

IGCC 系统中废热锅炉积灰特性的模拟研究

肖凯华¹ 金 晶² 张盈文¹ 王永贞¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 协同创新研究院, 上海 200093)

摘 要: 采用数值模拟方法对 IGCC(整体煤气化联合循环发电系统)发电系统中主要的显热回收设备废热锅炉(以下简称“废锅”)进行了分析,其中合成气连续相采用组分输运方程并结合 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型进行求解,颗粒相采用 DPM 模拟,两相间的相互作用采用双向耦合模型求解。温度场基于离散坐标法及灰气体加权和模型进行求解。结果表明:废锅环形通道中心线上速度呈周期性分布,提高了废锅内部的湍流强度;随着径向节距的增大,通道中心线上速度的周期性变化减弱,环形通道的阻力系数逐渐降低并趋于定值;而随着轴向节距的增加,废锅环形通道的阻力系数则逐渐增大,并最终稳定为定值。废锅内环堵板上的速度较小,是积灰严重的重点区域。螺旋环隙内存在涡流,会使得飞灰颗粒的停留时间增加,增大了积灰的可能性,而随着轴向节距的增大,环隙内的涡流逐渐减弱,因此环隙内的积灰将会减弱。

关 键 词: IGCC; 废热锅炉; 积灰特性; 数值模拟

中图分类号: TK229.92+9 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.07.021

引 言

整体煤气化联合循环发电系统简称为 IGCC 系统,是未来适应我国煤高效清洁发电技术要求的先进发电技术之一^[1-3];气化炉后的废热锅炉是 IGCC 系统中关键设备,采用废锅对热量进行回收能使 IGCC 供电效率提高 4%~5%^[4]。

有关对流废锅的研究,国外 J. S. Jayakumar 等人利用 Fluent 软件对螺旋管的传热特性进行了模拟分析^[5];国内,先有李亚东等人分析了壳牌气化炉飞灰的组分和行程过程^[6],从激冷温度、飞灰粒径和微量元素含量等三个方面分析废热锅炉积灰结垢的原因;随后,马飞等人对壳牌气化炉后飞灰的特性做了分析研究^[7],结果表明积灰颗粒的粒径基本分

布在 0~1.0 μm 之间,小颗粒中的含钙量较高,这是造成积灰严重的一个重要原因;再有张传美等人对壳牌气化炉的对流废热锅炉进行了结构的设计计算^[8],利用 Fluent 模拟得到了废热锅炉内部的温度场和流场,详细的阐述了不同条件下的流动和传热特性。

本文在前人研究的基础上,以国内某 250 MW IGCC 电站(壳牌气化工艺)的对流废热锅炉为研究对象,着重研究对流废热锅炉中积灰特性,为废锅的设计和实际工程应用提供理论指导。

1 模型的建立与分析

高压对流废热锅炉的结构如图 1 所示。该对流废锅直径约 3 m,高约 31.7 m,废锅内部布置有膜式水冷壁和 3 圈膜式螺旋盘管内芯,膜式螺旋管受热面分上中下 3 段,最内圈的环隙为了防止合成气短路而安装了堵板,该结构承压能力好,结构紧凑,有很好的换热能力。900 $^{\circ}\text{C}$ 的高温合成气从废锅顶部进入,经过水冷壁和膜式螺旋管冷却至 350 $^{\circ}\text{C}$,同时能够产生 6.8 MPa 的中压饱和蒸汽,进而送往过热器进一步加热以供蒸汽轮机发电。另外在废锅内部布置了若干气动锤振打和 N_2 吹灰装置以防止和减弱积灰带来的影响。对流废锅的整体结构和内部换热面的结构如图 2 所示。

由于对流废锅内部由三圈膜式螺旋管和水冷壁所构成,在炉内形成 3 个环形通道,因此可以将废热锅炉视为一个由多个环形通道所组成的换热器,而废热锅炉的体积较大,因此为了简化计算模型,本文选取膜式螺旋管上段入口处内环和中环所组成的环形结构作为研究对象,主要研究环形通道内合成气的流动换热及积灰特性,其结构如图 3 所示。

收稿日期: 2015-06-01; 修订日期: 2015-10-26

基金项目: 上海市基础研究重点项目(14JC1404800), 国家科技支撑计划项目(2015BAA04B03), 上海理工大学准东煤高效利用协同创新平台项目

作者简介: 肖凯华(1989-),男,河南鹤壁人,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者: 金 晶(1963-),女,山东济南人,上海理工大学教授。

