

火电厂石膏旋流器分离性能强化研究

安连锁, 杨 阳, 刘春阳, 沈国清

(华北电力大学 国家火力发电工程技术研究中心 北京 102206)

摘 要: 针对火电厂石膏旋流器存在空气柱、分离效率低等问题,进行了分离性能强化研究。采用 Fluent 软件,应用 RSM(雷诺应力湍流模型)、VOF(流体体积模型)、DPM(离散相模型)对石膏旋流器的流场特性进行数值模拟;并搭建实验台分别对无中心棒、插入圆柱形中心棒、倒锥形中心棒的石膏旋流器进行性能实验,获得生产能力、分股比、分离效率等指标参数的变化规律。研究表明:石膏旋流器内存在负压区,导致外界空气从两端出口倒流进入形成空气柱;空气的螺旋运动会引起能量损失;采用中心棒可有效消除空气柱,降低能耗,提高生产能力,对于石膏旋流器的分离有很好的促进作用,并具有良好的入口压力适应性。

关 键 词: 生产能力;分股比;分离效率;中心棒;石膏旋流器;分离性能

中图分类号: TK124

文献标识码: A

引 言

石膏旋流器是火电厂湿法石灰石/石膏脱硫系统中的核心部件,在运行中主要存在空气柱、底流夹细、分离效率低等问题^[1]。

以往对石膏旋流器的研究主要集中在速度场、压力场、结构改造等方面;对空气柱的研究主要集中在形成机理、外形、直径等方面,也有学者提出插入中心棒来取代空气柱^[2~3],但中心棒的形式仅仅局限于圆柱形。

本研究采用 Fluent 软件对旋流器内空气柱的流动特性进行了分析,并搭建实验台,对插入中心棒后旋流器的工作性能进行了研究,为石膏旋流器的设计及运行提供指导。

1 数学模型

1.1 湍流模型

石膏旋流器内部为复杂湍流,介质在旋流器内做高速旋转运动,径向压力梯度及切向速度梯度很

大,由于流体旋转和压力梯度对雷诺应力的影响不能忽略,因此选择 RSM(雷诺应力湍流模型)。

1.2 多相流模型

由于石膏旋流器内部的空气柱属于自由表面流体,且体积分数小于 10%,因此采用 VOF(流体体积)模型进行计算,且液相与气相满足式(1),即:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha_k}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

式中: α_k —第 k 项的体积分数,数值范围 0~1; u_j — j 方向上的速度分量。

体积函数模型无需求解第 1 项。第 1 项的体积函数可由式(2)得到:

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1 \quad (2)$$

1.3 VOF 模型边界条件

进口条件(速度入口):第一相为水,温度为常温,入口体积比为 1,入口速度为 5 m/s,切向进入旋流器;第二相为空气,入口体积比为零。即入口处只有水,没有空气。

出口条件(压力出口):溢流口与底流口设置为与大气相通,出口压力为当地大气压;定义 2 个出口的回流介质为空气,回流系数为 1,即回流全部为空气。

1.4 DPM 模型边界条件

在连续相流场收敛后,加入 DPM 离散相模型,对颗粒的运动轨迹进行追踪,以获得石膏旋流器的分离效率。

(1) 溢流管边界条件:逃逸。

(2) 底流管边界条件:捕捉。

(3) 筒壁边界条件:认为颗粒运动到壁面时服从镜面反射原理,以此对颗粒的下一点位置和速度参数进行计算。

1.5 网格划分

为保证生成网格的质量,将旋流器分解为进口

收稿日期: 2013-05-23; 修订日期: 2013-06-18

基金项目: 高等学校学科创新引智计划项目(B12034)

作者简介: 杨 阳(1981-),女,山西黎城人,华北电力大学讲师,博士研究生。

段、柱段、锥段、溢流管与底流管 5 个区域。将区域相邻面设置为分界面,使用相同的网格节点,对各个区域分别进行网格划分,最终生成的网格总数为 223193。经过网格无关性验证,采用该方法划分网格,模拟结果能够很好地反映旋流器内部多相流场的特性。

2 模拟结果分析

2.1 空气柱的形成

图 1 为石膏旋流器纵截面的压强分布云图。可以看出,旋流器中心区域为负压,约 -6.10 Pa 。由于旋流器的溢流口和底流口均与大气相通,由此产生了由两端出口指向中心的压力梯度,导致外界空气倒流进入旋流器内部,形成空气柱。还有一种观点认为旋流器入口浆液中携带的少量气泡也会形成空气柱^[4]。

