

# 循环流化床锅炉下排气旋风分离器的改造

杨群峰, 曹颖, 董哲

(山东省特种设备检验研究院济宁分院, 山东 济宁 272025)

**摘要:** 针对目前下排气旋风分离器效率较低的问题, 对某台循环流化床锅炉的下排气旋风分离器进行改造。在排气管的后侧开槽并加装导流板。对改造前、后的下排气旋风分离器进行了数值模拟, 对改造前、后分离器和除尘器灰的颗粒进行了取样、分析, 对进入排气管后的气固两相流进行了二次分离的研究。研究表明: 排气管分离装置能有效地提高分离器的效率。

**关键词:** 下排气旋风分离器; 排气管分离装置; 二次分离; 分离效率

中图分类号: TK229.6+6 文献标识码: B  
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.039

## 引言

循环流化床锅炉分离装置分离效率的高低直接影响返料量, 进而影响锅炉效率、脱硫效果、床温控制和尾部烟道受热面的磨损速率等, 对锅炉的经济运行至关重要。

下排气旋风分离装置及其返料系统烟气阻力小, 有利于锅炉整体设计布置, 尤其适用于锅炉改造。在锅炉设计和锅炉改造中得以广泛应用。但该系统分离效率较低, 当负荷降低后, 其分离效率下降更明显。实际运行中, 因分离器制造、安装、使用方面的原因, 分离效率不足 80%, 造成返料量较少, 达不到锅炉运行的最佳状态。

通过改进旋风分离器排气管的型式, 利用气固两相流进入排气管后的旋流作用进行二次分离, 将二次分离后的灰颗粒送入炉膛, 提高总返料量, 从而提高锅炉效率, 强化脱硫效果, 降低尾部烟道受热面的磨损。

## 1 传统下排气旋风分离器结构

目前循环流化床下排气方式的旋风分离装

置<sup>[1-2]</sup>, 一般采用蜗壳型、圆型、方型结构分离器, 上部有导流体, 下部引出干净烟气的排气管为单一的圆筒形, 如图 1 所示。分离后的灰颗粒沿分离器筒壁下落后, 通过落料管、返料器送入炉膛。排气管为分离后含灰量较低的烟气引出的通道。

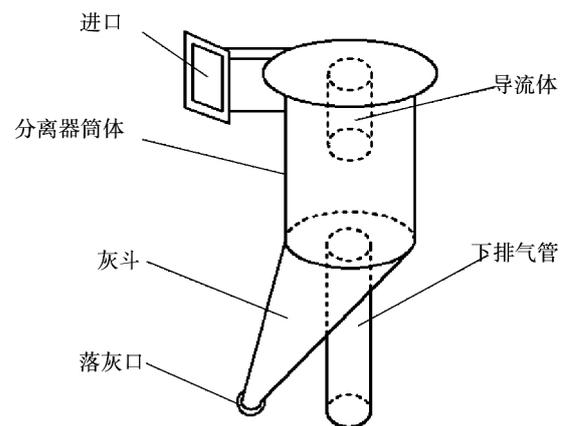


图 1 下排气旋风分离器

Fig. 1 The cyclone separator with downward exhaust gas

排气管以上的空间里是向下的颗粒轴向流动, 靠近排气管进口处, 向心的径向速度较大, 将大量颗粒夹带进入排气管, 导致分离效率下降。在排气口以下存在上升流, 造成已分离颗粒的夹带, 导致分离效率下降。

## 2 排气管分离装置改造前后的数值模拟

通过对下排气管分离装置的研究, 将排气管分离装置设计成带有蜗壳的分离装置, 使排气管内靠近壁面的旋流中夹带的颗粒有效地进入蜗壳, 分离

收稿日期: 2014-08-20; 修订日期: 2014-10-17

基金项目: 国家质检总局科技计划项目(2010QK235)

