DOI:10. 3969/j. issn. 1674-1951. 2020. 12. 002

SCR催化剂磨损原理探究及优化方案分析

Exploration on causes of SCR catalyst wear and the optimization scheme

于世林¹,金立梅¹,谭厚章^{1*},张高雄²,任巧丽² YU Shilin¹,JIN Limei¹,TAN Houzhang^{1*},ZHANG Gaoxiong²,REN Qiaoli²

(1.西安交通大学 能源与动力工程学院,西安 710049;2.西安圣光控制设备有限责任公司,西安 710021)
 (1.School of Energy and Power Engineering, Xi 'an Jiaotong University, Xi 'an 710049, China; 2.Xi 'an Shengguang Control Equipment Company Limited, Xi 'an 710021, China)

摘 要:选择性催化还原(SCR)是目前应用最广泛、最成熟的燃烧后脱硝技术,但在工程实践过程中存在诸多问题, 其中由于惯性作用导致烟气内飞灰颗粒集中在尾部烟道近锅炉侧,造成了飞灰颗粒对SCR脱硝催化剂局部磨损、 积灰严重,脱硝装置效率大幅下降。针对此类问题,通过分析催化剂磨损原因和机理,设计了改造方案:在烟道内 加装百叶窗导流板优化流场,加装氨-烟混态扰流发生器,通过计算流体动力学(CFD)软件进行可行性验证。结合 工程实践,发现优化改造后能够改善尾部烟道内飞灰颗粒的质量浓度分布,使得尾部烟道内流场分布更均匀,有效 解决催化剂局部磨损的问题。

关键词:SCR 脱硝;催化剂磨损;混态扰流发生器;CFD;流场优化

文献标志码:A

中图分类号:X 733

文章编号:1674-1951(2020)12-0007-07

Abstract: Selective Catalytic Reduction (SCR) is the most widely used and mature post-combustion denitration technology by far, but there are many problems in engineering practices. The ash particles in flue gas concentrating in tail flues near boiler side because of inertia can result in local wear and ash accumulation of SCR denitration catalyst, which dramatically reduces the efficiency of denitration units. A targeted optimization scheme was designed through analyzing the cause and mechanism of catalyst wear, in which the flow field in the flue was optimized by installing louver guide plates and ammoniasmoke mixed vortex generators. The feasibility of the scheme was verified by CFD. Combined with the engineering practice, the modification installing louver guide plates and an ammonia-smoke mixed vortex generator in the tail flue can improve the uniform distribution of particle mass concentration in the flue and solve the local wear of catalyst effectively. **Keywords**: SCR denitration; catalyst wear; mixed vortex generator; CFD; flow field optimization

0 引言

近几年来,环境问题成为人们日益关注的问题,酸雨、雾霾、沙尘暴等极端恶劣天气的出现次数与日俱增,据有关部门统计数据显示,氮氧化物(NO_x)等一系列大气污染物是引发上述恶劣天气的主要原因^[1]。

作为 NO_x重点排放单位,燃煤电厂减少 NO_x的 排放成为当务之急。国家相关部门也相继颁布愈 加严苛的 NO_x排放标准,为达到国家超低排放标准, 减少燃煤电厂 NO_x排放质量浓度,燃煤电厂多采取 多种脱硝方式结合的方法,包括低氮燃烧工艺和烟 气脱硝工艺两部分^[2]。其中选择性催化还原(SCR) 技术是当下应用最广泛、最成熟的脱硝技术^[3],但也

收稿日期:2020-09-30;修回日期:2020-11-30

存在着很多技术性问题亟待解决。

国内某电厂330 MW 燃煤汽轮发电空冷供热机 组,亚临界参数变压运行螺旋管圈直流炉的锅炉尾 部布置了SCR烟气脱硝装置,但长期运行过程中发 现催化剂被烟气中飞灰颗粒局部磨损。高质量浓 度、大粒径的飞灰颗粒长时间对催化剂近锅炉侧进 行冲刷,导致该部分催化剂穿透形成烟气走廊,进 而在催化剂上形成积灰,使得脱硝装置效率大幅 下降。

