

煤粉粒子的发射率*

刘林华 余其铮 谈和平
(哈尔滨工业大学)

许万里
(哈尔滨理工大学)

[摘要] 本文基于均质光滑球形粒子散射的 Lorentz-Mie 电磁理论,利用实验测得的煤粉粒子的复折折射率,计算了国产二十种动力煤煤粉粒子的发射率。计算结果表明,煤粉粒子的全波长发射率与粒径、粒子温度及煤种有关,并在很宽的粒径范围内远远偏离文献中常用的假定值 0.8,粒径在 1-20 μm 范围内煤粉粒子的发射率常常大于 1.0。本文解释了部分煤粒子发射率大于 1.0 的原因及其物理含义,并给出了国产二十种动力煤煤粉粒子发射率随粒径、温度变化的线算图。

关键词 煤 微粒 发射率 电磁理论
分类号 TQ038

0 引言

目前煤的燃烧已受到越来越多的关注,其中最热门的一个课题是煤的着火问题。单个煤粉粒子的升温着火规律是研究煤粉气流着火的基础。目前不少煤粉气流的着火模型建立在单个煤粒着火研究基础上,并以此研究煤粉粒子着火过程的化学反应动力学常数。研究表明煤粉粒子在锅炉炉膛内加热着火过程中辐射热占煤粒吸热总量的比例从细粒子(10 μm)的 1% 到大粒子(100 μm)可高达 50%^[1],由此可见辐射热对煤粉粒子的温升速率、煤粉粒子的着火距离有不可忽略的影响。煤粉粒子着火过程辐射热的计算中,煤粉粒子的发射率是最基本的输入参数,它的取值直接影响煤粉粒子着火模型中相关参数计算的准确性。

由于实验方面的困难目前尚无合格的测量手段测量单个煤粒的发射率。理论计算方面由于粒子在尺度参数(CD/λ)不大时其吸收和散射不属于几何光学的范畴,粒子的发射率无法用常规的大物体表面发射率的有关理论公式计算。鉴于此,文献中常近似假定煤粉粒子的全波长发射率为 0.8。本文后面的计

算将表明大部分煤种在温度 [600-1800 K] 范围内只有当粒径大于 200 μm 时煤粉粒子的全波长发射率才趋近于 0.8,而煤粉炉中燃烧的煤粉粒子只有很少一部分粒径大于 200 μm 。

Mie (1908) 从 Maxwell 电磁场方程出发导出了任意粒径和任意复折折射率、表面光滑、各向同性、均质球形粒子的散射规律,可从理论上计算粒子的发射率^[2],但理论计算必需预先测出粒子的复折折射率,由于缺乏相关煤种煤粉粒子复折折射率的实测数据,迄今尚未见到关于国产动力煤煤粉粒子发射率研究资料。

本文基于均质光滑球形粒子散射的 Lorentz-Mie 电磁理论,利用文献 [3] 实验测得的煤粉粒子的复折折射率,计算了国产二十种动力煤煤粉粒子全波长发射率随煤粒粒径、温度、煤种变化的规律,并对计算中出现的在某些粒径范围内煤粉粒子的发射率大于 1.0 的现象即所谓的发射佯谬进行解释。

1 粒子的发射率

1.1 粒子发射率的计算式

考虑一尺寸远大于热辐射波长的任意形状,不

* 国家教委博士点基金资助项目

收稿日期 1995-08-24 修改稿 1996-07-20

本文联系人 刘林华 28岁 男 博士研究生 150001 哈工大 513信箱

透明、温度均匀的封闭空腔,当空腔温度恒定不变时,空腔内将产生均匀、各向同性、非偏振的辐射场。空腔内任意一点的辐射能分布由 Planck 函数给出。若在空腔内放置一粒径远小于空腔尺寸的粒子,在平衡条件下辐射分布不变。为分析方便,不妨假设包围粒子的半径 R 远大于粒子粒径 D 的球面,球面上的一面圆 dS 以辐照 $I_{by} dS / R^2$ 照射粒子,则粒子所吸收的辐射能为:

$$\int_0^\infty \int_s I_{by} C_{\alpha\lambda} \frac{dS}{R^2} d\lambda = 4 \int_0^\infty I_{by} C_{\alpha\lambda} d\lambda \quad (1)$$