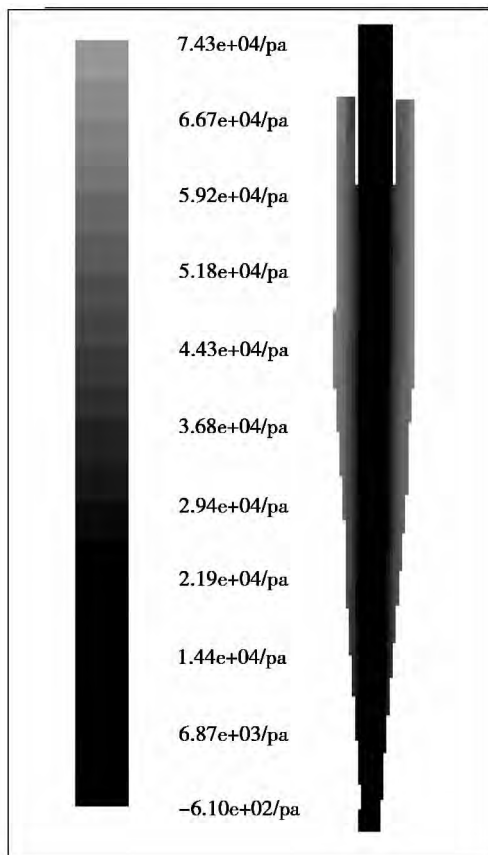


图 1 石膏旋流器内压强分布云图 (Pa)
Fig. 1 Atlas showing the pressure distribution inside the gypsum cyclone

图 2 为石膏旋流器内空气柱示意图。中心灰色

部分为空气,外侧黑色部分为液相水,两者有明显的分界面,互不掺混。

空气柱的形成时间、外形、直径等参数受旋流器内工作介质物性参数及运行参数的影响,处于不稳定状态,会导致分离效率降低^[2~5]。

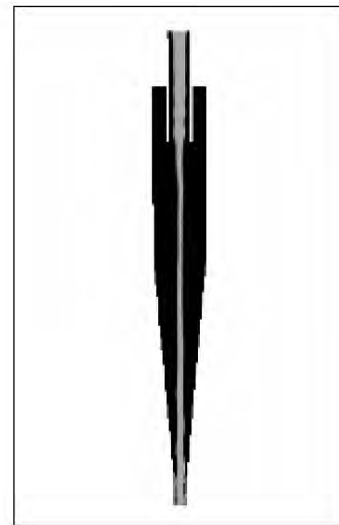


图 2 空气柱
Fig. 2 Air column

2.2 空气柱内速度场

图 3、图 4 分别为石膏旋流器柱段某横截面的轴向速度与切向速度曲线,图中标出了空气柱所在区域,由于空气柱内气体的径向速度非常小,在此不做讨论。从速度曲线图中可以看出,空气柱并不是关于旋流器中心线对称的,这是由于该旋流器采用单向入口引起的。

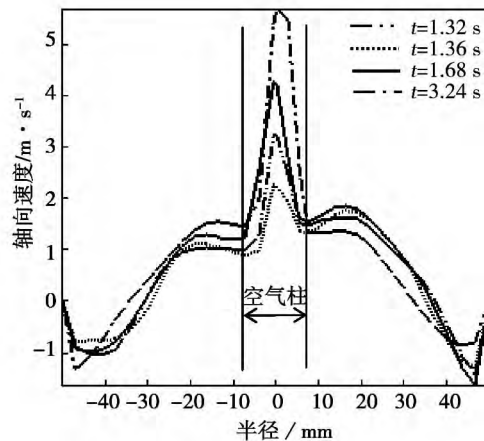


图 3 旋流器柱段轴向速度
Fig. 3 Axial velocity in the cylindrical section of the cyclone

从图 3 可以看出 在空气柱的发展过程中 空气的轴向速度随时间并不是单调增大的 而是中心速度高 气液交界面速度低的状态。t = 1.32 s 时 空气柱中心处的轴向速度为 3.4 m/s 左右 但是 t = 1.36 s 时 减小为 2.2 m/s 左右 此后 轴向速度逐渐增大至 5.7 m/s。

