球团烟气脱硫除尘改造关键技术研发与应用

陈 荣
(中冶华天工程技术有限公司 工业环境能源分公司,江苏 南京 210019)

摘要: 竖炉球团烟气以其成分复杂、温度低、SO_2 质量浓度高、流量波动大等特点,对循环流化床脱硫工艺的流场分布提出了更高的要求。本文通过分析循环流化床的脱硫机理以及影响脱硫效率的因素,采用 Fluent 数值模拟方法,重点研究文氏管布置、塔内扰流环、除尘器导流板对循环流化床流场的影响;并结合某钢厂球团烟气改造实例,进行对比分析,验证仿真分析的可靠性。仿真结果表明:在脱硫塔烟气入口对称布置文氏管后,气流的速度偏差减小到5.70%;在塔内增加扰流环后,速度突变增加到9.80 m/s;在布袋除尘器入口增设导流板后,各分室的速度偏差减小到7.53%,上述改进均满足设计要求。项目投产后,球团烟气中 SO_2、颗粒物质量浓度分别小于20、5 mg/Nm^3,优于钢铁行业超低排放标准,并能长期稳定运行。

关键词: 球团; 烟气脱硫; 循环流化床; 流场分析; 二氧化硫; 颗粒物
中图分类号: TF046.6; X701 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8764(2023)02-0108-07
doi: 10.13403/j.sjqt.2023.02.030

R&D and application of key technologies for pellet flue gas desulfurization and dust removal transformation

CHEN Rong
(Industrial Environment & Energy Branch Company, MCC Huatian Engineering & Technology Corporation, Nanjing 210019, Jiangsu, China)

Abstract: Due to its complex composition, low temperature, high concentration of SO_2 and large flow fluctuation, the flue gas of the vertical furnace pellet puts forward higher requirements for the flow field distribution of desulfurization process of the circulating fluidized bed. By analyzing the desulfurization mechanism of circulating fluidized bed and the factors affecting desulfurization efficiency, a Fluent numerical simulation method is used to research the influence of venturi arrangement, spoiler ring in the tower and dust collector deflector on the flow field of circulating fluidized bed, while an example of pellet flue gas reform in a steel plant is combined to verify the reliability of the simulation analysis. The simulation results show that, after symmetrically arranging the venturi tube at the flue gas inlet of the desulfurization tower, the velocity deviation of the gas flow is reduced to 5.70%. After adding a spoiler ring in the tower, the velocity mutation is increased to 9.80 m/s. After adding a deflector plate at the inlet of the bag filter, the speed deviation of each chamber is reduced to 7.53%, and all the above improvements meet the design requirements. After the project is put into production, the mass concentration of SO_2 and particulate matter in pellet flue gas is less than 20, 5 mg/Nm^3, respectively, which is superior to the ultra-low emission standard of iron and steel industry and can run stably for a long time.

Key words: pellet; flue gas desulfurization; circulating fluidized bed; flow field analysis; sulfur dioxide; particulate matter

进入21世纪以来,我国钢铁工业取得了长足进步,但在高质量转型发展的同时,也面临越来越严峻的污染物排放压力。烧结、球团工序是钢铁生产中 SO_2、NO_x、颗粒物等污染物的主要排放

收稿日期: 2022-08-08; 修回日期: 2022-10-12
作者简介: 陈 荣(1982—),男,高级工程师,从事烟气脱硫脱硝环境除尘方面的设计和研发工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

源[1-2]。2019 年 4 月生态环境部等五部委联合发布《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》，对钢铁行业污染物排放提出了更严格的要求，其中规定烧结、球团工序的 SO_2、NO_x、颗粒物的超低排放限值分别为 35、50、10 mg/Nm^3[3-4]。半干法循环流化床脱硫工艺具有占地面积小、投资和运营费用少、操作和维护简便、不产生二次污染等优点，在烧结烟气超低排放改造中获得了广泛应用。与烧结烟气相比，球团烟气具有成分复杂、温度低、SO_2 质量浓度高(最大为2 500 mg/Nm^3)、流量波动大等特点。传统的循环流化床(circulating fluidized bed，CFB)脱硫工艺受限于脱硫塔和布袋除尘器的流场分布不合理等因素，对烟气入口 SO_2 质量浓度有一定限制(一般小于 1 500 mg/Nm^3)。因此开发和推广适应于高质量浓度 SO_2 烟气的循环流化床脱除技术，对球团烟气超低排放改造，具有十分重要的意义[5-6]。