式中 $C_{\alpha\lambda}$ 为粒子的单色吸收截面,所谓吸收截面是一表观面积,即一束平行光照射粒子,被粒子吸收的能量可等效于垂直入射光的某一截面按几何光学的方式所拦截的能量,这一等效截面即为吸收截面。在平衡条件下粒子发射的总能量必需等于吸收的总能量,即:

$$\int_0^\infty W_\lambda d\lambda = 4 \int_0^\infty I_{by} C_{\alpha\lambda} d\lambda \quad (2)$$

式中 W_λ 为整个粒子在单位波长间隔内所发射的能量。粒子的单色发射率为:

$$X_\lambda = \frac{W_\lambda}{c^2 D^2 I_{by}} \quad (3)$$

由式 (2) 及式 (3) 可得

$$\int_0^\infty I_{by} (Q_\alpha - X_\lambda) d\lambda = 0 \quad (4)$$

式中 Q_α 为粒子的单色吸收效率 (粒子的吸收截面与粒子几何投影面积的比值), 上式成立必有:

$$Q_\alpha = X \quad (5)$$

全波长发射率为

$$\begin{aligned} X &= Q_\alpha = \int_0^\infty X_\lambda I_{by} d\lambda / I_b \\ &= \int_0^\infty Q_\alpha I_{by} d\lambda / I_b \end{aligned} \quad (6)$$

1.2 发射悖谬

式 (5) 和 (6) 计算得到粒子发射率有时大于 1.0, 初看起来这似乎是谬论, 其实不然。黑体指的是能将照射到它的射线全部吸收的物体。黑体定义中关于光线照射的描述属于几何光学的范畴, 即物体吸收全部几何入射辐射而不以任何方式改变入射光的行进方向。对粒径与入射光波长同一数量级或更小的粒子而言, 几何光学的概念事实上已不再适用^{[2][4]}。从图 1 所示的一束平行光照射一球形铝质小粒子时

粒子周围的 Poynting 向量场可以看出, 在远离粒子处光线与入射方向保持平行, 但在粒子邻近区域光线变形并强烈收缩^[2]。按几何光学的观点, 几何拦截范围 ($\frac{1}{4}\pi D^2$) 以外的光线应毫无障碍地通过, 而实际上部分光线却向粒子偏转并打到粒子表面上, 致使粒子的有效吸收范围大于几何拦截范围, 在这种情况下粒子吸收的能量完全有可能大于粒子按几何光学所能拦截光线的能量。由式 (3) 知, 显然 X 可大于 1.0, 全波长发射率 X 也必然可大于 1.0。

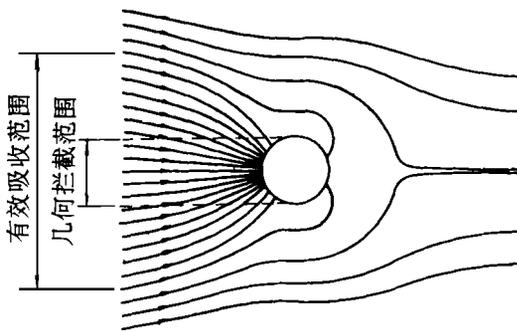


图 1 围绕铝粒子 ($x=0.3$) 的 Poynting 向量场 (不包括散射, 光的能量为 8.8 eV)

2 计算方法

一直径为 D 复折射率为 $m = n - ik$ 均质无磁性、光滑各向同性球体, 当一列波长为 λ 的单色平面波照射到球体时, 粒子对入射光的散射规律由 Lorentz-Mie 电磁理论求得^[2]。

$$Q_\alpha = \frac{2}{x^2} \sum_{j=1}^{\infty} (2j+1) \operatorname{Re}\{a_j + b_j\} \quad (7)$$

$$Q_\alpha = \frac{2}{x^2} \sum_{j=1}^{\infty} (2j+1) (|a_j|^2 + |b_j|^2) \quad (8)$$

$$Q_\alpha = Q_\alpha - Q_\alpha \quad (9)$$

式中 Q_α 、 Q_α 、 Q_α 分别为粒子的单色衰减、散射、吸收效率; x 为尺度参数, Re 表示取复数的实部, a_j 、 b_j 为由 Riccati-Bessel 函数组成的 Mie 氏散射系数。

