

移动颗粒层过滤高温除尘器中循环清灰系统的试验研究

(国家电力公司热工研究院, 陕西 西安 710032) 许世森

摘要: 介绍能连续稳定高效运行的颗粒介质气力循环清灰系统, 包括颗粒介质供料器、传输系统和清灰器结构优化试验研究, 系统的运行规律证明连续稳定循环清灰可行, 对移动颗粒层过滤高温除尘技术开发有较大参考价值。

关键词: 移动颗粒层; 循环清灰; 高温除尘

中图分类号: TK227.3 文献标识码: A

1 前言

移动颗粒层过滤被认为是一种很有发展前途的高温除尘技术, 对未来的 IGCC 和 PFBC 等燃煤联合循环发电系统的发展有着重要的意义。颗粒介质的连续循环清灰是移动颗粒层过滤高温除尘工艺中的难点之一。要使移动颗粒层过滤器在高温下连续稳定地运行, 则必须配备颗粒层介质的清灰再循环系统。目前, 国外研究颗粒层清灰再循环系统的主要形式是振动筛分清灰和机械提升斗循环。这种系统不能适应高温运行, 易堵易损, 故障率较高, 系统复杂, 严重制约了移动颗粒层进入工程化。本文提出气力清灰循环系统, 结构简单、尺寸小, 集循环和清灰于一体, 不需要机械传动, 易于实现大型化。国内关于移动颗粒层清灰循环的研究较少, 随着高温移动颗粒层过滤除尘技术的发展, 很有必要深入研究介质颗粒的气力清灰循环技术。

本文介绍作者从气力输送的基本理论出发尝试开发的一套颗粒层介质的循环清灰试验装置, 并进行试验研究的主要思想和结论。旨在探讨气力清灰循环过程的运行规律, 为未来颗粒层气力循环清灰系统的大型化设计提供必要的方法和依据。

2 气力清灰循环试验装置

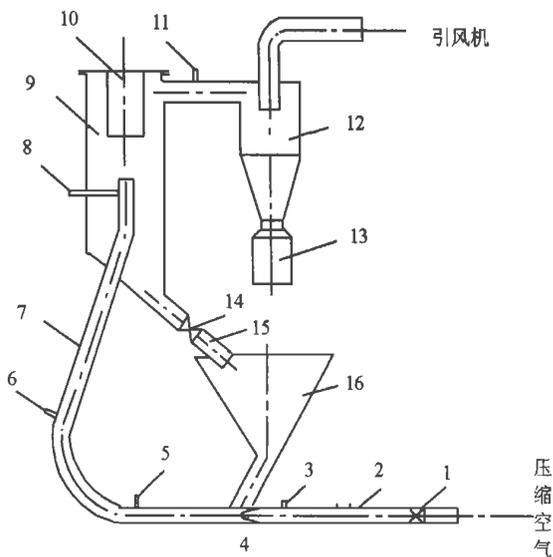
实验系统简介

收稿日期: 1999-04-07 修订日期: 2000-06-09

基金项目: “九五”国家重点科技攻关课题(97-A26-03-01)

作者简介: 许世森(1965-)男, 陕西韩城人, 国家电力公司热工研究院工学博士, 高级工程师。

图1是经过理论设计计算, 得到的实验系统简图。含尘的颗粒介质在料斗中靠自重下降, 在喷射式供料器中被高速气流携带, 经混合扩压后, 以一定的速度经输送管到达清灰器中, 靠重力和惯性分离机理将颗粒层介质和灰尘分离。该系统可以独立进行清灰循环实验研究, 能够比较准确地把握进料量、出料量、分离量、空气流量以及压力等关键参数。容易改变运行的工况, 能对气力清灰和循环规律进行详尽的研究。



1-入口气流阀门; 2-流量计; 3-压力测点; 4-喷射式供料器; 5-压力测点; 6-压力测点; 7-传输管; 8-压力测点; 9-清灰器; 10-挡筒; 11-压力测点; 12-旋风分离器; 13-收尘筒; 14-颗粒介质回料阀门; 15-回料管; 16-料斗。

