

中低负荷下 300 MW 燃煤机组 SCR 入口烟温提升方案设计

梅文^{1,2}, 王峰¹, 武洁^{1,3*}, 周会成^{1,2}, 唐忠锋^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051;

2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

3. 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司, 内蒙古呼和浩特 010020)

摘要:针对燃煤机组在中低负荷运行时,选择性催化还原脱硝反应系统(SCR)入口烟温低而无法投运的问题,以某电厂300 MW 燃煤机组为研究对象,采用给水旁路和烟气旁路联合设计方案,分析 SCR 入口烟气温度变化。利用 Aspen Plus 建立宽负荷脱硝模型,根据温升要求调节流量提升 SCR 入口烟气温度。结果表明,在锅炉最大连续蒸发量为 20%~86% 负荷区内,联合设计方案投入后对机组热效率影响范围为 0.1%~1.19%,流量调节对比单独投入调节总量减少 3%~8%,入口烟气温度最高提升 50℃,脱硝效率最高提升 31.5%,NO_x 的排放浓度低于 36.8 mg/m³。该方案可实现锅炉最大连续蒸发量的 20% 负荷以上 SCR 的稳定运行,满足排放要求。为深度调峰下燃煤机组变负荷运行引起的 SCR 入口烟温低导致 NO_x 浓度超标等提供解决方案。

关键词:深度调峰;NO_x;SCR;温度;火电厂;燃煤机组

中图分类号:TK223.27

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)12-0219-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.12.038

Design of SCR inlet flue temperature enhancement program for 300 MW coal-fired units under low and medium loads

MEI Wen^{1,2}, WANG Feng¹, WU Jie^{1,3*}, ZHOU Hui-cheng^{1,2}, TANG Zhong-feng^{1,2}

(1.College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2.Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 3.Inner Mongolia Power Technology Research Institute Branch, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, China)

Abstract:The selective catalytic reduction denitrification reaction (SCR) system cannot operate due to a low inlet flue gas temperature when the coal-fired units in thermal power plant operate at low and medium loads.To address this issue,a 300 MW coal-fired unit of a power plant is taken as the research object,a joint design scheme combining feedwater bypass with flue gas bypass is employed to analyze the change of the inlet flue gas temperature of the SCR. Aspen Plus software is utilized to establish a wide-load denitrification model,and the flow rate is adjusted to raise the SCR inlet flue gas temperature according to the temperature rise requirement.Study results show that as the maximum continuous evaporation of the boiler stays at the load range of 20%-86%,the joint design scheme has a 0.1%-1.19% impact on the thermal efficiency of the unit,the flow regulation amount is 3%-8% lower than the total regulation amount by separated input,the temperature of the inlet flue gas is increased by up to 50℃,the denitrification efficiency is increased by up to 31.5%,and the emission concentration of NO_x is lower than 36.8 mg/m³.This scheme can help SCR realize the stable operation when the maximum continuous evaporation amount of the boiler exceeds 20% load,and meet the emission requirements.This study provides solutions for the problem that NO_x concentration surpasses the emission standard due to low SCR inlet flue temperature caused by variable load operation of coal-fired units under deeply peak shaving.

Key words:deeply peak shaving; NO_x; SCR; temperature; thermal power plant; coal fired unit

“双碳”战略下,可再生能源并网的比例逐渐增加,燃煤机组在电源侧保供调峰作用使得中低负荷运行逐渐成为常态^[1-2]。当燃煤机组负荷较低时,选择性催化还原脱硝反应系统(SCR)的入口烟气温度将脱离其设计运行温度范围,导致烟气中 NO_x 含量远高于 50.0 mg/m³ 的环保限值,必须开展 SCR

入口烟温提升方案设计^[3-4]。目前提高 SCR 入口烟温技术主要包括烟气旁路、省煤器分级、给水旁路以及热水再循环 4 种方案^[5-7]。

董陈等^[8]以 600 MW 机组 SCR 系统为例,通过数值模拟的方法对机组进行旁路烟道改造,在 60% 热耗率验收工况下使 SCR 入口烟气温度从 295℃ 提

收稿日期:2025-03-14;修回日期:2025-09-23

基金项目:内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司项目(2024-ZC-2-02);中央引导地方科技发展奖励资金项目(2023ZY0006)

