

垃圾发电余热锅炉烟道仿真研究

徐伟, 陈斯, 姚心, 郭天宇
(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 工程实际中, 焚烧余热锅炉烟道管束常因受烟气冲刷而磨损严重, 专家往往采用在管束添加鳍片的方法来保护管束。但是, 所添加鳍片的选择多凭经验, 缺少理论上的支持和验证。本文利用流体仿真计算研究了管束加入鳍片设计对烟气流动的影响, 并根据仿真结果对鳍片的设计方案进行了优化。仿真结果表明, 在管束上添加鳍片对烟气具有导流作用, 能提升烟气在管道内的流动均匀性, 同时通过对鳍片的宽度和高度进行精细设计, 能进一步提高烟气流动均匀性, 提高烟气与管束间的换热效率。

[关键词] 垃圾发电; 烟道管束; 数值仿真; 余热锅炉; 鳍片; 仿真模型; 烟气流动

[中图分类号] TM621 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)01-0024-08

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.01.004

0 引言

在工程实际中, 焚烧余热锅炉烟道管束常因烟气的冲刷而遭受严重磨损^[1-2]。这种磨损不仅会影响烟道管束的正常使用, 还可能对整个余热锅炉的运行状态产生负面影响。为解决这一问题, 工艺研究者们发现了一种有效的保护措施——在管束上添加鳍片^[3]。

鳍片的设计和安装需要根据烟道管束的实际情况进行, 以确保其能够有效地发挥作用^[4-6]。鳍片在管道中能够导流和分配烟气, 通过合理分配烟气流, 让更多烟气达到蒸发器管束下方, 从而提高蒸发器利用效率。此外, 鳍片的设计和安装还需要考虑尺寸和安装方式。这些细节的处理可以进一步增强鳍片的保护效果, 确保余热锅炉烟道管束的正常运行和延长使用寿命。

本文以某厂垃圾余热锅炉烟道为研究对象, 针对管束加入鳍片结构后对烟气流动的影响进行研

究, 探索不同鳍片设计高度及管束数对烟气流动的影响, 根据仿真结果确定了最优的鳍片设置方案。

1 余热锅炉烟道仿真计算模型和方法

1.1 计算模型

烟道内涉及烟气湍流流动的物理过程, 在模拟中拟采用连续性方程、动量方程及湍流方程对其进行计算^[7-12]。连续性方程是质量守恒定律在流体力学中的具体表述形式, 其数学表达为偏微分方程, 用于描述守恒量传输行为。数值仿真的计算结果必须满足连续性方程, 其具体形式为:

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = 0 \quad (1)$$

动量方程是动量定理在流体力学中的具体应用, 其原理为作用在物体上的合外力的大小等于物体在力作用方向上的动量的变化率。其具体的表达形式为:

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T)] + \rho\vec{g} + F_V \quad (2)$$

湍流是不规则、多尺度、有结构的流动, 一般是三维、非定常的, 具有很强的扩散性和耗散性。湍流模型是科学家为准确描述湍流运动细节而建立的理论模型。湍流模型可根据微分方程的个数分为零方程模型、一方程模型、二方程模型和多方程模型。在工业应用中使用最为广泛的是二方程模型, 本文采用二方程模型中适用性最好的标准 $k-\epsilon$ 模型, 其数学表达形式为:

[收稿日期] 2023-11-26

[第一作者] 徐伟(1981—), 男, 浙江温州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事矿山、冶金与节能环保领域数智化、绿色化方面的研究。

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFB3304901); 中国科协(2022QNRC001)。

[引用格式] 徐伟, 陈斯, 姚心, 等. 垃圾发电余热锅炉烟道仿真研究[J]. 有色设备, 2024, 38(1): 24-31.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j}}_{c_{ij}} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\underbrace{\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right)}_{D_{L,ij}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(\rho w u_j)}{\partial x_j}}_{c_{ij}} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\underbrace{\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_w} \right)}_{D_{L,ij}} \frac{\partial w}{\partial x_j} \right] + G_w - Y_w + S_w \quad (3)$$

