

# 蒸汽动力循环耦合正、逆制冷循环的电站空冷系统

杨善让<sup>1</sup>, 徐志明<sup>1</sup>, 王 恭<sup>1</sup>, 卢洪波<sup>1</sup>, 王升龙<sup>1</sup>, 陈立军<sup>2</sup>, 李菁华<sup>1</sup>, 李春来<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学节能与测控技术研究中心, 吉林省 吉林市 132012;

2. 华北电力大学动力系, 河北省 保定市 071003)

## A New Air Cooling System by Steam Power Cycle Coupled With the Positive and Negative Sequence Refrigerating Cycle

YANG Shan-rang<sup>1</sup>, XU Zhi-ming<sup>1</sup>, WANG Gong<sup>1</sup>, LU Hong-bo<sup>1</sup>, WANG Sheng-long<sup>1</sup>,  
CHEN Li-jun<sup>2</sup>, LI Jing-hua<sup>1</sup>, LI Chun-lai<sup>1</sup>

(1. Energy Conservation & Measure-Control Center, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China;

2. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** A new indirect air cooling system for steam condenser in power plant was presented, in which the steam power cycle was coupled with the positive and negative sequence refrigerating cycle by means of a special dual-phase change heat exchanger. According to the ambient temperature, the combined power and refrigeration cycle was expected to work in positive or negative order for keeping the turbine back pressure near to or below the conventional water cooling condenser pressure and to build up the capacity for adapting the air cooling system to suit the variation of ambient temperature and wind velocity. This paper illustrated the components and process flow diagram, predicted the effects, evaluated the potential benefit and pointed out the unsolved questions for the new style air cooling system. The conclusions are that the principle is credible, the technology is feasible and effects are outstanding for the new cooling system.

**KEY WORDS:** air cooling system; steam power cycle; refrigerating cycle; negative sequence refrigerating cycle; combined power and refrigeration cycle

**摘要:** 文中提出一种电站汽轮机凝汽器新型间接空冷系统, 它通过特制的双相变换热器将蒸气压缩制冷循环及与其并联的逆制冷循环和蒸汽动力循环串接耦合, 以使系统能根据环境温度的高低, 分别利用正、逆制冷循环的相互切换和制冷设备运行参数的调整将蒸汽动力循环的平均放热温度降低到和水冷系统的相近或更低, 从而使该系统既节水又低耗; 而且还可增强空冷系统的环境适应能力: 高环境温度时

段能满发, 低环境温度时段无冻害。文中介绍了该系统的组成和工作原理, 预测了系统的主要效果, 进行了粗略的经济、社会效益估计, 指出了有待进一步深入研究的问题。分析得出结论: 新空冷系统的原理可信, 技术可行, 效果显著。

**关键词:** 空气冷却系统; 蒸汽动力循环; 制冷循环; 逆序制冷循环; 复合循环

## 0 引言

目前, 国内外电站汽轮机凝汽器的绝大多数都是用水来冷却汽轮机排汽, 即湿冷系统或水冷系统; 在严重缺水地区则是以空气取代水来冷却排汽, 即干冷系统或空冷系统。空冷系统按其冷却介质与排汽间的换热方式又可分为直接空冷和间接空冷。间接空冷系统又可分为采用混合式(喷淋式)凝汽器的间接空冷系统(简称混间冷或海勒式)和采用表面式凝汽器的间接空冷系统(简称表间冷或哈蒙式)。1977年 Surface<sup>[1]</sup>曾提出以氨或氟利昂代替水作表面式凝汽器的冷却介质的设想, 但未作具体说明。

最近, 马义伟<sup>[2]</sup>介绍了近年来在国外不断得到应用的一种干—湿并列的空冷系统(图1)。它直接将干冷和湿冷两系统并联安装, 运行则按环境温度高低, 交替地分别单个运行: 低环境温度时段, 排汽进入干冷系统(图1中汽轮机、空冷凝汽器及以左部分)运行, 而高环境温度时段, 排汽则进入湿冷系统运行(图1中汽轮机、空冷凝汽器及以右虚线连接部分)。该系统虽兼有干、湿两系统的优点, 但其运行

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金项目(2007CB206904)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2007CB206904).

