

脱硫反应器进口弯头部分多相流数值模拟及结构优化

王 雷, 章明川, 周月桂, 田凤国

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对脱硫反应器进口弯头处液滴粘壁严重的问题, 考虑液滴蒸发后, 对气相采用标准湍流脉动 $k-\epsilon$ 双方程模型, 离散相采用随机轨道模型对碱雾发生器内气液固三相流动进行了模拟, 得到了优化前后反应器弯头处的温度场、各相速度矢量场及颗粒浓度场。模拟结果表明, 优化前由于多流体碱雾发生器和进口弯头在较底部接触, 造成各相在弯头处转矩过大, 各组液滴在较大的惯性力作用下容易偏离流线发生粘壁。

关键词: 数值模拟; 多相流; 蒸发; 液滴

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

1 前 言

随着我国环保事业的不断发展和环保法规的不断完善, 国家对燃煤锅炉二氧化硫排放量提出更加严格的标准, 因此燃煤电厂逐步采取脱硫措施已势在必行。燃煤电厂烟气脱硫技术主要有: 湿法烟气脱硫技术、干法脱硫技术及半干法脱硫技术。其中半干法烟气脱硫技术由于具有初始投资低、运行费用低、系统相对简单、脱硫后烟气无须加热、脱硫效率较高及易于适合机组改造等一系列优点, 已成为电厂锅炉烟气脱硫技术领域的研究热点之一。通过分析现有的各种半干法烟气脱硫技术的特点, 我们提出了一种前置式碱雾发生器烟气脱硫新工艺, 可在垂直烟道弯头处加装一个多流体碱雾发生器, 完成脱硫; 并建立相应的半工业性炉后烟气低温脱硫试验台, 试验中发现, 由于碱雾发生器与反应器进口弯头处结合不当, 造成液滴在弯头部分碰壁严重。为此, 我们通过数值计算对试验装置进行了优化, 并按优化后的方案进行了改造。

2 研究对象

反应器高 6 m, 横截面积 $0.59 \text{ m} \times 0.85 \text{ m}$, 中间

垂直隔板把反应器分成左右两个顶部相通的空腔, 采用 Π 型结构布置, 以保证反应器内液滴理论停留时间。试验台通过燃烧城市煤气产生的热烟气和冷空气混合到 140°C 左右, 双流体喷嘴固定在碱雾发生器顶部用来增湿活化脱硫剂颗粒。图 1 为试验装置弯头部分优化前后的示意图, 优化后与碱雾发生器相割的斜板与水平夹角为 45° 。携带风及脱硫剂颗粒从碱雾发生器顶部的空气分配器进入, 工程中携带风可以是热烟气或冷空气, 在试验中取的为冷空气; 试验及数值计算中发现, 在携带风较小时, 碱雾发生器内回流严重, 经过调整, 认为携带风为 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ 较为合适; 热烟气从图 1 中烟气进口加入。为减少计算量, 仅对虚线框内的反应器、碱雾发生器及弯头部分进行模拟。

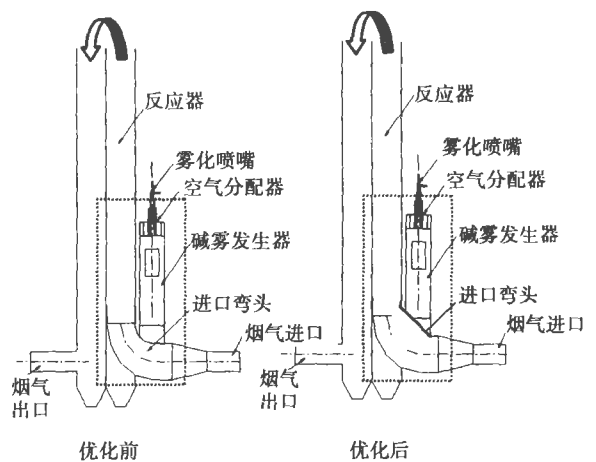


图 1 前置式碱雾发生器脱硫试验台

3 数学模型

3.1 气相控制方程

流场内的气相流动可用 Navier-Stokes 方程组描

收稿日期: 2004-01-20; 修订日期: 2004-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90210016)

