

与用户对话一

我们需要了解的热风炉（一）

王长春

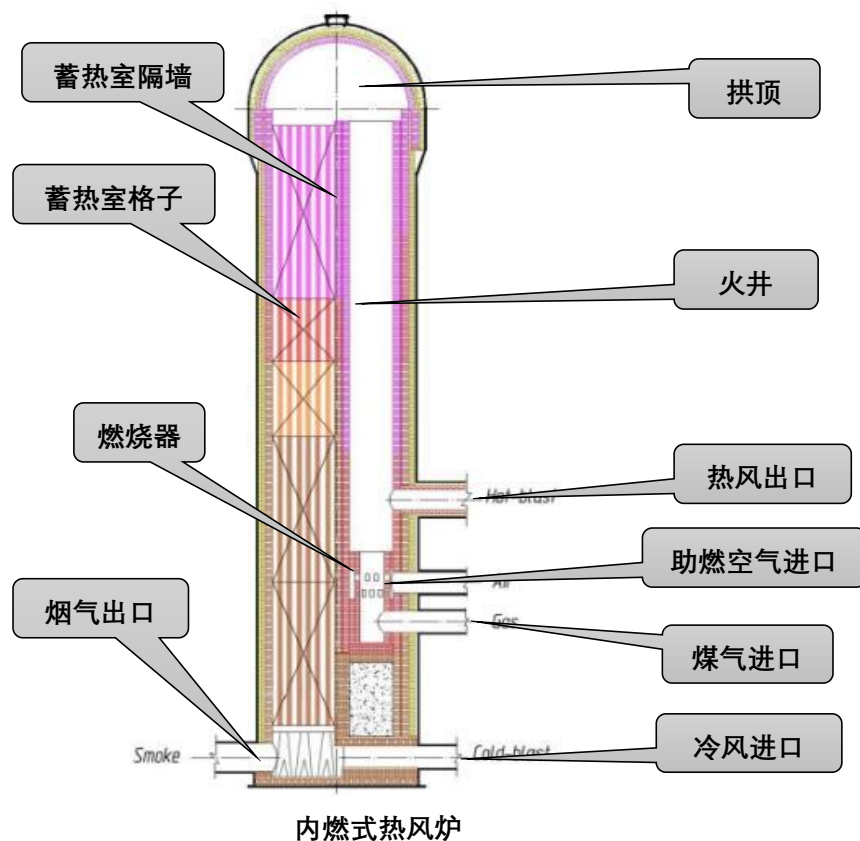
摘要

据介绍，经历 2019-2021 年钢铁产能集中置换后，国内钢铁行业的主要变化体现在①产能集中度继续提升，②高炉大型化集中提速，高炉平均容积提升至 1280m³。从小炉型、从内燃式热风炉、从球式热风炉到大高炉顶燃式热风炉，很多技术人员面临一些知识和经验问题，缺乏讨论和交流。在这里，我们尽量从铁厂用户具体使用的角度，面对铁厂热风炉技师，对顶燃式热风炉从技术方面开展一些讨论，抛砖引玉，重点讨论新技术新工艺的适用性和工程经验。

