SCR脱硝系统内置式燃烧炉温度不均原因分析及对策

陈 磊，李启超
（中冶华天工程技术有限公司，安徽 马鞍山 243061）

摘要： 内置式燃烧炉在SCR脱硝系统运行过程中，普遍存在加热后烟气温度均匀性较差的问题。目前国内广泛采用燃烧器前段遮挡、后段加导流板的方式来提高SCR反应器进口截面温度的均匀性，其中如何合理设置各段导流装置是难点。本文采用FLUENT数值模拟方法来研究燃烧器的设置位置以及前、后段导流装置的布置方式对系统温度场的影响，同时结合典型工程运行时的检测结果，验证了仿真结果的可靠性。结果表明，经过对燃烧器设置位置以及前、后段导流装置的优化，SCR反应器进口截面温度偏差可降低至±5 ℃以下，系统阻力可控制在300 Pa以内。

关键词： 内置式燃烧炉；SCR脱硝反应器；温度均匀性；导流装置；数值模拟
中图分类号： X701 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)05－0075－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.05.074

Analysis and countermeasures of temperature nonuniformity of internal combustion furnace in SCR denitration system

CHEN Lei，LI Qichao
(*MCC Huatian Engineering & Technology Corporation，MA'Anshan* 243061，*Anhui*，*China*)

Abstract: During the operation of the SCR denitration system，there is a widespread problem of poor uniformity of flue gas temperature after heating in internal combustion furnace. At present，the method of shielding the front section of the burner and adding a deflector in the rear section is widely used in China to improve the temperature uniformity in the inlet section of the SCR reactor，and how to properly set the diversion device in each section is difficult. In this paper，the FLUENT numerical simulation method is used to study the influence of the setting position of the burner and the arrangement of the front and rear diversion devices on the temperature field of the system. At the same time，the reliability of the simulation results is verified by combining the test results of typical engineering operations. The results show that after optimizing setting position of the deflector and the front and rear section diversion devices，the temperature deviation of the import section of the SCR reactor can be reduced to less than ±5 ℃，and the system resistance can be controlled within 300 Pa.

Key words: internal combustion furnace; SCR denitration reactor; temperature uniformity; diversion device; numerical simulation

随着国家对钢铁企业超低排放与低碳发展要求的日趋严格，节能性能出众的内置式燃烧炉逐渐成为了SCR烟气脱硝系统的最优选择。然而在内置式燃烧炉的应用初期，时常会出现加热温度不均，燃气耗量过大，脱硝效率低等诸多问题[1-3]，最直接的原因就在于内置式燃烧器无法通过利用热风分布管道提供均匀分布的热源。

收稿日期： 2022－01－20；**修回日期：** 2022－02－22
基金项目： 安徽省重点研究与开发计划(202104a05020014)
作者简介： 陈 磊(1984—)，男，高级工程师，从事大气污染控制工程设计与设备研发工作。

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

对于传统外置式热风炉，目前国内通常利用数值模拟优化设计的方式，在竖直加热烟道以及反应器进口等处设置导流板，其可轻易实现速度场均匀达标[4-6]。根据典型项目中SCR进口截面速度及温度现场检测结果可知，当速度最大相对标准偏差小于平均值的±15%时，温度最大偏差也同时满足小于平均值±10 ℃的标准要求，两者呈相互促进的趋势。但对于内置式燃烧炉系统，沿用外置式系统导流板设置形式常会出现速度场均匀达标，温度场却难以均匀的情况。

针对内置式燃烧系统热源不均匀这一关键性问题，本文通过对典型应用项目加热系统各段进行优化改造，结合计算机数值模拟分析手段，提出了燃烧炉前段、加热段以及后段的优化设计建议与整改对策，以便使温度均匀性满足标准要求，有效地保证脱硝效率。

