

基于正交设计和灰色关联理论的板式省煤器优化

吴俐俊, 袁志成, 苑昭阔

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 基于正交设计理论和灰色关联理论对新型板式省煤器的结构参数进行了优化研究。选取 3 种优化变量(长轴长度、短轴长度和板间距), 采用正交设计方法确定 9 组计算模型。综合模拟结果与仿真验证分析得到新型板式省煤器的优化结果, 当烟气走板间波纹通道、水走板内循环通道时, 在新型板式省煤器长轴长度、短轴长度和板间距 3 种优化变量中, 对优化指标影响最大的因素是板间距, 其次是长轴长度, 影响最小的是短轴长度。当板长为 400 mm 时, 新型板式省煤器的最优结构参数组合为, 长轴长度为 32 mm、短轴长度为 12 mm、板间距为 25 mm。并搭建试验台, 对此最优结构进行试验验证。研究结果为板式省煤器的设计提供一种思路。

关键词: 板式省煤器; 正交设计; 灰色关联度; 优化

中图分类号: TK172

文献标志码: A

Optimization on the Structure of Plate Economizer Based on Orthogonal Design and Grey Relational Theory

WU Lijun, YUAN Zhicheng, YUAN Zhaokuo

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on orthogonal design theory and grey correlation theory, structure parameters of new type economizer were optimized. Nine groups of calculation models were defined according to the orthogonal design method and three kinds of variables (long axis, short axis and plate spacing). Combined the simulation conclusions and analysis, the optimization results of plate type economizer show that: when the gas flows in corrugated channel and water flows in internal circulation channel, plate spacing, among the three factors, has the most significant impact on the optimization index. When the plate length is 400 mm, the optimal structural parameters of new plate and shell economizer are as follows: when the long axis is 32mm, the short axis is 12mm and the plate spacing is 25 mm. In addition, an experimental platform was set to verify the optimal structure, which

provides a new method for the design of plate type economizer.

Key words: plate type economizer; orthogonal design theory; grey relational theory; optimization

电站锅炉加装低压省煤器不仅可以降低排烟温度, 提高锅炉运行的安全可靠, 而且对于节能降耗, 回收燃煤烟气余热具有重要意义^[1-3]。国内外学者对于锅炉省煤器的研究大多集中在不同换热芯体对换热的影响, 或针对省煤器进行节能优化等。

李斌等^[4]在低温省煤器中采用 H 型鳞片管, 收到较好的余热回收效果; 王朝华等^[5]结合国内外翅片管省煤器的发展过程, 对影响翅片管换热性能的主要影响因素进行了分析; 温山等^[6]提出双级低压省煤器烟气余热利用技术; 王际洲等^[7]提出了一种新型的分层机制模型, 可通过模型各层间的耦合关系推算出省煤器内部热力参数沿烟气流动方向的分布特征。安恩科等^[8]建立模型计算加装低压省煤器热力系统的经济性, 并运用粒子群算法对热力系统进行了优化。随着板式省煤器各方面优势愈加明显^[9-12], 研究板式换热器各结构参数对于换热性能的影响显得尤为必要。吴俐俊等^[13]利用等效热降法和热平衡理论分别对新型板壳式低压省煤器传热性能进行分析, 结果表明, 在相同条件下, 新型板壳式低压省煤器具有更好的节能效果。王文平等^[14]对板式省煤器的传热特性进行数值求解研究, 发现板式省煤器的传热系数比传统管翅式省煤器高, 而且在烟气流道上添加鼓包将提高省煤器的换热效果。

本文在以上基础上, 对板式换热器各结构参数进行整体优化。一个好的省煤器应该是有较好的综合传热和流动的特性, 即表面传热系数不太小、压降不太大^[15-16], 因此本文采用正交实验和灰色关联度

收稿日期: 2016-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(51574179)

第一作者: 吴俐俊(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程传热及余热利用。E-mail: ljwu@tongji.edu.cn

分析的方法^[17-19],以新型板式换热器板片椭圆流道长轴长度(A)、短轴长度(B)和板间距(H)3项为优化因素,选用表面传热系数*h*与空气侧压降 $\Delta P^{1/3}$ 比值作为优化指标,研究对新型板式省煤器优化指标影响最大的因素,从而得到新型板式省煤器尺寸参数的最佳参数组合。

