

· 专题综述 ·

湿空气透平 (HAT) 循环的研究发展现状

(哈尔滨工业大学) 王永青 严家驷
(哈尔滨七〇三研究所) 闻雪友

[摘要] 文中介绍了新型高效热力循环——湿空气透平 (Humid Air Turbine——HAT) 循环及其相关循环的概念、特点和国内外研究发展状况。

关键词 热力循环 发电系统 湿空气透平 (HAT) 循环
中图分类号 TK471

1 引言

世界性的能源危机和环境污染对燃机装置的有效性和合理性提出了更高的要求。总的说来,近年来改善燃气轮机性能的工作一直沿两个方向进行:一是通过改进高温部件的材料和改进冷却技术来提高涡轮入口温度,同时在改善压气机、涡轮等部件的效率方面进行不懈的努力。这方面主要依赖于材料工程、叶轮机械气动力学和机器制造工艺等的发展。另一个很重要的方面是在总能系统理论的指导下,用合理的系统安排来推动燃机性能的改善,由此产生了一系列新型热力循环。这类循环或者在燃气循环的不同点注水或蒸气,或者采用水和空气以外的其它工质,或者插入某些部件如热交换器、化学回热器、空气/水饱和器等等。这些措施的效果是显著的:更合理的热力循环结构使效率提高,比功和工质流量的增长使动力输出增大,水或蒸汽的注入使 NO_x 大大降低,从而减少了环境污染^[1~3]。Kalina 循环、注蒸汽燃气轮机 (STIG) 循环、化学回路燃烧动力发电系统 (CLCS)^[1]、湿空气透平 (HAT) 循环等都是新型循环的代表,而 HAT 循环是其中特别突出的一个,被誉为跨世纪的热力循环。它的优良性能吸引了众多科技工作者的目光,许多公司不惜重金进行研制和开发。本文将介绍此循环的构成原理、系统特点和发展现状。

2 HAT 循环概念

HAT 循环称作“湿空气透平循环”,其特点在于系统中湿空气的存在。循环的原型是 Gasparovic 和 Hellemans 于 1972 年提出的^[4],那时只是在简单燃机循环的压气机后加了一个蒸发器。1983 年日本的 Mori 等进行了一些改进,1985 年以后美国的 Rao A D 等人对循环进行了进一步的完善并申请了多项专利^[5~9]。图 1 为典型 HAT 循环的流程图。

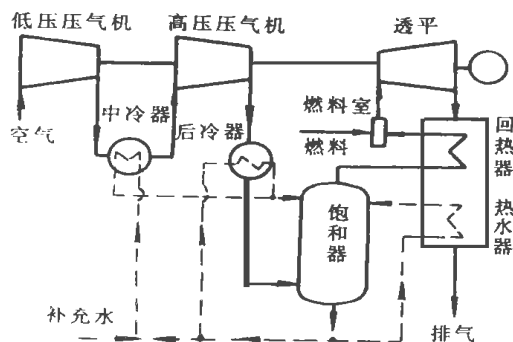


图 1 典型 HAT 循环系统图

HAT 循环建立在中冷回热燃机循环基础上。空气经低压压气机、中冷器、高压压气机、后冷器后进入饱和器底部;水在中冷器、后冷器、热水

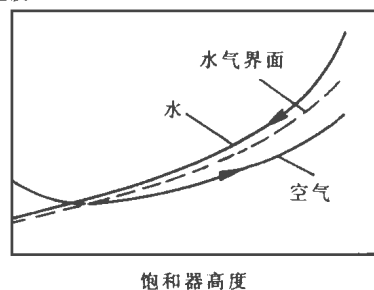


图 2 饱和器中工质的温度变化
后从饱和器顶部进入。在饱和器中,空气和水逆流接

收稿日期 1997-03-17

本文联系人 王永青 女 1970 年生 博士研究生 150001 哈工大 456 信箱

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

触,空气被加热湿化,水被冷却并部分蒸发。从饱和器出来的湿空气回收透平高温余热后进入燃烧室,经燃烧加热,生成的高温高湿燃气在燃气透平中膨胀做功,透平排气经回热后排向大气。

