

大高炉高风温热风炉安全运行策略（二）

王长春

三、大高炉热风炉“本体+热风管道系统安全策略”的研究和实践

1. 炉壳材质可靠性（更正和补充）

（1）大型热风炉炉壳材质选择

热风炉炉壳不同于高炉炉壳，热风炉工况是交变应力，材质强度与抗疲劳性能是优选考虑项。高炉炉容从 1000m^3 提高到 5000m^3 ，热风炉炉壳疲劳应力增加一倍。

国内最常见的顶燃式热风炉炉壳牌号是 Q345C GB/T 1591-2008；与 BB41-BF Q/WTBO25-2008 对比，Q345C 在材质成分和强度指标、使用温度等方面都没有明显的缺陷，并且在中国有最多的应用业绩。

Q345C 比照了俄罗斯热风炉炉壳材质牌号 17Г1С 和 09Г2С-15/ГОСТ 12981-89，日本热风炉炉壳牌号是 SM 490A/ SM 400B/SAL325A JIN G 3106，欧洲常用热风炉炉壳牌号是 P355NH/P460NH DIN EN 10028-3(2009)。

从材料性能看，Q345C 虽然价格较低，但作为结构钢仍然存在晶粒粗大、杂质较多等不足，有进步的是一些热风炉炉壳开始使用合金结构板 Q345LK 和容器钢 Q345R/Q370R，其中添加的微量元素成分有利于增强材料韧性和耐腐蚀能力。国外热风炉炉壳材一般选用压力容器钢，更强调晶粒细化和抗腐蚀能力，例如欧洲牌号 P355NH 就是典型的压力容器钢，要求采用脱氧、除气和晶粒细化处理。

将炉壳板的交货状态由正火提高为调质，更适合于大型热风炉炉壳长期

使用要求。

(2) 拱顶区域炉壳材质选择

顶燃式热风炉拱顶的圆弧过渡带及邻近带是复合应力（弯曲/拉伸）集中或者高值部位，拱顶上还有热风出口、人孔等容易产生应力集中的部位，因此在拱顶部位采用高等级材质是一种比较好的技术方案。一些技术人员建议采用强度级别更高的 Q390-(GJCZ15、D) [4]或 Q370R，交货状态提高到调质处理，进一步强化晶粒细化处理。

2. 炉壳防腐性能

热风炉炉壳的耐腐蚀能力是热风炉设计的重要内容，也是所有用户、尤其是临海地区和使用外矿的用户必须特别重视的一项设计内容。热风炉炉壳板长期运行下失效的主要原因是（疲劳）应力下的腐蚀开裂，腐蚀会产生应力集中和微裂纹，腐蚀还会加速微裂纹扩展。顶燃式热风炉具有低氮排放优势，但炉壳板腐蚀原因不仅是氮氧化物 NO_x ，还包括硫离子和氯离子。因为腐蚀介质是不可避免的，任何的无视炉壳板腐蚀开裂因素的设计都可能会缩短炉壳板的预期寿命。

提高炉壳板耐腐蚀能力的有效方法有二，包括①涂刷强耐腐蚀涂料 (YJ-250) 和②提升炉壳表皮温度 ($\sim 150^\circ\text{C}$)，最好是两种方法都采用，例如日本 JFE“外改卡”热风炉就是这样。俄罗斯（包括乌克兰）曾经采用了铝箔（或不锈钢箔片）贴附炉壳板内壁的方法提高抗腐蚀能力，炉壳使用寿命超过 30 年。

在国内，不锈钢复合钢板 (904L+Q345C) 已经应用在 4350m^3 高炉卡卢金热风炉工程 (2013 年投产) [5]和 5500m^3 高炉卡卢金热风炉工程中（复合板材材质 904L+Q345R，2019 年投产），这一技术方案虽然投资比较高，内壁

不锈钢焊接要求较高，但实际应用效果较好。

3. 炉壳施工可靠性

(1) 焊接施工规范

大型热风炉炉壳焊接施工应严格执行技术规范，所有纵缝不允许高空焊接，必须进行 100%全长度无损探伤检查。大型顶燃式热风炉炉壳对接焊缝、炉壳与管道连接处的焊缝应符合《炼铁工艺炉壳体结构技术规范》(GB50567-2010)中一级焊缝的要求；管道短管的对接焊缝应符合《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205-2001)中一级焊缝的要求。技术规范还要求对拱顶区域内壁的焊缝余高打磨到与母材齐平，目测没有裂纹、砂眼、坑洞等焊接缺陷。