为解决燃煤电厂尾部烟气中飞灰颗粒对脱硝 催化剂的局部磨损问题和由于局部磨损而导致的 积灰、脱硝效率下降等问题,本文针对SCR脱硝装 置近锅炉侧催化剂易受到局部磨损问题,研究磨损 原理,并对优化方案进行可行性验证。

1 SCR催化剂磨损原因分析

脱硝装置的烟道及反应器位于锅炉省煤器后、 空气预热器(以下简称空预器)前。烟气在锅炉出 口处分成2路,每路烟气分别进入下游SCR反应器 内,在反应器内烟气通过导流板、催化剂层,随后进 入回转式空预器。

在原设计省煤器出口烟道转弯处,当水平烟道 中飞灰颗粒转入上升烟道后,由于惯性作用,质量 浓度较高及粒径较大的飞灰颗粒在Ⅱ型烟道内壁 富集;转弯上升过程中,由于粒径较大的飞灰颗粒 惯性较大,不易在气流的携带下向整个断面扩散, 因此到达上升烟道转弯处经内侧第1块导流板导 流撞击后,高质量浓度、大粒径的飞灰颗粒集中在 水平烟道底部;当水平烟道转为下行烟道时,在内 侧导流板撞击导流作用下,高质量浓度、大粒径的 飞灰颗粒被带到催化剂入口断面的近锅炉侧,从而 造成催化剂近锅炉侧的磨损,靠前墙催化剂磨损情 况,如图1所示。催化剂层由于长期被冲刷,产生了 大面积的脱落、磨损和积灰,烟气易穿透形成烟气 走廊。



图 1 靠前墙催化剂局部磨损情况 Fig. 1 Local wear of catalyst by the front wall

2 磨损机理分析

飞灰颗粒对催化剂的撞击可分为垂直(法线方向)分力和切向(切线方向)分力。飞灰颗粒垂直撞击可使催化剂表面产生微小的塑性变形或显微裂纹,称为撞击磨损^[4]。飞灰颗粒切向撞击则对催化剂表面产生微小的切削作用,造成摩擦损失。由于烟气中大量飞灰颗粒对催化剂的撞击、切削,造成冲击角度在 30°~50°范围内的催化剂壁面磨损最为严重^[5]。磨损量常用管壁最大磨损厚度 *E*_{mx}来表

示,可由下列经验公式估算[4.6]

$$E_{\max} = a\eta M \mu k_{\mu} t \left(\frac{k_{\omega} w}{2.85 k_{\rm D}} \right)^{3.3} R_{90}^{2/3} \left(\frac{s_1 - d}{s_1} \right)^2, \quad (1)$$

式中:a为与煤灰磨损特性及管束结构有关的磨损 系数; η 为灰粒碰撞管壁的频率因子;M为管材的抗 磨系数; μ 为管束计算断面处烟气的飞灰质量浓度, g/m^3 ; k_{μ} , k_{α} 为飞灰质量浓度和烟气速度场不均匀系 数;t为锅炉运行时间,h;w为管束间最窄截面处烟 气流速,m/s; k_p 为锅炉额定负荷与实际运行负荷时 烟速的比值; R_{90} 为飞灰颗粒细度,%; s_1 为顺列部分 横向节距,m;d为管道直径, m_0

从上式可以看出,催化剂磨损状况受很多因素 影响,其中包括飞灰特性和锅炉管束性能。特别 的,催化剂磨损状况与烟气流速的3.3次方成正比, 与飞灰质量浓度成正比。由此,在烟气流速一定的 情况下,烟气中飞灰颗粒质量浓度场对催化剂的磨 损起主要作用,而影响烟气飞灰颗粒质量浓度场最 关键的因素在于催化剂入口处飞灰颗粒质量浓度 及颗粒粒径。

