

烟气直接加热结晶硫酸铵的实验研究

张廷发, 王助良

(哈尔滨电站工程有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 对传统的氨法烟气脱硫技术进行了改进和创新, 研制出利用锅炉热烟气直接加热结晶硫酸铵的新型气液换热环流结晶器, 该结晶器换热效率高, 阻力小, 不易结垢, 具有很大的发展潜力。通过实验研究了气泡在环流结晶器中的分布及热空气流量、温度对晶体主粒度和平均粒度的影响。结果表明: 在使用空气—硫酸铵体系的环流结晶器中气泡平均直径只有 0.5 mm 左右, 粒度分布均匀, 平均含水率变化范围为 0.12~0.25。热空气温度是控制硫酸铵晶体粒度的关键控制手段, 通过调节热空气初始温度, 硫酸铵晶体平均粒度可提高 20% 以上。

关 键 词: 氨法烟气脱硫; 硫酸铵结晶; 环流结晶器; 气液直接换热

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

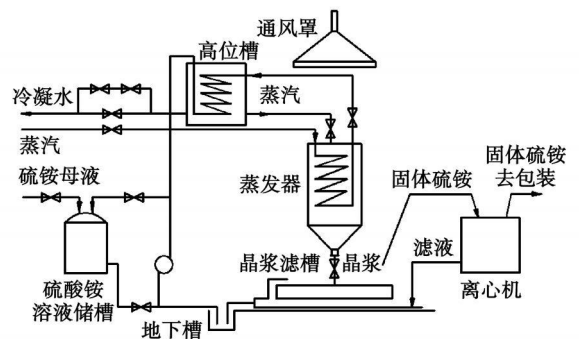
引 言

烟气脱硫技术的发展要求脱硫系统不仅具有更高的脱硫率和可用率, 而且具有脱硫工艺流程简单、脱硫系统投资运行费用低、能够有效地同时脱硫脱硝和去除其它污染物的特点^[1]。氨吸收法烟气脱硫就是一种能够满足上述要求的很有发展潜力的脱硫方法, 目前很多学者正致力于氨法脱硫工艺和设备的研究与创新。

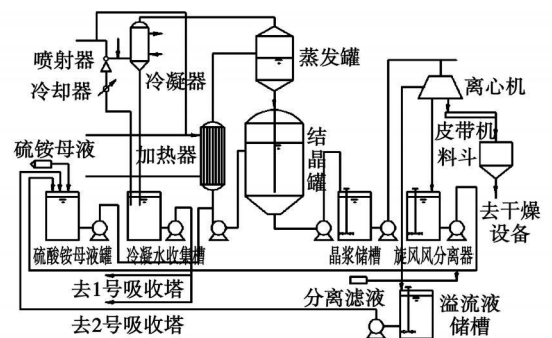
氨法脱硫常采用蒸发结晶对硫酸铵溶液进行结晶。结晶器主要有两种, 一种为连续蒸发结晶器, 如图 1(a)所示, 该系统加热器安装在蒸发结晶器内部。这种结晶器优点是结构紧凑, 造价低。缺点是当结晶器直径较大时, 加热管道容易发生振动, 焊缝易开裂; 此外, 由于加热过程与结晶过程同时发生在结晶器内, 所以浆液流速较低, 换热面上经常有溶质结成晶垢, 妨碍传热, 因此结晶器需要周期性地停工进行清理检修, 检修难度也较大。

另一种为真空蒸发连续结晶器, 如图 1(b)所示, 该系统加热器移出了结晶器, 并增加了一台大功率轴流泵进行强制循环。这种结晶器的主要优点

是: (1) 浆液外循环, 因而维护检修方便; (2) 浆液通过换热器的流速较高, 具有冲刷作用, 可防止换热面的结垢; (3) 结晶器的过饱和度由被加热后的晶浆与器内的晶浆混合后溶剂沸腾蒸发而产生, 溶质沉积于呈旋转运动的悬浮晶体表面, 也有利于防止结晶器的结垢。这种结晶器缺点是为了提高循环速度必须采用大流量循环设备, 设备操作复杂, 工艺条件不易控制, 汽耗高; 加热器长时间高浓度操作结垢速度快, 运转率低^[2]。



