

# 水力旋流器分离石膏浆液的试验研究

张现晨<sup>1</sup>, 王泉海<sup>1</sup>, 郑先国<sup>2</sup>, 卢啸风<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;

2. 杭州云众电力科技有限公司 浙江 杭州 310000)

**摘 要:** 针对石膏旋流器在工程应用中出现的底流浓度偏低、分级精度差等问题, 从优化分流比、分离效率、底流浓度和分级精度的角度探索提高石膏旋流器分离性能的方法。通过试验研究寻找旋流器的结构参数、操作参数和物性参数对分离性能的影响规律。结果表明: 在保证底流浓度不低于 50% 前提下, 当入口浓度为 16% 时分离性能最优的底流管径为 23 mm, 此时分流比小于 0.16, 分级精度最高。

**关 键 词:** 水力旋流器; 石膏浆液; 分级精度; 分离性能

中图分类号: TQ 028. 4

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2014.06.021

## 引 言

水力旋流器作为脱硫工艺中间环节的关键设备, 影响着脱硫系统运行的可持续性。进口的石膏旋流器由于适应性较窄, 在工程中体现出底流浓度偏低、分级精度差、易堵塞等问题<sup>[1]</sup>。因此, 加强石膏旋流器的研究, 促进脱硫关键设备国产化, 具有重要意义。

水力旋流器是一种利用离心力场进行非均相液体混合物分离的设备, 具有结构简单、操作方便、处理量大和分离效率高等优点, 广泛应用于采矿、石油、化工和食品等领域<sup>[2]</sup>。上世纪五十年代开始, 国内外科技人员就开始对水力旋流器分离技术进行研究, 包括旋流器内流体流型<sup>[3-4]</sup>, 分离性能的影响因素<sup>[5]</sup>, 及工艺计算方法等<sup>[6]</sup>。在专用石膏旋流器方面, 赵志峰用滑石粉悬浮液替代石膏浆液进行分级增浓试验并建立分级效率的数学模型<sup>[7]</sup>。杨强通过数值模拟和试验研究锥度对石膏旋流器的综合性能指标的影响<sup>[8]</sup>; 沈国清、黄军通过试验和分析得出溢流管、底流管结构和入口压力等参数对旋流器综合性能指标的影响规律并进行优化<sup>[9-11]</sup>。目前, 人们对专用石膏旋流器的研究集中在如何优化旋流器的综合性能指标如压力降、分离效率和分离粒度等方面。但对石膏旋流器的底流浓度、分级精

度等个性性能指标影响规律的研究较少。

在石膏脱水系统中, 较高的分离效率和较低的压力降只有在满足底流浓度的前提下才有意义。而且分离粒度并非越小越好, 要综合下级脱水皮带机对入口粒度的要求, 即考虑旋流器的分级精度。本研究在前人所得的结论基础上, 分析并结合石膏旋流器在实际运行中遇到的问题, 通过试验研究其分离性能并优选出一个合适的底流管径, 最后对优选旋流器的分级精度的影响因素进行研究, 为进一步优化设计石膏旋流器提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验系统

