doi:10.3969/j.issn.1009-3230.2018.08.008

# 蜂窝外表面换热管积灰特性模拟及性能分析

黄 中<sup>1,2</sup>,刘冠杰<sup>1</sup>,郭 浩<sup>3</sup>,陈 林<sup>3</sup>,车得福<sup>2</sup>

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司,北京 102209;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;

3. 华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室,北京 102206)

摘 要:减少锅炉尾部烟道受热面积灰会有助于提高火力发电的能效。文中针对一种具有 蜂窝外表面的新型换热管进行了流动和积灰的数值模拟,运用所搭建实验台测量了换热管的表 面平均积灰量。实验结果与数值模拟结果的规律一致。研究结果表明,蜂窝结构在特定条件下 有助于增加流场扰动减少积灰。

关键词:蜂窝结构;换热管;数值模拟;积灰特性;性能分析 中图分类号:TK229.4 文献标志码:B 文章编号:1009-3230(2018)08-0034-06

## Ash Deposition Simulation and Performance Analysis of Heat Exchanger Tubes with Honeycomb Structure

HUANG Zhong<sup>1,2</sup>, LIU Guan - jie<sup>1</sup>, GUO Hao<sup>3</sup>, CHEN Lin<sup>3</sup>, CHE De - fu<sup>2</sup>

 China Huaneng Group Clean Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;
 State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China;
 MOE's Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Reducing ash deposition on heat exchanger surface helps to improve the energy efficiency of coal – fired electric power generation. In this paper, numerical simulation of ash deposition on a new type of heat exchanger tube with honeycomb structure on surface (honeycomb tube) was carried out. Also, ash deposition on honeycomb tube was investigated experimentally. The numerical and experimental results are consistent with each other. It is found that the honeycomb can help to reduce air deposition by enhancing disturbance of the flow field under certain conditions.

Key words: Honeycomb structure; Heat exchanger tube; Numerical simulations; Ash deposition characteristics; Performance analysis

0 引 言

我国电力生产以燃煤火力发电为主,当电站 锅炉所使用燃煤品味较低时,容易造成锅炉受热 面积灰、磨损、结渣、腐蚀等一系列问题<sup>[1]</sup>。积灰 和结渣会显著增加受热面的热阻、降低换热器的 传热性能<sup>[2-4]</sup>,当局部区域的积灰量较大时,甚至 会发生连片搭桥,造成烟道堵塞。

为了提高电站热力系统的能量利用效 率<sup>[5-6]</sup>,必须采取有效措施降低受热面的传热损 失。定期吹灰可以减少受热面的积灰,但吹灰的 高速气流会携带颗粒冲刷管壁,造成金属管壁的

收稿日期: 2018-03-28 修订日期: 2018-07-11

基金项目: 华能清能院科技课题"带有蜂窝外管壁的电站 锅炉新型换热管研究开发"(TC - 15 - CERI01), 中央 高校基本科研业务费专项资金项目 (2016YQ03)

作者简介:黄 中,男,博士研究生,研究方向为清洁煤发电 及系统优化。

磨损<sup>[7-8]</sup>。为了减轻积灰对换热性能的影响,同 时减少吹灰等措施对换热器件的损伤,科研人员 尝试通过改变换热管件的结构来提高管件抵抗积 灰的能力。翟强等<sup>[9]</sup>采用三维内外肋管作为空 预器管件,在增强烟气余热回收的同时改善了空 预器堵灰的问题。史月涛等<sup>[10]</sup>研究了螺旋翅片 管表面积灰的特性,发现螺旋翅片的导流作用可 以在迎风面的滞点处产生轴向速度,从而减轻换 热管件表面的积灰。

