

不同密度煤粉的矿物质分布与燃烧特性研究

蔡攸敏, 姚 洪, 刘小伟, 徐明厚

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要:用重液浮选将一种烟煤分为高($> 2.0 \text{ g/cm}^3$)、中($1.4 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$)和低($< 1.4 \text{ g/cm}^3$)3 个密度段, 利用 SEM、XRD、XRF 等分析方法, 研究了不同密度原煤矿物分布、矿物成分、矿物粒径、灰成分、工业和元素分析及燃烧特性。结果显示: 随着原煤密度的增加, 工业分析显示煤中灰分含量增加, 挥发分和固定碳含量减少; 元素分析显示有机碳、元素氢和氮含量减小。低密度煤粉含少量内在矿物质, 而中密度和高密度煤粉矿物质含量丰富。不同的是, 前者含大量内在矿物质, 后者则是以外在矿物质为主; 3 种密度原煤的粒度分布几乎相同, 而其所含矿物质的粒径分布相差则很大。随原煤密度的增大, 其所含矿物质的粒径增加很明显; 3 种密度原煤的热重曲线显示, 低密度煤粉燃烧最为剧烈, 随着密度增大则失重和放热都越来越弱。

关键词:煤; 密度; 矿物质; 粒度; 热重

中图分类号: TQ534 文献标识码: A

引 言

煤的组成十分复杂, 其中所含矿物质是锅炉结渣和可吸入颗粒物等问题的根源。国内外学者利用许多方法对煤中无机矿物的粒径、赋存状态、形貌、成分以及煤的燃烧特性等做了大量研究。重液浮选就是其中方法之一, 它可以将原煤分为不同密度等级。国外学者 Querol、Senior 和 Pusz 研究了无机矿物质、微量元素和痕量元素在不同密度原煤中的分布^[1-4]; 学者 Russell 研究了内在矿物和外在矿物在不同密度原煤中的分布^[5]; 学者 John Lucas 研究了不同密度原煤热解生成焦的形态及膨胀比的不同^[6]; 学者 Sarbajit Ghosal 研究了不同密度煤灰与其粒径及成分之间的关系^[7]。而国内在这方面的研究较少, 文献[8~9]利用热天平研究了不同密度原煤的燃烧特性和不同密度原煤的热破碎性质。因此本文利用重液将典型烟煤浮选分为高、中、低 3 个不同的密度段, 用 SEM、XRD、XRF、热天平等分析仪器, 研究了不同密度原煤矿物分布、矿物成分、矿物粒

径、灰成分、工业和元素分析以及燃烧特性。

1 试验

1.1 试验条件

煤种采用典型烟煤。比重液用苯、四氯化碳、三溴甲烷分别按一定的体积比混合后, 配置成密度为 1.4 和 2.0 g/cm^3 的比重液。将煤粉连续浮选成密度 < 1.4 、 $1.4 \sim 2.0$ 、 $> 2.0 \text{ g/cm}^3$ 3 个低、中、高密度段, 以下分别用 C₁、C₂ 和 C₃ 表示。

1.2 样品测试

原煤元素分析在德国 Elementar Analysensysteme Gmbh 公司生产的元素分析仪上测得; 原煤工业分析在西班牙 Las Navas Instruments 公司生产的工业分析仪上测得; 原煤的矿物分布在荷兰 PANalytical 公司生产的 X 射线衍射仪上测得; 原煤内外在矿物的形貌在 FEI 公司生产的环境扫描电子显微镜上观察并拍照; 灰成分测试在美国 Edax 公司生产的 X 射线荧光能谱仪上测得; 低温灰制备在英国 Emitech 公司生产的 K1050X 型等离子体低温灰化仪上进行; 粒度测试在英国 Malvern 公司生产的 MNM5004 型激光粒度分析仪上测得; 热重使用德国 Netzsch Geratebau Gmbh 公司生产的 NETZSCH STA 409C 进行实验。