方式却造成了设备利用率低、维护量大、初投资和占地面积也都比较大,且环境适应能力和排放状况则仍然分别与干冷、湿冷相同。前不久,有人撰文介绍了国外两例蒸发式冷凝器用于蒸汽—燃气联合循环和锯木厂的废汽发电冷却系统的成功经验<sup>[3-4]</sup>,以举证蒸发式冷凝器用于电站空冷系统的可行性。实际上,这两例只不过增大了空冷散热器的空气侧换热系数,无助于消除电站直冷系统的“以煤换水”<sup>[5]</sup>,而且蒸发式冷凝器仍有水汽损失,仍要向环境排放。

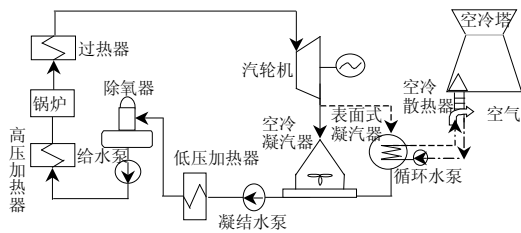


图 1 干—湿并列空冷系统示意图  
Fig. 1 Air-cooled condenser in parallel with wet-cooling tower

基于 20 世纪 60 年代以来的引进、消化吸收和科研创新实践,我国空冷界近期先后对现有诸种空冷系统作了深入、细致的技术经济比较<sup>[5-10]</sup>,形成了这样一个共识:直冷系统节水效果最为显著(节水率可达 90%),基建投资、占地面积均比间冷系统小,防冻手段又比间冷多,因而应作为空冷技术的主流。但是,直冷技术以多耗不可再生的能源——煤来换取可循环使用的资源——水的“以煤换水”而且,我国电网调峰容量不足,夏季电负荷紧张时,调度常要求空冷机组带满负荷,而且要求空冷机组的年不满发小时数越小越好<sup>[6]</sup>。但直冷机组的“高温满发”却又不得不以高背压运行方式来实现。例如,山西某厂 135MW 机组夏季满发背压最高可达 50kPa,一般也在 30kPa 以上。而且直冷的大型风机多,增大了厂用电率。更成“世界性难题”的是,直冷机组在高背压下运行时,狂风足可引起机组背压突然升高而跳闸<sup>[6]</sup>。这些都说明直冷技术的环境适应能力仍然不能满足运行要求。

与直冷形成鲜明对照的是,间冷系统虽因其“四多一难”(耗水多、占地多、投资多、水汽排放多、防冻难)而日渐逊于直冷,但它可为汽轮机提供比直冷低得多、且和水冷相近的排汽压力却具有极大的节能价值。

本文提出一种以氨或绿色制冷剂为工质的并联正、逆制冷循环和蒸汽动力循环串接耦合的新型

间接空冷技术方案,其目标在于:既能发扬现有直冷技术高节水率的优势,又能保持空冷机组的发电煤耗和传统水冷机组相近;且可使环境适应能力增强到全年满发、无冻害;实现冷却系统水汽零排放。

## 1 系统构成和工作原理

新型间接空冷系统的原理性热力系统如图 2 所示。其中双相变换热器既是蒸汽动力循环中汽轮机排汽的凝汽器,又是制冷循环中制冷剂的蒸发器。通过它,并联的正、逆制冷循环得以与蒸汽动力循环进行串接耦合。本文将上述系统称为复合循环间接空冷系统或简称为复合循环间冷系统。

