与专家对话—

关于《对高炉顶燃式热风炉的几点认识》一文的讨论

王长春

引用原文：X 卡氏炉热风出口上部锥形段结构及与水平夹角讨论

近年热风炉锥形段钢壳开裂、锥形段掉砖，予燃室坍塌时有发生，锥形段钢壳与水平夹角太小，支撑受力不佳等有关，它不同于外燃式的球形穹顶和内燃式的悬链式穹顶，这两种穹顶的砖衬是座落钢壳上后， 再闭环连接的，就象拱桥能拱住靠得是砖与砖之间相挤的摩擦力，而卡氏炉的锥形段上部不是闭环的，砖衬是自由上涨的，要想稳住这一结构，其钢壳及耐材与水平夹角不能太小，当前这种 60 度左右，砖体稳定性差，建议应在 65-70 度之间。再者角度大一点高度有一定增加，带来燃烧空间增大，有利充分燃烧与烟气分布。

1、 关于卡卢金热风炉锥形拱顶结构

讨论意见：

首先，锥形拱顶采用 60°角是一种非常可靠、稳定性很高的优化承压结构，这是理论加实践验证的科学结论，无需争议；

顶燃式热风炉的典型特征之一就是预燃室在拱顶上方，因此，拱顶结构兼具承载预燃室载荷又具有燃烧室功能。

拱顶上部的预燃室通过托圈将内衬载荷（耐火砖重量）传递到拱顶钢结构上，换句话说，预燃室耐火砖载荷根本不会直接作用在拱顶内衬上；同时，拱顶也是通过托圈将内衬载荷传递到直筒形的蓄热室钢结构上，对蓄热室大墙内衬也没有任何影响，这是一种教科书般的标准设计。

除了承载功能，具有该夹角的锥形拱顶还兼具合理的火焰喷射通道和引导高温烟气均匀分布的功能，这也是顶燃式热风炉拱顶的结构设计原则之一，这是经过反复计算得到的最优结构。

那么，顶燃式热风炉拱顶是不是需要采用悬链式或者加大夹角呢？从综合效果来看，那样不仅会增高炉体尺寸增加投资，同时也影响燃烧效

果。可以说，悬链式拱顶并不是顶燃式热风炉的最佳选择，对于卡卢金顶燃式热风炉来说，甚至根本就不是选择项。

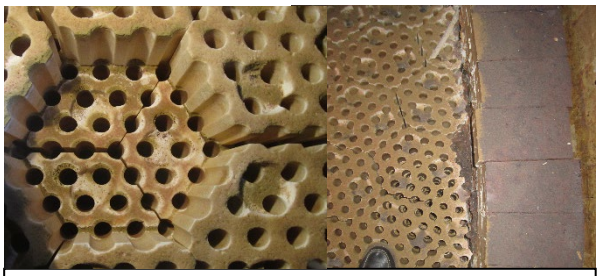
2、 关于燃烧器的燃烧工况。

引用原文：“卡氏炉……，不属于短焰或无焰燃烧，在格砖柱中还要产生燃烧，缩短火焰长度和适当扩大燃烧空间都极为重要的。”

讨论意见：

文中上述观点表述既不严谨也不正确，这里逐一分析辨明：

（1） 济南钢铁 1750m³ 高炉（1#、2#、3#高炉）卡卢金热风炉运行 10-12 年后停产（2016 年工厂关闭），可见其格子砖表面如新（如附图），这足以让“火焰烧到格子砖”的说法不攻自破。



济南钢铁 2 高炉（1750m3）卡卢金热风炉 2006 年投产 2016 年关停，可见上层格子砖完好无损。

（2） 我们从不参与卡卢金热风炉是不是“短焰燃烧或长焰燃烧”的讨论。卡卢金热风炉燃烧器的核心特征是空煤气预先充分混合后再燃烧，根据研究，当煤气与空气充分混合、煤气完全燃烧的时候，其火焰形态与计算模型是吻合的。