饱和器(又称湿化器)是 HAT 循环的特色部件,它是一个直接接触式传热传质单元。与联合循环和 STIG 循环中的余热锅炉不同,水在饱和器中是变温蒸发的(图 2)^[10],利用低温热水就可完成,这样高温余热可用来加热湿空气,从而系统的热量得到了合理的梯级利用。同时,中冷器的使用减少了系统的压缩功;后冷器的使用摒弃了回热循环的回热温度限制;随空气进入燃烧室的大量水蒸气大大降低了 NO_x 的产生速率,也改善了高温部件的冷却条件,使透平初温可以适当提高;水蒸气的加入也增大了系统工质流量,进而增大了输出。因此, HAT 循环具有高效率、高比功、低污染的特点。此外,开发 HAT 循环没有技术上的障碍,利用现有的材料和部件基础就可完成。

水的消耗是影响 HAT 循环经济性的重要因素。闭式 STIG 循环的研制为 HAT 循环的水利用打下了基础,用高效抗腐蚀冷凝器回收排气中的水蒸气或将河水和海水闪蒸来提供补充水都是解决水问题的有效方法。

HAT 循环可以以油或天然气为燃料,也可以以固体煤气化后的产物为燃料。近年来,由于石油和天然气资源短缺,煤的清洁化燃烧技术得到了迅速发展,与煤气化技术相结合的联合循环(IGCC)已经在应用中显示出了巨大优势^[3]。将清洁化燃煤技术与 HAT 循环结合起来就得到整体煤气化 HAT(IGHAT - - Integrated Gasification Humid Air Turbine)循环。由于 IGHAT 循环可以用水回收气化装置放出的大量的热,因而与燃油或天然气的 HAT 循环相比,工质中水分含量增大,系统输出也相应增加。

3 HAT 循环国内外研究发展状况

美国对 HAT 循环装置的研究起步较早。1990 年,美国的 EPRI Fluor Daniel Texaco TPM 等公司联合制定了一个时间表,准备分三个阶段实现 HAT 循环的商业化。第一阶段是在 HAT 循环机械预计性能的基础上,就实现的途径、系统的性能、投资和运行费用以及商业上的可靠性等进行评估;第二阶段研究建造 HAT 循环模型并进行整机试验;第三阶段开始商业运行。整个工作大约需要五年时间^[2,5,9]。

根据 GE ABB 和 Texaco 等公司提供的数据, Fluor Daniel 公司开发并预测了 HAT 循环的性能,并与相同技术条件下的联合循环(CG— Combined Cycle)进行了比较。结果表明,与 IGCC 相比,IGHAT 装置热效率升高,单位千瓦发电量的初投资降低 20%,从而电价格降低了 15%。对燃用天然气的系统, HAT 装置比 CC 装置的热效率高 4%,并且在 NO_x、CO₂ 和水消耗方面都占据优势,部分负荷性能也很好。唯一的不利之处是初投资偏高,从而使两个循环电价格基本相等^[2,5,6]。

此后, EPRI 等进行了将 Pratt & Whitney 的 PW4000 航空发动机改型为 FT4000 HAT 装置的研究工作。由于水的蒸发和燃料量的增大,湿燃气透平的流量比压气机大得多,使得母型机必须在机械上做较大的修改。修改是这样进行的:保留 FT4000 HAT 和 PW4000 高压压气机的通用性,通过去除叶片安装增压级来增大低压压气机的流量和压比,同时设计新的燃烧室和透平^[2,7-9]。

Fluor Daniel 公司在设计时同时考虑了燃用不同燃料(天然气和煤气)的 HAT 装置的相互改造,力争改造成本最低,改动量最小。改造的途径有两个:一是保留压气机的通用性,改变透平和燃烧室以适应工质流量的变化;二是保留透平的通用性,重新设计或选择压气机。表 1 列出了 FT4000 HAT 装置的预计性能与相应的联合循环性能的比较,表中同时也列出了将 IGHAT 发动机通过两种途径改造为燃用天然气的发动机所得到的不同性能^[9]。

预计开发 FT4000 HAT 发动机需 150 000 000\$ (1992 年 \$),另外还需要 93 000 000\$ 用于试验、设备改造、设备安装等^[9]。

表 1 HAT CG IGHAT IGCC 性能比较^[9]

项目	IGHAT	IGCC	HAT		联合循环
			保持透平通用性	保持压气机通用性	
净输出 (MW)	410.23	501.53	199	157	201
净效率 (% LHV)	42.48	42.42	55.16	55.45	52.63
NO _x (ppm)	7	25	< 5	< 5	5(利用 SCR)
CO ₂ (kg/kWh)	0.760	0.761	0.358	0.356	0.375
补充水 (m ³ /kWh)	1.772 × 10 ⁻³	1.738 × 10 ⁻³	1.151 × 10 ⁻³	1.147 × 10 ⁻³	1.192 × 10 ⁻³
总投资 (\$/kW)	1360.6	1536.3	未评估	692.9	670.7

