

烟气横掠不同管翅结构的传热及积灰特性研究

李凤翔, 虞斌, 王硕, 陈帅康, 胡加俊

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏南京 211816)

摘要: 为了合理设计电厂低温热管省煤器, 利用 Fluent 软件结合用户自定义函数 (UDF) 对比研究了烟气参数对 H 形翅片椭圆管束与折齿型螺旋翅片圆管束表面的流动传热及颗粒沉积特性的影响。结果表明: 在烟气流速为 5 ~ 10 m/s 时, 烟气横掠两种管束的颗粒沉积率随烟气流速增加而升高; 相同烟气流速下, 颗粒沉积率随粒径增大呈先上升后下降趋势, 折齿型螺旋翅片圆管束粒径为 5 μm 时颗粒沉积率最大, H 型翅片椭圆管束粒径为 7 μm 时颗粒沉积率最大; 相同粒径条件下, H 型翅片椭圆管束沉积率低于折齿型螺旋翅片圆管束, H 形翅片椭圆管束的抗积灰性能更强; 相同的传热面积下, 折齿型螺旋翅片圆管束具有更好的传热性能。

关键词: 热管式低温省煤器; 翅片管; 流动传热; 颗粒沉积; 数值模拟

中图分类号: TK172.4

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.11.007

[引用本文格式] 李凤翔, 虞斌, 王硕, 等. 烟气横掠不同管翅结构的传热及积灰特性研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(11): 56-63. LI Fengxiang, YU Bin, WANG Shuo, et al. Investigation of flue gas deposition and heat transfer properties across different tube-fin structures[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(11): 56-63.

Investigation of Flue Gas Deposition and Heat Transfer Properties Across Different Tube-Fin Structures

LI Fengxiang, YU Bin, WANG Shuo, CHEN Shuaikang, HU Jiajun

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, China, Post Code: 211816)

Abstract: In order to design the low temperature heat pipe economizer in power plant reasonably, the effects of flue gas parameters on the flow and heat transfer and particle deposition characteristics on the surfaces of H-shaped finned elliptic tube bundles and folded spiral fin round tube bundles were studied comparatively using Fluent software in conjunction with user-defined functions (UDF). The findings indicate that when flue gas flow rate is 5 to 10 m/s, the particle deposition rate of flue gas across two types of tube bundles increases with the increase of flue gas flow velocity. As particle size increases, the particle deposition rate first rises and then falls at the same flue gas flow rate. The folded spiral fin round tube bundle with particle size of 5 μm exhibits the highest particle deposition rate, while the H-shaped fin elliptic tube bundle with particle size of 7 μm exhibits the highest particle deposition rate. H-shaped fin elliptic tube bundles provide superior resistance to ash formation and a lower deposition rate than folded spiral fin round tube bundles under the same particle size conditions. The folded spiral fin round tube bundle performs better in terms of heat transfer performance under the same heat transfer area.

Key words: heat pipe low temperature economizer, finned tube, flow and heat transfer, particle deposition, numerical simulation

引 言

在环保政策推动下,燃煤电站尾部烟道内的余热资源利用逐渐成为研究重点^[1]。省煤器作为热能回收系统的核心装置,其性能优劣关键在于换热元件的传热与阻力特性。H 型翅片与螺旋翅片在提高省煤器换热性能方面均发挥重要作用,它们通过独特的结构优化传热效率、降低流动阻力,为电站尾部烟道余热的有效回收提供有力支撑。此外,烟气颗粒易沉积在换热面,使其传热性能变差,锅炉效率及余热回收装置性能降低。故在研究改善热管换热器传热性能过程中,还必须深入研究其抗积灰特性,这对火电厂锅炉热管式低温省煤器的改进与研发有至关重要的价值和意义。

众多学者已对不同管型及翅片形式的设备内部工质流动传热特性与积灰情况展开研究。Walmsley 等人^[2]通过数值模拟方法研究了 10 种不同管形的抗积灰性能,发现椭圆管束在抑制颗粒沉积上效果显著。Han 等人^[3]比较了 4 种管束结构的积灰特性,指出交错式排列的椭圆管布置能有效降低颗粒沉积率。屠珊等人^[4]深入研究 3 个椭圆翅片管与 1 个圆翅片管空气冷却器的传热及阻力特性,结果表明,迎风面流速相同时,椭圆翅片管空气侧传热系数为圆翅片管的 3~7 倍;传热系数一致时,椭圆翅片管压降更低。马宇翔^[5]采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型结合 DPM 离散相模型对单 H 型和双 H 型翅片椭圆管束的烟气侧传热特性和磨损特性进行研究,发现单 H 型翅片椭圆管束的传热性能优于双 H 型翅片椭圆管束。郭修文^[6]通过对比开齿对螺旋连续、环形连续翅片管束性能的影响发现,相同条件下螺旋翅片管束开齿强化传热效果好,但流阻增幅大,受开齿影响环形翅片管束综合性能更好。综上所述,学者们在管型结构与翅片类型方面进行了大量研究,但是针对 H 型翅片椭圆管束与折齿型螺旋翅片圆管束表面流动传热特性及防积灰性能尚未开展相关对比研究。

