

# 燃气轮机装置湿压缩技术的研究发展状况

王永青, 李炳熙

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 湿压缩技术是提高燃机装置效率和输出、降低排气污染的有效、经济且简便的手段。本文介绍了湿压缩的概念、特点、种类以及国内外研究发展状况, 并对其应用前景作了展望。

**关键词:** 湿压缩; 燃气轮机装置

中图分类号: TK47

文献标识码: A

## 1 湿压缩概念及特点

自从燃气轮机装置问世以来, 人们一直为改善其性能进行着不懈的努力。近年来, 世界性的能源危机和环境污染的加剧以及燃气轮机装机容量的增加和使用范围的扩展, 使燃机性能的改善显得更加重要。寻找行之有效而又经济、简便的改善方法已经成为动力领域的重要研究课题。湿压缩正是这样一种方法。

在燃气轮机装置中, 压气机耗功通常要占透平功的50%以上, 限制了燃机性能的提高, 大大湿压缩技术就是由此提出的。所谓湿压缩, 就是在压气机入口或在压缩过程中向被压缩气体喷入液体, 利用液体的汽化吸热, 使湿压缩过程更接近于定温, 以此达到改善燃机性能的目的。理论上, 喷入的可以是水、乙醇、苯等

各种液体, 但是由于水的冷却效果最好、且价廉易得, 因此迄今为止, 所有关于湿压缩的研究都是围绕喷水进行的。

从热力学方面而言, 湿压缩与传统的分级压缩、中间冷却方法目的相同, 都是降低空气压缩过程的温升, 减少压缩功耗, 但二者又有不同之处:

(1) 湿压缩过程中, 水滴与空气在压气机中直接接触, 发生热量传递和质量传递, 空气在被压缩的同时被冷却, 因此湿压缩过程是一个连续的冷却过程。中冷则是将被压缩气体从压气机级间抽出, 经冷却后再送回压气机继续压缩。为防止系统过于复杂和成本过高, 中冷的次数是有限的, 一般只有一两次, 因此中冷只能对气体进行间断冷却。

(2) 湿压缩通过水的蒸发来降低空气温度, 空气减少的能量等于水或水蒸气增加的能量, 仍存在于系统中, 因此湿压缩过程又是一个回热过程。而采用中冷时, 中冷热量通常被冷却水带走。冷却水温升有限, 很难加以利用, 中冷热量通常释放给环境, 成为系统能损的又一来源, 同时还会对环境造成热污染。

(3) 采用湿压缩时, 水蒸气的

存在使透平工质流量增加, 同时由于湿燃气的比热容较大, 相同温降时的焓降也大, 从而透平功增加。采用中冷时透平功基本不变。因此, 采用湿压缩后燃机装置输出功的增加比中冷显著。

(4) 湿压缩时, 只要水滴雾化良好、喷嘴位置合理、喷水对压气机效率影响不大, 就可使燃机装置的热效率得到改善。而中冷只有用于回热燃机才能使热效率提高。

(5) 湿压缩燃机的输出可以通过改变喷水量来调节。

(6) 湿压缩燃机中, 随空气进入燃烧室的水蒸气可使 $\text{NO}_x$ 的生成速率降低, 从而减少对环境的污染。

显然, 与中间冷却方法相比, 湿压缩方法更有效, 也更合理。

根据喷水位置和喷水方式的不同, 湿压缩可大致分为三类:

(1) 压气机进口喷水湿压缩  
压气机进口喷水湿压缩通常是在压气机进气通道安装喷嘴, 向空气流中喷入水滴。与进气蒸发式冷却不同, 喷水量不受空气湿球温度的限制。进入压气机前, 会有少量水气化, 起到进气冷却的作用, 未蒸发的水进入压气机实现湿压缩。因此, 进口喷水

湿压缩是压气机进气蒸发冷却技术和湿压缩技术的有机结合。

采用压气机进口喷水湿压缩技术无需对压气机进行改动, 简便易行。为了防止结冰, 只有在环境温度较高时才能使用。

### (2) 压气机级间喷水湿压缩

空气经过压气机低压级压缩后, 温度上升、相对湿度降低。在级间喷水, 水滴蒸发非常迅速, 减小了喷水引起的摩擦和可能对叶片造成的损伤。同时, 由于蒸发迅速, 喷水量可以适当增大<sup>[1]</sup>。这种方式不受环境温度的限制, 使湿压缩的应用范围大大扩展。但是, 在级间喷水, 需在压气机机壳上安装喷水装置, 操作比进口喷水复杂。