1、 关于热风炉的结构形式

（1） 顶燃式热风炉是为改进内燃式热风炉而生

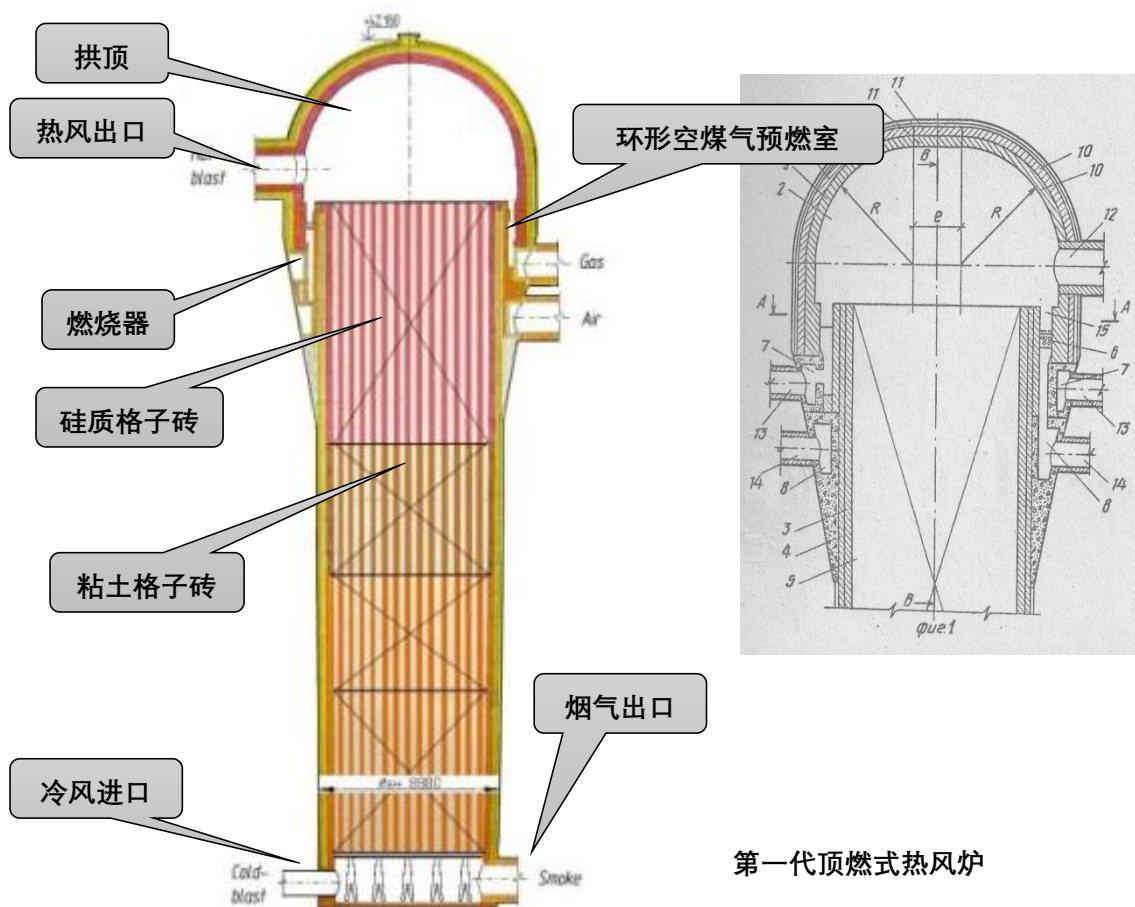
至少在前苏联是这种情况，在前苏联的钢铁企业里 90%以上的高炉热风炉都是内燃式结构，这些热风炉普遍存在风温低、故障频发的问题。根据研究，影响其稳定运行的主要原因，是内燃式热风炉结构特有的、和格子砖在同一炉壳里的竖直火井（如下图所述），在实际运行中表现在火井掉砖、隔墙裂缝甚至坍塌、风温降低等典型事故。



国内目前还存留有多座大高炉内燃式热风炉，依靠早期建造热风炉采用高标准和优质材料的优势，尤其是加上严格控制风温，很多内燃式热风炉已经运行多年甚至2代炉龄，少数内燃式热风炉进行了翻新重建。

值得注意的是，翻新重建的内燃式热风炉，使用寿命预期不会超过前代，相比早期建设的内燃式热风炉，翻新重建后使用寿命会大幅度缩减，风温也不会很高。

既然内燃式热风炉的问题集中在火井，那么，无论是哪种形式的内燃式热风炉，都无法彻底消除来自火井的事故隐患，这只是内燃式热风炉必须技改的原因之一；在当今形势下，提温降本 是钢企技术提升的必由之路，风温目标是 1200°C – 1220°C ，这是内燃式热风炉达不到的。



