现代顶燃式热风炉降低氮氧化物排放和应力腐蚀的技术措施

王长春

一.概况

随着国内钢铁行业加大力度推广超低排放标准，高炉热风炉氮氧化物的排放情况已经引起工程技术人员和业主的关注。影响热风炉烧炉期间氮氧化物排放的因素很多，与内燃式和外燃式热风炉相比，现代顶燃式热风炉因为具有独特的结构，在抑制氮氧化物排放方面表现更加优异，针对风温 1200℃-1250℃的现代顶燃式热风炉来说，一般都无需单独设置脱硝装置。

氮氧化物对高炉热风炉的最大损害是晶间应力腐蚀，随着热风炉风温的提高，对酸性介质腐蚀和应力腐蚀问题的防范措施也应进一步加强。

二.氮氧化物危害以及对高炉热风炉的影响

1. 氮氧化物是大气主要污染物之一

人类活动产生的氮氧化物主要来源于燃烧过程，生成 NOx 的途径有三个:（1） 热力型，指空气中的氮在高温下氧化而生成的 NOx，（2)燃料型，指燃料中的氮氧化物在燃烧过程中热分解而又接着氧化而生成的 NOx，（3）快速型，指燃烧时空气中的氮和燃料中的碳氢离子团如 CH 等反应生成的 NOx。氮氧化物包括多种化合物，如 N_2O、NO、NO_2、N_2O_3、N_2O_4、N_2O_5等，其中，大气中氮氧化物 NOx 主要指 NO 和 NO_2，也包括少量 N_2O。氮氧化物是大气中主要的气态污染物之一，是形成酸雨的一种酸性气体，这些气体在

紫外线的照射下还会产生光化学反应，产生有毒气体，刺激人体呼吸道黏膜，使人呼吸困难【1】。

2. 氮氧化物对高炉热风炉的损害

对于高炉热风炉来说，炉内的氮氧化物与水结合形成酸性腐蚀物质，会对钢制炉壳、管壁产生腐蚀作用。一般认为，由于 NO→NO_2（也包括 SOx）进而在炉壳钢板上产生某些腐蚀介质，在焊缝及焊接热影响区域的腐蚀损害最为严重，导致强度降低。

炉壳钢板在周期性应力的作用下，经过一定时间后会也出现低于材料强度极限的脆性开裂现象，致使金属材料失效；尤其是在有焊接缺陷、应力集

中的焊缝位置，在周期性应力的作用下出现疲劳裂缝，这是典型的应力腐蚀开裂现象。在腐蚀介质的加强作用下，这种应力腐蚀现象会在焊缝及焊接热影响区域（晶粒间界区域）加速形成腐蚀微裂纹（龟裂），微裂纹逐步向炉壳外侧发展直至形成断裂，主裂缝通常垂直于应力方向（多有分枝），这就是所谓的“晶间应力腐蚀”。

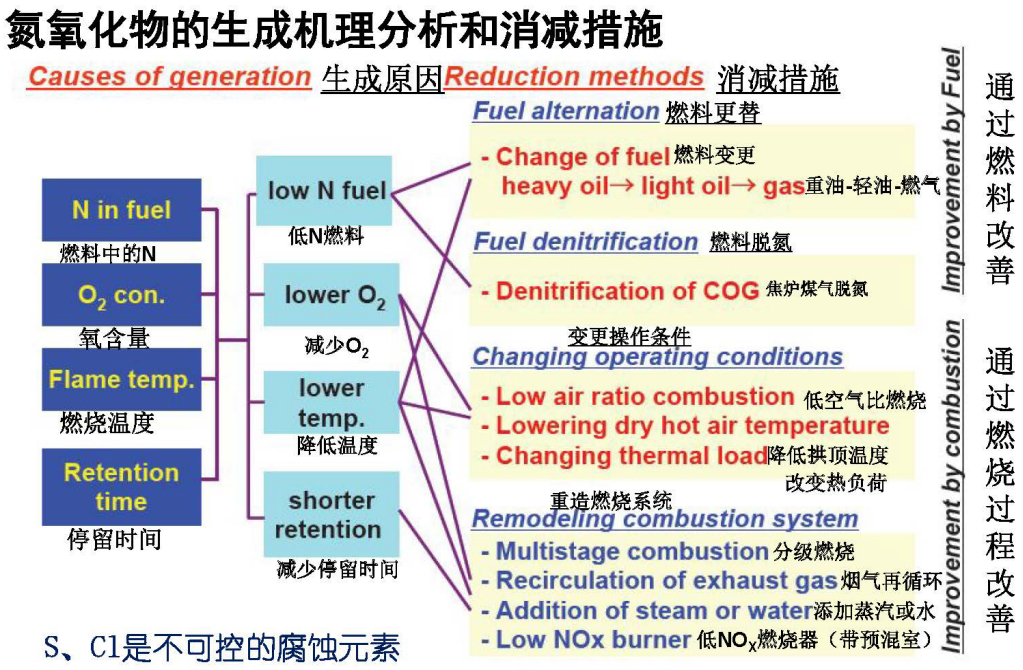
这种晶间应力腐蚀情况多发在内燃式热风炉和外燃式热风炉，外燃式热风炉通常采用“外保温”方式维持一定的炉壳温度，减少氮氧化物在炉壳焊缝形成晶间应力腐蚀的几率。