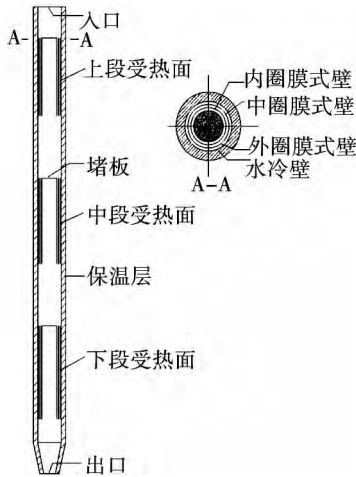


图 1 高压对流废热锅炉结构图

Fig. 1 Structural diagram of a high-pressure convective waste heat steam generator

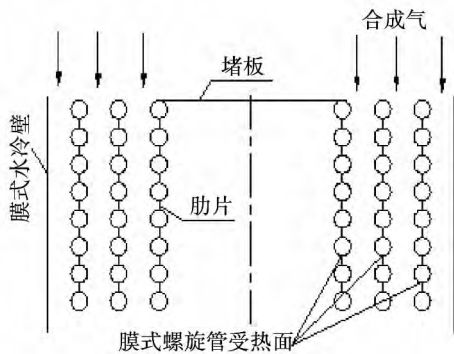
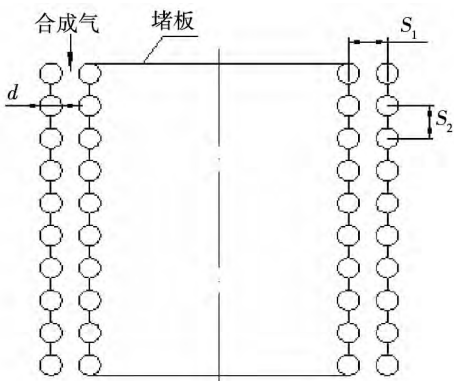


图 2 对流废锅受热面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the heating surfaces in a convective waste heat steam generator



d - 螺旋管径; s_1/d - 径向节距; s_2/d - 轴向节距

图 3 废热锅炉环形通道结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of an annular channel in the waste heat steam generator

合成气组分较多,其中 CO 和 H₂ 的体积分数约为 85%^[9],且高温高压下各组分的物理化学特性各不相同,因此采用组分输运模型模拟各组分间的能量传递和运输过程。本文采用欧拉-拉格朗日模型来进行模拟分析,并采用双向耦合法来考虑气相和颗粒相之间的相互作用。由于合成气出口温度为 900 °C 左右,废锅中对流为主要换热方式,由高压废热锅炉的热力计算得到,对流换热量占总换热量的 85%,而辐射换热量仅占 15%。因此在求解纳维-斯托克斯方程时,对流项采用二项迎风插值法,辐射换热的求解采用 DO 模型,并对空间八分体 4 π 空间角进行离散化。

合成气中的热辐射气体 CO、CO₂、CH₄ 和水蒸气的辐射特性采用灰气体加权和模型求解,合成气中煤渣颗粒的辐射能力远强于合成气,且辐射特性与颗粒本身结构和化学成分密切相关。根据 Mills 测得的还原性气氛下实际煤气化炉颗粒辐射特性值,颗粒的发射系数取 0.83^[10]。

2 网格划分与边界条件

由于对流废锅为轴对称结构,因为本文选取其 1/4 结构作为研究对象,并对其进行非结构化的网格划分。模型网格的划分图如图 4 所示。

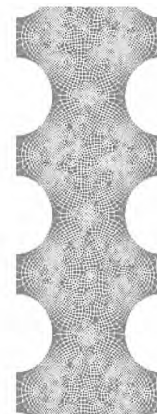


图 4 废热锅炉网格划分图

Fig. 4 Chart showing the grid division of the waste heat steam generator

本研究采用无滑移恒温的边界条件,并采用标准壁面函数法对壁面进行处理。收敛判据除控制方程残差之外,又选取进出口质量差(进口质量)和出口截面速度平均值作为收敛依据。

3 模型验证

赵振兴等通过实验研究了对流废锅的等比缩小模型^[11],分析不同结构和试验工况对废锅内流动换热的影响,得到相关换热系数实验关联式,如下所示:

$$Nu = 0.286 1Re^{0.7217} Pr^{0.85} \quad (1)$$

式中: Nu —努赛尔数; Re —雷诺数; Pr —普朗特数。

本文对上述经验公式进行建模分析,并得到了相关模拟结果,废锅模型换热系数模拟值与实验关联式计算值的对比如图 5 所示。

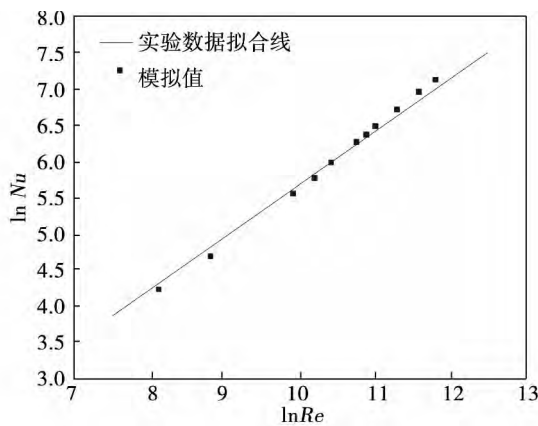


图 5 废锅模型换热系数模拟值与实验关联式计算值的对比图

Fig. 5 Chart showing the contrast of the values of the heat exchange coefficient simulated by using the model for waste heat steam generators with the values calculated by using the empirical correlation formulae

由图 5 可知,采用上述模型的模拟值与实验关联式计算值吻合较好,最大误差在 $\pm 10\%$ 以内,因此该模型可以用于废热锅炉的模拟研究。

4 模拟结果及分析

4.1 环形通道内速度分布

废锅环形通道由两圈模式螺旋管组成,其内部结构复杂,并呈现周期性变化,这与其它水冷壁结构有所不同,因此有必要对其内部流场进行分析。

对流废锅环形通道内合成气的速度分布如图 6 所示。图 6 的结果显示废锅环形通道轴线上合成气的速度要大于其进口速度,并且沿轴线方向速度呈现周期性变化,同时随着气流方向有减小的趋势,而

在螺旋环隙之间气流的速度则明显减小,并形成明显的环流,在螺旋管与肋片交界处形成了一定范围的流动滞止区。这主要是因为对流废锅的模式螺旋管结构使得环形通道的横截面积形成了大小交替的周期性变化,这造成了合成气流动的周期性变化,增强了环形通道内部流体的湍流强度,有利于增强废锅的余热回收能力。而流体流经螺旋管表面类似于流过圆柱表面,会在其后面形成涡流,使得螺旋管尾部出现了流动滞止区,且在环隙之间速度明显减小,这也是造成废锅积灰的一个重要原因。因此在进行膜式螺旋管的设计时,应当考虑选取适当的轴向节距以减小流动滞止区,同时也要考虑选择合适的径向节距,以保证环形通道内合成气的湍流强度。

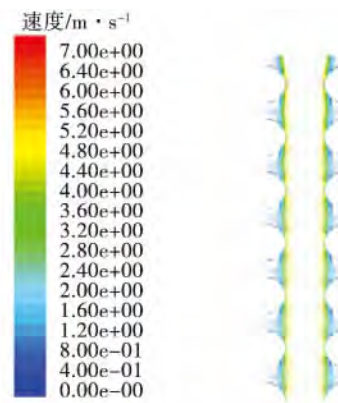


图 6 对流废锅环形通道内合成气的速度分布图
Fig. 6 Chart showing the distribution of the velocity of the syngas in an annular channel in the waste heat steam generator

4.2 环形通道内的颗粒相分布

废锅环形通道内飞灰颗粒的浓度分布图如图 7 所示,结果显示:大部分飞灰颗粒主要沿着环形通道中心区域流动,在螺旋环隙之间的颗粒浓度较小,这与合成气的速度流场相一致,说明颗粒随气体的跟随性较好。

废锅环形通道内飞灰颗粒的运动轨迹如图 8 所示。图 8 表明,有一部分飞灰颗粒随气流沿着环形通道的中心区域流动直至出口,而另一部分颗粒则与螺旋管壁面发生了多次碰撞,其对应的停留时间也相应的延长了很多,这说明飞灰与壁面碰撞的几率较大。在本文中飞灰颗粒被视为弹性球体进行处理,所以图 7 的结果中出现了颗粒与壁面的多次碰撞,而在实际的运行情况中,处于 $700\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的飞灰具有一定的黏性,此温度范围内碱金属易于在

