

# 正交实验法在湿式烟气脱硫装置 除水器实验中的应用

仇中柱, 张鹤声, 徐吉浣

(同济大学热能工程系, 上海 200092)

**摘要:** 将正交实验法用于湿式烟气脱硫装置离心式除水器脱水性能实验中, 通过对实验数据的方差分析, 确定了除水器各结构参数对脱水性能影响的显著水平及最佳除水器结构参数, 实现了除水器的优化设计。

**关键词:** 正交实验法; 离心式除水器; 脱水性能; 优化设计

中图分类号: X701 文献标识码: A

## 1 湿式烟气脱硫装置除水器简介

烟气脱硫的方法很多, 按照脱硫的工艺方式分为干法、湿法、半干法三大类, 其中湿法脱硫具有反应速度较快、设备较简单、初投资低及脱硫效率高等优点。但湿式烟气脱硫常伴有烟气带水问题。较常用的气体除水方法分成三类: 重力法、碰撞法、离心法。重力法通过降低空气流速, 使液滴沉降下来; 碰撞法一般采用曲折的挡板捕集液滴; 离心法通过气体的旋转运动, 依靠离心力把液滴抛向器壁以捕集液滴。重力法与碰撞法的一个不易克服的缺点是需要较大的空间, 而离心式除水器的脱水效率高, 结构简单, 而且适用于气体含液量大的情况, 所以采用离心式除水器。

离心式除水器的结构见图1。烟气自进气口进入除水器, 固定叶片使气流产生旋转运动, 气流中的液滴先是在粘滞力的作用下随气流旋转, 随之液滴在离心力的作用下被抛向筒壁, 从而被分离。

影响气流旋转运动的除水器结构参数有: 叶片高度( $h$ )、叶片切向角( $\alpha$ )、叶片数目( $n$ )和外圆直径( $d$ ), 所以上四个关键结构参数决定除水器脱水性能的优劣。虽然离心式除水器(以下简称除水器)有很多优点, 但在实际应用中若关键结构参数设计不当, 则会产生除水器脱水效率低, 出口处烟气带水等问题。烟气中若含有吸收了 $\text{SO}_2$ 的酸性液滴, 它们对脱硫装置后的烟道和风机有很强的腐蚀作用,

以至出现钢制烟道和烟囱使用寿命不长, 风机叶轮“飞车”事故等问题。湿式脱硫后烟气带水问题将造成很大的经济损失, 所以必须通过实验对除水器进行优化设计, 寻找其最优结构参数。

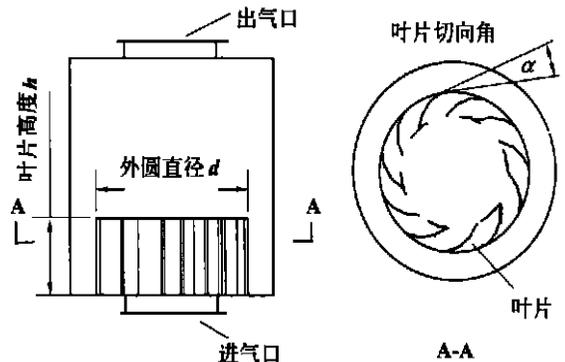


图1 除水器结构示意图

## 2 除水器的正交实验及数据分析

### 2.1 正交实验设计<sup>[3-4]</sup>

如上所述, 影响除水器脱水性能的因素有四个。多因素实验一种最简单的设计是全面实验, 即把每个因素的水平一切可能的组合都做一遍, 这种方法的优点是揭示内部的规律性比较清楚, 但是全面实验一般实验次数太多。若四个因素中的每个因素取3个水平, 则全面实验的实验次数为 $3^4$ 即81次。这样的实验设计在实际中既浪费, 实验工作量又大。

正交实验设计是在大量实践的基础上总结出来的一种科学的实验方法。它用一套规格化的表格来安排实验。正交实验有以下两个特点: (1)任一因素其各水平的实验数目都是一样的; (2)任两个因素之间都是交叉分组的全面实验。正因为正交实验有上述两个特点, 正交实验能大致反映全面实验的结果。如4因素3水平的正交实验中, 9次实验可以大体上反映81次全面实验的结果。