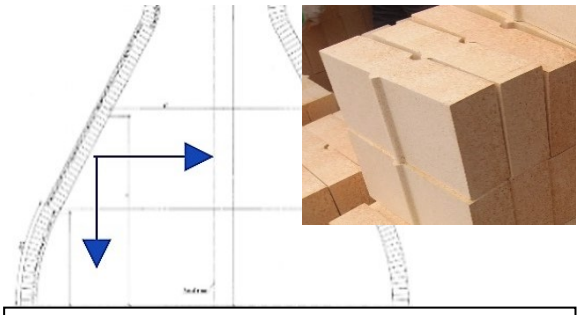
（3） 卡卢金不认为增大燃烧空间是必然合理的选项，拱顶结构的一项重要作用是保证烟气沿格子砖分布均匀，现在的结构则是最优的。

3、 关于热风炉内衬设计和砌筑。

引用原文：“卡氏炉的锥形段上部不是闭环的，砖衬是自由上涨的”

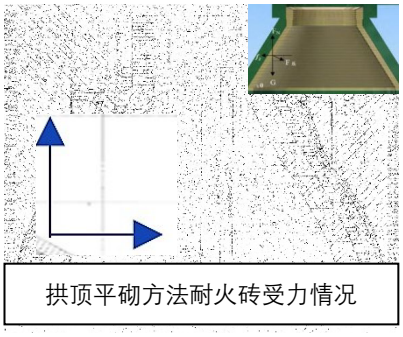
讨论意见：

关于热风炉拱顶砌体，因为文章作者不了解卡式热风炉砌筑设计原理，所以才有此说。



附图　卡卢金热风炉锥形段耐火砖受力示意图，楔形砖膨胀的过程中会更加紧凑，锥形段耐火砖重量坐落在炉壳上。

卡卢金热风炉的拱顶采用楔形带锁扣的耐火砖，采用“立砌”方法砌筑，因此每块楔形砖都同时有两个受力方向，即向热风炉中心和向下，当耐火砖受热膨胀的时候，耐火砖被挤向热风炉中心和向下（而不是向上）的方向，并且越挤越紧，从而形成稳定的拱顶结构，不存在拱顶耐火砖自由上涨的情况。

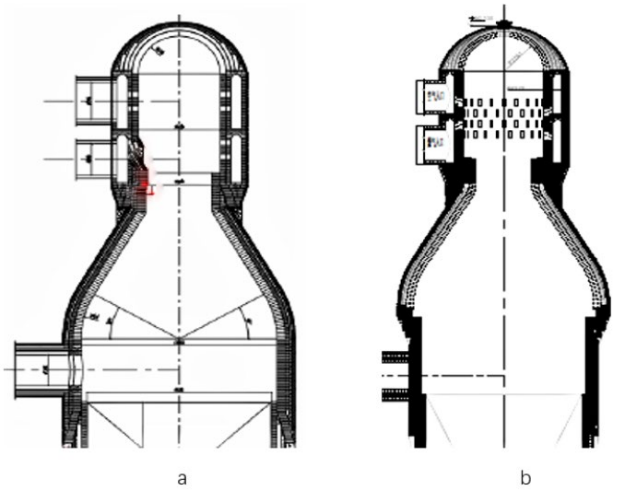


拱顶平砌方法耐火砖受力情况

补充说明一点，近来有个别耐材厂宣传拱顶采用平砌方法，这是一种不安全的拱顶砌筑方式。早期卡卢金热风炉也有过采用拱顶平砌工艺的工程（右图），但最终发现很难避免拱顶耐火砖塌损故障。从拱顶耐火砖受力情况就可以看出，每层拱顶耐火砖的膨胀方向是向上和向拱顶中心，因为每层耐火砖尺寸存在偏差，就容易导致每层耐火砖各自向上膨胀，容易导致砌体损坏。一些耐材厂宣称采用“立砌”方式的拱顶平均使用寿命为4-5 年，是缺乏合理数据支撑的，目前欧洲如西门子等设计的热风炉拱顶砌筑方式都采用“立砌”方式。