研究还表明, HAT 循环要求高压比, 需双轴机组, 从而倾向于选用航空发动机作为母型机; 另一方面因为重型机组更适用于大型化, 且在性能和成本上都有利, 所以轻、重型混合的结构也许更为理想^[6,9]。

除美国外, 其它国家对 HAT 循环的研究大多还处在对系统流程和性能的理论计算和比较中。Chiesa P 等将以前研究者的方案综合起来并加入自己的构思, 得到了 HAT 循环的超结构流程^[11], 对流程进行了优化并与中冷联合循环和中冷 STIG 循环进行了比较。结果表明, 在相同的部件基础上, 三者的优化热效率分别为 56.98%、55.51%、53.23%, 焓效率分别为 55.13%、53.63%、51.50%。

瑞典国家工业技术开发委员会 (NUTEK) 开展了“发电发热新过程”的研究工作, 主要目的是开发热效率高环境性能好的动力循环, 蒸发式燃机循环是其中的一个重点。为此, 各研究者对燃用天然气和固体燃料补燃的蒸发式循环进行了一系列研究, 并申请了相关专利。此外, Lindegren 等还考虑了将 HAT 和 IGHAT 与区域供热结合起来的可能性, 借助热泵, 将燃气排热传给区域热水, 热泵所需动力来自循环。与热电联供的联合循环相比, 二者的电效率分别损失了 3% 和 4%, 总效率分别为 93% 和 91%。对 IGHAT 来说, 因为排气中的水蒸气含量较高 (40% 左右), 所以露点温度较高 (75°C 左右), 从而大部分热可以不借助热泵而得到利用。此时, IGHAT 与相应的 IGCC 的效率分别损失 3% 和 5%, 总效率分别为 90% 和 87%^[12]。

文献 [13] 研究了一个新型湿化器: 整个湿化器分为两部分, 每部分通过的水流量不同, 并且只是对部分空气进行湿化。据称这种方法所得到的循环效率不变甚至更高, 整个系统的换热面积可以减少 20% ~ 40%, 湿化器横截面积可降低约 50%。此外, 比利时的 Philippe J 意大利的 Stecco S S 德国的 Andreas Krause 等也进行了相关工作^[14~16]。

国内对 HAT 循环的研究始于 1992 年, 基本上限于理论研究。中科院的林汝谋等发表了我国第一篇关于 HAT 循环的论文, 对循环的性能进行了分析和计算^[17]。此后, 肖云汉等对整个循环进行了系统优化, 得出了分别对应于最大比功和最佳热效率的系统结构, 结果表明, 透平初温 1260°C 时, 循环最大比功可达 1298 kJ/kg, 最高效率可达 60.33%; 论文首次提出了“HAT 循环更适合在低压比下工作”的观点, 这与当时普遍认同的结论不同^[18,19]。文献 [20] 利用能量模型焓分析法分析了 HAT 循环中各

部件的效率贡献系数和焓损失, 得出的结论与通常焓分析有所不同: 透平性能对循环性能影响最大, 燃烧室次之, 各低温回热设备 (中冷器、后冷器、热水器、饱和器) 的影响很小。文献 [21] 建立了 HAT 循环的性能估算公式, 公式物理意义明确, 计算方便。此外, 其它研究者也做了一些很有意义的研究工作^[22~26], 西安交通大学涡轮专业建造了饱和器的实验台^[27]。

4 其它 HAT 装置

4.1 CASH IGCASH 和 CASHING 循环

压缩空气储能 (CAES - Compressed-Air Energy Storage) 并不是个新概念, 在 1972 年, Koutz S. 就申请了相关专利。消耗非用电高峰的便宜电产生的压缩空气在用电高峰时发电, 已经收到了很好的经济效益^[28]。

EPRI 拟在 Alabama 电力公司 110 MW 原型机的基础上, 将湿化方法和 CAES 技术结合起来, 构成 CASH (Compressed Air Storage with Humidification) 循环, 用于峰期发电。CASH 装置的透平连续运转, 在晚上或休息日, 所发的电全部用来驱动压气机, 产生的高压空气存入储气室备用; 在峰期, 压气机停止运转, 利用储存的空气发电, 所发的电全部供入电网。很明显, CASH 循环具有以下优点: ① 与使用空气储能系统的干式循环相比, CASH 的系统能量比 (即用于压缩空气的功与透平功之比, 也等于储气时间与总时间之比) 要小得多, 因为透平流量的增大使压缩功相应减小了; ② 透平和压气机不直接相联, 所以不用严格考虑二者的匹配问题, 可以分别购买而不用重新研制, 使投资大大降低^[2,7]。