空气的切向速度呈现气液交界面大 中心处小的状态 且随时间的变化不是特别明显。切向速度的存在也说明了空气柱内为螺旋流动。

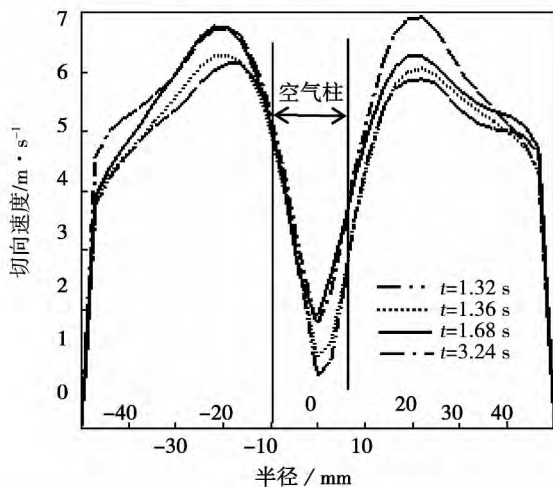


图 4 旋流器柱段切向速度分布

Fig. 4 Tangential velocity distribution in various sections of the cyclone

从空气柱的产生、发展到完全形成 均会消耗石膏浆液泵提供的能量。从节能降耗角度出发 取消空气柱不失为一个有效的方法。

2.3 分离效率

表 1 为入口压强 0.04 MPa 时 采用 DPM 模型对石膏颗粒进行轨迹追踪的结果。表中给出了在旋流器入口处追踪到的颗粒数、溢流口逃逸的颗粒数以及底流口捕捉到的颗粒数。旋流器的分离效率为底流口捕捉到的颗粒数与入口处追踪到的颗粒数的比值。

由表 1 可以看出 旋流器入口处追踪到相同石膏颗粒数时 与无中心棒相比 采用倒锥形中心棒时 底流口捕捉到的颗粒数明显增多 分离效率增大为 86.68%。

但由于采用 DPM 模型时 未考虑不同颗粒间的相互作用 因此表 1 中得出的数据与实验结果存在一定的误差 因此 还需对 DPM 模型进行改进以得到更精确的模型。

表 1 不同结构下石膏旋流器分离情况

Tab. 1 Separation conditions of the cyclone with different structures

| 结构 | 入口追踪数 | 溢流口颗粒数 | 底流口颗粒数 | 分离效率/% |
|--------|-------|--------|--------|--------|
| 无中心棒 | | 359 | 1405 | 79.65 |
| 圆柱形中心棒 | 1764 | 273 | 1491 | 84.52 |
| 倒锥形中心棒 | | 235 | 1529 | 86.68 |

3 实验研究

3.1 实验方案

图 5 为插入中心棒的石膏旋流器示意图。为了解空气柱对旋流器能耗、分离效率等指标参数的影响 分别对无中心棒、插入圆柱形与倒锥形中心棒的石膏旋流器进行了实验研究。其中 圆柱形中心棒直径为 18 mm 倒锥形中心棒上端直径为 18 mm 下端直径为 14 mm。

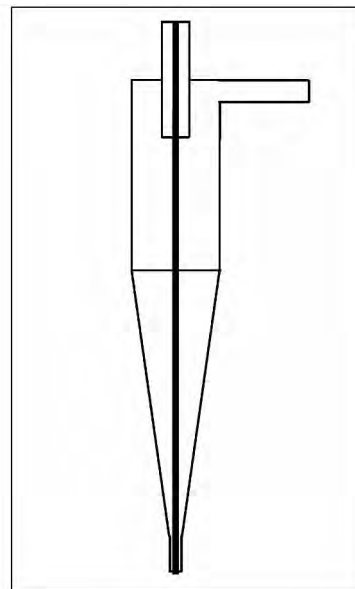


图 5 具有中心棒的石膏旋流器

Fig. 5 Gypsum cyclone with a central rod

实验所用石膏浆液密度为 1 131.58 kg/m³ 质量浓度为 17.55% 通过电磁流量计获得石膏旋流器的入口浆液体积流量 并对底流和溢流进行体积流量以及密度测量。

