

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403046

某 300 MW 机组脱硝前紧凑空间粗颗粒 飞灰预脱除关键技术研究及应用

杨晓刚¹, 兰永胜², 郭雅琼³, 杨小金⁴, 王明生⁵,
罗志¹, 秦建柱⁴, 舒凯¹, 王晓冰¹, 潘栋¹, 王伟², 王博¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.华能辛店发电有限公司, 山东 淄博 255414;

3.内蒙古丰电能源发电有限责任公司, 内蒙古 丰镇 012100;

4.华能海南发电股份有限公司东方电厂, 海南 东方 572600

5.国能宁夏鸳鸯湖第一发电有限公司, 宁夏 银川 751400)

[摘要] 燃煤机组由于煤质及燃烧等原因, 锅炉尾部烟道烟气中的粗飞灰颗粒易造成烟道及脱硝催化剂不同程度的磨损。以某 300 MW 等级机组省煤器出口至脱硝入口烟道为研究对象, 建立“A型折流富集+V型高效收灰+T型粗灰通道”的“A-V-T”型脱硝前粗颗粒飞灰预脱除结构, 布置于省煤器出口的大截面低流速烟道内, 通过数值模拟研究了布置粗颗粒飞灰预脱除装置前后不同粒径分布轨迹、脱除效果、阻力等条件的影响规律, 并进行了工程应用。模拟结果表明: 采用粗颗粒脱除技术后对原系统烟气侧流场状态影响小; 随着飞灰粒径的增大, 飞灰脱除率越高, 其中 50、200、500、1 000 μm 粒径的飞灰脱除率分别为 12.15%、59.40%、87.01%、93.62%, 对粒径 200 μm 及以上的粗颗粒脱除效率为 85.15%, 整体的收灰率为 15.50%, 新增阻力 78 Pa。对某 300 MW 机组实施改造后, 经试验, 脱硝前对粒径 200 μm 及以上粗颗粒灰脱除率为 83.96%, 整体灰的脱除率为 14.91%, 净增阻力 73 Pa, 试验结果验证了数值模拟结果的合理性。

[关键词] 脱硝; 粒径分布; 粗颗粒飞灰; 脱除; 阻力

[引用本文格式] 杨晓刚, 兰永胜, 郭雅琼, 等. 某 300 MW 机组脱硝前紧凑空间粗颗粒飞灰预脱除关键技术研究及应用[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 151-162. YANG Xiaogang, LAN Yongsheng, GUO Yaqiong, et al. Research and application of key technologies for pre-removal of coarse particle fly ash in compact space before denitration of a 300 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 151-162.

Research and application of key technologies for pre-removal of coarse particle fly ash in compact space before denitration of a 300 MW unit

YANG Xiaogang¹, LAN Yongsheng², GUO Yaqiong³, YANG Xiaojin⁴, WANG Mingsheng⁵,
LUO Zhi¹, QIN Jianzhu⁴, SHU Kai¹, WANG Xiaobing¹, PAN Dong¹, WANG Wei², WANG Bo¹

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Huaneng Xindian Power Generation Co., Ltd., Zibo 255414, China;

3. Inner Mongolia Fengdian Energy Power Generation Co., Ltd., Fengzhen 012100, China;

4. Dongfang Power Plant of Huaneng Hainan Power Generation Co., Ltd., Dongfang 572600, China;

5. Guoneng Ningxia Yuanyang Lake First Power Generation Co., Ltd., Ningxia 751400, China)

Abstract: Due to factors such as coal quality and combustion, coarse fly ash particles in flue gas of coal-fired boiler can easily cause varying degrees of wear and tear on tail flue and denitrification catalysts. An “A-V-T” type

收稿日期: 2024-03-05 网络首发日期: 2024-07-03

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ21-H46, HNKJ22-HF48)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-H46, HNKJ22-HF48)

第一作者简介: 杨晓刚 (1992), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为烟气脱硝及粗颗粒脱除技术, yangxiaogang@tpri.com.cn.

pre-removal structure for coarse particle fly ash before denitrification is established using the flue from the economizer outlet to the denitrification system inlet of a 300 MW unit as the research object. The structure is composed of “A-type baffle enrichment + V-type high-efficiency ash collection + T-type coarse ash channel” and is placed in a large cross-section low flow velocity flue at the economizer outlet. The influence rules of different particle size distribution trajectories, removal effects and resistance before and after the arrangement of the coarse particle fly ash pre-removal device are studied through numerical simulation, and engineering application is conducted to verify the effectiveness. The numerical simulation results indicate that, the use of coarse particle removal technology has little effect on flow field state of the original system at flue gas side. As the particle size of fly ash increases, the removal rate of fly ash increases. The removal rates of fly ash particles with size of 50, 200, 500, and 1 000 μm are 12.15%, 59.40%, 87.01%, and 93.62%, respectively. The removal efficiency for coarse particles with size of 200 μm and above is 85.15%. The overall ash collection rate is 15.50%, with an additional resistance of 78 Pa. For this 300 MW unit, the tests after retrofitting show that, the removal rate of coarse ash particles with size of 200 μm and above is 83.96%, the overall removal rate of ash is 14.91%, and the net increase in resistance is 73 Pa. The experimental results verify the rationality of the numerical simulation results.

Key words: denitration; particle size distribution; coarse particle fly ash; removal; resistance

燃煤机组由于入炉煤质变化及燃烧系统原因,在锅炉尾部烟道出现烟气飞灰颗粒偏粗的现象^[1],其中粒径超过 200 μm 的灰颗粒占比较大,甚至还存在粒径高达 1 000~2 000 μm 的飞灰颗粒,这些粗颗粒飞灰是造成后续烟道及催化剂严重磨损的重要原因^[2]。常规设计的省煤器烟道及灰斗仅能收集约 5% 的总灰量,绝大部分灰仍将进入后续烟道及设备^[3]。导致尾部烟道、导流板部件、脱硝催化剂以及低温省煤器在运行过程中存在不同程度的磨损和积灰问题,这些磨损问题直接影响机组安全经济运行^[4]。尤其近年来,煤质供应不稳定,灰分整体浓度偏高,飞灰颗粒粒径变粗,致使锅炉尾部烟道内构件及设备磨损问题更为突出。

目前已提出或应用的脱硝前高温预除尘技术主要有高温电除尘技术^[5]、旋风分离除尘技术^[6]、大颗粒拦截网^[7]等。加装高温电除尘或旋风分离器后,对省煤器出口烟道流场整体扰动较大,无法满足下游脱硝系统对流场均匀性的要求^[8],另外这 2 种技术需要较大的改造空间,改造工程量^[5-6],且旋风分离装置阻力达到 500~2 000 Pa 及以上^[6],目前省煤器出口烟道加装高温电除尘及旋风分离器装置在电力行业未应用。大颗粒拦截网技术在国外应用较多,其主要针对特殊燃烧工况产生的爆米花灰,该飞灰疏松多孔,密度较小,外形不规则,粒径一般在 4 000 μm 以上^[7],针对该飞灰特点,有部分国外电厂采用设置滤网的形式拦截爆米花灰,防止爆米花灰堵塞催化剂孔道^[8-11],但对于 200~4 000 μm 粒径的粗颗粒并无拦截效果,脱除粒径及适用范围有限。