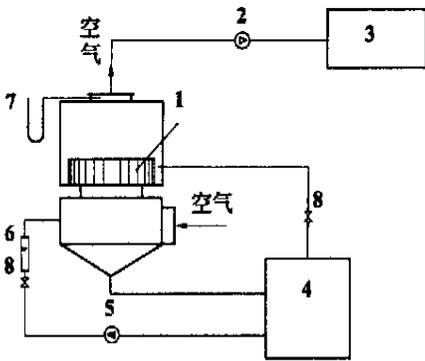
对具有一定烟气流处理能力的除水器, 四个结构参数各取三个水平, 取值情况见表 1。根据正交实验原理, 可以选择正交表  $L_9(3^4)$ 。把表 1 中各因素的取值情况, 反映到正交表  $L_9(3^4)$  中, 即得实验安排, 具体情况见表 2。

表 1 各因素的取值情况

水平	A 叶片高度 $h/\text{mm}$	B 叶片切向角 $\alpha/(\text{°})$	C 叶片数目 $n/\text{个}$	D 外圆直径 $d/\text{mm}$
1	100	30	12	500
2	80	20	9	450
3	120	10	15	550

## 2.2 测试方法

测试系统见图 2。



1—除水器; 2—风机; 3—整流罩; 4—水箱; 5—水泵;  
6—玻璃转子流量计; 7—U 型压力计; 8—阀门

图 2 测试系统图

风量的测量: 在整流罩 3 的出口处用热球风速仪测风速再计算风量  $L(\text{m}^3/\text{h})$ 。

气体带水量的测量: 采用水量平衡法。测定供给脱硫装置的水量和脱硫装置排出水量的差值, 计算出气体的带水量  $G(\text{kg}/\text{h})$ 。

在冷态下, 对每一种尺寸的除水器做一次重复试验, 计算得每一种除水器后空气的带水量  $y_{i1}$ ,  $y_{i2}(\text{kg}/\text{m}^3)$

$$y_{i1} = G_1/L_1, y_{i2} = G_2/L_2 \quad \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1)$$

其中, 下标  $i$  表示实验序号,  $i = 1, 2, 3 \dots 9$ ; 下标 1 和 2 分别表示重复实验的第一次实验和第二次实验。

## 2.3 气体带水量的测试结果与分析

气体带水量测试结果及方差计算结果见表 2。方差分析<sup>[5~7]</sup>结果见表 3。

表 2 气体带水量实验安排、测试结果及方差计算表

实 验 号	A 叶片高度 $h/\text{mm}$	B 叶片切向角 $\alpha/(\text{°})$	C 叶片数目 $n/\text{个}$	D 外圆直径 $d/\text{mm}$	$y_{i1} \times 10^4$ $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$y_{i2} \times 10^4$ $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$y_i \times 10^4$ $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$				
1	1	100	1	30	1	12	1	500	140.0	120.0	260.0
2	1	100	2	20	2	9	2	450	77.8	90.0	167.8
3	1	100	3	10	3	15	3	550	91.8	100.0	191.8
4	2	80	1	30	2	9	3	550	161.2	155.0	316.2
5	2	80	2	20	3	15	1	500	21.0	17.5	38.5
6	2	80	3	10	1	12	2	450	39.0	50.0	89.0
7	3	120	1	30	3	15	2	450	36.0	40.0	76.0
8	3	120	2	20	1	12	3	550	80.0	86.0	166.0
9	3	120	3	10	2	9	1	500	99.5	104.0	208.5
$K_1$	619.6	662.2	515.0	502.0				$\Sigma = 1\ 508.8$			
$K_2$	443.7	372.3	687.5	332.8							
$K_3$	445.5	484.3	306.3	674.0				$Y_i = y_{i1} + y_{i2}$			
$Q_i$	129\ 874.2	133\ 086.4	138\ 616.8	136\ 172.6							
$S_i$	3\ 403.2	6\ 615.4	12\ 145.8	9\ 701.6							

注: 定义  $c$  为实验的重复数,  $n$  为各因素每一水平重复的次数,  $N$  为实验总次数。此处  $c = 2, n = 3, N = 9$ 。

在表 2 中则:  $K = \sum_{i=1}^N Y_i = 1\ 508.8$ ;  $P = \frac{1}{C \cdot N} \cdot K^2 = 126\ 471.0$ ;  $R = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^N Y_i^2 = 158\ 337.0$ ;  $W = \sum_{i=j=1}^N \sum_{i=j=1}^c y_{ij}^2 = 158\ 767.0$ ;  $Q_i = \frac{1}{C \cdot n} (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2)$ 。其中,  $i$  为因素 A、B、C、D;  $S_i = Q_i - P$ 。其中,  $i$  为因素 A、B、C、D。

