

顶燃式热风炉不是越高越好

作者 王长春

1. 前言

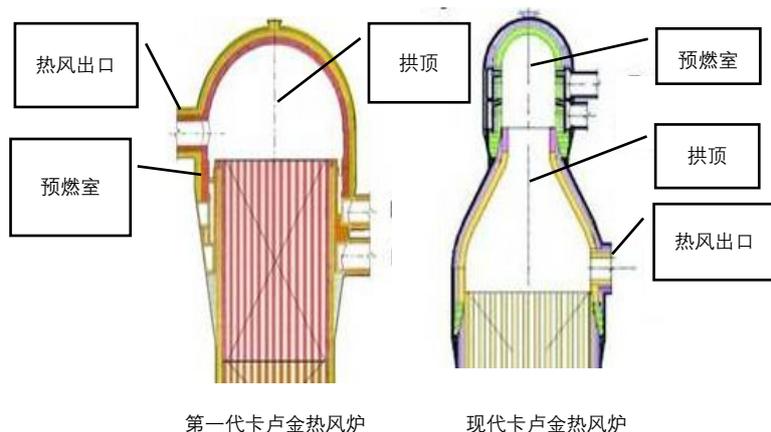
近二十年来，国内高炉炼铁技术有了长足发展，这其中也包括顶燃式热风炉技术的广泛应用，越来越多的用户已经了解到顶燃式热风炉具有风温高、投资低的优势。

但是，国内顶燃式热风炉技术差异化的特征是比较明显的。我们注意到近几年出现的一种创新结构并被大力宣传：即在现有热风炉结构基础上增加一个独立膨胀段用于安装热风出口。这种创新结构将使得热风炉高度增加、拱顶直径增大，会增加投资，热风炉会越建越高。因为这种研发思路与现代顶燃式热风炉技术发展初衷完全不同，值得我们加以深究和论证，去除其中的商业化糟粕，明确顶燃式热风炉结构设计的基本原则。

2. 卡卢金顶燃式热风炉的基本特征是高风温、长寿命、低投资

追溯到五六十年前顶燃式热风炉的研发初期，当时的顶燃式热风炉在结构分成两

大基本类型：即在拱顶上部布置燃烧器和在拱顶下部侧墙上布置燃烧器（第一代卡卢金热风炉）；在此基础上，后续得到广泛应用的现代卡卢金顶燃式热风炉采



用在拱顶上部布置采用带预燃室的陶瓷燃烧器的方式，预燃室具有煤气空气在燃烧之前充分混合的空腔，充分混合后的空煤气可以实现煤气完全燃烧〔1〕。

热风炉工程设计的基本原则和先进性特征是“结构可靠、制造简便、去繁从简、去难从易、降低投资、创造效益”，从而能够得到广泛且长期应用。

第一代卡卢金热风炉运行 27 年 (1982-2010)，验证了采用普通耐火材料 (硅砖、莫来石砖、粘土砖) 就可以在高风温下长期运行，现代卡卢金热风炉则更是从多方面验证了顶燃式热风炉具有低投资优势。在运行的现代卡卢金热风炉最长运行时间已经达到 22 年 (俄罗斯马格尼钢铁厂 1#高炉，炉容 1400m³，卡卢金热风炉组 1998-2020)，俄罗斯北方钢厂 5580m³ 高炉在 2011 年热风炉改



造工程中就采用了卡卢金 20 毫米孔径 (37 孔) 格子砖热风炉，耐火材料用量降低 50% (相比原外燃式热风炉)。

卡卢金热风炉技术发展路线是**结构可靠、提高风温**和**降低投资**，以国内特大高炉卡卢金热风炉为例，2009 年投产的国内第 1 座 5500m³ 高炉卡卢金热风炉高度近 50 米；2019 年投产的国内第 3 座 5500m³ 高炉卡卢金热风炉高度不足 44 米，但热风炉供热能力整体提高 13%。

3. 带“热风出口独立膨胀段”热风炉概念的提出

(1) 何谓“热风出口独立膨胀段”热风炉？

带“热风出口独立膨胀段”热风炉概念或许起源于几年前某次的热风炉维修工程。据国内公开报道：河北某钢厂对一座 2000m³ 级别高炉顶燃式热风炉 (非卡卢金设计) 拱顶坍塌进行了故障维修工程，维修工程采用了带“热风出口独立膨胀段”热风炉的概念〔2〕，简而言之就是将热风出口移出拱顶，在拱顶段下部单独设立一个用于安装热风出口的独立膨胀的砌体段。