2 试验结果与讨论

2.1 基础数据分析

3 种密度原煤所占的质量百分比如表 1 所示, 其中中密度煤粉所占质量比例最大, 其次为低密度, 最少的则是以外在矿物质居多的大密度煤粉。从表 1 的测试结果可以看出, 随着原煤密度的增加, 煤中灰分含量增加, 煤中挥发分和固定碳含量减少; 从元素分析数据还知道随着原煤密度增加, 有机碳、元素

收稿日期: 2006-12-18; 修订日期: 2007-02-25

基金项目: 国家重点基础研究专项基金资助项目(2002CB211602); 国家自然科学基金资助项目(50325621)

作者简介: 蔡攸敏(1981-)男, 湖南常德人, 华中科技大学硕士研究生

氢和氮含量随之减小。

将 3 种密度煤粉 C₁、C₂ 和 C₃ 在马弗炉内 815 °C 时灼烧至燃尽制得高温灰, 对 3 种灰分做定量成分分析, 高密度煤粉所含矿物成灰元素明显高于其它两种密度原煤。如表 1 所示, 对于 3 种不同密度煤粉, 元素 Si 和 Al 的含量是最多的, 但是唯一例外的元素 Ca, 其在 3 种密度原煤中含量基本相当。分析原因, 可能是因为在 C₁ 中, 钙元素主要以有机态存在, 在 C₂ 和 C₃ 中主要以无机矿物的形式存在。Matsuoka 也证实^[12], Ca 元素和碱金属在煤中经常以两种形式存在, 分别为有机态和无机态, 并且普遍认为对于低阶煤用醋酸铵 (NH₄OAc) 淋滤即可溶解以有机态存在的钙元素。

表 1 原煤基础数据

	C ₁	C ₂	C ₃
质量百分比/%	30.3	58.5	11.2
工业分析(干燥基)			
V _d /%	27.3	21.4	16.5
A _d /%	4.4	28.9	79.4
FC _d /%	68.3	49.7	3.9
元素分析(干燥基)			
C	81.3	56.1	6.7
H	5.4	3.2	0.5
N	1.4	0.9	0.2
S+O	7.5	10.9	13.2
高温灰成分分析/%			
Al	1.49	9.57	19.26
Si	2.09	14.9	45.06
K	0.04	0.67	2.46
Fe	0.34	2.42	9.36
Na	0.03	0.08	1.17
Mg	0.04	0.23	0.87
Ca	0.15	0.12	0.25
Ti	0.07	0.90	1.05

中是最多的, 其次是 C₃ 中, 含量最小是 C₁; 石英和高铁矿则是在 C₃ 中最多, 依次是 C₂ 和 C₁; 二氧化钛则只存在于 C₃ 中; 方解石和石膏存在于 C₂ 和 C₃ 中; 伊犁石在 C₁、C₂ 和 C₃ 中都存在。这也和上文的灰成分分析所示的结果和元素 Si 和 Al 的含量是最多的相一致。

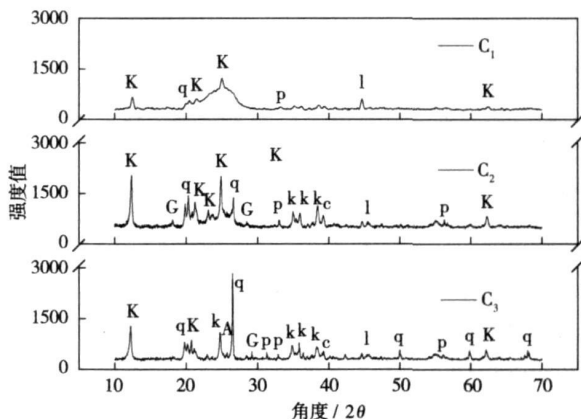


图 1 原煤矿物分布

表 2 矿物名及化学式

矿物名	化学式
A 金红石	TiO ₂
C 方解石	CaCO ₃
G 石膏	CaSO ₄
I 伊犁石	(K, H ₃ O)Al ₂ (OH) ₂ [AlSi ₃ O ₁₀]
K 高岭石	Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈
P 黄铁矿	FeS ₂
q 石英	SiO ₂

