

水泥分解炉 SNCR 脱硝的数值模拟研究

张乐宇¹, 张忠孝¹, 陈立新², 付艳辉²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 北京汉能清源科技有限公司, 北京 100071)

摘要: 选取吉林某 3 200 t/d 新型干法水泥生产线为研究对象, 使用 Ansys-Fluent 软件进行仿真数值模拟, 在得到分解炉内部热态规律的基础上, 探究影响喷氨脱硝效果的因素。实验分别研究了喷氨高度、喷氨速度、喷氨角度、氨氮比、氨水雾化粒径、喷氨深度、喷口数量各因素对脱硝效果的影响。结果表明: 优化后的喷氨高度为 42 m, 喷氨速度为 80 m/s, 喷氨角度为 0°, 氨氮比为 1.8, 氨水雾化粒径为 100 μm , 喷氨深度为 750 mm, 喷口数量为 4 个, 沿圆周呈 90°均匀分布。在此优化工况条件下, 可以达到 76.89% 的脱硝效率。

关键词: 分解炉; 选择性非催化还原 (SNCR); 脱硝; 数值模拟

中图分类号: TK 175 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of SNCR Denitration in Cement Precalciners

ZHANG Leyu¹, ZHANG Zhongxiao¹, CHEN Lixin², FU Yanhui²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Beijing Hiner Technology Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: A 3 200 t/d new type of dry-process cement production line in Jilin was chosen as the research object. The simulation was carried out by using Ansys-Fluent software. Based on the thermal law inside the precalciner, the factors influencing ammonia denitrification were explored. The effects of ammonia injection height, ammonia injection rate, ammonia injection angle, ammonia nitrogen ratio, ammonia water atomization particle size, ammonia injection depth and nozzle number on the out-of-stock effect were studied. The experimental results show that the optimized ammonia injection height is 42 m, the ammonia injection rate is 80 m/s, the ammonia injection angle is 0°, the ammonia nitrogen ratio is 1.8 and the ammonia water atomizing particle size is 100 μm , the ammonia injection depth is 750 mm, the number of nozzle is 4, evenly distributed along the circumference of 90°. Under this optimized working conditions, it can achieve the denitrification efficiency of 76.89%.

Keywords: precalciner; selective non-catalytic reduction (SNCR); denitrification; numerical simulation

收稿日期: 2018-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0601503)

第一作者: 张乐宇 (1992-), 男, 硕士研究生。研究方向: 脱硝数值模拟研究。E-mail: no.1007@163.com

通信作者: 张忠孝 (1959-), 男, 教授。研究方向: 燃煤污染物减排技术。E-mail: zhzhx222@163.com

我国水泥年产量已达 24 亿 t，占世界水泥产量的 55%，其生产过程需要消耗标准煤 2.6 亿 t 和电 2 000 亿 kW·h。水泥生产会导致大气污染物的大量排放，带来严重的环境污染问题，其中氮氧化物(NO_x)的排放占全国排放量的 8%~10%，仅次于火力发电和汽车尾气。 NO_x 是形成酸雨、光化学烟雾的主要物质之一，也是形成灰霾的主要前体物和重要的大气污染物。我国《“十三五”生态环境保护规划》中指出，水泥等重污染行业应大力推进清洁能源的使用，大幅削减 NO_x 等大气污染物的排放^[1]。

对于水泥生产线而言，脱硝较常采用选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)和选择性非催化还原(selective non-catalytic reduction, SNCR)^[2]。由于 SCR 所使用的催化剂较易中毒，生产成本低^[3]，因此大部分水泥生产线采用 SNCR 脱硝技术。本文采用数值模拟方法，分析影响 SNCR 脱硝效率的因素，并与生产线实际运行的脱硝效率进行对比，在得到各因素对脱硝效率影响的基础上，选取各因素最佳运行条件，得到优化后的运行工况，较为显著地提高了 SNCR 运行效率，为水泥生产线 SNCR 脱硝工艺的运行优

化提供了参考。

1 分解炉概述和数值模拟方法

1.1 分解炉结构及网格划分

分解炉炉型为第三代 TTF 型，具有两缩口、三喷腾特性，其立式剖面图如图 1(a)所示。

依据分解炉实际尺寸，利用 Gambit 软件建立三维模型，如图 1(b)所示。煤粉燃烧器分两层布置，每层对称布置 2 个，共布置 4 个；三次风管位于炉体第一段主体起始位置处，呈对冲分布；水泥生料下料口位于炉体第二段主体靠近缩口处，水泥生料撒料箱位于炉体第一段主体与主燃区煤粉燃烧器所在高度持平。最下方为烟气进口，最上方为总出口，分解炉总体布局为九进口一出口。