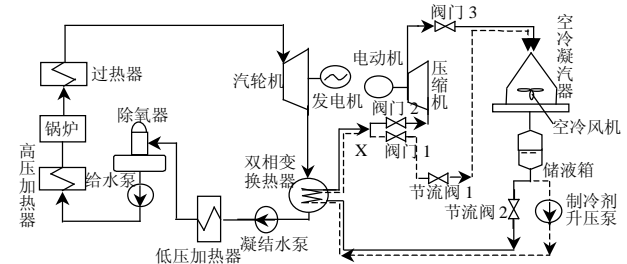


图 2 蒸汽动力循环耦合正、逆制冷循环的空冷系统原理图  
Fig. 2 Principal layout of the air cooling system of steam power cycle coupled with positive & negative refrigeration cycle

复合循环间冷系统所采用的双相变换热器可以采用强化换热管(如国内新近研制的双斜内肋管、交叉缩放椭圆管、中心被堵的纵向内翅片管等<sup>[11-12]</sup>)的管式间壁换热器,也可采用和制冷行业的冷凝蒸发器一样的板翅式间壁换热器;双相变换热器以液态制冷剂的流动蒸发来吸收间壁另一侧的汽轮机排汽冷凝所放出的汽化潜热。因此,双相变换热器需要通过全面的技术经济比较来选型、设计、研发。至于复合循环间冷系统中的空冷散热器,也应通过具体技术经济比较来选定最佳型式。限于篇幅,本文暂取直冷系统的单排翅片管空冷散热器为例进行分析。

复合循环间冷系统的工作原理为:环境高温时段,由电动机拖动压缩机使在双相变换热器内吸热蒸发的的气态制冷剂升温、升压,升温、升压后的气态制冷剂经阀进入空冷散热器,在空冷风机鼓送的冷风对流冷却下,气态制冷剂凝结为液态并被收集在储液箱中。液态制冷剂由储液箱经节流阀等焓降压至略高于双相变换热器冷却侧压力,而重新流入双相变换热器内吸热蒸发,完成正制冷循环(图 2 中的实线所示);环境低温时段,环境温度所决定的空冷散热器冷凝侧的气态制冷剂冷凝温度可低于

汽轮机真空所决定的双相变换热器冷却侧的蒸发温度，本系统利用节流阀 1 将双相变换热器出口的饱和和气态制冷剂进行节流。节流后的气态制冷剂进入空冷散热器，经空冷风机的冷风冷却而凝结为液态被收集在储液箱中，液态制冷剂由储液箱经升压泵压缩、升压，直至液制冷剂参数与双相变换热器冷却侧参数匹配后再送入双相变换热器，完成逆制冷循环(图 2 中虚线所示)。热力循环理论分析指出<sup>[13]</sup>，制冷循环是动力循环的逆循环，因而逆制冷循环便是动力循环，它可对外输出机械功。且环境气温越低，可利用的焓差越大。其工作原理可用  $T-S$  图示，如图 3。其中，实线 1'~4' 表示直冷汽轮机排汽以饱和压力  $p_{dc}$  在空冷散热器中的凝结放热过程，实线 2~4 则表示汽轮机排汽以饱和压力  $p_{cc}$  在双相变换热器中的凝结放热过程，其下方的虚线方框则分别表示正、逆制冷循环，箭头表示各过程的进行方向。鉴于目前尚无可直接利用的饱和和气态工质做功的原动机，故本方案暂不利用逆制冷循环所能提供的机械能，以简化系统，降低初投资。

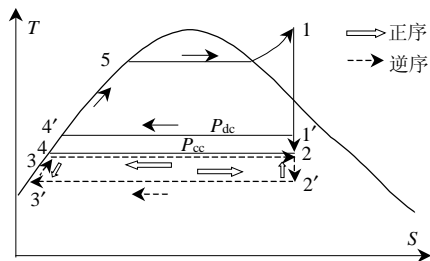


图 3 复合循环  $T-S$  图  
Fig. 3  $T-S$  diagram for combined power and refrigeration cycle

与上述类似的蒸汽动力循环与制冷循环的有机耦合在余热和中低温太阳能利用中的应用，文献已有较多报道<sup>[14-18]</sup>；在化工生产过程中的应用可以证明氨制冷循环的可行性和安全性。