1.2 建模方法

1.2.1 建模与网格划分

辐射室及烟道整体设计如图 1 所示。为分散进入的烟气,在辐射室内设置三道管屏,蒸发器管束和过热器管束在第一排列管上部两侧增加鳍片。

以蒸发器管束示意图为例,展示增加鳍片前后结构差异,如图 2 所示。

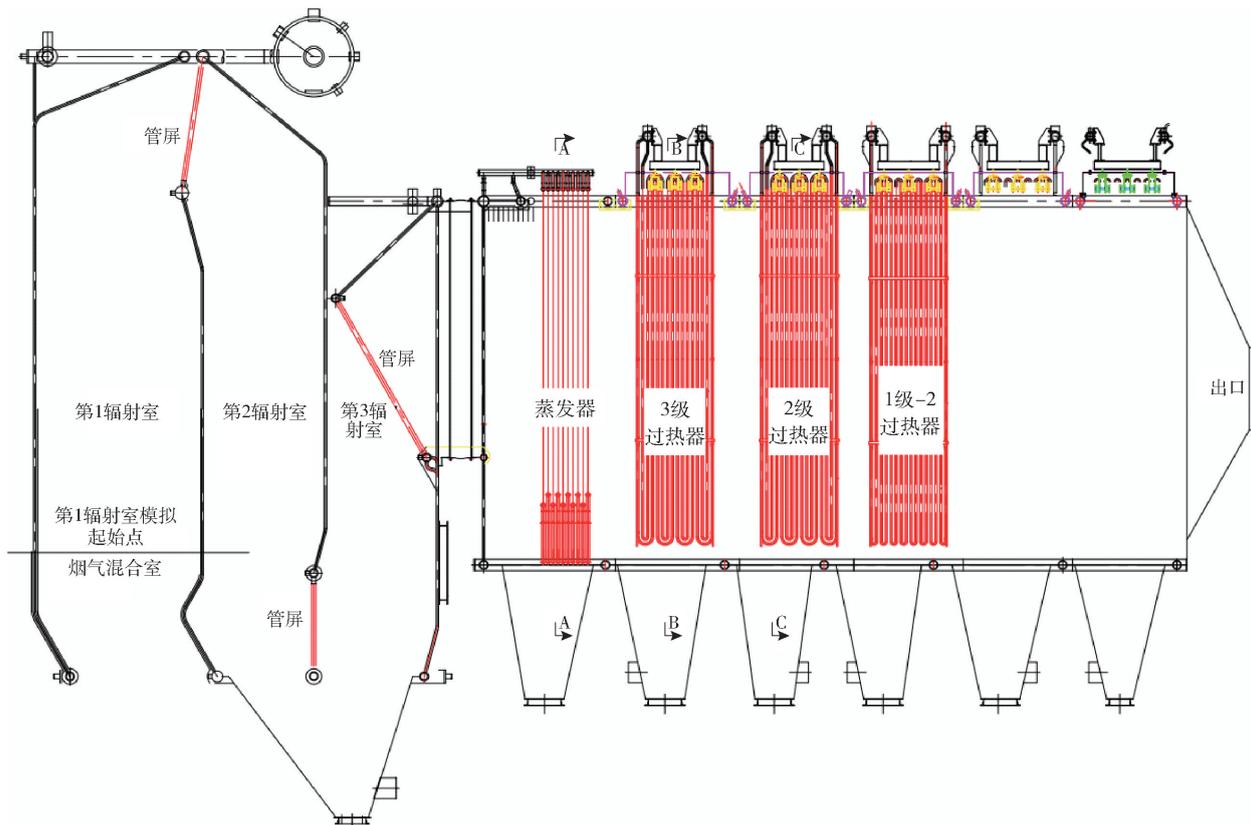
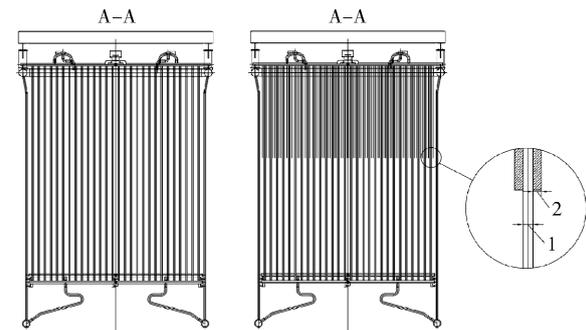


图 1 模型整体设计图



1. 管束; 2. 单侧鳍片 (仅第一排管束增加鳍片, 每根管增加两侧鳍片)

图 2 蒸发器管束增加鳍片前后结构对比图

入口及出口,模型按照图纸 1:1 建模,为便于网格划分,将圆管简化为方管,方管边长等于圆管直径。

根据模型结构特点,在规则区域划分六面体网格,少部分不规则区域使用四面体网格。由于模型较为复杂,为便于划分网格,将模型进行适当的分区,整体分区及网格示意如图 4 所示。

网格质量参数见表 1,网格扭曲度小于 0.889,平均正交质量为 0.924,最大长宽比为 11.185,网格质量较好,符合仿真计算的一般要求。

1.2.2 基本假设与边界条件

鉴于烟道管束的复杂性,对该模型进行以下假设:

1) 烟气混合物为理想气体,其密度为各组分加

网格模型示意如图 3 所示,图中高亮两面分别为

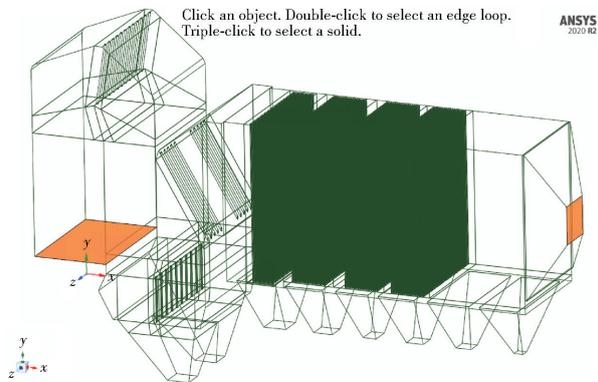


图 3 网格模型示意图

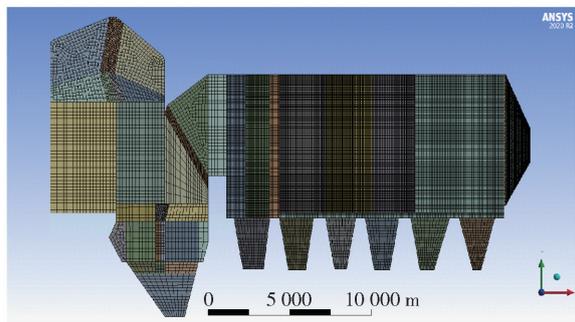


图 4 总体网格分布图

表 1 网格质量参数表

参数	值
网格数量	3 179 134
扭曲度	<0. 889
平均正交质量	0. 924
最大长宽比	11. 185

权平均值,黏度在流动过程中改变很小;

- 2) 不考虑烟气与各装置的热交换;
- 3) 为便于网格划分,将管束圆管改为方管;
- 4) 对微小的模型细节进行了简化。

建立模型时,设定模型的边界条件为均匀速度入口,速度方向垂直于入口截面;出口则被设置为压力出口,出口压力为 -200 Pa。在固体壁面的边界条件上采用绝热壁面。工艺条件按照 100% MCR 工况进行设定,入口烟气的流量为 105 370 Nm³/h,温度为 1 050 ℃。入口烟气的成分数据表如表 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 原始设计余热锅炉烟道流场仿真结果

2.1.1 总体流动仿真结果

本节展示了原始设计下余热锅炉烟道内气体流

表 2 入口烟气成分表

烟气成分/%	100% MCR 工况
CO ₂	9. 354
SO ₂	0. 018
N ₂	66. 541
H ₂ O	17. 050
HCl	0. 070
O ₂	6. 967

动情况的模拟结果,为便于观察研究,取四分之一宽度截面,四分之一宽度截面速度云图及矢量图分别如图 5、图 6 所示。图中各点的颜色分别代表该点处的速度大小,速度标尺见图面左侧。图 6 中箭头代表该点处的速度方向。根据速度图观察辐射室内的流动趋势,气体首先由左侧下方进入辐射室,在到达转角处时靠近内侧处的速度明显增大,随后内外侧气体汇聚并沿着右侧壁面流动,到达下一个拐角时,气体穿过管束后沿右侧壁面继续流动,最后辐射室内的烟气集中注入后续烟道上方。烟道内的流动趋势,在第一管束和第二管束处,烟气主要位于烟道上方,随后烟气开始在烟道内扩散,最后充满整个烟道。

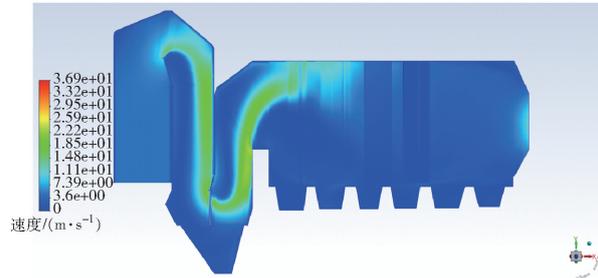


图 5 原始设计方案速度云图(1/4 宽度截面)

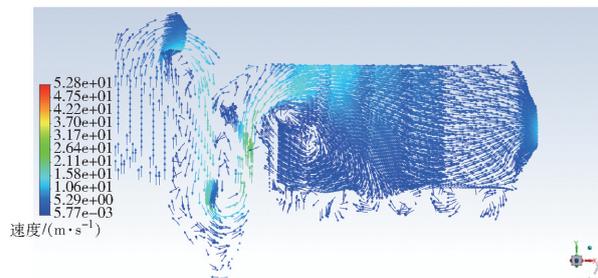


图 6 原始设计方案速度矢量图(1/4 宽度截面)