3 改造方案简介

3.1 加装百叶窗导流板

通过以上理论分析,现有的SCR脱硝设备烟道 进口的烟气速度场及飞灰颗粒质量浓度场分布是 不均匀的,通过在喷氨格栅(AIG)前面烟道外侧(导 流板2后面)加装3组百叶窗导流板,改变此处飞灰 颗粒的运动方向,使飞灰颗粒在首层催化剂截面上 均匀分布,来消除飞灰颗粒质量浓度沿水平烟道的 速度偏差。设计百叶窗导流板的合理间隙结构以 尽量不影响上升烟道的同一水平截面的气流速度 分布。SCR装置内Π型烟道水平段和催化剂上部竖 直烟道的飞灰颗粒质量浓度场和速度场的分布更 加均匀,可有效解决SCR催化剂局部严重磨损的 问题。

3.2 加装氨-烟混态扰流发生器

在AIG之后加装氨-烟混态扰流发生器,可以 改善SCR反应器入口处的烟气速度分布、飞灰颗粒 质量浓度分布,以及NH₃和NO_x分布的均匀性,安装 位置如图2所示。

3.3 流场优化设计

添加百叶窗导流板后,通过改变颗粒的运动方 向来降低催化剂近炉侧区域的飞灰颗粒质量浓度。 为进一步减小添加百叶窗导流板对催化剂入口截 面气流速度分布均匀性的影响,在导流板4之后烟 道顶添加1组导流板,如图3所示。



图 2 百叶窗导流板和氨-烟混态扰流发生器加装位置 Fig. 2 Installation position of the louver guide plate and the

ammonia-smoke mixed vortex generator



图 3 烟道新加导流板示意 Fig. 3 Schematic of the installed guide plates in flue

4 优化改造方案计算分析

4.1 模型建立与网格划分

本文对上述 300 MW 国产亚临界燃煤空冷凝汽 式供热机组的烟气脱硝装置进行优化前后的计算 流体动力学(CFD)数值模拟,对比优化改造前后首 层催化剂入口区域质量浓度和尾部烟道内飞灰颗 粒速度场分布,验证上述方案的可行性。CFD数值 模拟采用 Fluent 14.0 软件,按照 1:1 的比例建立 SCR反应器系统的原始模型,始于锅炉省煤器出口, 止于空预器入口(实际 SCR 系统的界定以进、出口 膨胀节为限)。因为左、右两侧 SCR 脱硝反应器结 构及入口烟气条件相同,且沿锅炉中心线呈对称布 置,故仅以单侧反应器作为研究对象。实际计算中 SCR系统的几何模型如图4所示。



图 4 SCR 反应器三维模型 Fig. 4 3D model of the SCR reactor

对计算模型进行网格划分,模型网格划分的优 劣直接关系到模拟结果的合理性。采用分区划分 网格的方法,将计算区域分解为多个相对简单的模 型分别进行网格划分。考虑到导流板、整流格栅和 烟道等其他部分的尺寸差异较大,对它们进行局部 网格加密,目前针对 330 MW 机组 SCR 脱硝系统进 行 的 数 值 模 拟 计算,网格 数 量 大 都 在 170 万 以上^[7-9]。

本次计算模型网格采用4种网格数量进行无关 性检验,验证结果见表1。由表1可知,网格数量对 计算结果的影响较大,当网格数量大于200万时,各 检测项目的模拟结果变化差异不大。在兼顾计算 量和网格合理性的情况下,此次模拟SCR脱硝系统 模型总网格数约为300万,计算模型总体网格划分 情况如图5所示。

4.2 边界条件

根据电厂实际运行情况构建SCR反应器模型, 计算入口采用速度入口边界条件,计算出口设置为 压力出口边界条件;烟道壁面、导流板和整流格栅 设为"壁面",采用标准壁面方程、无滑移边界条件。

4.3 控制方程

对于复杂的气相湍流旋转流动,理论上最精确 的方法是直接数值模拟(DNS),但是DNS求解瞬时 的湍流控制方程要求计算网格必须足够小,因此对 计算机的要求较高,目前无法用于真正意义上的工