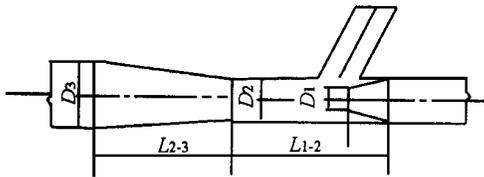
图1 颗粒层气力循环清灰实验装置系统简图

3 过滤介质供料器和传输的试验研究

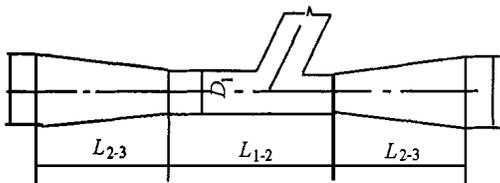
3.1 供料器的可行性试验

供料器是颗粒层气力循环清灰系统的关键部件, 首先应保证连续、均匀、稳定地送料, 无堵塞。

如图 2a 和图 2b 所示, 对这两种供料器进行可行性试验的结果表明: 对于相同的含尘颗粒层来说, 文丘利供料器的下料不均匀, 有时会发生堵塞现象, 特别是在料位较低时, 还会出现从料斗冒粉的现象。此外, 风量稍有波动便会使得供料量发生变化, 甚至下粉不畅。而喷射式供料器则能连续均匀地下粉, 而且调节的幅度较大。性能试验中累计运行了 80 多个小时, 没有发生堵塞现象, 供料量比较准确。性能差别的原因在于进料处输送空气的速度不同, 二者的差别约 4 倍。喷射速度低以及下料处不易形成负压是造成文丘利供料器供料处冒正压, 以及供料不畅的主要原因。本文选择喷射式供料器作为研究开发的方向。



(a)
图 2a 喷射式供料器



(b)
图 2b 文丘利供料器

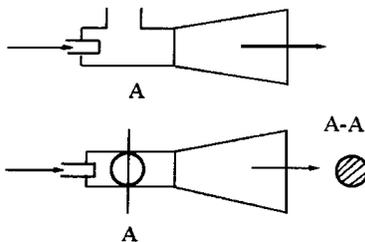


图 3a 垂直进料管（圆形进料口）

喷射式供料器的正常供料还与进料口的大小及倾斜管的倾斜角度密切相关, 图 3a 和图 3b 是两种进料口形式。将二者进行试验比较, 发现图 3b 所示的形式下料均匀, 易于调节, 堵塞的可能性很小, 而且在料斗料位较低时仍能稳定运行。而图 3a 形式的供料器下料不均匀, 时有堵塞现象, 当料斗料位较低时会从料斗冒正压。这主要有两方面的原因: ①图 3a 形式中的倾斜入口管能缓冲料斗中物料下落时的冲击力, 使进料更均

匀; ②长条形进料口控制了进料的速率, 在进料口截面 B—B 中形成两个气流流通空间, 便于气流穿透料层并卷吸携带物料, 在入料口能形成稳定的负压。而图 3a 形式的入口管太大, 物料一进入供料器便全部填充整个截面, 易堵塞并形成正压。当然, 长条形进料口的设计必须保证物料足以自然下落, 不致于搭桥堵塞。本试验装置最后选择图 3b 所示的形式进行试验研究。

3.2 传输管的可行性试验

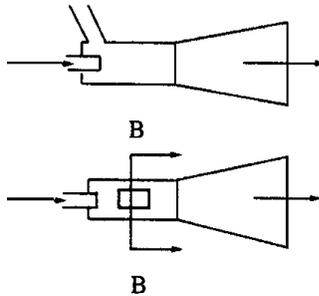


图 3b 倾斜进料管（长条形进料口）

图 4a 和图 4b 是两种传输管结构形式。将两种形式的系统进行可行性试验, 结果表明图 4b 所示的系统运行稳定性较差, 经常发生堵塞和料斗冒正压的现象, 而且调节复杂, 很难控制。该

