

# 低温热源发电制冷复合系统研究进展

郑 彬,翁一武

(上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240)

**摘 要:** 对低温热源发电制冷复合系统研究现状进行了综述,介绍了吸收式发电制冷复合系统和喷射式发电制冷复合系统的发展历程和技术特点,总结了复合系统性能分析、效率评价、工质选择等方面的研究成果。指出了低温热源发电制冷复合系统中关键设备制造、系统优化设计、系统控制与集成化是制约该系统推广应用的主要因素。通过研究提出开发新型工质及适用于该类工质的系统关键设备、建立适用于不同热源品质的系统优化设计方法,同时进一步提出加强系统控制以及对系统集成技术研究是今后该领域研究工作的重点和方向。

**关 键 词:** 低温热源;发电制冷复合系统;性能比较;效率评价;工质选择

中图分类号: TK114

文献标识码: A

## 引 言

我国能源总体利用效率在 30% 左右,在能量转化利用过程中,大量余热被直接排放,导致了能源的巨大浪费。随着我国能源结构的调整,太阳能、地热能、生物质能等可再生能源的应用比例不断提高<sup>[1~2]</sup>。在此背景下,诸多学者提出了一些针对低温热源( $<200\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的发电制冷复合系统。这些复合系统能够同时满足用户对电量和冷量的需求,具有

形式多样、结构灵活、低碳环保等特点,为低温热源的清洁高效利用开辟了新的途径。

## 1 低温热源发电制冷复合系统研究现状

目前,低温热源发电制冷复合系统主要以太阳能、地热能、生物质能和回收的余热作为低温热源。低温热源发电制冷复合系统既可以与可再生能源结合作为独立的分布式联供系统使用,也可以作为底层循环用于回收利用工业系统中大型用能设备排放的工业余热。

低温热源发电制冷复合系统按照工作原理可分为吸收式发电制冷复合系统和喷射式发电制冷复合系统;按循环工质不同,又可分为纯工质系统和二元工质系统。

### 1.1 吸收式发电制冷复合系统

吸收式发电制冷复合系统最初由 Goswami 于 1995 年提出<sup>[3]</sup>,该系统以卡琳纳循环为基础,以氨水为工质,将朗肯循环与吸收式制冷循环相结合,实现同时向外界输出电量和冷量的功能。吸收式发电制冷复合系统的工作过程如图 1 所示。吸收器中高浓度氨水经工质泵加压,并通过精馏

器、回热器预热后进入锅炉,经过回热器以及低温热源加热形成高浓度氨气以及低浓度氨水两部分,低浓度氨水经过回热器、节流阀重新回到吸收器中,而高浓度的氨气经过精馏器和过热器后推动透平旋转发电做功。由于氨气具有较低的沸点,因此透平出口处氨气可以达到低温状态。这些低温气体在制冷换热器中吸热从而实现制冷效果,并在吸收器中被回流的低浓度氨水重新吸收并回到循环。在该循环模型被提出之后,Florida 大学的一些学者从理论和实验的角度对该循环进行了系统深入的研究<sup>[4~13]</sup>。其中,Xu、Hasan 和 Tamm 完善了系统的数学模型,并对不同工况下系统的工作性能进行了理论计算<sup>[4~6]</sup>。在此基础上,Lu 运用广义简约梯度法(GRG,generalized reduced gradient)对系统进行了优化计算,确定了不同热源温度下系统的最优工况<sup>[7]</sup>。随后,Vijayaraghava、Hasan 和 Vidal 从热力学第二定律角度出发,对系统进行了深入的理论分析,指出系统可用能损失主要发生在吸收器和余热锅炉中<sup>[8~10]</sup>。此外,Tamm 通过实验验证了系统的可行性<sup>[11~12]</sup>,但由于实验过程中采用膨胀阀和换热器来模拟透平工

收稿日期: 2010-08-30; 修订日期: 2010-12-10

基金项目: 国家基础研究发展计划(973)基金资助项目(2010CB227301)

作者简介: 郑 彬(1983-),男,内蒙古包头人,上海交通大学博士研究生。



中,二元工质溶液被热源加热后分为两部分,气体部分参与透平发电,低浓度溶液部分则流入吸收器中吸收制冷端的气体工质。与传统的有机朗肯循环发电系统相比,吸收式发电制冷复合系统仅有部分工质经过透平发电,而其余部分工质用于完成吸收制冷过程。

在喷射式发电制冷复合系统中,气态纯工质全部经过透平参与发电,与传统的有机朗肯循环相比,透平出口气体压力相对较高。这是因为,工质在热源中吸收的能量除了用于推动透平旋转发电外,还用于驱动喷射器工作。在此过程中系统牺牲了部分发电潜力用于驱动制冷循环。