2.1.2 流动方向截面仿真结果

为观察烟道内管束及鳍片对流动的影响,取各管束前截面速度及矢量图,分别如图 7、图 8 所示。观察蒸发器管束前速度分布,发现烟气主要集中于

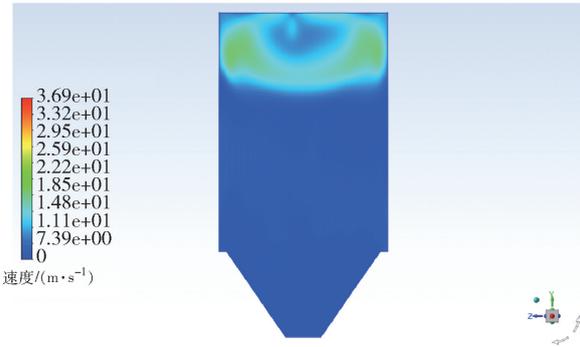


图7 原始设计方案蒸发器管束前速度图

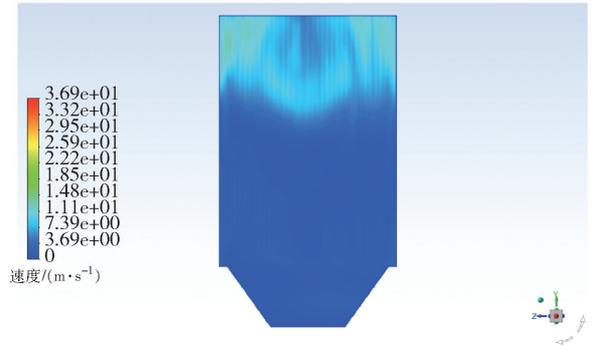


图9 原始设计方案3级过热器管束前速度图

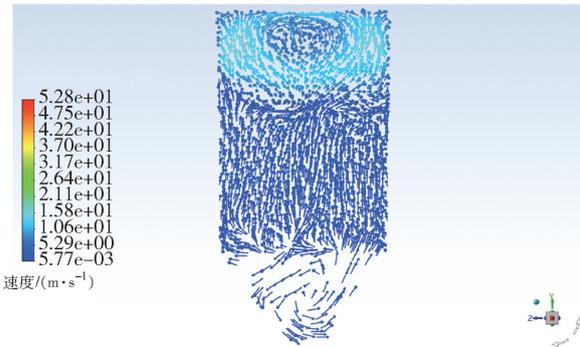


图8 原始设计方案蒸发器管束前速度矢量图



图10 原始设计方案3级过热器管束前速度矢量图

烟道上方,且左右两侧烟气组分较多。

分析3级过热器管束前的速度分布,发现烟气分布范围开始扩大,但仍集中于烟道上方。

继续分析2级过热器管束前速度分布和1级过热器管束前速度分布,可发现烟气随着流动的进行扩散范围不断增大,且有下落的趋势。

2.2 增加鳍片设计的余热锅炉烟道流场仿真结果

2.2.1 总体流动情况结果

本节对导流鳍片方案进行设计,设计方案分三种:方案一在蒸发器管束第一排加入高4 m的鳍片,

蒸发器单侧鳍片宽度为30 mm;方案二在蒸发器管束第一排加入高4 m的鳍片,蒸发器单侧鳍片宽度为30 mm,第三过热器管束第一排加入高1 m鳍片,单侧鳍片宽度为15 mm;方案三在蒸发器管束第一排加入高3 m的鳍片,第三过热器管束第一排加入高1 m鳍片。通过仿真技术对各设计方案下烟道内气体流动情况进行模拟,所有方案的流动方向截面速度标准差对比,如表3所示。通过数据对比可知,优化方案二的总体速度标准差最小,该设计下的气体流动均匀性最佳。

表3 所有方案流动方向截面速度标准差模拟结果统计表

方案	第一管束前 速度标准差	第二管束前 速度标准差	第三管束前 速度标准差	第四管束前 速度标准差	出口前 速度标准差
原始设计方案	4.399	3.574	1.892	1.360	1.134
优化方案一	3.896	2.522	1.829	1.207	1.070
优化方案二	3.849	2.341	1.318	0.884	0.986
优化方案三	4.06	2.414	1.280	0.936	1.055

下面以优化方案二的仿真结果为例具体分析。为便于观察研究,取四分之一宽度截面,四分之一宽度截面速度及矢量图分别如图11、图

12所示。图中各点的颜色分别代表该点处的速度大小,速度标尺见图面左侧。图中箭头代表该点处的速度方向。辐射室内结构并无改变,该方

案在辐射室内的气体流动趋势与原始设计方案相同。观察烟道内气体流动趋势,烟气在到达蒸发器管束后有明显的向四周扩散的趋势,部分气体开始流入蒸发器管束的下方,对比原始设计方案,气体在通过蒸发器管束后流动均匀性有较大提升,当气体到达 3 级过热器管束后,部分气体逐渐向下扩散直至充满整个烟道,烟道内气体流动均匀性进一步提升。各优化方案与原始设计方案的定量结果对比见表 3,可以看到加入鳍片优化后,烟道内的流动速度标准差有较大幅度的降低。