综上，本文所构建的复合循环间冷系统全年都可维持比直冷系统低、甚至和常规水冷系统相近甚或更低的排汽背压。该系统在传统蒸汽压缩制冷循环中仅增设少量设备(图 2 中的压缩机、节流阀和泵及其连接管道、阀门)就能组成逆制冷循环与正制冷循环相并联、运行中可按需要而在两者之间进行切换的复合循环。

另外，采用复合循环系统的空冷机组，在低温时段还可以进一步拓宽汽轮机排汽压力的变化范围，以最大限度地增大汽轮机的可利用焓降。其最低排汽压力的两个限界为：(1)不低于汽轮机末级喷

嘴的极限压力(它由低压级设计决定)；(2)保证双相变换热器中汽水侧不结冰的压力( $\geq 0.7054\text{kPa}$ ，即保持凝结水温 $\geq 2^\circ\text{C}$ )。这样，既可在相同蒸汽初参数下增大汽轮机焓降，增大蒸汽做功能力，又可降低排汽温度，提高循环热效率。对此，复合循环空冷机组实现上述调整的操作并不复杂，只需将图 2 串接的并联正、逆制冷循环的虚、实线上的对应阀门 1、2 作开、闭切换即可。本方案正是通过图 2 所示系统、根据环境温度高低所作的切换运行来确保汽轮机排汽真空不受环境温度的影响而常年按运行要求维持在某一恒定的水平上，这将明显降低空冷汽轮机的汽耗，从而降低整个机组的煤耗和相应排放。

运行中若欲将空冷汽轮机的排汽压力降低至低于水冷机组的排汽压力，则必须有相应设计和制造的低压缸及排汽设施，以保证增大的焓降得以充分利用。

## 2 系统效果预测

预测系统效果如下：

(1) 真空提高，煤耗降低。

可通过复合循环空冷机组与相同容量和进汽参数的国产亚临界 600 MW 直冷和水冷机组的对比说明。比较中假定复合循环空冷机组低压缸已按前述要求设计、制造。直冷机组背压取为 15 kPa，这是我国“三北”富煤缺水地区的 600 MW 直冷机组设计背压 11~35 kPa 的中档值<sup>[10]</sup>。复合循环空冷机组背压设为 4.0 kPa，水冷机组设计背压取 4.9 kPa；600 MW 亚临界机组的汽轮机初参数为 16.7/538/538，对应的蒸汽初焓值为 3394 kJ/kg；设汽轮机总排汽量为 1200 t/h(333.3 kg/s)，复合循环、直冷和水冷 3 者的排汽参数(压力、温度、焓)、理想焓降及循环热效率则分别如表 1 所示。由表可见复合循环机组和直冷机组的有效功分别为  $W_1 = Q \times Dh_1 \times h_{r1} = 333.3 \times 1095 \times 0.4561 = 166459.9 \text{ kJ/s}$ ， $W_2 = Q \times Dh_2 \times h_{r2} = 333.3 \times 913 \times 0.4417 = 134410.6 \text{ kJ/s}$ 。两者差值  $\Delta W = 166459.9 - 134410.6 = 32049.3 \text{ kW}$ 。

这一比较表明，若将相同初参数的 600 MW 直冷机组改用复合循环间冷系统，且调整制冷循环运行参数使其背压略低于常规水冷机组，则采用复合循环的空冷机组相比于直冷机组可多做功： $(32049.3 / 600000) \times 100\% = 5.34\%$ ，相当于煤耗率

表1 复合循环、直冷和水冷机组的排汽压力、温度、排汽焓、理想焓降及循环热效率

Tab. 1 Back pressure, temperature, enthalpy, ideal enthalpy drop and cycle thermal efficiency for the air cooling system of combined power and refrigeration cycle, direct cooling, water cooling