黄中等<sup>[11]</sup>在总结文献研究和工程实践经验 的基础上提出一种具有蜂窝外表面结构的新型 换热管(以下简称"蜂窝管")。文中以蜂窝管为 研究对象,采用数值计算的方法<sup>[12-13]</sup>开展了蜂 窝管表面流动和积灰特性的模拟,并利用所搭建 的实验台<sup>[14]</sup>对积灰模拟进行了验证,综合分析 了蜂窝管表面积灰的特性。文中的研究结果有 助于增强对蜂窝结构与换热管表面积灰量之间 关联的科学认识,为工程应用和实践提供必要的 参考和依据。

1 换热管表面流动的数值模拟

1.1 换热管的几何参数

以空预器的换热管为研究对象,进行二维的 流动模拟,分别计算光管和蜂窝管外的流场,为后 续表面积灰模拟做准备。换热管外径 57 mm,表 征蜂窝管几何特征的参数还包括蜂窝宽度、深度、 相邻蜂窝对应的圆心角等,如图 1 所示。光管及 多种规格蜂窝管的算例编号及相应的几何参数列 于表 1。



图1 换热管截面几何特征示意图

#### 表1 数值计算的算例编号及相应的换热管几何参数

算例编号 *	蜂窝宽度 l <sub>w</sub> /mm	蜂窝深 l <sub>d</sub> /mm	相邻蜂窝对应的 圆心角 θ /°
G(光管)	1	1	1
h - 5 - 1 - 30	5		30
h - 5 - 1 - 60		1	60
h - 5 - 1 - 90			90
h - 5 - 1 - 120			120
h - 8 - 1 - 30	- 8		30
h - 8 - 1 - 60		1	60
h - 5 - 1 - 90			90
h - 5 - 1 - 120			120

\*编号规则:光管(G)/蜂窝管(h)一蜂窝宽一蜂窝深一相邻蜂窝 对应的圆心角。

#### 1.2 计算区域及边界条件

参照某循环流化床锅炉所采用的管式空气预 热器,选取如图 2 所示的周期性计算区域,沿烟气 流动方向选取 6 排管,管排横向节距  $S_1 =$ 100 mm,纵向节距  $S_2 = 90$  mm。

计算流场时,进、出口边界分别设定为均匀速 度进口和自由出流的边界条件,换热管设定设定 为壁面,其他表面设定为对称面。密度采用不可 压缩的理想气体模型进行处理,采用 RNG k - ε 模型和 two layer zonal 壁面函数处理湍流流动。



#### 图 2 流场的计算区域

### 1.3 网格划分及独立性验证

采用结构化网格对计算域进行离散,光管及 蜂窝管计算区域的网格如图 3-4 所示。相比于 光管,蜂窝管的壁面存在下凹的蜂窝结构,需要对 此区域的网格进行细化,从而较好地预测出蜂窝



#### 图 3 光管网格划分

为了降低网格数量对于模拟结果的影响,对 网格数量进行独立性测试。图5比较了不同网格 数量下,光管计算域内 Line -1 和 Line -6(参见 图2(b))两条水平线上 y 方向速度矢量的分布情 况。根据比较结果,选择采用 18 万的网格对计算 域进行离散。此外,18 万的网格对应的 y<sup>+</sup>值小 于5,可以较好的捕捉到紧邻壁面区域的流动特 征,从而更好的预测蜂窝结构对于边界层的影响。 同理,通过对蜂窝管计算域的网格数量进行独立 性测试,确定网格数量为40 万。









2 换热管表面积灰的数值模拟

#### 2.1 模拟方法

通过以上计算可以获得光管、蜂窝管表面的 流场分布,而流场是影响换热管表面颗粒积灰的 关键因素。烟气中颗粒体积浓度一般低于10%, 可以采用离散相(DPM)模型处理颗粒运动。此 外,烟气中的颗粒运动对于流场的影响较小,可以 忽略。因此,采用单向耦合方式计算颗粒在流场 中的运动轨迹。