表	1 网格无关性检验结果	
Tab. 1	Grid independence test results	

III 日	网格数量			
	1 015 328	2 328 076	3 004 694	4 538 643
首层催化剂上游烟气流速分布偏差/%	13.52	11.47	10.80	10.67
首层催化剂上游烟气最大入射角/(°)	12	9	8	7
首层催化剂上游截面烟气最大流速/(m·s ⁻¹)	8.57	7.32	7.66	7.62
系统阻力/Pa	958	879	905	896





程计算。目前针对工程实际问题应用较多的是非 直接数值模拟的雷诺平均法,该方法有2种模型,即 雷诺应力模型和涡粘模型。涡粘模型中有零方程 模型、一方程模型和两方程模型,目前工程上应用 最广泛的是两方程模型:标准(Standard) $k-\varepsilon$ 模型、 重整化群(RNS) $k-\varepsilon$ 模型和可实现(Realizable) $k-\varepsilon$ 模型。Standard $k-\varepsilon$ 模型和可实现(Realizable) $k-\varepsilon$ 模型。Standard $k-\varepsilon$ 模型不能准确地预报旋转流动 中心回流区的大小和强度,而Realizable $k-\varepsilon$ 模型能 较好地模拟旋转流动,因此从工程角度看, Realizable $k-\varepsilon$ 模型比较适合旋流流动。

采用 Realizable *k*−*ε*模型进行湍流封闭,在直角 坐标系下,气相运动的控制方程通用形式为

 $\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho U\Phi) - \operatorname{div}(\Gamma_{\phi}\operatorname{grad}\Phi) = S_{\phi} + S_{\rho\phi}, (2)$ 式中: ρ 为流体密度;U为流体速度矢量; Γ_{ϕ} 为广义扩散系数; Φ 代表流体速度矢量在某一方向上的速度 $(u,v,w); S_{\phi}$ 为气相引起的源相; $S_{\rho\phi}$ 为固体颗粒引起的源相。

各控制方程中*Γ*,*Φ*,*S*均有其特定的表达式和 对应的物理意义^[10]。

连续性方程中,颗粒的质量变化项是固体颗粒 引起的源项;动量方程中,是颗粒与气体之间相互 作用的阻力及颗粒的热解挥发而引起的动力源项, 在*k-ε*方程中忽略了该项。Realizable模型^[11-12]考虑 到平均流动中的旋转及旋转流动,通过修正后的黏 度和大尺度运动项体现小尺度运动项的影响,从控 制方程中将这些小尺度运动项系统地去除,使之可 以很好地应用到有强曲率影响的快速畸形流动中, Realizable *k-ε*模型相比Standard *k-ε*模型对瞬变流 和流线弯曲的影响能做出更好的反应。因此本次 数值模拟试验气相采用Realizable *k-ε*模型,该模型 不仅适用于高雷诺数湍流,对于低高雷诺数湍流区 域,可以直接积分到壁面,而不必像Standard *k-ε*模 型那样在近壁面区域必须采用相应的处理。

Realizable $k - \varepsilon$ 模型的 $k \pi \varepsilon$ 方程分别为^[13]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - , (3)$$

$$\rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_s \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\upsilon \varepsilon}} + , (4)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_{\varepsilon}$$

其中,

$$u_i = \overline{u_i} + u_i' , \qquad (5)$$

$$\mu_{\rm eff} = \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} , \qquad (6)$$

$$\mu_{t} = \frac{C_{\mu}\rho k^{2}}{\varepsilon} , \qquad (7)$$

$$G_{k} = -\rho \, \overline{u'_{i} u'_{j}} \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \,, \tag{8}$$

$$C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right],$$
 (9)

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} , \qquad (10)$$

式中:k为湍流动能; ε 为湍流耗散项; G_k 为层流速度 梯度产生的湍流动能; G_b 为由于浮力而产生的湍流 动能; $Y_{\rm M}$ 为可压缩湍流中的脉冲膨胀对总耗散率的 影响, S_k , S_s 为自定义源项; C_{3e} 为浮力对湍流耗散项 的影响系数;S为平均应力张量;v为分子运动黏度; μ 为黏性系数; μ_i 为湍流黏性系数; u_i 为层流速度u在 i方向上的分量, $\overline{u_i}$, $\overline{u_j}$ 为平均速度分量, u'_i , u'_j 为脉冲 速度分量; u_j 为层流速度u在j方向上的分量; x_i , x_j 为 位置坐标。Realizable $k-\varepsilon$ 模型中,有关常数取 值^[14-15]: C_{μ} =0.0845, α_k =1.39, α_s =1.2, C_{1s} =1.44, σ_k = 1.0, C_2 =1.9。