系统	排汽压力 $P_e/\text{kPa}$	排汽温 度 $T_e/^\circ\text{C}$	排汽焓 $h/(\text{kJ/kg})$	理想焓降 $\Delta h_i/(\text{kJ/kg})$	有效焓降 $\Delta h_e/(\text{kJ/kg})$	循环热效 率 $\eta/\%$
复合 循环	4.0	29	2299	1095	1031	45.61
直冷	15	54	2481	913	860	44.17
水冷	4.9	32.8	2339	1055	993	45.37

降低 5.07%；我国现有 600MW 机组煤耗率一般为 280~300g/kW·h，若取所比较的直冷机组煤耗率为 290g/kW·h，则相同工况的复合循环机组煤耗将较直冷机组降低 14.7 g/kW·h；按年运行 5500 h 计，复合循环机组年发电量 34.76 亿千瓦时，则一年节约标煤 5.11 万吨。如标煤价格按 180 元/吨计<sup>[9]</sup>，则一台 600MW 复合循环空冷机组比直冷年节约燃料费用 919.8 万元。另据文献[5]报道，预计 2010 年我国火电空冷机组装机容量将新增 2300 万千瓦。

若能都采用复合循环系统，且均年运行 5500 h，则可节约标煤约 195.88 万吨/年。

(2) 物耗降低，投资减少。

Cleve<sup>[19]</sup>曾将直冷与间冷系统的空冷散热器换热过程的对数平均传热温差(LMTD)作过对比(图 4(a), (b))：间冷系统 LMTD 小于直冷系统约 30%，同样散热量、风温、风速下，间冷系统的换热面积将大于直冷系统约 30%。按此法将复合循环间冷系统与传统间冷、直冷进行对比(图 4(c))可见，复合循环系统若按双相变换热器出口(图 2 中 X 点处)制冷剂温度确定 LMTD 并据以设计空冷散热器，则其 LMTD 和直冷相近。如能采用适当的强化相变传热技术使双相变换热器的冷、热流体的传热端差降至目前的下限 3℃，则可使复合循环间冷系统具有和直冷系统极为接近的 LMTD(如图 4(b)和(c))。这表明复合循环间冷系统可有和直冷系统相近的换热面积，因而占用空间和初投资都比传统间冷系统的小。