作者简介: 王雷(1977-)男, 山东郓城人, 上海交通大学博士研究生

述, 用标准湍流脉动 $\kappa-\epsilon$ 双方程模型封闭方程组, 以壁面函数法处理壁面流动, 气相三维湍流方程可用下面通用形式表示^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_c + S_p \cdot \phi \quad (1)$$

式中: ϕ —通用变量; μ_ϕ —输运系数; S_c 、 S_p —气相自身及相间作用源项。

3.2 颗粒与液滴运动模型

为充分考虑湍流脉动对液滴颗粒运动的影响, 采用随机轨道模型, 直接由离散相瞬时方程出发, 跟踪颗粒及液滴沿轨道的变化经历。受内部环流及变形这两个因素的影响, 液滴曳力系数的计算一般不同于固体颗粒。由于液滴从两流体喷嘴中以极高的速度喷出, 颗粒雷诺数较大, 液滴表面张力不再占据主导地位, 液滴表面将发生变形^[2], 故曳力系数按固体计算将不再准确, 文中采用 Klose 文献^[3]中提到的曳力系数。

$$C_D = 0.28 + \frac{21}{Re_d} + \frac{6}{\sqrt{Re_d}} \quad (2)$$

3.3 液滴蒸发模型

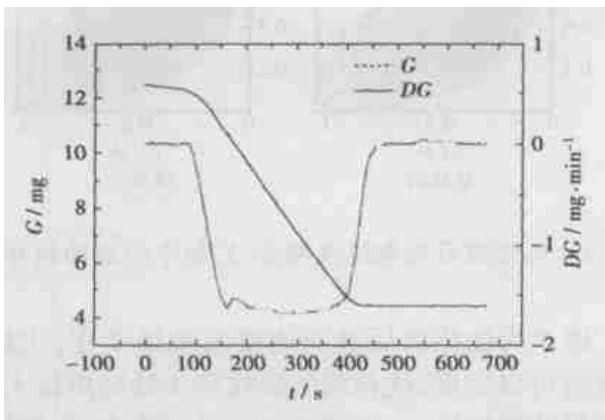


图 2 吸收剂浆液的 $G-DG$ 曲线

水滴捕集脱硫剂颗粒后成为含有固体颗粒的浆滴。根据干燥理论, 浆滴蒸发过程分为: 升速干燥阶段、恒速干燥期、第一降速干燥阶段和第二降速干燥阶段及平衡阶段。脱硫剂有效成分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及反应产物 CaSO_3 在水中溶解度极小, 可认为浆滴内的固体颗粒对蒸汽压降低的影响可以忽略, 即对浆滴在恒速干燥阶段没有明显影响^[4], 则恒速干燥阶段可以按纯液滴的蒸发过程进行计算。在对 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浆滴进行热天平模拟蒸发试验时发现浆液只有一个降速干燥阶段且临界湿含量很小, 如图 2。一般来说干燥过程中升速阶段很短, 可以忽略, 故在模型计算中

只考虑了恒速干燥阶段和降速干燥阶段。

3.3.1 恒速干燥阶段

在反应器中, 液滴处在一种流动状态下, 在液滴周围是一个强迫对流环境, 采用工程上常用的“折算薄膜”理论将一个真实的轴对称二维对流传热和传质问题简化为等值的球对称导热和扩散问题^[5]。烟气与液滴间的传热速率为:

$$\dot{Q}_d = \pi \cdot D_d \cdot Nu^* \cdot \lambda_g \cdot (T_g - T_s) \quad (3)$$

式中: T_g —烟气温度; T_s —液滴表面温度; Nu^* —固球没有蒸发和燃烧时(惰性)对流换热的平均 Nusselt 准则, 可用著名的 Ranz-Marshall 公式来表达:

$$Nu^* = 2.0 + 0.6 Pr^{1/3} Re_d^{1/2} \quad (4)$$

在有蒸发时, 液滴表面会产生强烈的 Stefan 流, 对液滴表面的传质与传热过程产生影响, Spalding 等人对传热传质系数进行如下修正:

$$Nu = Nu^* \cdot \frac{\ln(B_T + 1)}{B_T} \quad (5)$$

$$B_T = \frac{C_g(T_g - T_s)}{Lat + C_1(T_s - T_0)} \quad (6)$$

式中: Lat —水的汽化潜热; T_0 —液滴内部温度; C_g 、 C_1 —烟气比热和水的比热。考虑强烈蒸发及传质与传热后的液滴直径变化速率为:

$$\frac{d(D_d^2)}{dt} = \frac{4Nu^* \lambda_g}{\rho_d C_g} \ln(1 + B_T) \quad (7)$$

