

液幕式湿法脱硫中喷嘴竖直射流液体回落特性实验

张 伟¹, 周屈兰², 惠世恩²

(1. 中国石油大学 热能与动力工程系, 山东 东营 257061; 2. 西安交通大学 热能工程系, 陕西 西安 710049)

摘 要: 在液幕式湿法脱硫中, 竖直射流回落液体分布情况直接决定脱硫效率。研究了 3 种型线喷嘴竖直射流液体回落的分布规律和射流高度与喷射压力关系。根据实验数据, 推导出了“回落液幕无量纲体积流率公式”。实验中发现, 不同型线喷嘴的回落液体分布规律差别不大, 因为同样射流高度下, 推导的公式中参数 A 、 n 和 R_0 很接近。拟合出射流高度和喷射压力以及无量纲平均半径和射流高度关联式。通过喷嘴组实验, 证明喷嘴组回落液体量可视为多个单喷嘴同时射流回落液体量简单叠加, 且分布均匀性是喷嘴间距和射流高度的函数。

关 键 词: 喷嘴; 竖直射流; 回落液幕

中图分类号: X701.3 文献标识码: A

引 言

目前, 环境污染问题严重, 其中由锅炉排放引起的污染占很大比例, 因此, 控制锅炉排放刻不容缓^[1]。现我国几乎没有自主产权的脱硫技术, 且现有的各种石灰石膏脱硫方法性能参数差别很大。为此, 本文提出了“液幕式湿法脱硫”的方案, 旨在研究控制 SO_2 排放的有关技术, 其指导思想是: 紧凑布置的喷嘴竖直射石灰石浆液, 当浆液到达最高点以后必然回落, 利用上升下降的浆液液幕吸收与之接触的烟气中的 SO_2 。可见, 液幕分布情况和射流阻力决定着脱硫效果的好坏。鉴于石灰石浆液是由喷嘴组喷射, 首先研究几种不同型线的单个喷嘴射流特性, 而后研究其中一种型线喷嘴组射流特性。

1 实验系统

实验系统如图 1 所示。实验用水采用闭式循环, 首先将水箱充满水, 然后通过水泵抽水送入管道, 流经喷嘴进行竖直射, 喷射后的水靠重力作用回落水箱。预先在母管上安装与喷嘴配套的法兰底座, 在实验时只要安装相应喷嘴即可。在实验系统

中, 高度标尺测量射流高度; 测压探针联接 U 型管压力计测量喷射压力; 阀门用来粗调射流高度; 再循环分管用来细调射流高度; 回落液体量分布用排状量管测量。

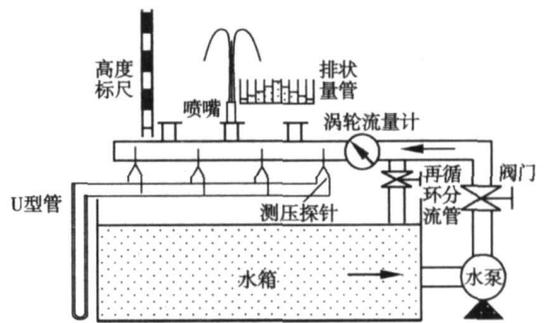


图 1 实验系统

2 实验内容

实验研究了 3 种型线的单喷嘴射流特性, 如图 2 所示, 目的在于对比型线不同对射流特性的影响。图 2(a)喷嘴入口为圆弧过渡, (b)入口为圆锥过渡, 而(c)为截面方形、入口为四棱台过渡的喷嘴。以上 3 个喷嘴顺序用 N1、N2、N3 编号表示。选用图 2(a)型喷嘴进行喷嘴组实验。

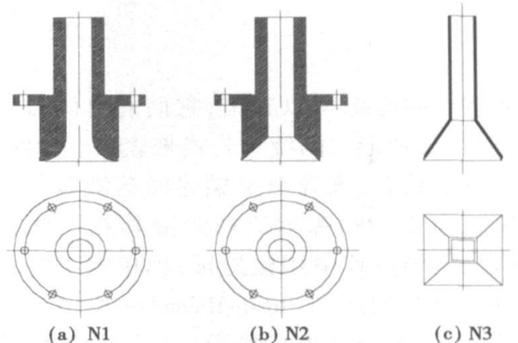


图 2 喷嘴型线

3 单喷嘴实验结果

3.1 回落液量数据处理

回落液体流量用“回落液幕无量纲体积流率” Q 来整理:

$$Q = q/u = V/Stu$$

式中: V 、 S 、 t 、 u —测点回落液体体积、测点量管面积、测试时间和射流速度。

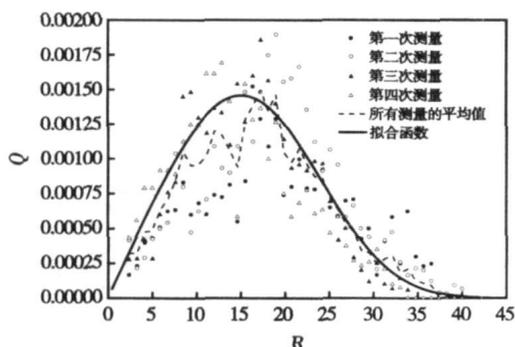
整理数据时使用无量纲半径, 即极坐标系下, 极半径 r 与喷嘴半径 r_0 之比为无量纲半径 R :

$$R = r/r_0$$

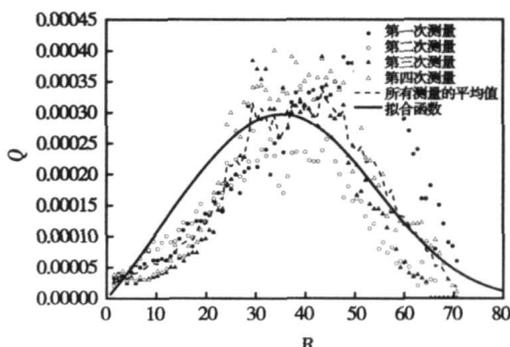
式中: R 同样为无量纲数。对于方形喷嘴应用无量纲当量半径。

3.2 回落液幕无量纲体积流率与无量纲半径的关系

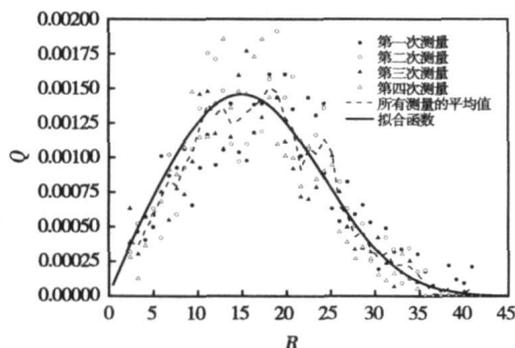
实验处理图比较多, 本文仅选几个有代表性的回落液量与无量纲半径关系, 如图3所示, 其中点线为实验测量数据。



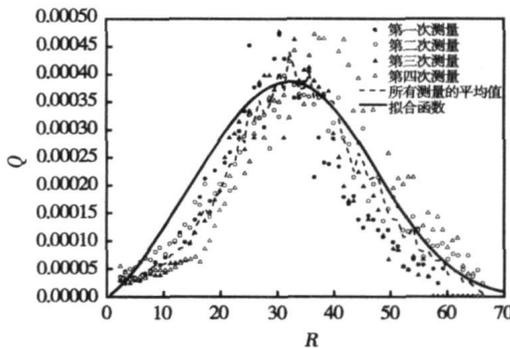
(a) N1射流高度 2m



(b) N1射流高度 8m



(c) N2射流高度 2m



(d) N3射流高度 8m

图3 单喷嘴回落液幕分布

由图3的图形可以看出, 它们的总体形状很相似, 可以用某种形式的统一公式来表示。为此, 根据分布曲线的状态, 推导出了描述回落液幕分布的统一公式。由于单喷嘴射流回落液幕在平面上呈圆形, 所以, 推导过程中用极坐标; 因单喷嘴垂直射流回落液幕分布曲线与 Rosin-Rammber 概率分布十分类似^[3], 故按此分布进行推导。以下为求取拟合系数步骤:

(1) 实验数据求积分:

$$A = \int_0^{\infty} Q(R)2\pi R dR \quad (1)$$

(2) 实验数据求出一个沿 R 分布的函数:

$$F(R) = 1 - \frac{\int_0^R Q(R)2\pi R dR}{A} \quad (2)$$

(3) 预测函数的分布形式为 Rosin-Rammber 分布:

$$F(R) = e^{-\left(\frac{R}{R_0}\right)^n} \quad (3)$$

(4) 对式(3)连续求两次自然对数:

$$\ln(-\ln(F(R))) = n(\ln R - \ln R_0) \quad (4)$$

以上为推导过程。用实验数据可以求出 $\ln(-\ln(F(R)))$, $\ln R$ 的值, 进而用最小二乘法拟合两者

间的关系, 从而可以求出对应于每个射流高度下的 n 和 R_0 。图 4 为 N1、N2、N3 喷嘴射流高度 2 m 和 8

m 时用 $\ln(-\ln(F(R)))$ 和 $\ln R$ 绘制的。表 1 示出对应射流高度的各个系数值。

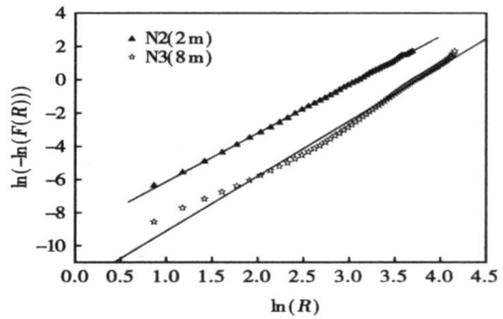
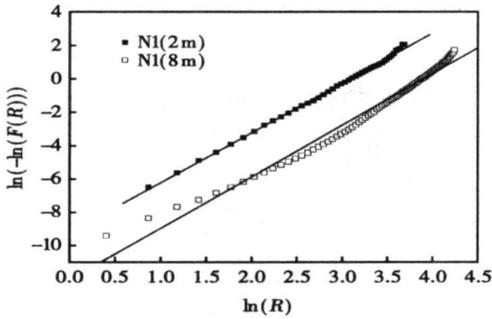


图 4 $\ln(-\ln(F(R)))$ 和 $\ln R$ 的关系曲线

表 1 对应射流高度系数

射流高度/m	系数 A	系数 R_0	系数 n	
N1	2	3.00	21.90	2.98
	8	2.88	49.39	3.09
N2	2	3.05	22.22	2.92
	8	2.85	42.49	3.31

由表 1 数据可以清楚地看出, 不同型线的喷嘴相同射流高度的参数非常接近, 说明型线对射流特性没有明显影响。同时方形喷嘴回落液幕同样呈圆形, 这是因为射流脱离喷嘴后因表面张力的作用上升液柱同样为圆形, 故回落液幕必然呈圆形的缘故。

对式(2)两边求导数, 导出了以下的关系式:

$$Q(R) = \frac{An}{2\pi R^2} \left(\frac{R}{R_0}\right)^n e^{-\left(\frac{R}{R_0}\right)^n} \quad (5)$$

图 3 中的实线为式(5)绘制的。可以看出, 推导出的公式与实验数据吻合良好, 这说明完全可以应用此公式表示单喷嘴竖直射流回落液幕分布。本文提出的公式有明确的物理意义, 其中系数 A 表示回落液幕总无量纲流量, 理论值为 π , 但由于射流存在一定的雾化, 还不能收集所有射流液量, 所以 A 应该小于 π , 并且随着射流高度的增加, A 呈现下降趋势, 这一点由表 1 数据给予验证; 定义系数 R_0 为无量纲平均半径, 此值接近于拟合函数最大值对应的无量纲半径, 代表单喷嘴回落液幕有效覆盖范围。在布置喷嘴组时, R_0 是决定喷嘴间距的重要参考依据; 整个函数值分布的均匀性取决于系数 n , n 值越小, 函数曲线越平缓。

3.3 射流高度与喷射压力的关系

除了关心射流回落液量分布规律以外, 射流阻力状况也是要考虑的问题。由图 5 看出, 3 种喷嘴实测数据几乎重合, 并且呈现良好的线性关系。这再次证明, 喷嘴型线对竖直射流没有明显影响。运用流体力学知识^[3], 理论射流高度与喷射压力的关系为: $H = P/\rho g$ 。为了与理论关系比较, 将实验数据整理成上述关系, 即 $H = 0.76P/\rho g$ 。比较两个公式可知, 喷嘴能将压能的 76% 转化成位能, 即喷嘴的阻力损失为 0.24。损失主要是在脱离喷嘴后的流体与空气相互摩擦产生的。