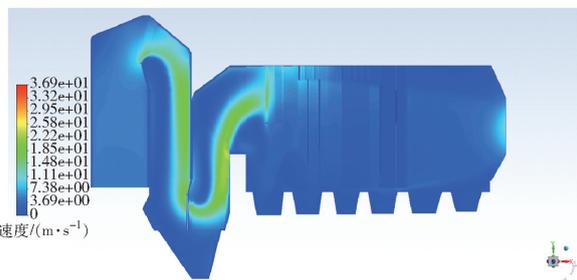


图 11 优化方案二截面速度图(1/4 宽度截面)

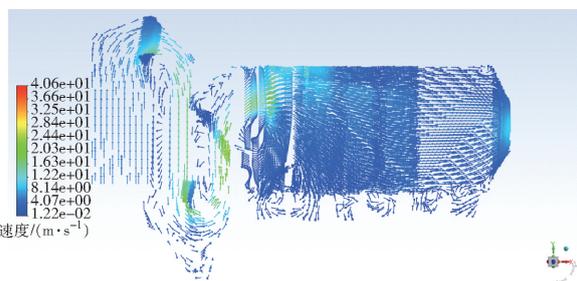


图 12 优化方案二截面速度矢量图(1/4 宽度截面)

2.2.2 流动方向截面仿真结果

为观察烟道内管束及鳍片对流动的影响,取各管束前截面速度及矢量图分别如图 13、图 14 所示。观察蒸发器管束前速度分布,发现烟气集中于烟道上方,烟道两侧具有两片烟气较为集中的区域,加入 4 m 鳍片后烟气扩散范围增大。