3.3.2 降速干燥阶段

脱硫剂颗粒及其产物属于无机物, 所含水份主要为非结合水, 通过图 2 可以发现, 在降速干燥阶段所含的水份很少。为了简化计算, 当浆滴湿含量达到临界湿含量时, 认为浆滴的直径不再变化。浆滴的湿含量小于 1.5% 时认为浆滴蒸发已经结束, 所获热量完全用于颗粒温度的提高:

$$\dot{Q} = \frac{\pi}{6} D_d^3 \cdot \rho_d C_p \cdot \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \pi \cdot D_d \cdot Nu^* \cdot (T_g - T_s) \quad (8)$$

4 计算方法

为同时考虑气相湍流脉动和捕捉过程对液滴运动的影响, 将随机轨道模型和 DSMC 算法(直接蒙特卡罗方法)结合起来, 在每个时间步长 Δt 内, 用 Lagrange 轨道“并行”算法计算所有的液滴颗粒轨道, 液滴对颗粒的捕捉采用蒙特卡罗方法, 将颗粒的自由运动和液滴间的相互碰撞解耦。液滴运动是自身均运动、湍流脉动和对颗粒捕捉的综合作用的

结果。标准的 $\kappa - \epsilon$ 双方程模型采用 SIMPLEC 算法求解, 使用 PSIC 算法考虑离散相与气相间的相互作用。

5 模拟结果及讨论

图 3 显示了本次计算所划分的网格系统, 模拟对象为筒状碱雾发生器及其相连的反应器右腔部分, 以阶梯形网格近似模拟筒体内壁。网格节点数为 $26 \times 58 \times 49$ 。两流体喷嘴固定在距碱雾发生器顶端入口 0.20 m 处。计算中液滴及颗粒被分成 5 组, 各组粒径分布及质量百分含量如表 1 所示, 碱雾发生器

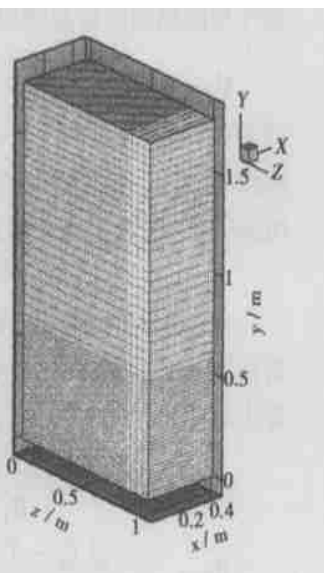


图 3 计算网格

入口空气流量 $600 \text{ m}^3/\text{h}$, 温度 10°C 。反应器进口空气流量为 $2867 \text{ m}^3/\text{h}$, 温度 130°C 。雾化水流量 $100 \text{ kg}/\text{h}$, 颗粒入口流量 $8.1 \text{ kg}/\text{h}$ 。参照喷嘴雾化程序算出的液滴速度结果, 各组液滴取统一的出口速度, $\vec{V}_d = 40.8 \text{ m}/\text{s}$, 颗粒入口速度取 $\vec{V}_p = 0.9 \vec{V}_g$, 颗粒在入口处均匀分布, 液滴在 20° 的空间锥角内等概率随机发射。

表 1 颗粒及液滴的分组

颗粒	粒径/ μm	5.7	15.6	28.2	43.8	68.4
	质量含量/%	37.8	22.6	17.1	14.0	8.5
液滴	粒径/ μm	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
	质量含量/%	11.8	22.8	24.5	24.7	16.2

图 4 和图 5 是优化前后的温度场和速度场, 对两图分析可以发现, 优化前多流体碱雾发生器在较下部和进口弯头相交, 这样造成碱雾发生器和进口弯头相交面较小, 使碱雾发生器出口气流和反应器进口气流在弯头处转矩过大, 气流在弯头处混合强烈且在弯头贴壁面处速度较高。优化后的碱雾发生器和弯头部分有较大的相交面, 碱雾发生器出口气流速度较小, 两股气流混合减弱。图 6 显示了优化前后进口弯头处在 Y 轴截面气流速度场。