综上所述,发电制冷复合系统的能量传递过程可简化为统一的形式,如图5所示。该过程可分为动力循环和制冷循环两部分。在动力循环中,工质从温度为 $T_g$ 的热源中吸收热量 $Q_g$ ,通过热机做功 $W_{e1}$ ,同时向温度为环境温度 $T_0$ 的冷源放热 $Q_{c1}$ 。 $W_{e1}$ 中的一部分向外输出电功 $W_{net}$ ,另一部分 $W_{e2}$ 输入到制冷循环中。制冷机在 $W_{e2}$ 的作用下从温度为 $T_c$ 的冷源中吸热 $Q_c$ ,同时向温度为环境温度 $T_0$ 的热源放热 $Q_{c2}$ 。总体上,复合系统从热源吸热 $Q_g$ ,向环境放热 $Q_c$ (包括 $Q_{c1}$ 、 $Q_{c2}$ 两部分),向外界输出电功 $W_{net}$ ,制冷量 $Q_c$ ,即:

$$Q_g + Q_c = W_{net} + Q_{c2} \quad (1)$$

两种低温热源发电制冷复合循环的本质均是在热源与环境、冷源与环境之间构建动力循环与制冷循环,而不同点在于参与动力循环与制冷循环的可用能比例不同,这也导致了两种复合循环发电量与制冷量的比值 $R$ 显著不同。与吸收式发电制冷复合系

统相比,喷射式发电制冷复合系统在制冷过程中利用了工质的气化潜热,因此制冷量具有较大幅度的提升。然而由于制冷过程牺牲了透平出口处工质的发电潜力,因此喷射式发电制冷复合循环的发电量也相应减小。总体上,吸收式发电制冷复合系统适用于发电制冷比 $R$ 较大的场合,而喷射式发电制冷复合系统适用于发电制冷比 $R$ 较小的场合,二者的能量利用效率相差不多。

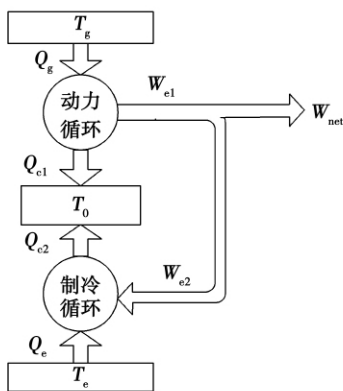


图5 复合系统能量平衡图

## 2.2 系统效率评价

在低温热源发电制冷复合系统中,存在电量和冷量两种形式的能量输出,这两种能量具有不同的品质,因此国内外学者分别从热力学第一定律和第二定律角度提出了衡量系统性能优劣的不同效率表达式<sup>[8,21]</sup>,这些表达式本质上反映了电量与冷量间不同的权重关系。

系统热效率表达式为:

$$\eta_1 = (W_{net} + Q_c) / Q_h \quad (2)$$

系统热效率 $\eta_1$ 是从热力学第一定律角度出发,考察系统的能量输入与收益。系统的能量输入是指复合系统从低温热源吸收的总热量 $Q_h$ ,系统的收益包括系统的净发电量 $W_{net}$ 与制冷量 $Q_c$ 两部分。在该效率表达式中,制

冷量的权重与电量相同,因此系统的热效率可以视为从能量“数量”角度来衡量系统的工作性能。

炯效率表达式为:

$$\eta_{exergy} = (W_{net} + E_c) / E_h \quad (3)$$

系统的输入是指低温热源向系统传递的热量中所包含的热量炯 $E_h$ 。系统的收益包括系统的净发电量 $W_{net}$ 与系统向外界输出的冷量炯 $E_c$ 。

热力学第二定律效率表达式为:

$$\eta_{II} = \eta / \eta_{rev} \quad (4)$$

式中: $\eta$ —复合系统的实际工作效率; $\eta_{rev}$ —工作在相同冷热源温度下的可逆循环工作效率。 $\eta_{II}$ —实际循环与可逆循环的接近程度。

对于吸收式发电制冷循环,由于采用二元工质作为系统工质,因此应选用相同工作温度下的洛伦茨循环效率作为可逆循环效率。而对于喷射式发电制冷复合循环,由于选用纯工质作为系统工质,因此应选用相同工作温度下的卡诺循环效率作为可逆循环效率。