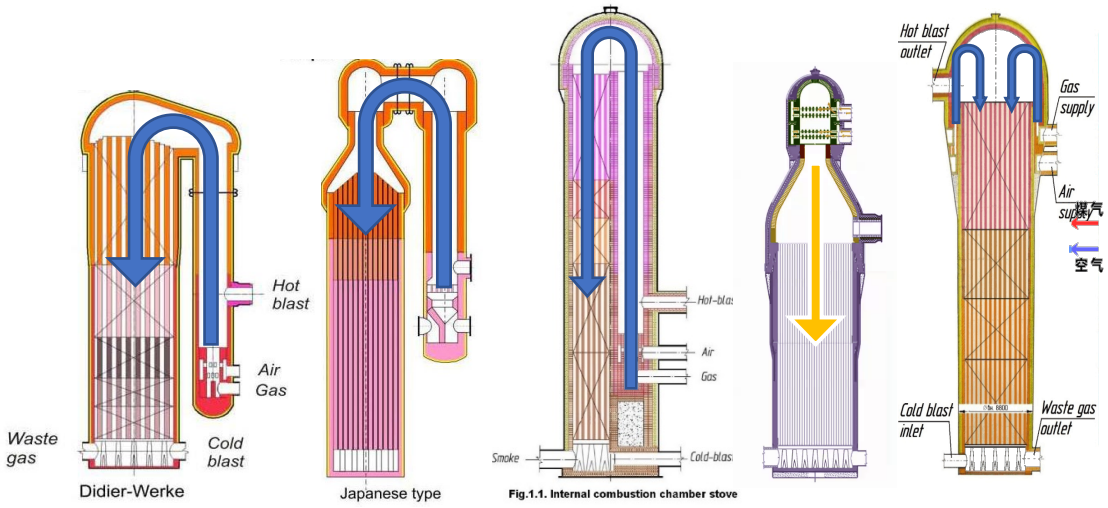
三.现代顶燃式热风炉氮氧化物排放低于现行超低排放标准

热风炉在混烧焦炉煤气的情况下，燃料里有氮也有碳氢离子团，因此会促发生成氮氧化物（快速型氮氧化物），随着国内高炉使用外矿的情况越来越多，工程技术人员在高炉煤气里发现一些氯离子 Cl^-等，这些腐蚀元素是随矿料进入高炉、并随高炉煤气一起进入热风炉的。

氮氧化物的生成和排放量与燃烧方式 ,特别是与燃烧温度和过量空气系数等燃烧条件关系密切 。从普通高炉煤气的成分可看出，一般情况下高炉煤气中不含氮氧化物及碳氢离子团 (即使燃料中存在 CH_4 ,但其量很少)，因而高炉煤气燃烧时产生的 NO_x 为主要为热力型。【2】

高炉热风炉燃烧生成氮氧化物的主要条件、消减措施如下:

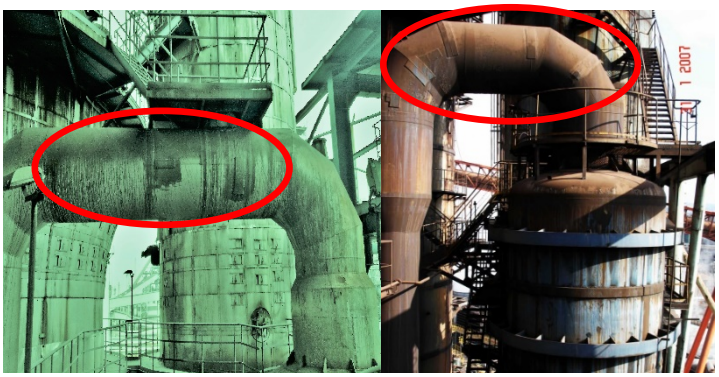




外燃式热风炉、内燃式热风炉、顶燃式热风炉燃烧烟气运行轨迹

上图显示了热风炉燃烧烟气在炉内运行轨迹，可见现代顶燃式热风炉燃烧烟气在炉内运行轨迹最短，

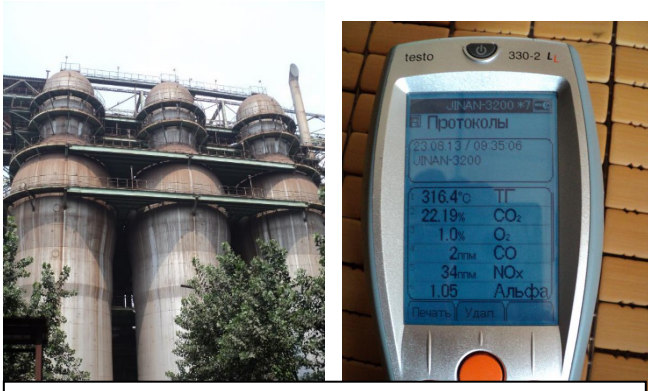
下图是新日铁式外燃式热风炉垂直热风支管顶部混



新日铁式（科铂式）外燃式热风炉垂直热风支管的顶部折弯的混风管受晶间应力腐蚀损害

风管受晶间应力腐蚀损害情况，混风管在折弯位置频繁出现钢壳焊缝腐蚀开裂事故。

由此可见，与内燃式热风炉、外燃式热风炉相比，现代顶燃式热风炉的先进结构保证了燃烧烟气在炉内停留时间最短，在较大程度上降低了顶燃式热风炉氮氧化物生产量和排放量。



2013-08-13 对国内 3200m³ 高炉烟道里 NOx 含量检测情况：34ppm

附图是对国内和哈萨 3000m³ 高炉卡卢金热风炉运行氮氧化物排放量的实测结果，以及日本 JFE 公司外燃式热风炉改造为卡卢金热风炉的运行情况。实际上，正在运行的卡卢金热风炉氮氧化物排放都低于现行超低排放指标。因此，现代顶燃式热风炉不需要特别配置脱硝装置，当然也不需要做外保温。

2014-03-12 对哈萨 3200m³ 高炉烟道里 NOx 含量检测情况：8ppm

2009 年日本 JFE 公司 4300m³ 高炉外燃式热风炉改造为卡卢金热风炉，没有外保温，氮氧化物排放满足日本环保标准：不高于 50ppm

国内刊物发表的一些文章也介绍了现代顶燃式热风炉的运行情况，结合氮氧化物生成机理，对顶燃式热风炉结构进行了多角度分析，通过实际工程运行情况证明顶燃式热风炉氮氧化物排放满足现行超低排放标准【2】。

四.现代顶燃式热风炉抑制氮氧化物的目标和技术措施

1、 降低氮氧化物排放

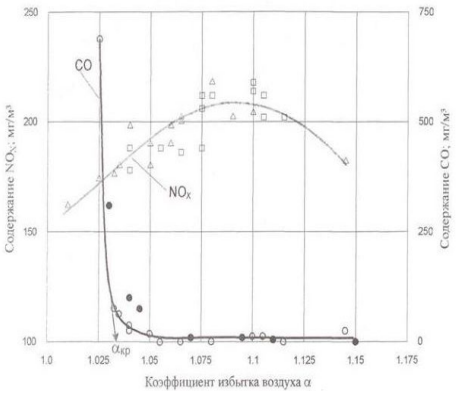
（1）高炉热风炉降低氮氧化物排放的目标之一是满足环保要求，根据上述分析和实际工程验证，现代顶燃式热风炉的氮氧化物排放量低于现行超低标准，通常不需要设置脱硝装置。

（2）高炉热风炉降低氮氧化物排放的另一项重要目标是抑制腐蚀介质对炉壳的损害。10 年以前，卡卢金就已经在中国、日本和俄罗斯设计 4000m^3-5500m^3 大高炉高风温热风炉，对氮氧化物的抑制和防范技术也在不断发展和完善，形成了一系列技术规范。

2、 抑制腐蚀介质损害的技术措施

（1）采用低 N 燃料。顶燃式热风炉推荐采用单一高炉煤气为燃料，这是降低氮氧化物排放的第一步，同时也可以降低风温成本。

（2）控制拱顶温度。针对燃烧温度（实际生产中以控制拱顶温度为准）对氮氧化物生成量的影响关系，早先已经有很多的研究成果。当现代顶燃式热风炉热风风温达到 1250℃-1300℃的时候，拱顶温度控制在 1380℃-1400℃以下是合适的。这种情况下，就需要较大幅度地提高热风炉供热能力，包括提高热风炉蓄热面积等技术措施。小孔格子砖技术发展在其中起到了重要作用，在大幅度提高热风