图 6 为清水介质时 旋流器锥段内形成的空气柱。从图中可以明显的看到空气柱呈弯曲状态 并且越到锥段下方 空气柱占据的空间越大。



图 6 石膏旋流器锥段空气柱
Fig. 6 Air column in the cone section
of the gypsum cyclone

3.2 石膏旋流器生产能力

入口浆液的体积流量即为石膏旋流器的生产能力。表 2 为采用 3 种不同结构时石膏旋流器的生产能力。可以看出,在同一结构下,生产能力均随入口压强的增大而增大。

表 2 不同结构下石膏旋流器生产能力
Tab. 2 Production capacity of the gypsum cyclone
with different structures

| 结构 | 入口压强/MPa | 生产能力/ $m^3 \cdot h^{-1}$ |
|--------|----------|--------------------------|
| 无中心棒 | 0.05 | 18.5 |
| | 0.04 | 17.19 |
| | 0.03 | 14.5 |
| 圆柱形中心棒 | 0.04 | 19.65 |
| | 0.03 | 17.38 |
| | 0.025 | 16.33 |
| 倒锥形中心棒 | 0.04 | 19.85 |
| | 0.03 | 17.8 |
| | 0.025 | 16.38 |

在相同的入口压强下,采用中心棒时生产能力明显增大。这是由于插入中心棒后,阻止了空气柱的形成,而原本被空气运动消耗掉的能量就用于提高石膏旋流器的生产能力。同时,由于倒锥形中心棒更符合空气柱的外形,所以采用该中心棒时生产

能力最高。

目前,火电厂中石膏旋流器一般是 4 台或更多台并联,全天 24 h 运行,以入口压强为 0.03 MPa 工况为例进行分析。

若采用倒锥形中心棒,石膏旋流器运行 19 h 即可达到无中心棒时全天运行的处理量,从节能角度来说,效果非常可观。

若采用 5 台石膏旋流器并联运行,每台每天仍运行 24 h,采用倒锥形中心棒可以将台数减少至 4 台,节约了设备投资成本。

3.3 石膏旋流器分股比

分股比指的是石膏旋流器底流体积流量与溢流体积流量的比值。如果分股比不合适,会有大量细小颗粒从底流管排出,不但达不到石膏旋流器本身的分离作用,这部分细小颗粒还可能引起脱硫系统下游设备真空皮带脱水机滤布的堵塞,影响真空泵的出力,甚至给设备造成一定的安全隐患。另外也会使整个系统的处理能力降低,导致脱硫系统的综合效率下降^[6]。

不同结构下石膏旋流器分股比曲线,如图 7 所示。3 种结构形式下,分股比与入口压强呈非线性关系。无中心棒时分股比最低,采用倒锥形中心棒时分股比最高。

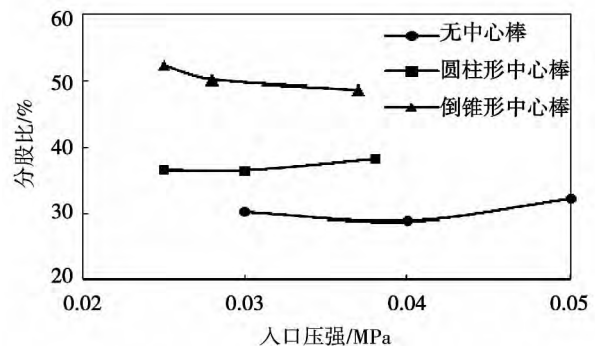


图 7 不同结构下石膏旋流器分股比
Fig. 7 Split flow ratio of the gypsum cyclone
with different structures

无中心棒时,从底流口进入的空气会对底流管中向下流动的石膏浆液产生向上的拖曳力,导致底流体积流量减小,因此无中心棒时,分股比最低。

采用中心棒后,消除了空气柱对旋流器内浆液运动的影响,并且由于倒锥形中心棒的底端直径小于圆柱形中心棒,故该结构下底流管流动截面面积变

大,底流体积流量也随之增大,因此分股比在三种结构中最高。

3.4 石膏旋流器分离效率

分离效率是衡量水力旋流器分离过程完善程度的技术指标,主要用来表示旋流器针对特定的物料在一定的操作条件下所能达到的分离效果。在固-液分离中,分离效率表示的是旋流器底流口被分离的分散相固体颗粒的质量流率与进口分散相颗粒的质量流率之比^[7]。