壁面形成稳定的沉积层,使得积灰现象严重^[12],因此在废热锅炉上段应采取更多的除灰装置,以确保废锅的稳定运行。

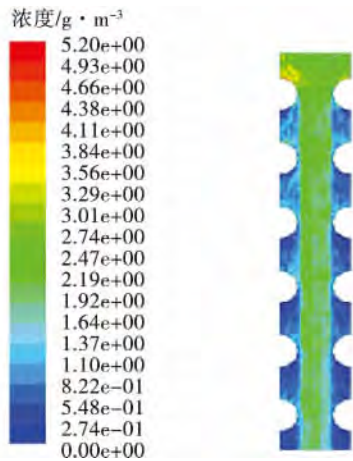


图 7 废锅环形通道内颗粒浓度的分布图

Fig. 7 Chart showing the distribution of the particle concentration in an annular channel in the waste heat steam generator

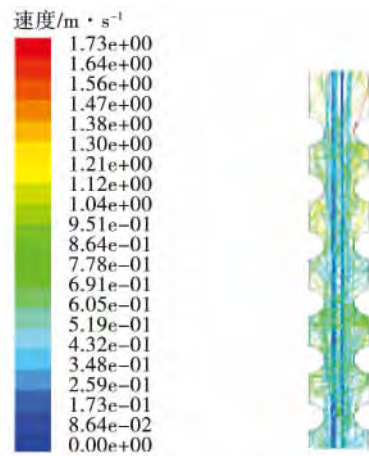


图 8 废锅环形通道内飞灰颗粒的运动轨迹图

Fig. 8 Chart showing the movement trajectory of the flying ash particles in an annular channel in the waste heat steam generator

4.3 流动特性对积灰的影响

对流废锅内部采用的是膜式螺旋管结构,并且在内环的顶部采用了堵板结构,这样可以使气体从废锅内的环形通道中流过,增大了合成气的流动速度,有助于整体换热效果的提升。但根据文献[6]报道,废锅内部的堵板上为积灰严重区域,因此有必要对其堵板处的流体特性进行分析研究。

对流废锅内环堵板处的合成气流动特性如图 9 所示。结果显示:废锅环形通道内的速度与进口速度相比明显增大,而堵板上的速度则明显减小。堵板面积约为废锅横截面积的 44.4%,这意味着合成气中的多数飞灰颗粒将会与堵板发生碰撞,而堵板处合成气速度降低,其携带飞灰的能力将迅速减弱,这使得飞灰粘附在堵板上的概率加大;同时废锅入口处于 1 173 K 的高温段,飞灰的黏附性仍然很强,更容易沉积到堵板上,这样将会加重堵板上的积灰现象,因此在堵板处应当布置相关的除灰装置。

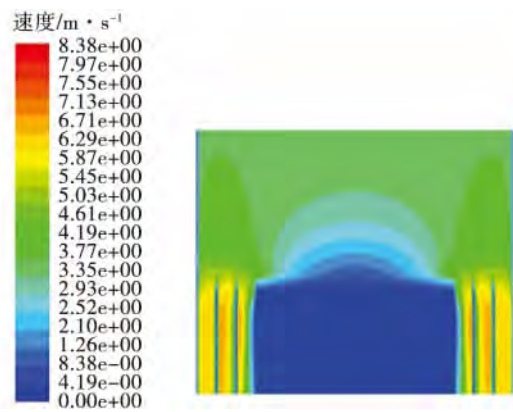


图 9 废锅内环堵板处的合成气流动特性图

Fig. 9 Flow characteristics of the syngas at the place of the inner annular block plate in the waste heat steam generator

由于对流废锅内部为膜式螺旋管结构,环隙间合成气的速度较低并有涡流的存在,因此会造成较为严重的积灰现象,这也是对流废锅中常见的积灰位置。因此如何选取合适的螺旋管轴向节距,将会影响到废锅内的积灰特性。

图 10 为不同轴向节距下螺旋环隙内的气流速度分布图。由图 10 可知:在 S_2/d 为 1.5 ~ 4.0 时,废锅环形通道内均有涡流产生,并且随着轴向节距的增大,环隙间的涡流逐渐减弱,速度也有所增大,同时随着轴向节距的逐步增大时,涡流区域逐渐偏向于前段,而在肋片中段则未出现明显的涡流。这主要是因为随着轴向节距的提高,肋片所占面积逐步增大,环形通道内肋片所对应的流通体积也随之增大,由图 10 也可以看出在不同的轴向节距时,肋片前段和后端与螺旋管交界处均有流动滞止区,而这一区域并未随着轴向节距的增大而增大,这说明螺旋管主要使得与其接近肋片上的合成气速度减