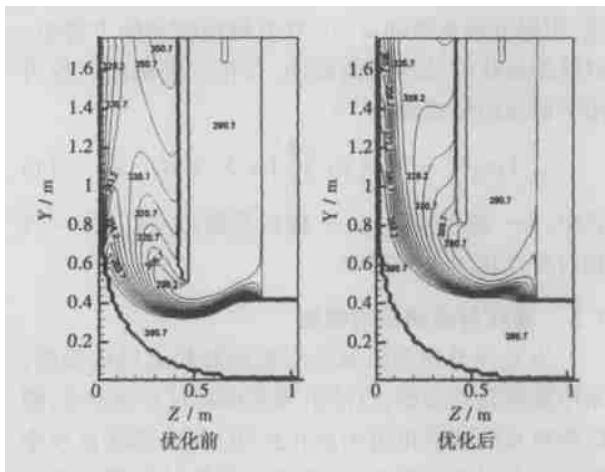


图 4 优化前后温度场沿 X 轴中心截面的分布

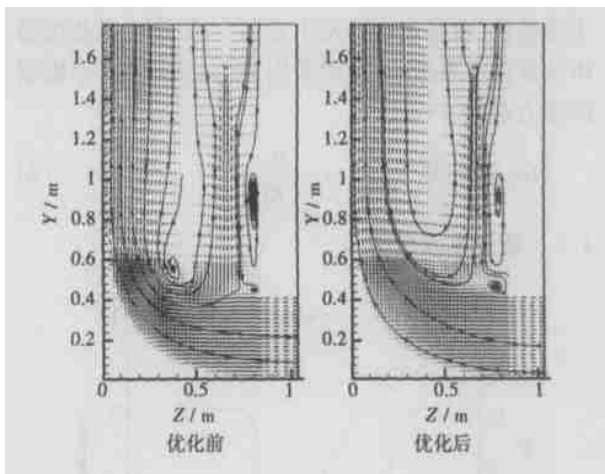


图 5 优化前后气相速度场沿 X 轴中心截面的分布

图 7 为优化前后液滴速度矢量场变化, 比较优化前后可以发现, 优化前气流在弯头处转矩较大, 由于液滴的惯性较大, 跟随流线运动过程中, 在惯性力的作用下, 液滴要向反应器右腔壁面富集并粘结。粒径越大, 惯性越大, 向壁面偏移越厉害。优化后的液滴速度场较优化前的液滴速度场均匀得多。从图 7 还可以看出, 不同粒径的液滴在相同的初始条件下, 其空间扩展角不同。主要由于液滴和气相的相互作用, 使气流在碱雾发生器中心轴线附近被加速, 形成一个速度相对较高的中心气流区, 对于大液滴, 其惯性较大, 在穿越高速气流区的过程中, 径向速度衰减较慢。对于小液滴, 颗粒驰豫时间小, 惯性也较小, 在径向速度衰减较快, 所以小液滴的扩展角比大液滴要小。

图 8 为优化前后颗粒场浓度分布, 从图中可以看出, 优化后反应器右腔颗粒浓度场比优化前均匀。

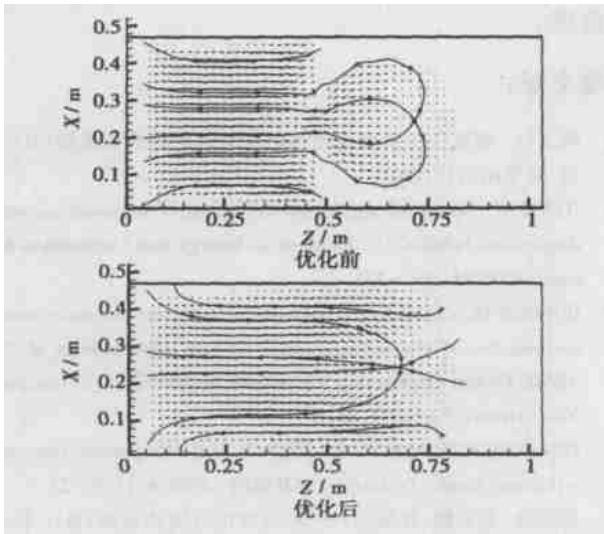


图 6 优化前后 $Y=0.52\text{m}$ 截面处气相速度场分布

液滴的累积粘壁率定义为各组液滴在一段时间内沿程累积粘壁个数与同一段时间内所发射的各组液滴总数比值。通过分析优化前后的两幅图可以看出, 优化后的液滴粘壁率大大降低。