近年来，国内外许多学者采用计算机仿真技术，对循环流化床的脱硫设施进行流场仿真和优化设计，如：刘强国等[7]建立了循环流化床脱硫工艺的床体模型，探讨了床层稳定措施；胡金榜等[8]对脱硫塔入口的文氏管结构进行数值模拟，揭示了气体流动特征及对提升管内气体流动的影响。目前大多数研究都集中在探讨单个脱硫塔或者脱硫塔各部件物理流场的合理性，对于循环流化床系统整体的流场分布及其对脱硫效率的影响较少提及。本文通过分析循环流化床的脱硫机理以及影响脱硫效率的因素，采用 Fluent 数值模拟方法，重点研究文氏管布置、塔内扰流环、除尘器导流板对循环流化床流场的影响；并结合某钢厂竖炉球团烟气超低排放改造的实例，对脱硫塔和除尘器进行改进和优化，以满足球团烟气长期稳定超低排放的要求。

1　工艺流程及脱硫效率的影响因数分析

1.1　循环流化床脱硫系统工艺流程

典型的循环流化床脱硫系统由吸收剂制备及添加系统、脱硫塔、物料再循环系统、工艺水系统、布袋除尘器以及仪表控制系统等组成，其工艺流程如图 1 所示。由图 1 可见：烟气从底部进入脱硫塔，经过文丘里管加速后，进入流化床床体，并与除尘器的返料产生激烈的湍动与混合。其中，在文丘里出口扩管段喷入雾化水，可降低脱硫塔内的烟温，从而使得 SO_2 与 Ca(OH)$_2$ 的反应转化为可以瞬间完成的离子反应。在烟气上升过程中，一部分颗粒随烟气被带出脱硫塔，另一部分因自重回流到循环流化床内。净化后的含尘烟气从脱硫塔顶部侧向排出，然后进入除尘器进行气固分离，再被引风机排至烟囱[9]。脱硫生成的副产物通过气力输送至飞灰仓，再通过密闭罐车外排。

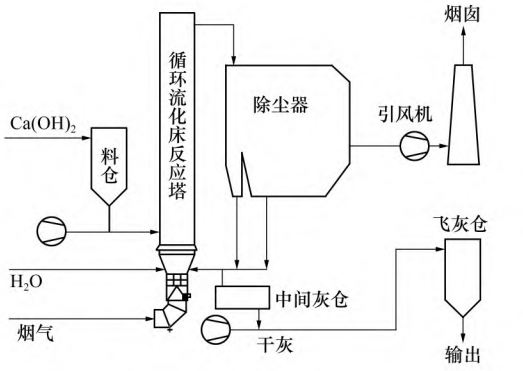


图 1　循环流化床脱硫系统工艺流程

Fig. 1　Process of circulating fluidized bed flue gas desulphurization (CFB-FGD)

1.2　脱硫效率的影响因数分析

1.2.1　趋近绝热饱和温度

趋近绝热饱和温度是指脱硫塔出口烟气温度与烟气绝热饱和温度的差值。一般通过增加脱硫塔内的喷水量来降低出口烟气温度，从而降低趋近绝热饱和温度。随着趋近饱和温度的降低，脱硫塔的脱硫效率明显升高，这是因为随着趋近绝热饱和温度的降低，烟气的相对湿度升高，水的蒸发速率降低，液相的停留时间也相应延长。由于 SO_2 和 Ca(OH)$_2$ 在液相中的反应以离子状态进行，其反应迅速，因此脱硫效率明显升高。但是趋近绝热饱和温度过低，容易使设备内表面结露，导致设备腐蚀，最终影响脱硫系统的正常运行。

1.2.2　钙硫比

较高的钙硫比(质量比)有利于提高脱硫效率。一般而言，脱硫剂以干粉的形式被喷入脱硫塔内。当钙硫比小于 2 时，随着钙硫比的增加，脱硫效率增加较快；当钙硫比大于 2 时，随着钙硫比的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

进一步增加，脱硫效率增加趋缓[10]。

1.2.3 反应塔内物料质量分数

在趋近绝热饱和温度和钙硫比一定的条件下，脱硫效率随着脱硫塔内返料的增加而升高。脱硫塔内物料质量分数的增加，增大了 SO_2 与脱硫剂的接触面积，同时也增大了脱硫塔的压降和布袋除尘器的负荷，因此应当兼顾脱硫效率和能量消耗的平衡。