### (3) 叶片注水湿压缩

这种方式是通过压气机叶片上的小孔将水注入到被压缩工质中。显然, 叶片注水湿压缩更有效, 但对工艺和设计的要求也更高, 实现的难度很大。

目前, 叶片注水湿压缩方面的研究文献很少。本文将着重介绍压气机进口喷水湿压缩和级间喷水湿压缩的研究发展状况。

## 2 燃气轮机装置湿压缩技术的研究发展状况

### 2.1 国外研究发展状况

早在 20 世纪 40 年代, 美国的 Kleinschmidt 就提出了燃气轮机装置湿压缩的概念<sup>[2]</sup>。此后十几年, 美国和前苏联都对湿压缩技术进行了理论和实验研究<sup>[2~5]</sup>。由于对湿压缩过程认识的局限性和当时技术条件的限制, 早期的这些研究并未取得预期成果, 但得到的一些结论对现在的研究仍有一定的指导作用或参考价值。有代表性的如 Shao-

Lee-Soo, J. T. Hamrick 等人的研究。

Shao-Lee-Soo 等人对轴流式压气机的研究表明<sup>[3]</sup>: 湿压缩效果取决于压气机长度、气流速度、压比以及水滴直径等; 其它条件相同时, 湿压缩在高压比压气机中使用效果更好; 为湿压缩研制低转速、低轴向速度的压气机可使湿压缩发挥更大作用。

J. T. Hamrick 等人在不同的离心式压气机上进行了一系列实验, 在文献<sup>[4]</sup>中, 对实验结果进行了总结: (1) 在压气机入口注水可使压比提高。(2) 最初的实验未对水进行处理, 水中的矿物质在压气机通道严重沉积, 因此湿压缩必须使用软水。(3) 采用湿压缩后, 压气机效率降低。实验结果表明, 水气比为 0.055 时, 压气机绝热效率降低 12% (绝对值), 原因在于喷入的水滴直径较大, 大部分水沾在叶轮或通道表面蒸发, 使得摩擦力增大, 同时大液滴与空气掺混不匀及工质流量的变化使流场发生了畸变。(4) 采用湿压缩后, 压气机效率的降低和燃烧室燃料量的增加会使整个燃气轮机装置的热效率降低。

20 世纪 60 年代以后, 美国对湿压缩的研究基本中断。前苏联则进行了较为详尽的理论和实验研究。

近年来, 燃气轮机装机容量的增大和能源与环境问题的日益严重, 使湿压缩技术再度受到重视。目前, 美国、一些独联体国家、中国、日本等都在进行这方面的工作。由于技术的改进和一些有效措施的采用 (如高效雾化喷嘴和高效过滤器的使用、喷水量的优化控制、喷嘴位置的合理安排等), 湿压缩技术在改善现有燃

机装置的性能方面已取得成效, 已有湿压缩机组投入商业运行。

美国在湿压缩技术的实用化方面走在最前列。EPRI (Electric Power Research Institute) 率先开发了多级喷水冷却技术。1996 年, UtiliCorp 能源集团利用 EPRI 的技术在 Ralph Green 电厂的 7E 型燃气轮机上进行了实验<sup>[6]</sup>。在压气机进行气道内侧排列了 1400 个高压雾化喷嘴, 分为 8 级, 以便于根据环境状况和 NO<sub>x</sub> 的排放要求调节水量。喷嘴和压气机之间安装过滤器除去大的液滴, 仅允许小液滴进入压气机, 减小了对叶片的冲击和对压气机流场的影响。1996 年夏天 150 h 的运行表明, 燃机装置功率增加了 15.5%, 同时热耗下降。与传统的压气机入口介质式蒸发冷却相比, 湿压缩技术对燃机装置性能的改善更显著, 初投资也更低 (见图 1)。不计软化水费用, 单位千瓦初投资为 90~100 \$。到 1999 年, 美国已安装了 50 多套这样的压气机入口过喷系统<sup>[7]</sup>。