将 CASH 循环与煤气化技术相结合就得到 IGCASH (Integrated Gasification Compressed Air Storage with Humidification) 循环。在 IGCASH 中, 燃气透平和气化装置连续运行, 压气装置间歇运行。由于供电的间歇性, 湿化方法的应用和气化器 (体积小、淬冷、气化器) 的优势, 预计 IGCASH 的气化装置将比 IGCC 减小 1/3^[7]。

HAT 循环利用压缩空气储能技术的另一种方法是 CASHING (Compressed Air Storage with

Humidification Integrated Gasification and Natural Gas),是在 IGCASH循环中另加了一个燃用天然气的 CASH循环,新加的 CASH循环只包括透平、湿化器、回热器和热水加热器,没有压缩系统和储气室。EPRI和 ESPC的研究表明,对附加的 CASH系统,每消耗 2 MW 电用于压缩空气,在峰值运行时会输出 5 MW 的电。预计 IGCASH装置投资为 995 \$ /kW,附加的 CASH装置投资为 200 \$ /kW,这时可得到两倍于 IGCASH的功率,也就是说,实际投资降到了 600 \$ /kW。如果增加 CASH的发电量,而不增加压缩设备和储存容量,初投资还可进一步降低^[2,7]。

4.2 CHAT循环

CHAT(Cascaded Humidified Advanced Turbine)循环是已申请专利的一种高级循环,虽然 CHAT中的 HAT与前面所提到的 HAT循环来自不同英文单词的缩写,但从下面的系统图可以看出,它实际上是 HAT循环的一种改型^[29,30]。

环境空气首先进入位于动力轴的低压压气机,升压后进入第一中冷器冷却,然后再进入位于动力平衡轴的中压压气机;经第二中冷器冷却的空气在高压压气机中再次升压后进入饱和器底部。空气在饱和器中加热湿化,并进入回热器进一步预热,然后经高压燃烧室加热后,到高压透平膨胀做功。高压透平的排气在低压燃烧室中再次加热,并在低压透平中做功。透平排气经回热后排向大气。

可见,CHAT循环是一双轴再热系统,低压透平带动低压压气机,高压透平带动中压和高压压气机。低压轴为动力轴,它与简单 HAT循环的最大区别在于轴系安排的不同,由此引起二者性能不同。

表 2 CHAT与联合循环、简单燃机循环的性能比较^[29]

循环类型	CHAT	联合循环	简单循环
净输出 (MW)	288	250	167
热效率 (%)			
满负荷	54.7	54.8	35.5
75% 负荷	53.6	52.9	32.9
50% 负荷	51.5	47.8	28.8
环境温度从 15°C 到 32°C			
动力输出降低 (%)	1.5	10.0	11.0
热效率降低 (%)	1.0	3.0	4.0
起动时间 (min)	30	120	30
起动费用 (\$)	1400	6500	1140

CHAT技术由 EPR 和 ESPC联合开发。动力轴系由西屋公司 W501F简单燃机改型而成,动力平衡轴系由 Dresser Rand(D-R) 提供,其中的 D-REA-614高压透平是 D-R将燃气透平和蒸汽透平技术有机结合起来专为 CHAT装置设计的。饱和器采用填充型,填料层约厚 15.24 m,饱和器总高度约 30.48 m,直径约 4.87 m,壁厚约 0.13 m,壳体用碳钢制成,内衬不锈钢层,内部部件全部用不锈钢。现在已经设计出了整个 CHAT循环系统,并对其性能、费用等进行了详细评估,1998年即可建成商业上可用的发电系统^[29]。

预计将要建成的 CHAT装置净输出 288.3 MW,热效率 54.7%。表 2为以 W501F燃机为基础的 CHAT循环、联合循环、简单燃机循环的各项性能指标的比较。

研究结果还表明,CHAT装置比同样条件的联合循环装置投资低 15% ~ 20%,每年的运行费用低 6%,并且在高海拔地区性能良好^[29]。

CHAT同样也可与煤气化技术结合,可以预见,这时的性能也很具吸引力。

此外,Sargent & Lundy 公司还研究了 CHAT-DG(Cascaded Humidified Advanced Turbine for Distributed Generation)装置,有更大的运行上的灵活性。CHAT-DG与 CHAT的不同之处在于