1.2.4 脱硫塔烟气流速及停留时间

吸收塔烟气流速与颗粒下滑速度的关系如图2所示。由图2可知：在一定范围内，保持烟气在脱硫塔内的停留时间不变，随着脱硫塔设计流速的增加，脱硫效率也相应增大；此外，在脱硫塔内，较高的设计流速可以承担较高的物料质量分数。由于 SO_2 与脱硫剂的接触面积增大，当气固间的滑落速度或颗粒的雷诺数增加时，$Ca(OH)_2$ 颗粒表面的气膜厚度减小，SO_2 进入 $Ca(OH)_2$ 的传质阻力减小，传质速率加快，从而加快了 SO_2 与 $Ca(OH)_2$ 颗粒的反应。

1.2.5 雾化粒径

高压回流喷枪与双流体喷枪雾化效果比较如表1所示。由表1可知：相较于双流体喷枪，高压回流喷枪的雾化粒径较大，一般为100 μm以上。由于高压回流喷枪雾化水的比表面积小，故所需蒸发时间延长、喷水量减少。循环流化床脱硫反应主要分为离子反应和分子反应两个阶段。研究表明，脱硫反应起决定作用的是离子反应阶段，因此增加离子反应的时间，即延长水分蒸发时间是关键。实践表明，增大喷枪雾化的粒径，相应增加了离子反应阶段的时间，是行之有效的措施[10]。

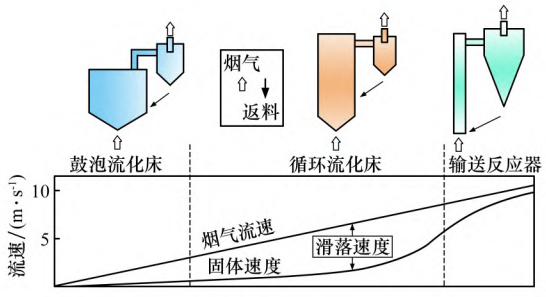


图2 吸收塔烟气流速与颗粒下滑速度的关系

Fig. 2 Relationship between flue gas velocity and particle sliding velocity

表1 高压回流喷枪与双流体喷枪雾化效果比较

Table 1 Comparison of atomization effect between high pressure reflux spray gun and two-fluid spray gun

项目	D_{max}/μm	D_{90}/μm	D_{50}/μm	D_{32}/μm	平均蒸发时间/s	最长蒸发时间/s
高压回流喷枪	527	329	210	167	1.2	5.0
双流体喷枪	360	207	110	60	0.3	1.3

注：D_{max}为最大雾化粒径，mm；D_{90}为粒级占比为0～90%液滴的平均粒径，mm；D_{50}为粒级占比为0～50%液滴的平均粒径，mm；D_{32}为某一液滴的粒径，该液滴的体积与表面积之比和所有液滴总体积与总表面积之比相等，mm。

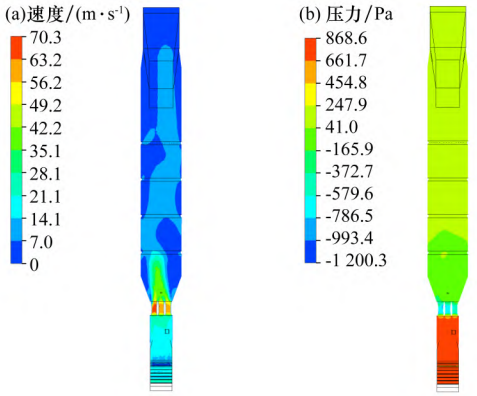
2 流场分布模拟与优化设计

2.1 脱硫塔

采用ANSYS Fluent软件对脱硫塔进行流场模拟，选择Realizable-k湍流模型，设置脱硫塔入口烟气流速为18 m/s、烟气密度为0.8 kg/m^3、烟气温度为130 ℃。模拟得到脱硫塔的速度和压力分布如图3所示。由图3可知，当烟气流速为6 m/s时，气固滑落速度达到最大。而加大气固滑落速度，能提高脱硫效率，因此实际应用中将烟气空塔流速由原来的4.3 m/s提高到6.2 m/s。此外，延长脱硫剂和烟气的反应时间对提高脱硫效率有直接作用，因此，将烟气反应时间由4.9 s提高到7.0 s。在实际项目设计中，采取缩小脱硫塔直径(提高塔内烟气流速)，增加脱硫塔高度来提高脱硫效率[10-11]。