试验系统由旋流器本体、供料系统和测量系统组成。旋流器本体结构如图 1 所示。

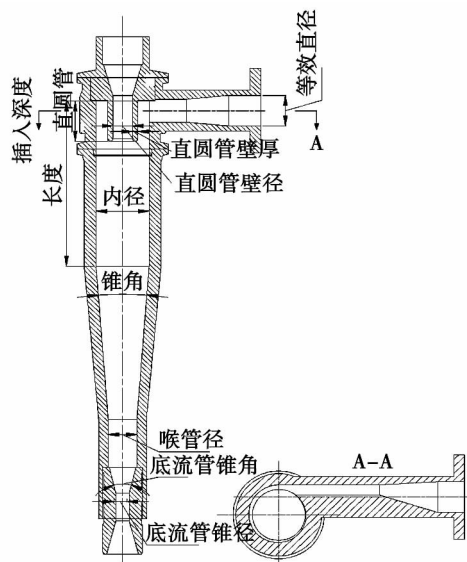


图 1 水力旋流器的结构

Fig. 1 Structure of a hydro-cyclone

收稿日期: 2014 - 01 - 16; 修订日期: 2014 - 02 - 20

作者简介: 张现晨(1986 -), 男, 山东菏泽人, 重庆大学硕士研究生。

旋流器本体由进口、旋流器筒体、溢流和底流部分组成。进口部分采用入口截面为矩形(等效直径 $D_i$ 为65 mm)螺旋线形式进料。旋流器筒体部分由柱段(内径 $D$ 100 mm,长度 $H$ 为324 mm)和锥段(锥角 $\theta_1$ 为 $9^\circ$ ,长度300 mm)连接而成,沿锥段有一段长度为95 mm的直段部分。

溢流部分包括溢流管的形状、溢流管插入深度和溢流管的壁厚。本试验采用薄壁直圆管(壁厚 $d$ 为10 mm,插入深度 $h$ 为80 mm,内径 $D_o$ 为37 mm)。底流部分包括底流管径和底流管形式,底流管径的尺寸要与入口浆液的浓度相匹配,否则可能造成底流管处堵塞。本试验采用渐扩管形式,配备3种可更换的底流管,管径 $d_n$ 分别为20、23和25 mm。

供料系统由浆液泵、循环浆液箱容积为 $3\text{ m}^3$ 、搅拌装置、管道和阀门等组成。测量系统包括对入口压力和流量,浆液粒度分布,及底流和溢流量的测量。试验采用隔膜压力表测量入口压力;采用KRC-FLO-1518H超声波流量计测量入口流量。浆液粒度分布由BT9300-HT型号激光粒度分析仪进行测量。由于底流流量小,采用“量筒计时法”进行测量;溢流流量由入口流量和底流流量相减得到。

### 1.2 试验物料

由于脱硫石膏含有未燃尽的煤粉颗粒、粉尘和未反应完全的石灰石颗粒及杂质,因此其粘结性、颗粒大小和流变性等特征与天然石膏存在差异<sup>[12]</sup>。为了更接近工程实际,本试验使用的脱硫石膏粉取自重庆某电厂脱硫石膏。试验物料的液相采用清水;固相采用脱硫石膏粉。脱硫石膏粉在环境温度为 $20^\circ\text{C}$ 时含水率9.89%,密度 $2\,254\text{ kg/m}^3$ 。

### 1.3 试验流程及工况安排

试验流程:试验采用闭式循环系统(如图2所示)在浆液泵增压作用下,搅拌均匀的石膏浆液进入石膏旋流器,分离后的粗颗粒和细颗粒经取样后分别从底流管和溢流管返回浆液箱。试验通过旁路阀门调节入口流量和压力;通过入口管道上装设的流量计和压力表来获取入口浆液的压力和流量,底流管和溢流管直接与大气相通。

实验工况:入口浓度( $C_i$ )分别为12%、16%和20%;每个入口浓度下入口压力( $P_i$ )分别取0.14、0.16、0.18、0.20和0.22 MPa。

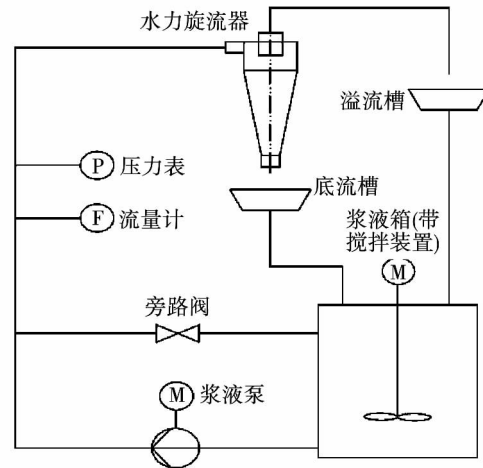


图2 试验系统流程图

Fig. 2 Flow chart of the test system

## 2 旋流器的优选

石膏旋流器的综合性能指标主要有分流比、分离效率和底流浓度。试验在满足底流浓度要求的前提下,优化分流比和分离效率;分析了各因素对石膏旋流器性能影响规律并提出了较为合理的操作压力范围和底流管径;同时,研究了旋流器的分级精度的变化规律。

