

高温紊流烟道内减温喷淋层布置方式研究

郝继光¹, 张 千²

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081; 2. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 100025)

摘 要: 采用计算流体力学方法, 基于离散相模型, 针对吸收塔入口前烟道内喷淋层的布置方式进行数值模拟, 结果表明: 受烟气流速影响, 喷淋层喷淋方向垂直于烟气流向难以穿透烟气, 无法解决脱硫塔入口处局部高温问题, 喷淋方向平行于烟气流向并顺流喷淋既有利于降低烟气温度又能避免喷头阻塞; 液滴直径每增加 50 μm , 喷淋水流量需要增加 60% 以上; 喷淋层内喷头的布置与烟气流速相关, 流速越快的位置需布置越多的喷头。

关 键 词: 喷淋层布置; 离散相模型; 数值模拟

中图分类号: TK264.1 **文献标识码:** A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.022

引 言

常规火电厂的脱硫装置设有烟气旁路^[1], 当烟气超温时, 可打开旁路挡道门, 使烟气直接进入烟囱排放, 完成对脱硫装置的保护。近年来, 随着国家环保标准的修改^[2], 对新建和已建成的机组都提出了取消旁路烟道的要求^[3-4]。为保证脱硫装置入口发生烟气超温情况下脱硫装置不发生损坏, 通常需要在吸收塔入口前的烟道内设计喷淋层, 对进入吸收塔的烟气进行减温^[5], 要求在吸收塔入口处将烟气温度降低至某一设计值。烟气受烟道走向影响, 流动多处于紊流状态, 流动参数尤其是流速分布不均, 这加大了喷淋层设计的难度, 而烟气流动特征、喷淋层布置形式和喷淋层内喷头布置形式等均直接影响喷淋减温效果, 这些布置方式如何确定, 至今仍没有具体的设计规范和标准。烟道内烟气与喷淋减温水液滴的流动属于典型的气液两相流动, 液滴相相对于烟气相而言为稀疏相, 可以采用基于 Euler-Lagrange(多体系统动力学方程)方法的颗粒轨道模型求解该类问题^[6-9]。

本研究采用计算流体力学软件 FLUENT, 对烟道内喷淋层的布置机制开展研究。在离散相模型基

础上, 以某典型烟道结构为研究对象, 对烟道内喷淋层的布置形式、液滴直径和喷淋层内喷头布置形式等关键因素, 对减温效果的影响开展了数值模拟研究, 得到了一些有益工程设计的结论。

1 数学模型

1.1 气相控制方程

烟道内湍流流动的连续方程、动量方程和能量方程用 Realizable $k-\varepsilon$ 方程描述^[10], 其通用形式为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi \quad (1)$$

式中: ρ —气相密度, kg/m^3 ; u —气相速度, m/s ; ϕ —通用变量; S_ϕ —通用变量对应的广义源项; Γ_ϕ —通用变量对应的广义扩散系数。

1.2 液滴运动方程

液滴假设为稀疏相、球形, 仅考虑重力和气相对液滴的曳力, 则液滴的运动方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(\mu - \mu_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (2)$$

式中: u_p —液滴速度, m/s ; F_D —阻力系数; ρ_p —液滴密度, kg/m^3 ; F_x —附加加速度项, m/s^2 。

1.3 液滴蒸发方程

随液滴温度的变化, 液滴蒸发汽化可以划分为 2 个阶段^[11]:

当液滴颗粒温度低于沸腾温度时, 液滴的质量变化率为:

$$\frac{dm_p}{dt} = k_c \left(Y \frac{P}{RT} - \frac{P_{\text{sat}}}{RT_p} \right) A_p M \quad (3)$$

式中: m_p —液滴质量, kg ; k_c —质量传递系数, m/s ;

收稿日期: 2014-06-23; 修订日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51406012)