作者简介:梅文(2000-),男,硕士,研究方向为燃烧污染物控制,20221100204@imut.edu.cn;武洁(1986-),女,博士生,高级工程师,能源与环境保护方向,通讯联系人,wujiegongda@126.com。

升到 319℃,满足喷氨温度要求。张楚城等^[9]将主、旁路烟气之间的混合距离延长到 20 m,使高温烟气加热氨气的同时与低温烟气均匀混合,减小催化剂上层截面温度偏差,实现了 SCR 宽负荷运行。王煜伟^[10]以某超超临界 1 000 MW 机组塔式锅炉为研究对象,利用给水旁路改造后,在 30% 锅炉最大蒸发量(BMCR) 负荷以上运行,SCR 入口烟温能提升 10~15℃。李守磊等^[11]以 680 MW 超临界机组为研究对象,研究发现投运给水旁路系统,每增加给水旁路流量 100 t/h,SCR 装置入口烟温可升高约 5℃。王懂北^[12]利用热水再循环技术对 600 MW 锅炉进行改造,改造后 35% BMCR 工况下出口烟温能从 293℃ 提升到 315℃。徐嘉叶等^[13]对某 600 MW 亚临界机组进行热水再循环改造,在机组 30% BMCR 负荷下,省煤器出口烟气温度达到 309.1℃,增幅为 30.8℃,但需要精准调节再循环水量^[14]。邹祥波等^[15]对 700 MW 燃煤机组省煤器分级改造工程案例进行分析,发现改造后的机组在 36% 热耗率验收负荷以上工段 SCR 入口烟气温度能提高 40℃ 左右。省煤器分级对锅炉影响较小,但有烧结 SCR 脱硝系统催化剂的风险,并且改造难度较大^[16-17]。综上所述,已有中低负荷下 SCR 入口烟温的提升方案,方案可在 30%~50% BMCR 负荷区间将 SCR 入口的烟温提升至所需工作温度范围。上述方案对低于 30% BMCR 中低负荷区深度调峰下,SCR 入口烟温远低于工作温度,现有方案无法解决 SCR 入口烟温低的问题,亟需开展 SCR 入口烟温提升方案设计分析。

本文中以某电厂 300 MW 燃煤机组为研究对象,采用给水旁路和烟气旁路联合投入的设计方案。以最低 20% BMCR 负荷以上投用 SCR 脱硝系统为目标,将 SCR 入口烟气温度由 270.2℃ 提升到 320℃ 以上,同时保证锅炉总体性能基本维持原状,以此作为判断灵活性脱硝设计方案成功与否的标准^[18]。以某电厂 300 MW 燃煤机组实际运行数据对模拟结果进行验证,提出一种适用燃煤机组 20% BMCR 负荷以上 SCR 稳定运行的设计方案,实现燃煤机组宽负荷运行,为燃煤机组深调运行提供理论依据。

1 模型的建立与计算

1.1 机组概况

以蒙西地区某电厂 300 MW 超临界参数直流煤粉炉为案例,SCR 脱硝反应器布置在出口与空气预热器之间,反应器催化剂为钒系催化剂,规定使用温度为 320~400℃^[19]。该锅炉在运行期间 20%~

100% BMCR 负荷区间下 SCR 脱硝入口烟气温度与脱硝效率基本呈线性关系。

该锅炉在运行期间(20%~100% BMCR),当负荷低于 86% BMCR 时,SCR 装置入口烟温降到 320℃ 以下,低于催化剂设计运行温度,导致脱硝效率低,反应器内会生成硫酸氢铵,覆盖催化剂活性位点,产生不可逆损失并导致催化剂失活,同时会堵塞空气预热器^[20]。若要确保机组深度调峰至 20% BMCR 以上脱硝装置全程投入,必须设计提高 SCR 脱硝入口烟气温度的方案。

1.2 方案设计

本设计旨在实现机组的宽负荷运行,为解决该机组在 20%~86% BMCR 负荷区间内 SCR 入口烟气温度低、脱硝效率低的问题提供方案。现有宽负荷脱硝技术方案详见表 1,烟气旁路设计方案最高能提升烟温 40℃,但实际运行存在漏烟问题。给水旁路方案简易且成本低,但对烟温提升有限。热水再循环方案调节性能好,但系统复杂、排烟温度高对锅炉热效率影响大。省煤器分级方案对锅炉效率影响小,但改造难度大且难以调节烟温,高负荷时可能导致 SCR 脱硝系统超温。