第一代顶燃式热风炉

顶燃式热风炉发明的目标就是彻底解决这类问题，采用的基本原理是①取消炉壳内部的火井。因此拆除隔墙，蓄热室改成为完整的圆筒形蓄热室；②将火井下部的燃烧器移到蓄热室上方。

根据上述原理，首先，在蓄热室炉壳高度和炉壳内径不变时，蓄热室可以装填更多的格子砖，增加了热风炉换热面积；其次，在拱顶下部、蓄热室外环设置了带预混功能的多组陶瓷燃烧器（如上图所示），由于这种设计，热风出口也同时搬移到拱顶，位于拱顶下方、燃烧器上部。

在此之前，国内和欧洲也有类似的顶燃式热风炉结构，但都是在拱顶上布置金属燃烧器，而当时则是首次在顶燃式热风炉上采用耐火砖砌筑结构的陶瓷燃烧器。

按照这样的设计，前苏联冶金设计研究院在下塔吉尔钢铁厂建设了

全世界第 1 座带陶瓷燃烧器的顶燃式热风炉（如图，高炉炉容 1500m³，蓄热室高温区使用了硅质格子砖）。



在这座热风炉上，在拱顶底部创新地设置了一个 1 米高的环形预燃室，空煤气先预混再燃烧，从而保证煤气完全燃烧（并且是低氮燃烧）。环形预燃室的底部安装有 53 组小型陶瓷燃烧器喷嘴，环形的煤气和空气收集器也在于炉壳内，因此，相对于内燃式热风炉的拱顶，这种顶燃式热风炉的拱顶尺寸更大（内径更大）。

这座热风炉在内衬设计方面还有很多创新，比如对蓄热室温度进行了详细计算，在高温区使用了硅质格子砖，格子砖下部使用了“无托梁独立支撑炉箄子”等。

这座热风炉从 1982 年投产到 2010 年停炉拆除，（内衬）无大修稳定运行了 28 年，风温 $\geq 1200^{\circ}\text{C}$ ，真正开启了顶燃式热风炉时代。但是，这种炉型只建造了一座，因为其拱顶尺寸太大，在两座内燃式热风炉之间放不下这种炉型，不能适应内燃式热风炉改造要求。