本文基于某超超临界 1 000 MW 燃煤机组的烟气余热回收系统,提出一种折齿型螺旋翅片管,其开齿部分具有 5° 折齿角度,能有效破坏流动边界层、

增强扰流,促进流体渗入翅片根部以实现强化传热。基于此创新结构,选取固定翅间距和管束横向节距,对比研究折齿型螺旋翅片圆管束与 H 型翅片椭圆管束对传热积灰特性的影响,为电厂热管式低温省煤器的翅片管选型提供理论支撑。

1 计算模型

1.1 物理模型

采用 Fluent 软件,通过用户自定义函数(UDF)引入颗粒沉积模型,对烟气横掠 H 型翅片椭圆管和折齿型螺旋翅片圆管的传热及积灰特性展开数值模拟研究,本文所选的 H 形翅片椭圆管束与折齿型螺旋翅片圆管束表面积相同。两种翅片管结构如图 1 所示。

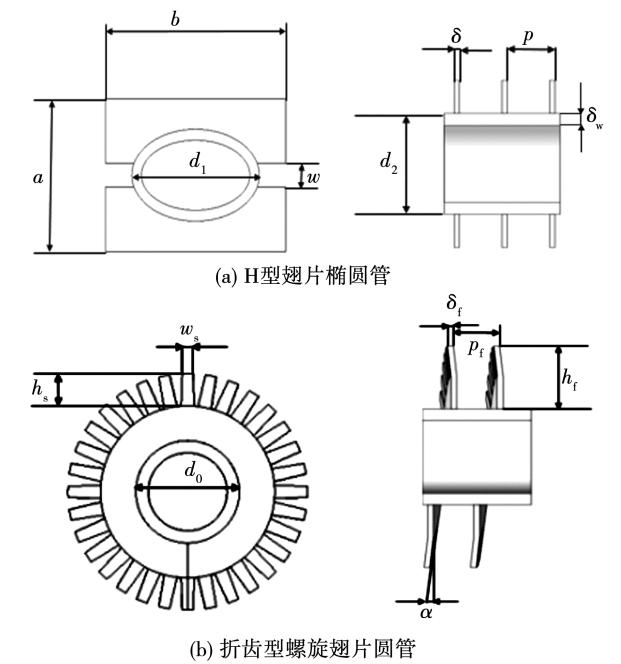


图 1 两种翅片管结构图

Fig. 1 Structure diagrams of two kinds of finned tubes

两种翅片管束结构参数具体数值如表 1 所示。

表 1 翅片管束结构参数

Tab. 1 Finned tube bundle structure parameters

H 型翅片椭圆管		折齿型螺旋翅片圆管	
参 数	数值	参 数	数值
长轴直径 d_1/mm	60.46	基管管径 d_0/mm	38
短轴直径 d_2/mm	38	折齿角度 $\alpha/(\text{^\circ})$	5
管壁厚度 δ_w/mm	4.5	管壁厚度 δ_w/mm	4.5
翅片宽度 a/mm	58	翅片高度 h_f/mm	25

续表 1

H 型翅片椭圆管	数值	折齿型螺旋翅片圆管	数值
参 数		参 数	
翅片长度 b/mm	80.5	翅片厚度 δ_f/mm	1.8
翅片厚度 δ/mm	1.5	翅片间距 p_f/mm	14
H 型翅片间距 p/mm	13.5	锯齿宽度 w_s/mm	4
开缝宽度 w/mm	10	锯齿高度 h_s/mm	12
横向节距 S_L/mm	110	横向节距 S_T/mm	110
		纵向节距 S_L/mm	110

考虑到结构周期性和流动相似性,折齿型螺旋翅片管束计算域高度方向选取连续的两个螺旋翅片间距高度。因本文研究翅片在开齿部分存在一定的倾倒,为防止翅片表面与计算单元过近产生复杂边界,沿翅片倾倒方向翅根端面与基管端面距离保留 $0.4 + h_s \sin \alpha$,单位为 mm ,另一端则保留 0.4 mm ,所以计算域高度为 $2p_f + \delta_f + 0.8 + h_s \sin \alpha$,单位为 mm 。入口段向上游延长 8 倍管径,保证来流速度的均匀性,出口段向下游延长 16 倍管径,避免回流。H 型翅片椭圆管束计算域与其相同,计算域总长 L 为 $1\,242 \text{ mm}$,保证对比可靠性。两种翅片管束计算区域如图 2 所示。