不同入口结构下石膏旋流器的分离效率曲线,如图 8 所示。

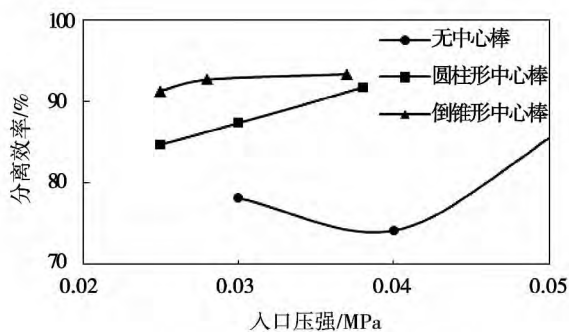


图 8 不同结构下石膏旋流器分离效率

Fig. 8 Separation efficiency of the gypsum cyclone with different structures

从图中可以看出,无中心棒时,石膏旋流器的分离效率与入口压强呈非线性关系,并且随入口压强变化的波动较大,只能在某些特定压强下才能达到较好的分离效果,这也是由于空气柱的状态会随入口压强变化引起的。

由于倒锥形中心棒阻止了空气柱的产生,又能够提供较大的分离空间,因此,采用倒锥形中心棒时分离效率最高,并且随压强变化波动很小,适合入口压强多变的场所。

4 结 论

(1) 石膏旋流器内空气柱的存在会消耗石膏浆液泵提供的能量,导致生产能力下降,分离效率降低。

(2) 石膏旋流器的生产能力随入口压强的增大而增大。

(3) 采用中心棒可阻止空气柱的形成,增加流场的稳定性,降低能耗。

(4) 倒锥形中心棒更符合空气柱的外形,在相同的入口压强下,生产能力最大,分股比及分级效率最高,且具有良好的入口压强适应性。

参考文献:

- [1] 杨亚龙. 石膏旋流器分离性能研究与结构优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
YANG Ya-long. Study of the separation performance and structural optimization of the gypsum cyclone[D]. Beijing: North China University of Electric Power, 2012.
- [2] Dyakowski T, Williams R A. Prediction of Air-Core Size and Shape in a Hydrocyclone[J]. International Journal of Mineral Processing, 1995, 43(1-2): 1-14.
- [3] Romero J, Sampaio R. A Numerical Model for Prediction of the Air-Core Shape of Hydrocyclone Flow[J]. Mechanics Research Communications, 1999, 26(3): 379-384.
- [4] Neesse T, Dueck J. Air Core Formation in the Hydrocyclone[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(4): 349-354.
- [5] 王志斌, 褚良银, 陈文梅, 等. 基于高速摄像技术的旋流器空气柱特征研究[J]. 金属矿山, 2010, (8): 140-143.
WANG Zhi-bin, CHU Liang-yin, CHEN Wen-mei, WANG Sheng-gui. Research of the characteristics of the air column inside cyclone based on high speed photography technology[J]. Metal Mine, 2010, (8): 140-143.
- [6] 黄 军, 安连锁, 杨 阳, 等. 结构参数对石膏旋流器分股比的影响分析[J]. 动力工程学报, 2011, (9): 678-681, 688.
HUANG Jun, AN Lian-suo, YANG Yang, et al. Analysis of the effect of the structural parameters on the split flow ratio of a gypsum cyclone[J]. Journal of Power Engineering, 2011, (9): 678-681, 688.
- [7] 黄 军, 安连锁. 溢流口结构对石膏旋流器分离性能的影响[J]. 动力工程学报, 2011, (2): 137-141.
HUANG Jun, AN Lian-suo. Influence of the structure of the overflow port on the separation performance of a gypsum cyclone[J]. Journal of Power Engineering, 2011, 31(2): 137-141.

(陈 滨 编辑)

Nm³. **Key words:** 660 MW ultra-supercritical opposed combustion swirling burner ,CO ,NO_x

蒸汽动力装置废汽总管压力控制系统改进研究 = **Study of the Improvement of the Exhaust Steam Mainline Pressure Control System of a Steam-driven Power Plant** [刊 ,汉] WANG Peng (Automation College ,Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) ,WANG Peng ,LIU Meng ,GE Xian-xin (CSIC Harbin No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150080) ,LI Si-qi (Automation College ,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics ,Nanjing ,China ,Post Code: 211106) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(1) . -65 ~70