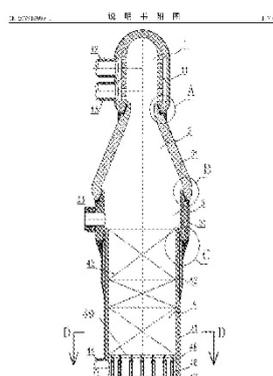
带“热风出口独立膨胀段”结构是针对现有的顶燃式热风炉的“三段式”结构发展而来，所谓“三段式”热风炉内衬是业内对常规顶燃式热风炉内衬设计概念的一种共识，即：针对不同膨胀量的内衬，将热风炉上部预燃室、拱顶段、蓄热室三部分设计为独立内衬（荷重由炉壳承担），彼此采用滑缝连接（也称迷宫式、错位连接等），各自膨胀互不影响。带“热风出口独立膨胀段”则是将热风炉分为“预燃室段、锥形拱顶段、热风出口直墙段、蓄热室段”四段〔2〕。

（2）带“热风出口独立膨胀段”热风炉的技术理论

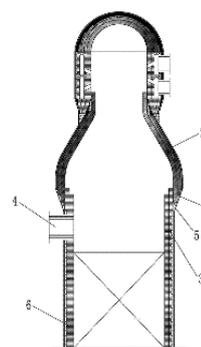
根据公开文献报道：“三段式顶燃式热风炉因为锥形拱顶直接坐落在热风出口之上，导致来自拱顶自身重力、膨胀力、叠加膨胀力、扩张力、下滑力、剪切力、送风冲击力和送风结束后的钢壳反弹力等集中复杂的应力作用，从而导致了热风炉出口和拱顶垮塌的事故频发”〔2〕。但是，遍查各种公开报刊资料，均没有机构公布对这些所谓“集中复杂的应力”的任何计算和校核结果，因此，我们姑且认为这是针对某些顶燃式热风炉出现的拱顶和热风出口故障原因的一种分析和判断。

（3）相关专利检索

国内某设计院在 2017 年申报的一份实用新型专利（CN 207918899 U 《四段式顶燃热风炉》）里把顶燃式热风炉自上而下分为燃烧器、燃烧室、整流室、蓄热室，也就是在现有顶燃式热风炉的燃烧室和蓄热室之间增加了“整流室”，国内耐火材料公司



某设计院申报的实用新型专利



某耐火材料厂申报的实用新型专利

申请的实用新型专利（CN 207362273 U 《热风炉锥形支撑装置》）是设立了热风出口直墙段。

(4) 去除商业化糟粕、还原技术本身的必要性

迄今为止，依据能检索到的所有关于“热风出口独立膨胀段”热风炉的各种公开资料，不仅没有对相关拱顶、热风出口部位的应力计算参数，也没有对现有“三段式”热风炉结构相关部位的应力计算和校核过程。

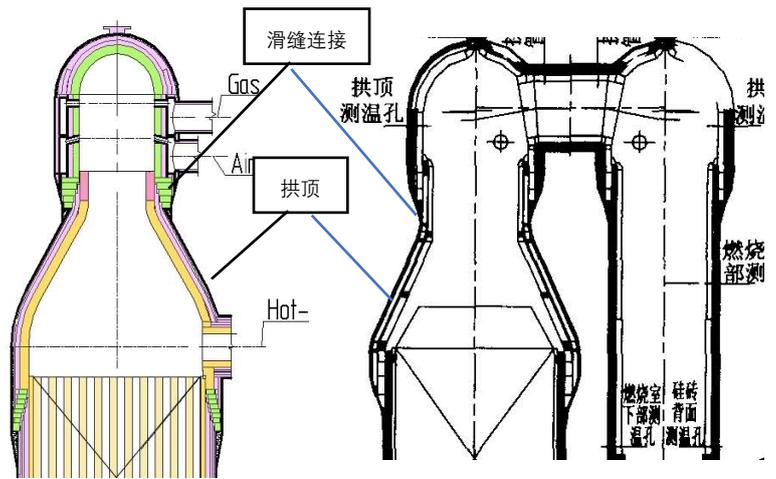
带“热风出口独立膨胀段”热风炉作为解决热风出口组合砖损坏的一种对策，不失为一种创新结构。需要指出的是，这种顶燃式热风炉结构因为增加了“热风出口直墙段”或者“整流室段”，既加高了热风炉高度又增大了拱顶直径，会增加工程投资，也使得砌体复杂化，因为设置“热风出口直墙段”或者“整流室段”需要增加一组滑缝连接结构，热风出口仍然需要采用组合砖形式。因此，如果认为这种结构是“今后我国乃至世界高风温顶燃式热风炉因结构瓶颈限制的重大技术突破”〔2〕等等，尚需要今后更多的工程实践验证。