1 新型板式省煤器传热模型的建立

1.1 板式省煤器芯体结构模型

新型板式省煤器芯体物理模型如图 1 所示。板式省煤器是由一系列板束错位叠加形成省煤器的换热芯体。单个换热板束是由 2 块板片通过一定的加工工艺形成截面为椭圆或扁圆的通道,板束内循环通道作为水通道。板束与板束之间错位叠放形成的波纹空间形成烟气波纹通道。如图 2,对省煤器换热性能的主要影响因素为类椭圆通道的 A、B、H。通过改变 3 种结构变量可以得到适合不同工况的板式省煤器。

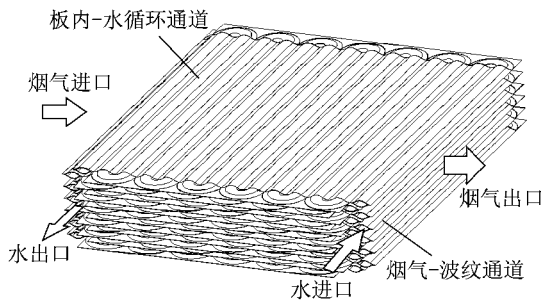


图 1 新型板式省煤器芯体结构

Fig. 1 Core structure of new plate economizer

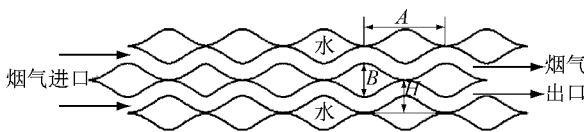


图 2 新型板式省煤器物理模型截面

Fig. 2 Sectional physical model of new plate economizer

1.2 数学物理模型的建立

为建立合适有效的模型,综合新型板式省煤器内部流动和换热的特点,作如下假设:①流动状态稳定,且流体为不可压缩的牛顿流体;②在计算过程中,忽略重力、浮升力的影响;③忽略流体流动时黏性耗散所产生的热效应,这在低速流动中是允许的;④忽略由于温差引起的辐射换热;⑤忽略省煤器边界与外部环境换热,即省煤器外部边界设定为绝热

边界^[20-22]。

为了简化计算,计算模型选取 3 个板束,板束内共设计 10 个椭圆循环通道,搭建形成 2 个波纹通道。省煤器其他结构参数由正交设计中的初始因素确定。水在板内椭圆通道内循环流动,烟气在板间波纹通道内流动。换热芯体物理模型截面如图 2 所示,材料物性如表 1。

表 1 材料物性参数

Tab. 1 Physical parameters of materials				
材料	温度/ °C	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·(m·°C) ⁻¹)	比热容/ (J·(kg·°C) ⁻¹)
换热芯体 (钢)		7 840	50	465
水	25	998	0.6	4 180
烟气	150	0.849	0.035 7	1 083

在本文的计算条件下,流动为湍流,计算对象的基本数学控制方程分别为:流体的连续性方程、动量方程、能量方程和平板导热微分方程。在烟气-水换热计算过程中,在板式换热器内流通截面发生变化的通道中,流动为湍流状态,采用标准的 *k-ε* 模型^[23],有

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_1 k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho_1 \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_1 \epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1g} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2g} \rho_1 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中:*t*为温度梯度,°C;ρ₁为密度,kg·m³;v_{*i*}为流体在*x_i*方向上的速率,m·s⁻¹;ε为脉动耗散率;*k*为湍流动能;μ为动力黏度,Pa·s;u_{*t*}为温度梯度方向的速率,m·s⁻¹;i,j,k分别为空间坐标3个方向;G_{*k*}为由于平均速度梯度而产生的湍流动能,J;σ_{*k*}为对于*k*的湍流脉动动能扩散的有效普朗特数 Pr;σ_{*ε*}为对于ε的湍流脉动动能扩散的有效普朗特数 Pr;C_{1g},C_{2g}为常数。