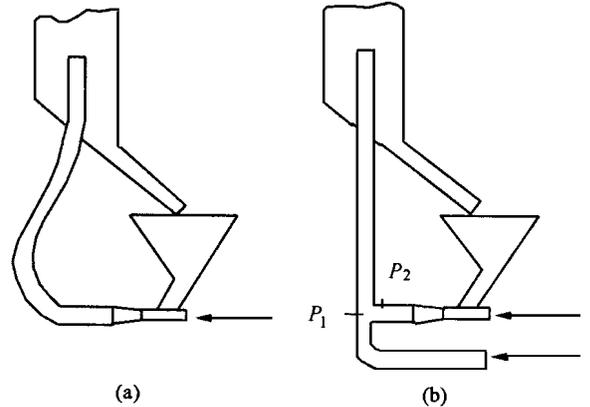


图 4 颗粒层气力循环清灰传输管形式

系统的阻力并非想象的那样小, 比图 4a 的系统压损大得多。而对图 4a 所示系统进行试验时, 一开始就能稳定地运行, 而且, 压损适中。其中的原因是: 图 4b 系统必须保证 $P_1 < P_2$, 才能使供料器正常供料。即便如此, 也会由于 P_1 的作用而引起供料器出口阻力增大, 进而影响物料的自然下落和顺利供料。当 $P_1 \geq P_2$ 时, 则会发生入料口的堵塞和料斗冒正压现象。况且要控制 P_1 和 P_2 则必然使系统复杂, 稍有压力波动, 就会影响供料器的运行。而给料气流对输送气流又有截流作用, 所以, 整个系统压损较大, 运行不稳定, 甚至无法运行。

图 4a 采用一根输送管系统, 压力和流量容易控

制,运行稳定,采用适当半径的弯头过渡,使得传输管流畅,压损适中。在可行性试验和性能试验中没有发生堵塞现象。故此,本试验装置选用图 4a 形式。

3.3 供料器的性能试验

颗粒层传输率与压缩空气的流速成函数关系,其线性越好,说明供料器的调节性能越好。而函数关系的可再现性是表征供料传输系统优劣的另一个重要指标。若能符合上面两个条件,那么颗粒层循环率完全可以由输送的空气速度或空气量来计量调节。

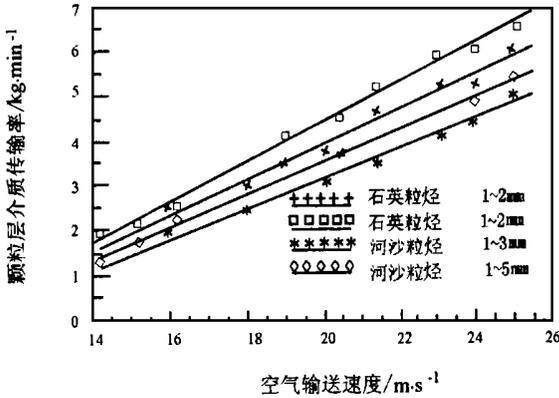


图 5 石英砂颗粒、普通河砂颗粒的传输率与空气输送速度的关系

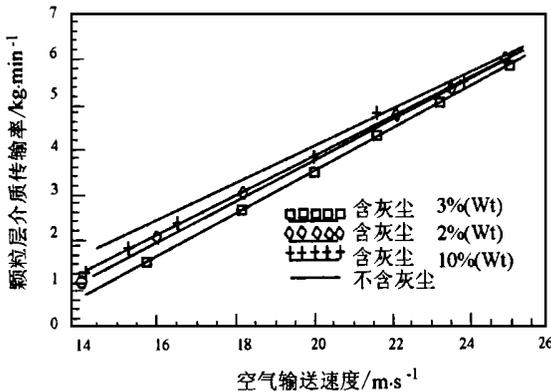


图 6 含尘颗粒的传输率与空气输送速度的关系

图 5 是针对石英砂和普通河砂在不同粒径时的传输率和空气速度的实验曲线。

试验结果表明,喷射式供料器及传输系统的颗粒传输率与输送空气量成线性关系,且再现性好。同时说明了颗粒的传输率与颗粒的粒径及种类有关。使用时必须进行详细的标定。

图 6 说明颗粒的传输率与含尘比例也有较大的关系。由于含尘颗粒占据了一部分输送空间,在传输速度较小时对传输率影响较大,传输速度较高时

影响较小。

3.4 传输性能试验

图 7 是压损与传输速度及输送比的关系曲线。图中的虚线是计算的压损值^[4]。试验说明了计算与试验结果基本吻合,只是在小速度范围内计算值比试验值略高。按计算值进行设计,压损更安全。