作者简介: 杨群峰(1970-), 男, 山东滕州人, 山东省特种设备检验研究院济宁分院高级工程师。

效果较好。但由于在用锅炉一般没有足够的空间对排气管进行改造,因此实际改造时采用了相对简单的分离器结构<sup>[3]</sup>,即利用下排气管后部空间区域,开槽后加装灰粒收集装置,对排气管内旋流中夹带的颗粒进行分离。由于烟气进入排气管后,既有轴向运动,也有切向运动,因此开槽的垂直长度会影响分离效果,当开槽较小的时候,会出现有些夹带颗粒的旋流不会流经开槽部位,直接经排气管进入下部空间。

### 2.1 模型的建立

以 35 t/h 的循环流化床锅炉的下排气分离器为基础,采用开槽方式改造的排气管分离装置结构如图 2 所示。在排气管的后侧开槽,按两相流旋流走向,槽的前部高度为 450 mm,后部高度为 350 mm,在开槽中心筒内部增加的入口挡板的宽度为 280 mm,高度为 350 mm,如图 3 所示。槽的下边增加底板和外部壳体按旋流方向向下与水平约成 30°的倾角,以利于灰粒的收集。

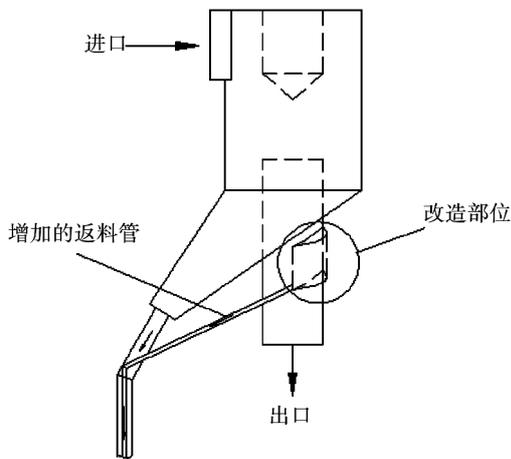


图 2 排气管分离装置

Fig. 2 2 The exhaust pipe separation device

为了研究装置的二次分离效果,选取两种进口尺寸和进口速度:(1)入口宽度 1 200 mm,入口两相流速度为 16 m/s,结构如图 4 所示;(2)结构不变,仅将入口宽度调整为 656 mm,入口两相流速度调整为 30 m/s 进行模拟。

采用商用 CFD 软件包—FLUENT 作为数值模拟工具,采用 Euler 坐标系下的 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型计算气相流场<sup>[4]</sup>。离散方程组采用 PISO 算法求解,扩散项离散采用中心差分,逐行迭代。对流项采

用二阶精度的 QUICK 格式进行离散,采用拉格朗日模型(Discreted Particle Model, DPM)对颗粒的轨迹进行计算,进而计算分级效率。固体壁面的边界条件设置:进、出口为逃逸边界条件;灰斗最下端的落灰口、排气管开口处截面为颗粒捕获边界,只要颗粒到达该处即表示其被捕获而分离;其它壁面为反弹边界条件。颗粒入口浓度为 28.9 g/m<sup>3</sup>,颗粒粒径符合 Rosin - Rammler 分布。

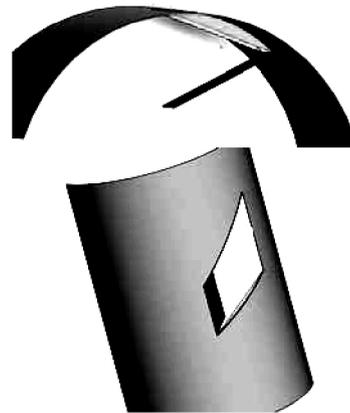


图 3 排气管开槽的结构

Fig. 3 The structure of slotted exhaust pipe

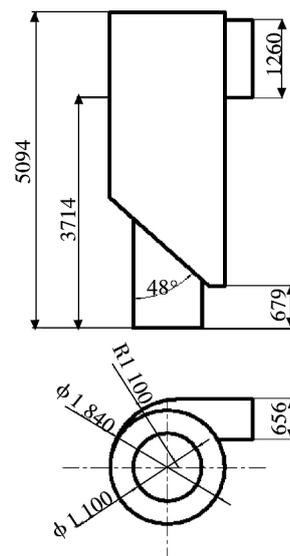


图 4 分离器模型(mm)