4、　关于顶燃式热风炉“四段式”结构。

引用原文：“锥形段耐材重量不应座在热风炉的大墙上，当前这类热风炉燃烧室的锥形段砖衬重力都坐落在热风出口段的大墙上（见图 1 中 a），热风炉大墙是随燃烧和送风周期性上下移动的，同样带动锥形段砖衬移动，该部位砖本身也是不受限制的上下膨胀，迭加起来很不稳定。同时影响热风出口处砖衬不稳定。是造成锥 形段掉砖、开裂，热风出口串风和高温下壳体开裂主要原因。如果将锥形段炉壳外扩一些（再增加一个 S 段），用牛腿方式将这部分的重力支撑在钢壳上，再采用迷宫方式优化砌筑，这部分砌体就稳定了(见图 1b)。”



讨论意见：

(1) 原文引用附图显然是采用了错误的比例，实际上，右图才是所谓的“四段式”热风炉，“四段式”热风炉不仅拱顶直径加大，而且炉体高度增加，材料用量剧增。


“四段式”热风炉与常规顶燃式热风炉

(2) 引用原文“热风出口坐落在拱顶底部是热风出口砌体不安全原因”原文论点是不成立的。

参照卡卢金热风炉热风出口组合砖的图纸（附图）就可以很容易理解到：热风出口上部的拱

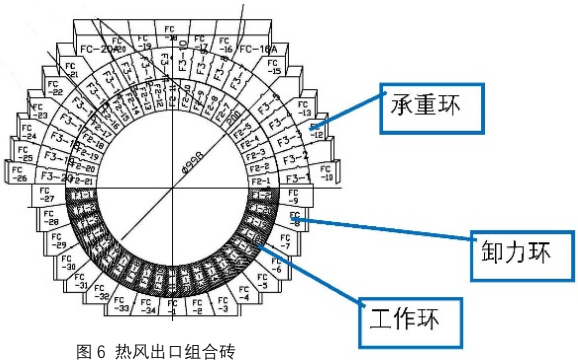


图 6 热风出口组合砖

顶大墙砖的载荷通过外环“承重环”、中间环“卸力环”都已经转移到下部大墙，实际上：热风出口工作环（“内环转”）是不承重的。补充说明：这也是教科书般的欧洲标准设计，如达涅利、PW 都是采用这种设计。

发生热风出口内衬掉砖的原因是综合性的，关键原因是材料、施工、钢结构等，不在本文赘述。

（3） “四段式”热风炉标新立异般的“创新”并不意味着一定是合理的。比如，“四段式”热风炉拱顶加高加粗，燃烧室空间阶梯式增大，这可能会影响烟气分布；其次，“四段式热风炉”增加了砌筑复杂性（多了一组“迷宫”），增加投资。因此，当热风出口内衬并不存在必然故障的设计缺陷时，“四段式”不仅不是必要的，甚至是多余的。

（4） 国内热风出口砌体的稳定性问题更多是与材料、施工质量有关，这是不可回避的问题。举例：俄罗斯没有使用组合砖的热风出口稳定运行 28 年后，仍然安全无恙（如附图），事实上很多工程案例已经证明，在拱顶底部设置热风出口，不存在任何的结构不安全问题。



5、预燃室结构与燃烧喷嘴结构

引用原文：“众多卡氏顶燃式热风炉的预燃室都是煤气分配环道和喷嘴在顶部，助燃空气环道及喷嘴在其下方，也就是分层喷嘴布置，从实际运行的结果看这种燃烧器是长焰燃烧，空、煤气混合是不好的，时有燃烧脉动和爆震燃烧发生，极易损坏喷嘴，有资料指出几乎所有的此类煤气喷嘴都出现了损坏，同时这种燃烧产生的烟气中含氮氧化物也高，

因其氧过剩系数高（1.1-1.2)。

内燃和外燃式热风炉燃烧器，其空、煤气出口是在同一标高上，采用交叉喷嘴气流成一定的角度喷出，混合得好，与之不同的是火焰向上。……”

讨论意见：

原文谬误之处，须加以分析和澄清。

（1） 在卡卢金热风炉技术专利尚在有效期内的情况下，原文里提及“众多卡式顶燃式热风炉~~”云云，已经不是专家的公允态度。但原文里也提及国内存在众多仿冒技术，因此可认为原文提及的“有资料指出几乎所有的此类煤气喷嘴都出现了损坏，同时这种燃烧产生的烟气中含氮氧化物也高，因其氧过剩系数高（1.1-1.2)”皆属于仿冒技术，所以不值赘论。