脱硫塔文丘里由7个文氏管组合而成，文氏管喉口断面的速度分布如图4所示。由图4可知：文氏管布置角度的不同，对脱硫塔入口气流分布以及7个文氏管喉口流速的均匀性有显著影响。分析原因认为，球团烟气进入脱硫塔时会经过一个90°弯头，虽然有导流板的均流作用，还是会导致部分气流偏析，使得烟气再经过上升管到达文氏管入口时，每个文氏管分配的流量不一致。

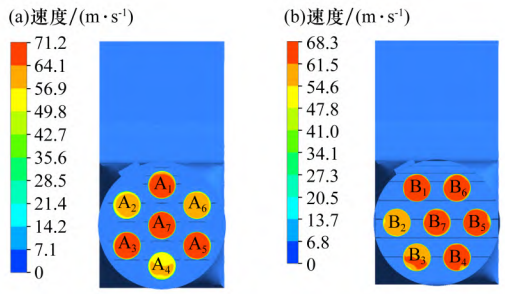
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 速度分布；(b) 压力分布

图 3　脱硫塔内烟气速度和压力分布

Fig. 3　Flue gas velocity and pressure distribution of desulfurization tower



(a) 优化前；(b) 优化后

图 4　文氏管喉口断面烟气速度分布

Fig. 4　Flue gas velocity distribution at the throat of a venturi

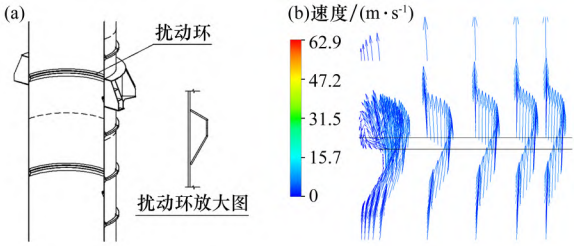
文氏管喉口断面速度偏差计算结果如表 2 所示。由表 2 可知，优化前 7 个文氏管速度的平均值为 62.12 m/s，方差为 4.89，其速度分布不均匀，其中最大的速度偏差达到 13.06%（A_5 文氏管），超出设计要求；优化后，7 个文氏管速度的平均值为 61.54 m/s，方差为 2.14，其速度分布较均匀，其中最大的速度偏差为 5.70%（B_3 文氏管），满足设计要求。由此可见，文氏管相对于烟气入口呈对称布置时，流场的均匀性最好。

表 2　文氏管喉口断面速度偏差

Table 2　Venturi throat section velocity deviation

序号	优化前		序号	优化后	
	平均速度/(m·s⁻¹)	速度偏差/%		平均速度/(m·s⁻¹)	速度偏差/%
A_1	59.59	4.25	B_1	63.11	2.48
A_2	64.13	3.13	B_2	62.15	0.98
A_3	55.87	11.19	B_3	65.26	5.70
A_4	65.80	5.59	B_4	58.43	5.33
A_5	54.95	13.06	B_5	59.21	3.94
A_6	67.48	7.94	B_6	61.57	0.04
A_7	67.05	7.35	B_7	61.07	0.77

为加强脱硫塔内的扰动，在脱硫塔的不同位置设置扰动环，如图 5(a) 所示。脱硫塔扰流环速度流线如图 5(b) 所示。由图 5(b) 可知，烟气在靠近壁面位置的上升速度为 4.60 m/s，经过扰流环后，该速度增加到 9.80 m/s，速度的大小和方向都发生了突变，形成了局部涡流。由此可知，扰流环加强了烟气的湍流程度，提高了气流与物料的传热传质效果，有利于提高脱硫效率[8]。



(a) 扰流环布置；(b) 扰流环速度流线

图 5　脱硫塔扰流环布置及速度流线

Fig. 5　Layout of the turbulence ring and velocity streamline of the desulfurization tower