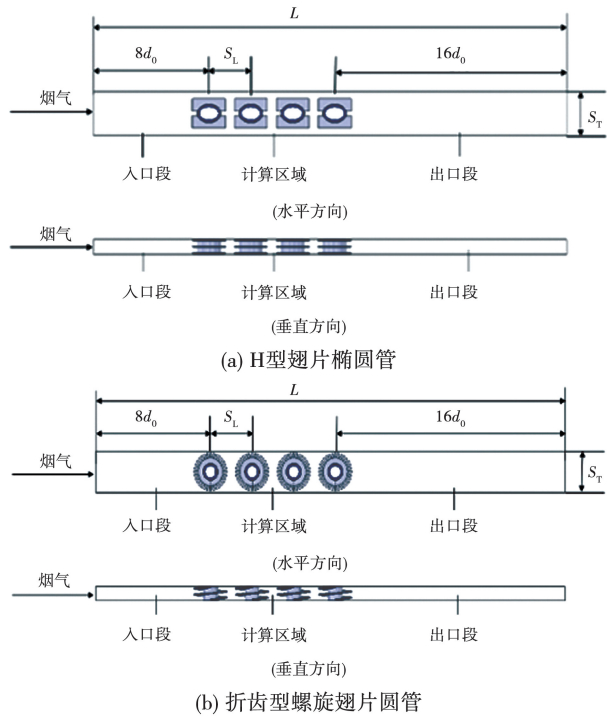


图 2 管束计算区域

Fig. 2 Tube bundle calculation areas

1.2 数学模型

1.2.1 连续相模型

烟气流为三维非稳态、不可压缩流动,作为连续相,控制方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} \tag{2}$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \tag{3}$$

式中: ρ —烟气密度; x —坐标;下标 i, j —相互垂直的单位向量; μ —烟气动力黏度; u_i, u_j —烟气流速在 x 和 y 轴的分量; c_p —烟气比定压热容; λ —热导率; p —烟气压力; T —烟气温度。

所研究的进口流速范围为 $5 \sim 10 \text{ m/s}$,基于进口速度和圆管外径的变化 Re 范围为 $4\,900 \sim 11\,000$,已进入湍流范围。RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型由标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型发展而来,相较于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,具有更高的准确性和可靠性^[7]。故本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型作为烟气流动的湍流模型,方程式^[7]如下:

$$\rho \varepsilon \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_k \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t S^2 - \rho \varepsilon \tag{4}$$

$$\rho \varepsilon \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \tag{5}$$

其中:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \tag{6}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{7}$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \phi^3 (1 - \phi/\phi_0)}{1 + \beta \phi^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{8}$$

式中: t —时间; k —湍流动能; ε —湍流耗散率; μ_t —湍流粘度; μ_{eff} —有效粘度; $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ —RNG $k-\varepsilon$ 模型的经验系数,分别取为 $0.084\,5, 1.42$ 和 1.68 ; S —应变率张量的模量; R_ε —RNG $k-\varepsilon$ 模型对 ε 方程的修正项; β —RNG 模型的经验系数,取 $\beta = 0.012$; ϕ, ϕ_0 —RNG 修正项的参数, $\phi = Sk/\varepsilon, \phi_0 = 4.38$; $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ — k 和 ε 的有效普朗特数,均为 1.393 。

1.2.2 离散相模型

以颗粒为离散系,对 Lagrange 坐标系下的颗粒作用力微分方程进行积分,求解颗粒运动轨迹^[8]。鉴于其体积分数极低(不足 10%),采用单向耦合用于烟气相和颗粒相的数值计算。烟气颗粒运动方程^[9]如下:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_p(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_{TH} + F_B + F_L \quad (9)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D Re_p}{24} \quad (10)$$

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (11)$$

式中: $F_D(u - u_p)$ —单位质量阻力; g_p —颗粒重力加速度; u —烟气流动速度; u_p —颗粒运动速度; F_D, F_{TH}, F_B, F_L —作用于颗粒的阻力、热泳力、布朗力和萨夫曼升力; C_D —拽力系数; d_p —颗粒直径; Re_p —颗粒相对雷诺数。