前述相关技术无法有效满足省煤器出口烟道

空间紧凑、流场要求较高、新增阻力小、对 200 μm 及以上粒径粗颗粒飞灰有效脱除的要求。本文以 300 MW 等级燃煤机组省煤器出口至脱硝入口烟道为研究对象,开发了“A 型折流富集+V 型高效收灰+T 型粗灰通道”的“A-V-T”型脱硝前粗颗粒飞灰预脱除结构,布置于省煤器出口的大截面低流速烟道内,通过数值模拟方式考察了布置粗颗粒飞灰预脱除装置前后不同粒径分布轨迹、脱除效果、阻力等条件的影响规律,并进行了工程应用验证。

1 项目概况

1.1 机组概况

某电厂 300 MW 机组锅炉是由哈尔滨锅炉有限责任公司生产的 HG-1025/17.5-PM32 型锅炉。锅炉为亚临界参数、一次中间再热、自然循环汽包炉,采用平衡通风、直流式燃烧器、四角切圆燃烧方式。

1.2 设计条件

项目期间实际煤质分析数据结果见表 1,省煤器出口实际烟气参数见表 2。

表 1 煤质分析
Tab.1 Coal quality analysis

项目	数值
收到基碳 $w_{ar}(C)/\%$	53.96
收到基氢 $w_{ar}(H)/\%$	2.60
收到基氧 $w_{ar}(O)/\%$	3.50
收到基氮 $w_{ar}(N)/\%$	0.84
收到基全硫 $w_{ar}(S)/\%$	1.31
全水分 $w_t(M)/\%$	9.80
收到基灰分 $w_{ar}(A)/\%$	27.99
空气干燥基水分 $w_{ad}(M)/\%$	1.08
干燥无灰基挥发份 $w_{daf}(V)/\%$	15.68
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	20.42

表 2 省煤器出口烟气参数
Tab.2 Parameters of flue gas at outlet of the economizer

项目	数值	备注
机组负荷/MW	300	
$\varphi(\text{O}_2)/\%$	2.30	湿基
$\varphi(\text{CO}_2)/\%$	15.21	湿基
湿度/ $\%$	7.93	湿基
$\varphi(\text{N}_2)/\%$	74.56	湿基
湿烟气量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	1 277	湿基
湿烟气量(标况下)/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	962 577	湿基
给煤量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	144	
干烟气量($\varphi(\text{O}_2)=6\%$, 标况下)/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	1 093 061	
烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	360	
静压/Pa	-600	
NO_x 排放质量浓度(标况下)/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	600	
污染物 $\varphi(\text{SO}_2)$ ($\varphi(\text{O}_2)=6\%$, 干基)/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	1 222.00	
$\varphi(\text{SO}_3)$ ($\varphi(\text{O}_2)=6\%$, 干基)/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	10.00	
飞灰质量浓度(标况下)/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	38.4	

飞灰特性主要取决于燃烧煤质特性及锅炉燃烧运行方式^[12-13], 测试燃煤电厂的飞灰特性, 为后续燃煤尾部烟道烟气飞灰粗颗粒预脱除模拟提供基础数据支撑。对燃煤机组锅炉尾部烟道省煤器出口飞灰多点取样, 并对飞灰特性进行全面表征。灰成分检测依据《煤灰成分分析方法》(GB/T 1574—2007)。飞灰密度检测依据《粉尘物性试验方法第 3 部分: 堆积密度的测定自然堆积法》(GB/T 16913.3—1997)。飞灰粒径分布的测定依据《火力发电厂燃料试验方法—飞灰和炉渣可燃物的测定方法》(DL/T567.6—2016), 测定飞灰的平均径、中位径、峰值等参数。

在省煤器出口烟道对烟气飞灰进行取样分析, 飞灰粒径分布如图 1 所示。由图 1 可知, 飞灰平均粒径 76.63 μm , 中位粒径 36.06 μm , 峰值粒径为 26.14 μm , 粒径 $\geq 100 \mu\text{m}$ 飞灰颗粒的体积分数为 21.1%, 粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 飞灰颗粒的体积分数为 10.2%, 整体飞灰粒径分布中粗颗粒飞灰占比较大。飞灰组成成分分析见表 3。其中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的质量分数占比 91.21%, 飞灰颗粒整体硬度较高, 流动性较高, 磨损特性较强^[14-16]。

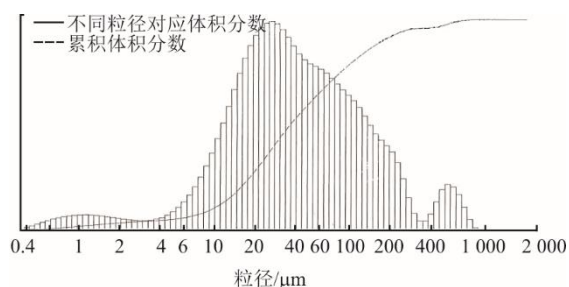


图 1 省煤器出口飞灰取样粒径分布
Fig.1 Particle size distribution of fly ash sampled at outlet of the economizer

表 3 飞灰组成成分分析 单位: w/%
Tab.3 Analysis of fly ash composition

项目	数值
SiO_2	52.38
Al_2O_3	27.73
Fe_2O_3	11.10
CaO	4.42
MgO	0.56
Na_2O	0.48
K_2O	1.60

1.3 运行现状

由于锅炉省煤器出口烟道未设置灰斗, 超低排放改造在增设 SCR 烟气脱硝装置时, 靠近脱硝侧增设了一排小灰斗, 并未覆盖省煤器出口底部烟道, 造成了省煤器出口烟道积灰严重, 且粗颗粒飞灰大量进入脱硝系统和空气预热器等后续设备, 导致脱硝烟道和催化剂出现较为严重的磨损及空预器蓄热元件堵灰严重, 甚至引起机组带负荷受限。因空间有限等因素影响, 迫切需要开发烟道内粗颗粒飞灰预脱除技术解决以上问题。图 2 为脱硝催化剂及尾部烟道导流板的磨损情况。



a) 催化剂坍塌照片 b) 导流板磨损照片

图 2 催化剂及导流板磨损照片
Fig.2 Photos of the catalyst and guide plate wear

2 原始结构计算结果分析

2.1 模型结构

系统建模部位为锅炉省煤器出口至脱硝入口段烟道, 结构如图 3 所示。模型包含省煤器下方的出口烟道、灰斗及 SCR 入口烟道。由于两侧对称结构, 选取一侧烟道为考察对象建立物理模型, 省煤器出口单侧烟道截面尺寸为 $7.040 \text{ m} \times 9.918 \text{ m}$, 系统以省煤器出口竖直烟道作为入口, 以脱硝斜烟道结束, 包含 2 个脱硝灰斗。

采用 Gambit 软件对锅炉省煤器出口至脱硝入口段烟道建模并进行网格划分, 在“A-V-T”型粗颗粒飞灰预脱除复杂结构进行网格局部加密, 保证每个粗颗粒脱除模块最小截面处有 8 个点以上的网格数目, 通过考察模型进出口差压, 进行网格无关性验证, 当模型网格数量为 510 万时, 进出口差