表 1 宽负荷脱硝方案对比

技术方案	对锅炉的影响	安全可靠	温升/℃
烟气旁路	排烟温升 2~5℃	旁路漏烟	40
给水旁路	排烟温升 2~4℃	可靠性好	10~15
热水再循环	排烟温升 0~12℃	改善水工况	20~40
省煤器分级	对锅炉无影响,需改进 SCR 烟道	可靠性好,难以调节	>20

考虑到本文中案例工况,20% BMCR 负荷下机组 SCR 入口烟气温度仅有 270.2℃,单独采取一种技术方案无法将烟温提升到 320℃ 以上,不能满足脱硝装置长时间安全稳定投入运行的要求。而烟气旁路联合给水旁路技术方案对锅炉影响小且能满足温升要求;烟气旁路联合省煤器分级方案满足温升要求,但对机组改造空间要求较高;热水再循环联合省煤器分级方案也满足温升要求,但对锅炉影响较大、对改造空间要求高。因此以烟气旁路和给水旁路联合设计方案,满足 SCR 脱硝装置中低负荷区间的投运温度要求。

1.3 宽负荷脱硝模型建立

1.3.1 宽负荷脱硝设计模型

基于燃煤机组原有的煤燃烧系统、烟气换热系统和 SCR 脱硝系统,利用 Aspen Plus 建立给水旁路和烟气旁路联合设计模型,如图 1 所示。

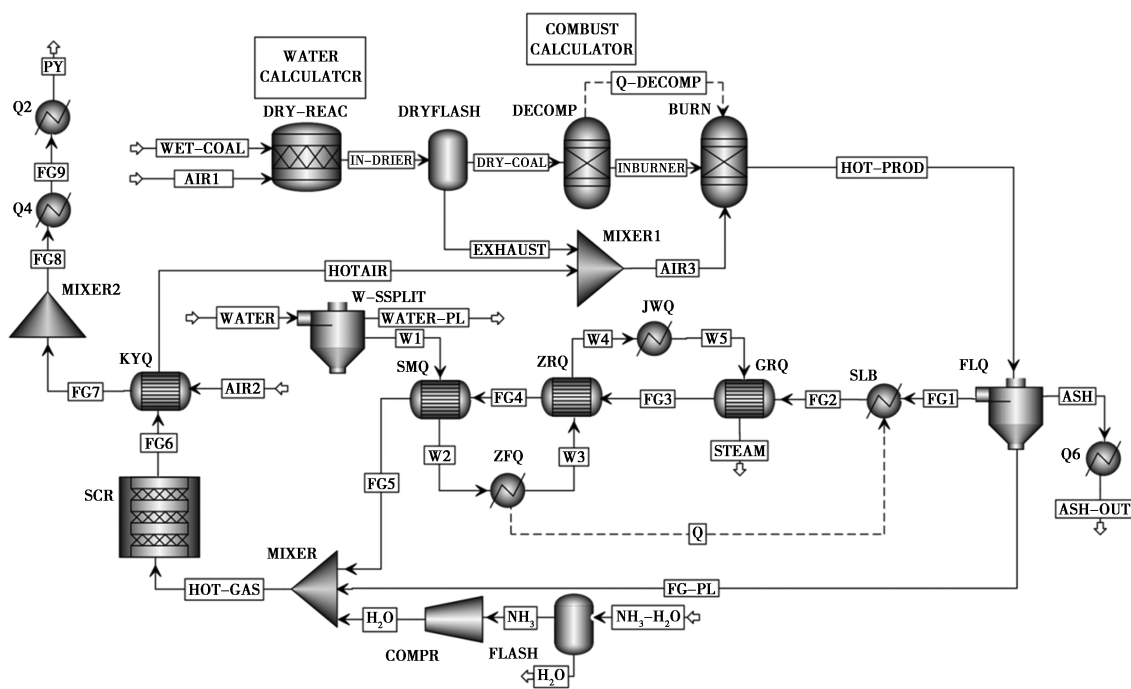


图 1 宽负荷脱硝设计模型

模型运行方式分为 2 种:①机组负荷在 86% BMCR 以上,燃煤从 WET-COAL 流股进入,干燥后在 DECOMP 模块热解,在 BURN 模块燃烧产生高温烟气。烟气通过 HOT-PROD 流股进入烟气换热系统,与通过 WATER 流股进入的循环水换热,最后和 FLASH 模块分离的 NH₃ 进入 SCR 脱硝系统,发生脱硝反应,最后烟气从 PY 流股流出。②机组负荷在 20%~86% BMCR 负荷区间,根据负荷判断温升要求,以调节烟气旁路和给水旁路单独或联合投入,通过改变 W1 流股的循环水流量,减少主路烟气换热和改变 FG-PL 流股烟气流量,进入 MIXER 模块与低温烟气均匀混合,以提升 SCR 脱硝入口烟气温度。