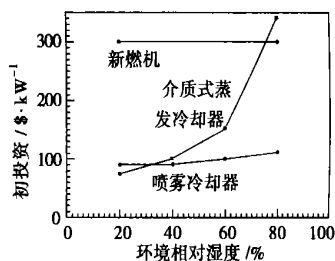


图 1 新燃机装置、压气机入口介质式蒸发冷却器和喷雾冷却器初投资比较<sup>[6]</sup>

1998 年, 美国 GE (General Electric) 公司推出了 LM6000 Sprint (Spray Intercooling——喷雾中间冷却) 技术<sup>[8~9]</sup>: 在现代高压燃气轮机 LM6000 (其压比为 30) 的高压压气机和低压压气机

之间安装 24 只空气雾化喷嘴, 水的雾化粒度小于  $20 \mu\text{m}$ , 雾化空气取自高压压气机的第 8 级。研究认为, 这种中间喷雾冷却技术适用于高压比机组, 用于低压比机组(如压比为 10)收益不大。表 1 所示为 LM6000PC 机组改造前和改造后的性能参数。首批两台机组已于 1998 年在英国投入商业运行<sup>[9]</sup>。在上述基础上, GE 公司又推出了强化的

(如俄罗斯、乌克兰)的研究工作较为深入<sup>[14~17]</sup>。

在文献[15]中, Арсеньев Л. B. 等比较了向燃机装置的燃气或空气通道中注入水汽工质以改进燃气轮机工作指标的各种方法, 结果表明, 向压气机通流部分注水是最具有效的。文中还考虑了向压气机通流部分喷水的冷却作用及其引起的各种损失对压气机效率的影响, 并对 150 ~ 200

得出的结果和实验结果都表明, 喷水量为空气流量的 0.5% ~ 1% 时, 效果最好。

其他研究者也进行了很多有意义的工作<sup>[18~19]</sup>。日本的 Uta-mura Motoaki 等将压气机入口喷水湿压缩循环命名为 MAT (Moisture Air Turbine) 循环, 分析了湿压缩提高燃机装置性能的机理, 研究了实际循环的湿压缩是改善燃气轮机装置性能的有效而简便的手段, 并进行了相关实验<sup>[18]</sup>。Sexton Michael R. 等研究了某船用燃气轮机采用湿压缩技术后的性能<sup>[19]</sup>。

## 2.2 国内研究发展状况

国内虽然对湿压缩技术的研究起步较晚, 但已取得了一系列研究成果, 已有湿压缩机组投入商业运行。

哈尔滨工程大学从 1995 年开始进行湿压缩研究<sup>[1]</sup>, 在压气机进气喷水湿压缩和级间喷水湿压缩方面作了大量的理论和实验研究工作<sup>[1, 20~26]</sup>。理论方面主要包括湿压缩机理分析<sup>[1, 20~21]</sup>、湿压缩热力循环性能分析<sup>[22]</sup>、湿压缩对压缩系统和燃机装置性能影响分析<sup>[22~25]</sup>等, 得到了一些有指导意义的结论。例如, 文献[22]在研究了湿压缩燃机的变工况性能后发现, 若采用等输出功率运行规律, 喷水可减轻热部件工作负荷, 延长发动机寿命; 再如, 文献[23]研究了湿压缩对压缩系统失速后瞬态响应的影响, 得出结论: 在一定条件下, 在系统刚刚发生喘振或旋转失速时, 喷水湿压缩可以消除喘振或旋转失速, 提高系统运行的稳定性; 等等。

哈尔滨工程大学的湿压缩实验在 S1A-02 小型燃机上进

表 1 LM6000PC 机组改造前和改造后的性能参数<sup>[8]</sup>

环境温度/℃		-1	7	15	21	27	32
输出功率 /MW	LM6000PC	51.5	48.2	43.3	38.9	35.2	31.9
	LM6000PC Sprint	51.5	50.0	47.2	44.4	41.1	38.4
热耗 /kJ·(kWh) <sup>-1</sup>	LM6000PC	8 773	8 835	8 982	9 195	9 440	9 686
	LM6000PC Sprint	8 756	8 836	8 936	9 042	9 163	9 310
排气温度/℃	LM6000PC	432	435	433	434	438	442
	LM6000PC Sprint	427	438	440	441	444	453
流量 /kg·s <sup>-1</sup>	LM6000PC	140	134	127	121	114	108
	LM6000PC Sprint	141	137	132	127	123	118
喷水量/L·s <sup>-1</sup>		0	0.25	0.47	0.59	0.63	0.69