热风炉是高炉炼铁最重要大型工艺装备之一，凡重大技术革新都需要实际运行验证才能得以确定，尤其是需要足够长期的运行验证，目前这种创新结构的验证工程仅仅处于运行初期，过度宣传反毁其根，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。

4. 顶燃式热风炉预燃室和拱顶砌体稳定性的技术基础

(1) 在拱顶上方合理地设置预燃室，各自膨胀互不影响

卡卢金顶燃式热风炉的技术特征之一是预燃室置于拱顶上方，预燃室荷重由炉壳承担、预燃室和拱顶砌体采用迷宫式连接，各自膨胀互不影响，因此，预燃室砌体对拱顶砌体没有重力影响。我们在新日铁式外燃式热风炉上也能看到这种布置方式和结构设计：蓄热室上部锥体与上方球形拱顶



卡卢金热风炉拱顶和上方预燃室

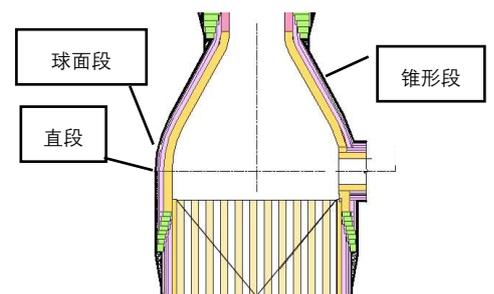
新日铁式热风炉锥体和上方球形拱顶

之间采用迷宫式连接，上部砌体荷重由炉壳承担，成为相互独立的稳定结构〔3〕。因此，这种组合拱顶结构的稳定性已经完成了数十年工程验证，设计方法均经过反复计算校核，并且已经列入设计规范，其可靠性是毋庸置疑的。

(2) 组合式拱顶的安全性

在各型热风炉设计中采用的拱顶形式多种多样，包括球形拱顶、悬链式拱顶、锥形拱顶、组合型拱顶等，各种拱顶形式都是根据不同工程需求按照设计规范选定的。

卡卢金热顶燃式热风炉拱顶砌体主要由锥形段、球面段、直段三部分组合而成，拱顶砌体由硅砖、硅质轻质砖、粘土轻质砖、保温材料和喷涂料组成，所有耐火材料的配置和砌筑方法均经过计算校核，设计依据于欧



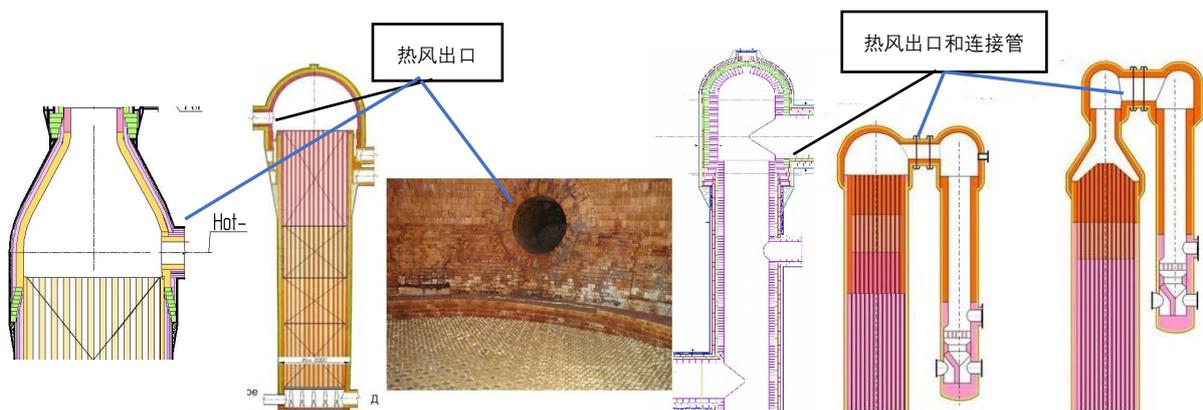
洲、俄罗斯的设计标准和规范，因此，由卡卢金设计的顶燃式热风炉从未出现过拱顶坍塌事故。但我们注意到一些机构采用了不合规的设计和砌筑方法，这可能导致拱顶砌体在升温膨胀过程中就已经出现损坏，在长期运行中可能引发多种故障和事故。

