节能环保及综合利用

# 浅谈烟气循环烧结工艺的发展现状及趋势

李惠莹[1]，王 浩[1,2]，金保昇[2]
（1. 中冶华天工程技术有限公司，安徽 马鞍山 243005；2. 东南大学能源与环境学院，江苏 南京 210096）

**摘 要**：烟气循环烧结是将部分烧结机烟气循环至烧结料层再次使用的一种新型烧结方法，可实现钢铁生产节能减排的双重效益。本文主要介绍了 5 种典型烧结烟气循环技术，即区域性烟气循环、EOS、LEEP、EPOSINT 和 BSFGR 工艺的特色，分析了各自的应用效果和现状。随后，根据我国烧结烟气治理发展的趋势和国情，提出了针对拟建烧结烟气脱硫脱硝降低一次性投资及运行成本，和已建烧结脱硫脱硝提质增产不同的烟气循环工艺模式。

**关键词**：烧结；烟气循环；节能减排；工艺特色；发展趋势
**中图分类号**：X701 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2018)01－0061－05
**doi**：10.13403/j.sjqt.2018.01.013

## Development status and trend of flue gas recirculation sintering process

Li Huiying[1], Wang Hao[1,2], Jin Baosheng[2]
(1. *Huatian Engineering & Technology Corporation, MCC, Maanshan* 243005, *Anhui*;
2. *School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing* 210096, *Jiangsu*)

**Abstract** Flue gas recirculation sintering process is a new sintering method that reutilizes partial flue gas that produced by the sintering machine as the input gas. It has been regarded as dual benefit to save energy and reduce emissions. In this paper, technological characteristics of five typical recirculation process of sintering flue gas are introduced, which are waste gas regional recirculation process, EOS, LEEP, EPOSINT process, and BSFGR process. Subsequently, according to the application benefit of each process, the application status is analyzed. Lastly, according to the actual situation no matter how the sintering flue gas desulfurization or denitrification equipment is or will be constructed, different flue gas recirculation process models are introduced to choose.

**Key words** sintering; flue gas recirculation; energy saving and emission reduction; technological characteristics; development trend

## 1 前 言

烧结和球团作为高炉生产的供料工艺，在钢铁企业里扮演着至关重要的角色。烧结工艺因对原料要求不像球团矿那么严格，因此，在我国的高炉炉料中烧结矿占 80% 以上。

据不完全统计，我国现有烧结机约 1 200 余台，每年烧结矿产量超过 8 亿 t，烧结能耗约 4 500 万 t 标煤，约占钢铁生产总能耗的 12%[1]。然而，传统烧结工艺具有高能耗、高污染、低余热利用率等诸多缺陷。2012 年，国家颁布了新的《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》(详见表 1) 对烧结生产提出了更加严格的环保要求，使得烧结厂在新建或扩建时，采用传统技术

**收稿日期**：2017－03－16
**基金项目**：安徽省科技攻关计划项目(1604a0902153)
**作者简介**：李惠莹(1980－)，女，高级工程师，主要从事电气自动化以及工业节能方向的研发与管理工作。
**通讯作者**：王 浩(1981－)，男，高级工程师，主要从事工业系统余热资源回收利用、大气治理方向的设计与研发工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

往往无法达到现行标准排放要求，而排放标准可能会在中短期内进一步严格。因此，生态环境问题已成为制约铁矿石烧结行业发展的根本性问题，发展循环经济，走环境友好的绿色低碳发展道路，已成为烧结生产的唯一选择。

表1 新旧钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准对比(以烧结为例)($mg/m^3$)

| 污染物 | 位置 | 旧标准(1997-1-1) | 新标准(2012-10-1) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 现有企业(2015年前) | 新建或现有企业(2015年起) | 特别排放控制地区 |
| 颗粒物 | 机头 | 150 | 80 | 50 | 40 |
| 二氧化硫 | 机尾 | | 50 | 30 | 20 |
| 烧结机 | | 2 000 | 600 | 200 | 180 |
| 氮氧化物(以$NO_2$计) | | 无 | 500 | 300 | 300 |
| 氟化物(以F计) | | 无 | 1 | 0.5 | 0.5 |
| 二噁英类 | | 无 | 6 | 4 | 4 |