文中分三个阶段模拟积灰过程:首先,假设碰 撞到壁面上的颗粒全部粘结到壁面上,分析粒径 对积灰的影响,此种情况对应着 DPM 模型中的 trap 边界条件;随后,假设碰撞到壁面上的颗粒按 照一定的恢复系数由壁面反弹回流场中,从而继续运动,此种情况对应着 DPM 模型中的 reflect 边 界条件;最后,按照 Rogers and Reed 的弹性 - 塑 性碰撞理论判断颗粒是否粘结到壁面或者由壁面 反弹以及反弹时的恢复系数,计算得到管壁不同 位置处的沾污率(Fouling Rate),量化不同结构蜂 窝管对于积灰的改善效果。

## 2.2 DPM 模型设置及粒子独立性验证

2.2.1 模型设置

数值计算的模型设置要点如下:

(1)考虑热泳力、Saffman 浮升力、布朗运动 和湍流脉动对颗粒运动的影响。

(2) 阻力定律设定为 spherical。

(3)颗粒由速度进口处注入计算域,初始颗粒位置在进口处呈随机分布状态且颗粒初始速度与进口速度相同。

(4)当颗粒运动至壁面附近区域时,时间步 长设定为 1e<sup>-5</sup>s,以便更好的追踪颗粒的沉积 过程。

2.2.2 颗粒粒径的设定

采用 trap 边界条件,分析颗粒粒径对积灰结 果的影响。图 6 所示是 0.1、1、10 和 100 μm 四种 粒径的计算结果。当粒径较小时,几乎没有颗粒 沉积;随着颗粒尺寸增大,开始出现沉积现象;当 粒径达到 100 μm 时,出现大量的颗粒沉积。下文 中,主要针对 5 ~ 10 μm 的颗粒进行模拟计算 分析。



#### 图6 四种不同粒径的颗粒运动轨迹

#### 2.2.3 注入颗粒数量的独立性验证

由于注入颗粒的数量对于模拟结果会产生一 定的影响,因此进行粒子注入数量的独立性验证。 以 10 μm 的颗粒为例,在顺排光管的情况下分别 注入 500、1 000 和 2 000 个粒子,采用 trap 边界条 件,结果统计在表 3 中。当注入粒子数量达到 1 000时,粒子数量对于颗粒运动结果的影响较 小,因此模拟中粒子注入数量设定为1 000。

 注入总数	沉积数(trap)	比例 (%)		
500	234	46.8		
1 000	470	47		
2000	940	47		

#### 表 3 粒子注入数量对模拟结果的影响

#### 2.3 二维的积灰模拟计算

计算区域、边界条件以及网格划分与流场计 算相同。在所获得的流场计算结果的基础上,在 计算域入口处分别注入1000个5μm和10μm 的颗粒,统计从出口处逃逸出去的颗粒数量,获得 积灰的模拟结果。为减少随机误差,每个算例中 重复5次积灰的计算,取平均值作为积灰的结果。 表4是以光管为例,列出了5次积灰模拟计算的 结果,并以平均值作为最终的积灰模拟结果。

表 4 积灰模拟中,光管的积灰结果(注入粒径 5 µm 的颗粒)

	注入颗粒数	逃逸颗粒数	积灰颗粒数	积灰率(%)
第1次	1000	764	236	23.6
第2次	1000	788	212	21.2
第3次	1000	785	215	21.5
第4次	1000	784	216	21.6
第5次	1000	790	210	21
平均	1000	782	218	21.8

按照上述步骤可以得到不同蜂窝管表面积灰 结果,图7给出了5 µm 和10 µm 两种粒径条件 下,积灰量随蜂窝深度、蜂窝密度(相邻蜂窝之间 夹角越大,同一圆周上蜂窝数量越少,即蜂窝密度 越小,反之亦然)的变化规律。可以看到,蜂窝管 对10 µm 颗粒的积灰率要高于5 µm 颗粒的积灰 率;对于同一粒径的颗粒,蜂窝宽度8 mm 的蜂窝 管比蜂窝宽度5 mm 的蜂窝更容易积灰,即蜂窝 尺寸大更可能引起积灰。在颗粒粒径和蜂窝宽度 给定的条件下,随着蜂窝分布密度的降低(即沿 圆周分布的蜂窝数量减少),积灰率越低。