(a) 连续蒸发结晶器



(b) 真空蒸发连续结晶器

图 1 硫酸铵溶液结晶工艺流程

因此, 结合氨法脱硫特点并借鉴化工中应用的结晶器^[3-6], 本研究提出一种新型的、适合氨法脱硫中硫酸铵结晶的气液换热环流结晶器, 以达到节能降耗、提高产品质量的目的。

1 气液换热环流结晶器

气液换热环流结晶器如图 2 所示。热烟气通过气体分布器鼓泡吹入, 气泡在导流管内外环流换热后从上部引出, 结晶料液从上部加入。

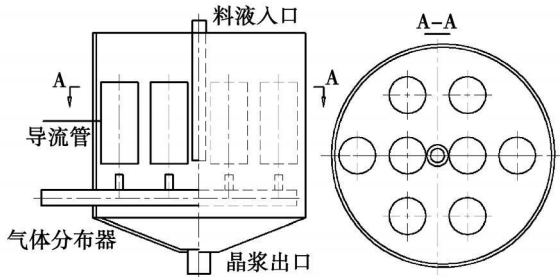


图 2 气液换热环流结晶器

气液换热环流结晶器具有以下优点: (1) 气液换热环流结晶器利用锅炉产生的热烟气加热结晶硫酸铵溶液, 减少了加热蒸汽的耗量, 节约了能耗; (2) 气液换热环流结晶器利用气液直接接触换热, 去除了用于换热的合金管, 因而结晶器传热温差小、无结垢、换热效率高、阻力也较小; (3) 气液换热环流结晶器利用气体的喷射动能和导流管内外流体的重度差造成流体循环流动来搅拌反应物料, 因而这种结晶器具有良好的动量、质量和能量传递性能; (4) 结构简单, 不含运动部件, 减少了大功率的循环泵和搅拌装置的使用, 低剪切、低能耗, 并且装置结构简单、易密封、容易制造、体积和重量小, 建造和维护使用费用低。

2 硫酸铵结晶实验

2.1 实验装置

为了更好的考察气液换热结晶器的流动、换热和结晶规律, 本研究设计了模拟实验系统^[7-8], 该系统由 3 部分组成, 分别为罗茨风机、空气加热器和气液换热环流结晶器, 各部分装置名称如图 3 所示。系统由罗茨风机给空气加压, 空气经调节阀和转子流量计进入空气加热器, 空气加热温度可调节, 热空气从结晶器底部通过气体分布器进入结晶器, 经过鼓泡换热后, 从结晶器顶部逸出; 实验装置主体为 $\Phi 200 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 高 800 mm 的有机玻璃管结晶器, 在玻璃管结晶器内开展流动、换热和结晶特性实验研究, 晶浆从结晶器底部流到收集桶, 晶体从收集桶

中取出筛分、干燥得到晶体产品。

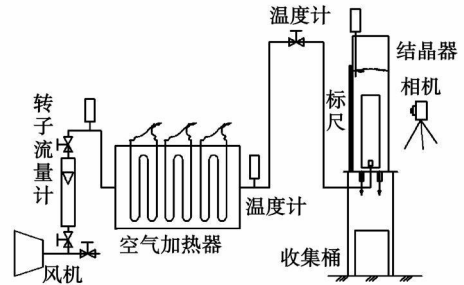


图 3 实验装置图

2.2 实验条件

结晶实验以热空气和硫酸铵饱和溶液 (28°C) 作为气、液介质。

实验考察了不同热空气流量下结晶器的流动特性和结晶特性。实验在常温常压下进行, 热空气入口温度可调, 调节时取 3 个典型的锅炉烟气出口温度作为热空气进口温度, 热空气进口温度分别为 150 、 180 和 220°C ; 流量计入口压强稳定在 0.2 MPa ; 气体分布器采用单喷嘴气体分布器, 喷嘴内径为 $\Phi 20 \text{ mm}$; 有机玻璃管内硫酸铵溶液初始高度为 350 mm 。由于硫酸铵晶体不含结晶水, 属斜方晶系, 因此实验中采用筛分法测试粒度分布。

3 实验结果及讨论

3.1 热空气流量对环流床结晶器的含气率的影响

流场中某一控制单元内气相所占的体积份额, 称容积含气率 (volume fraction of gas), 用 ϵ_g 表示, 它是无量纲的数字^[9], 含气率又可分为平均含气率和局部含气率。