烟气循环烧结技术在近30年来成为了烧结工艺余热回收的研究热点。该工艺不但可以减少烧结工艺生产的废气排放总量以及污染物排放量，同时降低末端治理的设备投资和运行费用，而且能够回收烟气中的低温余热、节省烧结工序能耗，具有重大的节能减排价值。目前，国内外具有代表性的烟气循环烧结技术共有五种，根据循环烟气来源和循环量的不同，五大工艺适用范围也不同，且优缺点均比较突出[2]。

## 2 典型烟气循环工艺的现状

当前，比较典型的烟气循环工艺有五套，即日本新日铁开发的区域性烟气循环工艺[3,4]、德国Lurgi公司开发的EOS(Emission Optimized Sintering)工艺[5]、德国HKM开发的LEEP(Low Emission and Energy Optimized Sinter Process)工艺[6]、德国西门子奥钢联与奥地利林茨的Voestalpine公司联合开发的EPOSINT(Environmental Process Optimized Sintering)工艺[7]，以及我国宝钢自主开发的BSFGR(Bao-Steel Flue Gas Recirculation)工艺[8]。

### 2.1 工艺特点

1992年，日本新日铁八幡炼铁厂对运行17年的户畑3#烧结机进行了设备改造，采用了主废气循环和提高脱$SO_x$的技术，如图1所示[3,4]。该烧结机面积480 $m^2$，共有32个风箱。改造后的工艺特点是：①烧结机头部(1#~3#风箱，9万$Nm^3/h$)的高氧、低温、低湿烟气循环至烧结机中部使用；②前部4#~13#风箱的低硫、低氧、低温、高湿烟气经除尘后直接排放；③中尾部14#~25#风箱的高硫、低氧、低温、高湿烟气经除尘和镁法脱硫后排放；④尾部(26#~31#风箱，20万$Nm^3/h$)的高硫、高氧、高温、低湿烟气循环至烧结机前部使用。区域性烟气循环工艺的采用，使系统在对烧结的生产率和质量不受影响的情况下，大幅度降低了烟气排放量，减轻了后续除尘和脱硫系统的运行负担，有效地控制了环境污染并促进了节能。

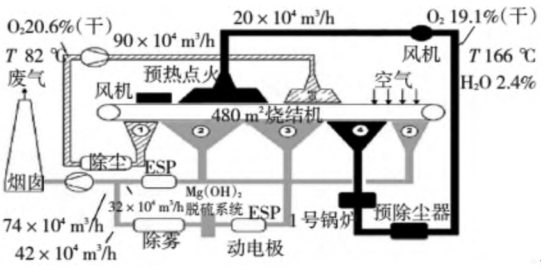



图1 区域性烟气循环工艺示意图

1994年，德国Lurgi公司开发了EOS工艺，并在克鲁斯艾莫伊登烧结厂实现工业化应用，如图2所示[5]。该工艺特点是：①结构简单，改造方便；②从主抽烟道除尘器后直接抽近50%的烟气用于烧结；③热风罩覆盖整个烧结机，需兑

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

入大量新鲜空气;④烧结气体低氧(14%)、低温(120 ℃)、高湿(10%)。该工艺的采用不仅显著降低了烧结烟气排放量,利用了烧结烟气的显热及其可燃成分,而且显著提高了废气中粉尘和 $SO_x$ 的脱除效率,降低了二噁英类和 $NO_x$ 的生成量。