### 2.1 分流比的比较

分流比也叫流量比,它表示底流排出口处的体积流量占入口体积分量的份额。合适的分流比有利于减少细小的颗粒随底流管排出,进而降低因细小颗粒带来的皮带机滤布堵塞的可能性。

以入口浓度16%为例研究底流管径对旋流器分流比的影响规律,图3为不同底流管径下分流比随入口流量的变化。从图中可以看出底流管径相同时,随着入口流量的增大,分流比减小并逐渐趋于平缓。入口流量相同时,分流比随着底流管径的增大而增大。说明底流管径增大时,旋流器中浆液较易通过底流排出。

以底流管径23 mm为例研究入口浓度对旋流器分流比的影响规律,图4为不同的入口浓度下分流比随入口流量的变化。从图中可以看出,同一入口流量下,分流比随入口浓度先增大后减小,但入口浓度对分流比影响幅度不大。

### 2.2 分离效率的比较

分离效率是指被分离的分散相物料占进料中该分散相物料的比例,又称为底流回收率<sup>[2]</sup>。以入口浓度 16% 为例研究底流管径对分离效率的影响规律。图 5 为不同的底流管径下分离效率随入口流量的变化。由图知,随着入口流量的增大,分离效率升高;随着底流管径的增大,分离效率升高。说明入口流量增大使石膏颗粒获得较强的离心场,较小的颗粒也能够克服液体曳力而沉降到底流口排出,分离效率升高。底流管径增大,分流比增大,更多的粒子通过外旋流由底流口排出,分离效率升高。

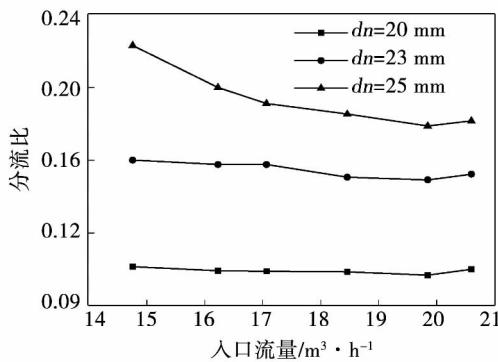


图 3 不同底流管径下分流比随入口流量的变化  
Fig. 3 Changes of the flow division ratio with the flow rate at the inlet at various underflow tube diameters

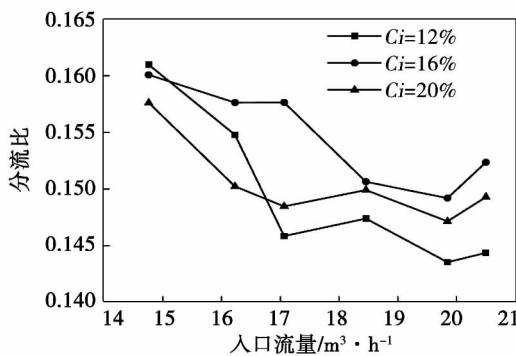


图 4 不同的入口浓度下分流比随入口流量的变化

Fig. 4 Changes of the flow division ratio with the flow rate at different concentrations at the inlet

以底流管径 23 mm 为例研究入口浓度对分离效率的影响规律,图 6 为不同的入口浓度下分离效率随入口流量的变化。从图中可以看出,当入口浓度为 16% 时的分离效率要高于入口浓度为 12% 和

20% 时。说明入口浓度对分离效率的影响比较显著,并且存在一个最佳浓度范围<sup>[13]</sup>;本试验测得底流管径为 23 mm 时,最佳浓度范围为 16% - 18%。

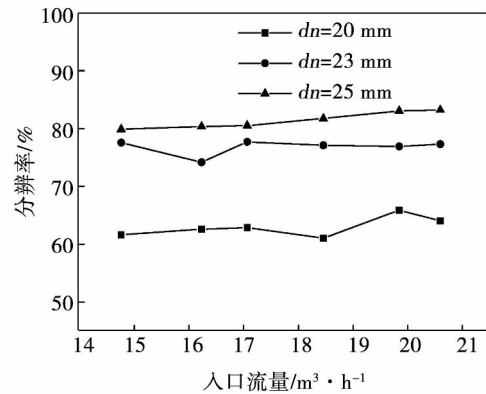


图 5 不同的底流管径下分离效率随入口流量的变化

Fig. 5 Changes of the separation efficiency with the flow rate at the inlet at different underflow tube diameters