作者简介: 郝继光(1979-), 男, 河南原阳人, 北京理工大学讲师, 博士。

Y —液滴的气相组分在当地的摩尔体积分数; P_{sat} —饱和压力, Pa; T_p —液滴温度, K; A_p —液滴表面积, m^2 ; M —液滴摩尔质量, g/mol 。

当液滴温度高于沸点温度后, 液滴的质量变化率为:

$$\begin{aligned}\frac{dm_p}{dt} &= \rho_p \frac{d}{dt} \left(\frac{\pi d_p^2}{6} \right) \\ &= \frac{2\pi k d_p}{c} (1 + 0.23 \sqrt{Re_p}) \times \\ &\quad \ln \left(1 + \frac{c(T - T_p)}{r} \right) \quad (4)\end{aligned}$$

式中: d_p —液滴直径, m; k —气相导热率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; r —液滴汽化潜热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; C —气相热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; Re_p —液滴雷诺数。

2 计算模型及边界条件

采用某热电厂火电机组脱硫塔入口段烟道, 对其内的喷淋减温过程开展数值模拟, 入口段烟道为矩形截面, 其高度为 4.3 m, 宽度为 9.4 m, 喷淋层布置位置距离脱硫塔入口 13.5 m。图 1 为计算模型的网格划分和边界条件, 区域离散采用结构化网格。

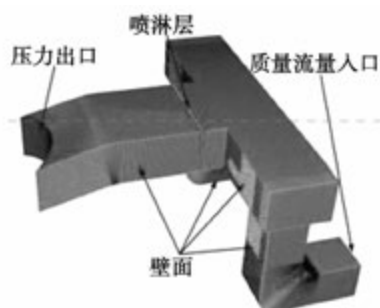


图 1 计算模型及边界条件

Fig.1 Schematic of simulation model and boundary conditions

计算模型网格量为 74 万, 入口质量流量 444.5 kg/s , 烟气温度为 160 $^{\circ}\text{C}$, 烟道壁面为绝热无滑移壁面边界条件; 吸收塔入口处为无反射压力出口边界条件, 压力设置为环境压力。计算中考虑 5 种主要烟气组分, 各组分的质量分数如表 1 所示, 烟气物理属性采用混合定律获得。

喷淋层采用面喷射模型模拟液滴喷射, 采用空心锥喷射模型模拟每个喷头的液滴喷射。

湍流模型选用 Realizable $k - \varepsilon$ 模型, 壁面附近采用标准壁面函数。采用离散相模型模拟液滴喷射, 考虑液滴间的碰撞和破碎, 在出口处液滴到达出口即停止对其计算, 认为其已离开计算区域, 采用弹性碰撞模型进行模拟液滴与固壁之间的碰撞。

表 1 烟气组分质量分数

Tab.1 Species mass fraction of flue gas

组 分	H_2O	N_2	O_2	CO_2	SO_2
质量分数/%	5.08	70.41	6.43	17.93	0.13

3 结果与分析

3.1 喷淋层布置形式对减温效果的影响

对喷淋方向平行于烟气流向顺流喷淋(方案 1)和逆流喷淋(方案 2)、及在烟道顶部布置喷淋层(方案 3)的 3 种喷淋层布置方式开展研究, 减温水流量、汽化率及脱硫塔入口截面的最高温度、最低温度和平均温度如表 2 所示。

表 2 不同布置形式计算结果

Tab.2 Simulation results of 3 spray layer arrangements

方案	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	汽化率/%	最高温 度/ $^{\circ}\text{C}$	最低温 度/ $^{\circ}\text{C}$	平均温 度/ $^{\circ}\text{C}$
1	52	29.23	80	53.2	67
2	52	29.42	78.6	53.1	66.6
3	52	19.81	142.8	54.3	90.1