1.3 边界条件及网格

(1) 入口边界条件:在对新型板式省煤器板片进行换热计算过程中,入口采用速度入口条件,冷水和烟气的入口温度和速度与试验过程保持一致,以便进行比较验证。

(2) 出口边界条件:出口边界条件采用压力出口条件,设定为一个大气压的表压力。Fluent 软件中当介质流动出现回流现象时,采用压力出口边界条件来替代质量出口边界条件常常会有更好的收敛

速度。

(3) 壁面边界条件:①外部边界. 无滑移速度边界条件 $u=0$, 温度服从绝热边界条件, $\frac{\partial t}{\partial n}\Big|_w=0$;②内部壁面. 无滑移速度边界条件 $u=0$, 内部换热面采用耦合边界条件。

通过数值模拟软件 Fluent 自带的前处理软件 Gambit 生成计算区域的网格. 由于流道复杂, 对于板内类椭圆冷却水循环通道, 采用结构化和非结构化混合网格生成, 板间波纹烟气通道结构比较规整, 采用结构化网格划分, 最终网格数量约为 40 万。

鉴于板式省煤器结构特点, 烟气侧为波纹通道, 板内为循环水通道, 流体的流动状态均为湍流. 湍流流动是一种高度非线性的复杂运动, 而在紧贴壁面的区域, 存在一层较薄的黏性底层, 该层中流动几乎是层流, 因此对于此种板式省煤器的数值模拟问题, 存在主流为湍流而近壁面附近为层流的问题. 由于 Gambit 中网格划分为自动生成, 网格的大小和疏密会影响近壁面流场的计算精度, 如果网格太密, 则会增加计算负担, 网格太疏又降低计算精度, 因此需要对近壁面的网格问题进行讨论. 近壁区的黏性底层区域通常用距离量纲为一参数 y^+ 衡量^[24-25]。

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho_g}{\mu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_g}} \quad (3)$$

式中: Δy 为第 1 层网格到壁面的距离, m; ρ_g 为气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; μ 为黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; τ_w 为壁面切应力, Pa. y^+ 表征对黏性底层分界区域的影响。

在网格数量不变的情况下, 通过设置不同的第 1 层网格距离 Δy , 根据工程经验和以往研究的基础^[26], 对比数值计算结果和试验结果, 得到当 $4 < y^+ < 30$ 时能够得到较好的计算精度。

2 基于正交试验和灰色关联理论的板式省煤器优化分析

2.1 灰色关联理论及计算步骤

灰色系统理论以“部分信息明确, 部分信息不明确”的“小样本”、“数据匮乏”不确定性系统为研究对象, 主要通过已知明确的生成、开发、提取而得到有价值的信息, 实现对系统演化规律、运行行为的有效监控和正确描述. 灰色系统理论的内容包括: 以灰色朦胧集为基础的理论体系, 以灰色关联空间为依托的分析体系, 以灰色序列生成为基础的方法体系, 以灰色模型为核心的模型体系, 以系统分析、评估、建模、预测、决策、控制、优化为主体的技

术体系^[27]。

2.2 模拟方案的确定和结果计算

对新型板壳式的综合传热系数和烟气侧压降影响的结构参数是: A 、 B 、 H 3 个因素, 设其为优化设计变量(因子). 在理论计算和数值模拟的基础上, 最终确定的设计变量取值如表 2。

表 2 优化变量的取值

影响因素	A/mm	B/mm	H/mm
1	24	8	20
2	32	12	25
3	40	16	30

新型板式省煤器结构参数选取的是三因素和三水平, 若按全排列组合须做 $3^3=27$ 次计算. 为减少计算次数, 且尽可能不影响结果, 采用正交设计助手 II 3.1 设计正交试验方案. 在保证冷热流体进口温度、流量等参数一定的情况下利用软件 Fluent 模拟计算, 其中板长 400 mm, 共 10 个椭圆通道. 正交试验方案和 Fluent 模拟计算结果如表 3 所示. 在选取的综合换热性能评价指标 $\frac{h}{\Delta P^{1/3}}$ 中, h 为综合换热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; ΔP 为烟气侧压降, Pa。