小,对其中部影响较小。因此在保持对流废锅紧凑型和安全性的前提下,适当的提高轴向节距有利于减轻积灰现象。

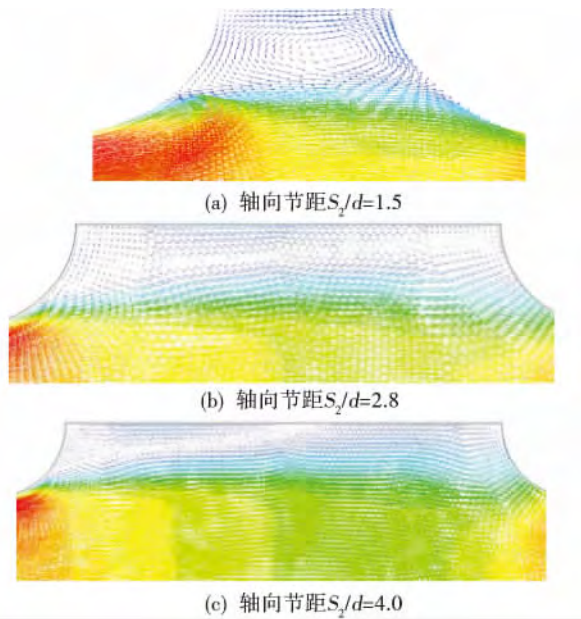


图 10 不同轴向节距下环隙内的气流速度分布
Fig. 10 Distribution of the velocity of the air flow inside the annular gap at various axial pitches

5 结论

(1) 在环形通道的螺旋环隙内存在涡流,使得飞灰颗粒在其中的停留时间增加,加大了积灰的可能,但随着轴向节距的增大,螺旋环隙内的涡流减弱且涡流区域逐渐偏向环隙前端,这表明在保证紧凑型和安全性的前提下,适当提高废锅轴向节距将有助于减轻积灰现象;

(2) 废锅上段出口处的合成气温度在700℃~900℃之间,此温度范围内碱金属易于在壁面形成稳定的沉积层,使得积灰现象严重,因此在废热锅炉上段应采取更多的除灰装置;

(3) 堵板占废锅横截面积的比例较大,在堵板处合成气的流速较低,使得飞灰颗粒在堵板处易于形成积灰,因此在堵板处应当布置相关的除灰装置,以确保废锅的稳定运行。

参考文献:

[1] 王俊有,李太兴,刘振刚,等. IGCC 环保特性的研究[J]. 燃气轮机技术. 2007, 20(2): 15-17.
WANG Jun-you, LI Tai-xing, LIU Zhen-gang et al. Research of the

environmental protection characteristics of an IGCC cycle [J]. Gas Turbine Technology 2007, 20(2): 15-17.

[2] 徐强,曹江,周一工,等. 整体煤气化联合循环(IGCC)特点综述及产业化前景分析[J]. 锅炉技术, 2006, 37(6): 1-9.
XU Qiang, CAO Jiang, ZHOU Yi-gong et al. Survey of the specific features of an IGCC cycle and analysis of its prospects in industrialization [J]. Boiler Technology 2006, 37(6): 1-9.

[3] 马金凤,张成恩,刘文林. 整体煤气化联合循环的环保优势[J]. 东北电力技术, 2004, 04: 18-22.
MA Jin-feng, ZHANG Cheng-en, LIU Wen-lin. Environmental advantages of an integrated gasification combined cycle [J]. Northeast Electric Power Technology, 2004, 04: 18-22.

[4] 金红光,王宝群. 化学能梯级利用机理探讨[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 181-184.
JIN Hong-guang, WANG Bao-qun. Exploratory study of the mechanism governing the stepped utilization of chemical energy [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 181-184.

[5] Jayakumar J S, Mahajani S M, Mandal J C et al. Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(3): 221-232.

[6] 李亚东. Shell 粉煤气化装置合成气冷却器积灰结垢的控制[J]. 化肥设计, 2010, 48(2): 27-29+32.
LI Ya-dong. Control of the ash deposition and fouling in a syngas cooler in a Shell pulverized coal gasification device [J]. Chemical Fertilizer Design, 2010, 48(2): 27-29+32.

[7] 马飞. Shell 煤气化飞灰粘附特性影响因素及模拟过程研究[D]. 安徽理工大学, 2011.
MA Fei. Study of the factors influencing the adhesion characteristics of flying ash during the process of Shell coal gasification and its simulation process [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2011.