根据炉型特征，将模型主体按照两缩口、三喷腾的设计划分为 6 个区域，每个区域均以结构网格为主、非结构网格为辅的原则划分网格，在煤粉燃烧器喷口、烟气进口及三次风管进口附近采用局部网格加密处理。经 Fluent 软件检测，网格总数约为 106 万，数量适中，满足计算要求。网格划分如图 1(c)所示。

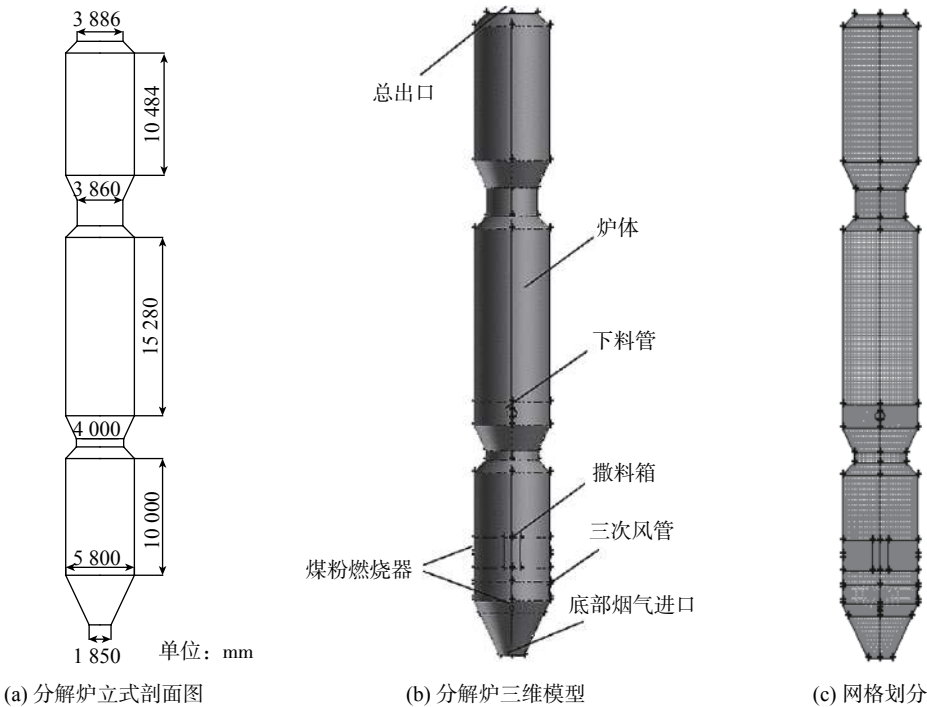


图 1 TTF 型分解炉物理模型及网格划分

Fig.1 Physical model of TTF precalciner and its meshing

1.2 分解炉设计参数及边界条件

表 1 分解炉设计参数
Tab.1 Design parameters of precalciner

分解炉 型号	产能/ (t·d ⁻¹)	耗煤量/ (t·h ⁻¹)	炉体 内径/mm	气体停留 时间/s	炉内平均 温度/℃
TTF	3 800	11	5 800	5.7	880

表 2 实验工况
Tab.2 Experimental conditions

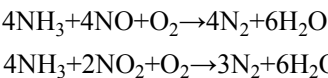
参数	温度/℃	质量流量/(kg·s ⁻¹)
烟气进口	1 070	27.68
三次风进口	830	22.66
燃烧器进口	70	4 个进口均为 0.775
生料进口	780	上层 15.7 下层 62.8
总出口	800	131.94

1.3 数值模拟方法

- a. 气相湍流流动模型选择可实现 $k-\varepsilon$ 模型。
- b. 组分输运模型中煤粉与 CaCO_3 均采用有限速率/涡耗散模型。煤粉燃烧分为两步反应，先生成 CO ，再生成 CO_2 ，反应式为 $2\text{C}+\text{O}_2=2\text{CO}$ ， $2\text{CO}+\text{O}_2=2\text{CO}_2$ 。 CaCO_3 分解为一步反应，反应式为 $\text{CaCO}_3=\text{CaO}+\text{CO}_2$ 。
- c. 气固两相流选择随机颗粒轨道模型 (DPM)，跟踪 11 200 个煤粉颗粒轨迹。
- d. 辐射传热模型选用离散坐标 (DO) 模型，使用加权总和和灰色气体模型 (WSGGM) 来计算气相的吸收系数。

e. 在煤粉燃烧中， NO_x 根据形成原理不同可分为：热力型 NO_x 、燃料型 NO_x 、快速型 NO_x ^[4]。热力型 NO_x 是由氮气在分解炉内的高温下被氧化形成，同时包含回转窑输入分解炉的底部进口烟气中的热力型 NO_x 含量；燃料型 NO_x 是由燃料氮氧化形成；快速型 NO_x 是在火焰前锋面的快速反应中形成。一般煤粉燃烧过程中快速型 NO_x 占 NO_x 总量的比例很小，可以忽略不计，因此只考虑热力型 NO_x 及燃料型 NO_x ^[5]。