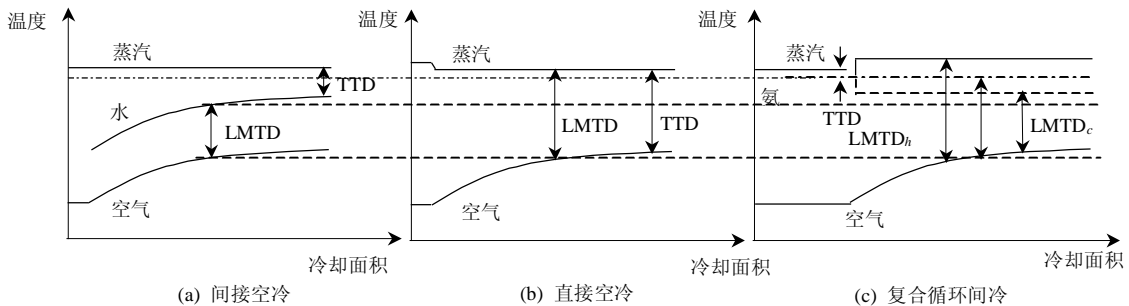


图4 传热温差的比较

Fig. 4 Comparison of heat transfer temperature difference

其次，复合循环间冷系统无需用水，亦即其节水率可达 100%。

再次，只要选用熔点低于最低环境气温的工质，如氨，其熔点为 $-77.9^\circ\text{C}$ ，其 0.1MPa 的饱和温度为 $-33.7^\circ\text{C}$ ，于是，只需保持氨蒸发温度高于 $-33.7^\circ\text{C}$ ，(实际上这一要求并不难实现：使双相变换热器传热温差 $\geq 3^\circ\text{C}$ ，保持冷凝侧的凝结水温 $\geq 2\sim 4^\circ\text{C}$ ，则氨蒸发温度约为 $-1\sim +1^\circ\text{C}$ ，相应的饱和压力为 0.11~0.45MPa)，正、逆制冷循环的工质就都可在压力状态下工作，从而使系统大为简化<sup>[13]</sup>；而且，因双相变换热器中与水蒸汽凝结温度相应(即减去传热温差)温度下的饱和氨气的比容只有水蒸汽的 0.2%左右<sup>[20]</sup>，故氨气输送管道尺寸也比直冷小很多，加上无空冷塔，占地比两种传统间冷系统小得多；再者，氨的运动粘性系数只有相同温度下水蒸汽的 14%左右，所以同尺寸流道中同样流速工

质的沿程阻力系数也较水蒸汽小，因而其管道压降也比直冷的小。这些都导致了复合循环间冷系统的物耗与投资的节省。

(3) 环境适应能力增强。

作为制冷循环的工质，还在环境和汽轮机排汽压力之间建起了一道缓冲“屏障”。利用制冷循环的正序或逆序运行和氨运行参数调整，可大为提高系统适应风温、风速变化的能力，进而可保证空冷机组全年都满发、无冻。

其次，按上述设计的复合循环间冷系统的空冷散热器，运行中因正、逆制冷循环的切换而引起的 LMTD 的变化将有利于增强机组的环境适应能力。因为，在环境高温时段，双相变换热器出口的气态制冷剂将先经压缩机进行多变指数  $n=k$  的绝热压缩，压缩后的工质温度  $T_{out}$  将按式(1)升高，升高的程度随压缩比而变化。

$$T_{out}/T_{in} = (P_{out}/P_{in})^{(k-1)/k} \quad (1)$$

式中,  $k$  为气态制冷剂的比热比。图 4(c)中右半部分以实线示之, 显而易见的是: 其 LMTD 大于直冷, 有利于环境高温时段的机组满发; 在环境低温时段, 双相变换热器出口的气态制冷剂将先经节流阀进行节流, 节流后的氨气温度  $T_{out}$  将降低, 图 4(c)中右半部分则以虚线表示, 此时的 LMTD 小于直冷, 这使极低环境温度下工质冷凝液出现过冷度的可能性减小。这表明, 按双相变换热器出口制冷剂温度设计的空冷散热器可以增强系统的环境适应能力。

而且, 以氨为制冷剂的系统, 由于氨熔点为零下  $77.9^{\circ}\text{C}$ , 只要保持双相变换热器的汽水侧最低冷凝温度不低于  $2^{\circ}\text{C}$ , 则自然气温下, 整个冷却系统都不可能发生冻害的部位。

(4) 排放减少, 环境友好。

采用复合循环间冷系统的 600 MW 机组与同容量、同初参数的直冷机组相比, 年节约标煤约 5.11 万吨。对此, 若沿用文献[21]的计算比例, 它每年将对环境减少粉尘排放 951.488 t, 减少  $\text{CO}_2$  排放 3.90 万吨, 减少  $\text{SO}_2$  排放 390.65 t。

另外, 和传统间冷系统相比, 复合循环间冷系统完全不用水, 也消除了冷却系统的水汽排放, 从而进一步减轻了环境的负担。

一般一台 600 MW 间冷机组的循环水量约需 67 000  $\text{t/h}$ <sup>[9]</sup>, 运行中因排污、蒸发损失需补水 930 $\text{t/h}$ , 直冷机组理论上则不存在水汽损耗; 若机组年运行 5500 h, 则复合循环机组比同容量间冷机组年节水量为  $(67\ 000+930\times 5\ 500)=5\ 182\ 000\ \text{t}$ ; 直冷机组的节水率一般为 69%~84%, 取其均值 76.5% 计, 则复合循环机组比同容量直冷机组的年节水量为  $518.2*(1-0.765)=1\ 217\ 800\ \text{吨}$ 。按算例所在地区补水价格 4 元/吨计, 复合循环机组比同容量间冷和直冷机组节省水费分别为 2072.8 万元和 487.12 万元。