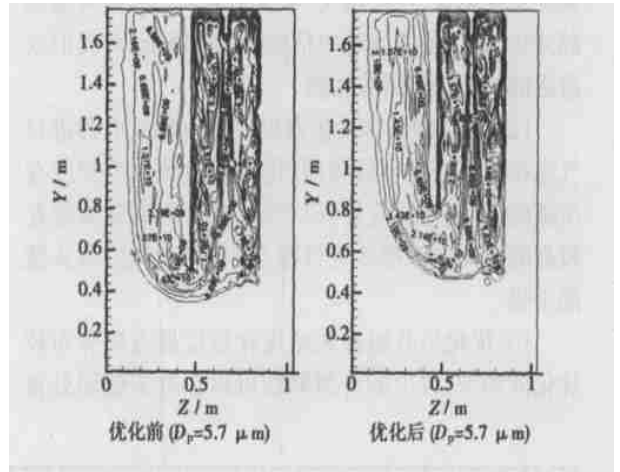


图 8 优化前后颗粒浓度场沿 X 轴中心截面的分布

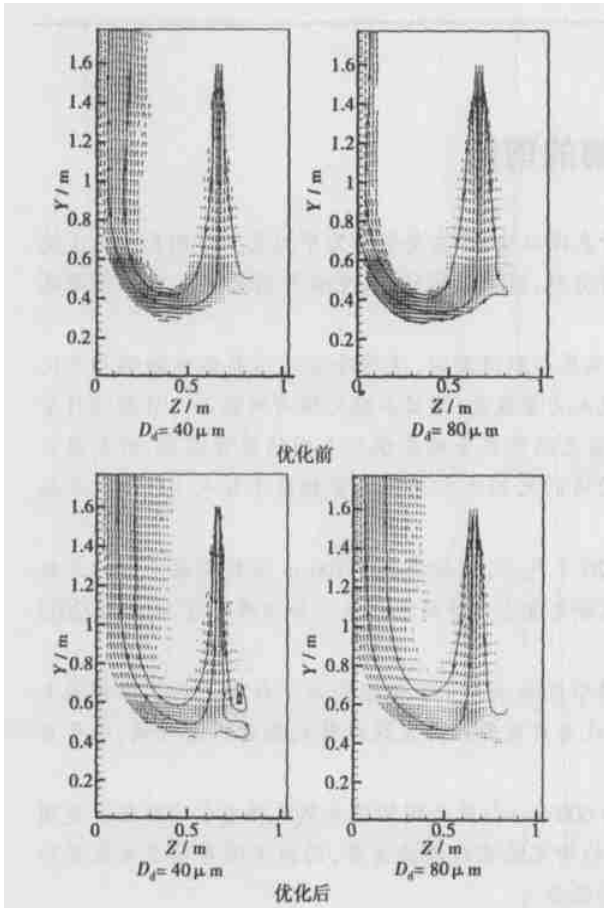


图 7 优化前后液滴速度场沿 X 轴中心截面的分布

优化前由于碱雾发生器出口气流在底部转矩较大, 颗粒在跟随流线运动过程中, 在惯性力的作用下容易偏离流线在反应器右腔壁面弯头处富集碰壁。

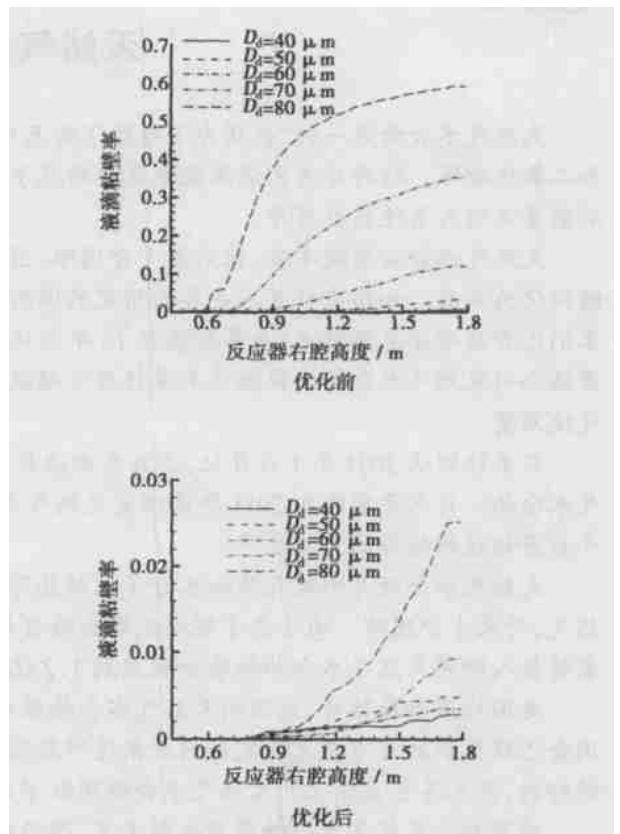


图 9 优化前后各组液滴在反应器右腔粘壁率

6 结 论

通过对脱硫反应器入口弯头部分数值模拟表

明:

(1) 优化前由于碱雾发生器和反应器弯头部分在较底部相交, 造成各相在弯头处转矩过大。液滴在弯头处运动过程中, 由于惯性较大, 易偏离流线运动并发生粘壁, 粒径越大, 粘壁率越大。通过对弯头部分优化后, 各组液滴的粘壁率大大降低, 与我们改造后的试验观察结果相符。

(2) 优化前碱雾发生器出口气流和反应器进口气流在弯头处混合较强烈, 优化后这种混合程度有所减弱, 可以使反应器入口气流在弯头贴壁面处在较高的距离内不被冷空气混合, 有利于保持弯头壁面干燥。

(3) 优化后各组颗粒浓度在反应器右腔分布较优化前均匀, 较少的各组颗粒可以在弯头壁面处富

集碰壁。

参考文献:

- [1] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] LOIH E. Numerical approaches for motion of dispersed particles, droplets and bubbles[J]. *Progress in Energy and Combustion Science* 2000, 26: 161-223.