1.3.2 旁路流量调节计算流程

本文中提出的适用于低负荷运行下负荷频繁变化时,实时控制旁路流量的方案,技术路线如图 2 所示。根据燃烧条件计算燃煤机组负荷,以实际运行

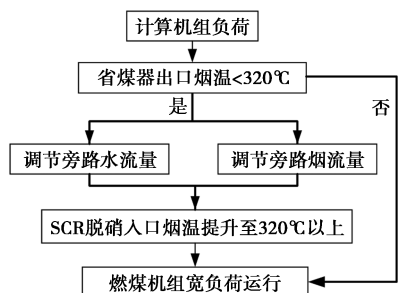


图 2 实时控制旁路流量的方案技术路线

数据为参考依据,同时预测省煤器出口的烟气温度。若温度低于 320℃,通过单独或同时调节给水旁路和旁路烟道流量,以提升 SCR 脱硝系统入口烟温,达到 SCR 反应器设计运行温度要求,实现燃煤机组宽负荷运行。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

基于 Aspen Plus 建立 300 MW 燃煤机组宽负荷脱硝设计模型,模拟结果与机组运行实测数据对比如表 2 所示,实测数据通过烟气排放连续监测系统测得。

表 2 实测烟气与模拟烟气的组分摩尔分数对比 %

	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	NO
实测数据	5.93	14.96	75.81	5.12	0.79
模拟数据	6.12	15.31	75.53	5.28	0.80
偏差	-0.19	-0.35	0.28	-0.16	-0.01

在机组满负荷工况下,由于燃煤机组存在漏气和测量设备老化等问题产生误差,而模拟过程忽略环境因素影响,导致实测和模拟数据有一定的偏差。CO₂ 浓度偏差最大是由于测位点受到飞灰沉积影响,而 NO 在烟气中相对稳定,受飞灰沉积、漏气等因素影响小,测量准确性较高。表 2 数据可知,烟气组分摩尔分数的实测值与模拟值偏差控制在 0.01%~0.35% 之间,属于可接受范围内,同时说明

模型的准确性、可靠性。

2.2 锅炉热效率

为讨论方案是否能成功投入使用,将原模型、给水旁路投入、烟气旁路投入和 2 种设计方案联合投入,这 4 种方案分别命名为方案一、方案二、方案三和方案四,利用反平衡法计算锅炉热效率。燃煤机组在 20%~86% BMCR 负荷区间,不同设计方案投入对锅炉热效率的影响如表 3 所示。

表 3 中低负荷下不同设计方案投入对锅炉热效率的影响

负荷	方案一	方案二	方案三	方案四
20	90.65	90.30	88.68	89.45
33	89.02	88.68	88.24	88.58
46	88.77	88.70	88.20	88.25
60	88.26	87.56	87.38	87.53
72	88.19	88.16	87.70	88.00
86	88.11	88.09	87.68	88.01

随着负荷的降低,排烟热损失降低,热负荷有所上升,同时设计方案调节流量增大,对锅炉热效率影响更大。方案二投入后减少循环水与烟气的换热量,导致有效热效率降低,排烟热损失增加,对锅炉热效率的影响为 0.03%~0.7%;方案三投入后减少与循环水换热的烟气量,由于烟气量远大于循环水产生的蒸气量,导致有效热效率减少得更多,同时烟气旁路对烟气温度影响更大,排烟热损失更多,相比方案二投入对锅炉热效率的影响更大,影响范围为 0.43%~1.97%;而联合投入 2 种设计方案后,给水旁路、烟气旁路流量占比减少,对锅炉热效率影响介于二者之间,影响范围为 0.1%~1.19%。3 种设计方案投入对锅炉热效率影响低于 5%^[21],皆能投入使用。