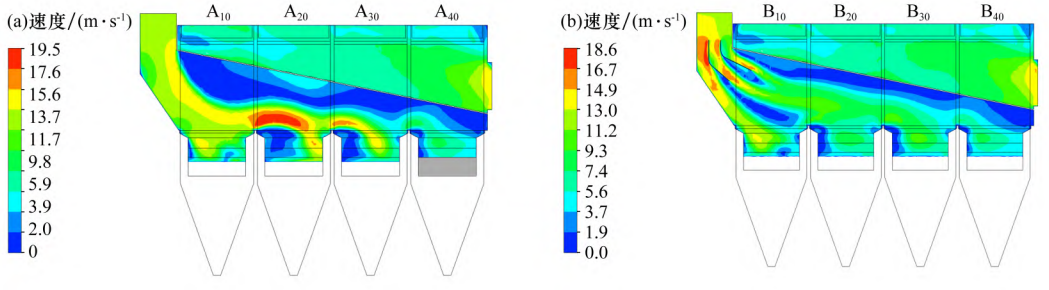
2.2　布袋除尘器

采用 ANSYS Fluent 软件对布袋除尘器的多孔介质域进行模拟，分别建立不设导流板、设导流板的除尘器模型，选择 Realizable-k 湍流模型，设置除尘器入口烟气流速为 9 m/s、烟气密度为 0.94 kg/m³、烟气温度为 75 ℃。

优化前后的除尘器入口烟气速度分布如图 6 所示。图 6(a) 中，从除尘器入口方向起仓室的编号依次为 A_{10} ~ A_{40}；图 6(b) 中，从除尘器入口方向起仓室的编号依次为 B_{10} 到 B_{40}。除尘器入口烟气速度偏差对比如表 3 所示。由图 6(a)、表 3 可知：优化前，除尘器进气箱的气粉混合物多集中在 A_{10}（进口断面平均速度为 6.73 m/s），往后依次递减，在 A_{40} 内的气粉混合物最少，几个仓室的负荷相差较大（最大速度偏差为 10.1%），4 个灰斗的卸料不均匀，容易导致循环灰返料不平衡，从而影响脱硫装置稳定运行；而 A_{20} 会产生局部涡流，容易发生堵料现象，使得烟气对壁板冲刷严重。由图 6(b)、表 3 可知：优化后，由于导流板

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

采用大倾角设置(不容易积料),使得进气箱的气粉混合物分布较均匀,除 B_{10} 箱体的进口平均速度较大外(速度偏差为 7.53%),其余 3 个箱体的负荷基本一致,4 个灰斗的泄灰基本一致,有利于脱硫装置的平稳运行。综合考虑,优化后的除尘器设计方案能减少带料烟气对导流板的冲刷,使气粉混合物的分布更均匀。



(a) 优化前; (b) 优化后

图 6 优化前后除尘器入口烟气速度流场对比

Fig. 6 Comparison of flue gas velocity at the inlet of the dust collector before and after optimization

表 3 除尘器各分室进口平均速度偏差对比

Table 3 Comparison of the velocity deviation for each sub-chamber of the dust collector

优化前			优化后		
序号	平均速度/(m·s⁻¹)	速度偏差/%	序号	平均速度/(m·s⁻¹)	速度偏差/%
A_{10}	6.73	10.10	B_{10}	6.17	7.53
A_{20}	6.06	0.16	B_{20}	5.58	2.24
A_{30}	5.84	3.59	B_{30}	5.55	2.79
A_{40}	5.57	8.61	B_{40}	5.52	3.35

3 实际应用

3.1 原有脱硫装置运行状况

某钢厂现有 1 条 14 m^2 的竖炉球团生产线,采用循环流化床(CFB)脱硫工艺[图 7(a)],脱硫入口 SO_2、NO_x、颗粒物质量浓度分别为 1 500 ~ 2 500、~15、80 mg/Nm^3,设计排放指标: SO_2 质量浓度≤100 mg/Nm^3,颗粒物排放质量浓度≤30 mg/Nm^3。经过多年的控制和调整,目前运行排放指标: SO_2 质量浓度为 60 ~ 80 mg/Nm^3,颗粒物质量浓度为 20 ~ 30 mg/Nm^3,未达到超低排放要求。由于脱硫出口烟气温度控制比较低(约为 65 ℃),而球团烟气成分复杂,氯离子等杂质元素质量分数高,其在除尘器内部隔板(烟气流通状况教差的区域)出现结露,严重腐蚀除尘器[图 7(b)],导致除尘器的颗粒物排放超标。