- [3] BURGER M, CLOSE G. A combined eulerian and lagrangian method for prediction of evaporating sprays [A]. In: *Proceedings of 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences* [C]. Louisiana: New Orleans, 2001. 47-58.
- [4] CHARLES WORTH D H, MARSHALL W R. Evaporation from drops containing dissolved solids[J]. *AICHEJ* 1960, 6(1): 9-23.
- [5] 徐旭常, 毛健雄, 曾瑞良, 等. 燃烧理论与燃烧设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

· 信息介绍 ·

天然气水合物的前瞻

天然气水合物是一种“在压力下冻结了的天然气”, 外表像冰块, 其主要成分为甲烷及少量的乙、丙、烷和二氧化碳等。这种冷冻的能源就像厚厚的毯子, 覆盖着海底, 有关专家认为, 全世界的天然气水合物蕴藏的能量足够人类使用数百年。

天然气水合物蕴藏丰富, 但采集十分困难, 因从海底采集后到海面时, 这种冷冻的结晶体被融解和气化瞬间化为乌有。如何有效开采是各国研究的课题, 日本投入力量最大, 因日本缺乏现有的能源。日本的科学家们已开始研究采集技术, 并希望能在 15 年内让储量丰富天然气水合物能供应本国的能源需求, 日本国家原油公司天然气水合物研究组的米泽哲男介绍说, 日本沿海的天然气水合物藏量相当于日本 100 年的天然气使用量。

日本计划从 2004 年 1 月开始, 在日本南海挖掘 10~20 个气井, 该处海底 1 100 m 深处蕴藏丰富的天然气水合物。日本希望能在 2011 年前确定天然气水合物能否大量生产并用于商业。如证明可行, 则希望 2015 年后开始这种能源的商业生产。

天然气水合物是甲烷气体和水分子的结晶形态, 要将甲烷和水分子在低温高压下分离才能获得普通天然气, 开采十分困难。由于急于实现能源自给自足, 日本认为目前开始开发这种替代能源正是时候, 明年日本将投入研究天然气水合物的资金就达到 1.2 亿美元。