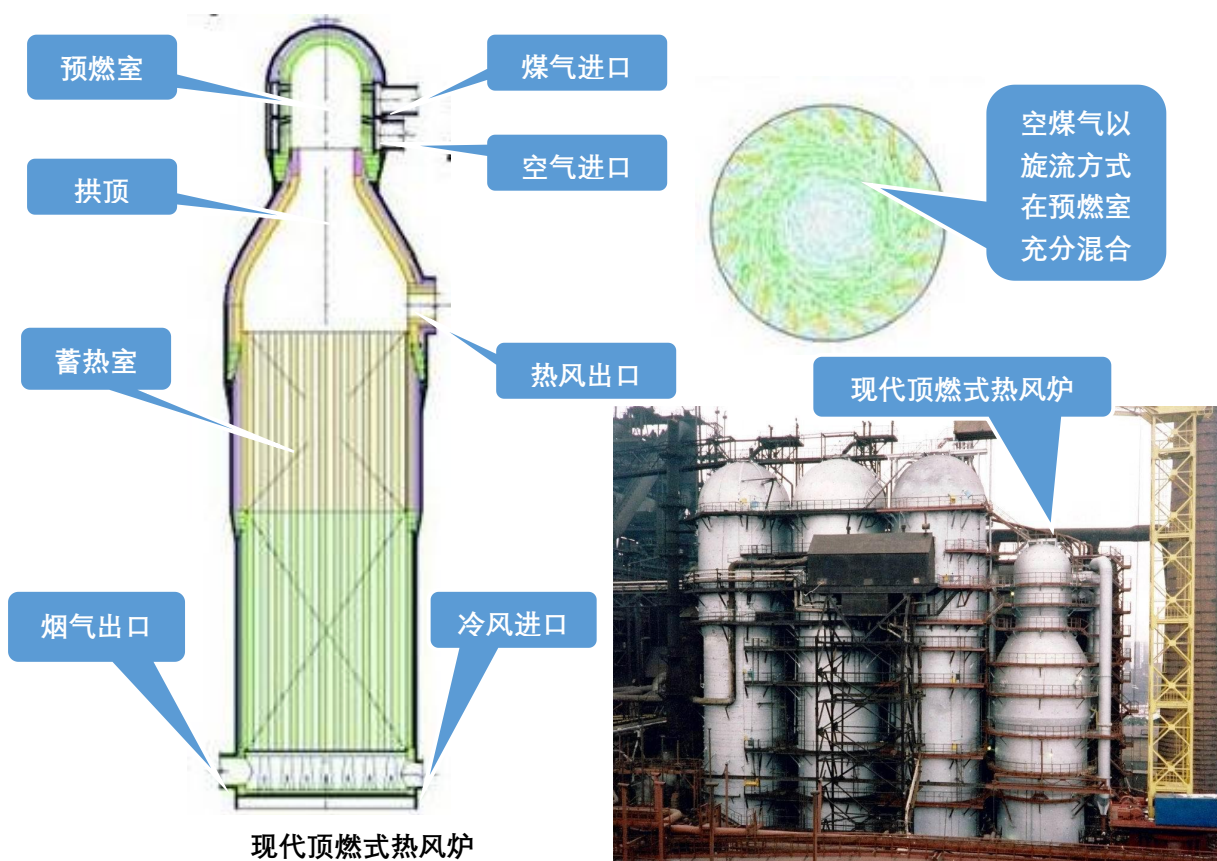
从前苏联到俄罗斯，顶燃式热风炉随之进入到现代顶燃式热风炉时代，也就是目前国内最常见的所谓“小帽子”顶燃式热风炉结构。

(2) 现代顶燃式热风炉的结构特征

既然第一代顶燃式热风炉已经取得成功，为什么还要发展现代顶燃式热风炉？现代顶燃式热风炉有哪些改进和技术特征呢？

首先，这座热风炉虽然运行成功，验证了“取消火井、顶置燃烧器”结构原理的合理性，以及无大修寿命 30 年的可靠性，但也有其明显不足。**其一**是拱顶尺寸大，因此占地空间也大。前苏联和俄罗斯的热风炉技术需求首先是改造，但这座热风炉不能应用于内燃式热风炉改造，因为现有内燃式热风炉之间放不下这么大尺寸的炉型；**其次**是这座热风炉总共安装了 53 组空煤气喷嘴，要保证这些喷嘴的燃烧强度具有一致性，在建造方面难度很大（这座热风炉的建设时间长达 2 年）。如果这些喷嘴燃烧强度不一致，就会出现个别喷嘴不燃烧（不着火）或者频繁断焰的情况，影响燃烧一致性效果。