1 内置式燃烧炉温度不均的分析

1.1 加热不均问题的现场检测

目前国内应用于大、中型生产规模烧结机、带式焙烧机等项目的SCR脱硝系统，由于烟气换热器(Gas Gas Heater，GGH)等设备尺寸以及脱硝塔整体结构形式的限制，SCR进口前烟道一般尺寸较大且多为扁长型(长宽比通常大于5)，通常大型烧结机组的烟道长边可达14 m以上，而考虑到经济性与结构合理性等要求，内置式燃烧炉一般为短边两侧布置[7]。

在实际应用中，燃烧器喷嘴火焰呈现向中心对喷的形式，但由于烧嘴火焰喷射距离与范围有限，且受到上行烟气气流的影响，导致从加热段开始，烟气温度分布不均，进而影响SCR进口烟气温度均匀性，温度偏差不能满足脱硝要求。

例如，某钢厂192 m^2烧结机脱硝系统在直燃炉调试过程中，补燃后的烟道内两侧温度高，中间温度低，最大温度差近30 ℃，反应器进口温度差达到60 ℃，致使催化剂层的温度无法满足(280±10) ℃的设计要求，现场随即进行检测与整改工作。

该项目的SCR反应器进口烟道尺寸长为13 m，宽为2.2 m，在13 m烟道长度方向依次设置A#、B#、C#共3个检测孔，其中：B#检测孔位于烟道中心，A#、C#检测孔分别设置在B#检测孔两侧，距离烟道中心3 m的位置，温度探测器选择1.9、1.4、0.9、0.5 m插深对烟道截面温度进行检测，现场实测数据如表1所示。

表1 SCR反应器进口烟道截面温度检测值

Table 1 Temperature detection value of inlet flue cross section of SCR reactor

检测孔	不同测温插深条件下的温度/℃				平均温度/℃
	1.9 m	1.4 m	0.9 m	0.5 m	
A#	257	276	272	284	272.2
B#	237	245	253	254	247.2
C#	269	283	286	284	280.5

由表1中的数据可以看出，在烟气拐入SCR反应器之前，13 m烟道长度方向两侧温度高，中间温度低，说明烟气在13 m长度方向没有充分混合换热，B#检测孔位置基本无法满足脱硝温度窗口要求。

SCR反应器入口截面尺寸长为13 m，宽为10 m，在13 m长度方向上依次设置a#、b#、c#、d#、e#、f#、g#、h#共8个检测孔，其中d#、e#检测孔位于烟道中心，其他检测孔分别设置在d#、e#检测孔的两侧，间距1 m依次排开，温度探测器选择2.5 m及1 m两种插深对反应器入口截面温度进行检测，现场实测数据如表2所示。

表2 SCR反应器入口截面温度检测值

Table 2 Temperature detection value of inlet cross-section of SCR reactor

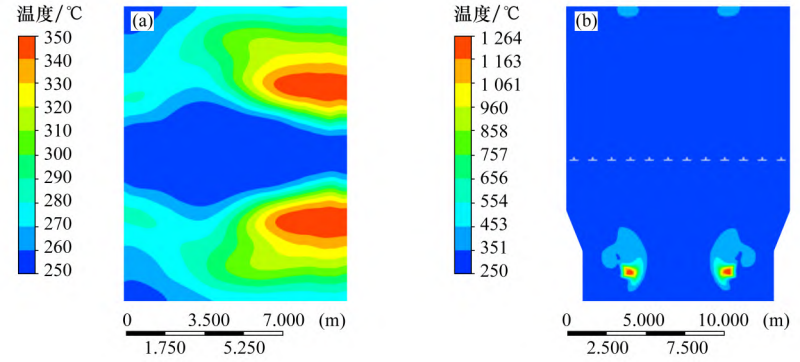
检测孔编号	不同测温插深条件下的温度/℃		平均温度/℃
	2.5 m	1 m	
a#	312	322	317.0
b#	294	293	293.5
c#	270	278	274.0
d#	258	255	256.5
e#	257	258	257.5
f#	271	272	271.5
g#	294	293	293.5
h#	313	321	317.0