从表 2 可知, 3 种布置形式中逆流喷淋(方案 2)减温效果最好, 进一步研究可知方案 2 将烟气最高温度降低至 80 $^{\circ}\text{C}$ 需要的减温水量是 50 kg/s , 相对方案 1 减少 3.8%; 但是实际烟道内喷头工作环境恶劣, 逆向布置喷头极易堵塞, 影响喷淋效果, 因此不建议逆向布置喷头; 在烟道顶部布置喷淋层(方案 3)减温效果最差, 同样的喷淋水量下, 方案 3 脱硫塔入口处的平均温度仍高达 90.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

方案 1 对应的流场分布如图 2 所示。脱硫塔前水平段的中间烟气速度较高; 喷淋液滴后, 烟气平均速度从喷淋层处的 11.5 m/s 降低至脱硫塔入口处的 9.5 m/s ; 在水平段烟道的直角拐点近侧壁处,

由于引射效应而形成负压,形成液滴漩涡,该处液滴直径可从 $200\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $110\text{ }\mu\text{m}$; 受不均匀的烟气流动和重力影响,喷淋层后及脱硫塔入口处的烟气温度分布亦不均匀,脱硫塔入口处烟气温度相差 $26.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

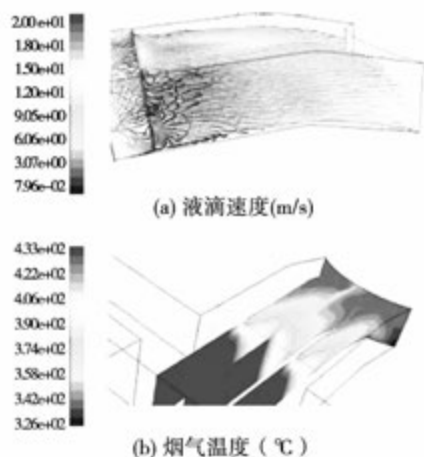


图2 方案1流场分布

Fig.2 Flow field of case 1

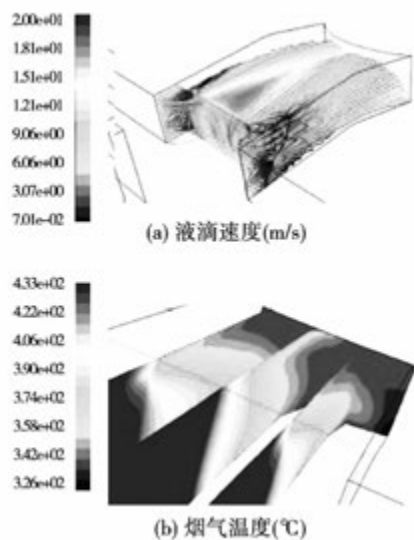


图3 方案2流场分布

Fig.3 Flow field of case 2

方案2对应的流场分布如图3所示。方案2与方案1的区别是喷淋层喷射方向相反,逆向喷射液滴可以达到更好的减温效果。但是由于烟道内烟气流动速度为 $10\text{--}25\text{ m/s}$,液滴喷射速度则通常为 $3\text{--}5\text{ m/s}$,即使逆向喷射,液滴喷射后在烟气阻力作用下,也会迅速沿烟气流动方向运动,如图3(a)所

示,逆向喷射液滴与顺向喷射液滴运动轨迹接近,所以烟气温度分布也表现出接近的分布,如图2和图3(b)所示。

方案3对应的流场分布如图4所示。从液滴速度图中可以看到顶部喷淋后液滴的运动轨迹,结合烟气温度云图可知,脱硫塔入口处有液滴运动经过处温度较低,而液滴未经过的位置烟气温度最高为 $142.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,且难以通过调整喷淋层内喷头布置方式对其进行改进。