烟气内颗粒运动复杂,本文借助离散随机轨迹模型及随机涡流来模拟湍流扩散对颗粒运动的影响。同时,假定飞灰颗粒呈均匀球形、无自转,研究中忽略颗粒间的相互碰撞。

1.2.3 颗粒沉积模型

本研究中依据动量和能量守恒判断换热面上的颗粒沉积。El-Batsh 等人^[10]凭借试验所获取的数据,提出了一个具有半经验性质的临界捕获速度 u_{cr} ,该速度的计算公式^[10]如下:

$$v_{cr} = [2K/(d_p R^2)]^{10/7} \quad (12)$$

$$K = 0.51 \left[\frac{5\pi^2 (k_s + k_p)}{4\rho_p^{1.5}} \right]^{2/5} \quad (13)$$

$$k_s = (1 - v_s^2)/\pi E_s \quad (14)$$

$$k_p = (1 - v_p^2)/\pi E_p \quad (15)$$

式中: K —有效刚度; R —恢复系数; k_s —壁面弹性参数; k_p —颗粒弹性参数; ρ_p —颗粒密度; v_s —换热面泊松比; E_s —换热面杨氏模量; v_p —沉积颗粒泊松比; E_p —沉积颗粒杨氏模量。

当颗粒被管壁面捕获后,其能否沉积取决于黏附能与气动力,El-Batsh 等人^[11]构建了用于判断粒子剥离情况的临界剪切速度 u_{tc} ,当壁面磨擦速度 $u_w > u_{tc}$ 时,颗粒脱离沉积换热面。临界剪切速度的计算公式如下:

$$u_{tc}^2 = \frac{CW_A}{\rho d_p} \left(\frac{W_A}{d_p E} \right)^{1/3} \quad (16)$$

其中:

$$E = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - u_s^2}{E_s} + \frac{1 - u_p^2}{E_p} \right)^{-1} \quad (17)$$

$$u_w = \sqrt{\nu n \cdot \nabla U} \quad (18)$$

式中: C —坎宁安修正系数,取 $C = 1$; W_A —黏附常数,取 $W_A = 0.039 \text{ J/m}^2$; E —复合杨氏模量; ν —烟气运动黏度; $n \cdot \nabla U$ —烟气沿壁面外法线方向的速度梯度。

1.2.4 数据处理

传热因子 j 为:

$$j = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{1/3}} \quad (19)$$

式中: Nu —努塞尔数; Re —雷诺数; Pr —普朗特数;

阻力因子 f 为:

$$f = \frac{2\Delta p A_c}{\rho u_m^2 A_0} \quad (20)$$

式中: Δp —烟气流经翅片管束的总压降; A_c —最小流通截面积; A_0 —烟气侧的总换热面积; u_m —最小流通截面处的速度。

1.2.5 边界条件

对于连续相,进口设为速度入口,出口设为压力出口,顶部与底部设为周期性边界,左右面设对称性边界,管壁采用恒定壁温且无滑移边界条件。固体与固体以及固体和流体的接触面采用耦合边界条件^[12]。使用 SIMPLE 算法处理压力与速度的耦合关系,对流项的离散格式为二阶迎风,收敛判据能量残差为 1.0×10^{-7} ,其他各项残差为 1.0×10^{-6} 。

对于离散相,颗粒以面源方式自进口边界喷入,进、出口边界条件为逃逸,管壁面边界条件设定用户自定义函数。数值计算过程中,跟踪每个颗粒运动轨迹,直至所有颗粒运动出计算域为止。烟气中的颗粒为煤粉燃烧后的产物,可定义为惰性颗粒。

本系统存在高温段和低温段,高温段烟气入口温度为 413 K,硫酸凝结及粘性积灰风险可忽略,所以研究重点在于翅片换热管束表面的干灰沉积问题。低温段最低烟气出口温度为 363 K,并且在设备启、停车时有发生露点腐蚀的风险,选用耐硫酸露点腐蚀钢作为防腐措施。含尘烟气具体参数如表 2 所示。灰组分分析如表 3 所示。影响积灰特性的颗

粒粒径分布如图 3 所示。由图 3 可知,粒径为 1 ~ 10 μm 的颗粒在含尘烟气中占比较高。

表 2 含尘烟气参数

Tab.2 Parameters of dust gas

参 数	数 值
烟气进口速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5 ~ 10
进口烟气温度/K	413
管壁温度/K	343
翅片导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	43
颗粒粒径/ μm	1 ~ 10
颗粒密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 665
颗粒的质量流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	3.24×10^{-4}

表 3 灰组分分析

Tab.3 Mass fractions of ash

组 分	数 值/%	组 分	数 值/%
SiO_2	51.38	Na_2O	0.64
Al_2O_3	24.21	K_2O	1.56
Fe_2O_3	11.69	TiO_2	0.71
CaO	5.43	SO_3	1.77
MgO	0.75	MnO_2	0.50