采用 NH_3 作为还原剂时，在温度窗口 900~1 100℃ 内， NH_3 还原 NO_x 的反应机理为



当反应温度超过温度窗口时，副反应开始占据主导地位： $4\text{NH}_3+5\text{O}_2\rightarrow 4\text{NO}+6\text{H}_2\text{O}$ ，因此选取合适

的位置使其温度在反应温度窗口内至关重要。

SNCR 脱硝模型中氨水入射选用 Droplet 模型，入射溶液氨的质量分数为 20%，喷射量为 0.45 t/h，同时追踪 1 600 个粒子轨迹^[6]。对计算过程采用压力与速度耦合的 Simple 算法及较低的松弛因子，采用二阶迎风离散格式，收敛标准取连续性 & 能量方程的余项小于 10^{-6} ，其余各项余项小于 10^{-3} ^[7]。

2 数值模拟方案设定

数值模拟过程采用控制变量法，针对影响 SNCR 脱硝效率的因素依次进行模拟分析，探究不同因素对脱硝效率的影响。工况设定时每次仅改变初始工况中的 1 个实验变量，保持其他参数不变。初始工况条件设定如表 3 所示。该工况条件下，数值模拟的脱硝效率为 55.62%，与生产线实际运行的脱硝效率 58.70% 相比，误差为 5.28%，说明模拟结果较为准确，数值模拟方法可行。

表 3 初始工况条件设定
Tab.3 Initial working conditions setting

喷氨高 度/m	喷氨速度/ (m·s ⁻¹)	喷氨角 度/(°)	氨氮 比	雾化粒 径/μm	喷氨深 度/mm	喷口数 量/个
42	40	0	1.6	60	500	6

2.1 喷氨高度对脱硝效果的影响

保持其他参数不变，仅改变喷氨高度，探究喷氨高度对 NO_x 脱除效率的影响。喷氨高度分别设定为 48、46、44、42 m，数值模拟结果如图 2 所示。

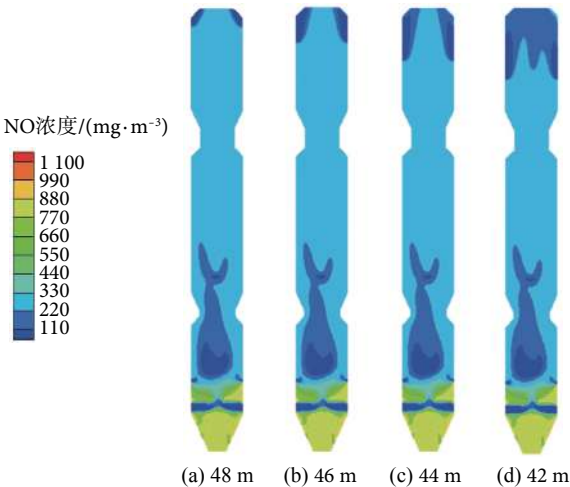


图 2 不同喷氨高度下断面 NO 浓度分布
Fig.2 Distribution of NO concentration at different ammonia injection heights

2.2 喷氨速度对脱硝效果的影响

保持其他参数不变, 仅改变喷氨速度, 探究喷氨速度对 NO_x 脱除效率的影响。喷氨速度分别设定为 20, 40, 60, 80 m/s, 数值模拟结果如图 3 所示。