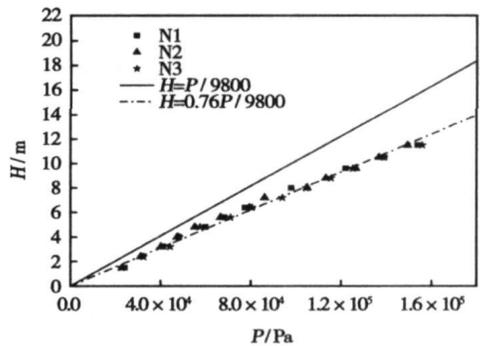


图 5 射流高度 H 与喷射压力 P 关系

3.4 无量纲平均半径与射流高度的关系

喷嘴间距大小取决于无量纲平均半径。图 6 给出了 3 种喷嘴 R_0 与 H 关系。从总体上讲, 随着射流高度的增加, 无量纲平均半径也增加。3 种喷嘴的对应高度下, R_0 值相差不大。综合所有的 R_0 值, 给出它们的关系式: $R_0 = 3.99H + 15.02$ 。

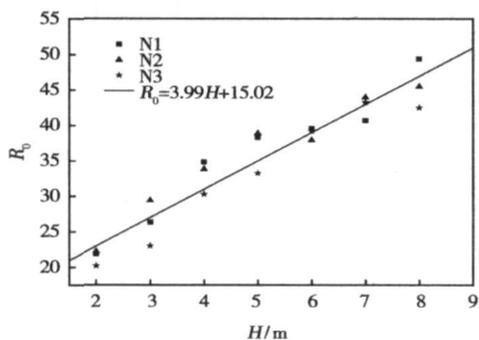


图 6 无量纲平均半径 R_0 与射流高度 H 关系

4 喷嘴组实验结果

用 4×4 正方形布置的喷嘴进行组合实验, 实验中变化 3 个喷嘴间距, 测量回落液量分布情况。在两列喷嘴之间布置测点, 利用排状量管收集回落液

体流量。

4.1 数据处理

回落液幕原始数据仍采用单喷嘴处理方法。处理图 7 中, 横坐标为无量纲距离 L , 表示测点距原点距离与喷嘴半径 r_0 之比。

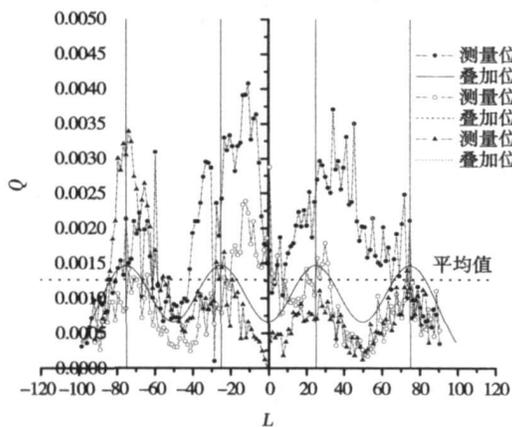
4.2 无量纲回落液幕体积流率与无量纲距离的关系

在单喷嘴实验结论中, 提出了表示单喷嘴回落液幕分布的公式。运用此公式按简单叠加原理可以对喷嘴组回落液幕分布状况进行预算:

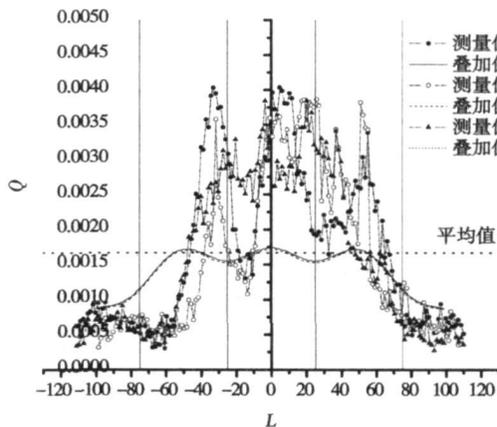
$$Q = \sum Q(R_j) \tag{6}$$

式中: Q —实验测点上各喷嘴回落液幕无量纲体积流率叠加; $Q(R_j)$ —回落液幕无量纲体积流率公式; R_j —第 j 个测点距离第 i 个喷嘴的无量纲半径。