5 结果分析

5.1 速度场分布分析

图6为本次优化设计后各区域烟气速度标量分 布,可以看出优化后的脱硝系统各层催化剂区域的 烟气速度分布较为均匀,说明本次设计不影响烟道 内速度场的均匀性。

图7为优化后烟气在首层催化剂入口截面的速 度分布,可以看出优化后催化剂区域烟气分布均 匀,催化剂得到充分利用,可保证脱硝效率并降低 局部氨逃逸率。

5.2 飞灰颗粒质量浓度分布分析

优化前飞灰颗粒质量浓度和飞灰颗粒运动轨 迹如图 8—9所示,原SCR脱硝设备烟道进口的飞灰



图 0 迷皮标重分布 Fig. 6 Velocity contour



图 7 首层催化剂入口截面速度分布 Fig. 7 Velocity contour on the inlet section of the first layer catalyst

颗粒质量浓度场分布是不均匀的,首层催化剂上游 飞灰颗粒富集在催化剂近锅炉侧,长期冲刷催化剂 局部。在AIG前面烟道外侧(导流板2后面)加装百 叶窗导流板和氨-烟混态扰流发生器后,飞灰颗粒 质量浓度和飞灰颗粒运动轨迹如图10—11所示。 对比优化前后飞灰颗粒质量浓度和运动轨迹,可以 看出,优化后的脱硝系统首层催化剂入口沿烟道水 平截面上的飞灰颗粒质量浓度趋于均匀,飞灰颗粒 运动轨迹分布也更加均匀。



图 8 优化前飞灰颗粒质量浓度 Fig. 8 Particle mass concentration before the optimization

5.3 混态扰流发生器效果分析

现有国内 SCR 脱硝设备烟道入口处的烟气速 度场及飞灰颗粒质量浓度场分布是不均匀的,一般 采用在 AIG 前面加装导流板来消除烟气的速度偏 差^[16-23],但烟气成分的质量浓度偏差(主要指 NH₃与 NO₄混合不均匀)难以用该设备消除,因此 AIG 到催



Fig. 9 Particle trajectory before the optimization



图10 优化后飞灰颗粒质量浓度

Fig. 10 Particle mass concentration after the optimization



Fig. 11 Particle trajectory after the optimization

化剂之间的烟道长度必须足够长,才能保证有足够的烟气扩散、稀释和混合时间。然而现有系统的烟道都较短,无法使 NH₃与 NO₄充分混合,使进入催化剂的 NH₃和 NO₄的混合均匀性差。因此提出了在AIG 后面加装氨-烟混态扰流发生器,用以改善 SCR反应器入口处 NH₃和 NO₄的混合均匀性。图 12 为在喷氨格栅上方加装氨-烟混态扰流发生器后的整体流线图。通过分析可以看出,烟气由下至上流动,经过氨-烟混态扰流发生器后湍流强度增加,合理设计静态氨-烟混态扰流发生器的形状和安装位置,通过氨-烟混态扰流发生器的形状和安装位置,通过氨-烟混态扰流发生器的形式和安装位置,通过氨-烟混态扰流发生器的形式和安装位置,通过氨-烟混态扰流发生器和表达

5.4 CFD 数值模拟结果

优化后对首层催化剂上方烟气速度分布、入射

角和阻力增加等情况进行了校核模拟计算,结果见 表2,计算结果满足相关的性能指标。



Fig. 12 Overall flow distribution after installing the ammonia-smoke mixed vortex generator

表2 CFD 计算结果与性能指标比较

Tab. 2 Comparison of CFD calculation results and performance indicators

参数	性能指标	结果
首层催化剂上游烟气速度分布相 对标准偏差/%	<15.0	10.8
首层催化剂上游烟气入射角/(°)	<10	7—8
增加阻力/Pa	<100	90