压趋于一致,认为该网格数量不对模拟结果产生影响,满足模拟精度要求。

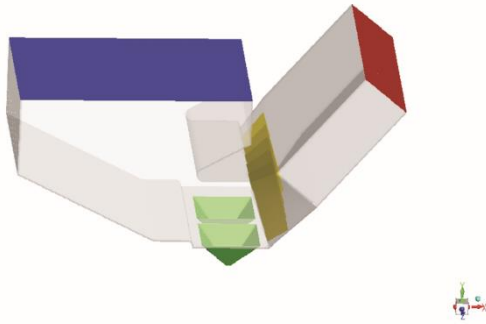


图3 原始烟道结构
Fig.3 Structure of the original flue duct

2.2 模拟模型

2.2.1 气固两相流模型

气相方程含质量、动量及能量守恒方程^[17-19]。

质量方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) \\ = -p \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T + \bar{\bar{\tau}} \mathbf{u} - \sum h_k \mathbf{J}_k) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ 为烟气密度, kg/m^3 ; \mathbf{u} 为烟气流速, m/s ; p 为压力, Pa ; $\bar{\bar{\tau}}$ 为剪切应力张量, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; \mathbf{g} 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; T 为烟气温度, K ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; e 为比内能, kJ/kg ; h_k 为烟气中组分 k 焓值, kJ/kg ; \mathbf{J}_k 为烟气中组分 k 扩散通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

飞灰颗粒在烟气的流动过程中,所占的总体积分数小于 5%,因此该颗粒流动可以认为是稀相流动。对这种流动的颗粒,一般采用拉格朗日方法对其进行描述,并忽略颗粒与颗粒之间的碰撞。颗粒受到的主要作用力有曳力、萨夫曼力、重力及 magnus 力^[20],使用牛顿第二定律求解颗粒的加速度、速度及位置。

使用牛顿第二定律求解颗粒的加速度、速度及位置^[21]:

$$m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} = F_D + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_{sl} + F_M \quad (4)$$

式中: m_p 为颗粒质量, kg ; x_p 为颗粒位置, m ; ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 ; F_{sl} 为萨夫曼剪切力, N ; F_D 为曳力, N ; F_M 为 magnus 力, N ; \mathbf{g} 为各方向重力加速度, m/s^2 。

2.2.2 碰撞模型

飞灰颗粒随烟气在烟道内流动会和烟道壁面、导流板发生碰撞^[22]。由于飞灰颗粒形状的不规则性,同时金属壁面也不是光滑的,因此这种碰撞是不规则的,需要对飞灰粒子实际的反弹角进行描述,通过对颗粒碰撞模型进行研究,并与实际电厂飞灰颗粒撞击钢板轨迹相对比,确定壁面碰撞模型:

$$\tau_N = 0.993 - 0.0307\alpha + 4.75 \times 10^{-4}\alpha^2 - 2.61 \times 10^{-6}\alpha^3 \quad (5)$$

$$\tau_T = 0.998 - 0.029\alpha + 6.43 \times 10^{-4}\alpha^2 - 3.56 \times 10^{-6}\alpha^3 \quad (6)$$

式中: τ_N 、 τ_T 分别为法相反弹系数和切向反弹系数; α 为颗粒入射角度。

2.2.3 边界条件

本文采用 Fluent18.0 模拟软件,模拟实际运行的满负荷工况,使用标准 k -epsilon 湍流模型、组分输运模型、离散颗粒相模型,打开能量守恒模型,编写曳力的宏动态连接到离散相模型求解器中。

边界条件:烟气和飞灰入口使用 velocity-inlet,大小均为 $3.88 \text{ m}/\text{s}$,温度为 633 K ,出口使用 outflow。壁面、导流板及混合器为 wall,类型为 reflect,灰斗底部面及粗颗粒脱除装置落灰管收口面设置类型为 trap。模型入口烟气流速为 $4.55 \text{ m}/\text{s}$,飞灰颗粒质量流量为 $11.66 \text{ kg}/\text{s}$,密度为 $800 \text{ kg}/\text{m}^3$,粒径分布满足 Rosin-Rammler 模型,并通过 30 组特征粒子进行表征,Spread Parameter 特征值为 1.36。残差收敛判断值均设置为 10^{-6} 。模拟运算过程中,先迭代计算 1 000 步烟气单相流场,收敛后再进行飞灰颗粒与烟气耦合计算至第 2 000 步收敛。

2.3 原始流场分析

图 4 为省煤器出口烟道内全粒径飞灰颗粒迹线。由图 4 可以看出:飞灰颗粒在烟气的驱动下沿脱硝入口水平烟道流动,小颗粒飞灰受曳力和萨夫曼力联合作用下在整个烟道截面分布较为均匀;只有尾部竖井靠近前墙的烟道的局部烟气飞灰进入了原始灰斗,粒径较粗、质量较大的灰粒受重力影响较大,集中在水平烟道下半部,且大部分又被烟

气又携带至下游脱硝烟道。

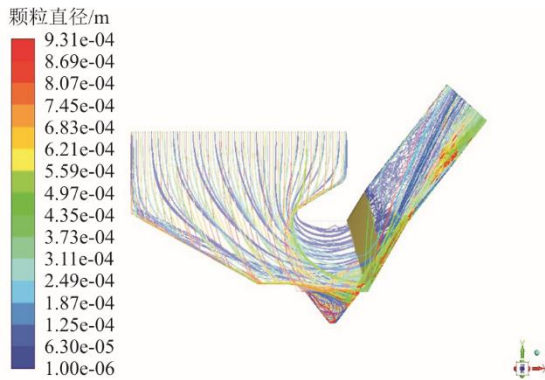


图 4 原始烟道全粒径飞灰颗粒迹线
Fig.4 Trajectories of fly ash particles with full sizes in original flue duct

通过数值模拟对原始结构模型的研究发现，原始结构灰斗收灰率仅为 2.31%，除灰率低，未被灰斗覆盖的底部烟道中积灰严重，剩余的飞灰中存在大量粗颗粒飞灰，粗颗粒飞灰较烟气的跟随性差，进入脱硝装置和空气预热器等后续设备，导致尾部烟道和脱硝催化剂等内构件出现较为严重的磨损问题，甚至影响脱硝装置正常运行。

图 5 为原始结构满负荷工况条件下整个系统全压分布云图。表 4 给出了原始结构省煤器出口烟道至脱硝入口烟道监测截面上全压取样值。计算得到系统进出口的压力差值为 180 Pa。

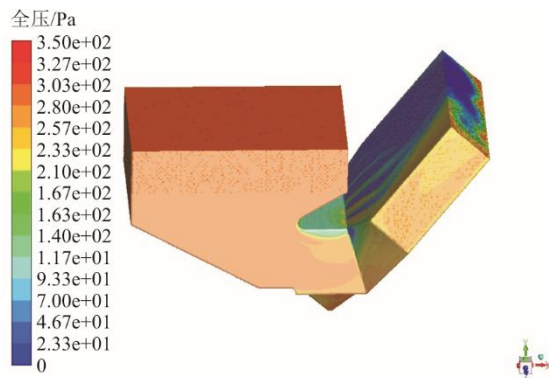


图 5 原始结构满负荷工况条件下全压分布云图
Fig.5 Cloud map of total pressure distribution with the original structure under full load conditions

表 4 原始烟道系统满负荷工况条件下监测面全压 单位: Pa
Tab.4 Total pressure on monitoring surfaces of the original flue duct system under full load condition

监测面位置	数值
省煤器出口烟道压力	289
脱硝入口烟道压力	109

3 粗颗粒预脱除方案及模拟结果

根据原系统流场数值模拟计算结果，对省煤器出口烟道至脱硝入口烟道系统流场优化设计并进行粗颗粒脱除装置设计，利用原有省煤器出口烟道内的紧凑空间，在烟道内建立“A 型折流富集+V 型高效收灰+T 型粗灰通道”的“A-V-T”型脱硝前粗颗粒飞灰预脱除结构模型，并在前墙下部和烟道斜坡底部布置灰斗，完成粗颗粒飞灰预脱除工艺方案，方案结构如图 6—图 7 所示。