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

由表 2 中的数据可以看出，在 SCR 反应器内部 13 m 长度方向同样存在两侧温度高，中间温度低的问题。其中，位于反应器中心的 d#、e#检测孔位置无法满足脱硝温度窗口要求，烟气依然没有足够的混合换热。

1.2　数值模拟验证结果分析

为了进一步了解温差产生的原因，本文采用计算机数值模拟，将某钢厂 192 m^2 烧结机 SCR 反应器入口截面以及进口烟道进行建模计算，模拟温度场仿真，其结果如图 1 所示。



(a) 入口截面；(b) 进口烟道

图 1　SCR 反应器入口截面及进口烟道温度场数值模拟结果

Fig. 1　Numerical simulation results of temperature field of inlet section and inlet flueof SCR reactor

由图 1 可以看出：系统优化前，SCR 反应器入口截面温度分布明显不均，最大温度差接近 100 ℃，高温区域位于反应器两侧位置，反应器中心区域基本为低温区域，且未达到正常脱硝反应温度窗口［图 1(a)］；2 个燃烧器位于加热烟道的两侧，仅覆盖了部分区域，热源均匀性较差［图 1(b)］。由此可见，数值模拟结果与现场的检测得到的温度场分布情况基本吻合。

1.3　加热不均的原因分析

1.3.1　烟道混合段导流装置设置不合理

脱硝系统烟道设计中，在 SCR 前段烟道内设置导流板的主要目的是确保烟气流场的均匀性，同时最大程度地降低系统阻力[8-9]。SCR 进口导流板的合理设置，对 SCR 系统内流场的均匀性起关键的作用，但针对于燃烧炉加热后的混合段而言，不合理的导流装置将影响高温热风与烟气的混合换热，进而导致 SCR 反应器进口温度不均现象。

对于燃烧炉补燃工作过程而言，需要一定的紊流区域来进行充分混合，过早的导流不利于混合换热。某钢厂 192 m^2 烧结机调试阶段内置式燃烧炉加热段后设置有大面积导流板装置，对该段烟气的混合产生了不良影响，温度偏差大于 15 ℃。

1.3.2　燃烧器前段导流装置设置不合理

由于脱硝反应器要求烟气流向为自上而下，而燃烧器加热段的烟气流向一般为自下而上，同时火焰及高温热风自身也会向上漂移，若不设置前段导流装置或设置面积过小，燃烧器烧嘴将被直接冲刷，导致火焰迅速被烟气向上引导，进而导致加热区域变窄。同时，该段烟气整体流速较快，无法有效进行混合换热。相应的，如果前段导流装置设置的面积过大，系统阻力则会明显增加，失去了内置式直燃炉拥有的节能优势，增加了运行成本。

1.3.3　燃烧器安装位置设置不合理

燃烧器在烟道上的安装位置，不仅取决于具体安装段烟道的尺寸，同时也取决于上部烟道的整体结构，同时还要考虑产生火焰与碳钢材质烟道壁的安全保护距离。

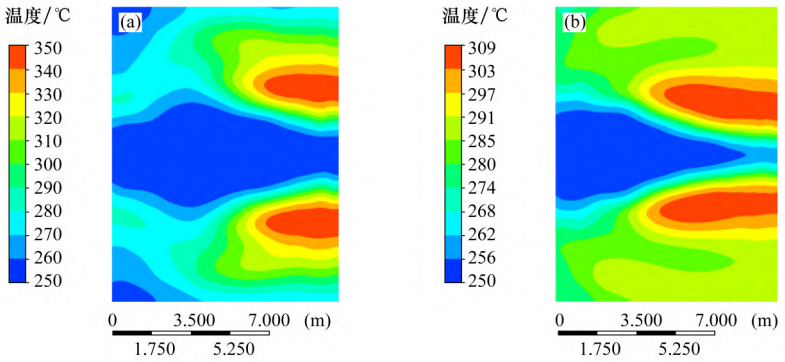
燃烧器一般并不居中设置，而是根据整体结构进行数值模拟，采用最有利于温度均匀的布置形式，同时由于烟道壁板一般为碳钢材质，设计温度一般在 350 ℃左右，需同时考虑火焰喷射区域与烟道壁之间保持一定的安全防护距离。