观察 3 级过热器管束前速度分布(图 15、图 16),发现烟气分布范围开始扩大,烟道中部已有部分气体到达烟道下方。

分析 2 级过热器管束前速度分布,发现烟气分布范围进一步扩大,烟气已充满料仓以上的烟道。分析 1 级过热器管束前速度分布,烟道内烟气均匀性进一步提升。

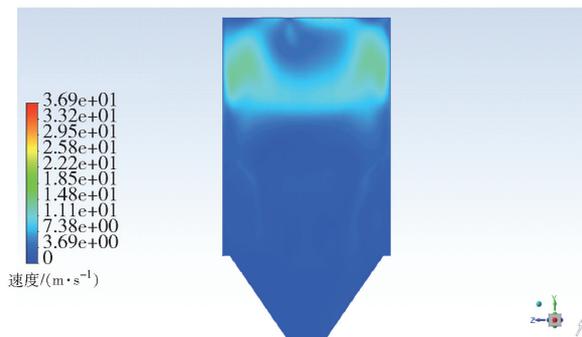


图 13 优化方案二蒸发器管束前速度图

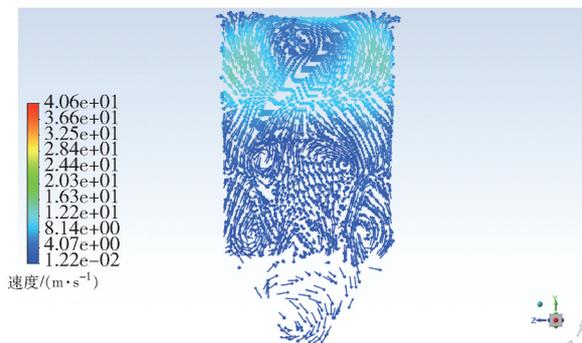


图 14 优化方案二蒸发器管束前速度矢量图

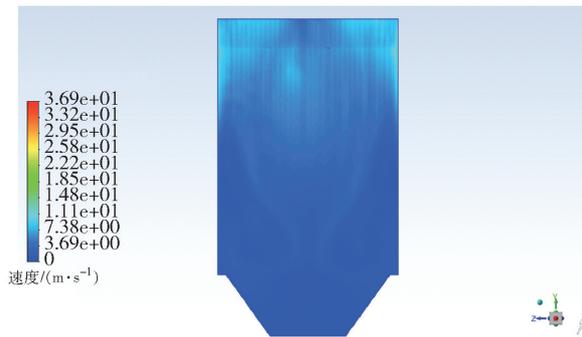


图 15 优化方案二 3 级过热器管束前速度图

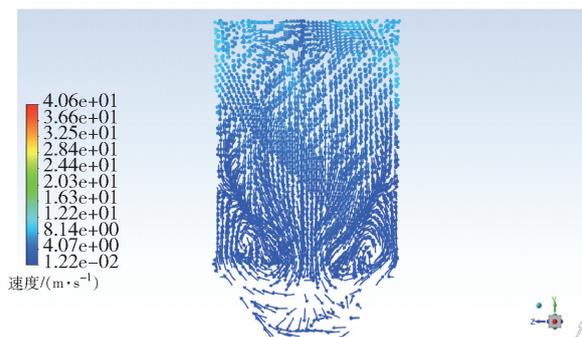


图 16 优化方案二 3 级过热器管束前速度矢量图

通过与原始设计方案结果进行对比,发现在蒸发器管束第一排加入高 4 m 的鳍片,第三过热器管

束第一排加入高 1 m 鳍片的方案下,气体流动均匀性最佳。鳍片对气体的导热效果明显,鳍片宽度应适中,以合理分配过鳍片的烟气量和从鳍片下方流过的烟气量,同时保证两股烟气间的速度相差不会过大,让烟道内整体流动均匀性最佳。鳍片高度由 3 m 提升到 4 m 后,烟道内流动均匀性有一定提升,有更多的烟气可以到达蒸发器管束下方,提高了蒸发器利用效率。

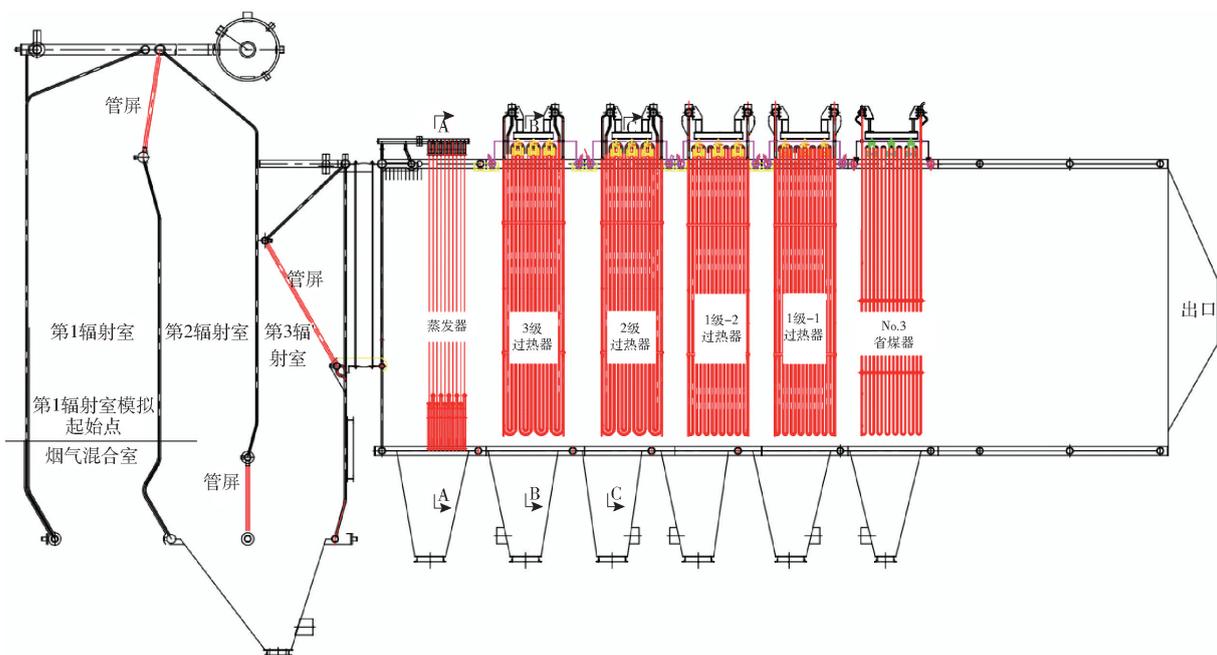


图 17 延长管道设计图

表 4 延长管道设计流动方向截面速度标准差模拟结果统计表

方案	第一管束前 速度标准差	第二管束前 速度标准差	第三管束前 速度标准差	第四管束前 速度标准差	出口前 速度标准差
优化方案二	3.849	2.341	1.318	0.884	0.986
延长管道设计	3.854	2.341	1.466	0.909	0.839

2.3.1 总体流动情况结果

分析延长管道设计的仿真结果,其四分之一宽度截面速度及矢量图分别如图 18、图 19 所示。图中各点的颜色分别代表该点处的速度大小,速度标尺见图面左侧。图中箭头代表该点处的速度方向。观察烟道内的流动趋势,烟气在通过蒸发器管束后流动均匀,鳍片后方区域与靠近鳍片下沿区域内的速度差较小,烟道内烟气的整体流动均匀性较好。延长管道设计烟道内气体的整体流动均匀性依然良好。