文献 [3] 用透射法在室温下测得了国产动力煤波长在 [2.5-18.5 μm] 范围内煤粉粒子的复折射率。图 2 给出的是加福无烟煤煤粉粒子的复折射率。研究表明煤粉粒子的复折射率在 [0.5-2.5 μm] 波长范围内变化不大, 并且几乎不随温度变化^[5-7]。在波长

[0.5-18.5 μm] 温度 [600-1800 K] 范围内
 $\int_{0.5}^{18.5} E_{\lambda} d\lambda E_b \geq 0.97$, 因此当辐射源温度在 [600-1800 K] 范围内时, 式 (6) 在无限区间内的积分改为有限区间 [0.5-18.5 μm] 内的积分能满足工程计算精度的要求。

本文在计算中作如下假设:

- (1) 煤粉粒子的复折射率不随温度变化;
- (2) 煤粉粒子为光滑 Mie 氏粒子;
- (3) 可将 2.5 μm 处煤粉粒子的复折射率等值扩展至 0.5 μm

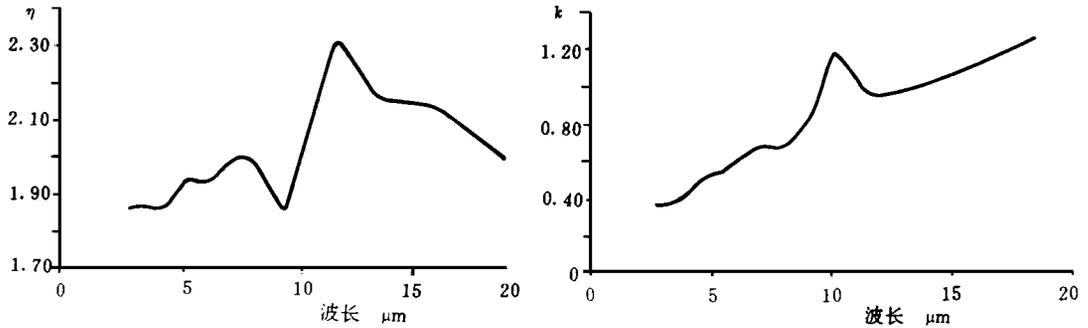


图 2 加福无烟煤煤粉粒子的复折射率

3 计算结果

业分析及元素分析见表 1 计算结果示于图 3 由图可见煤粒粒径、温度及煤种对煤粉粒子的全波长发射率有影响。

本文针对国产二十种动力煤进行计算, 煤的工

表 1 煤的工业分析及元素分析

序号	煤样来源	水份	灰份	挥发份	固定碳	碳	氢	氧	氮	硫
		M _{ad} %	A _{ad} %	V _{ad} %	FC _{ad} %	C _{ad} %	H _{ad} %	O _{ad} %	N _{ad} %	S _{ad} %
1	加福矿	0.50	29.82	3.71	65.97	64.46	1.14	2.21	0.54	1.33
2	平顶山矿	0.80	30.89	23.06	45.25	57.20	3.34	6.26	1.07	0.44
3	龙口电厂	2.00	28.63	21.52	47.85	57.22	3.20	6.81	0.98	1.16
4	元宝山露天矿	7.86	31.28	27.52	33.34	43.25	2.82	12.83	0.66	1.30
5	铁法矿	3.82	30.31	25.78	40.09	51.30	3.65	9.67	0.64	0.61
6	芙蓉矿	0.99	25.83	9.65	63.53	64.33	2.40	1.36	0.76	4.33
7	肥城矿	1.32	21.00	23.38	54.30	65.78	3.72	4.63	1.09	2.46
8	宝清矿	2.67	24.96	29.63	42.74	58.53	3.60	9.09	0.84	0.31
9	马头电厂	0.80	21.77	15.28	62.15	68.03	3.13	4.10	1.19	0.98
10	元宝山矿	8.16	37.21	25.01	29.62	38.43	2.12	12.29	0.68	1.11
11	合山电厂	1.44	48.96	12.58	37.02	37.16	1.76	5.04	0.52	5.07
12	七台河研石	1.08	65.02	12.35	25.55	26.96	1.90	3.73	0.54	0.77
13	七台河矿	1.05	20.16	23.27	55.52	68.75	3.81	4.11	1.12	1.00
14	霍林河矿	1.99	44.80	29.16	24.05	35.60	2.76	14.15	0.15	0.55