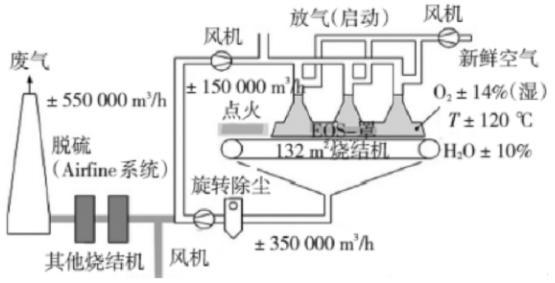



图 2　EOS 工艺示意图

2001 年,德国 HKM 公司开发了 LEEP 工艺,并应用于杜伊斯堡 - 胡金根厂 420 $m^2$ 烧结机,如图 3 所示[6]。该工艺旨在回收烧结机后半段的高氧、高温、低湿、高污染物的烟气进行循环。其工艺特点是:①将烧结机烟气管道一分为二,分别输送烧结机前半段和后半段的烟气;②两部分烟气首先进行热交换,使前半段低温烟气加热至露点温度以上后经除尘直接排放,后半段烟气则冷却至 150 ℃后经除尘循环使用;③热风罩虽然在烧结机长度方向上完全覆盖,但宽度方向上仍允许漏进新鲜空气以弥补氧浓度的不足。LEEP 工艺的实施使烧结烟气减排量达 45%,燃料单耗降低 5 kgce/t-s,而烧结矿的质量并未降低。

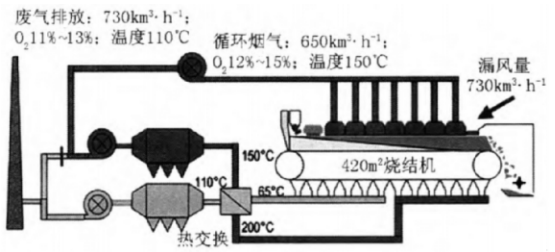



图 3　LEEP 工艺示意图

2005 年,德国西门子奥钢联开发的 EPOSINT 工艺应用于林茨公司 5#烧结机,如图 4 所示[7]。该烧结机面积 250 $m^2$,有 19 个风箱。该工艺特点是:①选择烧结机长度约 3/4 处(11#~16#风箱)的高硫、温度较高的烟气进行循环,烟气循环率为 25%~28%;② 烟气循环管路的切换系统使得该工艺可以灵活地应对各种工艺条件的波动;③热风罩长度方向上覆盖大部分烧结机,宽度方向上不完全覆盖,允许吸入少量空气;④烧结机循环烟气严重不足,混合环冷机的冷却热风,既提高了循环烟气的氧浓度,又利用了环冷机废气显热。该工艺应用前后,在无额外增加环境排放的前提下,产能提高 30%,节省燃料 2~5 kgce/t-s;在不影响烧结矿质量的前提下减排约 30%,$SO_x$ 和 $NO_x$ 排放量有所减少,二噁英和汞浓度明显降低。

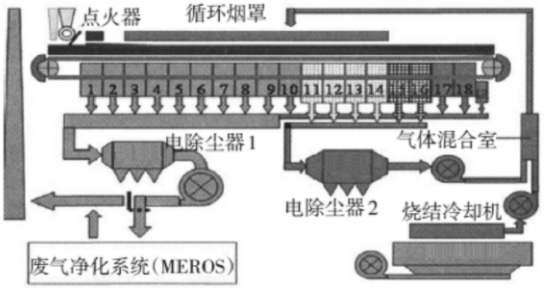



图 4　EPOSINT 工艺示意图

2013 年,宝钢针对烧结烟气特性,结合脱硫脱硝、二噁英深度净化、低温余热高效利用等行业前瞻要求,开发了 BSFGR 工艺,先后在不锈钢分公司 132 $m^2$ 烧结机和宁钢 486 $m^2$ 烧结机进行中试和工程示范,如图 5 所示[8]。以宁钢烧结为例,抽取 1#~5#、20#~23#风箱烟气,送至 6#~16#风箱循环使用。烟气循环率为 35%,将 210~230 ℃的烟气循环利用,实现降低固体燃耗 2.5 kg/t-s、外排烟气量降低 30%,且烧结矿产质量指标不受影响,产量略有提升。