2.3.2 流动方向截面仿真结果

为观察烟道内管束及鳍片对流动的影响,取各

2.3 延长管道设计的余热锅炉烟道流场仿真结果

在确认优化方案二的气体流动均匀性为最佳后,为验证其实际应用的流动效果,以某厂烟道设计为依据,延长模型管道长度,并增加后续两管束,测试优化方案二的鳍片设计是否依然有效。延长管道设计图纸如图 17 所示,定量分析结果如表 4 所示。定量结果表明,延长管道并加入后续管束后,烟道内流动均匀性并未发生较大变化,鳍片导热效果依然良好。

管束前截面速度及矢量图。观察蒸发器管束前速度分布(图 20、图 21),发现烟气集中于烟道上方,烟道两侧具有两片烟气较为集中的区域,鳍片高度提升后烟气扩散范围增大。

观察 3 级过热器管束前速度分布(图 22、图 23),发现烟气分布范围开始扩大,烟道中部已有部分气体到达烟道下方。

观察 2 级过热器管束前速度分布,发现烟气分布范围进一步扩大,烟气已充满料仓以上的烟道。观察 1 级过热器管束前速度分布,烟道内烟气流动均匀。

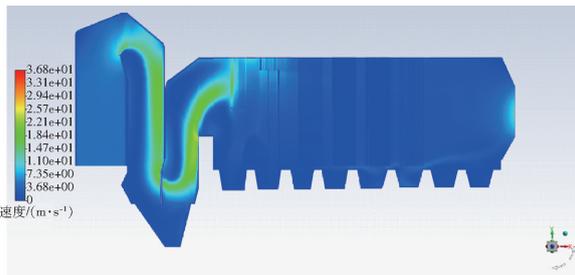


图 18 延长管道设计方案速度云图(1/4 宽度截面)

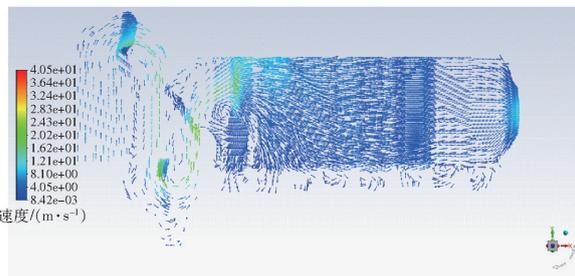


图 19 延长管道设计方案速度矢量图(1/4 宽度截面)