(a) 循环流化床脱硫设施; (b) 除尘器内部隔板腐蚀

图 7 原有循环流化床脱硫装置及除尘器内部隔板腐蚀情况

Fig. 7 The layout of the original CFB desulfurization facility and the corrosion problem of the original dust collector

3.2 球团烟气脱硫除尘改造方案

针对某钢厂脱硫装置在运行过程中通过增加钙硫比、降低趋近绝热饱和温度等常规手段仍不能稳定达标排放,考虑改造成本和技术风险等因素,采用如下优化和改造方案提高脱硫效率。

(1) 新建循环流化床脱硫系统。除原有增压风机系统进行利旧、移位处理外,其他装备均拆除,在原有场地新建脱硫系统; 重新设计脱硫塔,

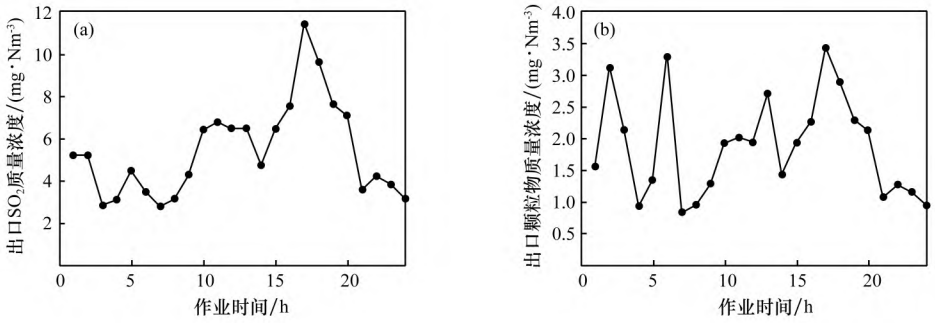
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

优化塔内流场分布，提高气固滑落速度，保持合理的脱硫反应时间; 新增布袋除尘器，增加过滤面积，保证烟囱出口颗粒物排放小于 10 mg/Nm^3; 更换工艺水系统，把双流体喷枪改成高压回流喷枪。针对原有除尘器腐蚀的问题，采用 316L 不锈钢(该材料抗氯离子腐蚀性能优越) 制作除尘器中箱体、上箱体与烟气接触的部位。

(2) 新建布袋除尘器(可增加 30% 的过滤面积) 。由于场地限制，除尘器采用单列四室布置，其入口距离最远箱体为 21 m。由于脱硫专用除尘器入口粉尘的质量浓度高，并且烟气中脱硫剂的质量浓度达 600 ~ 1 000 g/Nm^3，如果导流板设置不合理容易导致积料，严重影响除尘器运行。因此，为保证每个室进气的均匀性，在除尘器烟道进风口设置导流板。

3.3　应用效果

基于上述循环流化床处理高硫球团烟气的关键技术研发，制定某钢厂球团烟气脱硫除尘改造方案，经过 4 个月的紧张施工，项目顺利投产。机组运行 6 个月后，经过第三方检测，污染物排放情况如图 8 所示。由图 8 可知: 在球团生产满负荷烟气情况下，入口烟气 SO_2、颗粒物质量浓度分别为 2 300、30 mg/Nm^3 时，出口烟气 SO_2、颗粒物质量浓度稳定在 20、5 mg/Nm^3 以内，优于钢铁行业超低排放标准。



(a) SO_2; (b) 颗粒物

图 8　球团烟气循环流化床脱硫烟囱出口污染物排放情况

Fig. 8　Emission of pollutants at the outlet of the CFB desulfurization stack for pellet flue gas

4　结　论

本文针对球团烟气成分复杂、温度低、SO_2 质量浓度高、流量波动大等特点，开发适应高 SO_2 质量浓度的循环流化床脱硫工艺，得到如下结论。

(1) 脱硫工艺水系统采用高压回流喷枪，增大液滴粒径，延长液滴在塔内的蒸发时间，强化塔内 $Ca(OH)_2$ 和 SO_2 的离子反应，显著提高循环流化床脱硫效率。

(2) 通过加大塔内烟气流速和加高脱硫塔高度，增加气固滑落速度，保证合理的反应时间，是提高循环流化床脱硫效率的前提。

(3) 采用 Fluent 数值模拟方法，对文氏管、塔内扰流环、除尘器导流板进行分析，结果表明: 将脱硫塔文氏管相对于烟气入口对称布置时，气流的速度偏差减小到 5. 70%; 在塔内增加扰流环后，气流速度突变增加到 9. 80 m/s; 在布袋除尘器入口增设导流板后各分室的速度偏差减小到 7. 53%，满足设计要求。