### 3 讨论

本文所拟定的方案还有下述几点有待进一步研究、论证:

(1) 制冷剂的选型研究。氨作为第一代制冷剂有它的很多优点, 特别是它可以铁作催化剂, 以氮和氢直接进行合成而制成, 除必要的能耗外, 不消耗宝贵的自然资源, 对环境无有害排放。但氨有刺激异臭, 人体有不适感, 对碳钢等材料有腐蚀性。

因此还应与目前的绿色制冷剂作全面的技术经济分析、比较。本方案为说明方便以氨为例, 并非复合循环制冷剂的终选。

(2) 双相变换热器技术选型研究。

(3) 空冷散热器技术选型研究。

(4) 如将复合循环间冷系统的排汽压力降低到比常规的水冷系统还要低, 则需要对相应的汽轮机低压缸和双相变换热器作设计研究; 按环境温度优选正、逆制冷循环的切换温度和冷端优化的算法研究; 实现上述调整的测控技术研究。

(5) 整个系统的全面技术经济分析和综合评价研究。

### 4 结论

(1) 复合循环间冷系统的原理是可信的。

(2) 系统采用的技术多是成熟、可行的。

(3) 复合循环间冷系统的效果是明显的。

(4) 复合循环间冷系统也适用于应用蒸汽动力循环的其它电站, 如核电站、燃气-蒸汽联合循环电站等。

### 致 谢

东北电力设计院郭晓克副总工程师、热机室肖峰主任、水工室惠超主任对本文提出了一些建设性意见, 特此致谢。

### 参考文献

- [1] Surface M O. System designs for dry cooling towers[J]. Power Engineering, 1977, 81(6): 42-50.
- [2] 马义伟. 国外直接空冷电站的设计与建造[R]. 全国火电空冷机组技术交流会, 2005, 山西大同.
- [3] Baltimore Aircoil Company. Project report(PRJ41/98)[R/OL]. 1998. <http://www.baltaircoil.com>.
- [4] Baltimore Aircoil Company. Project Report (PRJ40/99)[R/OL]. 1999. <http://www.baltaircoil.com>.
- [5] 王佩彰. 我国空冷机组实践技术特点运行经验发展趋势[C]. 全国火电空冷机组技术交流会, 山西大同, 2005.  
Wang Peizhang. Characteristic of practical technology and operating experience and developing trend for air cooling system in large capacity fossil-fired power plant of China[C]. Proceeding of National Conference on Air Cooling System for Large Capacity Fossil-fired Power Plant. Datong, Shanxi, 2005(in Chinese).
- [6] 谢滨, 雷平和. 大型直接空冷电站设计、运行情况汇报[C]. 全国火电空冷机组技术交流会, 山西大同, 2005.  
Xie Bing, Lei Pinghe. Report of design and operation experience in direct air cooling system for large capacity power plant [C]. Proceeding of National Conference on Air Cooling System for Large Capacity Fossil-fired Power Plant. Datong, Shanxi, 2005 (in Chinese).

