

三工质朗肯循环

——提高火电厂效率的一种途径

肖立川 (江苏化工学院)

〔摘要〕 采用钾—联苯—水蒸汽三工质朗肯循环,可使火电厂热效率提高到50%以上,节约燃料35%左右,同时减轻了对环境的各种污染。

关键词 卡诺循环 三工质朗肯循环 循环效率 泄漏 腐蚀 经济性

1 概述

由于工业的高度发展,对能源的需求量日趋增加,而世界能源日益减少,所以节能问题成为举世瞩目的大事。同时,考虑到人类生存空间的质量,对环境保护问题也尖锐地提出来了。因此在节能的同时,设法减轻环境污染也是一个重大课题。

火电厂是世界一次能源的主要消耗大户,世界火力发电能源消耗占一次能源的32%左右,并有增长的趋势。多年来,人们致力于提高火电厂的效率。其主要途径有:1.提高初参数、降低终参数;2.改善蒸汽流通部分的结构,减少流动的不可逆损失。然而,由于水蒸汽性质的限制,这些努力在技术经济上已达到了一定的限度。目前火电厂的循环效率已达42%左右,再想提高、难度极大。

采用钾—联苯—水蒸汽三工质复合朗肯循环(TRC)或简化的钾—水蒸汽二工质复合朗肯循环(BRC),分级使用能量,能使火电厂的循环效率提高到50%以上。与常规电站相比,可节约燃料35%左右。这就大大

地节约了能源,同时也减轻了对环境的各种污染〔1〕。

根据美国空间动力站的发展规划,已对碱金属循环进行了广泛的分析研究,并进行了多种试验,获得了长时间的运行经验。例如,碱金属的蒸发和冷凝传热系数实验,在沸腾状态下临界流量的确定、湿的碱金属对透平的侵蚀作用(结果是大大小于湿水蒸汽对透平的作用)、及金属疲劳性试验,以确定碱金属系统在沸腾和冷凝状态下对合金钢Fe-Cr-Ni的兼容性〔2〕。

1960年有人利用空间技术中应用的碱金属系统的成熟经验来设计民用核电站。1970年这项工作扩展到燃烧矿物燃料的电站,随后对气体燃料的钾锅炉进行了设计、试验和建造。这个试验由于气体燃烧器中材料的蠕变和弯曲而中断,但没有出现钾从锅炉中漏出的情况。1975年由于磁流体发电及燃料电池技术的发展而停止了对碱金属循环技术的研究〔2〕。

1977年到1979年期间,国际能源总署(IEA)组织了对此项技术进行研究,这是“能量分级利用”课题的一部分。有九个国家参与了这项工作,并进行了分工。例如西

收稿日期:1990-09-08

本文联系人 肖立川 男 45 讲师 常州 231000

德负责研究钾透平与高温配件, 荷兰负责研究钾冷凝器及辅助安全系统, 澳大利亚负责研究钾蒸发器及燃料系统。这些工作已取得了一些进展。目前西德已着手进行钾—水蒸汽二工质循环系统的设计工作。

2 三工质朗肯循环的原理

大家知道, 用水作为循环工质的主要优点是它在常温下的性能较好。如当温度为 30°C 左右时, 水的饱和压力为 $4\text{--}5\text{ kPa}$, 这在技术上较易达到。而最大的缺点是水的临界温度太低, 定压吸热的平均温度比上限温度要低得多。此外, 液体的吸热与蒸汽的过热都不是定温过程。因此用水蒸汽作为工质的朗肯循环的效率要较相同温限下的卡诺循环低得多。由此可知, 要提高火电厂的循环效率, 单纯提高工质的上限温度是不够的, 重要的是要选择适当的工质, 使实际循环尽量接近于卡诺循环。由此出现了多工质朗肯循环。在多工质循环中, 常规的水蒸汽循环作为底循环, 在它的上面再增加一个或两个高温低压循环, 以此提高发电厂的效率。

在多工质循环过程中, 要从化学稳定性、腐蚀性及价格等方面考虑, 就会发现用钾或铯两种碱金属作为顶循环工质较为合

表 1 三工质朗肯循环典型数据^[3]