（2） 原文把内燃式、外燃式热风炉燃烧器比之优于顶燃式热风炉的带空煤气预混结构的燃烧器，属于一家之言，缺乏公开数据支撑。原文作者当然也有权为某些厂家技术做宣传，国内外现在还有多种结构形式的高炉热风炉在运行，这也说明各种技术路线之争远未结束，尚需要长期运行经验加以佐证辨析。

单就燃烧器结构而言，顶燃式热风炉燃烧器是一种空煤气先预混再燃烧的设计结构，空煤气预混越好，则燃烧效果也越好，因此这本身就是一种典型的“低氮燃烧器”结构。以国内 4350m^3 高炉卡卢金热风炉运行情况看，即使长期拱顶温度是 1420℃，在线检测的氮氧化物排放量最多也只是 80-100mg/m^3，因此顶燃式热风炉的用户完全无需为氮氧化物排放超标担忧。

6 重质硅砖

引用原文：……..为保证热容量足够，建议硅质格子砖柱不能设置得太高，根据炉容大

小不同选取 6-10m 砖柱高度为宜。

讨论意见：

把工程中的经验量化是一种常用的方法，但是设计热风炉高温区硅砖高度的时候不宜这样做。

针对高铝材质蓄热体格孔经常被高炉煤气粉尘渣化堵塞问题，国外很多年前就已经开始了研究，并且尝试用多种材料替代高铝格子砖（比如镁橄榄石等），最终依靠长期工程经验佐证了采用普通硅质材料的格子砖可以避免格孔被渣化堵塞，实际上，高风温热风炉采用硅砖逐渐取代高铝砖是一个严谨求证的技术发展过程。

蓄热室硅质格子砖高度不能以经验取舍，硅砖高度取决于硅砖下界面温度，这个温度值应保证下部高铝格子砖长期安全不堵塞，也要保证避免硅砖温度过低导致损坏，因此，硅砖高度应该通过严谨的计算确定下来。

7 结束语

我们对作者长期为国内热风炉技术发展潜心竭力、研究实践的工作精神深表敬佩，赞赏公允的技术争论争鸣。

顶燃式热风炉技术进入中国已经超过 20 年，最早应用在 750m^3 高炉上，现在已经应用在 5500m^3 高炉工程中。与早期建设、仍在运行的卡卢金热风炉相比，新投运的热风炉在炉体外观上并没有区别，以至于用户很难做技术分辨（哪些是卡卢金原创技术哪些是其它技术），外形差异最大的要属一种技术源自俄罗斯早期的大拱顶热风炉结构（国家专利局结论）。

2019-2021 年新投运的卡卢金热风炉，技术变革体现在炉体长寿技术（燃烧器耐火砖抗热震性能 100 次，热风出口三环式组合砖等）、小孔格子砖技术（20

毫米孔径格子砖技术)、热风管道与围管等标高（“U”形热风支管技术）....等等，我们认为，热风炉技术在高风温、低故障、低投资方面已经达到新的高度。

而恰在此时，高炉炼铁工艺技术即将转型进入一个全新的发展阶段。“新阶段”的典型特征是在“双碳”政策引导下降低碳排放、降低能耗、超低排放。但我们放眼望去，国内顶燃式热风炉技术早已偏向，在“自我标榜”的道路上带着惯性一路狂奔，趋向于越建越大。

“新阶段”对热风炉的要求是什么？比如：从“减碳”的要求出发，富氧烧炉如何安全高效运行？在高炉降低负荷运行时，热风炉如何降低能耗？在智慧炼铁、大数据管理的潮流中，热风炉如何通过全自动运行降低故障、降低能耗？

毫无疑问，“新阶段”将带来大刀阔斧式的变革，技术创新将再次、并且以更快的速度淘汰“陈旧落后”。但是，技术创新首先来自思想先进，我们是不是应该先自审自查：哪些“标新立异”其实是属于“陈旧落后”？

全文完。