Fig. 4 The separation device model(mm)

### 2.2 未改造前旋风分离器的模拟

#### 2.2.1 不同截面的速度云图分布

下排气旋风分离器是强三维旋转湍流场,流动

情况复杂。图 5 (a) 选取以 4 个截面上的速度分布做比较 4 个截面的位置分别为  $Z_1 = 0.5 \text{ m}$ 、 $Z_2 = 1.5 \text{ m}$ 、 $Z_3 = 2.7 \text{ m}$ 、 $Z_4 = 4.5 \text{ m}$ 。图 5 (b) 为不同截面上的速度云图分布,从轴平面上的云图可以看出,速度最大部位在排气管段,速度最小的部位出现在排气管的中心,从导流体下方直到排气管的出口,气流的速度都较低,另外在灰斗收集部下方,速度也比较小,有利于灰分的外排。

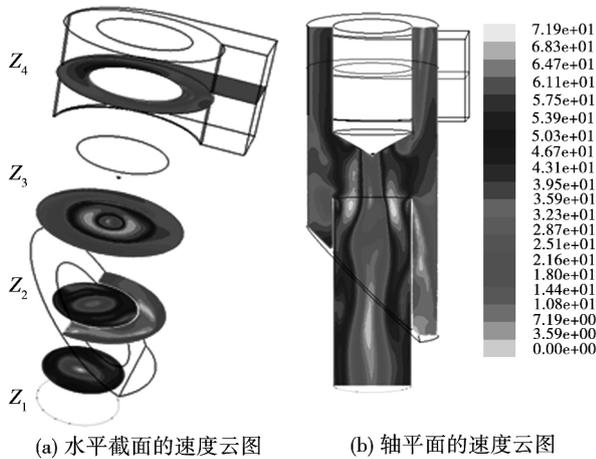


图 5 不同截面上的速度云图分布 ( m/s)

Fig. 5 The velocity contour distribution of different cross sections( m/s)

### 2.2.2 切向速度分布

旋风分离器内的气流主要是以环向的圆周运动为主,图 6  $Z = 0.5、1.5、2.7$  和  $4.5 \text{ m}$  处的不同截面上的切向速度径向分布。 $Z = 0.5、1.5、2.7 \text{ m}$  处排气管内的切向速度分布大体呈 M 分布,靠近壁面处的切向速度较大,越靠近下排气管的中心,切向速度越小,当到达中心时,速度为零。

从切向、轴向和径向速度分布情况看,在旋风分离器内,径向速度比较小,在轴向速度和切向速度作用下颗粒作高速旋转向下的运动,在离心效应下甩向壁面(器壁)处而分离。由切向速度分布图可以看出,在排气管中其切向速度最大的区域为靠近内壁的区域,速度分布呈 M 型。利用这一特点,对排气管的结构进行适当改造,进行二次分离提高旋风分离器的分离效率具有可行性。

### 2.3 改造前、后旋风分离器模拟情况的对比

2.3.1 入口宽度为 656 mm,入口两相流速度 30 m/s

图 7 为改造前、后旋风分离器纵向平面上湍动

能云图分布对比,改造后平均湍动能有所增大,但增幅较小,但在下排气管内,改造后湍动能显著降低,而且湍动能分布更为均匀,降低了下排气管内的气流扰动,利于细微颗粒在下排气管内的二次分离,从而提高旋风分离器的分离效率。