- [7] 顾国新, 张新海. 空冷系统设计经验介绍[C]. 全国火电空冷机组技术交流会, 山西大同, 2005  
Gu Guoxin, Zhang Xinhai. Experience in design of air cooling system[C]. Proc. of National Conference on Air Cooling System for Large Capacity Fossil-fired Power Plant. Datong, Shanxi, 2005(in Chinese).
- [8] 薛淦, 王志勇. 内蒙电力设计院电站空冷系统设计介绍[C]. 全国火电空冷机组技术交流会, 山西大同, 2005.  
Xue Lu, Wang Zhiyong. Experience of mongolia menggu electrical design institute in design of air cooling system[C]. Proc. of National Conference on Air Cooling System for Large Capacity Fossil-fired Power Plant. Datong, Shanxi, 2005(in Chinese).
- [9] 武俊. 600MW 机组直接空冷技术在国外的应用[J]. 华北电力技术, 2005, (3): 17-20.  
Wu Jun. The application of direct air cooling technique to domestic 600MW units[J]. Huabei electrical Technology, 2005, (3): 17-20 (in Chinese).
- [10] 伍小林. 我国火力发电厂空气冷却技术的发展现状[J]. 国际电力, 2005, 9(1): 1-4.  
Wu Xiaolin. The Developing status of air cooling technology for fossil-fired power plant in China[J]. Int. Electric Power, 2005, 9(1): 1-4(in Chinese).
- [11] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [12] 陶文铨, 何雅铃, 屈治国, 等. 强化迁移过程的基本理论——场协同原理及其应用[M]// 陶文铨, 何雅铃, 屈治国, 等. 对流换热及其强化的理论与实验研究最新进展, 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [13] 曾丹苓, 敖越, 张新铭, 等. 工程热力学[M]. 第三版, 北京: 高等教育出版社, 2002
- [14] 刘猛, 张娜, 蔡睿贤. 氨吸收式串联型制冷和动力复合循环及敏感性分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 1-7.  
Liu Meng, Zhang Na, Cai Ruixian. Series connected ammonia-water refrigeration and power combined cycle and its sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 1-7(in Chinese)
- [15] 张娜, 刘蔚蔚, 蔡睿贤. 利用 LNG 冷焯与工业余热的闭式循环热力分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 173-177.  
Zhang Na, Liu Weiwei, Cai Ruixian. Thermodynamic analysis of closed Brayton cycle working on LNG cryogenic and waste heat utilization[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 173-177(in Chinese).
- [16] 王宇, 韩巍, 金红光, 等. 新型中低温混合工质联合循环[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 200-204.  
Wang Yu, Han Wei, Jin Hongguang, et al. A novel binary cycle with mid and low temperature heat recovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 200-204 (in Chinese).
- [17] 郑丹星, 陈斌, 齐云, 等. 新型氨吸收式动力/制冷复合循环的热力学分析[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 201-204.  
Zheng Danxing, Chen Bin, Qi Yun, et al. A thermodynamic analysis of a novel absorption power/refrigeration combined cycle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(5): 201-204 (in Chinese).
- [18] Goswami D Yogi, Xu Feng. Analysis of new thermodynamic cycle for combined power and refrigeration using low and mid temperature solar collectors[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1999, 121(2): 91-96.
- [19] Von Cleve H H. 带自然通风塔的空凝汽设备直接和间接系统经济和技术比较[J]. 李惠卿, 译. VGB, 1976, 56. (9): 32-38.
- [20] Raznjevic K. Handbook of thermodynamic tables[M]. Second Edited and Revised Edition. New York: Wallingford (U. K) Begell House, Inc., 1995.
- [21] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳. 换热设备污垢与对策[M]. 第二版, 北京: 科学出版社, 2004.

收稿日期: 2006-09-10.

作者简介:

杨善让(1938—), 男, 安徽怀宁人, 教授, 博士生导师, 研究方向为节能理论与技术, 换热设备污垢与对策等, [yangshanrang@126.com](mailto:yangshanrang@126.com);

徐志明(1959—), 男, 吉林九台人, 教授, 博士生导师, 研究方向为换热设备污垢与对策, 强化传热与节能等;

王恭(1980—), 男, 安徽怀宁人, 助理实验师, 硕士, 研究方向为节能与测控技术;

卢洪波(1972—), 男, 吉林人, 副教授, 博士, 研究方向为节能理论与技术;

王升龙(1973—), 男, 黑龙江鸡西人, 副教授, 博士, 研究方向为节能理论与技术;

陈立军(1968—), 男, 吉林人, 副教授, 华北电力大学在读博士生, 研究方向为节能理论、技术及其经济评价;

李菁华(1977—), 男, 吉林舒兰人, 硕士研究生, 热能工程专业;

李春来(1981—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 测试计量技术专业。

(编辑 王庆霞)