表 1(续)

序号	煤样来源	水份	灰份	挥发份	固定碳	碳	氢	氧	氮	硫
		$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	$C_{ad}/\%$	$H_{ad}/\%$	$O_{ad}/\%$	$N_{ad}/\%$	$S_{ad}/\%$
15	霍林河露天矿	8.00	22.39	33.82	35.79					
16	大同矿	1.93	32.25	28.58	37.24	50.39	3.54	10.52	0.95	0.42
17	开滦矿	1.02	38.68	18.06	42.24					
18	焦作电厂	1.62	20.05	10.67	67.66	70.31	2.92	2.81	1.12	1.17
19	元宝山电厂	7.86	31.28	27.52	33.34	43.25	2.82	12.83	0.66	1.30
20	大雁矿	4.95	26.47	29.76	38.82	51.90	3.55	12.03	0.78	0.32

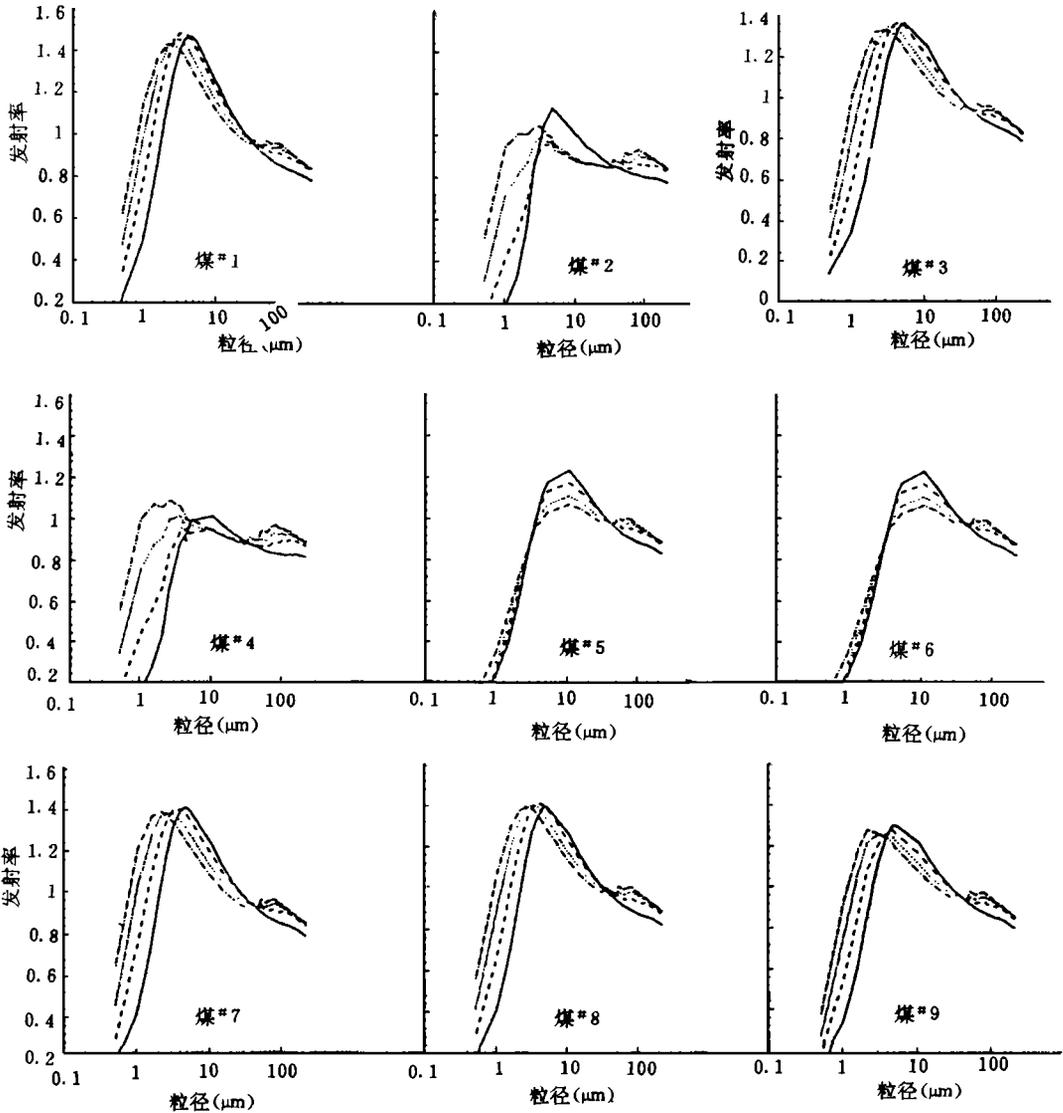


图 3-1 国产 20 种动力煤煤粉粒子全波长发射率随粒径、温度的变化

— $T=600$ - - - $T=1000$ ····· $T=1400$ - · - $T=1800$

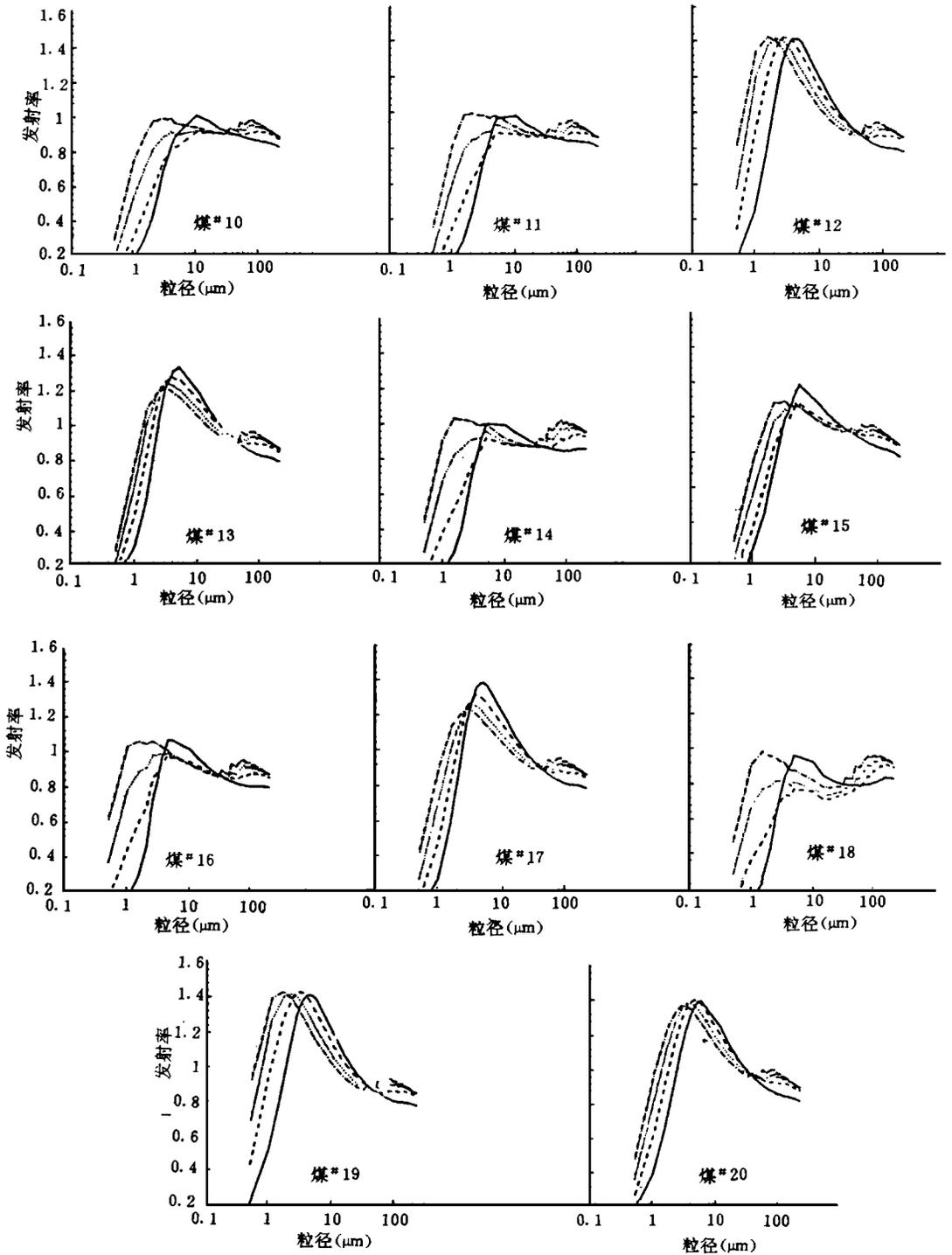


图 3-2 国产 20 种动力煤煤粉粒子全波长发射率随粒径、温度的变化

