容 1513m³）在环形预燃室下面安装五十多个小型陶瓷燃烧器，因此，每个燃烧器的建造质量差异对燃烧效果影响很大，建造难度较大。

----现代卡卢金热风炉是在拱顶上方设置了一个带空煤气涡流喷射供给系统的预燃室，相当于在拱顶上方安装了一台大功率陶瓷燃烧器，因此，相比之下，现代卡卢金热风炉燃烧器结构更为简单可靠。



(2) 燃烧器的位置从拱顶底侧移到拱顶上方，因此缩小了拱顶尺寸，降低了热风出口高

第一代卡式热风炉和现代卡式热风炉结构和燃烧效果图

度（降低到预燃室下方，位于拱顶底部）；

(3) 燃烧产物行走路线和均匀分布。

----第一代卡卢金热风炉燃烧产物（烟气）上行到拱顶再折返进蓄热室；

----现代卡卢金热风炉燃烧产物从拱顶上方进入锥形拱顶并扩散到蓄热室表面，沿蓄热室表面分布更均匀。根据德国专门机构测试，现代卡卢金热风炉燃烧产物沿蓄热室表面均匀分布的问题（不均匀度仅为 3-5%）；

(4) 材料耗量和投资

与第一代卡卢金热风炉相比，现代卡卢金热风炉整体材料耗量降低 20%-30%，因此有利于降低工程投资。

(5) 实践应用

第一代卡卢金热风炉在俄罗斯只建设了一座，而现代卡卢金热风炉具有明显的高风温、长寿命优势和良好的经济性，因此首先被应用在内燃式热风炉改造工程中并取得了成功。从 2000 年开始，现代卡卢金热风炉进入了全面的工业实践阶段，在大功率的带预燃室陶瓷燃烧器、小孔格子砖方面的成功带动大高炉顶燃式热风炉技术进入到长期高风温运行（风温 1250℃-1300℃）的新阶段；除了俄罗斯，应用市场扩大到中国、日本、印度和欧洲等；与内燃式外燃式热风炉相比，现代卡卢金热风炉的应用范围也首次扩大到高炉炉容 250m³-5580m³ 的工程中；早期建设的卡卢金热风炉已经跨越一代炉龄，大高炉（3000m³ 及以上）卡卢金热风炉最长运行时间已达 20 年，长期运行风温达到 1270℃-1280℃。

现代卡卢金热风炉自 2002 年引进中国以来，已经解决了大部分本地工程化问题，包括燃烧器和炉体内衬国产化、热风出口组合砖本地制造等，完成了 20 毫米孔径（37 孔）格子砖技术长期工业应用验证，这种格子砖已经应用在俄罗斯和中国的 5500m³ 高

炉卡卢金热风炉工程中。

7 “大帽子”顶燃式热风炉优于现代卡卢金热风炉?

近几年来，国内顶燃式热风炉技术发展具有很明显的差异化特点，尤其是由某耐火材料公司推出的“大帽子”结构热风炉应用发展很快，很多中小钢铁企业采用了这种炉型。该耐火材料公司在各种会议和报刊上宣介“大帽子”热风炉结构优于现代卡卢金热风炉，使得关于热风炉结构的技术讨论蒙上了商业化糟粕，例如，该耐火材料公司在宣介资料中经常以一些粗制滥造的工程为案例明指“悬链线拱顶结构稳定性远远优于锥形拱顶结构的稳定性，是长寿的唯一选择”等〔5〕。

事实是，“大帽子”热风炉技术来源于第一代卡卢金热风炉，增加的那种尺寸巨大的悬链式拱顶结构原本应用于大尺寸的内燃式热风炉，现在则普遍被应用于中小高炉热风炉工程。现代卡卢金热风炉则是发展自第一代卡卢金热风炉，其多方面的技术进步是显然易见的，国内部分市场接纳“大帽子”热风炉结构是一种市场行为，但应用尚不广泛，因此，现在应该做的是摒弃商业化糟粕、回归技术本身，深化工程技术应用研究。

8 小结

作为对内燃式热风炉的改进技术，40年前投产的首钢顶燃式热风炉是在拱顶安装了金属燃烧器，第一代卡卢金顶燃式热风炉在拱顶底侧安装了带预燃室的数十个陶瓷燃烧器，在1200℃风温下稳定运行27年（无大修），国内“大帽子顶燃式热风炉”脱胎于第一代卡卢金热风炉，现代卡卢金热风炉的预燃室位于拱顶上部、空煤气以涡流喷射方式在预燃室混合和燃烧。现代卡卢金热风炉2002年引进中国，已经解决了包括燃烧器和炉体内衬、组合砖国产化等问题，20毫米孔径（37孔）格子砖技术已经应用在俄罗斯和中国的5500m³高炉卡卢金热风炉工程中。

9 附录

- 〔1〕《The Shaftless Hot Stove – a Reliable Construction to Increase Blast Temperature 顶燃式热风炉--一种高温的、长寿命的热风炉结构》作者：雅科夫.卡卢金，2010年在AIST“钢铁技术协会”大会发言稿
- 〔2〕《顶燃式热风炉和卡卢金热风炉的研发过程》，作者：雅科夫.卡卢金
- 〔3〕《首钢顶燃式热风炉》，作者：高铁章，《冶金能源》1卷5期1982.9
- 〔4〕《我国大型顶燃式热风炉技术进步》，作者：张福明 刘艳波 毛庆武 倪莘
- 〔5〕《豫兴热风炉的发展与技术创新》，选自《世界金属导报》2018年第46期B02

(全文完 2020.04.10)