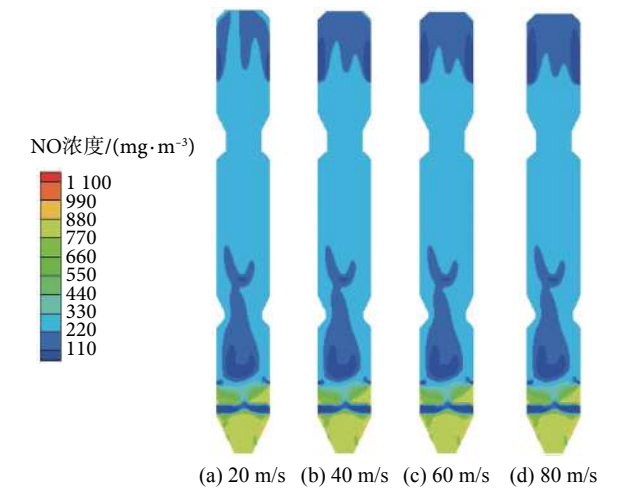


图 3 不同喷氨速度下断面 NO 浓度分布

Fig.3 Distribution of NO concentration at different ammonia injection rates

2.3 喷氨角度对脱硝效果的影响

保持其他参数不变, 仅改变喷氨角度, 探究喷氨角度对 NO_x 脱除效率的影响。喷氨角度分别设定为 0, 20, 40, 60°, 数值模拟结果如图 4 所示。

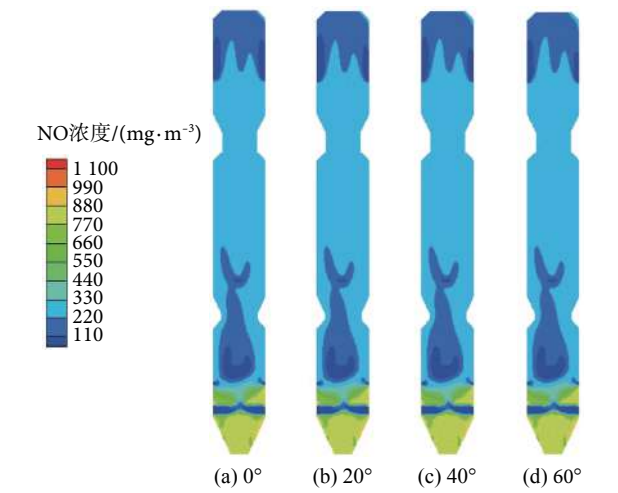


图 4 不同喷氨角度下断面 NO 浓度分布

Fig.4 Distribution of NO concentration at different ammonia injection angles

2.4 氨氮比对脱硝效果的影响

保持其他参数不变, 仅改变氨氮比, 探究氨

氮比对 NO_x 脱除效率的影响。氨氮比分别设定为 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 数值模拟结果如图 5 所示。

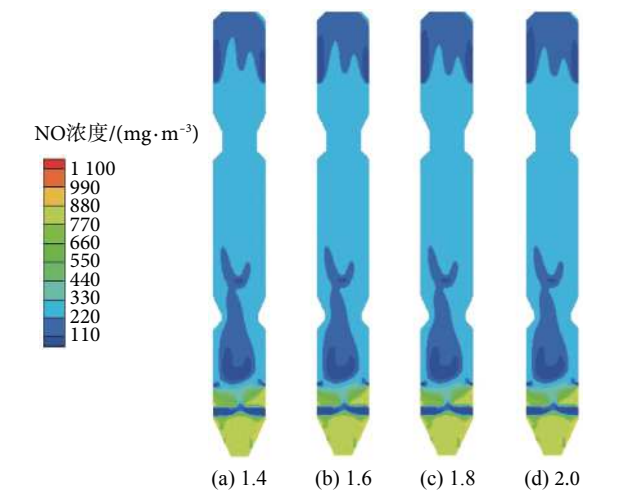


图 5 不同氨氮比条件下断面 NO 浓度分布

Fig.5 Distribution of NO concentration at different ammonia nitrogen ratios

2.5 雾化粒径对脱硝效果的影响

保持其他参数不变, 仅改变喷氨雾化粒径, 探究喷氨雾化粒径对 NO_x 脱除效率的影响。喷氨雾化粒径分别设定为 40, 60, 80, 100 μm, 数值模拟结果如图 6 所示。

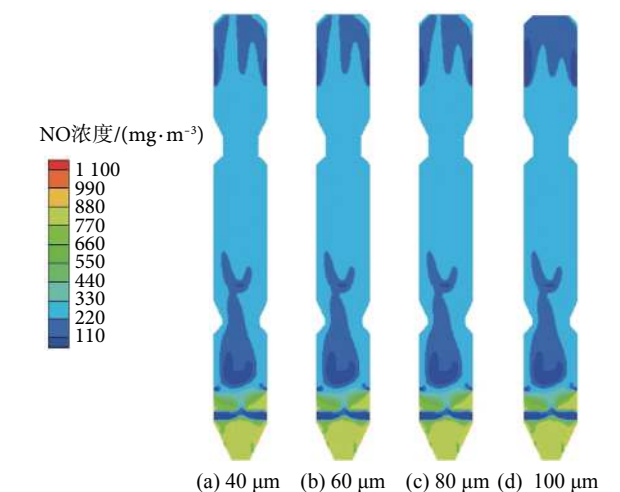


图 6 不同雾化粒径下断面 NO 浓度分布

Fig.6 Distribution of NO concentration at different atomizing particle sizes

2.6 喷氨深度对脱硝效果的影响

保持其他参数不变, 仅改变喷氨深度, 探究喷氨深度对 NO_x 脱除效率的影响。喷氨深度分别设定为 0, 250, 500, 750 mm, 数值模拟结果如图 7 所示。