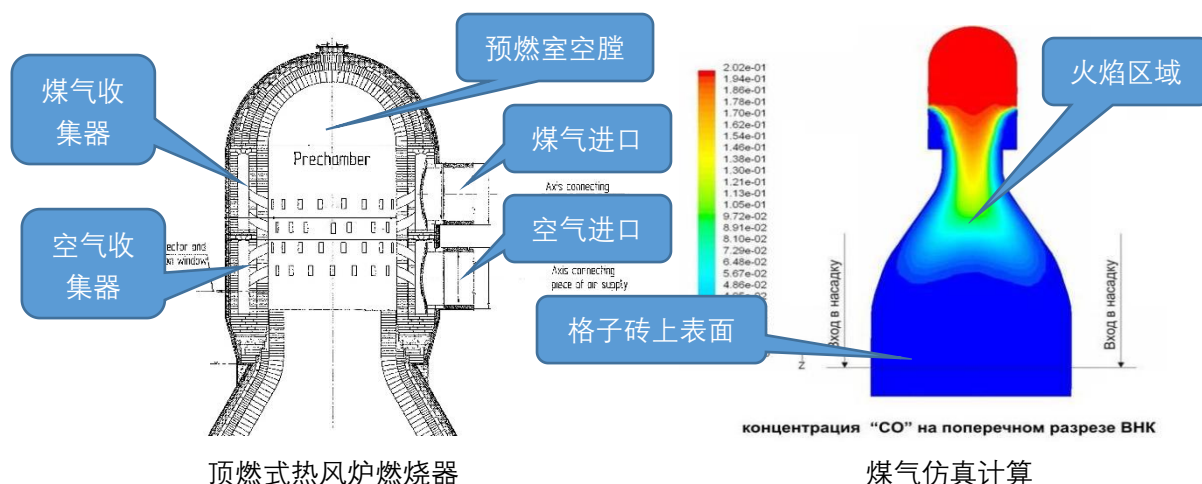
为了改进这座热风炉的结构不足，适应内燃式热风炉改造需求，卡卢金发明了现代顶燃式热风炉，并且持续发展了 30 年（如图示）。



从所示图片（俄罗斯新利佩茨克 3000m³ 高炉卡卢金热风炉，2000 年投产）可以看出，现代顶燃式热风炉具有明显的低投资优势。

与第一代陶瓷燃烧器顶燃式热风炉相比，现代顶燃式热风炉在炉型和燃烧器结构方面做了重大改进：

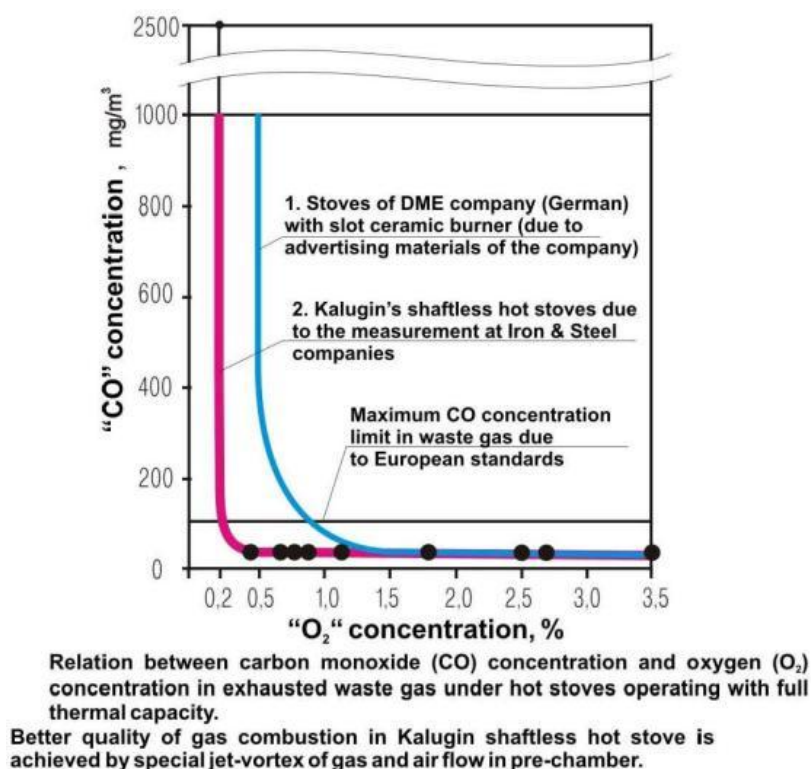
- ① 首先是把原来位于拱顶下部、环绕蓄热室的燃烧器移到拱顶上方，这就大大缩小了拱顶尺寸，进一步降低了材料用量；
- ② 其次，燃烧器结构由多个小型燃烧器合并成一个“带预混功能的大功率多孔燃烧器”，从而大幅度缩小了燃烧器尺寸，使得新型燃烧器可以放置在拱顶上方。
- ③ 这种先进燃烧器的结构特点和燃烧过程是：上下布置煤气和空气环形收集器，煤气向下以旋流形式喷射进预燃室，形成的煤气涡流与向上直喷的空气充分混合，混合气流向下经喉口位置高温耐火砖加热引燃，燃烧火焰在格子砖上部结束，燃烧产物（烟气）沿格子砖上表面分布均匀。