Sprint 技术, 即在 LM6000 燃机的低压压气机入口又安装了 23 个雾化喷嘴, 从而, 在高温天气时燃机性能的改善更加显著<sup>[10]</sup>。

此外, 文献[11]和[12]描述了一种已申请专利的新颖的湿压缩技术——SwirlFlash 技术: 将水压缩到 10~15 MPa 并加热到 200~250℃后送入旋流喷嘴, 由于喷射和闪蒸作用, 得到大量直径为  $2.5 \mu\text{m}$  左右的超微液滴。SwirlFlash 装置目前已安装于荷兰 Amer 电站的 ABB 9D 燃机上。文献[13]报道 Siemens Westinghouse 动力公司已将其湿压缩技术推向市场。

可见, 湿压缩技术在一些国家已经应用, 并已在实际中发挥作用。其它国家对湿压缩技术的研究大多还处于理论研究和实验研究阶段, 其中一些独联体国家

MW 燃气轮机的轴流式压气机进行了计算, 计算结果可参见文献[29]和[32]。对整个燃气轮机组的计算表明, 喷水量为 0.5% ~ 2% 时, 机组功率增加 7.5% ~ 14%, 效率提高 3.5% (相对值); 若喷水后压气机流量系数等于最佳值, 则机组功率增加 8.5% ~ 17%, 效率提高 4% ~ 6.5% (相对值)。

Романов В. И. 等人在 GT15000 型燃气轮机上进行了低压压气机入口喷水实验<sup>[16]</sup>, 结果表明: 除效率和功率的增大外, 当喷水量为 1% 时, NO<sub>x</sub> 排放量减少 40%。Беркович А. Л. 等人综合考虑了水在压气机通流部分的流动、蒸发情况以及喷水造成的各种损失, 给出了湿压缩的计算模型<sup>[17]</sup>。与实验结果相比较, 模型具有很好的准确性。利用模型

行<sup>[26]</sup>。根据结构特点,在两级离心式压气机的级间外壳上开了6个φ12的孔口,在其中的两个孔口安装喷嘴,进行级间喷水实验,发动机在喷水后工作状态稳定,实验验证了某些理论分析结果。

湿压缩持续运行需要大量的水,哈尔滨工程大学考虑采用自行研制的玻璃管低温换热器来回收水及其潜热,这种措施还可大幅度降低有害污染物的排放量<sup>[1,20]</sup>。

哈尔滨第七〇三所的研究人员对进气用蒸发式冷却器中的气水分离技术进行了实验研究<sup>[27]</sup>,结果表明:当节距约为2.5、气流速度在8~12 m/s之间时,波形板惯性级能够有效地除去空气中的大粒度水滴,从而显著降低空气中所含水滴的平均直径,满足湿压缩的要求。此外,还分析了湿压缩特性<sup>[28~29]</sup>和GT25000燃气轮机采用湿压缩后的性能<sup>[30]</sup>等。2000年以来,已有多台燃气轮机电站采用第七〇三所研制的喷水量可调的进口喷水湿压缩装置,并已投入商业运行,取得了显著的效果。

文献[31]拟合了以广义热力学力为驱动势时水与空气传质系数的关系式,建立了湿压缩的数学模型,研究了湿压缩的一般规律;研究了湿压缩简单燃机循环的性能,得出了最佳性能参数;首次将湿压缩用于HAT(Humid Air Turbine)循环,研究了循环的热力性能。

### 3 应用前景展望

理论分析和实践结果都证明,在喷水系统有效合理、喷水量控制恰当的前提下,湿压缩可以

有效改善燃机装置的性能,使其功率输出增大、效率提高、NO<sub>x</sub>排放降低。此外,采用湿压缩技术无需对燃机装置进行大的改动,投资少,见效快。

燃机装置性能受环境温度影响显著。夏季环境温度高时,用电负荷大,但此时燃机输出最少、效率最低。压气机进口喷水湿压缩是改善高温环境下燃机装置性能的有效手段,采用它可以更充分地发挥高温天气燃机作为调峰电站的作用。