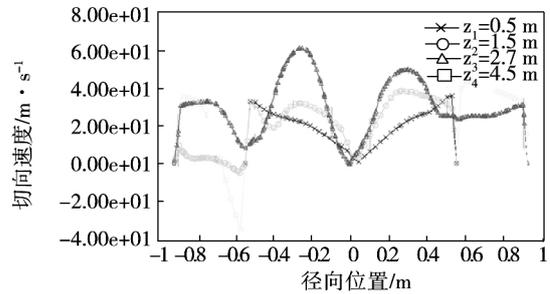


图 6 不同截面上的切向速度径向分布

Fig. 6 The radial distribution of tangential velocity in different cross sections

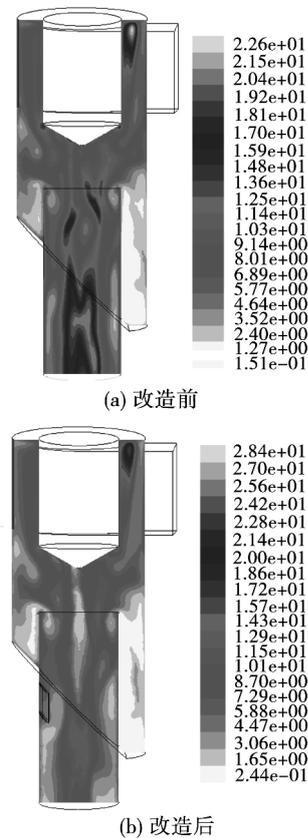


图 7 改造前后湍动能云图分布对比( m/s)

Fig. 7 The comparison between the nephograms of turbulent kinetic energy particles before and after improvement( m/s)

通过在气相模拟已收敛的模型中释放颗粒源,

模拟了旋风分离器的气固分离过程。图 8 为改造前与改造后的 Particle Trucks 对颗粒( $d = 20 \mu\text{m}$ ) 进行追踪计算的结果。改造后下排气管分离装置对颗粒的二次分离起到了明显的作用。

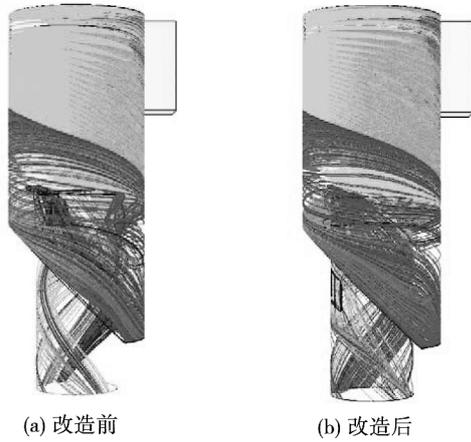


图 8 改造前、后( $d = 20 \mu\text{m}$ ) 颗粒追踪对比  
Fig. 8 The tracking contrast before and after improvement( $d = 20 \mu\text{m}$ )

图 9 为改造前、后排气管中的颗粒( $d = 20 \mu\text{m}$ ) 轨迹对比图。

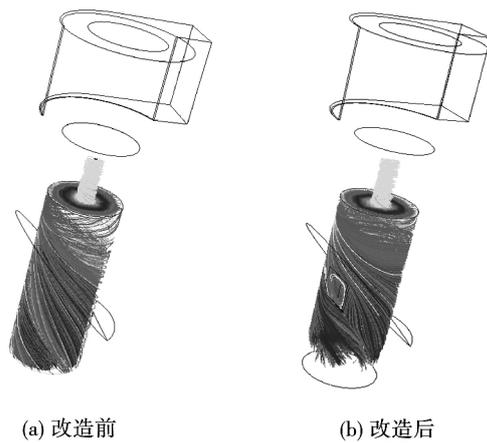


图 9 改造前、后颗粒( $d = 20 \mu\text{m}$ ) 在排气管内的轨迹对比

Fig. 9 The comparison of particle tracks in exhaust pipes before and after improvement( $d = 20 \mu\text{m}$ )