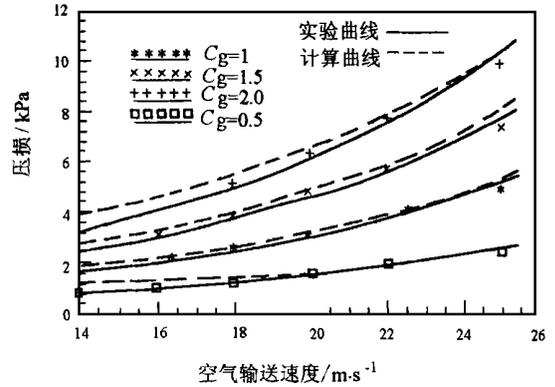


图 7 压损与空气输送速度及输送比的关系

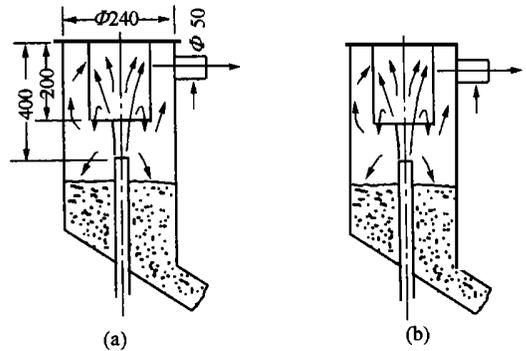


图 8 气力循环清灰器结构示意图

4 清灰试验研究

4.1 清灰器的可行性试验

图 8 是清灰器的结构简图,它实际上是一个分级器。由于颗粒层使用的石英砂或者其它砂类的粒径范围约在 1~5 mm,密度约在 $2.5 \times 10^3 \sim 2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 燃煤飞灰的粒径一般小于 0.2 mm,密度约在 $1.0 \times 10^3 \sim 1.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。所以,二者的沉降速度差别较大,石英砂介质颗粒的沉降速度范围约为 8~16 m/s; 燃煤飞灰的尘粒的沉降速度范围约为 0.01~1 m/s。尽管清灰器内的流动比较复杂,但平均上升气流速度范围约为 1~5 m/s,控制出口速度小于 6 m/s。加之,撞击和惯性分离作用,使清灰器可以达到良好的分级作用。

在进行可行性试验时,曾经对图 8a 和图 8b 的

结构形式都进行了试验。结果发现其清灰效率差别很大。图 8a 的分级效果较高, 而图 8b 的分级效率较低, 并且会有许多介质颗粒被携带离开清灰器。

$$\eta_N = \left(\frac{\text{被回收的介质颗粒量}}{\text{清灰器入口的介质颗粒量}} - \frac{\text{已回收介质颗粒中的含尘量}}{\text{入口的介质颗粒量中的含尘量}} \right) \times 100\%$$

如图 9 所示, 清灰效率随入口管气流速度增大而提高; 含灰量增加, 清灰效率也有所增加; b 型式清灰器的清灰效率比 a 型式的清灰效率稍高。但从图 10 中却反映出其分级效率远不及 a 型式。主要原因是, b 型式清灰器在分离灰尘的同时却携带了大量的石英砂颗粒, 致使分级效率降低。从总的性能上看还是 a 型式清灰器占优。