图 7 中同时给出了光管的积灰结果,作为对 比的基准。从结果对比来看,蜂窝管的积灰情况 在一定条件下要优于光管。从模拟结果可以做这 样的推测:蜂窝通过增强换热管表面流场的扰动 减少换热管表面的积灰,因此带有一定数量蜂窝 结构的换热管的积灰量少于相同条件下光管的积 灰量;如果蜂窝数量过多,尽管蜂窝可以起到扰动 流场的作用,但蜂窝本身的凹陷结构容易成为积 灰的场所,因此蜂窝管的积灰量多于光管的积灰 量。在实际运行中,灰分颗粒大小不一,同时速度 分布也更加随机多变,因此模拟结果与实际运行 中的积灰情况可能有差别,需要通过实验来验证 和判断。



## 图 7 两种粒径条件下,积灰比例随蜂窝几何特征(蜂窝深度、 相邻蜂窝夹角)的变化规律

3 换热管表面积灰的实验研究

## 3.1 积灰实验台

换热管表面积灰实验台的系统组成如图8所 示,实验台主要由罗茨风机、螺旋给料机、实验段 和除尘器等部分组成,实验系统由程序集中控制, 可以记录流量、压力等运行数据。测量换热管表 面积灰的实验中,空气由罗茨风机加压后鼓入风 道,粉尘物料与空气混合后自上而下地流过实验 管件,与锅炉尾部管式空气预热器的流场相类似。

实验管件在实验段中顺排布置,垂直方向 (V1~V6)放置同一型号的6根实验管,水平方向 (H1~H3)放置3种实验管。横向间距 $S_1$  = 100 mm,纵向间距 $S_2$  = 90 mm。实验中采用某燃 用准东煤的锅炉飞灰作为螺旋给料机的粉料,飞 灰中位粒径 $d_{50}$  = 35  $\mu$ m。



图 8 积灰实验台系统组成

#### 3.2 实验工况

实际加工了 h-8-1-30-10、h-8-1-60 -10、h-8-1-30-20 和 h-8-1-60-20 四 种蜂窝管件,其中最后一位数字表示沿管轴线方 向相邻两排蜂窝的间距。将这四种管件分为两个 组别,加上用于对比的光管,每个组别有三种管 件。对于每一个组别,分别将三种管件布置在实 验段的 H1 列、H2 列、H3 列位置进行实验,需要 测试3次。对于每一种管件,取6 根管件在3 列 位置积灰重量的平均值来定量评价该管件表面积 灰的情况。实验测定了两种气流条件下的积灰 量,气体流速和粉尘浓度的参数见表5。

表 5 实验段的气体流速和粉尘浓度

气流条件	气体平均流速(m/s)	粉尘浓度(kg/m <sup>3</sup> 气体)
低风速	6.5	11.9
高风速	10.5	11.3

#### 3.3 实验结果

图 9 给出了两种风速条件下,蜂窝管表面平 均积灰量与光管表面平均积灰量的相对大小。低 风速条件下,蜂窝管表面积灰量比光管多 2% ~ 8%;高风速条件下,h-8-1-30-10和h-8-1 -60-10 蜂窝管表面的积灰量少于光管的积灰 量,而h-8-1-30-20和h-8-1-60-20蜂 窝管的积灰量高于光管。从实验结果可以看到, 沿圆周方向蜂窝数量较多的蜂窝管 h-8-1-30 -10和h-8-1-30-20的积灰量要大于沿圆 周方向蜂窝数量较少的蜂窝管 h-8-1-60-10 和h-8-1-60-20,这与数值模拟结果得到的 规律一致。