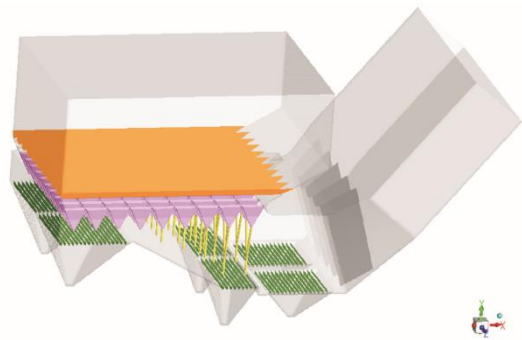


图 6 粗颗粒脱除布置方案示意
Fig.6 Schematic diagram of layout of the coarse particle removal device

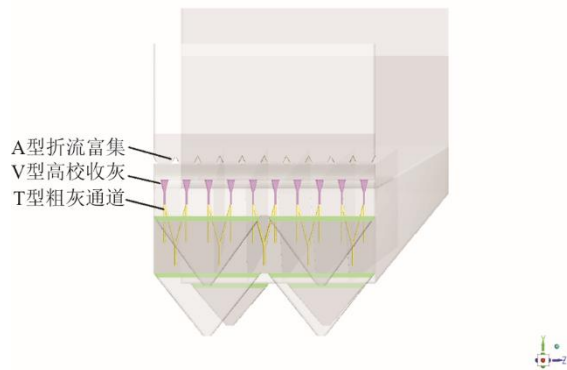


图 7 粗颗粒脱除装置前视图
Fig.7 Front view of the coarse particle removal device

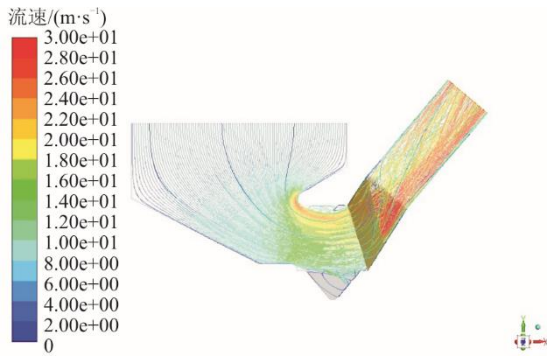
1) 飞灰富集 在省煤器出口烟道自上而下交错均匀布置全断面的屋脊式“A”折流板及集灰斗，烟气自上而下经过屋脊式折流板时，粉尘被逐渐富集并贴近折流板的表面。

2) 惯性分离 烟气飞灰在惯性力作用进入下方集“V”型集灰斗中，并在重力作用下进入“V”型落灰管，汇集进入省煤器大灰斗，烟气则沿着每 2 个“V”型集灰斗之间的空间顺着烟道继续向后流动。

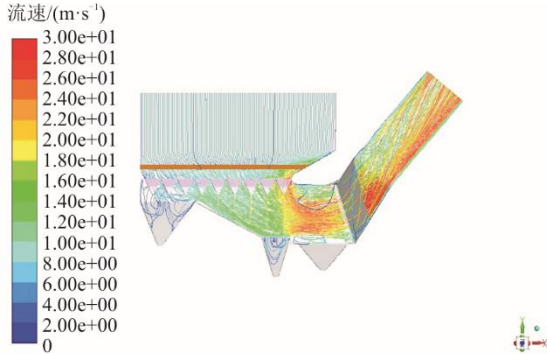
3) 强化收集 新增灰斗上方新增挡灰板，进

进一步增强灰斗的收灰能力。

图 8 为布置粗颗粒飞灰预脱除装置前后烟气流线。由图 8 可以看到，原始结构前墙烟气沿着灰斗上方斜烟道流向炉后，后墙烟气则经过折烟角转向后流向炉后，在布置粗颗粒飞灰预脱除装置后，烟气则沿着每 2 个“V”型集灰斗之间的空间顺着烟道继续向后流动，除极小部分烟气窜入新增灰斗外，烟气侧整体流场继续保持原结构流线方向，说明布置粗颗粒脱除装置后对原系统烟气侧流场状况影响小。



a) 原始结构烟气流线



b) 布置粗颗粒脱除装置后烟气流线

图 8 布置粗颗粒脱除装置前后的烟气流线
Fig.8 The flue gas streamlines before and after arranging the coarse particle removal device

图 9 为布置粗颗粒飞灰预脱除装置后全粒径飞灰迹线。由图 9 可以看到，在粗颗粒飞灰预脱除装置和新增省煤器灰斗的作用下，全粒径飞灰迹线经省煤器灰斗，不再向外流出。飞灰迹线显示，粗颗粒脱除装置落灰管里粗颗粒灰占比居多，实现了粗颗粒飞灰的有效收集，经粗颗粒脱除装置及灰斗对飞灰轨迹的捕捉统计计算，对粒径 200 μm 及以上粒径的粗颗粒脱除效率为 85.15%，整体的收灰率为 15.5%。

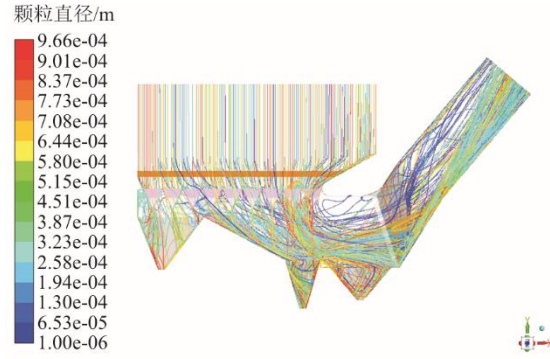
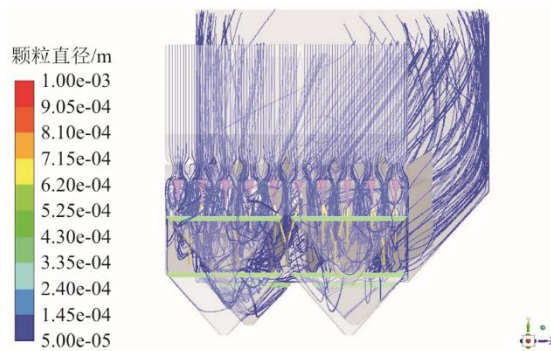


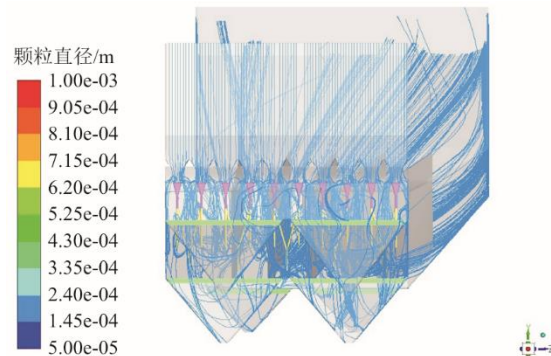
图 9 全粒径飞灰颗粒迹线
Fig.9 Trajectories of fly ash particles with full size

图 10 为 50、200、500、1 000 μm 这 4 种不同粒径的飞灰流动轨迹。经统计计算，4 种粒径的飞灰颗粒脱除率分别为 12.15%、59.40%、87.01%、93.62%。可以看出，当飞灰粒径越粗，粗颗粒脱除装置的脱除效果越明显，当粗颗粒飞灰在整个烟气飞灰占比更大时，该粗颗粒脱除装置的飞灰脱除效果更明显。