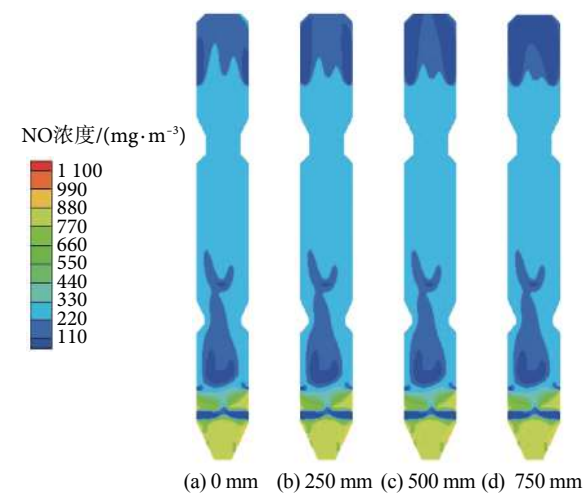


图 7 不同喷氨深度下断面 NO 浓度分布

Fig.7 Distribution of NO concentration at different ammonia injection depths

2.7 喷口数量对脱硝效果的影响

保持其他参数不变，仅改变喷口数量，探究喷口数量对 NO_x 脱除效率的影响。喷口数量分别设定为 1，2，4，6 个，均在炉体圆周同一高度上均匀分布，数值模拟结果如图 8 所示。

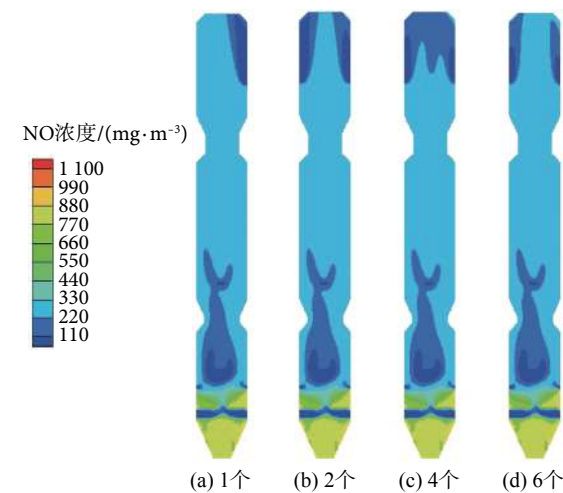


图 8 不同喷口数量下断面 NO 浓度分布

Fig.8 Distribution of NO concentration at different nozzle numbers

3 数值模拟结果分析

3.1 喷氨高度对脱硝效果的影响

当喷氨高度为 48 m 时，还原剂停留时间仅为 0.25 s，还原剂与污染物未充分反应，脱硝效率仅为 12.90%；当喷氨高度为 46 m 时，还原剂停留时间为 0.50 s，还原剂与污染物接触较为充分，脱硝

效率可达 33.69%；当喷氨高度为 44 m 时，还原剂停留时间为 0.75 s，还原剂与污染物可充分反应，脱硝效率可达 40.50%；当喷氨高度为 42 m 时，还原剂停留时间为 1.00 s，还原剂与污染物可充分反应，脱硝效率达 43.37%。因此，喷氨高度越低即还原剂停留时间越长，脱硝效率越高，如图 9 所示。

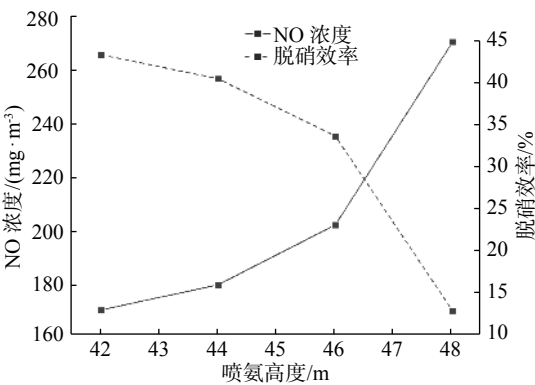


图 9 不同喷氨高度下出口 NO 浓度及脱硝效率

Fig.9 Outlet NO concentration and denitrification efficiency at different ammonia injection heights

3.2 喷氨速度对脱硝效果的影响

喷氨速度对脱硝效果的影响如图 10 所示。

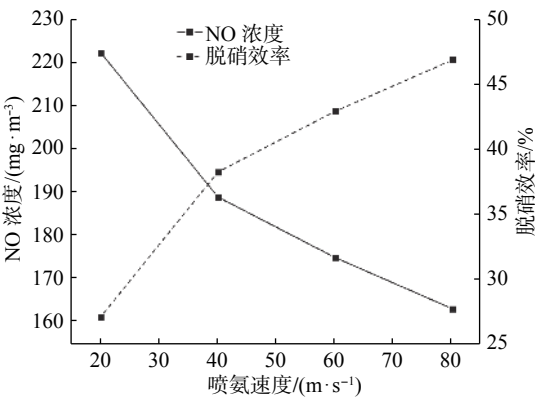


图 10 不同喷氨速度下出口 NO 浓度及脱硝效率

Fig.10 Outlet NO concentration and denitrification efficiency at different ammonia injection rates