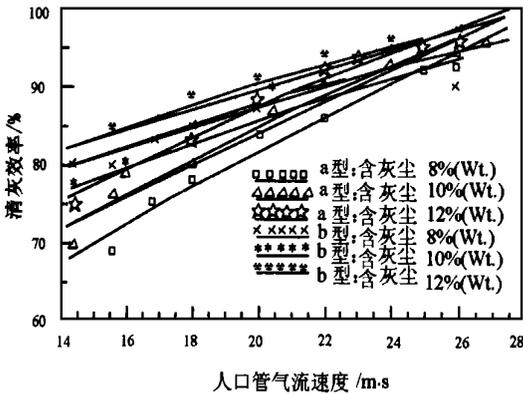


图 9 清灰效率与入口管气流速度、入口含灰量的关系

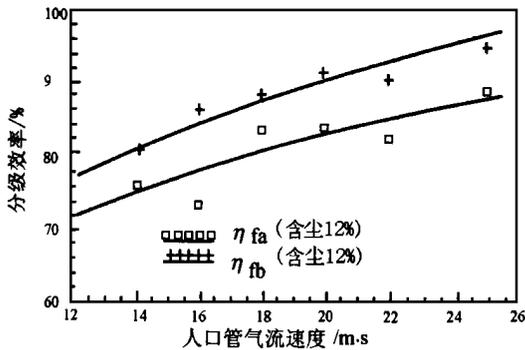


图 10 分级效率与入口管气流速度的关系

图 11 是清灰器入口粉尘和出口粉尘的粒度分布。据此可求得部分分级效率, 如图 12 所示。从而得到该清灰器的临界分级粒径 d_c 约为 $90 \sim 100 \mu\text{m}$ 。图 11 表明, 经过清灰器后, 小于 $150 \mu\text{m}$ 的尘粒残留在颗粒层中。这些尘粒在颗粒层过滤过程中, 不但不会被过滤气流所携带, 而且还会填充颗粒层的孔隙, 起到提高捕集效率的作用。

4.2 清灰器的性能试验

清灰器的清灰效率可以定义为:

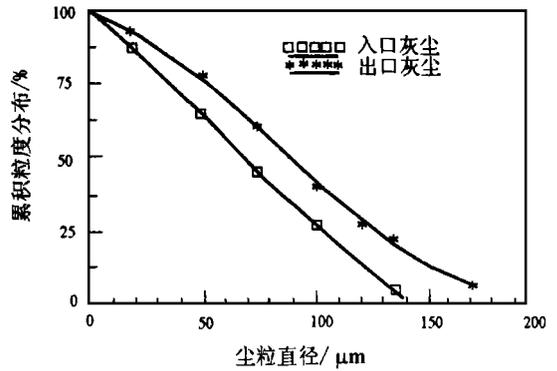


图 11 累积粒度分布

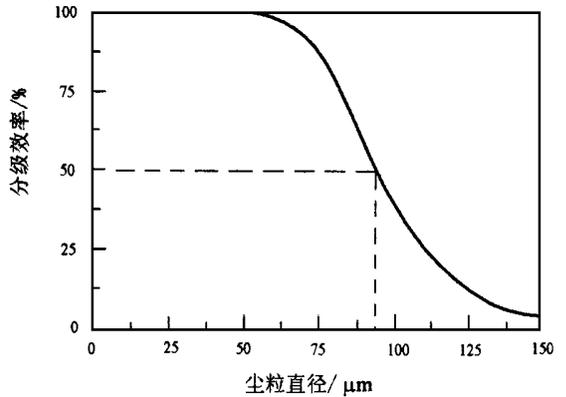


图 12 分级效率

(1) 试验证明颗粒层采用气力循环清灰是可行的。它体积小, 结构简单, 无转动部件, 运行可靠, 可实现连续、稳定的送料, 清灰效率较高, 调节性能较好, 对颗粒的循环量可达到比较准确的定量控制。试验中累计运行 100 多个小时, 没有发生堵塞和料斗冒正压现象。

(2) 试验证明供料器能达到 $1.2 \sim 6 \text{ kg/min}$ 的传输率, 运行稳定。下料管和供料口设计对供料器的性能有较大影响, 有关入口形式的研究和实验对今后供料器的设计具有重要的意义。