级间喷水湿压缩技术不受环境温度的制约,可以长期采用。已采用级间喷水湿压缩的燃机,在高温季节同样可以采用进气喷水湿压缩技术,这样,燃机装置的基本输出和峰期输出都可得到改善。

湿压缩技术的应用并不局限于一般的燃气轮机电站,将之用于燃气—蒸汽联合循环电站或注蒸汽燃气轮机电站同样可以收到显著的效益。

综上所述,燃机装置装机容量的增大决定了改善燃机性能的重要性,湿压缩技术良好的热力性能、环境性能和经济性则预示了该技术广阔的应用前景。

当然,在使用湿压缩技术的过程中,也会遇到一系列问题,如耗水量大、喷嘴阻塞时清理困难、液滴控制不当造成压气机叶片水蚀等等,因此,湿压缩技术还需要进一步研究和完善。

#### 参考文献:

[1] 孙聿峰,周杰. 试论级间喷水湿压缩技术的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1999, 20(4): 85-89.  
 [2] KLEINSCHMIDT R V. Value of wet compression in gas turbine cycles[J]. *Mechanical Engineering*, 1947, 69: 115-116.

[3] SOO SHAO-LEE. Wet compression in an axial-flow compressor[J]. *Transactions of the ASME*, 1952(3): 879-890.  
 [4] HAMRICK T J, BEEDE W L. Some Investigations with wet compression[J]. *Transactions of the ASME*, 1953(2): 409-420.  
 [5] ДОРФМАН ИЛ А, КУЗНЕЦОВ АЛ. Влияние впрыска воды во всасывание осево о компрессора вэту Юбинной Установки [J]. Энергетика, 1960, (4): 12-15.  
 [6] IRWIN STAMBLER. Spray cooling inlet and compressor flow increases hot day plant rating[J]. *Gas Turbine World*, 1997, (3): 37-41.  
 [7] THOMAS R. Inlet fogging augments power production [J]. *Power Engineering*, 1999, 103(2): 26-30.  
 [8] MARK MCNEELY. Intercooling for LM6000 Gas Turbines [J]. *Diesel & Gas Turbine Worldwide*, 1998, July/August: 42-45.  
 [9] Anon. LM6000 Sprint in Service with British REC [J]. *Turbomachinery International*, 1998, 39(5): 24-28.  
 [10] BIASI V. LM6000 Sprint design enhanced to increase power and efficiency[J]. *Gas Turbine World*, 2000, 30(4): 16-19.  
 [11] VAN LIERE J, MEIJER C G, LAAGLAND G H M. Power augmentation and NO<sub>x</sub> reduction of gas turbines by swirlflash over spray [J]. *VGB Power Tech*, 2002, 82(2): 51-54.  
 [12] LIERE VAN J, LAAGLAND G H M. Hot Water for Power Augmentation [J]. *Diesel & Gas Turbine Worldwide*, 2001, June: 72-74.  
 [13] SMITH ELLIOTT, RISING BRUCE, CLOYD SCOTT, et al. Wet compression for gas turbine: power augmentation and efficiency upgrade [A]. *Proceedings of the American Power conference* [C]. Illinois: Illinois Institute of Technology, 2000. 106-111.  
 [14] БЕРКОВИЧ АЛ, РОЗЕНКОЕР Е Е. Расчет параметров осево о компрессора с вводом воды в промежуточную часть [J]. Энергетика, 1990(8): 107-110.  
 [15] АРСЕНЬЕВ Л В, БЕРКОВИЧ АЛ. Параметры вэту Юбинных Установок с впрыском воды в компрессор [J].