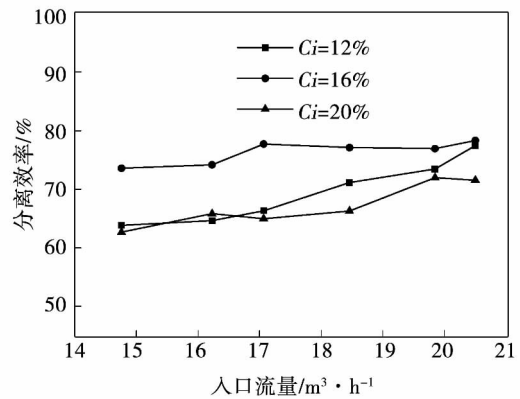


图 6 不同的入口浓度下分离效率随入口流量的变化

Fig. 6 Changes of the separation efficiency with the flow rate at different concentrations at the inlet

### 2.3 底流浓度的比较

石膏产品含水率要求低于 10% ,为了满足皮带脱水机的出力要求,石膏旋流器的底流浓度要达到 50% 。以入口浓度 16% 为例研究底流管径对底流浓度的影响规律,图 7 为不同的底流管径下底流浓度随入口流量的变化。从图 7 可以看出,底流浓度随着入口压力的增大而升高,但幅度平缓;底流浓度随着底流管径的增大而降低。说明随着入口压力升

高离心力场增强,较小的颗粒也能通过外旋流经底流口排出,表现为底流浓度升高;但随着底流管径增大,分流比增大,更多的液相也从底流口排出,导致底流浓度降低。

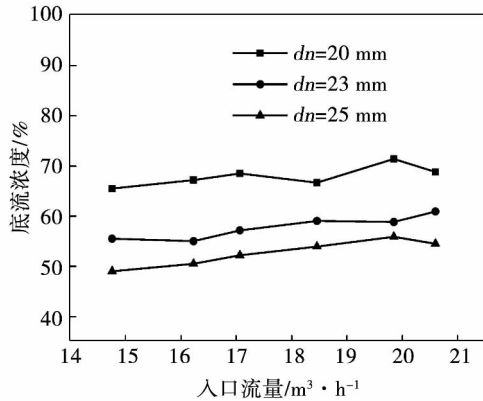


图 7 不同的底流管径下底流浓度随入口流量变化

Fig. 7 Changes of the underflow concentration with the flow rate at the inlet under different underflow tube diameters

以底流管径 23 mm 为例研究入口浓度对底流浓度的影响规律,图 8 为不同的入口浓度下底流浓度随入口流量的变化。从图 8 知,底流浓度随着入口流量的增大而升高;底流浓度随着入口浓度的升高而升高。说明入口浓度增大,更多的固体颗粒随底流流出;入口浓度继续增大,悬浮液粘度也增大,颗粒间干扰会增强,不利于分离过程的进行。

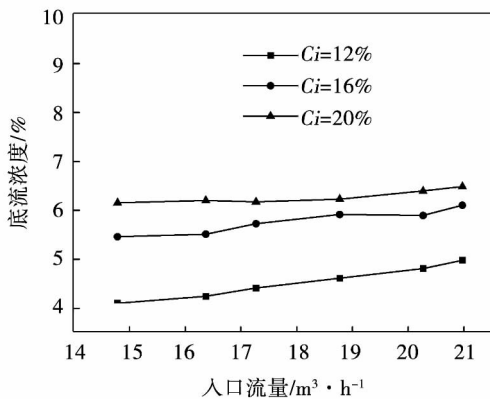


图 8 不同的入口浓度下底流浓度随入口流量的变化

Fig. 8 Changes of the underflow concentration with the flow rate at different concentrations at the inlet