粗颗粒飞灰预脱除装置对 200~1 000 μm 的灰粒的除灰率有着显著的提升。由于粗颗粒飞灰的磨损性较强^[23]，因此对粗颗粒飞灰的有效脱除，可显著减轻磨损。



a) 50 μm



b) 200 μm

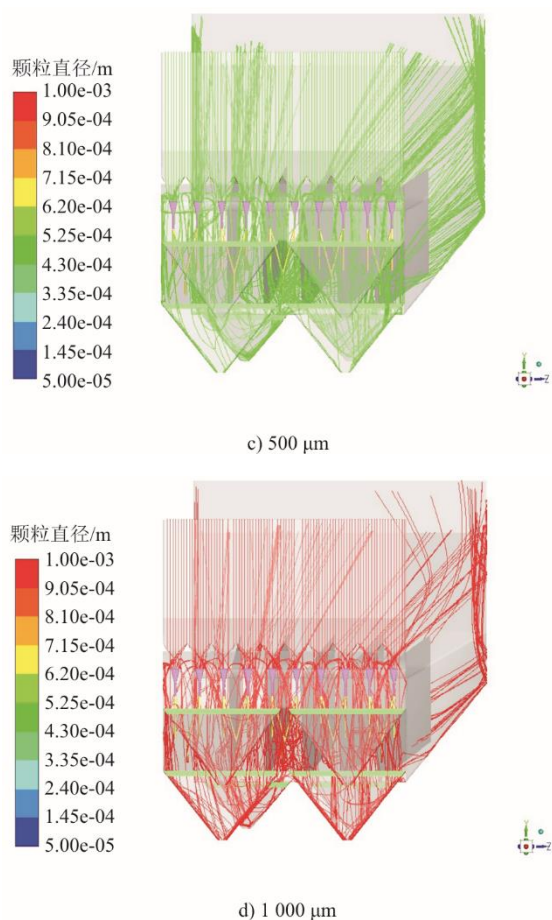


图 10 不同粒径飞灰颗粒迹线

Fig.10 Trajectories of fly ash particles with different particle sizes

图 11 为布置粗颗粒脱除装置后满负荷工况条件下烟道系统全压分布云图。表 5 给出了布置粗颗粒预脱除装置后省煤器出口烟道至脱硝入口烟道监测截面上全压取样值。增加粗颗粒脱除装置后系统进出口的压力差值为 252 Pa，对比原始烟道 180 Pa 的烟道阻力，计算得到粗颗粒脱除装置的阻力为 78 Pa。

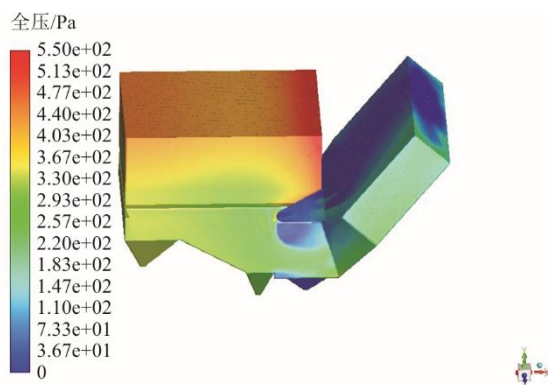


图 11 布置粗颗粒脱除结构后满负荷工况下系统全压分布

Fig.11 Total pressure distribution of the system under full load conditions after arranging the coarse particle removal device

表 5 布置粗颗粒脱除结构后满负荷工况条件下监测面全压
单位: Pa

Tab.5 The total pressure on monitoring surface under full load conditions after arranging the coarse particle removal device

监测面位置	数值
省煤器出口烟道压力	348
脱硝入口烟道压力	96

4 工程应用测试

以上述设计方案为基础，在该 300 MW 机组上进行了改造，并对机组满负荷状况下粗颗粒脱除装置进行试验工程应用测试。测试指标有：1) 预除灰装置系统阻力；2) 粗颗粒脱除系统整体除灰率；3) 粗颗粒脱除装置粗颗粒（200 μm 及以上粒径）脱除率。

4.1 试验测点布置

4.1.1 脱硝入口烟气飞灰采样测点布置

脱硝入口烟气飞灰采样测点布置如图 12 所示。

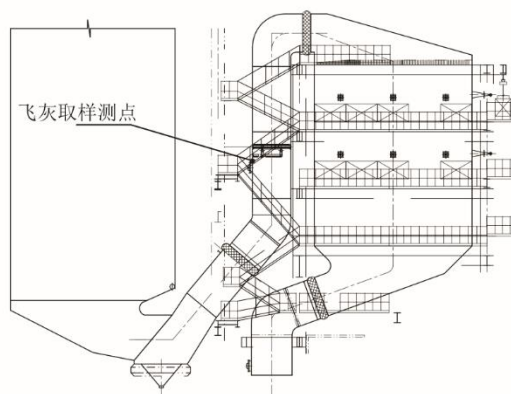


图 12 脱硝入口飞灰采样点位置示意

Fig.12 Schematic diagram of the fly ash sampling points at the denitrification device inlet

脱硝系统入口 A、B 侧烟气采样测点布置于脱硝系统反应器入口竖直烟道上。在烟道 A、B 侧反应器入口各布置 3 个测孔，按照锅炉左侧到右侧方向编号，每个测孔布置 1 个飞灰采样测点。

4.1.2 粗颗粒脱除系统采样测点设置

粗颗粒脱除系统所采集灰样取样点主要分为 2 个位置。一个位于仓泵上方落灰管，用于计量落灰管积灰量；另一个位于仓泵处，用于对预除灰装置所采集灰进行采样，具体布置见图 13。

4.1.3 脱硝入口烟气流量及静压测点布置

脱硝系统入口 A、B 侧烟气流量及静压测点布置于脱硝系统反应器入口竖直烟道上。在烟道 A、

B 侧反应器入口各布置 5 个测孔, 按照锅炉左侧到右侧方向编号, 每个测孔布置 3 个测点。

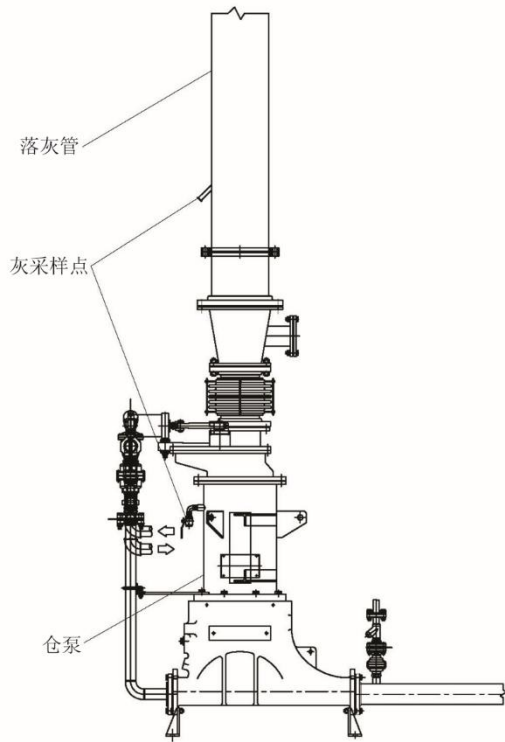


图 13 预脱除装置飞灰采样点布置

Fig.13 Layout of the fly ash sampling points for the pre-removal device

4.1.4 预除灰系统阻力测点

项目实施时在预脱除系统进出口安装了静压测点, 试验时通过测量预除灰系统进出口静压差, 得出预除灰系统阻力。由于粗颗粒预脱除装置安装位置为省煤器出口竖直烟道, 且高度差为 2 m, 且无弯头等局部阻力损失, 改造前原始烟道该高度差内的阻力不足 10 Pa, 按照 10 Pa 计。