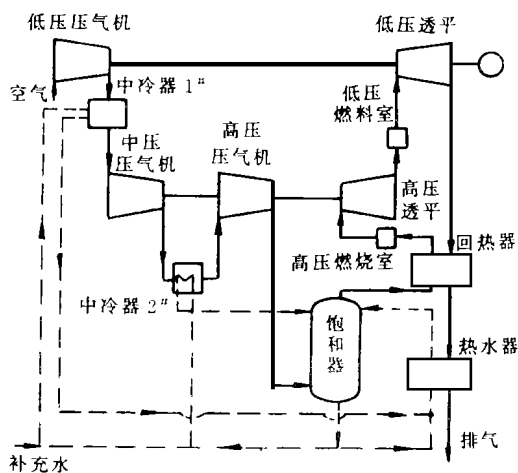


图 3 CHAT循环示意图

两个轴都有动力输出。以 Allison 的 501-KB7 燃机为基础, 整个 CHAT-DG 装置已设计成功, 占地面积不足 $20 \text{ m} \times 24.4 \text{ m}$, 输出功率 11 MW (简单循环时输出为 5 MW), 1999 年前建成投运^[30]。

5 结束语

由于良好的热力性能、经济效益和生态环境相容性, HAT 循环自一提出就受到了人们的普遍重视。此外, 与煤气化技术、能量储存技术相结合, HAT 循环装置也有它独特的优势。可以预料, HAT 循环装置及其相关装置将成为二十一世纪火力发电系统的重要发展方向。

参考文献

- Ishida M, Zheng D, et al. Evaluation of a Chemical Looping-Combustion Power-Generation System by Graphic Exergy Analysis, *Energy*, 1987, 12(2).
- Arther Cohn. Power Plant Cycles Featuring Air Humidification, *EPRI Journal*, Oct./Nov. 1993.
- Briesch M S, Bannister R L, et al. A Combined Cycle Designed to Achieve Greater than 60 Percent Efficiency, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995, 117(4).
- Gasparovic N, et al. Gas Turbine with Heat Exchanger and Water Injection in the Compressed Air, *Combustion*, Dec. 1972.
- Cook D K, et al. HAT Cycle Simplifies Coal Gasification Power, *MPS*, May 1991.
- A Comparison of Humid Air Turbine (HAT) Cycle and Combined Cycle Power Plants, *EPRI RP-2999-07*, 1991.
- Irwin Stambler. Predict \$ 600/kW for HAT Cycle Compressed Air Storage Plants, *GTW*, No. 3, 1992.
- Day W H, et al. Redefined Natural Gas HAT Cycle Produces Higher Output, *MPS*, June 1993.
- A Feasibility and Assessment Study for FT4000 Humid Air Turbine (HAT), *EPRI RP-3251-05*, 1993.
- Wang Yongqing, et al. HAT Cycle Analysis the Performance of the Humidifier, *International Conference on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy System*, Beijing: 1997(TAIES 97).
- Chiesa P, et al. An Assessment of the Thermodynamic Performance of Mixed Gas-Steam Cycles Part A and Part B, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995, 117(3).
- Lindgren G, et al. The HAT Cycle, a Possible Future for Power and Cogeneration, *Proc. of the Flowers Congress*, Florence, Italy: 1992.
- Niklas D Agren, et al. New Humidifier Concept in Evaporative Gas Turbine Cycles, *TAIES 97*.
- Stecco S S. The Humid Air Cycle Some Thermodynamic Consideration, *ASME Paper 93-GT-77*.
- Philippe J Mathieu, et al. Transient Behavior of a Humid Air Turbine, *TAIES 97*.
- Andreas K, et al. Thermodynamic and Exergoeconomic Evaluation of the HAT Cycle, *TAIES 97*.
- 林汝谋, 方钢, 蔡睿贤. HAT 循环性能分析研究. *工程热物理论*, 1993, 14(2).
- 肖云汉, 林汝谋, 蔡睿贤. HAT 循环的系统优化. *工程热物理论*, 1994, 15(2).
- 肖云汉, 蔡睿贤等. HAT 循环的模块化与热力学评价. *工程热物理论*, 1996, 17(3).
- 王永青, 闻雪友, 陈安斌, 严家禄. HAT 循环的能量模型和焓分析. *热力发电* 1998, (6).
- 王永青, 严家禄等. 一种新的热力循环性能的估算方法和 HAT 循环的性能估算公式. *热能动力工程*, 1998, 13(5).
- 黄瓯, 邹介棠等. STIG 循环和 HAT 循环的焓分析及比较. *燃气轮机技术*, 1996, 19(1).
- 靳海明等. 饱和器底部温差对 HAT 循环性能的影响. *西安交通大学学报*, 1995, 30(5).
- 焦树建. HAT 循环的热力学分析. *燃气轮机技术*, 1995, 8(2).
- 王永青, 闻雪友, 陈安斌, 严家禄. HAT 循环的系统优化和参数分析. *中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学会会议*, 洛阳: 1997.
- 王永青, 闻雪友, 陈安斌, 严家禄. 联合循环 STIG 循环、HAT 循环及其相关循环的热力性能比较. *工程热物理论*.
- 靳海明等. HAT 循环中关键部件 - 饱和器实验台的研制. *热能动力工程*, 1995, 10(1).
- Schalnker B, et al. Compressed Air Storage Can Improve Utility Load Factors, *MPS*, Feb. 1986.
- Nakhmkin M. The Cascaded Humidified Advanced Turbine (CHAT), *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1996, 118.
- Gavin Gual. Achieving a Competitive Edge with CHAT. *Modern Power System*, Nov. 1996.
- 林汝谋, 蔡睿贤, 张娜. 跨世纪的 HAT 热力循环. *燃气轮机技术*, 1993(2).