由表 3, 在正交设计所选取的初始参数基础上, 通过数值模拟计算可得出当板式省煤器结构变化时, 即 A 、 B 、 H 在一定范围内变化时, 板式省煤器的传热性能具有一定的特点. 由于烟气走板间波纹通道, 当 A 相同时, 随着 H 的增大, 压降变小, 这是因为较大的板间距对于烟气流动的阻碍减小, 换热能力降低, 从而导致烟气侧压降减小. 而当板间距相等时, B 增大, 相当于增大了烟气侧波纹通道的波动强度, 从而导致压降降低. 因此压降是受 A 和 H 的共同影响. 在初步限定的各参数范围内, 根据上文提到的评价标准, 在 9 组模拟结果中, 当 $A=32$ mm、 $B=12$ mm、 $H=30$ mm 时, 板式省煤器的综合换热性能最佳, $y=15.21$, 即换热系数较大、压降不是太高. 因此, 在此基础上对省煤器的 3 个结构因素加密数据进行进一步优化。

2.3 基于灰色关联理论的优化分析

应用灰色关联度分析方法, 一般包括下列计算和分析步骤, 即: 做原始数据变换; 确定参考序列和比较序列; 求绝对差序列; 计算关联系数; 计算关联度; 排关联序; 以灰色关联度最大值对应的工艺参数值为最优值^[28-29]。

(1) 为保证建模的质量和系统分析的正确结果, 对收集来的原始数据进行数据变换和处理, 使其

表 3 板式省煤器模拟方案计算结果

Tab. 3 Simulation results of plate type economizer

A/ mm	B/ mm	H/ mm	烟气进口流速/ (m·s ⁻¹)	烟气进口温度/ K	烟气出口温度/ K	换热量/ W	综合换热系数/ (W·(m ² ·K) ⁻¹)	烟气侧压降/ Pa	$\frac{h}{\Delta P^{1/3}}$
24	8	20	12.50	400	382.10	1 611.09	85.93	231.93	13.98
24	12	25	10.00	400	381.07	1 626.20	80.71	198.12	13.84
24	16	30	8.33	400	375.13	1 625.81	75.90	218.60	12.60
32	8	25	10.00	400	382.94	1 529.62	62.74	173.36	14.98
32	12	30	8.33	400	382.65	1 537.98	60.28	179.49	15.21
32	16	20	12.50	400	362.95	3 344.46	58.33	145.10	13.29
40	8	30	8.33	400	383.20	1 504.55	50.01	133.52	12.51
40	12	20	12.50	400	369.55	2 752.65	85.82	314.11	12.85
40	16	25	10.00	400	369.84	2 710.78	80.40	332.51	12.05

量纲一化和具有可比性. 本文采用均值法对原始数据进行量纲一化处理,即

$$x_i(k) = \frac{x'_i(k)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x'_i(k)} \quad (4)$$

(2) 确定参考序列(目标函数)与比较序列(因子).

(3) 求绝对差序列,即求比较序列与参考序列的差值的绝对值.

(4) 计算比较序列与参考序列的关联系数,用式(5).

设经变化处理的比较数列 $X_i = \{x_i(k), k=1, 2, 3, \dots, n\}, i=1, 2, 3, \dots, m$, 其中, m 为目标个数,参考序列 $X_0 = \{x_0(k), k=1, 2, 3, \dots, n\}$, 则 X_i 对于 X_0 在第 k 点的灰色关联系数为

$$\xi_i(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \times \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (5)$$

式中: ρ 为分辨率,一般取 $\rho=0.5$.

(5) 计算比较数列对于参考序列的关联度,即求关联系数的平均值.

$$\eta_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \lambda_k \xi_i(x_0(k), x_i(k)) \quad (6)$$

式中: λ_k 为权重系数,取 1.

(6) 排关联序:即比较关联度的大小,以灰色关联度最大值对应的工艺参数值为最优值. 关联度越大,表明影响因素与被影响的结果之间的关系越密切,对结果的影响越大.

依据表 4 模拟计算结果和灰色关联理论计算步骤,得到长轴长度、短轴长度和板间距三者的关联度,分别为 r_A, r_B, r_H , 得 $r_A=0.631, r_B=0.569, r_H=0.717$.

在正交设计所选取的初始参数基础上, 3 个结构因子序列的关联度大小为 $r_H > r_A > r_B$. 因此对新型板壳式省煤器的优化指标影响最大的因素是板间距,其次是长轴长度,影响最小的是短轴长度.