表 3 气体带水量方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性	临界值
A( $h$ )	3 403.2	2	1 701.6	35.6	**	$F_{0.01}(2, 9) = 8$
B( $\alpha$ )	6 615.4	2	3 307.7	69.2	**	
C( $n$ )	12 145.8	2	6 072.9	127.0	**	
D( $d$ )	9 701.6	2	4 850.8	101.5	**	
误差 $S_{e2}$	430.0	9	47.8			
总和 $S_T$	32 296.0	17				

注:  $S_{e2} = W - R$ ;  $S_T = W - P$

由表 3 的方差分析结果可以看出: A(叶片高度  $h$ )、B(叶片切向角  $\alpha$ )、C(叶片数目  $n$ )、D(外圆直径  $d$ ) 各个因素的  $F$  值分别为 35.6、69.2、127.0、101.5, 都远大于临界值  $F_{0.01}(2, 9)$ , 说明四个因素对气体带水量都有显著影响; 各因素的  $F$  值从大到小的排列为叶片数目( $n$ )、外圆直径( $d$ )、叶片切向角( $\alpha$ )、叶片高度( $h$ ), 因此各因素对气体带水量的影响程度从大到小依次为: 叶片数目( $n$ )、外圆直径( $d$ )、叶片切向角( $\alpha$ )、叶片高度( $h$ )。

表2中的 $K_1$ 表示每列中凡是对应水平1的气体带水量相加,如A列 $K_1 = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 619.6$ 。 $K_2$ ,  $K_3$ 的意义相同。为了直观,画出因素与气体带水量之间的关系图(图3)。

图3表明:叶片数目  $n = 15$ 、外圆直径  $d = 450$

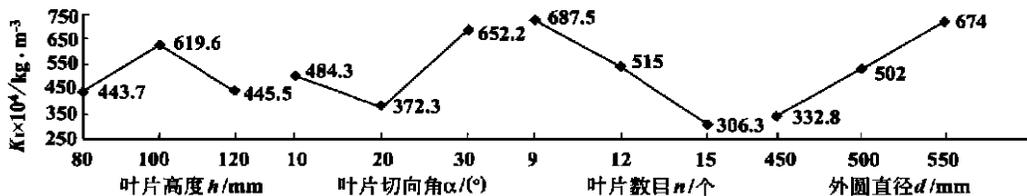


图3 因素与气体带水量之间的关系图

mm、叶片高度  $h = 80$  mm 和叶片切向角  $\alpha = 20$  度时,气体带水量均最小。气体带水量越小越好,所以脱水性能最佳的除水器结构参数为:叶片数目  $n = 15$ ,外圆直径  $d = 450$  mm,叶片高度  $h = 80$  mm,叶片切向角  $\alpha = 20$  度。

### 3 结论

用于湿式烟气脱硫装置的除水器脱水性能的高低直接影响着其后风机和烟道的寿命以及风机的安全运行,而除水器的结构参数——叶片数目( $n$ )、外圆直径( $d$ )、叶片高度( $h$ )、叶片切向角( $\alpha$ )等因素影响除水器的脱水性能。为了确定其的最佳结构参数,将正交实验法用于除水器的优化设计。以9次按正交设计的实验代替81次全面实验,为实验而加工制作的除水器也由81个减少到9个,大大减小了实验的工作量,降低了实验投资,并且,其实验效果与

全面实验的效果相同。

通过方差分析,确定了各因素影响除水器脱水性能的显著水平,叶片数目( $n$ )、外圆直径( $d$ )、叶片高度( $h$ )、叶片切向角( $\alpha$ )对脱水性能都有显著影响,影响程度从大到小的排列顺序为:叶片数目( $n$ )、外圆直径( $d$ )、叶片切向角( $\alpha$ )、叶片高度( $h$ )。

对应某一空气

量,除水器脱水性能最佳的结构参数为:叶片数目  $n = 15$ ,外圆直径  $d = 450$  mm,叶片高度  $h = 80$  mm,叶片切

向角  $\alpha = 20$  度。

### 参考文献:

- [1] 仇中柱. 燃煤工业锅炉旋流烟气脱硫装置的研究[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [2] 史猛. 对烟气湿式脱硫除尘后的烟气带水问题的研究[D]. 上海: 同济大学, 1998.
- [3] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组编. 正交设计[M]. 北京: 人民教育出版社, 1976.
- [4] 中国科学院数学研究所数理统计组编. 正交实验法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1975.
- [5] 中国科学院数学研究所统计组编. 常用数理统计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1974.
- [6] 中国科学院数学研究所统计组编. 方差分析[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [7] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987.