无论是炯效率 $\eta_{exergy}$ ,还是热力学第二定律效率 $\eta_{II}$ 都是从能量品质角度反映系统做功能力。Vijayaraghavan以吸收式发电制冷复合系统为例对这两种效率进行了较为全面的分析,结果表明,在相同的冷热源温度和环境温度下,系统的炯效率 $\eta_{exergy}$ 与热力学第二定律效率 $\eta_{II}$ 相同<sup>[8]</sup>。需要指出的是,从热力学第二定律角度去评价复合系统,系统制冷量的权重将被严重低估,因此在实际应用中,应当进行综合考虑。

折合效率表达式为:

$$\eta_{eff} = \frac{W_{net} + Q_c / COP_{effective}}{Q_h} \quad (5)$$

该效率可以视为对系统热效率  $\eta_1$  (式(2)) 的一种改进。通过引入参数  $COP_{\text{effective}}$ , 式(5) 可以将制冷量转化为电量, 并从实际应用的角度对净发电量  $W_{\text{net}}$  和制冷量  $Q_c$  的权重关系进行重新分配。在计算中,  $COP_{\text{effective}}$  可以根据实际情况在 3 ~ 5 之间进行选择。

### 2.3 工质选择

工质的选择对于低温热源发电制冷复合系统的工作性能具有重要的影响。在选择系统工质时, 应该考虑到系统冷热源温度、设备承压范围、关键设备工作性能、安全环保性和经济性等各方面因素。在满足上述条件下, 可以选择系统效率较高的工质进行系统设计。

吸收式发电制冷复合系统以二元工质作为系统工质。由于二元工质在相变换热过程中存在温度滑移现象, 所以系统中由换热温差导致的不可逆损失可以相应减小。此外, 为确保常温下透平出口工质为气态, 低沸点工质应具有挥发性。

喷射式发电制冷复合系统选择纯工质作为系统工质, 大多数适用于低温朗肯循环的工质均可以作为备选工质<sup>[24~25]</sup>。在系统承压允许的条件下, 选择临界温度较高的工质有利于提高系统的工作效率。此外, 为了防止工质在透平和喷射器喷嘴膨胀过程中发生凝结现象, 一般选用干性工质作为系统传递能量的载体<sup>[26]</sup>。

## 3 面临的问题与发展趋势

目前, 针对低温热源发电制冷复合循环的研究工作正处于由理论研究向实验推广转变的关键阶段。制约该技术推广应用的

主要因素是系统关键设备制造、系统优化设计、系统控制与集成化等。在以分布式供能系统为背景的实验研究中, 设备的选取往往趋于小型化和集成化, 而系统规模的局限与高效之间存在着矛盾。例如, 当系统设计发电量较小时, 传统离心式透平的转速往往较高, 使用这种小流量高转速的透平将增加设备制造成本并增加与发电机等部件的连接难度。在喷射式发电制冷复合系统中存在着同样的问题。由于喷射器喷嘴的喉部面积与工作流体的流量密切相关, 因此当系统设计制冷量较小时, 喷射器喷嘴喉部面积较小。当喉部直径小于 2 mm 时, 国内加工工艺很难满足精度要求。



图 6 喷射式发电制冷复合系统试验台

图 6 为上海交通大学机械与动力工程学院建立的低温热源喷射式发电制冷复合系统实验台, 该系统选用涡旋式膨胀机, 解决了低品位热源发电装置小型化设计问题。当热源温度为 80 ~ 95 °C 时, 发电功率约 1.5 kW, 制冷量约为发电功率的 3 ~ 5 倍。

低温热源种类繁多, 数量巨大。合理高效利用低温热源具有重大的社会意义。因此, 需要对

低温热源发电制冷复合系统技术进行更深入、更细致的研究, 内容包括:

(1) 目前, 低温热源发电制冷复合循环技术主要选用有机物工质。因此, 除了加强研究新型工质外, 还需加强研究适用于该类工质的系统关键设备, 包括透平、换热器、喷射器、工质泵等。

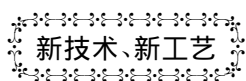
(2) 由于低温热源种类繁多, 品质各不相同, 因此需要因地制宜建立适用于不同热源品质的系统优化设计方法。