— $T=600$ — — — $T=1000$ ····· $T=1400$ - · - · $T=1800$

4 结论

参 考 文 献

本文针对国产二十种动力煤煤粉粒子的全波长发射率的计算表明,煤粉粒子的全波长发射率与煤粒粒径、温度及煤种有关。

(1)粒径的影响:随着粒径的增大,煤粉粒子的全发射率开始急剧增大,大约在粒径 $1-20\mu\text{m}$ 之间达到一峰值,然后逐渐减小并在粒径 $200-300\mu\text{m}$ 之间趋近于 0.8

(2)温度的影响:随着温度的增大,煤粉粒子全波长发射率的峰值向小粒径方向移动。

(3)煤种的影响:粒径在 $[1-20\mu\text{m}]$ 范围内煤种的变化对煤粉粒子的全波长发射率影响很大。在温度 $[600-1800\text{K}]$ 范围内部分煤种煤粒的全波长发射率峰值大于 1.0

- 1 Lawn C J Principles of combustion engineering for boilers. Academic Press, 1987
- 2 Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons, 1983
- 3 余其铮.燃煤锅炉中有关辐射特性的实验研究.技术总结报告,哈尔滨工业大学,1991.12
- 4 Field M A, et al. Combustion of pulverised coal. Institute of Energy, 1983