On the basis of the exhaust steam mainline pressure control system of a warship prototype steam-driven power plant , proposed was an improved version by employing the forward feed control ,expert control and self-adaptive control in a comprehensive way. Such a version had been applied in real vessels. A comparison of the operating data before and after the improvement shows that the improved system can better adapt itself to any influence caused by interference from the outside world during the control process. The control duration will be shortened from 60 seconds to 36 seconds under the disturbance caused by the flow rate of the steam admitted by the deaerator. The improve system has a quicker response ,smaller overshoot and shorter stabilization time. **Key words:** steam-driven power plant ,exhaust steam mainline pressure ,self-adaptive control ,expert control

火电厂石膏旋流器分离性能强化研究 = **Study of the Enhancement of the Separation Performance of a Gypsum Cyclone in a Thermal Power Plant** [刊 ,汉] AN Lian-suo ,YANG Yang ,LIU Chun-yang ,SHEN Guo-qing (National Research Center for Thermal Power Generation Engineering Technology ,North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(1) . -71 ~75

In the light of such problems as the presence of an air column in gypsum cyclones in thermal power plants and the low separation efficiency ,a study was performed to enhance the separation performance. By using the software Fluent and the RSM Reynolds stress turbulent flow model ,VOF (volume of fluid) fluid volume model as well as the DPM (discrete particle model) model ,a numerical simulation was performed of the characteristics of the flow field in the gypsum cyclone. Furthermore ,a test rig was set up to test the performance of a gypsum cyclone without a central rod ,with a cylindrical central rod and an upside-down cone-shaped central rod being inserted respectively in order to obtain the law governing the variation of the production capacity ,split flow ratio ,and separation efficiency etc. performance indexes. The research results show that a negative pressure zone in the gypsum cyclone is present ,leading the air coming from outside world to form an air column by a reverse flow from outlets at both ends. The spiral movement of the air may bring about an energy loss and to use a central rod can effectively eliminate the air

column ,lower the energy consumption and enhance the production capacity ,thus playing a better role in promoting the separation inside the gypsum cyclone and meriting a good adaptability to the pressure at the inlet. **Key words:** production capacity ,split flow ratio ,separation efficiency ,center rod ,gypsum cyclone

洗煤对高碱煤碱金属迁移及灰熔融特性的影响 = **Influence of Coal Washing on the Metal Migration and Ash Fusion Characteristics of Coal With a High Alkali Content** [刊 汉]DAI Bai-qian ,WU Xiao-jiang ,ZHANG Zhong-xiao (Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) ,ZHANG Zhong-xiao (Energy Source Research Institute ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(1) . -76 ~80

In the light of such difficulties encountered in burning a coal rank with a high alkali content as excessively more fouling and slagging ,a typical coal rank was chosen to perform coal washing by using deionised water ,1 mol/L nitric acid and 1 mol/L ammonium acetate respectively and an ICP-OES (induction coupled plasma object emission spectrometer) ,XRF (X-ray fluorescence) and XRD (X-ray diffraction) meter etc. analyzer and instruments to conduct an analysis and testing of the alkali metal elements and mineral substance components of coal before and after coal washing by using various solvents. The research results show that the above-mentioned three kinds of solvents for coal washing have almost no removal effectiveness to Ca and Si in coal while the deionised water has an around 50% removal rate of Na ,K ,S and Fe in coal. The nitric acid and ammonia acetate can attain an about 90% removal rate of Ca and Na in coal. Albeit the fusion temperature of the coal ash after coal washing has no big change (a deformation temperature of the ash increases by 11 to 42 °C) . However ,due to the removal of Na and S etc. alkali metals after the coal washing ,the precipitation temperature of the initial liquid phase in the ash fusion process will increase from 700 °C ,if raw coal is used ,to 900 °C (nitric acid) and 1 100 °C (ammonium acetate) and the mass percentage of the initial liquid phase precipitated will also decrease from 17 wt/% to 5.38wt% (deionised water) / 5.09wt% (nitric acid) . This plays a vitally important role in reducing the fouling degree caused by burning coal with a high alkali content. **Key words:** coal with a high alkali content ,coal washing ,alkali metal ,fusion characteristics

铁基载氧体的还原特性研究 = **Study of the Reduction Characteristics of the Fe-based Oxygen Carriers** [刊 , 汉]XUAN Wei-wei ,ZHANG Jian-sheng (Department of Thermal Energy and Engineering ,Tsinghua University , Beijing ,China ,Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(1) . -81 ~85

Studied was the reduction reaction process of Fe_2O_3 and Al_2O_3 prepared by adopting the mechanical mixing method and using a thermogravimetric analyzer together with a mass spectrometer. During the reduction reaction ,three