(3) 实验证明, 类似于 L 阀式的传输管系统, 很难实现稳定的供料, 压损较大, 且控制、调节困难。与之相比, 本文中设计的输送系统在这方面的性能非常优越。

(4) 本文中设计的清灰器能够达到较高的清灰

5 结论

(下转第 363 页)

表 1 测试应力 ($P = 0.51 \text{ MPa}$)

测点	当量应力 (MPa)	测点	当量应力 (MPa)	测点	当量应力 (MPa)
1	51.83	17	8.65	33	60.29
2	54.71	18	47.93	34	45.46
3	50.38	19	44.22	35	95.48
4	46.69	20	41.74	36	41.97
5	51.58	21	30.75	37	36.59
6	57.68	22	92.99	38	74.25
7	59.80	23	72.85	39	3.44
8	68.11	24	54.12	40	66.01
9	54.25	25	30.75	41	54.27
10	53.52	26	123.53	42	48.46
11	49.46	27	26.05	43	43.37
12	41.47	28	61.41	44	36.21
13	45.03	29	73.27	45	105.96
14	42.32	30	78.67	46	65.78
15	44.34	31	83.07	47	89.15
16	44.84	32	74.58	48	48.67

表 2 计算结果与实测数据比较 ($P = 0.51 \text{ MPa}$)

测点	测试数据 $a(\text{MPa})$	计算结果 $b(\text{MPa})$	绝对误差 $a-b(\text{MPa})$	相对误差 $ a-b /a(\%)$	修正后误差 $ a-b /a(\%)$
1	51.83	44.13	7.30	14.80	6.34
3	50.38	42.38	8.00	15.88	7.47
5	51.58	42.29	9.29	18.01	9.81
7	59.80	42.43	17.37	29.00	21.95
9	54.25	49.44	4.81	8.87	0.25
11	49.16	54.89	-5.73	11.66	21.93
13	45.03	47.76	-2.73	6.06	16.50
26	123.53	94.82	28.71	23.24	15.57
28	61.41	46.95	14.46	23.55	15.90
30	78.67	59.80	18.87	17.52	16.38
32	74.58	56.66	17.92	24.03	16.43
34	45.36	39.05	6.31	13.91	5.33
36	65.78	42.43	23.35	35.50	29.05
38	48.67	40.96	7.71	15.84	7.43
40	66.01	47.52	18.49	28.01	20.81
42	48.46	52.18	-3.72	7.68	18.44
44	36.21	39.43	-3.22	8.89	19.78

4 理论计算与实验结果比较

表 2 给出了理论计算与实验比较结果, 可以看

(上接第 355 页)

效率和分级效率。对试验灰尘的临界分级粒径 d_c 约为 $90 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

(5) 气力循环清灰系统下一步要解决的问题是过滤介质输送管的磨蚀。

出计算与实验结果的相对误差在 30% 以内 (只有 36 点为 35%), 说明计算方法可行, 结果可信。从表中还可看出绝对误差多为正数, 即计算结果普遍比测试结果小, 这可能是计算中材料性能参数取值与实际有偏差。可用修正系数 k 做修正, 即:

$$b' = ka \quad (7)$$

修正后结果与实际测试数据误差平均在 20% 以内 ($k=1.1$)。

5 结论

(1) 测试结果表明, 大开孔封头由于火筒及十字加强筋加强后, 实际应力没有超过材料的许用应力, 安全裕量较大。

(2) 计算结果与实际吻合较好, 有限元方法用于大开孔封头强度分析可行。

(3) 大开孔边缘与封头边缘应力较大, 实际设计中, 此处距离不宜过小。

(4) 十字加强筋板对于封头的强度和刚性有明显的加强作用。

参考文献:

[1] 张允真, 曹富新. 弹性力学及其有限元法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.

[2] 李之光等. 锅炉受压元件强度分析与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.

[3] 赵经文, 王宏钰. 结构有限元分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988.

[4] 杨德品. 应用薄壳力学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1988.