- 5 Howarth C R, et al. Proc. Third Heat Transfer Conf, part V, 1966, Chicago: 122-128
- 6 Blokh A G. Heat transfer in steam boiler furnaces. Hemisphere publishing corporation, 1988
- 7 Brewster M Q, Kunitomo T. The optical constants of coal, char, and limestone. ASME Journal of Heat Transfer, Nov 1984, 106: 678-683

技术改造

现代技术给老汽轮机注入新的生命力

据“Power Engineering”1996年8月号报道,当今世界各国正在利用现代技术改造老的汽轮发电机组。更高的效率和功率是这些改进预期产生的典型结果。除了增加效率导致较低的燃料费用和较低的排放外,对汽轮机的改进可以缓和其它老化部件,如锅炉和排放控制装置的应力并减少与灰份处理有关的费用。

借助于改进蒸汽流路设计、控制漏泄、改进叶型设计以及控制磨蚀和腐蚀,降低了汽轮发电机组运行的总的费用。高压级中性能降低的主要原因是漏泄,而且,即使低压级和中压级也承受了不良密封的损失。西门子公司改进了密封结构,把特殊的双带密封应用于级间密封。给静叶和动叶采用先进的涂层,可明显减少固体微粒磨蚀损坏,从而阻止由此而引起的效率下降。