2.2.2 内外在矿物质

原煤中矿物质按空间可分为内在矿物和外在矿物两种。其中, 内在矿物是指被有机炭物质紧紧包裹的矿物质颗粒, 外在矿物则是独立的母体颗粒^[10~11]。正因为如此, 内在矿物在燃烧过程中彼此之间会发生聚合或熔融等一系列物理和化学反应, 而外在矿物相互之间发生反应的几率则极小。大部分外在矿物质会在氧化性气氛中或气化, 或破碎, 或转化成另一种物质, 或熔化成玻璃体并最终存在于灰中。因此, 单独研究内外在矿物质则更加有意义。本文对 3 种密度原煤做剖面, 然后用环境扫描电镜背散射图像识别分析煤粉颗粒的形态。如图 2 所示, 黑色为底(制样过程中的环氧树脂), 灰色为炭物质, 白色为矿物质。从图中可以看出, C₁ 几乎

2.2 矿物分布特性

2.2.1 矿物质分布

图 1 是原煤 X 射线衍射分析结果。图中大写字母所代表的矿物名称及其它信息如表 2 所示。从图中可以看出, 对低密度煤粉, 矿物含量很少, 主要以高岭石, 伊犁石和石英为主; 对于中、高密度段的煤粉, 矿物分布则更广泛, 由于煤中含有大量粘土矿物, 因此无法准确定量分析, 但是衍射强度与其在煤中的含量是正相关的, 据此可以判定, 高岭石在 C₂

全部为有机炭, 含少量内在矿物质; C₂ 含大量内在矿物质; C₃ 含大量的外在矿物质; SEM 分析结果与

前文的 XRD 分析和工业分析结果一致。

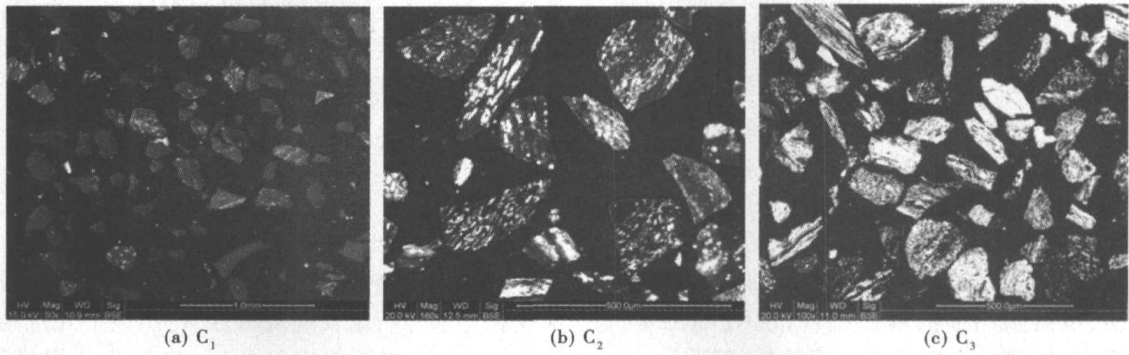


图 2 原煤剖面形态图(C₁ 放大 50 倍, C₂ 放大 160 倍, C₃ 放大 100 倍)