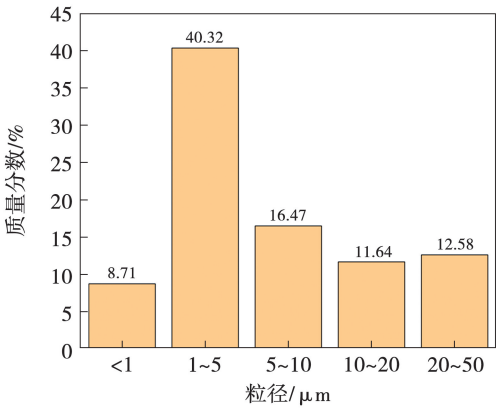


图 3 颗粒粒径分布图

Fig.3 Graph of particle size distribution

1.3 网格无关性检验

对两种管束表面计算区域网格予以 BOI 加密,远离核心区的进出口延长段网格作适当稀疏化处理。以传热因子 j 与阻力因子 f 为特征进行网格无关性验证,结果如图 4 所示。计算结果变化小于

2%时,认定网格具独立性,为确保模拟结果精确且节省计算时间,当前数值模拟采用约 200 万的网格数量。

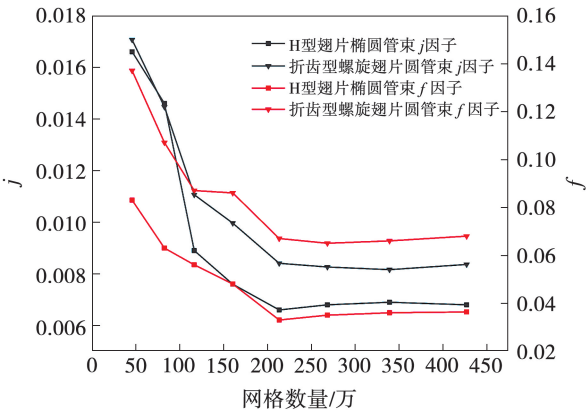


图 4 计算网格独立性验证

Fig.4 Computational grid independence verification

1.4 模型验证

由于创新设计的折齿型螺旋翅片管尚无公开实验数据可用,验证工作基于已有标准结构的 H 型翅片椭圆管束展开。将不同 Re 下 H 型翅片椭圆管束数值模拟结果与实验关联式^[13-14]预测结果对比验证,得出努塞尔数 Nu 和欧拉数 Eu 的变化曲线,如图 5 所示。可以看出, Nu 和 Eu 的最大偏差是 15.2% 和 6.97%,相对误差均在 16% 以内,数据吻合良好。在此基础上将同一套经过验证的数值方法应用于创新设计的折齿型螺旋翅片管研究,能确保后续模拟结果的可信度,故本工作的计算模型满足科学研究和工程应用的需要。

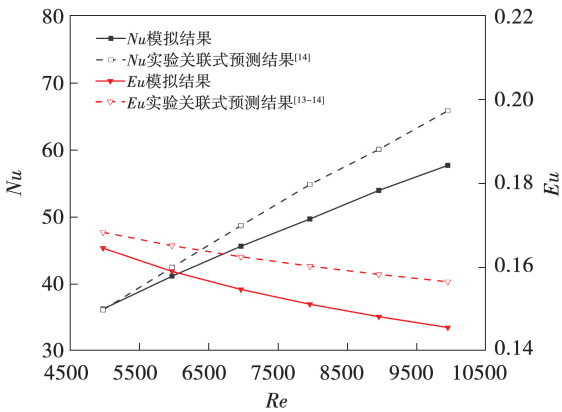


图 5 H 型翅片椭圆管束数值模拟验证

Fig.5 Verification of numerical simulation of H-shaped finned elliptic tube bundle

2 结果与讨论

2.1 烟气横掠管束流动特性

飞灰颗粒的运动受流场尾涡影响显著,翅片管周边的流动状态及流场分布是尾涡形成的关键因素。烟气流动速度 $u = 8\text{ m/s}$ 时两种翅片管束附近的速度和涡量云图如图 6 所示。

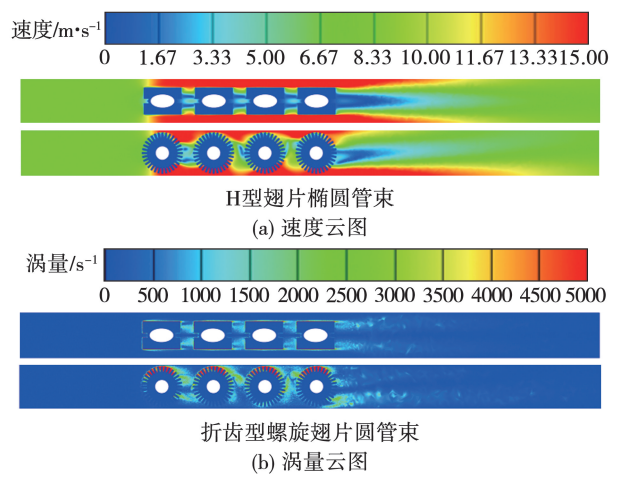


图 6 $u = 8\text{ m/s}$ 时烟气横掠管束的速度云图和涡量云图

Fig. 6 Cloud maps of flue gas velocity and vorticity across tube bundle at $u = 8\text{ m/s}$