分析新型板壳式省煤器的长轴长度、短轴长度和板间距各个水平与 y 的关联度,计算结果如表 4 所示.

表 4 长轴长度、短轴长度和板间距各水平与 y 的关联度

Tab. 4 The correlation of long axis, short axis and bundling spacing to y

因素	关联度 系数 1	关联度 系数 2	关联度 系数 3	平均关联 度系数
A=24 mm	0.485	0.495	0.607	0.529
A=32 mm	0.746	1.000	0.732	0.826
A=40 mm	0.701	0.451	0.463	0.538
B=8 mm	0.416	0.370	0.350	0.379
B=12 mm	1.000	1.000	0.834	0.945
B=16 mm	0.379	0.367	0.400	0.382
H=20 mm	0.538	0.739	0.658	0.645
H=25 mm	1.000	0.746	0.877	0.874
H=30 mm	0.478	0.510	0.818	0.632

从表 4 可知,当 $A=32$ mm 时的关联度最大, A 为 40 mm 和 24 mm 时影响较小,说明 $A=32$ mm 对新型板壳式省煤器的优化指标影响最大,故优化结构尺寸取 $A=32$ mm. 当 $B=12$ mm 时的关联度最大, B 为 8 mm 和 16 mm 时的关联度系数只有 B 为 12 mm 时的一半,说明 $B=12$ mm 对新型板壳式省煤器的优化指标影响最大,故优化结构尺寸取 $B=12$ mm. 当 $H=25$ mm 时关联度最大, H 为 20 mm 和 30 mm 时关联系数较小,说明 $H=25$ mm 对新型板壳式省煤器的优化指标影响最大,故优化结构尺寸取 $H=25$ mm. 综上所述,对新型板壳式省煤器的优化指标影响最大的因素是板间距,其次是长轴长度,影响最小的是短轴长度. 最优结构尺寸组合为: $A=32$ mm, $B=12$ mm, $H=25$ mm.

3 仿真验证

上述分析得到的新型板壳式省煤器结构参数组合在已经做过的 9 次模拟结果中没有出现,为确定此方案是否为最佳方案,利用 Fluent 软件按照此方案的结构参数进行模拟计算.对模拟数据进行处理,可得到数据如表 5.

表 5 最优结构模拟结果

Tab. 5 Simulation results of optimal structural

A/ mm	B/ mm	H/ mm	表面传热系数/ ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)	压降/ Pa	$\frac{h}{\Delta P^{1/3}}$
32	12	25	89.41	189.00	15.59

对比表 3 的初始数据,由表 5 的模拟计算结果可以看出,优化后的结构参数组合的优化指标 $y = \frac{h}{\Delta P^{1/3}} = 15.59$,是 10 组数据中最大的,因此,根据数值模拟结果和灰色关联理论,初步可得 $A = 32$ mm、 $B = 12$ mm、 $H = 25$ mm 是最优结构参数组合.为了验证此种板式省煤器设计思想的正确性,以最优参数组合搭建板式省煤器试验台,验证数值模拟的正确性.

4 试验验证

在误差范围内,为了验证以上 CFD (Computational Fluid Dynamics) 模拟结果的正确性,搭建板式省煤器试验台对结果进行验证.试验初始参数设置如下:换热器芯体通道长度为 400 mm,10 个椭圆通道,3 层板片,通过错位叠加,构成 2 层波纹通道.其中:烟气进口流量为 $144 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,温度为 150°C ,冷却水进口流量为 $80 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,温度为 25°C ,换热器芯体椭圆流体通道长轴长度为 30 mm,短轴长度为 12 mm,板间距为 25 mm.

4.1 换热试验原理

板式省煤器烟气-水换热系统如图 3.水循环系统主要由恒温水箱、水泵和流量计等组成,水在恒温水箱达到设定温度后,经水泵加压,流经试验段,在试验段完成热量交换后由循环水泵送入恒温水箱,完成水的循环.烟气系统是由天然气燃烧后产生的烟气,经风机加压,稳定到设定温度后流到试验段换热器内,在试验段完成热量交换后排出.测量系统主要包括温度测量、流量测量及压差测量.