循环过程	循环上限	循环下限	热力学效率**		透平功率比例
			卡诺效率	有效效率	
钾	$890^{\circ}\text{C}/300\text{kPa}$	$477^{\circ}\text{C}/2.7\text{kPa}$	35.5%	29.1%	47.8%
联 苯	$455^{\circ}\text{C}/2090\text{kPa}$	$287^{\circ}\text{C}/200\text{kPa}$	23.1%	16.9%	19.6%
水 蒸 汽	$270^{\circ}\text{C}/5500\text{kPa}$	$33^{\circ}\text{C}/5\text{kPa}$	46.9%***	33.6%	32.6%
三工质朗肯循环*			75.3%	60.9%	100%

* 设电厂功率为 600 MW

** 不考虑散热损失及自用电消耗

*** 设冷凝水温为 15°C

适。多次试验证明, 烟气侧材料耐温的最高限度为 850°C , 而在 850°C 时钾蒸汽压力仅为 200 kPa , 铯蒸汽压力为 400 kPa , 这样就避免了高压蒸汽系统的强度, 而设计者面临的问题则是对温度的敏感问题^[2]。由于钾的价格较铯便宜, 故目前的趋势是应用钾。

为了防止泄漏, 引起钾与水的反应, 使循环更好的卡诺化, 在钾循环与水循环之间加一个联苯循环。用联苯作为中间循环工质, 无论从热力学性质、毒性及价格上都是合适的。

由钾—联苯—水蒸汽组成的三工质朗肯循环 (TRC) 的 $T-S$ 图如图 1 所示。图 2 是系统图^[1]。表 1 是三工质朗肯循环的典型数据^[3]。

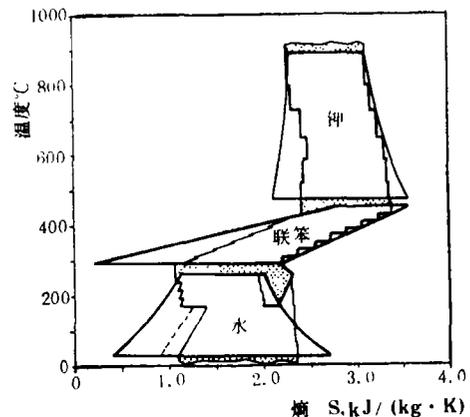


图 1 三工质循环 $T-S$ 图^[1]

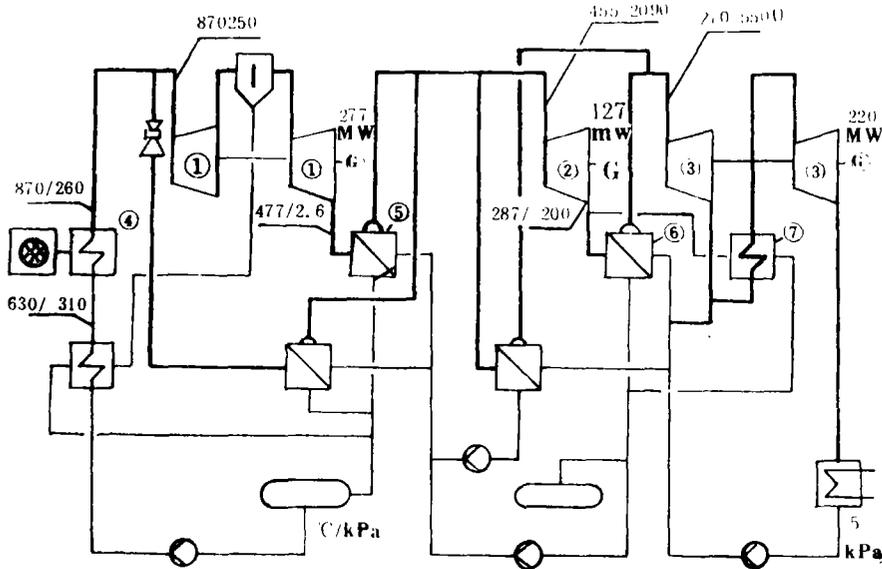


图 2 三工质循环系统图^[1]