美国地质勘局估计, 美国的天然气水合物藏量约为 9 600 亿 m^3 , 是美国传统天然气藏量的 200 倍。美国国会已经拨款数百万美元研究如何开采这种能源。他们的研究是实践理论并重, 因为美国希望在未来星际旅行时, 开采其它星球上的天然气水合物用做宇宙飞船的能源。

俄罗斯的天然气水合物藏量也很丰富, 西伯利亚冻土下遍布这种能源。由于俄罗斯的石油和传统天然气已非常丰富, 他们对这方面的研究并不十分投入。

我国南海发现大量天然气水合物藏量后, 又在台湾西南海域发现蕴藏千亿 m^3 的天然气水合物。根据地震探测资料分析研究, 认为, 这种有天然气水合物特征的存在范围甚广。

(赵旺初 供稿)

reaction and basically do away with the lowering of desulfurization reaction rate caused by the recrystallization process of CaO crystals. It is also possible to transform the main constituents of the desulfurization reaction products into CaSO₄. The pyrolysis temperature of the latter is relatively high and the stability of the desulfurization products relatively good, thus eliminating the possibility of secondary pollution. **Key words:** flue gas desulfurization, CaO particle, optimum temperature

脉冲等离子体烟气脱硫反应器电极配置对能量利用的影响 = **Influence of the Electrode Configuration of a Pulse Plasma-based Flue Gas Desulfurization Reactor on Energy Utilization** [刊, 汉] / WU Yan, DONG Bing-yan, LI Jie, et al (Research Institute of Electrostatic & Special Power Source under the Dalian University of Science & Technology), Dalian, China, Post Code: 116024 // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 458 ~ 461

The influence of the electrode configuration of a wire-plate pulse corona discharge-based desulfurization reactor on pulsed energy utilization is investigated by tests. Test results indicate that under certain test conditions an increase in corona discharge wires and a decrease in wire-plate spacing can enhance the utilization of pulsed energy by the reactor. At a given electric field intensity when the wire-wire spacing is 0.6 - 1 times that of the wire-plate, the utilization of pulsed energy by the reactor will reach a maximum value. **Key words:** pulse plasma, flue gas desulfurization, reactor, electrode configuration, pulsed energy

脱硫反应器进口弯头部分多相流数值模拟及结构优化 = **Numerical Simulation of Multi-phase Flows in the Inlet Bend of a Desulfurization Reactor and Reactor Configuration Optimization** [刊, 汉] / WANG Lei, ZHANG Ming-chuan, ZHOU Yue-gui, et al (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 462 ~ 466

With respect to the problem of serious wall adherence of liquid droplets located at the inlet bend of a desulfurization reactor a simulation was conducted of the gas-liquid-solid three-phase flows in an alkali-fog generator. Taking into account the liquid droplet evaporation the simulation was carried out by using a standard turbulent pulsation $k-\epsilon$ dual-equation model for the gas phase and a stochastic trajectory model for the discrete phase. As a result, obtained were the temperature fields at the bend portion of the reactor, velocity vector fields of various phases and particle concentration fields both prior to and after the optimization. The results of the simulation indicate that prior to the optimization the torque of various phases at the bend location is excessively great due to a contact of the multi-fluid alkali-fog generator and the inlet bend being realized at a lower bottom. Under the above circumstances the droplets of various groups will deviate from a streamline and adhere to a wall under the action of a relatively large inertial force. **Key words:** numerical simulation, multi-phase flow, evaporation, liquid droplets

调质脱硫剂硫化反应产物层固态离子扩散机理的研究 = **An Investigation of the Mechanism of Solid-state Ion Diffusion in the Sulfidation Reaction Product Layer of a Modified Desulfurization Agent** [刊, 汉] / WANG Chun-bo, LI Yong-hua, CHEN Hong-wei (Institute of Energy and Power Engineering under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), SHEN Xiang-lin (Education Ministry Key Laboratory of Coal Clean Combustion under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 467 ~ 470

The distribution of elements at the sulfidation reaction product section of a sodium salt-modified desulfurization agent was analyzed by using the energy-spectrum scanning function of SEM. The results of the analysis show that the content of S element is high at a particle edge location and low in the middle. It has also been detected that at the location where the