含气率是气液结晶换热器的重要参数, 它反映了气液相接触面的大小, 对反应器的传质、传热及阻力特性有很大的影响。实际操作中, 气液流量、结构参数、操作温度、流体力学条件及气泡大小等对 ϵ_g 有重要影响。

图 4 为气泡大小与分布随热空气流量的变化。可以看出, 在使用空气—硫酸铵体系的环流结晶器中气泡平均直径只有 0.5 mm 左右, 粒度分布均匀, 所以使用平均含气率研究气液直接换热环流结晶器的流动特性。平均含气率采用床层膨胀法测量。

$$\epsilon_g = (H - H_0) / H$$

式中: H —动床高; H_0 —静床高; ϵ_g —平均含气率。

室温 (25°C) 下饱和硫酸铵溶液中平均含气率随空气流量变化的实验曲线如图 5 所示。平均含气

率变化范围为 0.12~0.25 平均含气率随着空气流量的增大而增加,并且增大幅度逐渐减小,趋近含气率为 0.25 的水平线。这说明流量对平均含气率影响明显,但到达一定流量后平均含气率将不再继续增加,对某一特定的气液换热环流结晶器存在一个最大的热烟气进口流量,超过这一流量平均含气率将不再增加,系统阻力反而会迅速升高,即结晶器能耗增大,另外从结晶器上部出口热空气带出的溶液飞沫也会明显增加,所以运行时需要根据空气流量与含气率曲线选取一个经济的运行热烟气流量。

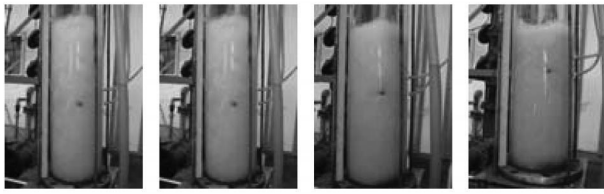


图 4 不同流量下气泡大小和分布

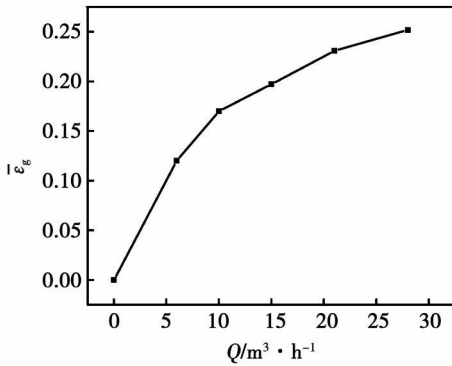


图 5 空气流量 (Q) 对平均含气率 ε_g 的影响

3.2 热空气进口流量对晶体粒度的影响

增加结晶器进口热空气流量,一方面可提高含气率,增强换热,加速溶剂蒸发,使溶液过饱和度增加,但过饱和度过高,会使成核速率加快,结晶产品粒度变小,一般工业结晶需要保持较低的过饱和度;另一方面,增加热空气流量会加剧溶液湍动,使晶粒与晶粒和晶粒与器壁相互碰撞加强,晶粒破碎是一种二次成核,在一定范围内相当于添加晶种,晶体在这些晶核上生长,使溶液维持较低的过饱和度,减少初级成核,增加产品粒度。但是二次成核过量也会使结晶产品粒度减小。

表 1 为使用不同流量的热空气结晶硫酸铵饱和溶液时的晶体粒度分布实验数据。图 6 是根据表 1 中的原始实验数据绘制的热空气流量对硫酸铵晶体

粒度分布(质量比)影响图,横坐标为晶体直径用 L 表示。实验热空气温度都为 174 °C,3 种流量下结晶溶液的温度均为 44 °C,结晶时间为 3 h。从图 6 可以看出,对于气液换热环流结晶器,流量对粒度分布的影响曲线形状相似,存在一个主粒度区,70%~80%的晶体都在这个主粒度范围内,实验中,晶体主粒度范围为 180~250 μm;另外,热空气流量增加,主粒度范围内晶体对应的百分比稍有增加,但主粒度范围不会平移。