2.3 入口烟气温度的调节性能研究

在锅炉 20%~86% BMCR 负荷区间,不同设计方案流量调节比例如表 4 所示。随着机组负荷的降低,给水旁路流量占比由 19%增加到 40%,烟气旁路流量占比由 13%增加到 40%,这是由于随着机组

表 4 中低负荷下各设计方案流量调节比例

负荷	方案二	方案三	总和	方案四
20	40	40	80	72
33	26	39	65	61
46	29	32	61	58
60	26	20	46	41
72	19	13	32	26
86	19	12	31	27

负荷减小,烟气温度降低,为满足温升要求,需增大调节流量。方案四调节流量占比由 27%增加到 72%,相比方案二和方案三单独投入的流量总和,联合投入 2 种设计方案流量调节总量减少 3%~8%,进一步说明当 2 种设计方案联合投入时,调节流量相应减少,对锅炉热效率的影响降低。

不同设计方案投入对 SCR 脱硝系统入口烟温的影响如表 5 所示。随着负荷的降低,SCR 脱硝系统入口烟气温度由 319℃降低到 270.2℃。方案一投入后提升烟温较少,全量调节最高提升烟温 15℃,在 75%~86% BMCR 负荷区间满足 SCR 脱硝系统运行要求;方案二投入后提升烟温较高,最高能提升 40℃,在 35%~86% BMCR 负荷区间满足要求,适用于常规调峰机组;方案四投入后在 20%~86% BMCR 负荷区间满足运行要求,适用于深度调峰机组,若是全量调节调峰深度可以适当加大。

表 5 中低负荷下各设计方案投入对 SCR 入口烟温的影响

负荷/%	温度/℃			
	方案一	方案二	方案三	方案四
20	270	285	310	320
33	279	289	318	324
46	289	300	321	326
60	300	310	320	328
72	308	315	321	325
86	319	326	331	336

2.4 脱硝效率的调节性能研究

不同设计方案投入对脱硝效率的影响如表 6 所示。随着机组负荷的降低,由于烟气温度逐渐降低导致脱硝效率呈下降趋势,未投入设计方案前,脱硝效率由 89%降低到 60%,不满足 SCR 脱硝系统的运行要求;方案二投入后小幅度提升烟温,脱硝效率最高提升 10%,SCR 脱硝系统运行区间扩大到 72% BMCR 负荷以上;方案三投入后烟气温度提升幅度高,脱硝效率最高提升 25%,SCR 脱硝系统能在 35% BMCR 负荷以上运行;方案四投入后烟气温度

表 6 中低负荷下各设计方案投入前后对脱硝效率的影响

负荷	方案一	方案二	方案三	方案四
20	60	68	85.6	91.5
33	62	73	88.0	92.0
46	67	80	90.3	92.8
60	74	85	92.0	93.5
72	79	89	92.5	94.0
86	89	92	93.0	94.3

提升幅度最大,脱硝效率最高提升30%,在20% BMCR 负荷以上都能满足SCR脱硝系统运行。

在20%~86% BMCR 负荷区间,变负荷下各设计方案投入对出口 NO_x 排放浓度的影响如表7所示。随着负荷的降低,烟温低于SCR脱硝系统设计运行温度,导致脱硝效率低, NO_x 排放浓度由 49.5 mg/m^3 上升到 173 mg/m^3 ,不满足排放要求;方案二投入后, NO_x 排放浓度由 36 mg/m^3 上升到 138.4 mg/m^3 ,72% BMCR 负荷以上满足排放要求;方案三投入后, NO_x 排放浓度由 31.5 mg/m^3 上升到 62.28 mg/m^3 ,运行区间再一次扩大,35% BMCR 负荷以上满足排放要求;方案四投入后, NO_x 排放浓度最高为 36.76 mg/m^3 ,20% BMCR 负荷以上都满足排放要求。

表7 中低负荷下各设计方案投入对 NO_x 排放的影响

负荷/%	NO_x 排放浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			
	方案一	方案二	方案三	方案四
20	173.0	138.4	62.3	36.8
33	165.0	117.2	52.1	34.7
46	144.5	87.8	42.6	31.6
60	115.0	66.3	35.4	28.8
72	94.0	49.2	33.6	26.9
86	49.5	36.0	31.5	25.7