4.2 试验值与模拟值对比

根据之前模拟所得数据与上述试验数据,选取 5

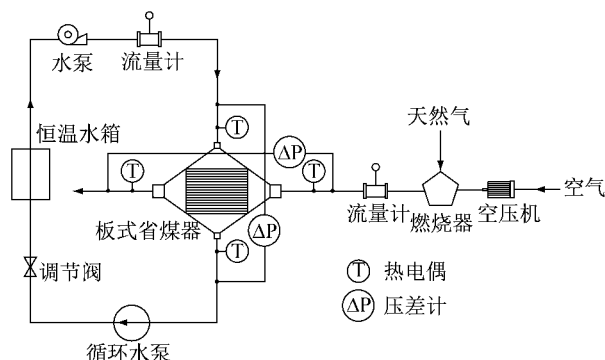


图 3 板式省煤器烟气-水换热系统试验示意

Fig. 3 Experimental platform of gas-water heat exchanger system of plate economizer

组试验数据与 CFD 模拟值进行对比分析.选取烟气侧压降和综合换热系数为目标函数,得到压降和换热系数 2 个方面的对比结果如图 4 所示.

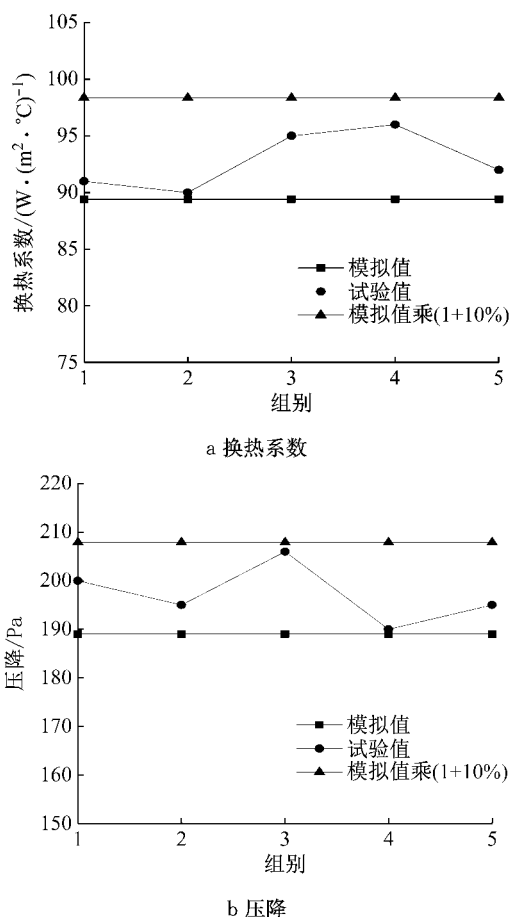


图 4 试验值与模拟值对比

Fig. 4 Comparison between the simulated and experimental results

从图 4 可看出,在相同的板片结构参数以及流体流速下,对于烟气侧压降和综合换热系数,对比模拟值和试验值的 5 组数据,误差均在 10% 以内,都有较好的吻合性.因此,对于板式换热器压降情况,数

值模拟所建立的计算模型是准确可信的. 当烟气进口流量为 $144 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 且温度为 150°C , 冷却水进口流量为 $80 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 且温度为 25°C , 换热器芯体椭圆流体通道 $A=30 \text{ mm}$ 、 $B=12 \text{ mm}$ 、 $H=25 \text{ mm}$ 时, 换热系数可达到 $90 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 以上, 烟气侧压降约为 200 Pa . 因此, 在 CFD 数值模拟的基础上, 利用正交设计和灰色关联理论对此类省煤器或换热器进行结构优化具有沿用性.

5 结论

基于正交设计理论和灰色关联度理论对新型板壳式低压省煤器进行优化分析. 分别研究了新型板式省煤器的长轴长度、短轴长度和板间距对其换热性能的影响, 综合仿真验证和试验验证分析, 得到结论如下:

(1) 在保证冷热流体进口温度、流量等参数一定的情况下, 根据正交试验所得初始参数进行模拟计算, 其中板长 400 mm 、共 10 个椭圆通、3 层循环水通道换热板错位叠加构成 2 层波纹烟气通道, 关联度计算结果表明, 对新型板壳式省煤器的优化指标影响最大的因素是板间距, 其次是长轴长度, 影响最小的是短轴长度.