图 9(a) 中, 排气管中的细微颗粒在气流的携带作用下还做着非常剧烈的旋转运动, 极大的影响旋风分离器的分离效率。图 9(b) 中, 下排气管中颗粒的运动轨迹, 从中可以直观地看到, 大量细微颗粒从

开孔处分离出来, 巧妙地利用了排气管中强旋流所产生的离心力, 起到了二次分离作用。根据模拟结果计算, 改造前、后总的分离效率和分级效率的值如下。

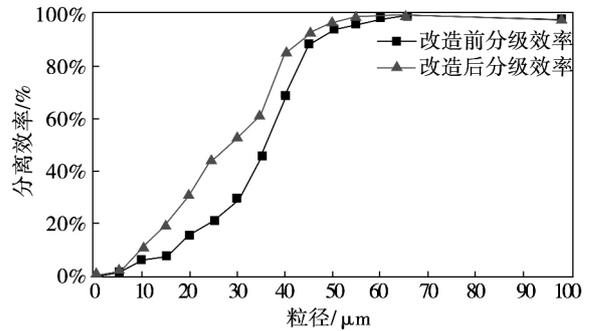


图 10 改造前、后不同粒径分离效率的比较  
Fig. 10 The comparison of separation efficiency of different particle sizes before and after improvement

依次对其它粒径的颗粒进行追踪, 并获得其不同粒径的分离效率列于表 1 中, 改造后模型的 5 - 45  $\mu\text{m}$  之间分离效率要明显优于改造前, 改造后的总效率相比改造前也有所提高, 由改造前的 94.4% 提高到了 96.3%, 说明对下排气管的改造可以提高分离效率。

表 1 不同粒径的分离效率

Tab. 1 The separation efficiency of different particle sizes

粒径/ $\mu\text{m}$	分级效率	
	改造前	改造后
5	0.014	0.0167
10	0.063	0.1073
15	0.078	0.1907
20	0.1557	0.3127
25	0.2113	0.4547
30	0.2941	0.5367
35	0.4586	0.6187
40	0.6933	0.8547
45	0.8847	0.9253
50	0.9487	0.9675
55	0.9657	0.9826
60	0.9883	0.9987
65	0.9981	0.9995
100	1	1

2.3.2 入口宽度为 1 200 mm ,入口两相流速度 16 m/s

对改造前、后总的分离效率和分级效率的变化情况进行模拟计算。通过计算被捕获颗粒的质量流量百分比 ,估算出改进前下排气旋风分离器的分离效率约为 53.6% ,改进后下排气旋风分离器的分离效率约为 85.4% 。

### 3 实际改造的应用分析

选择某台型号为 UG - 35 / 3.82 - M35 的锅炉进行改造试验。该锅炉为典型的下排气旋风分离器的低速循环流化床电站锅炉。该锅炉炉内带有槽型分离器 ,其旋风分离器为中温下排气分离器 槽型分离器为 I 级分离器 ,旋风分离器为 II 级分离器 ,锅炉燃料为煤泥 + 混煤。

#### 3.1 改造情况

对该锅炉的下排气旋风分离器进行改造 ,在后边排气管外露较多的区域采用开槽并加装导流板的方式进行了改造(如图 3 所示)。改造的排气管分离装置有导流板、排气管的灰粒收集装置、辅助返料管共同构成。

#### 3.2 粒度的测量与分析

改进前在返料器 U 型阀处和电除尘器 2 个位置分别进行了取样;改造后对返料器 U 型阀、电除尘器、下排气管收集装置及改造后增加的料腿取样管 4 个位置进行取样 ,取样位置分布如图 11 所示。粒度检测使用 BT - 9300ST 型激光粒度仪 ,测试粒径范围为 0.1 - 1 000 μm。样品检验结果如表 2 所示。