- 1. 钾透平 2. 联苯透平 3. 水蒸汽透平 4. 钾锅炉 5. 钾冷凝器 6. 联苯冷凝器
- 7. 水蒸汽中间再热器

从图中可以看出，燃料先在钾锅炉中燃烧，燃烧系统可以是常压燃烧系统，也可以是与燃气轮机进行联合循环的压力燃烧系统^[5]。钾在锅炉中被蒸发，温度为870℃。钾蒸汽进入钾透平膨胀做功。钾透平分高、低压两部分，并带有蒸汽干燥回热加热及液体钾的回热加热。做功后的钾蒸汽进入钾冷凝器/联苯蒸发器。实际上，这都是一个双程相变换热的管壳式换热器。壳程中的钾蒸汽在2.6 kPa的压力下冷凝成饱和液体(477℃)，管程中的联苯在2090 kPa的压力下被蒸发(455℃)。联苯蒸汽在进入联苯透平中膨胀做功后，再进入联苯冷凝器/水蒸发器。这也是一个双程相变换热的管壳式换热器，壳程中的联苯蒸汽在200 kPa压力下冷凝，温度为287℃，管程中的水在5500 kPa的压力下蒸发(蒸发温度为270℃)，饱和水蒸汽按常规方式进入蒸汽透平做功，最后在水冷凝器中冷凝。

从T-S图上可以看出，由于三种工质的吸热放热过程都近似于定温过程，即加热

时吸收潜热，放热时放出潜热，因此其循环更接近理想的卡诺循环。按照表1中提供的数据，三工质朗肯循环的循环效率达60.9%，仅比相同温限下卡诺效率低14.4%（不计散热损失及厂用电消耗）。

对于二汽循环(BRC)系统，省去了中间的联苯循环，钾冷凝器直接作为水蒸发器。在这种情况下，系统得到了简化，投资费用大大减少，也减少了中间二次传热过程的附加烟损失。但此时水蒸汽与钾蒸汽直接传热，温度接近500℃，这又使水蒸汽循环效率降低（非等温加热）。同时水蒸汽的压力也相应提高，这就增加了钾冷凝器/水蒸发器中两种传热介质的压差，传泄漏的可能性增大，给制造和运行带来一定的困难。

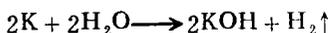
3 多工质朗肯循环存在的主要问题及解决措施

3.1 泄漏问题 发展碱金属循环的最大障碍之一就是担心泄漏。热的碱金属漏至大气

后会自发着火,空气漏进碱金属系统会形成一系列的腐蚀。泄漏可能发生在碱金属锅炉中或冷凝器中。

在钾锅炉中,如果燃烧气体漏进碱金属系统,会导致循环钾液体的氧化。而 N_2 及 H_2 将随循环被带入冷凝器。在冷凝器里,这些气体会积累成不凝气体,然而也可借助这两种气体在冷凝器中的含量检查出锅炉中小的泄漏,使泄漏及早发现而不致扩大[2]。

最担心的是BRC系统中的冷凝器泄漏。由于水或水蒸汽的压力较高,当发生泄漏时,水或水蒸汽将会喷入冷凝器壳程中。由于壳程钾冷凝压力较低,故水会立即闪蒸,其余蒸汽温度降低,压力上升。在闪蒸和膨胀的同时,水和水蒸汽会和钾发生化学反应:



从此方程式可以看出,产生1摩尔的氢气要消耗2摩尔钾蒸汽,这就使总体积减小。另一方面,反应会产生热量,这会使气体体积增大。如果压力升高,则钾蒸汽受压缩,促使钾蒸汽冷凝。

冷凝器中的泄漏可以迅速从冷凝器一端所积累的不凝氢气体量的变化中发现。因为冷凝侧有较大的空间,所以只要不发生爆炸或压力大幅度地增加,在一般情况下是来得及处理的。

为了减少泄漏的可能性,管子应按高标准来制造、安装和试验。在运行中定期对管束进行检查,以及时地发现和及时处理泄漏,避免事故扩大。目前,对于钠加热的蒸发器已有充分的设计和运行经验,可以借鉴。而且两者相比较,钾冷凝器较为安全[4]。