- Теплоэнергетика, 1996(6): 18—20.
- [16] РОМ АНОВ В И, ДИКИЙ Н А. Нзотермни Рвание п Рочесса сжатия воздуха в компрессоре и е о влияние на характеристики Газотурбинно о двигателя [ J ]. ПРФМ Теплотехника, 1998 (6): 45—50.
- [17] БЕРКОВИЧ АЛ. Параметры осево о компрессора с вводом воды в проточную часть [ J ]. Энергетика, 1995(1): 67—70.
- [18] UTAMURA M, TAKEHARA I, KARASAWA H, et al. MAT, a novel, open cycle gas turbine for power augmentation [ J ]. *Energy Conversion and Management*, 1998, 39(16—18): 1631—1642.
- [19] SEXTON MICHAELR, URBACH HERMAN B, KNAUSS DONALD T. Evaporative compressor cooling for NO<sub>x</sub> suppression and enhanced Engine performance for naval gas turbine propulsion plants [ A ]. *Proceedings of the 1998 International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition [ C ]*. New York: ASME, 1998: 98—GT—32.
- [20] 孙聿峰, 郑 群, 王国学, 等. 改进的双工质平行复合循环燃机装置热力设计的一些考虑 [ J ]. 燃气轮机技术, 1997, 10(2): 20—22.
- [21] ZHENG QUN, SUN YUFENG, LI SHUYING, et al. Thermodynamic analyses of wet compression process in the Compressor of gas turbine [ J ]. *Journal of Turbomachinery*, 2003, 125(3): 489—496.
- [22] 李淑英. 压气机级间喷水湿压缩燃气轮机原理研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1999.
- [23] 王云辉, 刘 敏, 孙聿峰, 等. 湿压缩对压缩系统失速后瞬态响应的影响分析 [ J ]. 热能动力工程, 2003, 18(1): 67—70.
- [24] WANG YUNHUI, WANG GUOXUE, LI SHUYING, et al. Analysis on effects of wet compression on surge margin of a small gas turbine [ A ]. *Proceedings of the 2002 International Joint Power Generation Conference [ C ]*. New York: ASME, 2002: 247—252.
- [25] WANG YUNHUI, ZHENG QUN, SUN YUFENG, et al. Theoretical and experimental study of compressor and gas turbine performance with wet compression [ A ]. *Proceedings of the International Pipeline Conference [ C ]*. New York: ASME, 2002, VB: 1125—1130.
- [26] 李淑英, 张正一, 孙聿峰, 等. 压气机级间喷水燃气轮机的实验研究 [ J ]. 热能动力工程, 2002, 17(2): 143—146.
- [27] 林 枫, 李伟顺, 侯宇辉, 等. 燃气轮机进口气用蒸发式冷却器中的气水分离技术实验研究 [ J ]. 热能动力工程, 1999, 14(4): 250—252.
- [28] 林 枫, 闻雪友. 压气机的湿压缩特性及计算模型初步研究 [ J ]. 热能动力工程, 1998, 13(6): 402—405.
- [29] 吉桂明, 李汇文. 向压气机内喷水对燃气轮机性能的影响 [ J ]. 燃气轮机技术, 1999, 12(3): 8—13.
- [30] 林 枫, 闻雪友. GT25000 燃气轮机喷水冷性能研究 [ A ]. 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议 [ C ]. 北京: 中国工程热物理学会, 1999: 71—76.
- [31] 王永青. 湿压缩过程及湿压缩燃机循环热力学分析 [ R ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [32] 刘建成, 闻雪友. 压气机湿压缩研究的发展 [ J ]. 热能动力工程, 2000, 15(2): 87—90.

(渠 源 编辑)

## 循环流化床锅炉放渣管的改进

由于冷渣管穿过炉底风室直接与布风板相连, 处于风室中的冷渣管段受到一次风的冷却, 此段性能稳定。因此, 整个冷渣管使用性能的好坏取决于其入口温度的高低。在未加设流化风管时, 放渣口处于布风板的流化死区, 未燃尽的煤与灼热的床料聚集在此, 温度聚升。在锅炉运行中, 冷渣管与布风板的焊接处经常因燃烧恶化而结焦, 影响正常排渣。同时, 还会出现放渣口撕裂、漏风及漏灰等现象, 严重影响床料的正常流化。为此, 放渣口的设计布置应进一步优化。

在设计中采用了放渣管入口位置微流化的方案, 从根本上消除了此位置在运行中出现的不利因素。如图 1 所示, B、C 位置的料层因流化风管位置一次风的投入而产生微流化状态, 放渣口周围的区域为强流化区, 床料在此循环聚集, 小颗粒的床料被放渣口