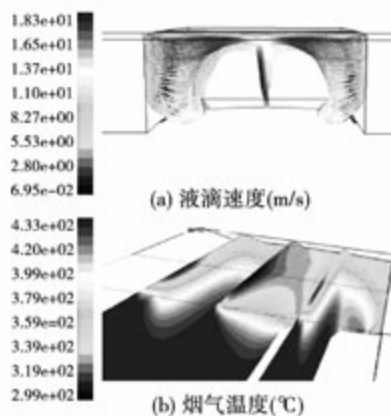


图4 方案3流场分布

Fig.4 Flow field of case 3

3.2 液滴直径对减温效果的影响

液滴直径决定喷淋液滴与烟气的接触面积,并最终影响减温水的汽化率。表3列出了不同液滴直径条件下,将烟气最高温度降低至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所需的减温水流量、汽化率及脱硫塔入口截面的温度参数。

表3 不同液滴直径计算结果

Tab.3 Simulation results of 5 droplet diameters

方案	液滴直径/ μm	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	汽化率/%	最大温度/ $^{\circ}\text{C}$	最小温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$
4	100	20.5	77.56	79.9	63.4	72.2
5	150	32.5	48.12	79.8	55.7	70
6	200	52	29.23	80	53.2	67
7	250	91	15.74	79.3	52.6	70
8	300	111	11.90	80	51.6	62.4

从表3中可知,液滴直径越大,需要的减温水流量越多,液滴直径每提高 $50\text{ }\mu\text{m}$,减温水量需要增加 $60\%\text{--}75\%$,减温水汽化量接近,而汽化率随减温水量的增加而降低。液滴直径与减温水流量间关系曲

线如图 5 所示。

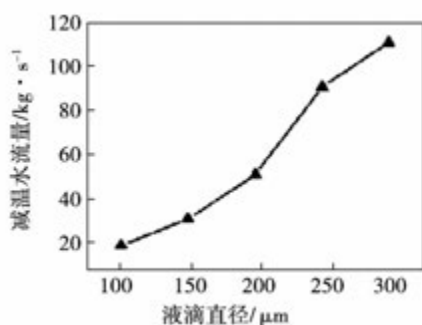


图 5 液滴直径与减温水流量曲线图

Fig. 5 Diagram between droplet diameters and water mass flow

根据液滴直径计算液滴体积 v , 可得单位质量减温水形成的液滴数量 n , 根据单个液滴表面积 s 可得所有液滴形成的表面积和 S , 以液滴直径 $200\ \mu\text{m}$ 为基准参数, 根据不同液滴直径下的 S 可获得其它液滴直径下需要的减温水流量。根据以上思路获得的减温水流量 M_{wc} 如表 4 所示。

表 4 预估减温水流量及误差

Tab. 4 Predicted water mass flow and errors

方案	液滴直径/ μm	实际减温水流量 $/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	预估减温水流量 $/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	误差/ $\%$
4	100	20.5	26	26.83
5	150	32.5	39	20.00
7	250	91	65	-28.57
8	300	111	78	-29.73

从表 4 中可知, 采用液滴直径 $200\ \mu\text{m}$ 情况下的减温水流量作为基准参数, 当液滴直径小于 $200\ \mu\text{m}$ 时, 计算出的减温水量偏大, 而当液滴直径大于 $200\ \mu\text{m}$ 时, 计算出的减温水量偏小, 可建立式 (5) 对该值进行估算:

$$M_{w1} = \varphi \frac{D_1}{D_0} M_{w0} \quad (5)$$

式中: M_{w1} —估算减温水流量; φ —修正系数; $D_1 < D_0$ 时 $\varphi = 0.8$; $D_1 > D_0$ 时 $\varphi = 1.4$; D_1 —估算液滴直径; D_0 —基准液滴直径; M_{w0} —基准减温水流量。

3.3 烟气流动对喷淋层内喷头布置的影响

采用面喷射模型对烟道内降温问题开展机理研

究可回避喷淋层内喷头布置的复杂问题, 但是实际工程中, 喷淋层是由喷头构成的, 由于烟气流速较高且不均匀, 喷淋液滴必然难以完全覆盖喷淋层所在截面, 因此采用相应的喷头模型对烟道内喷淋层布置问题开展研究是必要的。