2.2.3 矿物质粒径分布

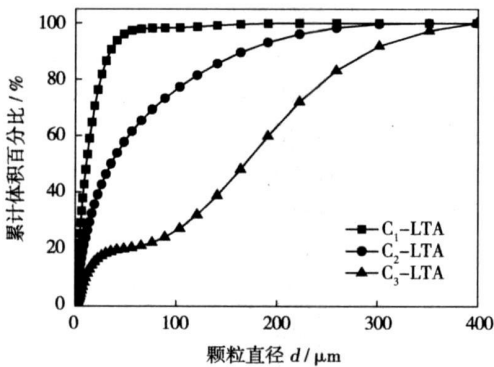


图 3 矿物质粒度分析

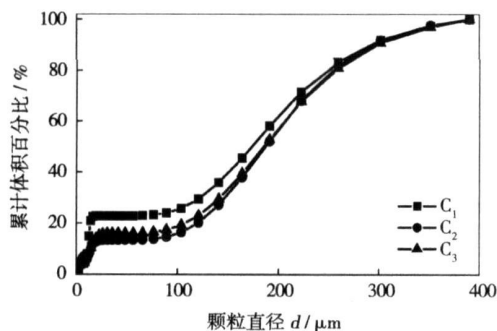


图 4 原煤粒度分析

将 C₁、C₂ 和 C₃ 3 种原煤低温灰化, 得到的低温灰便是原煤中的矿物质, 而原煤中矿物质的粒径对于燃烧过程中灰颗粒的形成及其粒径有重要影响^[13~14]。粒度分析结果如图 3 所示, 3 种原煤的矿物粒径变化很大, C₁ 的矿物粒径非常小; C₂ 的矿物

粒径居中; C₃ 的矿物粒径最大, 这也和图 2 的观察结果相一致。这一结果是否由于 3 种密度原煤的粒径变化造成的, 为寻找原因, 也对 C₁、C₂ 和 C₃ 的 3 种原煤做了粒度分析, 试验发现原煤的粒度相差很小, 结果如图 4 所示。表 3 为原煤和其矿物质的体积—粒度分布, 3 种原煤与其矿物质的中值粒径和体积平均粒径之比值随原煤密度的增大而减小, 进一步证明了小密度原煤含大量细小的内在矿物质和较多有机炭, 而大密度原煤因为含有大量的外在矿物质和较少的有机炭, 因此粒度减小比例相对较小。

表 3 颗粒粒度—体积分布

	中值粒径 $D(V, 0.5)/\mu\text{m}$	体积平均粒径 $D(4, 3)/\mu\text{m}$
C ₁	173.62	162.17
C ₂	187.09	180.51
C ₃	185.47	177.59
C ₁ -LTA	11.09	16.81
C ₂ -LTA	35.44	62.71
C ₃ -LTA	168.13	161.87

2.3 原煤燃烧特性分析

对 C₁、C₂ 和 C₃ 3 种原煤在热天平上进行热重实验, 3 种原煤实验的升温速率都为 20 K/min, 升温到达最高温度为 1 400 °C。图 5 给出了 3 种密度段煤粉的热重曲线图。

对于失重速率的定量分析, DTG 曲线更为明显。对于 C₁ 和 C₂, 曲线在 100 °C 左右, 失重速率有所增加, 这是煤粉中水分的析出造成的^[16]; 而在 200 ~ 300 °C 之间, 煤粉的失重速率又有所减缓, 这时是由于水分基本已经完全析出, 而氧气的化学吸附作用

还在继续;在 400 °C左右时,曲线开始急剧下降,这是挥发分开始大量析出造成的。对于 C₁ 的 DTG 曲线,在温度为 400~500 °C之间,曲线先是急剧下降,然后又有一个趋缓的过程,呈现出一个类似“肩部”的形状,这是挥发分大量的析出而产生的。过了这个区域后,曲线又一次急剧下降,这是固定碳着火燃烧的开始^[17]。这个固定碳着火燃烧前的肩部是挥发分含量较高的烟煤燃烧的典型特征,它的程度和温度范围则要视煤的品质而定^[17]。对于挥发分含量相对较少的 C₂ 就没有呈现出明显的“肩部”曲线特征,峰值两侧比较对称。C₃ 的 DTG 曲线则表现的十分平缓,没有很明显的峰值出现,说明 C₃ 在整个燃烧过程中,质量的失重速率一直比较稳定。

由 3 种密度原煤的 DSC 图可以看出,与热解不同,在煤粉的燃烧过程中是放热反应。比较 3 个煤粉的曲线发现,随着煤粉密度的增加,最大放热率随之减小,则反应的剧烈程度也是随之减小的。主要也是因为密度越低的煤粉中挥发分和固定碳含量越大,因此燃烧反应过程才越剧烈。