由图 6 可以看出,流场内涡量呈规律性分布,即涡量较低的涡与翅片管的间距相对较大,且此类涡的周期性脱落特征更突出。在翅片管结构中,每根翅片管后方均衔接一条具有低涡量特性的长尾涡,当流场中的流体驱动前排管的尾涡向后排管迁移时,该尾涡将在后排管的管前出现再附着现象。由于前排管管后尾涡的强力冲刷效应,后排管前端未呈现明显的流动滞止现象。

此外,由图 6 可知,椭圆管迎风面积小,管后尾涡狭长且对主流干扰弱;折齿型螺旋翅片圆管束存在显著低速回流区,折齿翅片齿的倾倒较 H 型翅片更能持续破坏流体边界层,加剧周边流场紊乱程度,产生漩涡脱落,颗粒卷入翅片管间及管后尾涡引发沉积问题。相比之下,折齿型螺旋翅片圆管束的管间和管后易卷入飞灰颗粒,引发更严重的积

灰情况。

2.2 烟气横掠管束传热特性

图 7 为 H 型翅片椭圆管束和折齿型螺旋翅片圆管束的传热因子 j 和阻力因子 f 随雷诺数的变化曲线图。由图 7 可知, j 与 f 均随着雷诺数的增加呈下降趋势,原因是随着烟气流速的增大,入口烟气流量也在逐步增加,导致进出口温差逐渐降低,传热效果降低。折齿型螺旋翅片圆管束的 j 因子比 H 型翅片椭圆管束平均高 6.9%,表明折齿螺旋翅片圆管束的传热性能优于 H 型翅片椭圆管束。H 型翅片椭圆管束的阻力特性优于折齿型螺旋翅片圆管束,其阻力因子 f 比折齿型螺旋翅片圆管平均低 77%。

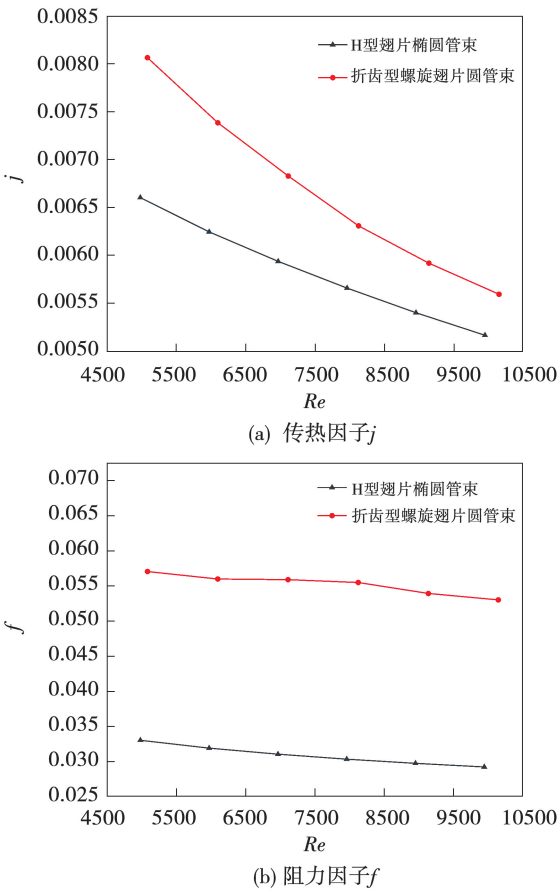


图 7 H 型翅片椭圆管束与折齿型螺旋翅片圆管束的 j 和 f 随 Re 变化曲线图

Fig. 7 Variation curves of j and f of H-shaped finned elliptical tube bundle and folded spiral fin round tube bundle with Re