[5] [英]沃诺克, 本哈姆. 材料力学手册[M]. 江秉琛译. 北京: 人民教育出版社, 1982.

[6] [法]阿弗里尔. 实验应力分析手册[M]. 陈棣华译. 北京: 机械工业出版社, 1985.

(渠源 编辑)

参考文献:

[1] 上渚具贞. 粒体の空気输送[M]. 日刊工业新闻社, 1974.

[2] 黄标. 气力输送[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982, 96.

[3] 许世森. 移动颗粒层过滤高温除尘系统的结构和参数优化试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, (4).

(复 编辑)

Described in this paper is a new type of high temperature air-fired boiler featuring the following key techniques: high-temperature air combustion, a ceramic honeycomb heat storage bed, a burner adapted for graded burning of fuel, in-furnace re-circulation of flue gases and a four-way high-frequency switch-over valve. The boiler working principle and process was explained in detail and the basic innovative approach for further development of the boiler explored along with an analysis of its main technical characteristics. In addition, the authors have also assessed the potential significance of popularizing this new type of boiler in China. **Key words:** high-temperature air combustion, new type of boiler, heat exchanger, burner, analysis of characteristics

移动颗粒层过滤高温除尘器中循环清灰系统的试验研究 = **Experimental Study of a Pneumatic Conveyor-based Ash-removal System for a High-temperature Precipitator Featuring a Moving Granular Bed Filter** [刊, 汉] / XU Shi-Sen (Thermotechnical Research Institute of China National Electric Power Corporation, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 352 ~ 355, 363

Described in this paper is a pneumatic-conveying and filtrating media-based ash removal system capable of uninterrupted steady and high-efficiency operation. An experimental study aimed at structure optimization has been performed of the granular media feeding device, a transport system and the ash removal device. The operation experience of the above-cited ash removal system demonstrates the feasibility of a continuous and stable process of pneumatic-conveyor-based ash removal. The detailed information presented in the paper can serve as helpful hints and valuable reference data for the development of high-temperature ash removal technology based on the use of a moving granular bed filter. **Key words:** moving granular bed filter, pneumatic cycle ash removal, high-temperature dust elimination

混煤热天平燃烧模型研究 = **A Study of Thermobalance Model for the Burning of Blended Coals** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-jie, NIE Qi-hong, SUN Shao-zeng, ZHU Qun-yi, WU Shao-hua, QIN Yu-kun (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 356 ~ 359

Each coal component in blended coals will keep its individual combustion characteristics during the combustion process. On this basis set up is a thermogravimetric combustion model of blended coals. The results obtained from the model are in fairly good agreement with those of experimental tests. **Key words:** blended coals, combustion, model, thermobalance

油田火筒加热炉大开孔封头强度研究 = **A Study of the Strength of a Crude Oil Heating Boiler Head Perforated by Large Openings** [刊, 汉] / WANG Huai-bin, XING Zhi-dong, DU Jun, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 363 ~ 363

At present there exist no applicable standards or specifications for calculating the strength of crude oil heating boiler (COHB) heads perforated by densely distributed large openings. This has to a certain extent hampered the further development of crude oil heating boilers in China. In this paper a finite-element strength analysis and calculation for the following three types of boiler head perforated by large openings is performed with the help of a plate-shell model: i. e., one without any reinforcement, another one with a reinforcement and a third one with a cross-shaped reinforcement. The results of a theoretical and experimental study indicate that the finite-element model set up by the authors is feasible and effective for the strength analysis of boiler heads perforated by large openings. The calculation results agree quite well with those obtained through tests. The actual stress sustained by the heads has not surpassed the allowable stress of the relevant material used. **Key words:** head, strength, large openings, finite-element analysis, experimental study, heating boiler

储冰桶换热管组流动特性研究 = **A Study of the Flow Characteristics of a Heat Exchange Tube Bank in an Ice Storage Tank** [刊, 汉] / QIAN Huan-qun, MIAO Zheng-qing, HU Zhi-hua, *et al* (Xi'an Jiaotong University, Xi'an,