综合比较,在保证底流浓度不低于 50% 前提下,当入口浓度为 16% 时分离性能最优的底流管径为 23 mm,此时分流比小于 0.16。

### 3 分级精度

分级精度是用来衡量溢流和底流中粗细颗粒的混杂情况<sup>[14]</sup>,分级精度越高,级效率曲线越陡,分离或分级过程越精确。一般用级效率曲线上对应两个分离效率时的粒径的比值来表征。

$$H_{25/75} = \frac{d_{25}}{d_{75}}$$

式中:  $H_{25/75}$ —陡度指数;  $d_{75}$ —修正级效率曲线上分离效率为 75% 相对应的颗粒粒度;  $d_{25}$ —修正级效率曲线上分离效率为 25% 相对应的颗粒粒度。

石膏旋流器底流中的细小颗粒不仅会影响石膏品质,而且容易阻塞皮带机滤布。提高旋流器分级精度,可以使尽量多的细小颗粒经溢流口排出,尽量多的大颗粒经底流口排出。以底流管径 23 mm、入口浓度 16% 为例,图 9 为入口压力对旋流器修正分级效率的影响。从图中可以看出,分级曲线随着入口压力增大向左上方移动,但陡度变小,分级精度降低;但压力超过 0.2 MPa 时,分级精度变化不大。当入口压力增大,有利于细小颗粒分离,细小颗粒分离效率提高时,但较大颗粒影响不大;入口压力增大,入口流量增大,悬浮液在旋流器内的停留时间缩短,有些颗粒还来不及分离就被上升的内旋流携走,随溢流流出,表现为分级精度降低。

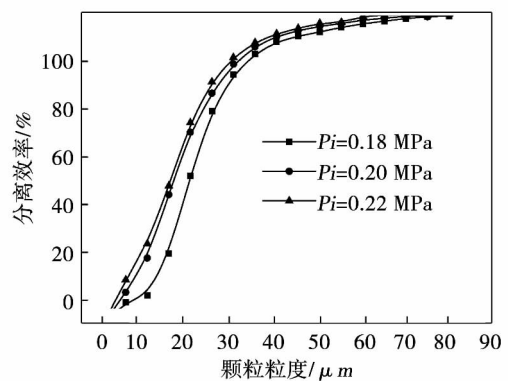


图 9 入口压力对分级效率的影响

Fig. 9 Influence of the pressure at the inlet on the classification efficiency

以底流管径 23 mm、入口压力 0.20 MPa 为例,

图 10 为入口浓度对旋流器修正分级效率的影响。从图中可以看出,当入口浓度在 12% - 16% 时,浓度对分级效率影响很小,陡度指数变化也很小;当入口浓度为 20% 时,分级效率曲线向右下方移动,且陡度指数变小。说明浓度较高时对分级效率有显著影响。入口浓度增大,悬浮液的密度和粘度也增大,使得悬浮液中的颗粒受到的阻力增加,颗粒最终难以定位,导致分级效果变差。

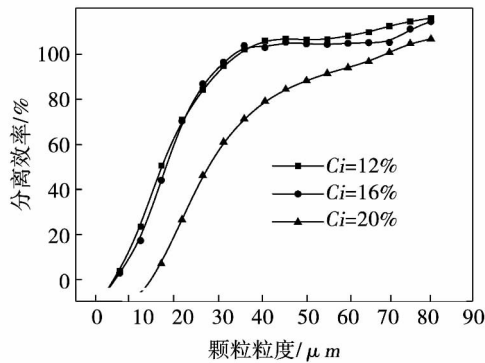


图 10 入口浓度对分级效率的影响  
Fig. 10 Influence of the concentration at the inlet on the efficiency

### 3 结 论

(1) 分流比随底流管径的增大而增大;随入口流量的增大而减小,并逐渐趋于平缓;入口浓度对分流比的影响不大。

(2) 分离效率随入口流量的增大而升高;随底流管径的增大而升高。分离效率随入口浓度的升高先升高后降低,在 12% - 20% 浓度范围内,最佳底流管径为 23 mm。

(3) 底流浓度随入口流量的增大升高;随底流管径的增大而降低。底流浓度随入口浓度的升高,但幅度逐渐变小。

(4) 分级精度随入口压力的增大而升高;但压力超过 0.2 MPa 时,分级精度变化幅度不大。当入口浓度在 12% - 16% 时,浓度对分级精度的影响很小;当入口浓度在 16% - 20% 时,分级精度升高。