4.2 测量方法及数据处理

4.2.1 除灰率

总输灰量 机组稳定高负荷工况下, 采集入炉煤质进行分析, 根据机组试验期间给煤量数据与入炉煤质分析数据, 按照式(7)计算得出试验期间烟气中总灰量。

$$Q_0 = Q_M \times A_{ar} \times 0.9 \quad (7)$$

式中: Q_0 为总灰量, t/h; Q_M 为给煤量, t/h; A_{ar} 为煤质收到基灰分, %; 0.9 为飞灰占总灰分比例。

粗颗粒脱除系统除灰量 机组稳定高负荷工况下, 关闭仓泵上方闸板阀, 打开落灰管飞灰取样管路, 观察取样管路落灰情况, 在取样管路稳定落

灰时, 认为灰斗所收集飞灰已充满闸板阀至飞灰取样位置落灰管, 根据所记录时间、落灰管容积、飞灰密度, 按照式(8)计算得出每小时此落灰管收集飞灰量。

$$Q_2 = \sum_{i=1}^4 \frac{V_i \times \rho_i}{T_i \times 1000} \quad (8)$$

式中: Q_2 为省煤器灰斗除灰量, t/h; V_i 为各落灰管容积, m^3 ; ρ_i 为收集飞灰密度, kg/m^3 ; T_i 为落灰管集满飞灰时间, h。除灰率为 Q_2/Q_0 。

4.2.2 粗颗粒 (200 μm 及以上粒径) 飞灰脱除率

利用粉尘采样仪对 SCR 入口烟气中烟尘进行采样, 采样结束后分析采样飞灰粒径分布, 并得出烟气中粉尘质量浓度。

在 SCR 入口测试烟气流量, 根据烟气量与粉尘质量浓度计算省煤器灰斗除灰后总灰量, 根据粗颗粒预脱除系统除灰比例对脱除前飞灰成分进行修正, 根据省煤器灰斗除灰前飞灰粒径分布及电除尘器入口采样飞灰粒径分布进行对比分析, 得出大颗粒灰脱除率。

$$G_2 = C_2 \times Q \times A_2 \times 10^{-6} \quad (9)$$

式中: G_2 为粗颗粒脱除后烟气中粒径 200 μm 以上飞灰量, t/h; C_2 为粗颗粒脱除后烟气中烟尘质量浓度, g/m^3 ; Q 为烟气量, m^3/h ; A_2 为粗颗粒脱除后采集飞灰样品中粒径大于 200 μm 以上飞灰量, %。

$$G_1 = Q_2 \times A_1 \quad (10)$$

式中: G_1 为除灰装置脱除的灰中粒径为 200 μm 以上飞灰量, t/h; Q_2 为省煤器灰斗除灰量, t/h; A_1 为省煤器除灰装置内采集飞灰样品中粒径 $\geq 200 \mu m$ 以上飞灰量, %; 粗颗粒脱除率为 $G_1/(G_1+G_2)$ 。

4.2.3 预除灰装置新增阻力

项目实施时, 在粗颗粒预脱除装置进出口安装了静压测点, 试验时通过微压计测量预除灰系统进出口静压差, 减掉原始烟道本身阻力, 计算获得除灰装置新增阻力。

4.3 测试结果与分析

4.3.1 除灰率

1) 总输灰量

根据试验采集煤质分析及机组给煤量数据, 总输灰量计算结果见表 6。计算得到, 机组满负荷工况下, 机组总灰量 Q_0 为 35 711 kg/h。

表 6 总输灰量计算
Tab.6 Calculation of total ash transportation volume

检测项目	数据
全水分 $w_t(M)/\%$	9.80
空气干燥基水分 $w_{ad}(M)/\%$	1.08
收到基灰分 $w_{ar}(A)/\%$	27.99
干燥无灰基挥发分 $w_{daf}(V)/\%$	15.68
收到基高位发热量 $Q_{gr,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	21.18
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	20.42
大气压力 P_0/Pa	101 700
烟气中的氧气体积分数 $\varphi(O_2)/\%$	2.27
炉渣灰量占燃煤总灰量的质量分数/ $\%$	90
飞灰灰量占燃煤总灰量的质量分数/ $\%$	10
总给煤量/ $(kg \cdot h^{-1})$	141 762
干基烟气流量 ($\varphi(O_2)=6\%$) / $(m^3 \cdot h^{-1})$	1 054 157
烟气中总灰量/ $(kg \cdot h^{-1})$	35 711

2) 预脱除系统除灰量

落灰管总输灰量计算结果见表 7。根据试验期间采样时间来计算，预脱除系统的除灰量 Q_2 为 5 324 kg/h。

表 7 落灰管总输灰量计算
Tab.7 Calculation of the total ash transportation volume of the falling ash pipe

项目	A 前	B 前	A 后	B 后
落灰管至采样处	0.119	0.088	0.072	0.067
容积/ m^3	656 14	985 80	920 38	808 66
灰密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	780	780	780	780
灰堆积至取灰测点处	2.8	3.4	3.0	3.3
时间/ min				
体积输灰量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	2.56	1.57	1.46	1.23
质量输灰量/ $(t \cdot h^{-1})$	2.00	1.22	1.14	0.96
所有落灰管总输灰量/ $(kg \cdot h^{-1})$	5 324			

3) 除灰率

试验得到，机组满负荷工况下，粗颗粒脱除系统除灰率为 $5\ 324/35\ 711=14.91\%$ 。

4.3.2 粗颗粒 (200 μm 及以上粒径) 飞灰脱除率

1) 粗颗粒脱除系统脱除灰粒径分布

粗颗粒脱除系统脱除灰粒径分布化验结果如图 14 所示，预脱除系统粒径分析及计算结果见表 8。结果表明，前墙灰斗脱除灰中粒径 $\geq 200\ \mu m$ 体积分数为 29.35%，后墙灰斗脱除灰中粒径 $\geq 200\ \mu m$ 体积分数为 48.32%。

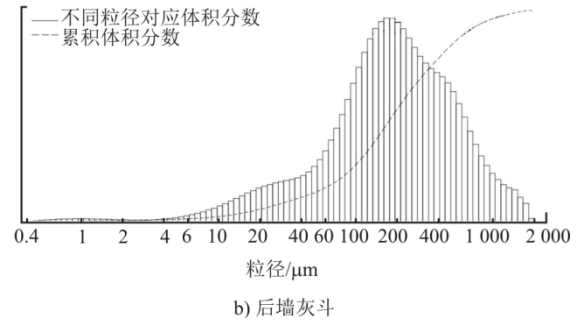
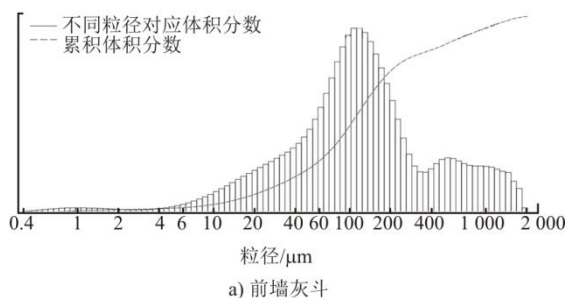