5.5 现场优化改造对比

在实际工程实践中采用上述优化改造方案,改 造前脱硝系统的首层催化剂磨损严重,导致部分催 化剂缺损、脱落,形成了烟气走廊,脱硝系统的脱硝 效率大幅下降;在改造后,催化剂没有发生大面积 磨损、脱落的情况,保证了催化剂的完整,确保催化 剂能够在SCR 脱硝过程中发挥作用。改造前后催 化剂对比如图13所示。





b 改造后 b After the modification 图13 改造前后催化剂对比 Fig. 13 Comparison of catalyst status before and after the modification

结论 6

针对SCR脱硝系统普遍存在的催化剂局部磨 损问题,通过分析引起催化剂磨损的原因和机理, 总结设计了优化改造方案并结合实际改造效果进 行了可行性检验。

(1)由于惯性作用而富集在近锅炉侧的飞灰颗 粒对SCR入口断面催化剂不断冲刷造成磨损,磨损 情况与烟气流速和烟气中飞灰颗粒质量浓度成 正比。

(2) 对脱硝系统催化剂磨损的状况和磨损原 因、机理进行分析,提出改造方案:在烟道内安装百 叶窗导流板优化烟道内流场并加装氨-烟混态扰流 发生器。CFD数值模拟证明,该方案能够优化SCR 扰流器内飞灰颗粒和NH,和NO,的混合均匀性,形 成均匀的飞灰颗粒质量浓度场和速度场,从而减少 飞灰对催化剂的磨损。

(3)实际工程实践过程中,首层催化剂上游近 锅炉侧富集的飞灰颗粒在优化改造后分布重新趋 于均匀,催化剂大面积磨损、脱落的问题得以解决。

参考文献:

[1]王旭睿.氮氧化物危害及处理方法[J].当代化工研究, 2018(10):116-117.

WANG Xurui.Nitrogen oxide hazards and treatment methods [J].Modern Chemical Research, 2018(10):116-117.

- [2]毛剑宏.大型电站锅炉SCR烟气脱硝系统关键技术研究 [D].杭州:浙江大学,2011.
- [3]杨冬,徐鸿.SCR烟气脱硝技术及其在燃煤电厂的应用 [J].电力环境保护,2007,23(1):49-51.

YANG Dong, XU Hong. Discussion on the application of the SCR technology in coal-fired power plants [J].Electric Power Technology and Environmental Protection, 2007, 23 (1): 49-51.

- [4]夏力伟,张学锁,韦红旗,等.SCR烟气脱硝系统上层催化 剂磨损原因分析[J].热力发电,2015,44(2):110-114. XIA Liwei, ZHANG Xuesuo, WEI Hongqi, et al. Reason analysis on abrasion of upper catalyst layer in an SCR deNO. device: Field test and numerical simulation [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(2): 110-114.
- [5]陈鸿伟,徐继法,王广涛,等.烟气飞灰对SCR脱硝催化剂 磨损数值模拟[J].动力工程学报,2019,39(2):148-154. XU Hongwei, XU Jifa, WANG Guangtao, et al. Numerical simulation on the erosion of SCR denitration catalysts by flue gas fly ash [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(2): 148-154.

[6]樊泉桂.锅炉原理[M].北京:中国电力出版社,2004.