型号 3/8SHG-SS12030 的喷头参数如表 5 所示, 采用该空心锥喷头模型, 通过顺烟气流向均匀布置和随烟气流速增加而加密布置两种方法布置喷头, 以将脱硫塔入口处的烟气最高温度降低至 $80\ ^\circ\text{C}$ 为目标, 研究烟气流速对喷淋层内喷头布置的影响。

表 5 喷头参数

Tab. 5 Nozzle parameters

喷头类型	水压/ MPa	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	液滴直径/ μm	喷射角度/ $^\circ$
空心锥	0.5	0.5	150	120

计算结果如表 6 所示, 方案 9 喷淋层内喷头布置如图 6 所示, 方案 10 喷淋层内喷头布置如图 7 所示。

表 6 不同喷头布置对应的计算结果

Tab. 6 Simulation results of different nozzle arrangements

方案	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	汽化率/ $\%$	最大温度/ $^\circ\text{C}$	最小温度/ $^\circ\text{C}$	平均温度/ $^\circ\text{C}$
9	42	39.3	79.2	56.2	63.6
10	35	45.9	79.8	55.8	63.8

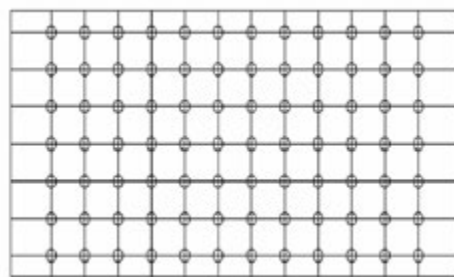


图 6 方案 9 喷头布置

Fig. 6 Nozzle arrangement of case 9

从表 6 中可知, 方案 10 以方案 9 的 83.3% 减温水流量实现了将脱硫塔入口处最高温度降低至 $80\ ^\circ\text{C}$ 以下的目标, 其减温水汽化率达到了 45.9%, 实现了对减温水更高效的使用。

图 6 的方案 9 喷淋层内喷头是均匀布置的; 图 7 的方案 10 喷头布置在烟道中间位置烟气流速快

的位置加密布置喷头,在烟道两侧减少了喷头布置数量。

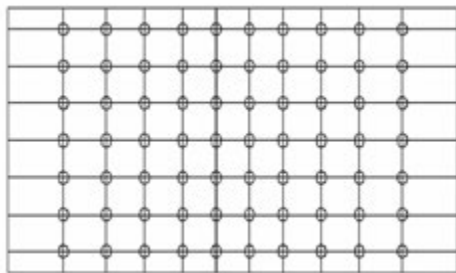


图7 方案10喷头布置

Fig.7 Nozzle arrangement of case 10

方案9和方案10对应的流场内液滴速度分布如图8和9所示。由于喷淋层距离脱硫塔入口距离固定,烟气流动速度越高的位置,液滴在烟道内的停留时间越短,这对于液滴相与烟气相的传热是不利的;在烟道内均匀布置喷头,通过增加喷头数量,即提高减温水流量,也可实现减温目标,如图8所示,但是所需减温水流量将大幅增加,尤其对于具有复杂烟道结构的火电机组;为更好的实现烟气减温目的,在烟气流速高处加密布置喷头,可增加与高速烟气接触的液滴数量和质量,在烟气流速低处减少喷头数量,有助于在较少减温水流量下实现烟气减温目标,如图9所示。

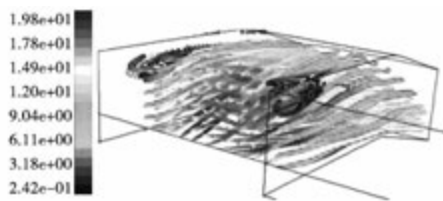


图8 方案9液滴速度(m/s)

Fig.8 Droplets velocity of case 9(m/s)