几乎涡轮设计的每一个改进都需要实验工作并进行试验。新的涂层技术就是一个例子。但是许多公司正转向先进的计算机方法,用来设计新的涡轮部件(如叶片),并用来分析现有的汽轮机,以便于优化改进。GE公司使用三维计算流体动力学(CFD)设计叶片,可使总的级效率较原有设计增加2% - 2.5%。GE也应用CFD设计排气管和阀门,并分析叶尖密封漏泄。

(思娟 供稿)

chemical Industry. **Key words** surge, anti-surge control system

太阳能吸附式空气取水器和太阳能制冷结露法空气取水器的热性能分析比较 = **An Analytical Comparison of Thermodynamic Performance of Solar-energy Adsorption-based Water Collector from Air and Solar Energy Refrigeration Dewfall-based Water collector from Air** [刊, 中] / Chou Qiaoli, Liu Zongyan, et al. (China National University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 253- 256

A thermodynamic performance is conducted of an adsorption type water collector from air and a refrigeration dewfall based water collector from air with a water collection expression being given. On the basis of the said expression a comparison has been made of the water collection rate of the above-cited two methods. **Key words** water collector from air, adsorption refrigeration, refrigeration dewfall method, water collection rate

泥炭燃烧的研究 = **A Study on Peat Combustion** [刊, 中] / Zhang Jingbo, Li Xueheng et al (Northeast Electrical Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 257- 260
On the basis of peat basic combustion tests and the development and operation practice of a 1 t/h peat-fired fluidized boiler this paper proposes a method of firing peat by utilizing fluidized bed combustion technology. A detailed description is given of the peat combustion characteristics with some key issues in the design of such boilers being pinpointed. **Key words** boiler, fluidized bed, peat, combustion

煤粉粒子的发射率 = **The Emissivity of Pulverized-Coal Particles** [刊, 中] / Liu Linhua, Yu Qizheng, Tan Heping (Harbin Institute of Technology), Xu Wanli (Harbin University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 261- 266

On the basis of the classical Lorentz-Mie electromagnetic theory for isotropic and homogeneous spherical particles and by utilizing the experimentally measured complex refractive indices of pulverized-coal particles determined are the emissivity of pulverized-coal particles of twenty kinds of Chinese coals for power generation. The results of calculation show that the full wave-length emissivity of pulverized-coal particles is dependent on particle diameter, particle temperature and coal type and within a wide range of particle diameters radically deviates from the assumed value of 0.8 often given in technical literature. It has also been found that within a particle diameter range of 1- 20 μ m the emissivity of the pulverized-coal particles is often greater than 1.0. The reason why some pulverized-coal particles have an emissivity greater than 1.0 is given with an explanation of its physical meaning. For engineering calculation purposes the curves showing the variation of emissivity with particle diameter and temperature are given for twenty kinds of typical Chinese coals. **Key words** emissivity, particles, coal, electromagnetic theory

一类不可逆卡诺热机最佳效率和功率间的关系 = **Relationship between the Optimum Efficiency and Output Power of a Kind of Irreversible Carnot Heat Engine** [刊, 中] / Lu Ying, Tian Xinquan (Luoyang Teachers College) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 267- 269

Through the use of an irreversible Carnot heat engine model of Dulong-Petit nonlinear heat transfer rate and heat leakage derived is its basic optimization relation with the issue of the heat engine efficiency during its maximum output power being also discussed. **Key words** finite-time thermodynamics, Carnot engine, thermal resistance, heat leakage, basis optimization relation, optimum efficiency

斜齿圆柱齿轮瞬时啮合刚度及齿廓修形的研究 = **A Study on the Momentary Meshing Rigidity and Tooth Profile Modification of Helical Cylindrical Gears** [刊, 中] / Chand Shan, Xu Zhenzhong, Huo Zhaobo (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 270- 274

The paper presents a high-efficiency gear calculation model with gear basic effects being taken into ac-