3 结 论

对典型烟煤用比重液密度分级后,研究了不同密度原煤矿物分布、矿物成分、灰成分、矿物粒径、工业和元素分析以及燃烧特性,得出以下几点结论:

(1) 随着原煤密度的增加,工业分析显示煤中灰分含量增加,挥发分和固定碳含量减少。元素分析显示有机碳、元素氢和氮含量减小。

(2) 低密度煤粉含少量内在矿物质,而中密度和高密度煤粉矿物质含量丰富。不同的是,前者含大量内在矿物质,后者则是以外在矿物质为主。

(3) 3 种密度原煤的粒度分布几乎相同,而其所含矿物质的粒径分布相差则很大;低密度煤粉所含矿物质的粒径最小,高密度煤粉所含矿物质的粒径最大,中密度煤粉所含的矿物粒径居中。

(4) 随着密度的增大,煤粉中可燃性物质含量减少,燃烧反应的剧烈程度也大大降低。低密度煤粉的最大失重速率和最大放热速率均远大于高密度煤粉,而中密度煤粉的数值介于二者之间。

参 考 文 献:

[1] QUEROL X, KLIKA Z, WEISS Z et al. Detemination of elemental affinities by density fractionation of bulk coal samples[J] . Fuel, 2001, 80(1): 83-96.

[2] ZHUANG XINGUO, QUERAL X, PLANA F, et al. Detemination of elemental affinities by density fractionation of bulk coal samples from the Chongqing coal district, Southwestem China. [J] . Coal Geology, 2003, 55(2~4): 103-115.

[3] SENIOR C L, ZENG T, CHE J, et al. Distribution of trace elements in selected pulverized coals as a function of particle size and density[J] . Fuel Processing Technology, 2000 63(2/ 3):215- 241.

[4] PUSZ S, KRZTON A, KOMRAUS J L, et al. Interactions between organic matter and minerals in two bituminous coals of different rank [J] . Coal Geogys, 1997, 33(4): 369- 386.

[5] RUSSELL NIGEL V, MENDEZ LILY B FRASER WIGLEY, et al. Ash deposition of a Spanish anthracite: effects of included and excluded mineral matter[J] . Fuel, 2002, 81(5): 657- 663.

[6] YU JIANGLONG, JOHN LUCAS, VIADIMIR STREZOV, et al. Swelling and char structures from density fractions of pulverized coal [J] . Energy & Fuels 2003, 17(5): 1160- 1174.