表 2 粒度检测情况

Tab.2 The detection of particle sizes

取样位置	$D_{50} / \mu\text{m}$	$D_{90} / \mu\text{m}$
返料器改造前	180.9	366.0
返料器改造后	168.2	336.3
电除尘改造前	113.9	264.9
电除尘改造后	92.2	264.1
排气管改造处	110.5	257.6
取样管	147.7	318.6

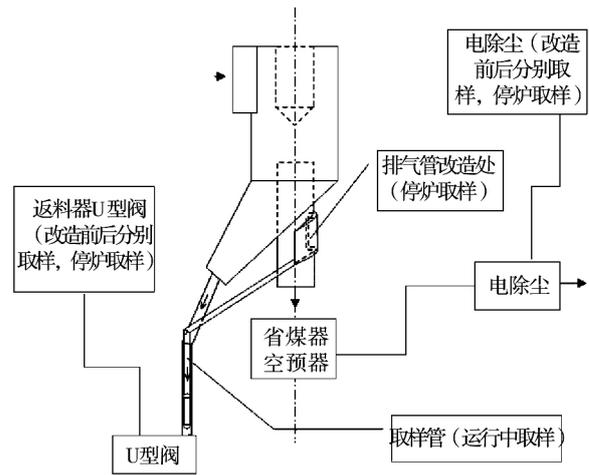


图 11 取样位置示意图

Fig. 11 The schematic diagram of sampling point

通过对比分析 ,可以发现:

(1) 改造后在返料器所采集的灰样品中位径 ( $D_{50} = 168.2 \mu\text{m}$ ) 比改造前同一位置所采集的样品中位径 ( $D_{50} = 180.9 \mu\text{m}$ ) 要小  $12.7 \mu\text{m}$  ,改造后的  $D_{90}$  均要比改造前小 ,所检测样品的最大粒径范围一致。这也说明通过对下排气旋风分离排气管的改造取得一定效果。排气管分离装置二次分离后返料的颗粒  $D_{50}$  为  $147.7 \mu\text{m}$  ,较一次分离小了  $33.2 \mu\text{m}$  ,使两次分离后返料的颗粒总的  $D_{50}$  变小。这表明 ,通过改造旋风分离器的分离能力得到了进一步加强 ,能够分离出粒径更小的颗粒。

(2) 电除尘所捕获的颗粒中位径 ( $D_{50} = 92.2 \mu\text{m}$ ) 改造后比改造前同一位置所采集的样品 ( $D_{50} = 113.9 \mu\text{m}$ ) 要小  $21.7 \mu\text{m}$  ,改造前、后的  $D_{90}$  及最大粒径范围趋于一致。这说明通过对下排气旋风分离器的改造 ,排至电除尘的烟气中颗粒的粒径变小了 ,从而验证了改造后的旋风分离器分离能力的提高。

(3) 下排气管改造处及料腿取样管所采集的样品  $D_{50}$ 、 $D_{90}$  均要比在改造前、后在返料器位置所采集样品的粒径小。说明改造后的排气管具备了二次分离的能力 ,且能够分离粒径更小的颗粒 ,达到了改造前预定的目标。下排气管改造处样品粒度分布要比料腿处样品粒度分布小 ,主要是因为 2 个样品一个是停炉后取样 ,一个是运行过程中取样造成的 ,因为停炉后取样设备本体内悬浮较小的颗粒会产生沉降

现象,而悬浮的颗粒均为较小的颗粒。

### 3.3 样品的含碳量检测和分析

为进一步检验旋风分离器的改造效果,我们对所采集的 6 个样品进行了含碳量的分析测试,检测结果如表 3 所示。

表 3 含碳量检测情况

Tab. 3 The detection of carbon content

取样位置	含碳量 Cad/%
返料器改造前	12.54
返料器改造后	11.25
电除尘改造前	17.19
电除尘改造后	14.83
取样点	11.13
排气管改造处	11.40