在结构上,有人建议采用双层管结构,其中水走管内,在上升的过程中汽化,上部的饱和蒸汽再通过环形通道向下过热。这样,万一发生泄漏,则漏进钾壳程的是气而不是水,这就大大地减慢了泄漏速率,有充分的时间来处理事故[2]。

在系统设计方面,采取如图3所示的保护系统[4]。在发现冷凝器泄漏后,钾透平发电机应与电网解列、冷凝器两侧流体隔开。打开阀门4可使压力快速释放。如发生大量泄漏,则可应用冷凝器进出口安全隔膜保险[4]。

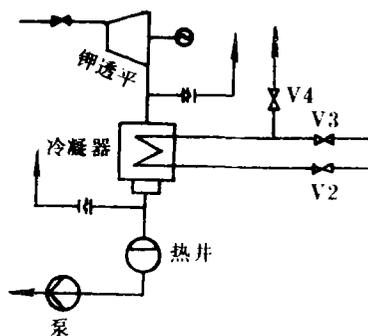


图3 冷凝器保护系统

3.2 高温材料选用问题 根据美国空间动力站发展计划,作了许多金属疲劳试验,摸索出Fe—Cr—Ni基合金在沸腾或冷凝的碱金属系统中的兼容性[1]。结论是Fe、Cr和Ni在碱金属中的溶解性虽然较小,但随着温度的升高而增加。金属在高温带出现分解,而在低温带出现沉积,这种传质现象限制了一些工质的循环上限(例如水银蒸汽的循环上限温度由此限制在 $500^{\circ}C$ 以下)。而对于碱金属蒸汽循环,在锅炉中液体内的Fe、Cr和Ni会马上达到饱和(只有百万分之几浓度),而不再继续溶解。因为只有碱金属蒸汽离开锅炉,而沉淀下来的Fe、Cr和Ni仍保留在再循环液体中。另外在冷凝温度范围($500-600^{\circ}C$),Fe、Cr和Ni在钾中的溶解度极小,几乎没有溶质通过凝结水而带入锅炉[2]。

目前关于金属在钾环境下的腐蚀数据还很少,现在多采用金属在钠中的腐蚀数据来推断[2]。通过对Fe—Cr—Ni基合金在钾中的腐蚀试验证明,金属在钾中腐蚀速度要较在钠中低[1]。图4示出了在不同的含氧量下金属的腐蚀速度与温度的关系。根据金属在液

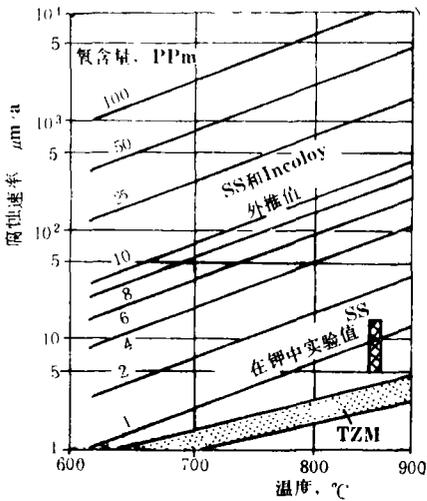


图 4 金属在流动钾中的腐蚀速率
SS: 不锈钢, TZM: Ti-Zr-Mo合金

体钠循环中的试验,在含氧量为10 ppm以下时,没有关于材料强度和其它性质方面的不良结果。其实,在锅炉蒸发循环系统里,腐蚀产物的饱和会使腐蚀速度大大降低[5]。

目前普遍认为,为了防止金属在高温下的腐蚀和结构性能变化,从长期的观点来看,选用 Incoloy 800 H 作为所有蒸发部件的材料,用不锈钢或回炉钢作为其余高温区的材料[5]。一些试验表明,这些材料在钾循环中的腐蚀情况还是可以接受的,但在某些情况下也观察到一些侵袭现象[5]。所以还需要更深入地研究其腐蚀机理,并采用有效的办法来控制这种腐蚀。