- ④ 在 30 年发展过程中，这种先进的燃烧器结构也在不断优化改进。实现了高炉炉容 250m³ 到 5580m³ 全覆盖，尤其是在进行大高炉热风炉设

计时，燃烧器完成了重大结构优化。例如，废气里 CO 和残氧含量是热风炉煤气完全燃烧的检验指标，也是热风炉自动烧炉控制的基本参数。根据对国内大高炉卡卢金热风炉用户、以及日本和捷克用户使用情况连续检测结果，卡卢金原创设计的热风炉达到了煤气完全燃烧的目标，满足国内标准、日本标准和欧洲标准。

为验证这种新型燃烧器的燃烧效果，卡卢金公司与德国“EKO-Stahl”公司协同进行了燃烧烟气成分测量工作，结果表明：在 0.3~5.1% 的范围内调节 O₂ 氧浓度时，燃烧烟气中 CO 浓度可以维持很低的波动范围（0.0016%，20mg/m³）。如下图。



(3) 总结，两种顶燃式热风炉的结构区别

国外建设运行的卡卢金顶燃式热风炉，都是现代顶燃式热风炉结构；国内目前常见的顶燃式热风炉，大体上是上述两种结构形式。综上所述：

➤ 顶燃式热风炉（指带耐火砖砌筑的陶瓷燃烧器的顶燃式热风炉）是

为改造内燃式热风炉而研发。

1982 年投产的首座顶燃式热风炉（第一代顶燃式热风炉），充分验证了没有火井的热风炉可以实现更高风温、更长（无大修）寿命。这座热风炉同时还验证了硅质格子砖长寿无堵塞、无托梁炉算子在废气温度 450°C 下可长期工作，解决了热风炉内衬长寿、提高风温（长期风温 $\geq 1200^{\circ}\text{C}$ – 1220°C ）等技术问题。

➤ 现代顶燃式热风炉是在第一代顶燃式热风炉基础上进行了优化改进

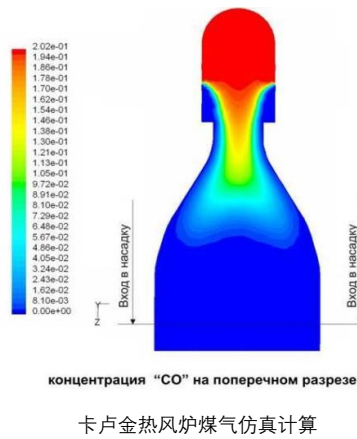
优化改进内容包括：①在结构上缩减了拱顶尺寸，实现了内燃式热风炉改造目标。②发明了一种尺寸更小、可以安装在拱顶上方、带预燃室、空煤气以旋流喷射方式形成涡流充分混合的大功率陶瓷燃烧器结构。

➤ 现代顶燃式热风炉燃烧器是这种炉型稳定运行的关键

材料标准：全部采用一种抗热震耐火砖砌筑（热震性能水冷 ≥ 70 – 100 次），在结构设计上最大程度消除燃烧器砌筑结构热应力。在俄罗斯，卡卢金热风炉最长运行时间已经超过 20 年，国内卡卢金原创设计的热风炉最长运行时间已经超过 15 年。