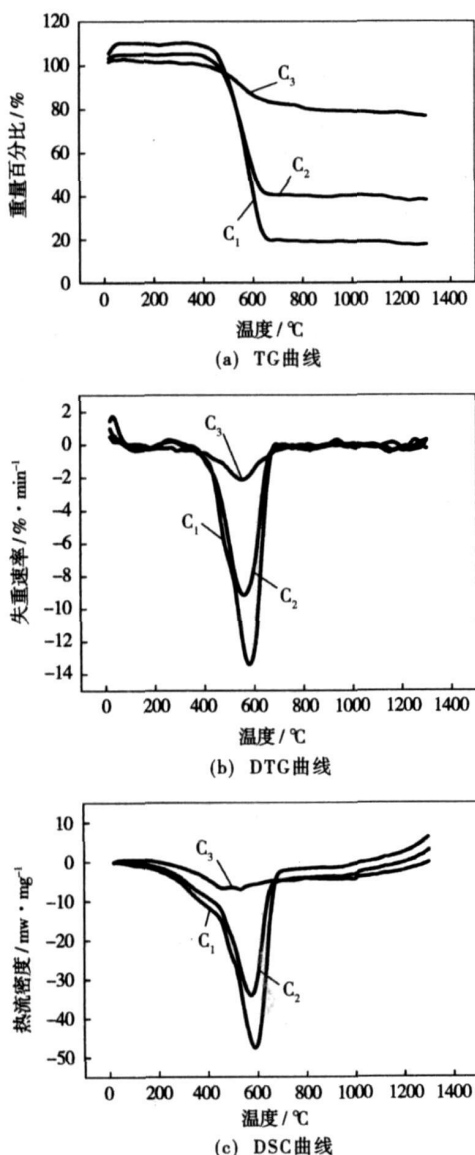


图 5 原煤的 TG、DTG、DSC 曲线

- [7] SARBAJIT GHOSAL, SELF SIDNEY A. Particle size-density relation and cenosphere content of coal fly ash[J] . Fuel, 1995, 74(4): 522—529.
- [8] SHU XINQIAN, XU XUCHANG, FAN HONGLI, et al. Application of TG-DTG analysis and centrifugal separation in the investigation of less combustible constituents in coals[J] . Thermochimica Acta, 2002, 381(1): 73—81.
- [9] 何宏舟, 骆仲决, 方梦祥, 等. 龙岩煤不同宏观煤岩组分的颗粒及其燃烧性质实验研究[J] . 燃料化学学报, 2006, 34(1): 15—19.
- [10] 于敦喜, 徐明厚. 煤焦破碎的模拟研究[J] . 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 90—93.
- [11] 刘小伟, 徐明厚, 于敦喜, 等. 燃煤过程中矿物质变化与颗粒物生成的研究[J] . 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 104—108.
- [12] KOICHI MATSUOKA, ERLAN ROSYADI, AKIRA TOMITA. Mode of occurrence of calcium in various coals[J] . Fuel, 2002, 81(11/12): 1433—1438.
- [13] 姜秀民, 杨海平, 刘 辉, 等. 粉煤颗粒粒度对燃烧特性影响热分析[J] . 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 142—145.
- [14] YU DUNXI, XU MINGHOU, SUI JIANCAI, et al. Effect of coal particle size on the proximate composition and combustion properties[J] . Thermochimica Acta, 2005, 439(1—2): 103—109.
- [15] CRELLING JOHN C, HIPPO EDWM J, WOERNER BRUCE A, et al. Combustion characteristics of selected whole coals and macerals[J] . Fuel, 1992, 71(1): 151—158.
- [16] MORGAN PAUL A, ROBERTSON STRUAN D, UNSWORTH JOHN F. Combustion studies by thermogravimetric analysis[J] . Fuel, 1986, 65(11): 1546—1551.
- [17] CUMMING JOHN W. A DTG combustion study on anthracitic and other coal chars[J] . Thermochimica Acta, 1989, 155: 151—161.

(编辑 滨)

船舶动力装置

燃用重油的 17 MW 船舶燃气轮机的设计

据《Gas Turbine World》2006 年 9~10 月号报道, Siemens Power Generation 成功完成了 17 MW 的工业和船舶 SGT—500 燃气轮机燃用重油的试验计划, 证实了预期的燃烧低成本燃料的设计性能。

由于重油的价格远远低于馏出油的价格, 所以上述试验对于船舶推进燃气轮机就具有重要的市场潜力。在由专家独立监视 6 周的广泛的试验后, 挪威船级社已签署了一份声明, 初步批准 SGT—500 燃气轮机在船上使用重油运行。

试运行是无故障的, 并且用重油运行对涡轮维护的影响是微不足道的。

SGT—500 是由原瑞典 Stal Laval 公司于上世纪 50 年代研制并推出的双轴 GT35 燃气轮机派生得到的。

GT35 于上世纪 80 年代进入船舶市场, 用于船舶和高速渡船推进, 最初是用船用轻质馏出油运行。

SGT—500 的试验结果证明, 它可以燃烧商业上可供应用的重油, 并且这样做对燃气轮机的性能和寿命没有任何不利的影

更重要的是在低于 20% 输出功率的部分负荷条件下, 也不存在可见烟。

与其它使用轻质馏出油的推进机械比较, SGT—500 在燃料和运行成本方面有了显著的减少。

(吉桂明 供稿)