(5) 通过试验和分析得出,在入口浓度为 16% 时,该石膏旋流器最佳底流管径为 23 mm,最佳入口压力范围 0.18 - 0.20 MPa,此时分流比低于 0.16,分级精度最高。

### 参考文献:

[1] 安连锁,张敬辉,黄军等.影响脱硫石膏旋流器性能的关键指标[J].中国电力,2011,44(4):71-74.  
AN Lian-suo,ZHANG Jing-hui,HUANG Jun,et al. Key indicators influencing the performance of a gypsum hydro-cyclone[J]. China Electric Power,2011,44(4):71-74.

[2] 赵庆国,张明贤.水力旋流器分离技术[M].北京:化学工业出版社,2003.  
ZHAO Qing-guo,ZHANG Ming-xian. Separation technology for hydro-cyclones[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2003.

[3] Kelsall D F. A study of the motion of solid particle in a hydraulic cyclone[J]. The Trans. Instr. Chem. Eng,1952,30(1):87-108.

[4] 徐继润,罗茜.水力旋流器流场理论[M].北京:科学出版社,1998.  
XU Ji-run,LUO Qian. Flow field theory in hydro-cyclones[M]. Beijing: Science Press,1998.

[5] Liang-Yin Chu,Wen-Mei Chen,Xiao-Zhong Lee. Effects of geometric and operating parameters and feed characters on the motion of solid particles in hydrocyclones[J]. Separation and Purification Technology,26(2002):237-246.

[6] 庞学诗.水力旋流器技术与应用[M].北京:中国石化出版社,2011.  
PANG Xue-shi. Hydro-cyclone separation technology and its applications[M]. China Petrochemical Press,2011.

[7] 赵志峰,都丽红,李秋萍.电厂烟气脱硫脱水系统的研究[J].化工装备技术,2004,25(2):7-10.  
ZHAO Zhi-feng,DU Li-hong,LI Qiu-ping. Research of flue gas desulfurization and dehydration systems in power plants[J]. Chemical Industry Equipment Technology,2004,25(2):7-10.

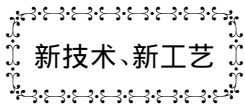
[8] Qiang Yang,Hua-lin Wang,Yi Liu. Solid/liquid separation performance of hydro-cyclones with different cone combinations[J]. Separation and Purification Technology,74(2010):271-279.

[9] 沈国清,杨亚龙,安连锁等.石灰石-石膏湿法脱硫系统石膏旋流器分级效率的研究[J].动力工程学报,2012,32(8):639-646.  
SHEN Guo-qing,YANG Ya-long,AN Lian-suo,et al. Study of the staged efficiency of a gypsum hydro-cyclone in a limestone-gypsum wet-method desulfurization system[J]. Journal of Power Engineering,2012,32(8):639-646.

[10] 黄军,安连锁,吴智泉.石膏旋流器结构参数优化设计研究[J].热力发电,2009,38(5):25-28,34.  
HUANG Jun,AN Lian-suo,WU Zhi-quan. Study of the optimized

- design of the structural parameters of a gypsum hydro-cyclone [J]. Thermal Power Generation 2009 38(5): 25-28 34.
- [11] 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 31(9): 678-681 688.  
HUANG Jun ,AN Lian-suo ,YANG Yang ,et al. Analysis of the effect of the structural parameters on the flow split ratio of a gypsum hydrocyclone [J]. Journal of Power Engineering ,2011 ,31(9): 678-681 688.
- [12] 田贺忠 郝吉明 赵 喆 ,等. 燃煤电厂烟气脱硫石膏综合利用途径及潜力分析[J]. 中国电力 2002 39(2): 64-69.  
TIAN He-zhong ,HAO Ji-ming ,ZHAO Zhe ,et al. Approach for comprehensively utilizing the gypsum in desulfurization of flue gases in coal-fired power plants and its potential analysis[J]. China Electric Power 2002 39(2): 64-69.
- [13] 邱家山 陈文梅 杜燕等. 固体浓度、颗粒大小和安装倾角对水力旋流器分离性能的影响[J]. 过滤与分离 ,1995 2: 3-6.  
QIU Jia-shan ,CHEN Wen-mei ,DU Yan ,et al. Effect of solid concentration ,particle size and installation inclination angle on the separation performance of a hydro-cyclone [J]. Journal of Filtration and Separation ,1995 5(2): 3-6.
- [14] 石小敏 崔韦鲁滨. 水力旋流器主要参数对分离精度的影响[J]. 黑龙江科技学院学报 2011 21(3): 210-214.  
SHI Xiao-min ,CUI Yu-tao ,WEI Lu-bin. Effect of main parameters of hydro-clone on separation accuracy [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology 2011 21(3): 210-214.