当喷氨速度为 20 m/s 时，喷枪入射的雾化液滴能量不足以穿透流场的刚性体，还原剂与污染物的接触率较低，故脱硝反应进行得不充分，脱硝效率仅为 27.24%；当喷氨速度为 40 m/s 时，喷枪入射的雾化液滴能量较为充足，还原剂与污染物的接触率大大提高，从而使得脱硝反应进行得较为充分，脱硝效率可达 38.35%；当喷氨速度提高到 60 m/s 时，喷枪入射的雾化液滴能量更为充足，还原剂与污染物的接触得更好，使脱硝反应

进行得更为充分, 脱硝效率可达 43.01%; 当喷氨速度为 80 m/s 时, 喷枪入射的雾化液滴能量更为充足, 使还原剂与污染物的接触更为充分, 从而使脱硝反应进行得更为完全, 脱硝效率可达 46.95%。因此, 喷氨速度越大, 脱硝效率越好。

3.3 喷氨角度对脱硝效果的影响

当喷氨角度在较大范围内变化时, 脱硝效率趋于稳定, 这是因为喷氨角度较小时还原剂能量集中, 可以较好地覆盖整个流场横截面, 使得脱硝效率较高; 而喷氨角度较大时, 还原剂能量较为分散, 但可以增加还原剂覆盖面积, 同样可以达到较好的脱硝效率。因此, 脱硝效率较为稳定, 但在一定范围内, 喷氨角度越小, 脱硝效率越高, 如图 11 所示。

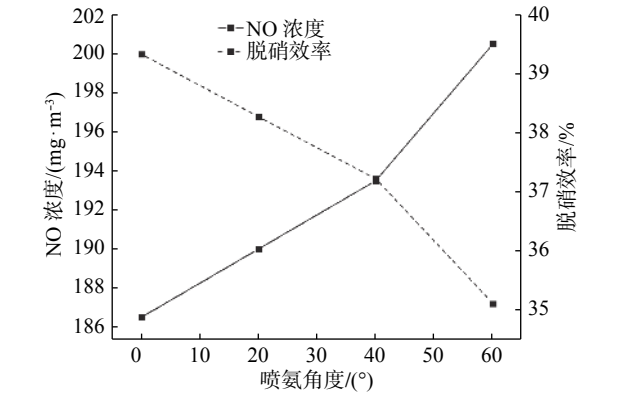


图 11 不同喷氨角度下出口 NO 浓度及脱硝效率
Fig.11 Outlet NO concentration and denitrification efficiency at different ammonia injection angles

3.4 氨氮比对脱硝效果的影响

随着氨氮比的增大, 还原剂用量更为充足, 使得脱硝效率随之增加; 但氨氮比的增大会带来生产成本的大幅增加、氨逃逸率升高甚至超标的问题, 如表 4 所示。因此在实际生产实践中, 既要考虑脱硝效率, 又要关注生产成本以及氨逃逸率的问题^[8]。氨氮比对出口 NO 浓度和脱硝效率的影响如图 12 所示。

表 4 不同氨氮比条件下出口氨逃逸率
Tab.4 Outlet ammonia slip rate at different ammonia nitrogen ratios

氨氮比	氨逃逸率/(mg · m ⁻³)
1.4	6
1.6	8
1.8	10
2.0	13(超标)

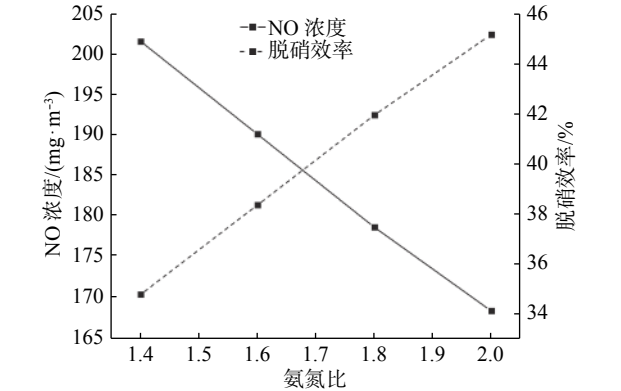


图 12 不同氨氮比条件下出口 NO 浓度及脱硝效率
Fig.12 Outlet NO concentration and denitrification efficiency at different ammonia nitrogen ratios

3.5 雾化粒径对脱硝效果的影响

雾化粒径从 40 μm 增加到 100 μm 过程中, 脱硝效率先保持不变, 然后逐渐提升, 如图 13 所示。当还原剂粒径低于 100 μm 时, 脱硝效率会降低, 这是因为还原剂雾化粒径过小, 会导致液滴刚性较差, 穿透力不足, 使得还原剂与污染物接触不充分, 从而使得脱硝效率较低。同时, 雾化粒径过小, 对雾化设备的要求更高, 明显增加设备采购成本及运行使用成本^[9]。