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

2 提高温度均匀性的改进措施

2.1 取消燃烧器上部临近烟道内的导流装置

早期国内SCR脱硝系统大多采用外置式热风炉的加热方式，即高温烟气通过气流分布管引入主烟道内，由于热源均匀性较好，通过在后端烟道内设置完善的导流或均流装置即可达到速度场与温度场的均匀。当改用内置式燃烧炉系统后，热源均匀性相对较差，在这种条件下，若从热源上端直接开始导流，则烟气在经过2层导流板到达SCR反应器进口时，数值模拟结果显示最大温度差仍在100 ℃左右，且低温区域占比较大，如图2(a)所示。为了解决内置式热源均匀性差的问题，对燃烧器上端导流板进行调整，发现随着该段导流板的缩短，SCR反应器进口的温度均匀性相应提高，当完全取消该段导流板后，最大温度差减少至50 ℃以内，且高温区域占比明显增大，如图2(b)所示。研究表明，对于热源较差的内置式加热系统，为进一步提高温度均匀性，燃烧器上端临近的导流板应以实现混合换热功能为主，避免过早导流影响换热。



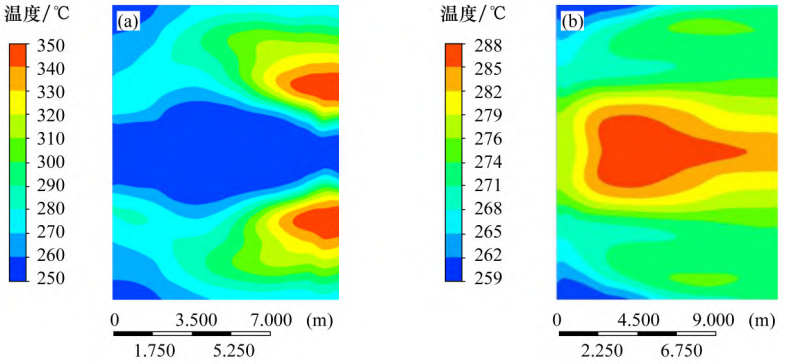
(a) 保留上部导流板；(b) 取消临近导流板

图2 反应器截面温度场数值模拟结果对比

Fig. 2 Comparison of numerical simulation results of cross-section temperature field of reactor

2.2 调整燃烧器前段导流板的结构与遮挡面积

内置式燃烧炉常使用的前段导流板通常会遮挡流通截面积的20%~60%左右。结合本项目进行分析，当前段导流板的遮挡流通面积为20%时，数值模拟结果显示SCR反应器进口截面最大温度差接近100 ℃，SCR反应器中心区域明显低温，难以达到正常脱硝温度窗口，如图3(a)所示。进一步调整导流板遮挡面积向烟道中心延伸增大时，烟气温度均匀性会逐渐改善，当遮挡流通面积达到40%时，SCR反应器



(a) 20%；(b) 40%

图3 不同遮挡烟道流通截面积下的SCR反应器截面温度场数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results of temperature field of SCR reactor under different sheltered circulation cross area

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

进口截面最大温度差小于 30 ℃，且中心及两侧温度均达到正常脱硝温度窗口，基本无低温区域，如图 3(b) 所示。通过系统压差检测，遮挡截面积 40% 时，导流板压损仍可控制在 300 Pa 以内，而当遮挡面积超过 40% 后，导流板的阻损上升明显，很快达到 400 Pa 以上，不利于系统的节能运行。

2.3　调整燃烧器设备安装位置

由于 SCR 脱硝反应器进口前烟道一般为扁长的矩形结构，因此燃烧器应尽量避免单侧安装，在条件允许的情况下，尽量考虑短边两侧对装的结构形式，但短边侧需留有至少 3 m 以上的安装空间，且应适当偏向烟道斜边下设置，以便有利于烟气的混合换热。