- [7]孙雪峰,王强,颜世剑,等.350 MW机组锅炉SCR脱硝系统优化[J].洁净煤技术,2020,26(1):221-227.
 SUN Xuefeng, WANG Qiang, YAN Shijian, et al. Optimization of SCR denitrification system for 350 MW unit boiler[J].Clean Coal Technology,2020,26(1):221-227.
- [8]孟文宇.SCR脱硝系统模拟优化研究及应用[D].太原:山 西大学,2018.
- [9]陈天杰.基于气固两相的SCR脱硝系统流场优化及喷氨 控制方法[D].南京:东南大学,2015.
- [10]王福军.计算流体力学——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [11]SPEZIALE C G, GATSKI T B, FITZMAURICE N. An analysis of RNG-based turbulence models for homogeneous shear flow[J].Physics of Fluids A Fluid Dynamics, 1991, 3 (9).DOI: 10.1063/1.857963.
- [12]YAKHOT V, ORSZAG S A.Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1):3-51.
- [13]陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版 社,2001.
- [14]吴子牛.计算流体力学基本原理[M].北京:科学出版 社,2001.
- [15]马贵阳,解茂昭.用RNG k-ε模型计算内燃机缸内湍流流动[J].燃烧科学与技术,2002,8(2):171-175.
 MA Guiyang, XIE Maozhao.Application of RNG k-ε model to the in-cylinder turbulent flow in ICE [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002, 8 (2): 171-175.
- [16]苑广存.500 MW机组脱硝系统喷氨格栅优化设计[J]. 锅炉技术,2019,50(6):8-12.

YUAN Guangcun. Optimal design of ammonia injection grid for SCR of 500 MW unit[J].Boiler Technology, 2019, 50(6):8-12.

[17]范辰浩,尚天坤,全文涛,等.基于数值模拟分析及试验 校核的喷氨系统结构优化[J].锅炉技术,2019,50(4): 19-23.

FAN Chenhao, SHANG Tiankun, QUAN Wentao, et al. Structure optimization of ammonia injection system based on numerical simulation analysis and field [J]. Boiler Technology, 2019, 50(4):19-23.

[18]梁建新.浅谈电站锅炉烟气脱硝系统喷氨优化调整方法 [J].中国设备工程,2019(20):75-76.

LIANG Jianxin. The optimization and adjustment method of ammonia injection in flue gas denitration system of power station boiler [J]. China Plant Engineering, 2019 (20) : 75-76.

[19] 王为, 王乐乐, 孔凡海, 等. 高温除尘脱硝一体化装置 SCR催化剂选型设计分析[J]. 华电技术, 2020, 42(9): 26-31.

WANG Wei, WANG Lele, KONG Fanhai, et al. Selection and design of SCR catalyst for a high - temperature dedusting and denitration integrated device [J]. Huadian Technology, 2020, 42(9):26-31.

- [20]余靖,侯博,黄齐顺,等.超低排放燃煤机组汞的形态分布和排放研究[J].华电技术,2020,42(9):69-75.
 YU Jing, HOU Bo, HUANG Qishun, et al. Study on form distribution and emission of mercury from ultra low emission coal-fired power plants[J].Huadian Technology, 2020,42(9):69-75.
- [21]孙哲,刘振波.基于智慧模型的脱硝控制系统优化[J]. 华电技术,2020,42(9):37-44.
 SUN Zhe, LIU Zhenbo. Application of intelligent model in denitration control system optimization [J]. Huadian Technology,2020,42(9):37-44.
- [22]徐克涛,何永兵,裴煜坤,等.某燃煤电厂SCR脱硝装置 堵塞问题分析及改进[J].华电技术,2019,41(6): 46-49.

XU Ketao, HE Yongbing, PEI Yukun, et al. Analysis and improvement of SCR denitrification devices blockage in a coal fired power plant [J]. Huadian Technology, 2019, 41 (6):46-49.

[23] 游松林,罗洪辉,王振,等.燃煤电厂SCR脱硝系统氨逃 逸率控制技术研究[J].华电技术,2019,41(2):55-59.
YOU Songlin,LUO Honghui, WANG Zhen, et al.Study on ammonia escape rate control technology of SCR denitrification system in coal fired power plant [J]. Huadian Technology,2019,41(2):55-59.

(本文责编:张帆)

作者简介:

于世林(1997—),男,山东青岛人,在读硕士研究生,从 事煤炭清洁利用方面的研究工作(E-mail:ysl0210@stu.xjtu. edu.cn)。

谭厚章*(1965—),男,江西永新人,教授,工学博士,博 士生导师,从事煤粉洁净燃烧、生物质燃烧与结焦模拟、大型 火电厂锅炉与关键辅机节能理论与应用等方面的研究(Email:tanhz@mail.xjtu.edu.cn)。