不同密度煤粉的矿物质分布与燃烧特性研究 = **A Study of the Mineral Distribution and Combustion Characteristics of Pulverized Coal of Different Densities**[刊, 汉] / CAI You-min, YAO Hong, LIU Xiao-wei, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 651 ~ 655

Through the use of a heavy-liquid floatation, a kind of bituminous coal can be divided into three density sections, i. e. high ($> 2.0 \text{ g/cm}^3$), medium ($1.4 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$) and low ($< 1.4 \text{ g/cm}^3$). By utilizing SEM, XRD and XRF etc. analytic methods, a study was conducted of mineral distribution, mineral composition, particle diameter, ash constituents, industrial and elementary analysis and combustion characteristics of raw coal of different densities. The results show that with an increase in density of the raw coal, the industrial analysis indicates an increase of ash content in coal, a decrease of volatile and fixed carbon content. The elementary analysis also indicates a decrease of organic carbon, element hydrogen and nitrogen content. Low-density pulverized coal contains a small amount of internal mineral matter while medium and high-density pulverized coal contain an abundance of mineral matter. What differs is that the former contains a great deal of internal mineral matter, but in the latter a large quantity of external mineral matter predominates. The particle diameter distribution of the raw coal of three densities is almost identical. However, the particle diameter distribution of the mineral matter contained in the raw coal in question is very different. With an increase of the density of raw coal, the particle diameter of mineral matter contained in it will increase significantly. The thermogravimetric curves of the raw coal of three densities indicate that the low-density pulverized coal assumes a most intense combustion and the weight loss and heat release become ever weaker with an increase of density. **Key words:** coal, density, mineral matter, granularity, thermogravimetry

螺旋通道内受限外流传热和阻力特性的数值模拟 = **Numerical Simulation of Heat Transfer and Resistance Characteristics of the Restricted Outgoing Flow in a Spiral Channel**[刊, 汉] / LEI Yong-gang, CHU Pan, HE Ya-ling, et al (National Key Laboratory on Multi-phase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 656 ~ 660

Through a three-dimensional numerical simulation, a study was conducted of the heat transfer and flow characteristics of restricted outgoing flows inside a spiral channel with different spiral angles ($15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ$). The authors have proposed several optimization modes applicable in a certain range of Reynolds Number ($0.8 \times 10^4 \leq Re \leq 6 \times 10^4$), thereby improving the flow conditions and heat transfer at the shell side of a tube-and-shell type heat exchanger. The results of the study show that the restricted outgoing flow in the spiral channel can form an ideal plunger flow with the velocity distribution inside the channel being uniform, thus effectively minimizing and eliminating flow dead areas. Compared with a "Z"-shaped restricted outgoing flow formed by vertical baffles, the above-mentioned flow inside the spiral channel can boast a relatively high heat transfer coefficient and enjoy an obvious energy-saving effectiveness at a same pressure-drop gradient. In the range of Reynolds number under investigation, the flow in question has a comprehensive performance of optimum heat transfer and resistance when the spiral angle α is around 45° . The research findings can well provide a theoretical basis for the design of a high-efficiency and low-resistance structure at the shell side of a shell-and-tube type heat exchanger and for its further optimization. **Key words:** shell-and-tube type heat exchanger, restricted outgoing flow, spiral angle, numerical simulation, pressure drop

大型热力发电机组能耗参数的统计分析与应用 = **Statistical Analysis and Application of Energy-consumption Parameters of Large-sized Thermal Power Plants**[刊, 汉] / LI Li-ping, NIU Yu-guang (Automation College, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), ZHANG Chun-fa, WANG Hui-jie (College of Energy Source and Power, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 661 ~ 664

Based on the long term operating data and on-line performance calculation ones of a power plant, a statistico-analytical study was performed of the actual performance characteristics of the plant. Proposed was a criterion for discriminating the plant performance steady state compatible with the process thermodynamic characteristics and thermal test standards. Through a statistical analysis of the sifted out data, which meet the steady-state criterion, obtained respectively was the un-