2.4　改进措施效果分析

通过采取以上改进措施，基本可以将脱硝系统内置式燃烧炉加热后的烟气温度偏差控制在 10 ℃以内。某钢厂 192 m^2 计算机数值模拟结果如图 4 所示。

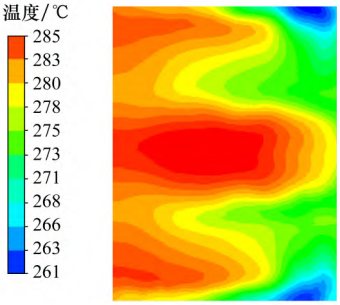


图 4　改进措施实施后反应器截面数值模拟结果

Fig. 4　Numerical simulation results of reactor cross-section after improvement measures are implemented

由图 4 可知，改进措施实施后，系统温度均匀性有明显的改善，最大温度差小于 15 ℃，温度偏差小于 5 ℃，优于脱硝温度均匀性的标准要求(温度最大偏差小于 ± 10 ℃) [10] 。

3　结　论

(1) 对于采用内置式燃烧炉进行补燃的 SCR 脱硝系统，由于燃烧器的加热区域无法均匀地覆盖整个过流断面，直接导致热源加热不均匀；随着烟道尺寸以及烟道长宽比的增大，其所产生的不利影响会愈加明显，SCR 反应器进口断面通常呈现两侧温度高，中间温度低的分布趋势。

(2) 过早对加热后的烟气进行强制导流，不利于混合换热；加热段后设置一段混合区域，对于提高温度场均匀性有明显效果。

(3) 当前段导流装置遮挡流通面积调整至 40% 时，温度均匀性与节能效果达到最优。

(4) 通过对内置式燃烧炉的设置位置以及各种导流方式的研究与优化，可将反应器进口截面温度偏差降低至 ± 5 ℃以内，且阻力可控制在 300 Pa 以下。

参考文献:

[1] 顾庆华，胡秀丽. SCR 脱硝反应区域运行温度影响因素研究 [J]. 洁净煤技术，2015(2) : 86 - 89.
GU Qinghua，HU Xiuli. Research on influencing factors of operating temperature in SCR denitrification reaction area [J]. Clean Coal Technology，2015(2) : 86 - 89.

[2] ZHOU H，CHEN J Z，ZHOU M X，et al. Experimental investigation on the mixing performance of heating gas into the low temperature sintering flue gas selective catalyst reaction facilities [J]. Appl Therm Eng，2017，115: 378 - 392.

[3] WANG J，ZHONG W Q. Simultaneous desulfurization and denitrification of sintering flue gas via composite absorbent [J]. Chin J Chem Eng，2016，24(8) : 1104 - 1111.

[4] 温荣耀，谭潇玲，刘克俭，等. 烧结烟气 SCR 脱硝系统流场数值模拟研究 [J]. 烧结球团，2021，46(5) : 74 - 77.
WEN Rongyao，TAN Xiaoling，LIU Kejian，et al Numerical simulation research on flow field in a sintering gas SCR denitrification system [J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(5) : 74 - 77.

[5] 史夏逸，周向，朱繁，等. 烧结烟气 SCR 脱硝反应器流场模拟与设计优化 [J]. 中国冶金，2018，28(1) : 66 - 70.
SI Xiayi，ZHOU Xiang，ZHU Fan，et al. Flow field simulation and design optimization of SCR denitration reactor for sintering flue gas [J]. China Metallurgy，2018，28(1) : 66 - 70.

[6] 倪建东，陈活虎，薛玉业，等. 烧结烟气 SCR 脱硝系统的数值模拟及工程验证 [J]. 化工环保，2018，38(5) : 581 - 586.
NI Giandong，CHEN Huohu，XUE Yuye，et al. Numerical simulation and engineering verification of SCR denitration system for sintering flue gas [J]. Environmental Protection of Chemical Industry，2018，38(5) : 581 - 586.