参考文献:

[1] 刘建辉,赵士奇,程华,等. 迁钢球团烟气超低排放关键技术集成与应用[J]. 中国冶金,2020,30(10) : 98 - 102.
LIU Jianhui,ZHAO Shiqi,CHEN Hua,et al. Integration and application of key technologies for ultra-low emission of flue gas in Qiangang pelletizing plant[J]. China Metallurgy,2020,30(10) : 98 - 102.

[2] 贺克斌. 打赢蓝天保卫战需要加快钢铁行业超低排放改造[N]. 中国环境报,2019 - 05 - 06(3) .
HE Kebin. Winning the battle to defend the blue sky requires speeding up the ultra-low emission transformation of the steel industry[N]. China Environment News,2019 - 05 - 06(3) .

[3] 杨晓东,张丁辰,刘辊,等. 球团代替烧结: 铁前节能

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

低碳污染减排的重要途径[J]. 工程研究:跨学科视野中的工程,2017,9(1):44-52.
YANG Xiaodong, ZHANG Dingchen, LIU Gun, et al. Pellets instead of sintering: An important way to save energy and reduce pollution and reduce emissions before ironmaking process[J]. Engineering research: Engineering in an interdisciplinary perspective,2017,9(1):44-52.

[4] 魏金海,赵磊. 大型钢铁企业炼铁工序节能减排工作实践[J]. 冶金动力,2020,239(1):84-86.
WEI Jinhai, ZHAO Lei. Practice of energy saving and emission reduction in the ironmaking process of large steel enterprises[J]. Metallurgical Power,2020,239(1):84-86.

[5] 王飞,张奇,闫小燕,等. 几种烧结球团烟气超低排放技术对比与分析[J]. 矿业工程,2021,19(3):53-55;60.
WANG Fei,ZHANG Qi,YAN Xiaoyan,et al. Comparison and analysis of several ultra-low emission technologies for sintered pellets[J]. Mining Engineering,2021,19(3):53-55;60.

[6] 黄学静,徐文青,魏耀东,等. 半干法循环流化床脱硫反应器内构件研究进展[J]. 化工进展,2014,33(10):2540-2545;2569.
HUANG Xuejing,XU Wenqing,WEI Yaodong,et al. Research progress on internal components of semi-dry circulating fluidized bed desulfurization reactor[J]. Chemical Industry Progress,2014,33(10):2540-2545;2569.

[7] 刘强国,丁泽国,郑丽君. 循环流化床半干法脱硫床体建模以及稳床措施研究[J]. 纯碱工业,2019(3):35-37.
LIU Qiangguo,DING Zeguo,ZHENG Lijun. Modeling of semi-dry desulfurization bed in circulating fluidized bed and study of bed stabilization measures[J]. Soda Industry,2019(3):35-37.

[8] 胡金榜,李艳平,陈安新,等. 循环流化床脱硫反应器入口结构对气体流动影响数值模拟[J]. 化学工程,2005,33(1):20-23.
HU Jinbang, LI Yanping, CHEN Anxin. Effect of the venturi in-let configuration on gas flow in circulating fluidized bed desulfrization reactor numerical simulation[J]. Chemical Engineering,2005,33(1):20-23.

[9] 烟气脱硫工艺设计标准:GB 51284—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2018.
Stand for design of flue gas desulfurization: GB 51284—2018[S]. Beijing: China Planning Press,2018.

[10] 蒋文举,赵君科,尹华强,等. 烟气脱硫脱硝技术手册(第二版)[M]. 北京:化学工业出版社,2017.
JIANG Wenju, ZHAO Junke, YIN Huaqiang, et al. Technical manual for flue gas desulfurization and denitrification(2nd Edition)[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2017.

[11] 汪军盛,叶猛,朱廷钰,等. 循环流化床脱硫反应器流场特性实验研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2014,31(2):129-135.
WANG Junsheng,YE Meng,ZHU Tingyu,et al. Experimental study on the characteristics of the flow field in a circulating fluidized bed desulfurization reactor[J]. Journal of Guizhou University(natural science),2014,31(2):129-135.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net