(3) 复合系统的设计与运行均对工质的流量、温度、压力有严格的要求, 因此系统控制以及系统集成技术有待进一步研发。

### 参考文献:

- [1] 江泽民. 对中国能源问题的思考 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42 (3): 345 - 359.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 可再生能源中长期发展规划 [EB/OL]. <http://www.ndrc.gov.cn/fzgh/ghwb/115zxgh/P020070930491947302047.pdf> 2007 - 09 - 28.
- [3] GOSWAMI D Y. Solar thermal power: status of technologies and opportunities for research, heat and mass transfer' 95// Proceedings of the 2nd ASME - ISHMT Heat and Mass Transfer Conference [C]. New Delhi: Tata-McGraw Hill, 1995. 57 - 60.
- [4] XU F, GOSWAMI D Y, BHAGWAT S. A combined power / cooling cycle [J]. Energy, 2000, 25 (3): 233 - 246.
- [5] HASAN A A, GOSWAMI D Y, VIJAYARAGHAVAN S. First and second law analysis of a new power and refrigeration thermodynamic cycle using a solar heat source [J]. Solar Energy, 2002, 73 (5): 385 - 393.
- [6] TAMM G, GOSWAMI D Y, LU S, et al. Novel combined power and cooling thermodynamic cycle for low temperature heat sources, part I: theoretical investigation [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125 (2): 218 - 222.

- [7] LU S ,GOSWAMI D Y. Optimization of a novel combined power refrigeration thermodynamic cycle [J]. Journal of Solar Energy Engineering , 2003 , 125 ( 2 ) : 212 - 217.
- [8] VIJAYARAGHAVAN S ,GOSWAMI D Y. On evaluating efficiency of a combined power and cooling cycle [J]. Journal of Energy Resources Technology 2003 , 125 ( 3 ) : 211 - 227.
- [9] HASAN A A ,GOSWAMI D Y. Exergy analysis of a combined power and refrigeration thermodynamic cycle driven by a solar heat source [J]. Journal of Solar Energy Engineering , 2003 , 125 ( 1 ) : 55 - 60.
- [10] VIDAL A ,BEST R ,RIVERO R et al. Analysis of a combined power and refrigeration cycle by the exergy method [J]. Energy , 2006 , 31 ( 15 ) : 3401 - 3414.
- [11] TAMM G ,GOSWAMI D Y. Novel combined power and cooling thermodynamic cycle for low temperature heat sources , part II: experimental investigation [J]. Journal of Solar Energy Engineering , 2003 , 125 ( 2 ) : 223 - 229.
- [12] TAMM G ,GOSWAMI D Y ,LU S et al. Theoretical and experimental investigation of an ammonia-water power and refrigeration thermodynamic cycle [J]. Solar Energy 2004 , 76 ( 2 ) : 217 - 228.
- [13] VIJAYARAGHAVAN S ,GOSWAMI D Y. Organic working fluids for a combined power and cooling cycle [J]. Journal of Energy Resources Technology 2005 , 127 ( 2 ) : 125 - 130.
- [14] 刘猛,张娜,蔡睿贤. 新型燃气-氨水功冷联合供联合循环 [J]. 中国电机工程学报, 2006 , 26 ( 17 ) : 82 - 87.
- [15] 刘猛,张娜,蔡睿贤. 氨吸收式串连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 - 8.
- [16] ZHANG N ,LIOR N. Methodology for thermal design of novel combined refrigeration/ power binary fluid system [J]. International Journal of Refrigeration , 2007 , 30 ( 6 ) : 1072 - 1085.
- [17] ZHANG D ,CHEN B ,QI Y et al. Thermodynamic analysis of a novel absorption power/ cooling combined-cycle [J]. Applied Energy , 2006 , 83 ( 4 ) : 311 - 323.
- [18] OLIVEIRA A C ,AFONSO C ,MATOS J , et al. A combined heat and power system for buildings driven by solar energy and gas [J]. Applied Thermal Engineering , 2002 , 22 ( 6 ) : 587 - 593.
- [19] NORD J W ,LEAR W E ,SHERIF S A. Analysis of heat-driven jet-pumped cooling system for space thermal management [J]. Journal of Propulsion and Power , 2001 , 17 ( 3 ) : 566 - 570.
- [20] 郑彬,翁一武,顾伟等. 低温热源喷射式发电制冷复合系统特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008 , 29 ( 16 ) : 16 - 21.
- [21] ZHENG B ,WENG Y W. A combined power and refrigeration cycle for low temperature heat sources [J]. Solar Energy 2010 , 84 ( 5 ) : 784 - 791.
- [22] DAI Y P ,WANG J F ,LIN G. Exergy analysis , parametric analysis and optimization for a novel combined power and ejector refrigeration cycle [J]. Applied Thermal Engineering , 2009 , 29 ( 10 ) : 1983 - 1990.
- [23] WANG J F ,DAI Y P ,SUN Z X. A theoretical study on a novel combined power and ejector refrigeration cycle [J]. International Journal of Refrigeration , 2009 , 32 ( 4 ) : 1 - 9.
- [24] LIU B T ,CHEN K H ,WANG C C. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery [J]. Energy , 2004 , 29 ( 8 ) : 1207 - 1217.
- [25] 顾伟,翁一武,曹广益等. 低温热能发电的研究现状和发展趋势 [J]. 热能动力工程, 2007 , 22 ( 2 ) : 115 - 119.
- [26] SUN D W ,EAMES I W. Recent developments in the design theories and applications of ejectors-a review [J]. Journal of Institute of Energy , 1995 ( 68 ) : 65 - 79.