(3) 安全地在拱顶底部设置热风出口

在拱顶底部设置热风出口的结构并非现代卡卢金热风炉首创，这种结构设计在其他工业炉窑里很常见，在外燃式热风炉上也可以见到。

热风出口在拱顶大墙上所占比例很小，相当于在面积很大的拱顶大墙上设置了一个面积较小的通风孔（并不是拱顶坐落在热风出口上），因此对拱顶大墙稳定性的影响很小；圆形热风出口形式可以使砌体处于最佳受力状态，但在设计中要特别增强上半环砌体的承重能力，并保证热风出口上部大墙荷重被均匀分散到周边，解决方式通常是采用拱形砌筑或者采用组合砖。

现代卡卢金热风炉热风出口设置在拱顶直段，第一代卡卢金热风炉的热风出口（没有采用组合砖）设置在球形拱顶底部，热风管道的竖管结构采用的是“球顶加出风口”的结构设计，外燃式热风炉在两个拱顶之间设置了热风连接管。因此，可以说这种“带风口的拱顶”的结构设计经过长期工程验证，应用非常普遍，工程技术人员在组合砖设计方面取得的成果让热风出口砌体更加稳定，总体来说热风出口砌体设计和砌筑技术是成熟可靠的〔4〕。



在拱顶上设置热风出口的热风炉和管道结构

现代卡卢金热风炉

第一代卡卢金热风炉及运行 27 年后的热风出口

热风竖管

库铂式外燃热风炉

新日铁式外燃热风炉

事实上，为热风出口设置一个独立的砌体段的概念并非很难想到，工程技术人员坚持采用现有结构的主要原因是：（1）依靠合理的设计和规范的建造质量，现有结构设计技术完全可以满足工程要求；（2）为热风出口设置独立砌体段会增加投资；（3）增加了预燃室到蓄热体表面的距离和空间，可能会增加一些新的技术问题。

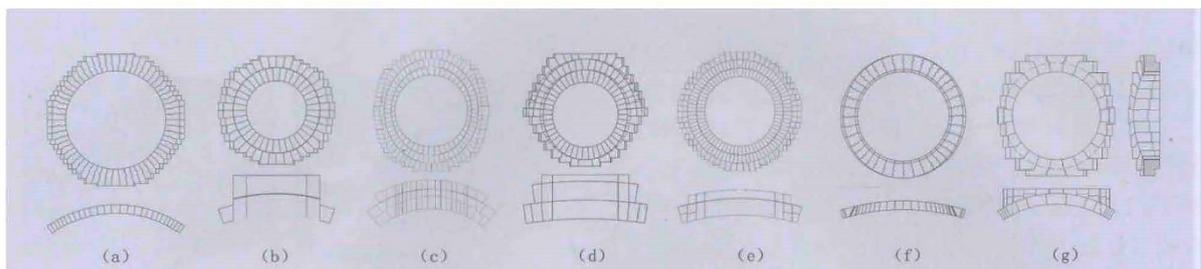
那些热风炉拱顶坍塌、热风出口砌体损坏的工程案例有没有承包方设计不合理或者建造质量不达标的原因呢？如果没有对此进行详细分析，而是直接确定是“三段式热风炉存在着结构设计缺陷”〔2〕的结论，显然就过于简单，流于商业化推销。为此，我们要鲜明地指出：这些故障、事故案例完全不能证明卡卢金顶燃式热风炉在拱顶设计中存在结构缺陷。仅从工程案例举证的角度来看，由卡卢金设计的顶燃式热风炉从未出现过拱顶坍塌事故，采用组合砖以后的热风出口也没有损坏事故。