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

[7] 王超,岳勇,甄众,等. 烧结烟气脱硝SCR工艺补燃系统节能降碳的探索[J]. 天津冶金,2021,(5):55-59.
WANG Chao,YUE Yong,ZHEN Zhong,et al. An exploration on energy saving and carbon reduction of supplementary combustion system in sintering gas SCR denitration technics [J]. Tianjin Metallurgy,2021,(5):55-59.

[8] 王兆才,刘臣,李继淦,等. 烧结烟气CO_x的生成机理及减排措施[J]. 烧结球团,2021,46(1):15-22.
WANG Zhaocai,LIU Chen,LI Jigan,et al. Generation mechanism and emission reduction measures of CO_x in sintering flue gas [J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(1):15-22.

[9] 周海成,高志芳,龙红明,等. 烧结烟气中NO_x治理技术及发展趋势[J]. 洁净煤技术,2021(5):77-88.
ZHOU Haicheng,GAO Zhifang,LONG Hongming,et al. Governance technology and development trend of NO_x in sintering [J]. Clean Coal Technology,2021(5):77-88.

[10] 朱廷钰. 烧结烟气净化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
ZHU Tingyu. Sintering flue gas purification technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2008.

(上接第12页)

[3] 宋良友,许建军. 烧结机台车起拱原因分析及对策[C]//2010年河北省冶金学会炼铁技术暨学术年会论文集. 石家庄:河北省金属学会,2010:335-339.
SONG Liangyou,XU Jianjun. Cause analysis and countermeasures of sintering machine [C]//Annual Meeting of Ironmaking Technology and Academic of Metallurgy Societyof Hebei Province. Shijiazhuang: Metallurgy Societyof Hebei Province,2010:335-339.

[4] 乔红军. 基于虚拟样机技术的带式烧结机动力学仿真[D]. 东北大学,沈阳,2009.
QIAO Hongjun. The dynamic simulation on sintering machine based on virtual prototype technology [D]. Northeastern University,Shenyang,2009.

[5] 白明华,胡国清,邱坤,等. 无起拱烧结机新理论的研究[J]. 机械工程学报,1995,31(6):68-72.
BAO Minghua,HU Guoqing,QIU Kun,et al. New theory of eleminating the suspending of pallets of a sintering machine [J]. Chinese journal of mechanical engineering,1995,31(6):68-72.

[6] 白明华,任素波. 偶数齿烧结机星轮的齿形优化与特性分析[J]. 燕山大学学报,2012,36(1):8-11.
BAI Minghua,REN Subo. Optimization of tooth profile and characteristics analysis of sintering machine with even-number tooth [J]. Journal of Yanshan University,2012,36(1):8-11.

[7] 刘克俭,李文斌,周胜良,等. 带式烧结机台车起拱的力学分析及仿真[J]. 烧结球团,2012,37(2):22-25.
LIU Kejian,LI Wenbin,ZHOU Shengliang,et al. Analysis and simulation of arching mechanics of straight-line sintering machine pallets [J]. Sintering and pelletizing,2012,37(2):22-25.

[8] 李文斌. 带式烧结机尾部回程道台车起拱技术研究及仿真[D]. 湘潭:湘潭大学,2012.
LI Wenbin. Trolley arching technology research and simulation on tail return channel of belt sintering machine [D]. Xiangtan University,Xiangtan,2012.

[9] 李国权,王勤福,李圭文. 烧结机台车起拱原因分析及处理[J]. 烧结球团,2019,44(4):27-30.
LI Guoquan,WANG Qinfu,LI Guiwen. Cause analysis and treatment of sintering machine [J]. Sintering and pelletizing,2019,44(4):27-30.

[10] 邓勇,赖强. 川威烧结机台车起拱现象分析与处理[J]. 四川冶金,2021,43(3):40-42.
DENG yong,LAI Qiang. Analysis and treatment of sintering machine for Chuanwei [J]. Sichuan Metallurgy,2021,43(3):40-42.

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