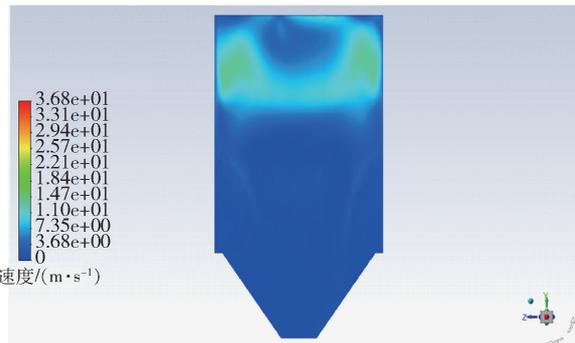


图 20 延长管道设计方案蒸发器管束前速度图

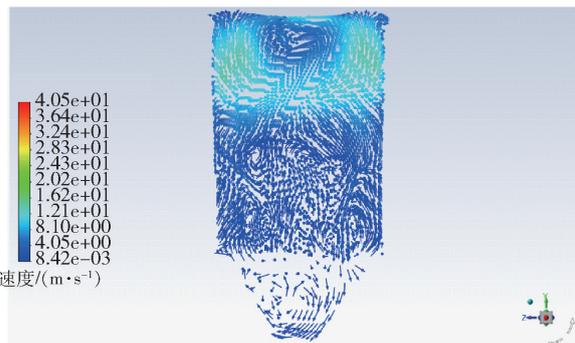


图 21 延长管道设计方案蒸发器管束前速度矢量图

与上节优化方案二相比,延长管道设计的各流动截面结果变化很小。延长管道及增加管束并不会对鳍片的导流效果产生影响。

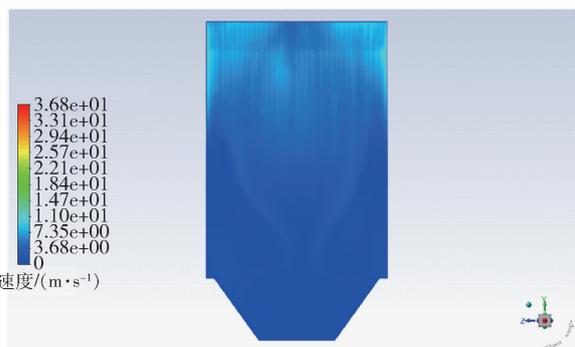


图 22 延长管道设计方案 3 级过热器管束前速度图

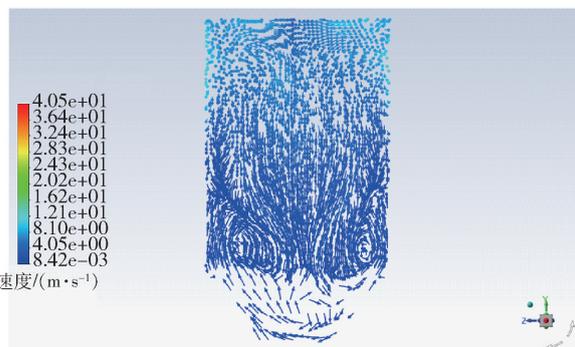


图 23 延长管道设计方案 3 级过热器管束前速度矢量图

3 结论

本文以某厂垃圾焚烧余热锅炉烟道为研究对象,应用 Fluent 软件建立垃圾发电烟道模型,通过数值模拟分析不同鳍片设计方案下的烟气流动趋势。通过建模及仿真计算,在充分考虑内部结构(管束和鳍片)、换热结构、出口结构等对烟气流动的影响后,获得了换热结构不同设计方案下余热锅炉烟气在烟道的流场分布。本文最终得到如下结论。

- 1) 鳍片对烟气具有导流效果,建议鳍片宽度应适中,以便合理分配通过鳍片的烟气量和从鳍片下方流过的剩余烟气,同时保证两股烟气间的速度相差不会过大。
- 2) 鳍片高度可以适当增加,有利于更多烟气到达蒸发器管束下方,提高蒸发器利用效率。
- 3) 在本文仿真的所有鳍片设计方案中,优化方案二的烟道流场均匀性最佳,其鳍片设置为在蒸发器管束第一排加入高 4 m 的鳍片,第三过热器管束第一排加入高 1 m 鳍片。
- 4) 在验证算例中对管道进行延长,并增加后续

两管束,发现鳍片导热效果依然良好。

[参考文献]

- [1] 李科宏,王佳,何庆中,等. 余热锅炉沉降室内烟道磨损特性研究[J]. 科学技术与工程,2022,22(12):4812 - 4819.
- [2] 陈逢胜,陈芹. 中国恩菲有色冶炼余热锅炉[J]. 有色设备,2021,35(4):12 - 14 + 32.
- [3] 吴楠,李静,申屠南凯,等. 基于细分 PI 控制的热连轧卷取机自动踏步控制仿真和优化[J]. 冶金自动化,2023,47(4):70 - 78.
- [4] 李振宇,刘畅. 联合循环余热锅炉螺旋鳍片管烟气放热系数研究[J]. 锅炉制造,2003(3):1 - 2.
- [5] 雷承勇,刘家斌,陈志华. 螺旋鳍片管在烟气余热回收换热器中的应用[J]. 锅炉技术,2021,52(3):31 - 35.
- [6] 重庆科技学院. 鳍片横向矩阵排列的余热锅炉炉排: CN201020511931.5[P]. 2011 - 04 - 13.
- [7] 郭天宇,张瑛华,姚心,等. CFD 在垃圾焚烧炉膛设计上的应用[J]. 有色设备,2019,33(2):42 - 48.
- [8] 姚心,杨培培. 回转窑内传热及燃烧过程模拟和工艺优化研究[J]. 有色设备,2019,33(2):10 - 15.
- [9] 任鹏,邢志楠,叶树枫,等. 铜闪速吹炼炉烟道内气粒两相流动过程的数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分),2022(7):1 - 7.
- [10] 李玉焯,王文波. 生活垃圾焚烧发电项目的节能与碳减排分析[J]. 有色冶金节能,2014,30(3):37 - 41.
- [11] 刘雄文,张岭,汤凯乐,等. 硫铁矿制酸余热锅炉仿真模拟研究[J]. 世界有色金属,2023(12):156 - 158.
- [12] 莫文水. 金氰化浸出过程混合建模及仿真算法分析研究[J]. 湿法冶金,2023,42(4):429 - 435.

Simulation calculation research on flue of waste heat boiler for garbage power generation

XU Wei, CHEN Si, YAO Xin, GUO Tianyu

Abstract: In practical engineering, the flue tube group within the waste heat boilers is frequently worn by scouring of the flue gas. To deal with this situation, the experts usually using several adding fins to protect the tube group, which could reduce the scouring of flue gas. However, the design of the adding fins, including the number and the position is mostly based on experience, which lacks of theoretical support and verification. In this article, the influence of adding fins on the flow field of the flue gas is studied by CFD simulation. Furthermore the optimizes design of the fins is achieved by analysing simulation results. The simulation results show that the addition of fins to the tube group has a diversion effect on the flue gas, which can improve the flow uniformity of the flue gas in the pipeline, and at the same time, the fine design of the width and height of the fins can further improve the flue gas flow uniformity and improve the heat exchange efficiency between the flue gas and the tube group.

Key words: waste-to-energy; flue gas duct bank; numerical simulation; waste heat boiler; fin; simulation model; flue gas flow