技术研讨必须远离商业因素，回归技术本源。实际上，国内很多工程技术人员对热风出口故障案例做了大量的技术分析，提出了很多具有科学性的技术建议并付诸实施，取得了较好的应用效果。

5. 热风出口砌体稳定性

热风出口砌体损坏的原因主要包括：结构设计不合理，或者组合砖设计不合理；耐火材料配置不合理；耐火材料质量不达标；施工质量不达标〔4〕。如果范围扩大到热风炉系统，导致热风出口砌体结构失稳的原因还包括热风出口位置的钢壳结构局部失稳，其原因是在热风炉投产初期热风短管钢壳与热风炉钢壳之间膨胀变形产生的应力没有得到有效消除。

比较常见的热风出口组合砖形式主要如下图，其中（c）为宝钢外燃式热风炉采用的热风出口组合砖形式，（d）为卡卢金在宝钢湛江大高炉热风炉工程中采用的热风出口组合砖形式〔4〕。



各种热风出口组合砖形式

卡卢金设计的热风出口组合砖包括承重环、卸力环和工作环，承重环和卸力环将热风出口上方拱顶大墙砖的荷重均匀分散到周边大墙砖上，保证工作环耐火砖不受大墙砖荷重影响；当采用水平热风支管时，热风出口组合砖由硅砖和低蠕变高铝砖组合而成；当采用垂直热风支管时，热风出口组合砖则全部采用硅砖。砌筑施工执行卡卢金顶燃式热风炉砌筑规范，由卡卢金专家现场做技术指导，这样建设的热风出口组合砖可以满足热风炉稳定长寿的工程要求。

实际上，无论是不是采用独立的热风出口砌体段，热风出口组合砖的设计、材料和砌筑施工质量都是影响热风出口砌体稳定性的主要因素。

6. 对创新结构的技术分析

这种创新结构真的“彻底解决了三段式热风出口复杂应力集中的结构缺陷将真正实现节能、高效、长寿、低成本的高风温运行”〔2〕？

回归技术本源，我们从技术角度分析一下这种创新结构可能存在的一些技术不足：

(1) 这种结构增加了烟气在炉内的运行路线，也就是延长了烟气在炉内停留时间，这样就增加了烧炉期间形成氮氧化物的概率；

(2) 这种结构不仅增加了高度，而且也增大了拱顶直径，除了增加投资外，因为增加了大墙内衬还会降低热效率；

(3) 因为增加了一个独立膨胀段，不同直径的炉壳衔接技术更加复杂，增加了制造加工难度，容易造成各个炉子拱顶形状不一的情况，



“热风出口独立膨胀段”热风炉和常规顶燃式“热风炉（引自附录〔2〕）

7. 总结

- (1) 将预燃室设置在拱顶上方、在拱顶下部设置热风出口的顶燃式热风炉结构具有稳定性的优势，既有同类热风炉设计结构佐证，又有长期稳定运行工程验证，由卡卢金设计的顶燃式热风炉从未有过拱顶坍塌事故；
- (2) 影响热风出口砌体的稳定性的主要因素是设计是否合理、材料质量是否达标、砌筑施工质量是否合规。无论是不是设置热风出口独立砌体段，热风出口组合砖的综合质量才是决定砌体稳定性的关键因素。
- (3) “热风出口独立膨胀段”热风炉是指在拱顶和蓄热室之间增加了独立的热风出口砌体段，这种创新结构正处在工程验证初期阶段，这种结构增加了热风炉高度和拱顶直径，增加了砌体复杂性和炉壳制造难度，会增加工程投资。

8. 附录

- 〔1〕《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
- 〔2〕《豫兴新型四段式热风炉走进国企》作者：夏杰生 《冶金报》2018-01-15
- 〔3〕《太钢 4350m³高炉热风炉的设计》作者：程琳 伍积明 《炼铁》第 25 卷第 2 期 2006 年 4 月口
- 〔4〕《大型高炉热风出口组合砖损坏的原因及对策》作者：王希波 王文学 秦建涛 夏欣鹏 徐国涛 《炼铁》第 38 卷第 1 期 2019 年 2 月口

(全文完 2020.04.20)