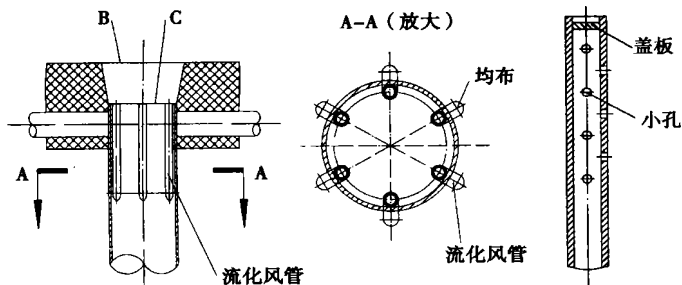


图 1

图 2

图 3 流化风管详图

位置的微流化风吹离, 大颗粒床料因不能被流化而沉积。如图 2 所示, 流化风管的布置采用冷渣管内侧均布的措施, 使放渣口位置呈现均匀的微流化状态。此处的流化风因从风室中引入, 使放渣口位置的料层直接受一次风的冷却, 有效的防止放渣口位置的燃烧恶化。为了防止停炉或压火时床料通过流化风管向风室大量漏入, 流化风管的设计采用管侧开孔端部密封的措施, 如图 3 所示, 使锅炉效率得到提高。

(刘长浩 供稿)

燃气轮机装置湿压缩技术的研究发展状况= **Present Status of the Research and Development of Wet Compression Technology for Gas Turbine Power Plants** [刊, 汉] / WANG Yong-qing, LI Bing-xi (Institute of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 111~115

Wet compression technology represents a cost-effective and simple approach for the enhancement of gas turbine efficiency and power output as well as for the reduction of turbine exhaust pollution. The authors have briefly described the theoretical basis of wet compression, its specific features and types, the present status of its research and development both at home and abroad. In addition, its usage prospects are also predicted. **Key words:** wet compression, gas turbine power plant, present status of research and development

锅炉燃煤方式对痕量元素分布的影响= **The Impact of Coal Combustion Modes of a Boiler on the Distribution of Trace Elements** [刊, 汉] / YU Liang-ying, LU Ji-dong, ZHANG Juan, et al (State Key Laboratory on Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 116~118, 123

A broad overview is given of the impact of boiler combustion modes introduced both at home and abroad on the distribution of trace elements. Measurements were taken of the distribution of trace elements in bottom ash and fly ash for five Chinese industrial boilers of different models and power ratings. The results of the measurements indicate that fluidized bed combustion can lead to an enhancement of evaporation of volatile trace elements and the distribution of trace elements not tending to volatile will not be affected by the specific type of boilers. With the increase in power capacity of industrial boilers an enrichment of trace elements can be observed in fine particles. The smaller the fly ash particle size, the higher will be the enrichment of the trace elements. **Key words:** fluidized bed, stoker, trace element, enrichment factor

千瓦级质子交换膜燃料电池电堆的实验研究= **Experimental Study of a PEM (Proton Exchange Membrane) Fuel Cell Stack of 1 kW Class** [刊, 汉] / HU Ming-ying, ZHU Xin-jian, CAO Guang-yi (Fuel Cell Research Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), GU An-zhong (Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 119~123

A large-capacity PEM (proton exchange membrane) fuel cell stack of 1 kW class has been developed by the authors. During experiments hydrophilic membrane electrode assemblies were prepared. By making use of membranes of Nafion 115 and Nafion 1135 and with the Pt content of cathode and anode both being assessed at 0.5mg/cm<sup>2</sup> the maximum power density of a single cell can respectively attain 0.19 w/cm<sup>2</sup> and 0.24 w/cm<sup>2</sup>. Through an enlargement test and a stability test of a single cell verified were the feasibility of a bipolar-plate flow field of the cell stack and the stable performance of the cell proper. By way of assembling a cell stack of 100watt class the feasibility of sealing technology in a cell stack of 1 kW class and the ability of a gas manifold to achieve gas uniform distribution on a bipolar plate have been verified. Finally, it is shown that the maximum output power of the PEM cell stack composed of 30 single cells each with a reaction area of 235 cm<sup>2</sup> may attain 1160w. **Key words:** fuel cell of proton exchange membrane, cell stack, membrane electrode assembly

低流速净蒸汽产生点模型预测过冷沸腾空泡率= **Prediction of Subcooled-boiling Void Fraction by Means of a Model Based on a Low Flow-rate Net Vapor Generation (NVG) Point** [刊, 汉] / SUN Qi (National Key Laboratory