(何静芳 编辑)

(上接第 509 页)

### 参考文献:

- [1] ANDREAS P Weiss. Advanced LP steam turbine design[R]. Switzerland: ABB, 1998.
- [2] HALLER B R, Hesketh J A. Large steam turbine retrofitting to improve performance[R]. Italy: GEC Alsthon, 1993.

- [3] 谭春青. 透平叶栅中叶片的弯曲对流场性能影响的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1993.
- [4] 刘凤君, 王仲奇. 适用于具有弯曲叶片的叶轮机械设计的正问题计算方法[J]. 工程热物理学报, 1990, 11(2): 169-171.
- [5] 舒士甄. 叶轮机械原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.

(何静芳 编辑)

503 ~ 506

On the basis of the first and second laws of thermodynamics and under constant heat flux conditions an analysis was conducted of the influence of fouling on the thermodynamic performance of convection heat exchange process in a tube. A criterion for evaluating such an influence is put forward, the so-called relative increment number of dimensionless entropy generation. Also discussed is the effect of parameters such as in-tube fluid Reynolds number (in the absence of fouling) and dimensionless heat flux density on the above-mentioned increment number. The results of the study indicate that the above criterion reflects not only the effect of fouling on the in-tube heat transfer process but also the effect of fouling on the in-tube flow process. It is noted that the entropy generation caused by the fouling layer heat conduction plays an important role in the total entropy generation of the in-tube heat transfer process. In addition, the study results have been compared with those of a tube with constant wall temperature. **Key words:** constant heat flux, convection heat exchange, fouling, thermodynamic performance

先进汽轮机准三维设计方法研究与流型分析 = **A Study of the Quasi Three-dimensional Design Method for an Advanced Steam Turbine and an Analysis of Its Flow Patterns** [刊, 汉] / ZHANG Dong-yang, JIANG Hong-de (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), LI Jiu-hua (Jiangxi Electric Power Testing Research Institute, Nanchong, Jiangxi Province, China, Post Code: 330006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 507 ~ 509, 512

Presented is the development of a quasi three-dimensional design method for an advanced steam turbine. With a successfully modified 200 MW unit serving as an object of study the authors have performed the related analysis of its flow patterns. **Key words:** steam turbine, quasi three-dimensional design, flow pattern analysis

正交实验法在湿式烟气脱硫装置除水器实验中的应用 = **The Application of an Orthogonal Experimental Method in the Experimental Study of a Dehydrator for a Wet Flue Gas Desulfurization Unit** [刊, 汉] / QIU Zhong-zhu, ZHANG He-sheng, XU Ji-huan (Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 510 ~ 512

An orthogonal experimental method was employed to conduct the experimental study of the performance of a centrifugal dehydrator for a wet flue gas desulfurization unit. Through a variance analysis of the test data the effect of the various structural parameters of the dehydrator on water removal performance was ascertained along with an determination of the optimum structural parameters of the dehydrator. This had led to an optimum design of the latter. **Key words:** orthogonal experimental method, centrifugal dehydrator, dehydration performance, optimum design

大型油页岩循环床电站锅炉运行性能分析 = **Operating Performance Analysis of an Oil Shale-fired Circulating Fluidized Bed Boiler of the Highest Capacity Currently in Operation in China** [刊, 汉] / WANG Qing, HAO Zhi-jing, SUN Jian, et al (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 513 ~ 516

Presented are the design features, overall structure, operating performance and the test results of a 65 t/h oil shale-fired circulating fluidized bed boiler of low circulation ratio. The economic and social benefits of the power plant operating on oil shale were also analyzed. The test results show that the overall performance of the boiler has attained the advanced international level. **Key words:** oil shale, circulating fluidized bed, boiler, operation

汽轮机真空系统严密性试验的静态模拟计算 = **Static Simulation Calculation of the Air Tightness Test of a Steam Turbine Vacuum System** [刊, 汉] / LI Yong, DONG Yu-liang, YANG Shan-rang (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 517 ~ 519