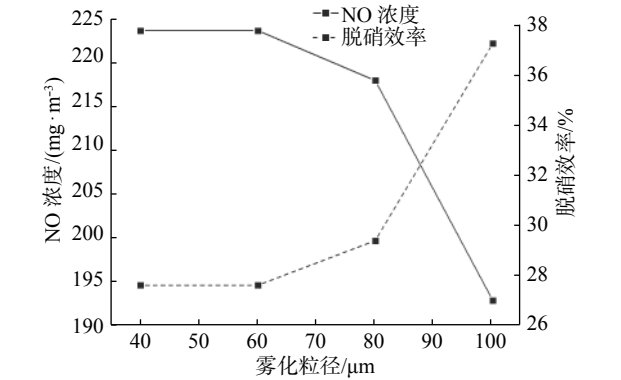


图 13 不同雾化粒径下出口 NO 浓度及脱硝效率
Fig.13 Outlet NO concentration and denitrification efficiency at different atomizing particle sizes

3.6 喷氨深度对脱硝效果的影响

喷枪深入炉内的距离越大, 越有利于脱硝效率的提高, 如图 14 所示。这是因为喷枪深入炉内距离越大, 越有利于还原剂克服自身刚性的不足, 提升液滴穿透力, 使其能更好地与污染物接触, 同时提高还原剂在横截面上的覆盖率, 从而提升脱硝效率。但喷枪深度过大, 会导致喷枪受炉内高温高速流体的冲刷而腐蚀加剧, 设备使用寿命降低, 损耗率增大, 运营成本增加^[10]。

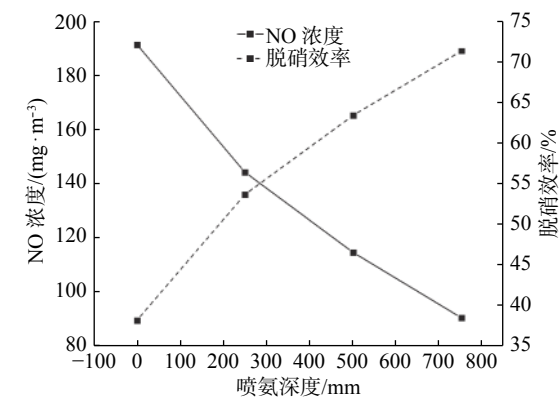


图 14 不同喷氨深度下出口 NO 浓度及脱硝效率

Fig.14 Outlet NO concentration and denitrification efficiency at different ammonia injection depths

3.7 喷口数量对脱硝效果的影响

喷口数量对脱硝效果的影响如图 15 所示。当喷口数量为 1 时，还原剂不足以有效覆盖整个炉体横截面，从而使脱硝效率较低，仅为 3.58%；当喷口数量为 2 时，即沿圆周呈 180°对称分布，脱硝效率增加至 18.64%；当喷口数量为 4 时，即沿圆周呈 90°均匀分布，还原剂可有效覆盖整个炉体横截面，使脱硝效率大大提高，达到 38.35%；当喷口数量为 6 时，即沿圆周呈 60°均匀分布，过于密集的喷口分布反而会制约脱硝效率的提升^[1]，脱硝效率相比 4 个喷口时反而下降至 32.97%。这说明喷口数量过多时，还原剂入射的能量过于分散，使得还原剂穿透力不足，与污染物接触不够充分，从而使脱硝效率降低。因此，合理选取喷口数量极为重要。

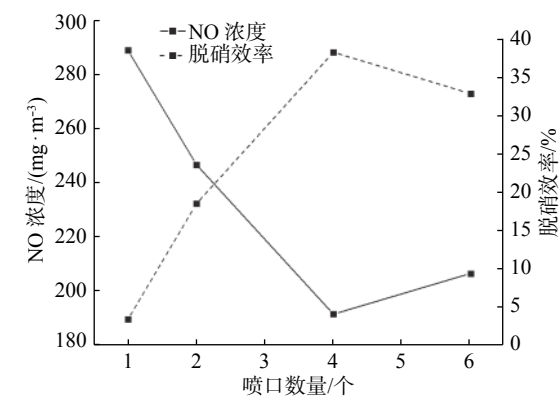


图 15 不同喷口数量下出口 NO 浓度及脱硝效率

Fig.15 Outlet NO concentration and denitrification efficiency at different nozzle numbers

3.8 优化工况

根据以上工况的分析结果，设定各影响因素

中对脱硝最有利条件，可得到优化后的分解炉 SNCR 脱硝的效率。

表 5 优化工况条件设定

Tab.5 Optimal working conditions setting

喷氨高度/m	喷氨速度/(m·s ⁻¹)	喷氨角度/(°)	氨氮比	雾化粒径/μm	喷氨深度/mm	喷口数量/个
42	80	0	1.8	100	750	4

模拟结果表明，脱硝后出口 NO 浓度值降低至 71 mg/m³，与初始条件下 NO 浓度值 309 mg/m³ 相比，NO 脱除效率达 76.89%。与初始 SNCR 工况下 55.62% 的脱硝效率相比，优化工况的脱硝效率有了较为明显的提高，如图 16 所示。