通过表中数据对比发现,旋风分离器改造后,返料器中所取样品的含碳量降低了 10%,电除尘装置中所取样品的含碳量降低了 14%,下排气管改造处、料腿中所取样品的含碳量也低于改造前在返料器中所取样品的含碳量。通过对循环流化床锅炉下排气旋风分离器排气管的改造,增加了返料量,使循环流化床锅炉的物料循环倍率有所提高,延长了物料颗粒在炉内的停留时间,提高了燃料的利用率,降低了飞灰含碳量。

### 3.4 下排气旋风分离器改造前、后运行数据比较

对改造前(2012 年 6 月 1 日至 6 月 6 日)和改造后(2012 年 9 月 1 日至 9 月 6 日)的运行数据进行了采集计算。对比改造前、后的运行数据,发现改造后其旋风分离器阻力增加了 2%,说明改造对其阻力性能基本没有影响;改造后炉膛出口温度下降了 22.0℃,排烟温度下降了 8.8℃,主要是返料量增加有利于燃尽,使炉膛上部空间灰颗粒的二次燃烧减少,造成炉膛出口烟温下降,排烟温度降低。

## 4 结 论

(1) 通过选取某台下排气旋风分离器循环流化床锅炉进行改造,增加了排气管分离装置,使下排气

旋风分离器具有两次分离的效果。对分离器改造前、后的气相流场和气-固分离过程中的颗粒运动的模拟,从理论上对排气管分离装置的分离情况和增加二次分离功能后的下排气旋风分离器进行了对比分析,验证了排气管分离装置的二次分离功能。

(2) 改造后,辅助分离系统工作良好,返料量增加,飞灰、返料颗粒的含碳量降低,中位径变小,锅炉总返料量提高;锅炉炉膛出口温度和排烟温度均有所下降,颗粒在炉内燃尽情况得到改善。有效地提高了锅炉效率,强化了脱硫效果,降低了尾部烟道受热面的磨损。

(3) 该项目改造方案有效地解决传统下排气循环流化床锅炉分离器效率低,返料量少,飞灰含碳量高的问题。改造方案简单易行,对原有下排气旋风分离系统改动较小,基本不增加分离器的阻力,有利于推广应用。

### 参考文献:

- [1] 刘德昌,陈汉平,吴正舜,等.下排气旋风分离器循环流化床锅炉的研究与开发[J].煤炭加工与综合利用,2000,(3):47-49.  
LIU De-chang, CHEN Han-ping, WU Zheng-shun. Research and Exploration of CFB with Cyclone Separator with Downward Exhaust [J]. Gas Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2000, (3): 47-49.
- [2] 郝晓文,王磊,赵强.下排气旋风分离器的流场分析与结构优化[J].电站系统工程,2011,(3):15-19.  
HAO Xiao-wen, WANG Lei, ZHAO Qiang. Analysis of Flow Field and Improved Design of Cyclone Separator with Downward Exhaust Gas [J]. Power System Engineering, 2011, (3): 15-19.
- [3] 杨群峰,曹颖,孙振国.一种带有分离装置的循环流化床锅炉用新型中心筒[P].中国:ZL200920290097.9,2010.11.24.  
YANG Qun-feng, CAO Ying, SUN Zhen-guo. A New Type CFB Central Cylinder with Separation Device [P]. China: ZL200920290097.9, 2010. 11. 24.
- [4] D. Choudhury. Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling[R]. TM-107, FLUENT Inc. Technical Memorandum, 1993.