[8] 张传美. 干煤粉加压气流床气化炉废热锅炉合成气的流动与传热特性研究[D]. 上海理工大学, 2013.
ZHANG Chuan-mei. Study of the flow and heat transfer characteristics of the syngas in a dry pulverized coal pressurized air flow bed gasifier waste heat steam generator [D]. Shanghai: Shanghai University of Science and Technology, 2013.

[9] 何永德. 现代煤化工技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
HE Yong-de. Modern coal chemical technical handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.

[10] MILLS K C, RHINE J M. The measurement and estimation of the physical properties of slag formed during coal gasification: 2 properties relevant to heat transfer [J]. Fuel, 1989, 68(7): 904-910.

[11] 赵振兴,杨震,刘宏,等. 煤粉加压气化炉膜式螺旋管和蛇形管对流传热特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(1): 10-14.
ZHAO Zhen-xing, YANG Zhen, LIU Hong et al. Study of the convection-based heat transfer characteristics of the film type coil tubes and snake-shaped tubes in a pulverized coal pressurized gasifier [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(1): 10-14.

[12] 马飞,李寒旭,盛新,等. Shell 煤气化飞灰粘附特性及沉积机理分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(10): 114-117.
MA Fei, LI Han-xu, SHENG Xin et al. Study of the adhesion characteristics of flying ash and analysis of its deposition mechanism during the process of Shell coal gasification [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(10): 114-117.

(刘瑶 编辑)

IGCC 系统中废热锅炉积灰特性的模拟研究 = **Study of the Simulation of the Ash Deposition Characteristics of a Waste Heat Boiler in an IGCC System** [刊, 汉] XIAO Kai-hua, JIN Jing, ZHANG Ying-wen, WANG Yong-zhen (School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), JIN Jing (Collaborative Innovation Research Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(7). -98 ~ 102

The numerical simulation method was employed to conduct an analysis of the main apparent heat recovery equipment item, a waste heat boiler in an IGCC power generation system, among which the constituent transmission equations in combination with the realizable $k - \varepsilon$ turbulent flow model were used to seek solutions to the continuous phase and the discrete phase model was used to seek solutions to the particle phase while a dual direction coupling model was utilized to seek solutions to the interaction between the two phases. In addition, the discrete coordinate method as well as the ash and gas weighted model were used to seek solutions to the temperature field. It has been found that the speed along the centerline of the annular passage in the waste heat boiler assumes a periodical distribution, thus enhancing the turbulent flow intensity inside the waste heat boiler. With an increase of the pitch along the radial direction, the resistance coefficient of the annular passage in the waste heat boiler will gradually decrease and finally tend to be a fixed value. With an increase of the pitch along the axial direction, the resistance coefficient of the annular passage in the waste heat boiler will gradually decrease and finally stabilize at a fixed value. The speed on the block plate in the inner ring of the waste boiler is relatively small, therefore, it is regarded as the key zone of serious ash deposition. Vortexes exist in the helical annular gaps, thus making the residence time duration of flying ash particles increase and heightening the possibility of ash deposition. With an increase of the pitch along the axial direction, the vortexes in the annular gaps will gradually become weakened, thus lessening the ash deposition in the annular gaps. **Key words:** IGCC, waste heat boiler, numerical simulation, ash deposition characteristics

基于 CFD 的高速离心泵进口段流动数值模拟分析 = **Numerical Simulation and Analysis of the Flow at the Inlet of a High Speed Centrifugal Pump Based on the Software CFD** [刊, 汉] WEI Li-chao, SONG Wen-wu, SHI Jian-wei, YANG Xiu-xin (College of Energy Source and Power Engineering, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(7). -103 ~ 109

Based on the CFD fundamentals and by using the RNG $k - \varepsilon$ turbulent flow model, a numerical simulation of the flow field inside a high speed centrifugal pump was performed with its returning flow phenomenon being disclosed. Through an analysis and calculation under various operating conditions, it has been found that the range of the returning flow vortexes at the inlet of the inducer wheel assumes a law of gradual descending tendency with an increase of the flow rate. A non-dimensional number was used to analyze any change in the range of the returning flow vortexes. Under the operating condition of the high speed centrifugal pump having a small flow rate $0.6Q_d$, the magnitude of the returning flow vortexes at the inlet was 2.26. Under the operating condition of the high speed centrifugal