燃烧过程中 CO、O_2 与 NOx 生成量的关系，O_2 增加过程中存在 NOx 增量高峰值

炉供热能力的同时，小孔格子砖技术（采用 20 毫米孔径格子砖）比较好地控制了高风温热风炉工程成本。

（3）针对酸性介质的防护措施，卡卢金借鉴新日铁热风炉的工程经验，为现代顶燃式热风炉制定了在炉壳内壁涂覆耐酸涂料的工艺，采用国内研制的特种耐酸涂料。目前现在一般是高温区炉壳内壁全涂覆耐酸涂料，要求在焊接锚固件以后统一除锈，然后再按照规范要求刷涂。

（4）针对酸性介质的另一项防护措施是适当提升热风炉炉壳表面温度。在设计拱顶内衬时，要保证拱顶炉壳外表面温度不低于 100℃，避免酸性介质与凝结水结合腐蚀钢板。有资料显示 PW 公司将外燃式热风炉拱顶外表面温度提高到 120℃~130℃，达涅利公司设计的内燃式热风炉也采用了这样的技术措施。卡卢金建议拱顶炉壳外表面温度不低于 100℃，新建大高炉卡卢金热风炉的钢壳表面温度都是 120℃。

（5）国内一些大高炉顶燃式热风炉在炉壳高温区采用了复合钢板（炉壳内壁复合不锈钢板）技术，这种工艺不仅可以抵抗酸性介质腐蚀，还有效减小了炉壳内壁焊接应力，取得了较好效果。

采用不锈钢复合钢板的炉壳

3、 降低应力腐蚀损害。

热风炉炉壳钢板受到晶间应力腐蚀有两个主要条件，即腐蚀介质以及炉壳板周期性应力（即应力腐蚀），首先出现损坏的部位都是晶粒间界区域（焊缝及焊缝热影响区）。因此，对于大高炉热风炉来说，除了抑制酸性介质外，降低和控制应力腐蚀已经成为重要的设计和工程问题，主要技术措施包括：

（1）消除限制热风炉炉壳自由膨胀的各种约束。例如各种用于固定拉杆的环箍，这些环箍可能损害炉壳。热风炉受到周期性内压影响，安全的炉壳实际上处于“自由呼吸”状态，这些环箍限制了炉壳在安全范围内的涨缩，长期运行可能会形成应力集中。

围绕炉壳的拉杆环箍附近容易出现焊缝开裂

（2）减小装配应力。采取严格的检验制度，严格保证炉壳预组装精度；在炉壳变径段热成形加工后，要采取措施消除热加工应力；

（3）减小焊接应力。主要技术措施包括：打磨炉壳高温区内壁焊缝余高与母材齐平，大高炉热风炉应特别对拱顶等高温区域的炉壳焊缝进行退火，严格执行拱顶等高温区域的焊接工艺、焊接工序，尽可能减小由于焊接顺序不当造成的结构应力。

五.总结

1、 相比内燃式、外燃式热风炉，现代顶燃式热风炉结构先进，燃烧烟气在炉内停留时间最短，在抑制氮氧化物排放方面表现优异，可以达到现行超低排放标准，针对风温 1200℃-1250℃的现代顶燃式热风炉来说，一般都无需单独设置脱硝装置。

2、 氮氧化物对高炉热风炉的损害主要是晶间应力腐蚀，晶间应力腐蚀的两个主要条件是腐蚀介质和应力腐蚀，主要表现在焊缝区域开裂，裂缝起源于炉壳内壁。顶燃式热风炉在防范酸性介质腐蚀方面已经具有了

一系列技术规范，包括单烧高炉煤气、控制拱顶温度、提升炉壳表皮温度、炉壳内壁涂刷耐酸涂料等。

3、 大高炉顶燃式热风炉应特别注意降低应力腐蚀对炉壳的损害，主要技术措施包括：避免使用环抱炉壳的环箍结构，减小炉壳装配应力，采用打磨内壁焊缝余高、焊后退火等措施减小焊接应力等。

【1】 《高炉煤气锅炉燃烧中氮氧化物污染物的控制》 江西能源 2007（3）作者：郭冬芳 ,王小平
【2】 《热风炉低氮排放的控制措施分析》世界金属导报 2019-09-24 B01（作者：刘红军、林桂珂）

（全文完）