图 7 为射流高度分别是 2 m 和 6 m 时, 回落液量处理图。其中点线代表实验测量值, 连续线为相应位置的由式(6)计算的叠加值。



(a) 射流高度 2 m



(b) 射流高度 6 m

图 7 相对间距 50 喷嘴组回落液幕分布

从总体上看, 无论是叠加曲线还是实验测量曲线, 共同特征是都呈现波浪式结构, 由小变大达到最大值, 然后再由大变直直至最小值。但是, 对比图 7 (a)、(b) 发现, 两者的波峰波谷数目不同, 这是因为射流不同时, 单个喷嘴回落液量分布不同, 表现在喷嘴组工作时回落液幕当然不同。同时, 还可以看出, 无论是图 7(a) 还是 (b) 中, 实验测量曲线和单喷嘴叠加曲线波峰波谷数目相同, 可以得出一个重要结论: 喷嘴组竖直射流回落液量满足多个同时工作单喷嘴回落液量简单叠加原理。尽管实测值波动较大, 但测量的平均值与叠加值比较接近。从这一点看, 射流高度

6 m 时回落液幕分布更均匀些, 这是因为此时无量纲平均半径更接近于 50 即这个间距与喷嘴回落液幕流量最大的位置恰好相吻合, 所以就更均匀些。一般而言, 在脱硫塔中, 为了保证烟气和浆液的接触时间, 必须保证两者的接触行程长度, 即射流高度。在高度确定以后, 再结合气液比要求, 根据分配均匀性和射流高度的关系, 即可确定喷嘴间距。

5 结 论

通过对单喷嘴和喷嘴组的竖直射流实验数据分

析处理, 得到如下一些结论:

(1) 不同型线喷嘴竖直射流回落液量分布差别不大;

(2) 提出了描述竖直射流回落液幕分布规律的

$$\text{公式: } Q(R) = \frac{An}{2\pi R^2} \left(\frac{R}{R_0} \right)^n e^{-\left(\frac{R}{R_0} \right)^n};$$

(3) 整理出了射流高度与喷射压力关系式 $H = 0.76P/\rho g$;

(4) 定义了可用来表示液幕覆盖面积的无量纲平均半径 R_0 , 并整理出了无量纲平均半径与射流高度关系式 $R_0 = 3.99H + 15.02$;

(5) 喷嘴组竖直射流回落液量满足多个同时工作单喷嘴回落液量简单叠加。布置多喷嘴时, 应根据不同射流高度下的无量纲平均半径确定喷嘴间距。

参考文献:

- [1] 钟 秦. 燃煤烟气脱硫脱硝技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 徐通模, 金定安, 温 龙. 锅炉燃烧设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [3] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982.

(编辑 柴舒)

· 会 讯 ·

ARA 亚洲/中国能源对话第九幕: 中国火力发电可持续发展 2008

作为世界第二大的电力消费市场, 随着不断增加的行业投资以及越来越多的外资电力公司的参与进入, 中国电力行业尤其是燃煤市场正在经历着重要的转变。在中国第十一个“五年计划”及相关节能减排指导政策正加剧影响行业格局。在此背景下, 中国电机工程学会和安隽博(中国)有限公司共同举办 ARA 亚洲能源对话交流活动的第九幕, 中国火力发电可持续发展 2008 国际峰会。本次活动将于 2008 年 2 月 27 日—29 日在北京汉华国际饭店召开。

本次活动主要通过主题演讲、小组讨论、座谈对话、预约小范围商务洽谈等丰富的参与形式来促进更轻松更深入的行业交流, 并得到了来自阿尔斯通公司、康菲石油公司、世界煤炭协会、绿色事实、独立电力企业协会、亚洲企业社会责任协会、英国二氧化碳捕捉与存储协会、美国彭博新闻社、亚洲能源、美国电力杂志、中国日报、热能动力工程、中国电力、中国能源网、热力发电、电力环境保护等海内外机构的大力支持。

截至目前, 来自美国能源部化石能办公室助理部长帮办 Justin R. SWIFT 先生、世界煤炭协会首席执行官 Milton Catelin 先生、意大利 ISAB 能源集团首席运营官 Giovanni Bellina 先生、中国科学院高技术研究与发展局副局长肖云汉先生、中国电力工程顾问集团公司总工程师孙锐先生、西安热工研究院总工程师许世森先生、中国国电集团科技环保部副主任钟鲁文先生等共计十六位国内外资深专家已经确认参与大会并发表精彩演讲, 他们将与国内外火电行业高层代表共聚一堂, 就业内新政策法规、国际国内电煤市场供需情况分析展望、绿色电力与清洁燃煤技术、二氧化碳捕捉碳存储发展趋势和清洁发展机制、燃烧过程控制管理、高效烟气排放控制、大型火电厂节水技术与水处理以及相关环保措施等关键议题和最佳实践开展精彩而深入的对话讨论。