( 陈 滨 编辑)



## 降低热电站噪声的全套措施

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.022

据《Электрические станции》2013 年 3 月刊报道,莫斯科动力学院的专家对火力发电厂的噪声源进行了深入的分析,并较详细地阐述了各种静噪器的结构及其工作特性。

在火力发电厂,发电设备的运行与高噪声辐射有关,该噪声辐射可以超过火力发电厂及其周围地区的环保标准。

经常采用静噪器和隔离屏来降低发电设备的噪声。取决于噪声源、被要求的降噪等级和运行条件,发电设备静噪器的结构可以显著不同。例如,对于蒸汽喷出和燃气轮机装置的空气道,其特征是高频噪声频谱;而对于热水锅炉,其特征是低频-和中频噪声频谱。

现在,共有 300 多台莫斯科动力学院研制的静噪器在运行中,它们可以综合解决降低火力发电厂的噪声问题。所有已安装的静噪器的试验表明其高降噪效果和可靠性。

静噪器考虑发电设备工作的特点并具有必要的声学效果。

( 吉桂明 摘译)

heating value coal gases are all 660 °C. The flame is stable and cannot be blown off. However, the prototype burner can only burn the low heating value coal gases with their heating values being greater than 16.31 MJ/Nm<sup>3</sup> and the preheating temperature being 660 °C. Furthermore, the flame is unstable and serious flame-out phenomena occur at the root of the flame. **Key Words:** burner, high temperature low heating value coal gas, preheating temperature, flame characteristics

水力旋流器分离石膏浆液的试验研究 = **Experimental Study of a Hydrocyclone in Separating Gypsum Slurry** [刊, 汉] ZHANG Xian-chen, WANG Hai-quan, LU Xiao-feng (National Key Laboratory on Low Grade Energy Source Utilization Technology and Systems, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030), ZHENG Xian-guo (Hangzhou Yunzhong Electric Power Science and Technology Co. Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6). - 682 - 687

In the light of such problems as the underflow concentration being excessively low in engineering applications of gypsum hydrocyclones and the classification precision being poor, from the angle of optimizing the flow division ratio, separation efficiency, underflow concentration and classification precision, explored were the methods for enhancing the separation performance of a gypsum hydrocyclone. Through an experimental study, the law governing the influence of the structural parameters, operation parameters and physical parameters of the hydrocyclone on its separation performance was identified. It has been found that under the precondition of guaranteeing the underflow concentration being not lower than 50%, when the concentration at the inlet is 16%, the underflow tube diameter at which optimum separation performance can be obtained is 23 mm and at such a time, the flow division ratio is not less than 0.16 and the classification precision is the highest. **Key Words:** hydrocyclone, gypsum slurry, classification precision, separation performance

大流量标准 Y 型喷嘴内部流动特性的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Flow Characteristics Inside a Large Flow Rate Y Type Nozzle** [刊, 汉] CHEN Peng-fei, FEI Jun, LI Long-fei, YANG Wei-dong (Xi'an Space-flight Power Research Institute, Xi'an, China, Post Code: 710100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6). - 688 - 692

By using the methods proposed in the CFD, numerically simulated were the flow characteristics inside a large flow rate standard Y type nozzle, emulated and calculated were the flow characteristics inside the nozzle and studied was the influence of the change in the air consumption rate on the flow state at the outlet of the nozzle. The calculation results show that when the air consumption rate is relatively small, the flow at the outlet of the nozzle displays the annular flow characteristics. When the air consumption rate is relatively big, the flow at the outlet of the nozzle ex-