根据以上研究内容,本文中提出的变工况下不同设计方案投入负荷区间如表8所示。在72%~86% BMCR 负荷区间,选取方案二能满足小幅度的温升要求,对锅炉热效率影响最小;在35%~72% BMCR 负荷区间,改为方案三投入能大幅度提升烟温,但对锅炉热效率影响较大;在20%~35% BMCR 负荷区间,方案三单独投入无法满足温升要求,需方案二联合投入,减少烟气旁路的调节量,同时能减小对锅炉热效率的影响。

表8 不同设计方案应用的负荷区间

负荷区间(BMCR)/%	使用方案	负荷区间(BMCR)/%	使用方案
0~20	—	72~86	方案四
20~35	方案二	86~100	方案一
35~72	方案三		

3 结论

针对深度调峰下燃煤机组SCR脱硝系统入口烟温低无法投运问题,设计给水旁路与烟气旁路联合方案提升SCR入口烟温的方案。以某300 MW燃煤机组为对象,用Aspen Plus建模型分析该方案

在20%~86% BMCR 负荷区间对锅炉热效率、烟气温升和脱硝效果的影响,得出以下结论。

(1)方案二对锅炉热效率的影响范围为0.03%~0.7%,方案三影响范围为0.43%~1.97%,方案四影响范围为0.1%~1.19%,3种设计方案投入对锅炉热效率影响小于5%,皆能投入使用。

(2)单独投入方案二或方案三,全量调节流量只能满足35%~86% BMCR 负荷区间温升要求,方案四投入后烟气温度最高提升 50°C ,能满足20% BMCR 负荷以上的温升要求,相比单独投入时调节流量的总量,方案四投入能减少3%~8%的调节量。

(3)方案二、方案三单独投入后脱硝效率分别能提升10%和25%,满足72% BMCR 和35% BMCR 负荷以上的脱硝要求;方案四投入能满足20% BMCR 负荷以上的脱硝要求,脱硝效率最高能提升30%左右。在不同设计方案投入对应的负荷区间内, NO_x 排放浓度都能降低到 50 mg/m^3 以下。

(4)模拟结果表明,72%~86% BMCR 负荷区间应投入方案二,在35%~72% BMCR 负荷区间应投入方案三,在20%~35% BMCR 负荷区间投入方案四。在烟气旁路投入负荷区间可用给水旁路辅助温升,减小锅炉热效率的影响。

参考文献

- [1] 刘沛奇,王建峰,李乾坤,等.600 MW 级燃煤机组宽负荷脱硝改造方案论证及评价[J].锅炉技术,2021,52(4):69-73.
- [2] 邓悦.燃煤机组深度调峰中SCR脱硝智能多点采样系统的应用[J].洁净煤技术,2024,30(S2):255-259.
- [3] 周会成,王峰,武洁,等.燃煤电厂深度调峰下宽负荷脱硝技术研究进展[J].现代化工,2025,45(3):45-49,55.
- [4] Wu Y, Xu Z, Liu S, et al. Emission characteristics of particulate matter from coal-fired power units with different load conditions [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2022, 233(11):447.
- [5] 曹慰,王懂北.应用分级省煤器技术实现宽负荷脱硝[J].锅炉技术,2015,46(6):21-24.
- [6] Han X, Chen N, Yan J, et al. Thermodynamic analysis and life cycle assessment of supercritical pulverized coal-fired Power plant integrated with No.0 feedwater pre-heater under partial loads [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233:1106-1122.
- [7] 王廷焱.基于焦炉煤气补燃的煤粉锅炉宽负荷脱硝性能数值模拟研究[D].贵阳:贵州大学,2023.
- [8] 董陈,王晓冰,牛国平.省煤器烟气旁路在SCR烟气脱硝系统中的应用[J].热力发电,2014,43(3):96-100.
- [9] 张楚城,叶兴联,刘栋栋,等.空间受限下SCR宽负荷脱硝高温旁路烟道优化设计[J].洁净煤技术,2022,28(7):149-156.
- [10] 王煜伟.1 000 MW 塔式锅炉全负荷脱硝技术研究与应用[J].热力发电,2020,49(2):104-109.