## 加药水处理对锅筒式锅炉水冷壁的影响

据《Электрические станции》2010年8月号报道,ВТИ(全俄热工研究所)的专家们对锅筒式锅炉的水处理进行了深入的研究。

研究了使用氨水处理后的ТП-90和ТМ-104А型锅筒式锅炉水冷壁损坏段和非损坏段的金属、氧化膜和沉积物的状态。

分析表明,破坏是由热应力、安装和维修所形成的缺陷进而溃疡腐蚀引起的。ТП-90锅炉炉膛下部含盐段水冷壁管段的腐蚀破坏具有热力性质,这与水处理无关。

分析还表明,锅筒式锅炉采用的水处理,如氨、联氨、磷酸盐和铵的水处理,不是保护金属免受腐蚀的普遍适用的方法。

保护金属免受腐蚀在于要查明并消除热力工况的破坏、安装和维修所形成的缺陷、吸入和污染源,而不仅仅是在于使用新的水处理或对传统的水处理进行修正。

在汽轮机冷凝器和低压加热器内拒绝使用由铜合金制造的管子是合理的。

(吉桂明 摘译)

低温热源发电制冷复合系统研究进展 = **Recent Advances in the Study of a Low-temperature Heat-source-based Power Generation and Refrigeration Combination System** [刊, 汉] ZHENG Bin, WENG Yi-wu ( College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(2). - 129 ~ 133

An overview was given of the research status of low-temperature heat source-based power generation and refrigeration combination systems. Furthermore, the development and technical features of both absorption and jet type power generation and refrigeration combination systems were introduced. The research findings concerning the performance analysis, efficiency evaluation and choice of working media of the systems in question were summed up. It is noted that key equipment manufacturing, optimized design, control and integration of the systems in question constitute the main factors restricting their popularization and application. Through the research, the authors have recommended that to develop new type working media and key equipment items for the systems adapting to working media of the kind, establish a system optimized design method applicable for different qualities of heat sources and at the same time further strengthen the study on the control and integration technologies of the systems will be the focal point and direction for future studies in this domain. **Key words:** low-temperature heat source, power generation refrigeration combination system, performance comparison, efficiency evaluation, working medium choice

气冷涡轮级气热耦合非定常数值模拟 = **Unsteady Numerical Simulation of the Air-heat Coupling of an Air-cooled Turbine Stage** [刊, 汉] ZHOU Hong-ru, GU Zhong-hua, HAN Wan-jin, et al ( College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(2). - 134 ~ 139

By using a numerical method for simulating three-dimensional unsteady air-heat coupling, studied were the unsteady flow and cooling performance of a single-stage turbine with cooling structures. Through an analysis of the unsteady flow field in the blade cascade and the solid temperature field, the influence of cold air on them was explored. It is noted that under the unsteady state, various relative positions of the rotor and stator blades can produce accordingly different air-film outflow conditions. The upstream periodic unsteady wake flow may lead to a mixing of the main stream in the rotor blades at the downstream with the air-film protection layer and cause a decrease in air-film cooling efficiency. The impingement of the wake flow on the leading edge of the blades will lead to a sudden increase in the attack angle, the aerodynamic load and temperature distribution on the blades will produce a fluctuation to a certain degree and the disturbance received by the leading edge of the suction surface will become more evident. **Key words:** air-heat coupling, turbine, blade, unsteady, air-film cooling

轮毂缘板进口圆角对涡轮气动性能的影响 = **Influence of the Hub Flange Plate Inlet Fillet Radius on the Aerodynamic Performance of a Turbine** [刊, 汉] ZHANG Wei-hao, ZOU Zheng-ping ( Key Laboratory on Aeroengine Aerodynamics and Thermodynamics, College of Energy Source and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100191), ZHOU Ying, PAN Shang-neng ( China Aviation Power Machinery Research Institute, Zhuzhou, China, Post Code: 412002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(2). - 140 ~ 146

As the seal gas on the hub would produce certain influence on the flow field configuration and aerodynamic performance of a turbine, a numerical simulation method was used to study the influence of the hub flange plate inlet fillet radius on the aerodynamic performance and inner flow configuration at different seal gas flow rates. The research re-