(2) 根据初始 CFD 仿真结果和综合传热性能评价指标 y , 新型板壳式省煤器最优结构参数组合为: $A=32 \text{ mm}$ 、 $B=12 \text{ mm}$ 、 $H=30 \text{ mm}$, 此时优化指标 $y=15.21$, 在 9 组参数组合中, 换热特性最优.

(3) 经灰色关联分析和仿真验证, 得到进一步的优化结果, 当 $A=32 \text{ mm}$ 、 $B=12 \text{ mm}$ 、 $H=25 \text{ mm}$, 最优结构参数组合优化指标 $y=\frac{h}{\Delta P^{1/3}}=15.59$, 大于之前所有的结构参数组合模型, 为灰色关联分析后所得到的最佳结构.

(4) 针对最优结构进行试验验证, 通过模拟数据和试验数据的对比分析可看出, 最优结构下的板式省煤器试验值与模拟值具有较好的稳定性, 2 种方法所得到的烟气侧压降与综合换热系数误差在 10% 以内.

(5) 在 CFD 数值模拟的基础上, 利用正交设计和灰色关联理论得出最优结构的板式省煤器, 且模拟数据与试验数据吻合较好, 为板式省煤器或换热器的设计和优化提供了一种参考方法.

参考文献:

[1] 康晓妮, 马文举, 马涛, 等. 320MW 机组锅炉加装低温省煤器

的经济性研究[J]. 热力发电, 2012, 41(5):8.

KANG Xiaoni, MA Wenju, MA Tao, et al. Economic study on adding low-temperature economizer on a 320MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(5):8.

[2] 景宇蓉. 锅炉余热利用装置低压省煤器的热力分析及优化设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

JING Yurong. The thermal analysis and optimization design of low-pressure economizer used for boiler exhaust heat recovery [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.

[3] 张炳文, 周振起. 利用火电厂锅炉排烟废热的新方法[J]. 锅炉技术, 2010, 41(2):57.

ZHANG Bingwen, ZHOU Zhenqi. Method to utilize the heat in the flue gas from boilers of coal-fired power plants [J]. Boiler Technology, 2010, 41(2):57.

[4] 李斌, 党自力. 低温省煤器设计及其动态特性分析[J]. 热力发电, 2014, 43(2): 25.

LI Bin, DANG Zili. Design and dynamic analysis of a low temperature economizer [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(2): 25.

[5] 王朝华, 鲁常春. 翅片管省煤器应用与分析[J]. 能源研究与信息, 2013, 29(3):144.

WANG Chaohua, LU Changchun. Application and analysis of the finned tube economizer [J]. Energy Research and Information, 2013, 29(3):144.

[6] 温山, 阎维平. 双级低压省煤器技术及其经济性分析[J]. 热力发电, 2013, 42(2):7.

WEN Shan, YAN Weiping. Two-stage low pressure economizer technology and its economic analysis [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(2):7.

[7] 王际洲, 张燕平, 黄树红. 省煤器参数分布特性的分层模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(8):30.

WANG Jizhou, ZHANG Yaping, HUANG Shuhong. Analysis of parameter distribution in economizer based on multizone model [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(8):30.

[8] 马健越, 安恩科. 350 MW 电站低压省煤器优化设计[J]. 锅炉技术, 2010, 41(2):14.

MA Jianyue, AN Enke. Optimized designing of low pressure economizer structure parameters of 350 MW power plant [J]. Boiler Technology, 2010, 41(2):14.

[9] LIN Yuehung, LI Guangcheng, YANG Chieyuh. An experimental observation of the effect of flow direction for evaporation heat transfer in plate heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 88(9):425.

[10] 张冠敏. 复合波纹板式换热器强化传热机理及传热特性研究[D]. 山东: 山东大学, 2006.

ZHANG Guanmin. Research on heat transfer mechanism and heat transfer characteristics of the composite[D]. Shandong: Shandong University, 2006.