此外,实验中观察到蜂窝内部确实存在明显 的积灰,并且位于 V4 ~ V6 位置的蜂窝管表面积 灰范围小于光管表面的积灰范围。根据这两点实 验现象并结合数值模拟的结果可以推测,蜂窝结 构从两个方面影响换热管件的表面积灰:一方面, 蜂窝结构通过增加对流场的扰动来减少粉尘的沉 积,另一方面,凹陷的蜂窝结构容易聚积粉尘从而 增加总的积灰量。低风速条件下,蜂窝增强流场 扰动、减少换热管件表面积灰的作用小于蜂窝自



## 图 9 两种风速条件下,蜂窝管表面平均积灰量与 光管表面平均积灰量之比

4 结束语

文中以新型蜂窝管为研究对象,数值模拟了 蜂窝管表面流动和积灰特性,利用实验结果验证 模拟结果,综合分析了蜂窝管表面积灰的特性。 通过文中的研究工作可以得知,换热管表面的蜂 窝结构从两个方面影响管件表面的积灰,一方面 蜂窝可以扰动换热管表面的流场,减少飞灰在换 热管表面沉积,另一方面,蜂窝的凹坑结构会成 为飞灰沉积的场所。在适当的风速条件下,优化 设计的蜂窝管可以有效减少换热管表面的积灰 情况。除对积灰有影响外,蜂窝结构可以通过扰 动边界层增强传热,还可能有利于积灰的脱离, 这些方面的规律可以在今后的工作中继续深入 研究。

#### 参考文献

[1] 岑可法,樊建人,池作和,等.锅炉和热交换器的积 灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M].北 京:科学出版社,1994. [2] 聂 立,白文刚,冉桑铭,等.新疆高纳煤积灰特
 性试验研究[J].动力工程学报,2015,35(2):108
 -112.

应用能源技术

- [3] 薛长海. 高钠煤质特性与沾污机理试验研究[J].
  华北电力大学学报:自然科学版, 2015, 42(4): 89
  -95.
- [4] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出 版社,1998.
- [5] 徐 刚,许 诚,杨勇平,等.电站锅炉余热深度 利用及尾部受热面综合优化[J].中国电机工程学 报,2013,33(14):1-8.
- [6] 杨勇平,黄圣伟,徐 钢,等.电站锅炉烟气余热 利用系统的热力学分析和优化[J].华北电力大学 学报:自然科学版,2014,41(1):78-83.
- [7] 车得福,庄正宁,李 军,等.锅炉[M]. 西安:西 安交通大学出版社,2008.
- [8] 全国电力行业 CFB 机组技术交流服务协作网组编. 循环流化床锅炉技术 1000 问[M].北京:中国电力 出版社出版, 2016.
- [9] 翟 强,刘 凡,黄丹青,等. 三维内外肋管换热 元件在管箱式空预器上的应用[C].第十五届中国 科协年会第9分会场:火电厂烟气净化与节能技术 研讨会论文集,2013.
- [10] 史月涛,韩志航,孙奉仲,等.螺旋翅片管防磨和
  防积灰特性的试验研究[J].动力工程,2006,26
  (1):145-148.
- [11] 黄 中,肖 平,孙献斌,等.一种带有蜂窝外管 壁的新型自清灰换热管[S]. Zl 201420418627.4.
- [12] 危日光,杨相钊,高建强,等.回转式空气预热器 传热元件传热与流动三维数值模拟[J].华北电 力大学学报:自然科学版,2015,42(1):58-62.
- [13] 危日光,高建强,张 磊,等.回转式空气预热器 搪瓷蓄热元件传热与流动数值模拟研究[J].华 北电力大学学报:自然科学版,2016,43(2):87 -91.
- [14] 黄 中,刘冠杰,陈 林,等.蜂窝外表面换热管
  结构验证及积灰特性研究[J].工程热物理学报,
  2017,38(8):1731-1735.