(下转第228页)

投资,经济效益十分可观。以皂化废渣和 CO_2 为主要耗材,铵盐循环利用,就可以得到高纯 PCC 和轻质 MgO ,同时实现皂化废渣的资源化、无害化、减量化,减碳化,可节省石灰石矿山的开采,保护生态环境,并达到“一箭三雕”的效果。

(2) 采用高镁的普通氢氧化钙进行皂化反应时,过剩系数大,产生的废渣数量多,镁元素需要回收,回收工艺复杂,投资较大,但回收轻质氧化镁的产值也很大。采用纯度较高的高比表面积氢氧化钙时,过剩系数小,产生的废渣数量少,镁元素无需回收,回收工艺简单,投资小。

(3) 皂化废渣减量化的关键技术在于采用高比表面积氢氧化钙取代普通氢氧化钙来减少皂化反应的过剩系数,并严格控制其中镁、铁、铝、硅等元素含量,从源头上减少皂化废渣数量,达到降低皂化废渣处理成本和投资的目的。

(4) 在“双碳”新时代,这类兼具环境效益、社会

效益和经济效益的循环经济项目,值得重视与推广,对其他行业的皂化废渣也具有借鉴意义。

参考文献

- [1] 本刊.一种环氧氯丙烷皂化废浆综合利用新技术[J].无机盐工业,2020,52(12):118.
- [2] 颜鑫,魏义兰.含钙镁废渣综合利用的现状 & 展望[J].无机盐工业,2022,54(1):7-11.
- [3] 颜鑫,刘海路,马媛媛,等.以电石渣为原料生产食品级轻质碳酸钙的绿色新工艺[J].现代化工,2019,39(2):199-201.
- [4] 颜鑫,刘海路,刘保林,等.绿色纳米碳酸钙生产关键技术与机理研究[J].无机盐工业,2025,57(1):71-76.
- [5] 颜鑫,李斌,刘保林,等.电石渣生产绿色微细轻质(纳米)碳酸钙的新工艺研究[J].纸和造纸,2024,43(1):18-21.
- [6] 颜鑫,刘保林,刘奕,等.一种对置式偶数喷嘴复合碳化生产纳米碳酸钙的装置及方法:CN 2023103733179[P].2023-07-05.
- [7] 颜鑫,卢云峰,马媛媛,等.氯化钙-氨水体系生产纳米碳酸钙的复合碳化机理研究[J].无机盐工业,2019,51(7):77-80.
- [8] 颜鑫,卢云峰.轻质系列碳酸钙关键技术[M].北京:化学工业出版社,2016:38.■
- [9] 颜鑫,卢云峰.轻质系列碳酸钙关键技术[M].北京:化学工业出版社,2016:38.■
- [10] 贺鹏,郑伯红,龚凯.醇胺法碳捕集再生能耗影响因素研究[J].现代化工,2016,36(9):171-174.
- [11] 张金星,张祥,黄志甲,等.基于响应曲面法的高炉煤气 CO_2 吸收工艺参数优化[J].过程工程学报,2021,21(8):985-992.
- [12] Jung W, Lee J. Kinetic modeling of Polyamine-based Water-Lean solvents for CO_2 capture; Reverse temperature dependence of the overall mass transfer coefficient[J]. Chemical Engineering Science, 2022,249:117355.
- [13] 陆诗建,高丽娟,王家凤,等.烟气 CO_2 捕集热能梯级利用节能工艺耦合优化[J].化工进展,2020,39(2):728-737.
- [14] 郭李恒,丁玉栋,廖强,等.基于蒸汽压缩-分流的电厂烟气 CO_2 捕集过程模拟优化[J].动力工程学报,2021,41(7):565-571.
- [15] 林海周,裴爱国,方梦祥.燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展[J].化工进展,2018,37(12):4874-4886.
- [16] 赵红涛,王树民.燃煤烟气胺法脱碳 MVR 再生系统关键参数及能耗分析[J].化工进展,2020,39(S1):256-262.
- [17] Li K, Cousins A, Yu H, et al. Systematic study of aqueous monoethanolamine-based CO_2 capture process: Model development and process improvement[J]. Energy Science & Engineering, 2016, 4(1):23-39.
- [18] Yu J, Wang S. Development of a novel process for aqueous ammonia based CO_2 capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 39:129-138.
- [19] Liu W, Huang Y, Zhang X J, et al. Steam-assisted temperature swing adsorption for carbon capture integrated with heat pump[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 49:103749.
- [20] 李青,余云松,姜钧,等.基于热泵技术的化学吸收法二氧化碳捕集系统[J].高校化学工程学报,2010,24(1):29-34.
- [21] 吴锋明,李帅旗,何世辉,等.大温升蒸汽压缩式热泵系统优化研究进展[J].化工进展,2024,43(3):1178-1198.
- [22] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [23] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [24] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [25] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [26] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [27] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [28] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [29] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [30] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [31] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [32] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [33] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [34] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [35] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [36] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [37] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [38] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [39] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [40] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [41] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [42] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [43] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [44] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [45] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [46] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [47] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [48] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [49] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [50] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [51] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [52] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [53] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [54] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [55] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [56] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [57] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [58] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [59] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [60] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [61] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [62] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [63] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [64] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [65] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [66] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [67] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [68] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [69] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [70] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [71] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [72] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [73] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [74] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [75] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [76] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [77] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [78] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [79] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [80] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [81] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [82] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [83] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [84] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [85] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [86] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [87] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [88] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [89] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [90] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [91] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [92] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [93] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [94] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [95] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [96] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [97] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [98] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [99] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■
- [100] 贺龙彬,郭健翔,孙晋飞,等.120℃ 补气式热泵变工况性能实验研究[J].化学工程,2023,51(7):33-38.■