除了泄漏和材料问题外,对于多工质循环,还有钾透平的轴封结构问题、高温钾的存放问题,受热面的清洁问题以及系统中的测量及调节等技术问题。对于这些问题的研究,都已取得了一些进展[2]。

4 多工质朗肯循环的经济性

为了对多工质朗肯循环电站进行经济评价,采用能源经济上常用的方法[3]。与常规电站相比,TRC 电站效率提高,投资增

加。假设二者的发电成本相同,则允许两者投资价格之比 f 为:

$$f = \frac{i_T}{i_K} = A \left(\frac{1}{\eta_K} - \frac{1}{\eta_T} \right) + 1$$

式中: i_T 、 i_K ——TRC 电站及常规电站的投资费用 元/kW。

η_T 、 η_K ——TRC 电站及常规电站的热效率。

A ——常数。取决于燃料价格,年运行小时数,运行费用及投资的利息等因素:

$$A = \frac{b}{\frac{a+z}{h} \cdot i_K}$$

式中: b —发电燃料成本 元/(kW·h)

a —投资年利息

z —运行成本 (以年投资费用为基准)

h —年运行小时数

当TRC电站的实际投资费用与常规电站投资费用之比低于 f 值时,则 TRC 电站就有经济效益。

图5为 f 值与 TRC 电站效率的关系。其中假设常规电站的投资费用为4 000 元/kW,效率为38%,年利率为8.4%。

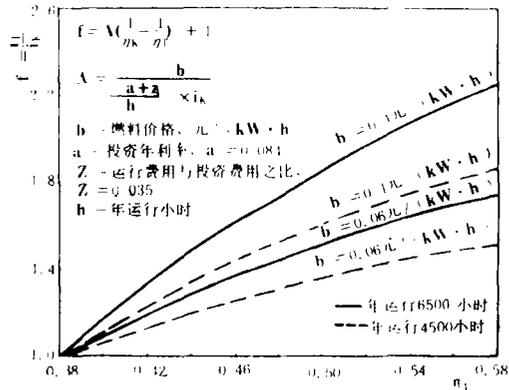


图 5 允许TRC电站与常规电站投资费用之比 f 与效率的关系

从图5中可以看出,影响 f 的主要因素是燃料价格和年运行时间。例如在年运行6500小时,TRC 电站效率为50%时,当燃

料费用从 0.06元/(kW·h) 提高到0.10/元(kW·h)时, 则 f 值从1.52提高到1.86。而在燃料价格为0.06元/(kW·h)时, 若年运行时间从6500小时(基础负荷电站)降到4500小时(高峰负荷电站)则 f 值从1.52降到1.36。但实际上TRC(或BRC)电站一般不会用来作调峰。

除此之外, 年利率及运行费用的大小也会影响TRC或BRC电厂的经济性。

如果设燃料价格为0.06元/(kW·h), 年运行6500小时, 如 $\eta_T=50\%$, 则 $f=1.52$ 。若常规电站投资费用为4000元/kW, 则当TRC或BRC电站的投资价格低于6080元/kW时, 就是经济的。如 $\eta_T=0.52$, 则 $f=1.58$, 最高经济的投资价格可达6320元/kW。

但TRC(或BRC)电站的投资价格究竟是多少, 目前还没有准确的结论, 投资高的主要原因是钾蒸发系统选用了较昂贵的Incoloy 800H材料。有四个国家: 澳大利亚、挪威、美国和西德研究了TRC电站的可行性。其中西德提供的报告较为乐观, 认为在年运行6000小时以上时, TRC电厂可与常规的燃煤电站竞争, 但不能和原子能电站及带基础负荷的褐煤电站竞争^[3]。但也有人估计, 即使到2000年(考虑燃料价格上涨的因素), 若TRC电站的年运行达5000小时, 其发电成本要较常规电站高20%^[1]。但还有一种观点认为以上估计都过于保守。原因是: ①设计时锅炉加热侧所选择的热流密度过低, 致使锅炉尺寸庞大, 投资增加; ②由于效率提高, 向环境散热减少, 因此冷却塔设备的投资还可降低; ③对TRC电厂的效率估计得过分保守, 认为实际可达52%左右; ④实际钾冷凝器尺寸还可减小, 因为两侧都是相变换热。