(单丽华 编辑)

chanical and thermal loads in various zones in the drum. On this basis ,the stress field of the drum shell was numerically calculated during the stable operation of the boiler and a strength evaluation of the drum shell was performed according to the calculation results. It has been found that the total stress of the drum shell has a maximum value of 106.6 MPa ,which is far less than the stress permitted by the material used at the working temperature ,thus the drum shell having a relatively large safety allowance. **Key words:** supercharged boiler drum ,stress field ,finite element analysis ,strength evaluation

反射型金属保温结构热性能试验及数值分析 = **Thermal Performance Test and Numerical Analysis of a Reflective Type Metallic Isolation Structure** [刊 汉] MAO Fei ,ZHOU Qiao-jia ,GONG Bi-ying ( Shanghai Nuclear Engineering Research and Designing Institute ,Shanghai ,China ,Post Code: 200233) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30( 5) . -792 -795

By making use of the metallic foil structures with a low normal reflectivity to reduce the heat losses ,the reflective type metallic isolation structures have been successfully used in the equipment items and pipelines in pressurized water and boiling water reactor nuclear power stations for the purpose of thermal isolation. The principles of the protective hot box method was applied to conduct a metallic isolation layer thermal performance test. Based on the heat transfer theory and numerical analytic methods ,a heat transfer analytic model for isolation layer structures was established and by using the software Matlab ,a calculation program was prepared to seek solutions to the equations of the model. The calculation results were compared with the test data. It has been proven that the analytic model thus established can correctly simulate the key parameters influencing the thermal performance of the isolation structures. Finally ,the analytic model thus established was used to obtain the relationship curves showing the influence of the number of the metallic foil layers ,metallic foil spacing ,normal reflectivity of the metallic foil and temperature on the hot surface of the isolation structure on the thermal performance. **Key words:** reflective type metallic isolation structure ,protective hot box method ,metallic isolation layer thermal performance test ,numerical analysis

循环流化床锅炉下排气分离装置的改造 = **Research and Application of Exhaust Pipe Separation Device** [刊 ,汉] YANG Qun-feng ,CAO Ying ,DONG Zhe ( Jining Branch ,Shandong Provincial Special Equipment Inspection Research Institute ,Jining ,China ,Post Code: 272025) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30( 5) . -796 -801

In the light of the problem of current downward exhaust gas cyclone separators having a relatively low separation efficiency, the downward exhaust gas cyclone separator in a CFB boiler was chosen to conduct a reconstruction, slots were provided in the lower part of the exhaust gas pipe and guide plates were additionally installed in the exhaust gas pipe. A numerical simulation was performed of the downward exhaust gas cyclone separator and the ash particles outgoing from the separator and dust removal devices were sampled and analyzed before and after the reconstruction. On this basis, the gas-solid two-phase flow after entering the exhaust gas pipe was studied through a secondary separation. It has been found that the separation device can effectively enhance the separation efficiency of the separator. **Key words:** downward exhaust gas cyclone separator, separation device in an exhaust gas pipe, secondary separation, separation efficiency

电站锅炉给水前置泵双速改造的必要性分析 = **Analysis of the Necessity of the Dual-speed Reconstruction of the Feedwater Booster Pump of a Utility Boiler** [刊, 汉] HU Si-ke, CHEN De, LIU Ru-zhou, WANG Shuo-lin

(College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(5). - 802 - 807

For the current large and medium-sized units, to enhance the cost-effectiveness of boiler feed water systems, the authors put forward for the first time a version to conduct a dual-speed reconstruction of the rated speed of the booster pump and undergo a series coordinated operation with the variable speed main feed water pump. In the meantime, whether or not any cavitation will happen in the system after the reconstruction was argued. Through a comprehensive case contrast and analysis, it has been proven that the reconstruction version is technically feasible, economically rational and operationally reliable, thus offering a reliable theoretical basis for concrete implementation in engineering projects. **Key words:** boiler feedwater, booster pump, main feed water pump, dual speed switch-over, series operation

大功率可调节等离子点火实验研究与工业应用 = **Experimental Study of High Power Controllable Plasma Ignition and Its Application in Industries** [刊, 汉] ZHU Xing-ying, CHEN Feng, ZHOU Fa (Beijing City Key Laboratory on Electric Arc Plasma Application Equipment, Aerospace Shenjie (Beijing) Environmental Protection Science and Technology Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100074), XU Rong-tian (Shenhua Guoneng Ningxia Coal