(上接第 218 页)

- [10] 贺鹏,郑伯红,龚凯.醇胺法碳捕集再生能耗影响因素研究[J].现代化工,2016,36(9):171-174.
- [11] 张金星,张祥,黄志甲,等.基于响应曲面法的高炉煤气 CO_2 吸收工艺参数优化[J].过程工程学报,2021,21(8):985-992.
- [12] Jung W, Lee J. Kinetic modeling of Polyamine-based Water-Lean solvents for CO_2 capture; Reverse temperature dependence of the overall mass transfer coefficient[J]. Chemical Engineering Science, 2022,249:117355.
- [13] 陆诗建,高丽娟,王家凤,等.烟气 CO_2 捕集热能梯级利用节能工艺耦合优化[J].化工进展,2020,39(2):728-737.
- [14] 郭李恒,丁玉栋,廖强,等.基于蒸汽压缩-分流的电厂烟气 CO_2 捕集过程模拟优化[J].动力工程学报,2021,41(7):565-571.
- [15] 林海周,裴爱国,方梦祥.燃煤电厂烟气二氧化碳胺法捕集工艺改进研究进展[J].化工进展,2018,37(12):4874-4886.
- [16] 赵红涛,王树民.燃煤烟气胺法脱碳 MVR 再生系统关键参数及

(上接第 223 页)

- [11] 李守磊,徐国鹏,程建朝,等.超临界锅炉省煤器旁路复合热水再循环提升 SCR 入口烟温技术应用研究[J].山东电力技术,2022,49(5):76-80.
- [12] 王憧北.应用热水再循环技术实现宽负荷脱硝[J].锅炉技术,2018,49(4):71-75.
- [13] 徐嘉叶,朱晓磊,李剑宁,等.全负荷脱硝技术的应用与分析[J].动力工程学报,2020,40(7):580-585,604.
- [14] 蒋蓬勃.超超临界深度调峰机组锅炉全时段脱硝技术研究[J].电站系统工程,2023,39(1):77-80,84.
- [15] 邹祥波,席剑飞,伍宇鹏.省煤器分级在提升 700 MW 燃煤机组 SCR 脱硝系统投运率的应用研究与实践[J].锅炉技术,2020,51(1):65-69.
- [16] 靖长财.锅炉省煤器分级改造技术分析和效果[J].锅炉技术,

- 2016,47(1):70-73.
- [17] 龚明焯.锅炉省煤器分级改造技术研究[J].科学技术创新,2020,(2):186-187.
- [18] 关键,项群扬,沈利,等.省煤器给水旁路提升 SCR 进口烟温应用研究[J].中国电力,2017,50(9):116-120,128.
- [19] Aguilar-Romero M, Camposeco R, Castillo S, et al. Acidity, surface species, and catalytic activity study on $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$ nanotube catalysts for selective NO reduction by NH_3 [J]. Fuel, 2017, 198:123-133.
- [20] Chai Y, Zhang G, He H, et al. Theoretical study of the catalytic activity and anti- SO_2 poisoning of a $\text{MoO}_3/\text{V}_2\text{O}_5$ selective catalytic reduction catalyst[J]. ACS Omega, 2020, 5(42):26978-26985.
- [21] 肖志前,吉硕.低负荷下给水温度对 SCR 及锅炉热效率的影响[J].广东电力,2015,28(9):22-27.■