表 1 变流量结晶实验数据

目数	Q=28m³/h		Q=21m³/h		Q=15m³/h	
	m/kg	n/%	m/kg	n/%	m/kg	n/%
10	0.01	0.004	0.01	0.008	0.01	0.008
20	0.005	0.002	0.01	0.008	0.01	0.008
30	0.005	0.002	0.01	0.008	0.015	0.012
40	0.21	0.085	0.095	0.076	0.155	0.123
60	1.42	0.576	0.615	0.49	0.535	0.423
80	0.605	0.245	0.345	0.275	0.42	0.332
100	0.14	0.057	0.11	0.088	0.09	0.071
250	0.07	0.028	0.06	0.048	0.03	0.024

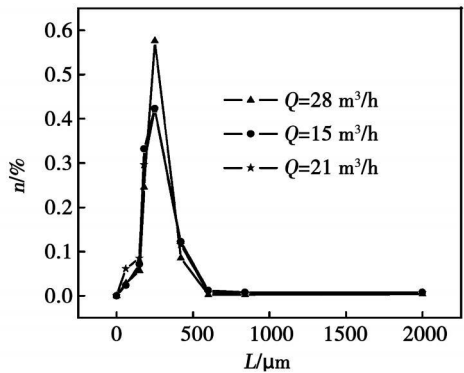


图 6 热空气流量 (Q) 变化对粒度分布 (n) 的影响

表 2 为实验热空气流量下晶体的平均粒度值,可以看出,热空气流量对晶体的平均粒度影响不大。

表 2 不同热空气流量 (Q) 下的平均粒度 (M S)

Q/m³·h⁻¹	M S/μm
28	289
21	288
15	302

3.3 热空气进口温度对晶体粒度的影响

结晶器进口热空气温度增加, 可以提高气液换热温差, 增强换热, 加速溶剂蒸发, 使溶液过饱和度增加。因为气泡在环流结晶器内分布均匀, 气泡直径较小, 所以换热温差对整个结晶器内过饱和度的影响也是均匀的, 不会有因局部换热强度过高而产生局部过大的过饱和度, 引起剧烈成核现象; 另外, 在一定流量下, 热空气温度变化不会影响溶液湍动, 不会引起额外的二次成核。综合这两方面原因热空气温度可以明显影响晶体生长, 改变晶体粒度分布。

表 3 变热空气温度结晶实验数据

目数	T= 151 °C		T= 174 °C		T= 221 °C	
	m/kg	n/%	m/kg	n/%	m/kg	n/%
10	0.01	0.007	0.01	0.008	0.01	0.008
20	0.005	0.003	0.01	0.008	0.005	0.004
30	0.015	0.01	0.015	0.012	0.01	0.008
40	0.245	0.167	0.155	0.123	0.09	0.069
60	0.685	0.468	0.535	0.423	0.34	0.261
80	0.33	0.225	0.42	0.332	0.465	0.356
100	0.105	0.072	0.09	0.071	0.23	0.176
250	0.07	0.048	0.03	0.024	0.155	0.119

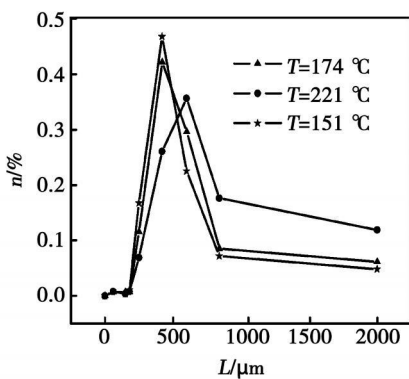


图 7 温度 (T) 对粒度分布 (n) 的影响

表 3 为使用不同进口温度的热空气结晶硫酸铵饱和溶液时的晶体粒度分布实验数据。根据表 3 中的原始实验数据绘制的热空气温度对硫酸铵晶体粒度分布 (质量比) 影响如图 7 所示, 横坐标为晶体直径用 L 表示。实验热空气温度分别为 151、174 和 221 °C, 热空气流量为 15 m³/h 3 种热空气温度下结晶溶液的温度均为 44 °C, 结晶时间为 3 h。从图中可以看出, 对于气液换热环流结晶器, 热空气温度

对晶体粒度分布影响明显。晶体也存在一个主粒度区, 但这个主粒度范围明显加宽, 实验中, 晶体主粒度范围可以达到 200 ~ 2 000 μm。在 151 和 174 °C 时, 粒度分布曲线相似, 晶体主粒度范围为 200 ~ 850 μm; 在 221 °C 时, 晶体主粒度范围为 200 ~ 2 000 μm。另外, 热空气温度增加, 主粒度范围内晶体对应的百分比变化很大, 主粒度范围会发生平移。