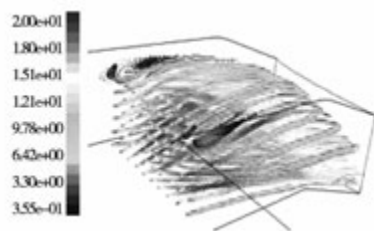


图9 方案10液滴速度(m/s)

Fig.9 Droplets velocity of case 10(m/s)

4 结 论

(1) 受烟气流速影响,喷淋方向垂直于烟气流向布置喷淋层,则喷淋液滴难以穿透烟气;喷淋方向平行于烟气流向并逆流喷淋既有利于降低烟气温度但工程上易阻塞喷头,导致减温效果降低;喷淋方向平行于烟气流向并顺流喷淋既有利于降低烟气温度又能避免喷头阻塞;

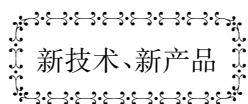
(2) 液滴直径越大,需要的减温水流量越多,液滴直径每提高 50 μm ,减温水流量需要增加 60% - 75%,建立了烟道内的事故喷淋水流量预估方法,如式(5)所示;

(3) 在喷淋层截面上,为烟气流速高处加密布置喷头,为烟气流速低处减少喷头数量,即可增加与高速烟气接触的液滴数量和质量,又有助于在较少减温水流量下实现烟气减温目标。

参考文献:

- [1] 肖 军,章名耀,蔡宁生. PFBC-CC 中试电站烟气旁路减温器模拟实验研究及设计应用[J]. 东南大学学报,2002,32(3): 431-436.
XIAO Jun,ZHANG Ming-yao,CAI Ning-sheng. Study and application on the attemperator of gas bypass in PFBC-CC pilot plant[J]. Journal of Southeast University,2002,32(3): 431-436.
- [2] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S].
GB 13223-2011, Emission standard of air pollutants for thermal power plants[S].
- [3] 蒋丛进,封乾君. 国华三河电厂脱硫装置取消烟气旁路技术[J]. 中国电力,2007,40(11): 93-96.
JIANG Cong-jin,FENG Qian-jun. Canceling gas bypass in FGD of guohua sanhe power plants[J]. Electric Power,2007,40(11): 93-96.
- [4] 王学飞. 脱硫烟气旁路取消后的相关研究[J]. 锅炉技术,2014,45(1): 68-71.
WANG Xue-fei. Flue gas desulfurization research after bypass canceled[J]. Boiler Technology,2014,45(1): 68-71.
- [5] 牛拥军,杨 程. 湿法脱硫无旁路运行的问题及应对措施[J]. 热力发电,2011,40(5): 56-59.
NIU Yong-jun,YANG Cheng. Problems occurred in operation of wet FGD without by-pass and countermeasures thereof[J]. Thermal Power Generation,2011,40(5): 56-59.
- [6] 周立行. 离散型湍流多相流动的研究进展和需求[J]. 力学进

- 展,2008,38(5): 611-622.
- ZHOU Li-xing. Major recent developments and requirements of discrete turbulent multiphase flow [J]. Advances in Mechanics,2008,38(5): 611-622.
- [7] Lyca M, Fabio I. Multiphase euler-lagrange CFD simulation applied to wet flue gas desulphurization technology [J]. International Journal of Multiphase Flow,2005,35: 185-194.
- [8] 朱振武, 嵇玉群, 安忠义, 等. 湿法脱硫系统中痕量元素的分布 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(3): 330-335.
- ZHU Zhen-wu, ZHUO Yu-qun, AN Zhong-yi, et al. Trace element distribution during wet flue gas desulphurization system [J]. Journal of Tsinghua university (Science & Technology), 2013, 53(3): 330-335.
- [9] Meikap B C, Kundu G, Biswas M N. Modeling of a novel multi-stage bubble column scrubber for flue gas desulfurization pilot plant [J]. Chem Eng Journal,2002,86(3): 331-342.
- [10] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new $k-\varepsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation [J]. Computers Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [11] Sazhin S S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation [J]. Prog. Energy Combust. Sci., 2006, 32(2): 162-214.
- (姜雪梅 编辑)