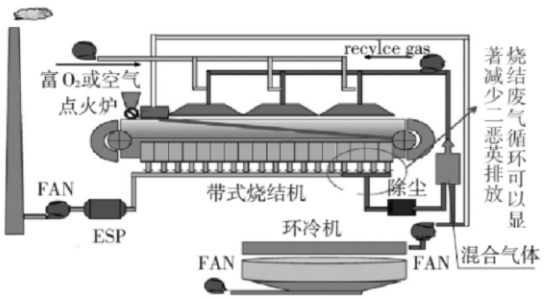



图 5　BSFGR 工艺示意图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 工艺推广现状及分析

烟气循环工艺开发的初衷是降低污染物排放、利用烟气余热提高产能、实现节能。从循环烟气来源看，可分为内、外循环两种模式[9]：内循环在风箱处直接取风，操作灵活，但需外配大功率变频抽风机，工程改造量多，固定投资高，更适于已建烟气净化设施及新建项目；外循环从主抽风机后分流部分烟气，只需外配小功率引风机，改造简便易行，但烟气温度低，烧结效果不明显，更适合改造项目。从现行五种工艺看，除EOS外均属内循环模式。

据本文作者不完全统计，五种工艺的推广现状如表2所示。日本新日铁技术和德国HKM技术除了在本公司有应用外，并未见有向外推广；德国Lurgi公司和德国奥钢联的技术推广效果也不显著；反而是中国市场，因政策扶持以及环境压力，2013年以来已实现多套系统的烟气循环工艺改造或新建，体现了良好的推广效果。

表2 典型循环工艺推广应用现状

| 循环工艺 | 应用企业 | 应用时间 |
|---|---|---|
| 区域性烟气循环技术 | 日本新日铁八幡厂户畑3# | 1992 |
| EOS | 荷兰克鲁斯艾莫伊登的3台烧结机 | 1994 |
| | 安赛乐法国敦刻尔克厂 | 2002 |
| | 中国联峰钢铁2#烧结机 | 2015 |
| LEEP | 德国HKM杜伊斯堡－胡金根厂420 $m^2$ 烧结机 | 2001 |
| EPOSINT | 奥地利林茨Voestalpine公司5#烧结机 | 2005 |
| | 韩国浦项 | － |
| | 中国台湾中龙钢铁2#烧结机 | 2013 |
| BSFGR | 中国宝山钢铁不锈钢分公司2#烧结机 | 2012 |
| | 中国宁波钢铁2#烧结机 | 2013 |
| | 中国沙钢3、4、5#烧结机 | 2013～2015 |

分析烟气循环应用不佳的原因，发现各工艺仍存在相关问题：①若烟气循环率过高，烟气氧浓度将过低，易影响烧结质量；②若循环烟气湿度过高，易加重料层过湿现象；③循环烟气中$SO_2$易在烧结矿中富集，影响高炉生产[10]。各工艺技术特点及应用效果如表3所示。

表3 典型工艺循环气体特点及应用效果

| 工艺 | 取风特点 | 节能率/% | 减排率/% | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 总量 | $SO_2$ | $NO_x$ | 二噁英 | 粉尘 |
| 新日铁 | 高氧、低湿 | 5.5 | 28 | | 1.5 | | 40 |
| EOS | － | 20 | 50 | 40 | 50 | 70 | 45 |
| LEEP | 烧结机后半段 | 14 | 50 | 67 | 75 | 80～90 | 50 |
| EPOSINT | 低温、低氧、高硫、高湿 | 4.4～11 | 25～28 | 29 | 23 | 30 | 30 |
| BSFGR | 高温、高氧、低硫、低湿 | 5 | 30～40 | 10 | 30 | 60 | 35 |

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 3　烟气循环工艺在我国的发展趋势

烟气循环工艺可作为拟建烧结烟气净化降低投资和运行成本以及已建烟气净化改造增产的手段，可以在降低烟气排放总量和污染物排放量的同时，回收烟气余热、降低能耗。我国是钢铁生产大国，然而，对于烧结工艺的余热回收却主要以回收环冷机冷却热风为主，而对于烧结机烟气回用工艺的研究却起步较晚。因此，烟气循环技术在我国还有很大的空间。