2.3 烟气横掠管束积灰特性

2.3.1 烟气风速对沉积率的影响

图 8 为不同进口烟气流速及粒径条件下两种管束颗粒沉积率的变化情况。

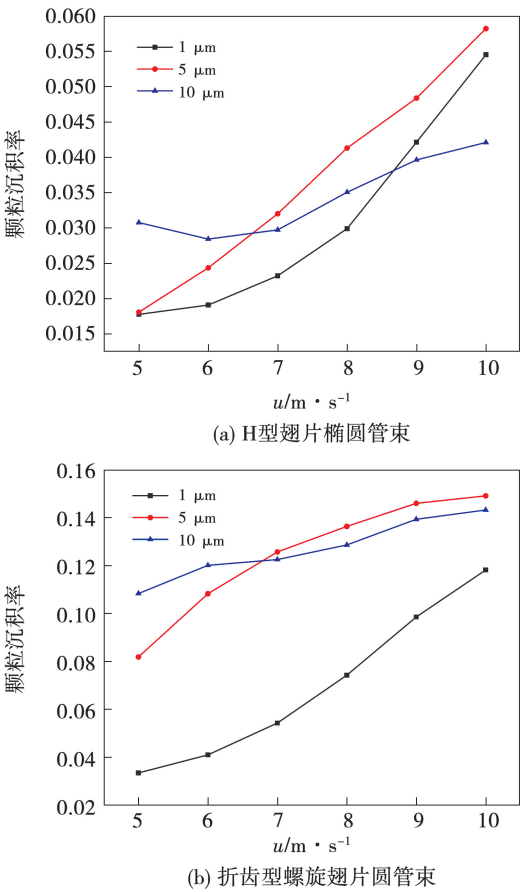


图 8 不同粒径条件下颗粒沉积率与风速的关系

Fig.8 Relations between particle deposition rate and wind speed under different particle size conditions

由图 8 可知,H 型翅片椭圆管束与折齿型螺旋翅片圆管束的颗粒沉积率均随烟气进口流速递增而上升。原因是随着烟气入口速度增大,流体的湍动能增强,颗粒与翅片管束壁面碰撞的频率增大,更易于附着沉积,颗粒沉积率因而升高。粒径为 1 和 5 μm 的颗粒在两种管束表面沉积率显著上升,这是因为在特定的流速区间内,小粒径颗粒临界捕获速度偏高,即便烟气速度有所增大,但仍未突破其临界捕获速度,导致小粒径颗粒撞击管壁后更易附着,沉积率随之上升。对于 10 μm 的颗粒,其沉积率波动相对较小,原因是颗粒粒径越大,惯性越强,受气流中低涡量、高应变速率所致阻力的干扰越小,且其临

界捕获速度相对更低,对沉积起到约束作用。

2.3.2 颗粒直径对沉积率的影响

图 9 给出了不同烟气流速下颗粒粒径 d_p 与两种管束表面颗粒沉积率的关系。由图 9 可知,随着颗粒粒径增大,沉积率呈先上升后下降趋势,H 型翅片椭圆管束和折齿型螺旋翅片圆管束分别于 7 μm 和 5 μm 处达到峰值。这是因为小粒径颗粒质量轻、惯性小,在流体中紧密追随流体运动,碰撞管壁时效率低、沉积率低;随着粒径增大,质量与惯性力递增,运动时与管壁碰撞概率及有效性增大,沉积率上升;继续增大粒径,大颗粒碰撞管壁后易回弹或偏转脱离壁面,并破坏沉积层,沉积率下降。

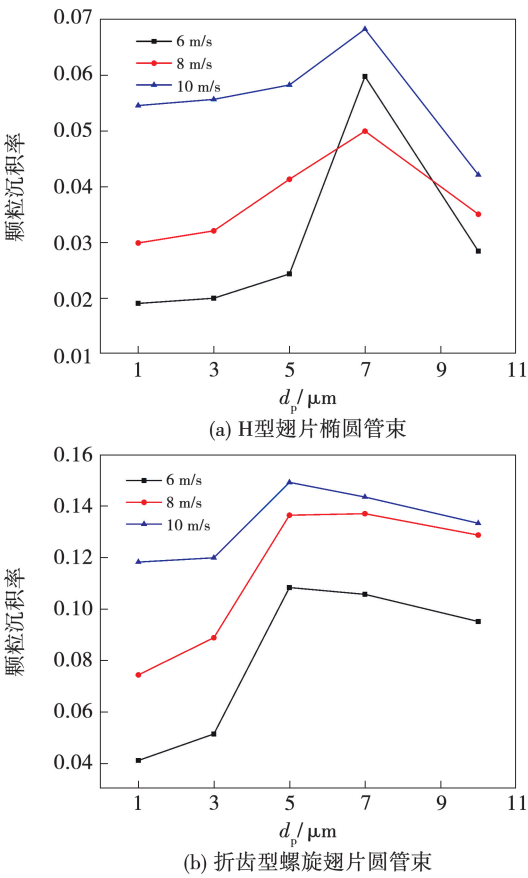


图 9 不同风速条件下颗粒沉积率与粒径的关系

Fig.9 Relations between particle deposition rate and particle size under different wind speed conditions

当含尘烟气中颗粒粒径相同时,H 型翅片椭圆管束沉积率更低。因为折齿型螺旋翅片的开齿结构强化流体扰动,产生更多尾涡,卷入更多飞灰颗粒发生沉积,而椭圆管迎风面积小,主流烟气顺流带走多