(2) 退火消应

残余应力集中并在运行过程中不断释放是影响炉壳开裂、失效的重要原因之一，对退火前焊缝的残余应力检测结果表明：炉壳板现场焊接存在局部区域焊接残余应力高的事实；对退火前后的残余应力检测结果表明：退火可以消除近 70%以上的残余应力，因此，大型热风炉炉壳板必须做退火消应 [6]。效果最好的施工方案是整体退火，其次是内壁退火（内壁加热、外壁保温），至少应进行外壁退火。

4. 炉壳工艺可靠性

以下两个涉及到炉壳安全性方面的问题尚需加以重视：

(1) 避免在大型热风炉炉壳上设置环箍和拉杆

- 来自俄罗斯、日本和国内大型热风炉工程的运行经验都表明：应避免在炉壳（拱顶及邻边位置）上设置环箍和拉杆，保证大尺寸炉壳在运行中能够

“自由呼吸”，不会受到额外应力影响（图 1）。

- 所有筋板/立板应采用“垫板（或贴板）”方式与炉壳焊接，避免这些筋板/立板像刀子一样嵌入炉壳，对炉壳长期运行产生不利影响（图 2）。
- 如果工艺上确实需要加抱箍，也应采用上述对炉壳保护性的设计，并充分考虑到抱箍对炉壳安全性的影响。

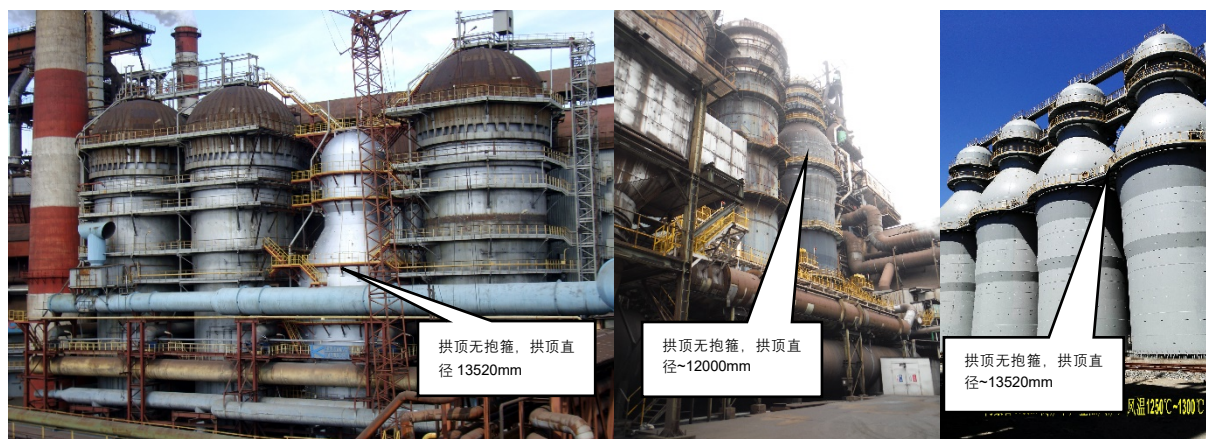


图 1 热风炉无抱箍拱顶 俄罗斯 BF5580m³、日本 BF4300m³/BF5000m³、中国 BF4150m³



图 2 抱箍和筋板/立板设计

(2) 热风出口钢壳的稳定性

对于顶燃式热风炉来说，在对称结构的拱顶上，热风出口是最重要的不对称单侧开口，因此，保证热风出口位置钢结构的稳定性对炉壳安全是非常重要的，这里主要指热风出口和热风阀之间的热风短管的刚性。

- 热风出口和热风阀之间不宜设置补偿器

- 当采用水平热风支管形式时，一般不推荐在热风出口和热风阀之间设置补偿器，其原因不仅是波纹管会降低热风出口钢结构稳定性，同时补偿器寿命也较短。
- 垂直热风支管形式已经成为顶燃式热风炉新结构的代表，包括带混风室的垂直热风支管（外燃式热风炉热风支管与顶燃式热风炉嫁接）和卡卢金式垂直热风支管。无论采用哪种结构，在热风出口附近都不宜设置补偿器。