典型的烟气循环工艺各具特色，且工艺均较成熟，从当前研发角度来看，开发全新的循环工艺不具备现实意义。因而，烟气循环工艺的发展趋势在于如何根据国情及实际生产需要，采用合适的工艺:

(1) 对拟建脱硫脱硝设施的烧结机，适用于类似 EOS 模式，如国内联峰钢铁。工艺优势在于布置简单，对原有系统改动小，改造简便; 循环风机只起增压作用，投资和运行费用低。但是，由于烟气氧浓度低，须同时配合兑风等措施。

(2) 对于已建烟气脱硫设施的烧结机，可通过烧结机加宽、加长，在不改变原有风机能力的基础上，通过增加循环风机风量来实现提质增产，同时不额外增加外排烟气量及改变原有机头烟气处理系统，实现增产效果: ①回用烧结机头尾烟气，保证循环烟气的氧浓度，稳定烧结生产; ②回用烧结机尾部烟气，保证循环烟气的温度，提升余热回收效率和节能效果; ③回用烧结机中部有害成分含量高的烟气，通过料层降解和吸附作用，提高有害物质的减排效果。此外，针对烟气循环率不够或氧浓度过低的问题，一般采用兑风和混入烧结矿冷却废气的方式来弥补。混入烧结矿冷却废气既能保证烧结氧浓度，还可利用烟气余热实现节能。

## 4　结　语

烧结工序是钢铁行业节能减排和绿色低碳领域的“木桶短板”和“重灾区”，在《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放新标准》(GB 28661 - 2012) 下面临严峻的节能、达标排放的问题，引进高效、节能、环保的烧结新工艺已成为大势所趋。

烟气循环烧结技术不仅能够回用烧结系统产生的废烟气，降低外排烟气量和有害成分，且能利用烟气的余热实现节能效果，具有显著的节能减排双重效益。在我国钢铁行业产能逐渐过剩的未来，产能重组和优胜劣汰势在必行，谁率先开发拥有自主知识产权的集“余热高效回收 - 烟气循环”优势于一身的烧结新工艺，必将拥有企业发展的核心竞争力。

## 参考文献


[1] 徐国群. 烧结余热回收利用现状与发展 [J]. 世界钢铁，2009，(5)：27 - 31.

[2] 于恒，王海风，张春霞. 铁矿烧结烟气循环工艺优缺点分析 [J]. 烧结球团，2014，39(1)：51 - 55.

[3] S. Ikehara，S. Kuba，Y. Terada，et al. Application of Exhaust Gas Recirculation System to Tobata No. 3 Sinter Plant [J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan，1995，81(11)：49 - 52.

[4] 吴锵，王颖生，杨尚宝，等. 国外和首钢炼铁过程环保现状及改进 [J]. 钢铁，2004，39(2)：71 - 77.

[5] 杨红博，李咸伟，俞勇梅. 烧结烟气二恶英减排控制技术研究进展 [J]. 世界钢铁，2011(1)：6 - 11.

[6] 郑绥旭，张志刚，谢朝明. 烧结烟气循环工艺的应用前景 [J]. 中国高新技术企业，2013，9：62 - 64.

[7] Alexander Fleischanderl，Christoph Aichinger，Erwin Zwittag. 环保型烧结生产新技术—Eposint and MEROS [J]. 中国冶金，2008，(11)：41 - 46.

[8] 李咸伟，崔健，杜洪缙，等. 烧结废气循环与深度净化技术的研发与应用 [C] //全国冶金能源环保生产技术会，2014.

[9] 王兆才，周志安，胡兵，等. 烧结烟气循环风氧平衡模型 [J]. 钢铁，2015，50(12)：54 - 59.

[10] 范晓慧，余志元，甘敏，等. 烟气循环烧结的应用现状与研究进展 [C] //2014 年度全国烧结球团技术交流年会论文集，2014：152 - 156.


(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net