(辉 编)

湿空气透平 (HAT) 循环的研究发展现状 = **The present Status of Research and Development of Humid Air Turbine (HAT) Cycles** [刊, 中] / Wang Yongqing, Yan Jialu (Harbin Institute of Technology), Wen Xueyou (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 387~ 391

Described in this paper is a new type of high-efficiency thermodynamic cycle, the so-called humid air turbine (HAT) cycle and the conception of its related cycles, specific features as well as the present status of research and development of HAT. Key words: thermodynamic cycle, electrical power generation system, humid air turbine, HAT cycle

能量系统分析优化中排弃焓计价探讨 = **An Exploratory Study of the Rejected Exergy Costing in the Optimization of Energy System Analysis** [刊, 中] / Chen Qinglin, Hua Ben, Wang Songping, et al (South China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(6). - 392~ 395

Based on an analysis of exergy and its economic aspects the authors expound the relationship between rejected exergy and the exergy to be recovered. After an systematic study of the rejected exergy costing in an energy system under various conditions of recovery it is pointed out that with respect to the stage-by-stage recovery and utilization of energy the traditional costing method in accordance with a material flow sequential analysis is not applicable to the costing of rejected exergy. On the basis of an energy system dual subsystem model proposed is an equivalent costing conception aimed at solving the problem of rejected exergy costing. Finally, the practical application of this costing method has been demonstrated through the evolution process of a catalytic cracking gas energy recovery scheme and the variation of rejected exergy costing. Key words: exergy costing, energy recovery, exergy economy, energy system

百叶窗煤粉浓缩器内流场的数值模拟研究 = **A Numerical Simulation Study of the Flow Field in a Louver Pulverized Coal Concentrator** [刊, 中] / Fan Weidong, Gao Jihui, Wu Shaohua, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(6). - 396~ 398

Through the use of a dual-equation turbulence model a numerical simulation is conducted of the flow field in a louver pulverized coal concentrator. The results obtained agree well with test ones. From the viewpoint of the flow field distribution features an analysis is conducted of the effect of blade spacing and cover ratio on air flow and gas-solid separation. It is noted that the blade spacing has little effect to the air flow distribution and an increasing blade cover ratio can markedly lead to a more drastic deflection of gas flow, thereby enhancing the effect of concentration. Key words: louver, pulverized coal concentrator, numerical simulation, gas-solid separation

关于溶解式制冷机和ЛАТЫ ЛЕВ 教授商榷 = **An Exchange of Views with Professor Latershev Concerning a Dissolution Type Refrigerator** [刊, 中] / Chou Qiaoli, Li Xinqiu, Xu Guang, et al (Nuclear Energy Design Institute of Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(6). - 399~ 401

First, a description is given of the basic principles of a dissolution type refrigerator invented by Professor Latershev V P of Russian Refrigeration Research Institute. Then, on the basis of the experience and understanding of the authors some observations are given regarding the possible difficulties such refrigerators may encounter in the course of their technical popularization. Key words: refrigerator, fusion heat, COP value, stability