中国订单保持继续不断

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.023

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2013 年 4 月刊报道, Rolls-Royce 宣布了一个价格为 7 500 万美元的合同, 向中石油公司供应: 通过西气东输三线管线, 三线用于泵送天然气的设备和相关的服务。

Rolls-Royce 将供应用于西气东输三线管线的由 6 台 RB211 工业燃气轮机驱动的管线压缩机组。该公司从 2004 年以来就已经为西气东输管线提供设备和服务。这个合同使被销售用于西气东输管线的 RB211 机组的总数达到 37 台。

RB211 发动机具有较高的简单循环效率使其成为管线压缩机理想的驱动装备。它的低重量和为了运输和维修可以迅速拆下燃气发生器的能力是适合这种应用的另一个关键因素。

RB211GT61 机械驱动装置技术规范 and 额定性能:

推出 年份	ISO 额定连续 功率/kW	热耗率 kJ/kWh	效率 %	压比	质量流量 kg/s	涡轮转速 r/min	排气温度 ℃	大约的尺寸 L × W × H/m	说明
2000	33 309	8 888	40.5	21.7	95.3	4 850	498	9.1 × 4.0 × 4.9	RB211-24GT 燃气发生器

(吉桂明 摘译)

In this paper, experiments have been performed to research the high temperature premixed combustion process of flat-flame combustion by PIV technique. Through the comparison of the turbulent flow field under two different conditions about cold non-burning and hot combustion, it reveals the effect of high temperature premixed combustion on distribution of turbulent vortex integral scale. The research shows that along with the momentum and energy transfer, the combustion process directly affect the size and distribution of the turbulent vortex structure, the minimum turbulence integral scale (12 mm) of hot-state combustion condition is exactly flame zone which the momentum and energy exchange strongly. However, the flow area which speed and velocity gradient is very small exists large turbulence integral scale (23 mm). The author thinks that this study would establish the foundation for the depth of the premixed flame transmission mechanism. **Key words:** Flat-Flame Combustion, Turbulence Flow, Particle Image Velocimetry (PIV), Integral Length Scale (ILS)

高温紊流烟道内减温喷淋层布置方式研究 = **Research on the Arrangement of Thermoreduction of Spray Layer in Elevated Temperature Turbulent Flue** [刊, 汉] HAO Ji-guang (School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, China, Post Code: 100081), ZHANG Qian (Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co. Ltd, Beijing, China, Post Code: 100025) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4). -582-586

The numerical simulation is about the arrangement of spray layer arrangement in front of the entrance of absorption tower using the method CFD and Discrete Phase Model (DPM). The conclusions are as follows: the droplets is difficult to penetrate the flue gas when the direction of spray layer is perpendicular to the gas flow influenced by velocity of flue gas. It is helpful to reduce the temperature of the flue gas and to avoid the blockage of nozzle if the direction of spray layer is parallel to the gas flow and downstream. The mass flow of cooling water increases more than 60% when the droplets diameter increase 50 μm . The nozzle arrangement in spray layer is related to the velocity of the flue gas. More nozzles should be installed at the place where the flue gas is rapider. **Key words:** accident flue gas, spray layer arrangement, discrete phase models, numerical simulation

切圆喷淋湿法脱硫塔内部流场的模拟 = **Simulation of Internal Flow Field in Tangential Spray Desulfurization Tower** [刊, 汉] YANG Jia-jun (Guangzhou power plant Co. Ltd, Guangzhou, China, Post Code: 510160), KAN Yin-hui, ZHANG Jing-zheng, LIU Ding-ping (School of Electricity, South China University of Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4).