图 14 粗颗粒脱除系统脱除飞灰粒径分布
Fig.14 Particle size distribution of the fly ash removed by the coarse particle removal system

表 8 预脱除系统粒径分析及计算
Tab.8 Particle size analysis and calculation for the pre-removal system

采样位置	预脱除系统前墙灰斗	预脱除系统后墙灰斗
飞灰粒径分布		
粒径小于 161.2 μm 体积分数/ $\%$	65.50	44.10
粒径小于 256.9 μm 体积分数/ $\%$	78.20	62.80
粒径小于 200 μm 体积分数/ $\%$	70.65	51.68
粒径大于 200 μm 体积分数/ $\%$	29.35	48.32

2) 粗颗粒脱除系统后 (脱硝入口) 飞灰粒径分布

粗颗粒脱除系统后烟气飞灰粒径分布结果如图 16 所示。粗颗粒脱除系统后粒径分析及计算结果见表 9。结果表明，粒径大于 200 μm 灰体积分数为 1.44%。

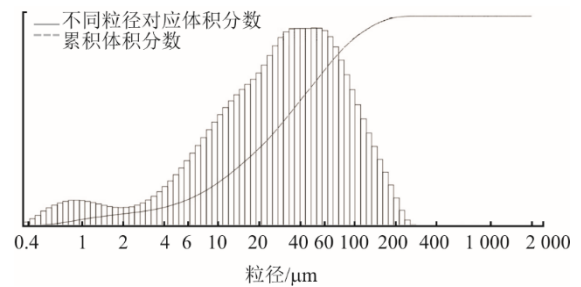


图 15 粗颗粒脱除系统后烟气飞灰粒径分布
Fig.15 Particle size distribution of fly ash in flue gas after flowing through the coarse particle removal system

表 9 粗颗粒脱除系统后粒径分析及计算
Tab.9 Analysis and calculation of particle size of fly ash after coarse particle removal system

采样位置	脱硝入口
飞灰粒径分布数据	
粒径小于 161.2 μm 体积分数/ $\%$	97.60
粒径小于 256.9 μm 体积分数/ $\%$	99.98
粒径小于 200 μm 体积分数/ $\%$	98.56
粒径大于 200 μm 体积分数/ $\%$	1.44

3) 粗颗粒脱除后烟尘质量浓度测试

根据粗颗粒脱除系统后（脱硝入口处）烟尘质量浓度测试结果计算的飞灰质量浓度见表 10。

满负荷工况下，机组脱硝入口烟尘浓度 C_2 为 24.67 g/m^3 。

表 10 粗颗粒脱除后飞灰质量浓度测试结果
Tab.10 Mass concentration test results of fly ash after coarse particle removal

项目	A1	A2	A3	B3	B2	B1
收灰前质量/g	0.900 4	1.191 2	0.968 3	0.954 3	1.008 3	0.782 7
收灰后质量/g	3.123 3	2.940 3	3.274 3	3.123 7	3.152 2	3.381 1
实际质量/g	2.222 9	1.749 1	2.306 0	2.169 4	2.143 9	2.598 4
采样体积/L	163.0	166.1	154.4	154.5	156.8	156.5
标况体积/L	73.6	75.0	69.7	69.7	70.8	70.6
采样时间/min	5	5	5	5	5	5
烟尘质量浓度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	30.20	23.32	33.08	31.12	30.28	36.8
氧气体积分数/%	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27
烟尘质量浓度 ($6\%O_2$) /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	24.19	18.68	26.50	24.93	24.25	29.48
烟尘质量浓度平均值/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)					24.67	

4) 粗颗粒灰脱除率

大颗粒灰脱除率根据 4.2.2 节计算得出，粗颗粒飞灰脱除率计算数据及结果见表 11。在机组满负荷工况下，计算得到粗颗粒脱除系统粗颗粒脱除率为 83.96%。

表 11 粗颗粒飞灰脱除率计算
Tab.11 Calculation of removal rate of coarse fly ash

项目	数据
机组烟气流量/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	1 054 157
粗颗粒脱除后烟尘质量浓度/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	24.67
粗颗粒脱除后飞灰粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 以上飞灰质量分数/%	1.44
脱除后飞灰总量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	26.01
粗颗粒脱除后烟气中粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 样品中飞灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.37
A 侧前墙输灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	2.00
B 侧前墙输灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	1.22
A 侧后墙输灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	1.14
B 侧后墙输灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.96
A 侧前墙飞灰粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 体积分数/%	29.35
B 侧前墙飞灰粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 体积分数/%	29.35
A 侧后墙飞灰粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 体积分数/%	48.32
B 侧后墙飞灰粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 体积分数/%	48.32
省煤器灰斗除灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	5.32
省煤器除灰装置内飞灰粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 体积分数/%	36.83
除灰系统粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 飞灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	1.96
粗颗粒脱除前 脱除前飞灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	31.33
粗颗粒脱除前 脱除前飞灰中 $200 \mu\text{m}$ 以上飞灰体积分数/%	7.45
粗颗粒脱除后烟气中粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 飞灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.37
计算结果 省煤器灰斗除灰量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	5.32
省煤器除灰装置内粒径 $\geq 200 \mu\text{m}$ 飞灰量/%	36.83
粗颗粒脱除率/%	83.96

4.3.3 粗颗粒脱除系统新增阻力

粗颗粒脱除系统阻力测试结果见表 12。

表 12 粗颗粒脱除系统阻力测试结果 单位: Pa
Tab.12 Resistance test results of the coarse particle removal system

烟道位置	A 侧	B 侧
粗颗粒脱除系统压降	82	84
平均值	83	

试验测试结果显示，在机组满负荷工况下，减去原始烟道结构 10 Pa 的阻力，粗颗粒脱除系统净增阻力为 73 Pa，粗颗粒脱除系统阻力试验测试数据与数值模拟结果接近。布置粗颗粒飞灰预脱除装置后，减轻催化剂磨损导致的氨逃逸，进而降低因空气预热器堵塞的阻力，因此装置新增阻力对于风机电耗影响较小，甚至磨损严重的机组在配套该装置后可降低整体烟道阻力。

5 结 论

1) 本文提出了“A 型折流富集+V 型高效收灰+T 型粗灰通道”的“A-V-T”型脱硝前粗颗粒飞灰预脱除方案，可实现 $200 \mu\text{m}$ 及以上粒径飞灰的高效脱除。

2) 模拟条件下，实现了在新增阻力为 78 Pa， $200 \mu\text{m}$ 及以上粒径的粗颗粒飞灰收灰率达到 85.15%，当粗颗粒飞灰在整个烟气飞灰占比更大时，该粗颗粒脱除装置的脱除效果更明显，同时将省煤器灰斗收灰率由 2.31% 提高到 15.50%。

3) 对某 300 MW 机组实施粗颗粒预脱除改造后。经试验，脱硝前 $200 \mu\text{m}$ 及以上粗颗粒灰脱除率为 83.96%，整体灰的脱除率为 14.91%，净增阻力 73 Pa，试验结果验证了数值模拟结果。

4) 开发一种具有广泛适用性，低阻、高效的

粗颗粒预脱除技术, 有利于大幅度降低飞灰对锅炉烟道及内构件的冲刷磨损。粗颗粒预脱除装置适宜布置在大截面低流速的烟道内, 一般在锅炉省煤器出口烟道或者反应器入口烟道都具备布置条件, 对于 600 MW 和 1 000 MW 机组同样具有适用性。