欲了解更多详情, 请致电峰会组委会: +86-21-66523700 或登陆活动主题网站: www.coalgenchina.com

of Shell-and-tube Heat Exchangers[刊, 汉] / GU Xin, DONG Qi-wu, LIU Min-shan (Thermal Energy Engineering Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou, Post Code: 450002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 64 ~ 68

In the light of the structural characteristics of shell and tube heat exchangers, a periodic whole-section calculation model was presented for use in the numerical simulation of the exchanger flow and temperature fields. A comparison of the calculation results obtained by using the model under discussion with those of an integral model for a shell side shows that the error is less than 10%, indicating that the model in question is rational and its simulation results are correct. As a result, it provides a new approach for performing the numerical simulation of shell-and-tube heat exchangers with a sophisticated shell-side structure. On the basis of the calculation results obtained by using the periodic whole-section model, the modified algorithm of a periodic unit flow-passage model was presented for baffle-rod type heat exchangers, thus improving and perfecting the practicability and applicability of the above periodic model. **Key words:** shell and tube heat exchanger, periodicity, calculation model, numerical simulation, modified algorithm

自抗扰控制器串级三冲量汽包水位控制系统 = Three-element Drum Water-level Cascade Control System Featuring a Self-disturbance-resistant Controller[刊, 汉] / CHENG Qi-ming, DU Xu-feng, GUO Run-qing (College of Electric Power and Automation, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, Post Code: 200090), ZHENG Yong (Automation College, Shanghai University, Shanghai, Post Code: 200072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 69 ~ 72

In the light of the specific features of boiler-drum water level control, a self-disturbance-resistant controller-based drum water-level control system was presented, which adopts a three-element cascade control plus a feedforward control. The inner ring of the cascade control employs a PID (proportional-integral-differential) control while the outer ring uses a self-disturbance-resistant controller with a feedforward compensation. The self-disturbance-resistant controller comprises three elements, i. e. a tracking differentiator, an extension-state observer and a non-linear status error feedback control gear. The simulation results show that the control scheme proposed by the authors enjoys a better control quality and stronger robustness compared with those of a conventional PID control scheme. **Key words:** boiler drum water level, self-disturbance-resistant control, tracking differentiator, extension state observer, PID (proportional, integral and differential) control

液幕式湿法脱硫中喷嘴竖直射流液体回落特性实验 = Experiments on Falling-back Characteristics of an Upright-jet-flow Liquid from Nozzles in Liquid-curtain Type Wet-method Desulfurization[刊, 汉] / ZHANG Wei (Thermal Energy Engineering Department, China University of Petroleum, Dongying, Post Code: 257061), ZHOU Qu-lan, HUI Shi-en (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 73 ~ 77

During the liquid curtain type wet-method desulfurization the distribution of the falling-back liquid quantity of an upright-jet-flow directly determines the desulfurization efficiency. The distribution law of the upright jet-flow falling-back liquid from three kinds of nozzle profile and the relationship between the jet flow height and jet pressure have been studied. On the basis of the experimental data, derived was the “non-dimensional volume-flow rate formula of a falling-back liquid curtain”. It has been found during the experiment that the distribution law of the falling-back liquid in different nozzle profiles differ relatively little, because at a same jet flow height, the parameters A , n and R_0 derived from the formula very approximate to one another. Formulae showing the correlation of jet flow height and jet pressure as well as non-dimensional averaged radius and jet flow height have undergone a fitting. Through experiments of the nozzle groups it has been proven that the falling-back liquid quantity of the nozzle groups can be regarded as a simple superimposition of jet flow falling-back liquid quantity obtained simultaneously from many a single nozzle, and the distribution uniformity is a function of the nozzle spacing and jet flow height. **Key words:** nozzle, upright jet flow, falling-back liquid curtain

两种不对中在线补偿控制算法的比较 = A Comparison of Two Kinds of Out-of-alignment On-line Compensation