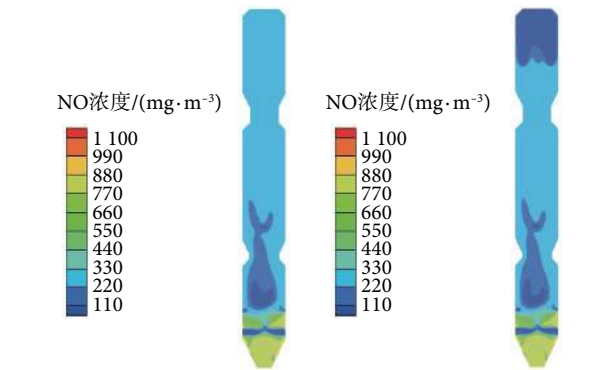


图 16 初始和最佳工况条件下 NO 浓度分布

Fig.16 NO concentration distribution at initial and optimal working conditions

4 结 论

针对影响水泥分解炉 SNCR 脱硝效率的因素进行了对比分析，得出以下结论：

a. 喷氨高度在温度场变化较小时对脱硝效率的影响，实质上等效为还原剂停留时间对脱硝效率的影响，且停留时间越长，脱硝效率越高，停留时间为 1.00 s 时，脱硝效率最高为 43.37%。喷氨速度越大，脱硝效率越高，喷氨速度为 80 m/s 时，脱硝效率最大为 46.95%。氨氮比越大，脱硝效率越高，在氨逃逸率不超标的前提下，当氨氮比为 1.8 时，脱硝效率最大为 41.94%，在实际生产中尤其要注意过大的氨氮比会导致氨逃逸率超标的问题。雾化粒径越大，脱硝效率越高，当雾化粒径为 100 μm 时，脱硝效率最大为 37.28%。喷氨深度越大，脱硝效率越高，当喷氨深度为 750 mm 时，脱硝效率最大为 71.33%，喷氨深度是

上述对比工况中对脱硝效率影响最大的因素，也是提高脱硝效果最明显的因素。因此在实际生产中，可适当增加喷枪插入炉体的深度，但要注意喷枪深度过大会使得高温高速流体对喷枪的腐蚀和冲刷加剧，从而导致设备使用寿命降低等问题。

b. 喷氨角度对脱硝效率的影响较小，当选取喷氨角度为 0°时，脱硝效率最大为 39.43%。

c. 喷口数量从 1 增加至 4 时，脱硝效率逐渐提高，当喷口数量从 4 增加到 6 时，脱硝效率反而降低，这表明过于稀疏或过于密集的喷口布置方式对脱硝效率均有不利影响，因此在实际生产中建议使用 4 喷口布置方式，脱硝效率最大为 38.35%。

d. 根据以上各因素分析结果，得到优化工况，最大脱硝效率为 76.89%。实际生产中可参考最佳工况设定对 SNCR 脱硝部分进行改进和提高，这对于提升还原剂使用效率、降低还原剂单位使用量、降低氨逃逸率、降低生产成本、提高生产环保性等方面，均有积极作用。

参考文献：

[1] 中国水泥协会. 水泥工业“十三五”发展规划[J]. 中国水泥, 2017(7): 7–17.

[2] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 4915—2013 水泥工业大气污染物排放标准[S]. 北京: 中

国环境科学出版社, 2014.

[3] 巴清心. 水泥生产用分解炉传热和流动特性的数值模拟及实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.

[4] HOUSHFAR E, KHALIL R A, LØVÅS T, et al. Enhanced NO_x reduction by combined staged air and flue gas recirculation in biomass grate combustion[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(5): 3003–3011.

[5] 李相国, 马保国, 胡贞武, 等. 分解炉内流动特性数值模型的探讨[J]. 水泥工程, 2004(3): 4–7.

[6] XIA Z H, LI J, WU T T, et al. CFD simulation of MSW combustion and SNCR in a commercial incinerator[J]. Waste Management, 2014, 34(9): 1609–1618.

[7] 黄来, 陆继东, 李昌军, 等. 双喷腾分解炉内气固两相流场的数值模拟[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(8): 748–753.

[8] 蔡鑫. 水泥分解炉内流场和 SNCR 脱硝工艺的数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2014.

[9] DE DIEGO L F, DE LAS OBRAS-LOSCERTALES M, RUFAS A, et al. Pollutant emissions in a bubbling fluidized bed combustor working in oxy-fuel operating conditions: effect of flue gas recirculation[J]. Applied Energy, 2013, 102: 860–867.

[10] HUAN B W. Combustion theory and application of boilers[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1999.

[11] 白涛. 燃煤锅炉低 NO_x 燃烧系统的数值模拟与试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.

(编辑：董 伟)