表 4 为实验热空气流量下晶体的平均粒度值, 可以看出, 热空气温度对晶体的平均粒度影响明显, 通过调节热空气初始温度, 硫酸铵晶体平均粒度可提高 20% 以上。

表 4 不同温度 (T) 下的平均粒度 (M_S)

T/°C	M _S /μm
151	302
174	288
221	252

5 结 论

(1) 新型气液换热环流结晶器能很好利用锅炉热烟气直接加热结晶硫酸铵, 换热效率高, 阻力小, 无结垢, 具有很大的发展潜力。

(2) 在使用空气—硫酸铵体系的环流结晶器中气泡平均直径只有 0.5 mm 左右, 粒度分布均匀; 平均含气率变化范围为 0.12 ~ 0.25, 平均含气率随着空气流量的增大而增加, 并且增大幅度逐渐减小, 趋近含气率为 0.25 的水平线。

(3) 气液换热环流结晶器存在一个主粒度区, 70% ~ 80% 的晶体都在这个主粒度范围内, 过调节结晶器进口热空气初始温度, 主粒度范围可以达到 200 ~ 2 000 μm。

(4) 热烟气流对晶体的主粒度及平均粒度影响不大; 热烟气温度对晶体的主粒度及平均粒度影响较大, 通过调节结晶器进口热空气初始温度, 硫酸铵晶体平均粒度可提高 20% 以上, 因此, 调节进口热空气初使温度是很好的控制晶体粒度分布手段, 可以根据粒度要求选择合适的热烟气温度。

参考文献:

[1] 仲兆平, 金保升, 兰计香, 等. 鼓泡式烟气脱硫 原理性试验台气体流动冷模试验 [J]. 热能动力工程, 2003, 18(6): 592-596
 [2] 郭东明. 脱硫工程技术与设备 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

- [3] 章学来, 卢家才, 李瑞阳, 等. 直接接触式换热技术的研究进展 [J]. 能源技术, 2001, 22(1): 2—6
- [4] 孙长贵, 徐维勤, 沈自求. 气泡在热液相介质中上升时的传质与传热 [J]. 高校化学工程学报, 1992, 6(2): 139—146
- [5] 罗大忠. 真空制盐发展概况及工艺述评 (续) [J]. 中国井矿盐, 2001, 32(2): 7—9
- [6] 叶铁林. 化工结晶过程原理及应用 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006
- [7] RAU I SM. The influence of impurities on crystallization kinetics—a case study on ammonium sulfate [J]. Journal of Crystallization, 2000, 213(1—2): 116—128
- [8] DEKORAJ, HOOGENBOEZEM A J, BOSGRA O H. Design issues related to the control of continuous crystallizer [J]. Computers & Chemical Engineering, 1996, 20(4): 427—435
- [9] 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002

新技术、新工艺

ГТ^Θ-45燃气轮机装置的低排放燃烧室

据《Теплоэнергетика》2009年4月号报道, ГТ^Θ-45发电用燃气轮机装置的核心技术之一—低排放燃烧室。在燃气轮机装置工况参数宽广的变化范围内,除了有害物质(氮氧化物、不完全燃烧产物)低的排放外,它还应该具有高的经济和运行指标。

现有的减少燃烧室出口 NO_x浓度的方法均与降低火焰的最大温度有关。在组织燃料与空气预混时可以达到这种方法最大的效果。

分析了 ГТ^Θ-45燃气轮机装置燃烧室和燃烧器组件的结构,给出了在 BIM燃烧室试验台试验段上气流、燃料和燃烧产物主要参数测量的系统图,并提供了 ГТ^Θ-45发电用高温燃气轮机装置低排放燃烧室燃烧器组件计算和试验研究的结果。

为了在 ГТ^Θ-45燃气轮机装置内实现贫燃料空气混合物的燃烧,研制了具有直径为 340 mm的 12 个火焰筒的管—环式燃烧室,每个火焰筒装有 7 个燃烧器组件。在燃烧器组件内规定有燃料空气混合物预先的制备。

在额定工况下, ГТ^Θ-45燃气轮机装置燃烧室的参数为:

燃烧室前空气的压力, MPa	1.712
通过工作面装置的空气流量, kg/s	133
温度, °C	
燃烧室前的空气	430
燃烧室后的燃烧产物	1 208

试验研究表明,燃烧器组件内的静压损失为 1.8% (无燃烧)和 2.5% (有燃烧)。

在具有燃料与空气预先混合的燃烧器组件研究时得到的结果表明,把这种组件用于燃气轮机装置低排放燃烧室的建造是有前途的。

(吉桂明 摘译)

was the influence of O_2 concentration, CaO and Fe_2O_3 on coal sample Hg emissions in an air and O_2/CO_2 atmosphere. When a conversion is made from an air atmosphere to a 20% O_2/CO_2 concentration atmosphere, the gas state single substance mercury ($Hg^0(g)$) concentration in the flue gas produced by burning lignite will slightly decrease and the total gas state mercury ($Hg^T(g)$) will slightly increase while bituminous coal will exhibit a contrary tendency. In the O_2/CO_2 atmosphere when O_2 concentration ranges from 20% to 25%, $Hg^T(g)$ concentration of the bituminous coal will change insignificantly, i.e. around $19 \mu g/m^3$. When O_2 concentration is 30%, the $Hg^T(g)$ concentration will conspicuously increase to $23.2 \mu g/m^3$ while the $Hg^0(g)$ concentration will basically not be affected. CaO and Fe_2O_3 can curb the Hg emissions and the effectiveness achieved in the O_2/CO_2 atmosphere is superior to that in an air atmosphere. After CaO has been added, the $Hg^0(g)$ concentration will decrease remarkably. At a same O_2 concentration, the O_2/CO_2 atmosphere will be more favorable for the reduction of $Hg^T(g)$ emissions. After Fe_2O_3 has been added, the $Hg^T(g)$ concentration will somewhat decrease while the O_2 concentration will increase, so that $Hg^0(g)$ oxidation will be enhanced accordingly. Key words: coal combustion; Hg emissions; sedimentation boiler; O_2/CO_2 combustion; on-line Hg analyzer

烟气直接加热结晶硫酸铵的实验研究 = Experimental Study of Crystallized Ammonium Sulfate Directly Heated by Flue Gases [刊, 汉] / ZHANG Ting-fa, WANG Zhu-liang (Harbin Power Plant Engineering Co. Ltd., Harbin, China; Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(4). — 432~436

Improved and innovated were the traditional ammonium method-based flue gas desulfurization technologies and developed was a new type gas-liquid heat exchange ring flow crystallizer with crystallized ammonium sulfate directly heated by boiler flue gases. The crystallizer features a high thermal efficiency, a small drag and resistance to fouling, thus enjoying a very big development potential. Through experiments studied was the influence of the air bubble distribution in the pop flow crystallizer, hot air flow rate and temperature on the main and average crystal particle diameter. The research results show that the average diameter of air bubbles in the ring flow crystallizer using an air ammonium sulfate system is only about 0.5 mm, the particle diameter distribution is uniform and the change of the average air content rate ranges from 0.12 to 0.25. The hot air temperature becomes a key control method for controlling the crystal particle diameter of ammonium sulfate. Through a regulation of initial hot air temperature, the average particle diameter of the ammonium sulfate can increase by over 20%. Key words: ammonium method-based flue gas desulfurization; crystallization of ammonium sulfate; ring flow crystallizer; gas-liquid direct heat exchange

我国 SCR脱硝成本分析及脱硝电价政策探讨 = Analysis of the SCR (Selective Catalytic Reduction)-based Denitration Cost in China and Exploratory Study of Its Policies on Denitration Electricity Price [刊, 汉] / GUO Bin, LIAO Hong-kai, XU Cheng-hong et al. (Guangdong Electric Grid Company Academy of Electric Power Science, Guangzhou, China; Post Code: 510600) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25(4). — 437~440

Analyzed was the cost for a SCR-based denitration device. It has been pointed out that the expenses for reduction and catalytic agent as well as fixed asset depreciation cost constitute the three largest ones in the cost of a SCR-based denitration device. On this basis, from such aspects as design denitration rate, reduction agent price, reduction agent type and SCR-based denitration device construction form etc., the factors influencing the on-line electricity price increment of the foregoing device were quantitatively analyzed and a denitration electricity price calculation formula was proposed. The formula comprehensively takes into account the main factors influencing the on-line electricity price increment of the SCR-based denitration device. It is of definite reference significance for calculating