[11] 徐志明, 李煜, 郭进生, 等. 板式换热器运行参数影响结垢的权重及机理分析[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(3):78.

XU Zhiming, LI Yv, GUO Jinsheng, et al. Analysis of operating parameters' effect weights and mechanisms on fouling of the plate heat exchanger[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(3):78.

[12] AMALFI R L, FARAHANI F V, THOME J R. Flow boiling and frictional pressure gradients in plate heat exchangers. Part 1: Review and experimental database[J]. International Journal of

- Refrigeration, 2016;61:166.
- [13] 高秀晶, 吴俐俊, 梁辰光. 新型板壳式低压省煤器与管翅式低压省煤器传热性能的对比研究[J]. 电力与能源, 2014, 35(3):366.
GAO Xiujing, WU Lijun, LIANG Chenguang. Comparative study on heat transfer performance of plate and shell economizer and finned tube economizer[J]. Power & Energy, 2014, 35(3):366.
- [14] 王文平, 吴俐俊. 新型板式省煤器的传热特性研究[J]. 电力建设, 2013, 34(6):65.
WANG Wenping, WU Lijun. Heat transfer characteristics of new plate economizer [J]. Power Construction, 2013, 34(6):65.
- [15] LOWREY S, SUN Z. A numerical model for a wet air-side economizer[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 60:38.
- [16] KUMAR V, TIWARI A K, GHOSH S K. Application of nanofluids in plate heat exchanger: A review [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 105:1017.
- [17] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8):2041.
LIU Sifeng, CAI Hua, YANG Yingjie, *et al.* Advance in grey incidence analysis modelling [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(8):2041.
- [18] 周秀文. 灰色关联度的研究与应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
ZHOU Xiwen. The study on the grey relational degree and its application[D]. Jilin: Jilin University, 2007.
- [19] 曹明霞. 灰色关联分析模型及其应用的研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2007.
CAO Mingxia. Research on grey incidence analysis model and its application[D]. Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [20] 苗世昌. 除尘器区低温省煤器烟道数值模拟[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(2):65.
MIAO Shichang. Numerical simulation of low temperature economizers in the electrostatic precipitator area[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(2):65.
- [21] YUAN Zhicheng, WU Lijun, YUAN Zhaokuo. Shape optimization of welded plate heat exchangers based on grey correlation theory[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123:761.
- [22] 吕吉锋, 刘昊俊, 郭千朋, 等. 基于 CFD 数值模拟的单通道流动分析及结构优化[J]. 节能技术, 2015, 33(4):325.
LV Jifeng, LIU Haojun, GUO Qianming, *et al.* Single-channel flow analysis and structure optimization based on CFD simulation[J]. Energy Conservation Technology, 2015, 33(4):325.
- [23] 熊莉芳, 林源, 李世武. $k-\epsilon$ 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 工业加热, 2007, 36(4):13.
XIONG Lifang, LIN Yuan, LI Shiwu. $k-\epsilon$ turbulence model and its application to FLUENT software [J]. Industrial Heating, 2007, 36(4):13.
- [24] 于冲, 王旭. y^+ 值对翼型气动参数计算精度的影响研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(3):25.
YU Chong, WANG Xu. The study of effect of y^+ on precision of pneumatic parameters of foil [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 13(3):25.
- [25] 陈懋章. 黏性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
CHEN Maozhang. Fundamentals of viscous fluid dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [26] 吴俐俊, 袁志成. 板式省煤器通道结构对换热特性的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(8):1248.
WU Lijun, YUAN Zhicheng. Effect of channel structure for board economizer on heat transfer characteristics [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(8):1248.
- [27] 孙芳芳. 浅议灰色关联度分析方法及其应用[J]. 科技信息, 2010(17):880.
SUN Fangfang. Grey correlation analytical method and its application [J]. Science & Technology Information, 2010(17):880.
- [28] 吴俐俊, 高秀晶, 王树. 基于灰色关联度的高炉冷却壁整体优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(12):1885.
WU Lijun, GAO Xiujing, WANG Shu. Global optimization of blast furnace cooling stave based on grey correlation analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(12):1885.
- [29] LIU Sifeng, LIN Yi. Grey system (Theory and applications) [M]. Berlin: Springer Publisher, 2010.