➤ 热风短管同步地随热风炉（受热）升高

热风炉烘炉投产时会膨胀升高，刚性的热风短管应同步地随热风炉受热升高，从而保证热风出口钢结构安全。

- 当采用水平热风支管形式时，一般推荐在热风阀和热风主管之间设置万向补偿器，万向补偿器可以吸收（受热升高的）热风炉本体和（不抬高的）热风主管之间的位移。
- 带混风室的垂直热风支管可以在垂直段设置弹簧支座（日本 JFE 外燃式热风炉改造为顶燃式热风炉方案），卡卢金式垂直热风支管（象鼻式垂直支管）可以在垂直段中部设置补偿器（拉伸式补偿器，投产后锁紧停止工作）或者底部设置弹簧支座，这些设计方案都可以保证热风短管与热风炉本体同步升高。

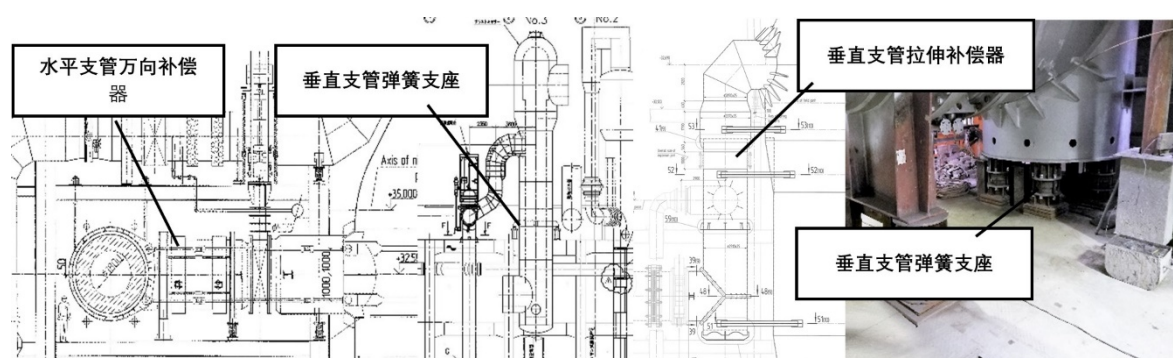


图 3 保证热风短管与热风炉本体同步升高的技术措施

(3) 热风支管拉杆对炉壳的影响

如果在热风炉拱顶炉壳和热风主管之间设置了拉杆(支管拉杆),拉杆的一端固定在热风炉炉壳上,拉杆的另一端固定在主管上(三岔口位置),在热风炉烘炉投产的时候,热风炉本体受热升高,热风主管则不会抬高。这种情况下,拉杆会在热风炉本体炉壳上产生额外应力;当设置了多根(支管)拉杆的时候,由于安装工程因素,各个拉杆施加在炉壳上的力也是不同的,各个拉杆会在热风炉本体炉壳上产生不同的应力。

铰链式拉杆对吸收热风炉本体和热风主管的位移差有一定效果,但是多根拉杆在安装中容易产生拉力不均的情况;针对刚性拉杆(如三角拉杆、框架式拉杆等),为了避免对炉壳造成不利影响,刚性拉杆应在热风炉烘炉投产后再安装和固定。

(未完待续)

参 考 文 献

- 【1】 《大型高炉热风炉技术的比较分析》, <钢铁>第 46 卷第 10 期 2011 年 10 月, 作者: 钱世崇,张福明,李欣,银光宇,毛庆武
- 【2】 《高炉热风炉闷炉的危害性分析》, <炼铁技术通讯> 2009(000)006 孟凡双
- 【3】 《5100m³高炉热风炉的设计》<工业炉>第 41 卷第 1 期 2019-09-24 作者: 刘华平 况维良 刘红军 宋绍强
- 【4】 《高炉及配套热风炉炉壳用钢拓展性研究》<钢结构> 2009 年 07 期 作者: 但泽义 李业绩. 薛尚铃 陈卿 邓玉孙 段斌
- 【5】 《超高温免维护高炉热风炉和热风管道工业实践》<冶金报> 作者: 向宏宇
- 【6】 《热风炉焊接残余应力周向分布与消除》<第十二届中国钢铁年会论文集-1.炼铁与原料 2019 年>, 作者: 陈辉 孙健 王伟 梁海龙 熊军 王长水 王建 要志超