5 结束语

采用TRC或BRC系统可使火电厂的循环

更接近卡诺循环, 使效率提高到50%以上。可节省燃料35%左右, 向环境散发的飞灰、重金属、SO₂、及NO_x等也相应减少35%左右。同时对环境的热污染也可大大地减少。开展对TRC或BRC的研究, 是一件有意义的工作。

由于高温钾对金属的腐蚀性, 钾锅炉蒸发系统不得不采用十分昂贵的合金钢材; 其它设备的费用也大大超过常规电站, 这就大大地增加了TRC或BRC电站的投资费用。从目前情况来看, 其发电成本要高于常规电厂。但随着能源价格的上涨以及对环境保护要求的提高, TRC或BRC的吸引力将日益增加。

在技术上, 多工质朗肯循环与常规电站有很大的不同。对许多技术问题尽管已作了一些研究, 但还不够成熟, 需要对下列问题进行深入的研究:

1. 进一步研究材料的性能及受热面允许热负荷;
2. 从总体上对安全系统进行研究;
3. 对TRC和BRC电站进一步作技术经济可行性研究;
4. 研究与燃气轮机相组合的压力燃烧系统; 以进一步提高电厂总效率;
5. 在有条件时建立小型BRC实验设备, 以获更确切的数据。

参 考 文 献

- 1 Brocker D. Der Dreifachdampfprozess—Ein Konzept zur Wirkungsgradverbesserung von Grosskraftwerken. VGB Kraftwerkstechnik, 64 Heft 3. März, 1984
- 2 Frass A P. Metal vapour topping cycles—status problems and potential. New Energy Conservation Technologies, Proceedings of an International Conference, Berlin, April, 1981: 6—10
- 3 Maier W. The treble Rankine Cycle. New Energy Conservation Technologies, Proceedings of an International Conference, Berlin;

April, 1981: 6-10

4 Woudstra N, De boer G A. The potassium topping cycle—research and development activities in the Netherlands. *New Energy conservation Technologies, Proceedings of an International Conference, Berlin: April, 1981: 6-10*

5 Rieger A, Mayr K, Schwarz N. The boiler concept of the treble Rankine Cycle.

New Energy Conservation Technologies, Proceedings of an International Conference, Berlin: April 1981: 6-10

(李乡复 编辑)

Tri-Working-Medium Rankine Cycle as an Approach to Enhancing Thermal Power Plant Efficiency

Xiao Lichuan

(*Jiangsu Chemical Engineering Institute*)

Abstract

The use the tri-working-medium (kalium-diphenyl-steam) Rankine cycle can lead to an enhancement of thermal power plant efficiency by more than 50% and a fuel saving of nearly 35% with a simultaneous alleviation of environmental pollution.

Key words: *Carnot cycle, tri-working-medium Rankine cycle, cycle efficiency, leakage, corrosion, economic operation*

消息

煤气化联合循环装置的销售合同

据“Gas Turbine World”1990年9—10月号报道, Siemens(西门子)/KWU公司得到了来自RWE Energie的一个合同, 为位于Cologne市附近的 KoBra 示范装置提供燃气轮机部分。

Siemens/KWU公司将在1994年下半年交付一台 V94.3 型燃气轮机机组, 全套装置计划在1995年联机运行。

据Siemens公司说, 这将是德国第一个煤气化联合循环装置。该项目也标志了 200 MW 的V94.3型燃气轮机的第一个销售合同。

在ISO条件下, 这种最新型号的V94系列燃气轮机工作时的燃气初温为 1300 °C, 质量流量为 560 公斤/秒, 压比为16。在以气态燃料工作时, 其简单循环热效率为36%。

(吉桂明 供稿)