5) 相对满负荷工况, 其他负荷工况下省煤器出口烟道流速降低, 更有利于粗颗粒飞灰脱除装置对飞灰的捕捉, 该技术对非满负荷工况或变负荷工况具有良好的适应性。对调峰机组在低负荷运行时, 在粗颗粒飞灰有效脱除后, 可以有效减轻锅炉烟道积灰。

[参 考 文 献]

- [1] 朱义洲, 王志超, 杨忠灿, 等. 燃煤电站锅炉大颗粒飞灰成因分析[J]. 热力发电, 2019, 48(12): 111-116.
ZHU Yizhou, WANG Zhichao, YANG Zhongcan, et al. Analysis on formation mechanism of large particle fly ash in utility boilers[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(12): 111-116.
- [2] 陈鸿伟, 赵宝宁, 张千, 等. 烟气飞灰对 SCR 脱硝催化剂的磨损性能试验研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(4): 286-290.
CHEN Hongwei, ZHAO Baoning, ZHANG Qian, et al. Experimental study on wear resistance of SCR denitration catalyst to flue gas fly ash[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(4): 286-290.
- [3] 张千, 刘毅, 许文良, 等. 省煤器灰斗结构对飞灰颗粒捕集性能影响研究[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(10): 66-72.
ZHANG Qian, LIU Yi, XU Wenliang, et al. The study on effect of the economizer ash hopper structure on fly ash particle capture performance[J]. Power Science and Engineering, 2016, 32(10): 66-72.
- [4] 何雅玲, 汤松臻, 王飞龙, 等. 中低温烟气换热器气侧积灰、磨损及腐蚀的研究[J]. 科学通报, 2016, 61(17): 1858-1876.
HE Yaling, TANG Songzhen, WANG Feilong, et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(17): 1858-1876.
- [5] 王春波, 陈亮, 任育杰, 等. 基于高温除尘的燃煤电站多污染物协同控制技术[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(6): 82-92.
WANG Chunbo, CHEN Liang, REN Yujie, et al. Collaborative multi-pollutant control technology based on hot gas filtration for coal-fired power plant[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2017, 44(6): 82-92.
- [6] 汪林. 旋风分离器气固两相流数值模拟及性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 1.
WANG Lin. Numerical simulation and performance analysis of gas solid two phase flow in cyclone separator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 1.
- [7] 孟磊, 雷彧, 陈晟, 等. SCR 脱硝装置大颗粒灰拦截网压降特性研究[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 168-174.
MENG Lei, LEI Yu, CHEN Sheng, et al. Research on pressure drop characteristics of large particle ash interceptor in SCR flue gas denitrification system[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(6): 168-174.
- [8] 刘一帆, 董建宁, 田煜昆, 等. 大型火电机组 SCR 烟气脱硝全流场数值模拟分析与优化[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 103-110.
LIU Yifan, DONG Jianning, TIAN Yukun, et al. Numerical simulation and optimization for SCR flue gas denitration full flow field of large thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 103-110.
- [9] 陈鸿伟, 罗敏, 王远鑫, 等. 燃煤锅炉飞灰对 SCR 脱硝催化剂的影响及预防措施. 燃烧科学与技术, 2017, 23(3): 200-211.
CHEN Hongwei, LUO Min, WANG Yuanxin, et al. Influence of coal-fired boiler fly ash on SCR denitration catalysts and preventive measures[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017, 23(3): 200-211.
- [10] 单文盼, 刘安阳, 李丁辉, 等. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝设备大颗粒灰拦截技术的应用研究[J]. 电力科技与环保, 2018, 34(2): 20-23.
SHAN Wenpan, LIU Anyang, LI Dinghui, et al. Application research of large particle ash intercepting technology in SCR flue gas denitrification equipment of coal fired power plant[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2018, 34(2): 20-23.
- [11] 岳朴杰, 雷彧, 陈晟, 等. 选择性催化还原大颗粒灰拦截装置效率及压降特性实验研究[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 119-125.
YUE Pujie, LEI Yu, CHEN Sheng, et al. Experimental investigation on pressure drop characteristics and efficiency of large particle ash interceptor for SCR denitration system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 119-125.
- [12] 岑可法. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 413-491.
CEN Kefa. Prevention and calculation of the fouling, slagging, erosion and corrosion of the boilers and heat exchangers[M]. Beijing: Science Press, 1994: 413-491.
- [13] PATEL R D, PATEL I J. A review paper on erosion and corrosion behavior of coal combustion chamber[J]. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 2014, 1(7): 72-76.
- [14] DAS S K, GODIWALLA K M, HEGDE S S, et al. A mathematical model to characterize effect of silica content in the boiler fly ash on erosion behavior of boiler grade steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204(1/2/3): 239-247.
- [15] HUTTUNEN-SAARIVIRTA E, KINNUNEN H, TUIREMO J, et al. Erosive wear of boiler steels by sand and ash[J]. Wear, 2014, 317(1/2): 213-224.
- [16] 张妮乐, 黄明达, 高胜斌, 等. 根据煤灰成分判别 CFB 锅炉磨损特性的新方法[J]. 动力工程学报, 2006, 26(1): 54-58.
ZHANG Nile, HUANG Mingda, GAO Shengbin, et al. A new criterion for ascertaining the abrasion liability of CFB boilers by ash components[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(1): 54-58.
- [17] 张媛媛, 曲江源, 张锴. 燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统流场均布一体化建模与性能优化[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 146-155.
ZHANG Yuanyuan, QU Jiangyuan, ZHANG Kai. Integrated modeling and performance optimization of

- flow field homogenization in SCR denitrification system of coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 146-155.
- [18] SADEGHI F, TIRANDAZI B, KHALILI-GARAKANI A, et al. Investigating the effect of channel geometry on selective catalytic reduction of NO_x in monolith reactors[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 118: 21-30.
- [19] SHANG D, LI B, LIU Z. Large eddy simulation of transient turbulent flow and mixing process in an SCR denitration system[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 141: 279-289.
- [20] 牛国平, 周梦伟, 杨晓刚, 等. 飞灰分布对烟冷器的磨损研究及工程实践[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 139-146. NIU Guoping, ZHOU Mengwei, YANG Xiaogang, et al. Research and engineering practice for the effect of fly ash distribution on wear of flue gas cooler[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(5): 139-146.
- [21] 董陈, 乔海勇, 牛国平, 等. 某 600 MW 机组 SCR 烟气脱硝装置优化设计[J]. 热力发电, 2014, 43(12): 99-104. DONG Chen, QIAO Haiyong, NIU Guoping, et al. Optimization design of SCR flue gas denitration equipment for a 600 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(12): 99-104.
- [22] 刘舫辰, 石岩, 李元鲁, 等. 用于燃煤电厂的低温省煤器前烟道流动及磨损特性[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(3): 100-108. LIU Fangchen, SHI Yan, LI Yuanlu, et al. Flow and wear characteristics in front flue of low-temperature economizer used in coal-fired power plant[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(3): 100-108.
- [23] 雷彧. SCR 脱硝大颗粒灰拦截装置及技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022: 1. LEI Yu. Research on large particle ash interceptor in SCR flue gas denitration system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022: 1.

(责任编辑 邓玲惠)

广告目次

《热力发电》	封三
国核自仪系统工程有限公司	后彩插 1
西安热工研究院有限公司	后彩插 2—27
中车戚墅堰机车有限公司	后彩插 28