数颗粒,不与壁面发生作用,沉积现象不明显。所以折齿型螺旋翅片圆管束积灰问题更严重,这与 2.1 中所述现象结论相契合。

3 结 论

本文利用数值模拟方法,综合研究相同表面积的 H 型翅片椭圆管束与折齿型螺旋翅片圆管束对烟气横掠管束的流动传热及积灰特性的影响,得出以下结论:

(1) H 型翅片椭圆管束与折齿型螺旋翅片圆管束的传热因子 j 和阻力因子 f 随雷诺数的变化趋势相同,相比于 H 形翅片椭圆管束,折齿型螺旋翅片圆管束具有更好的传热性能。

(2) 在烟气流速 $5 \sim 10 \text{ m/s}$ 范围内,烟气横掠两种管束的颗粒沉积率随烟气流速增加而升高。

(3) 颗粒沉积率受颗粒自身惯性和流场的相互作用影响。相同烟气流速下,沉积率随粒径增大呈先上升后下降趋势,折齿型螺旋翅片圆管束粒径为 $5 \mu\text{m}$ 时沉积率最大;H 型翅片椭圆管束粒径为 $7 \mu\text{m}$ 时沉积率最大。

(4) 在相同粒径条件下,对比两种管束的颗粒沉积率,H 型翅片椭圆管束低于折齿型螺旋翅片圆管束,说明其防积灰性能良好,在防积灰换热器形式中具有较大潜力。

参考文献:

[1] 马有福,杨丽娟,吕俊复. 电站锅炉尾部烟气余热利用系统技术经济性比较[J]. 动力工程学报,2017,37(4):321-328.
MA Youfu, YANG Lijuan, LYU Junfu. Techno-economic comparison of three processes for boiler waste heat recovery[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(4): 321-328.

[2] WALMSLEY T G, WALMSLEY M R W, ATKINS M J, et al. Numerical performance comparison of different tube cross-sections for heat recovery from particle-laden exhaust gas streams[J]. Procedia Engineering, 2012, 42: 1351-1364.

[3] HAN H, HE Y L, TAO W Q, et al. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72: 210-221.

[4] 屠 珊,杨 冬,黄锦涛,等. 椭圆翅片管空冷器流动传热特性的研究[J]. 热能动力工程, 2000, 15(5): 455-458.
TU Shan, YANG Dong, HUANG Jintao, et al. A study of the heat transfer characteristics of air cooled heat exchangers consisting of

elliptical finned tubes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2000, 15(5): 455-458.

[5] 马宇翔. H 型翅片管束流动传热及磨损特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
MA Yuxiang. Study on the flow heat transfer and wear characteristics of H-type finned tube bundles[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2023.

[6] 郭修文. 锯齿翅片管束换热及流阻特性的数值研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
GUO Xiuwen. Numerical simulation of heat transfer and flow resistance characteristics of serrated fin-tube bundles[D]. Changsha: Central South University, 2022.

[7] SOBERA M P, KLEIJN C R, VAN DEN AKKER H E A, et al. Convective heat and mass transfer to a cylinder sheathed by a porous layer[J]. AIChE Journal, 2003, 49(12): 3018-3028.

[8] 王 鹏. 烟气余热回收换热器中粉尘沉积特性分析[J]. 中国粉体技术, 2014, 20(3): 16-20.
WANG Peng. Analysis on dust deposition in heat exchanger of flue gas waste heat recovery[J]. China Powder Science and Technology, 2014, 20(3): 16-20.

[9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
TAO Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004.

[10] BRACH R M, DUNN P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres[J]. Aerosol Science and Technology, 1992, 16: 51-64.

[11] EL-BATSH H, HASELBACHER H. Numerical investigation of the effect of ash particle deposition on the flow field through turbine cascades[R]. ASME Paper GT-2002-30600, 2002.

[12] 邹 建, 江建军, 李 强, 等. 椭圆翅片管的流动传热特性及积灰磨损规律研究[J]. 锅炉技术, 2024, 55(2): 7-14.
ZOU Jian, JIANG Jianjun, LI Qiang, et al. Study on heat transfer characteristics and ash wear of elliptical finned tubes[J]. Boiler Technology, 2024, 55(2): 7-14.

[13] 李 飞, 史月涛, 孙奉仲. 椭圆 H 型翅片管束阻力特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(32): 34-39, 8.
LI Fei, SHI Yuetao, SUN Fengzhong. Experimental research on resistance characteristics of H-type elliptical finned tube bundles [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(32): 34-39, 8.

[14] 李 飞, 史月涛, 孙奉仲, 等. H 型翅片椭圆管束传热及阻力特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(14): 2261-2266.
LI Fei, Shi Yuetao, SUN Fengzhong, et al. Experimental research on heat transfer and resistance characteristics of H-type finned elliptical tubes [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(14): 2261-2266.