2、 关于顶燃式热风炉燃烧器技术性能的一些问题

（1）现代顶燃式热风炉不存在“燃爆”问题。



卡卢金顶燃式热风炉燃烧器整体采用高抗
热震耐火砖，运行 11 年燃烧器完好



某顶燃式热风炉，因为燃烧器材料缺陷和
建造质量缺陷导致喷嘴砖破损脱落

从左边这幅煤气仿真计算图上可以看出，预燃室没有火焰，实际操作中（从预燃室球顶测温计读数）也显示这个区域温度较低，烧炉期间温度一般不超过 500°C ，送风期间一般不超过 900°C 。

中间照片展示了现代顶燃式热风炉燃烧器运行 11 年后完好无损的情况，燃烧器整体采用了高抗热震耐火砖。随着目前耐火材料制造技术的提高，卡卢金热风炉燃烧器已经形成完整的耐火砖材料和砌筑标准。

那么，右边这幅照片能说明什么问题呢？是指顶燃式热风炉燃烧器的缺陷吗？很显然这是谬误！实际上，这种情况是因为耐火砖材料和建造质量存在严重缺陷导致的喷嘴砖破损脱落。为了降低成本或竞标需要，有一些设计是将空煤气环道甚至预燃室墙砖都改成了所谓“红柱石”甚至是粘土耐火砖，同时又简化了砌筑标准，这种简化设计隐患很大，其理由是认为空煤气温度低、燃烧器整体改造温度低。但这种简化设计是缺乏工程经验支撑的（后文会介绍这种简化设计造成的塌砖事故）。

对于顶燃式热风炉燃烧器来说，虽然空煤气环道里的气流温度较低，但因为燃烧器在烧炉和送风期间温差较大，会在燃烧器整体结构里产生复杂的交变热应力。因此，采用具有较高抗热震能力的耐火砖，整体采

用同一材质、同涨同缩，是降低直至消除热应力的最好方式。

(2) 废气里 CO 含量过高是什么原因？

正常情况下顶燃式热风炉废气里 CO 含量不会超过 $10\text{--}50\text{mg}/\text{m}^3$ ，异常情况则表现为废气里 CO 含量超过 $100\text{--}200\text{mg}/\text{m}^3$ ，有时甚至会达到 $1000\text{mg}/\text{m}^3$ 以上。

废气里 CO 含量超常波动或者严重超标都是在烧炉期，所以需要从燃烧器找原因，包括结构设计、材料和建造三方面。

可以把 CO 外溢分为两种类型：第一类是废气里 CO 含量不超过 $500\text{mg}/\text{m}^3$ ，这时则首先要检查煤气燃烧参数，分析是否存在煤气不能完全燃烧的情况；第二类是 CO 含量在 $500\text{mg}/\text{m}^3$ 以上甚至更高，那么，仅仅是空煤气配比不合适的因素是不可能导致这么多煤气外溢的。可能的事故原因包括：

➤ 如果是“大帽子”顶燃式热风炉：需要检查是不是有个别喷嘴存在没有着火或者经常断焰的情况。常规“大帽子”热风炉基本上都是一根煤气支管，环绕拱顶的各个煤气喷嘴的参数差异较大，煤气压力波动较大的时候，远离支管进口的喷嘴就容易出现断焰；

另外一种情况就是拱顶局部掉砖，部分喷嘴被碎砖堵塞导致断焰。这就和内燃式热风炉出现废气 CO 超标的主要原因一样，内燃式热风炉火井掉砖会堵塞燃烧器，导致煤气外溢，这也是判断内燃式热风炉故障原因的一种方法。

➤ 如果是现代顶燃式热风炉（非卡卢金设计）：即使出现上述预燃室喷

嘴砖脱落的情况，碎砖会落在拱顶下部的格子砖上，结果是煤气喷口扩大、煤气输入参数出现大范围波动，但只要输入足够的空气，最终大部分煤气在进入拱顶时都会燃烧，不太会出现大量煤气外溢情况。当然，出现喷嘴砖破损情况也是一种严重事故，会导致空煤气不能完全混合、格子砖堵塞等，结果是拱顶温度烧不上去，风温降低。

（未完待续）

2022-01-10