

基于电气体发电的 ORC 系统热力学分析

孙万敏, 刘娟芳, 陈清华, 朱桂同

(重庆大学 动力工程学院 重庆 400044)

摘 要: 构建了含电气体发电的 ORC 系统并对比于传统的汽轮机-发电机的发电方式, 以发电功率和炯效率作为目标函数, 基于热力学和电学理论, 计算分析了亚临界状态下 7 种不同工质相应目标。研究表明, 蒸发温度升高, 系统发电功率增加。相同条件下, R134a 有较大的输出电功率; 热源进口温度一定, 窄点温差越小, 系统炯效率越大; 同一窄点温差, 热源进口温度不高于临界温度约 2 倍的窄点温差时, 炯效率存在最大值; 反之, 炯效率则随蒸发温度单调递增。本研究将为 ORC 新型发电技术在工质选择和性能优化方面提供理论指导。

关 键 词: 电气体发电; 发电功率; 炯效率; 窄点温差

中图分类号: TK123; O432.1 文献标识码: A

引 言

ORC(有机朗肯循环)地热发电被认为是地热能的一种有效利用形式^[1-2]。ORC 是利用有机工质替代传统朗肯循环中水蒸气动力循环, 因其无需消耗化石燃料, 减少了对环境的污染, 因此受到广泛的关注。对 ORC 的研究已较深入和全面, 电气体发电则是一项新型发电技术^[3-4], 它将工作流体的动能直接转化成电能。较传统汽轮机-发电机的发电方式, 装置内无运动部件, 结构简单, 发电简单。另外, 电气体发电的特点是电压比较高, 电流比较小, 特别适用于小功率发电的场所, 如用作航天飞行器电火箭发动机电源、静电除尘、静电喷漆等。目前, 国内外电气体发电相关研究较少。西安交通大学的陈昕宽等介绍了电气体发电的基本原理^[5], 单极电荷的产生、输送、收集及电气体发电的热力循环。Marks 阐述了电气体发电的装置和原理并对简化的模型进行了分析计算^[6-7]。Varga 利用 CFD 对电气体发电装置中的两相流流动进行了数值模拟^[8]。Khalid 的研究以实验为主, 在理论分析和工质选择

都比较单一^[9]。Riffat 等侧重于电气体发电部分的研究, 未对整个系统进行综合性能分析^[10]。

本研究构建了电气体发电的 ORC 系统, 分析了亚临界状态下, HFE7100、n-hexane、R11、R123、R134a、R718、R134a、R717、R718 7 种工质相应热力学循环性质。

1 电气体发电的 ORC 系统及其热力学分析模型

1.1 电气体发电的 ORC 系统

电气体发电的 ORC 系统由 4 个部件组成, 分别是蒸发器、冷凝器、发电装置、工质泵。其中, 发电装置如图 1 所示, 其工作原理是将具有一定能量的工作流体从发电装置的入口端送至发电装置内部, 通过静电场(即针形发射极与环形吸引极之间接有高压电源后所形成的电场)的作用, 外加电晕放电, 产生单极性的带电粒子。由于流动过程中粘性摩擦, 这些单极性带电粒子被强制带到收集极, 从而产生电势并形成高电位。而载有电荷的工作流体则从低电势向高电势流动, 当收集极与有阻值的外负载相连接后, 就会有电流流过外负载, 产生电能。电气体发电的实质是流体在流动过程中, 消耗自身能量(流体的压力和温度降低), 使流体热能转变为电能^[5]。

循环装置及相应 $T-s$ 图如图 2 所示。循环工质在蒸发器中吸收地热流体余热, 变为蒸气(2-3-4); 蒸气进入发电装置, 膨胀做功, 压力减小, 焓值降低(4-5); 发电后的乏气进入冷凝器对冷凝剂放热, 冷凝为饱和液(5-1); 饱和液被工质泵加压至蒸发压力后被送往预热器和蒸发器, 从而完成一次循环。

收稿日期: 2014-01-01; 修订日期: 2014-03-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 基金资助项目(2011CB710701)

作者简介: 孙万敏(1989-), 女, 四川简阳人, 重庆大学硕士研究生。

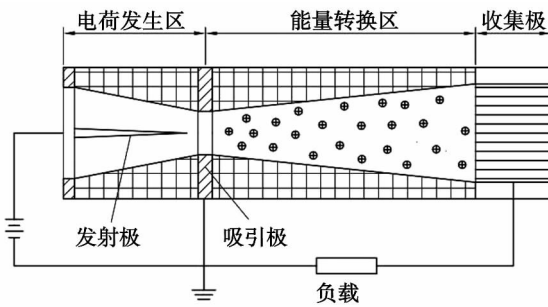


图 1 电气体发电装置图

Fig. 1 Diagram of an electrical-gas power generation device

在发电装置中,发射极位于喷管渐缩段中心,吸引极位于喉部中央,收集极位于渐扩段中心,电气体发电在喷管内完成。考虑摩擦等不可逆因素,发电装置和泵内工质实际膨胀和压缩过程如 $T-s$ 图中的虚线所示。其中, T_{in} 、 T_{out} 和 T_m 分别为地热流体在蒸发器进口、出口和窄点温度(K)。

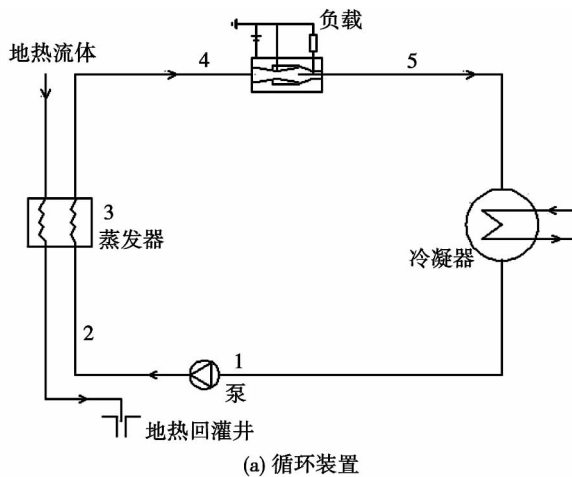


图 2 基于电气体发电的 ORC 系统简化模型及温熵图

Fig. 2 Simplified model for an ORC system and its $T-s$ diagram based on the electrical-gas power generation

1.2 热力学分析模型

1.2.1 发电功率

根据电学基本原理,发电装置发电功率为:

$$P = IU \tag{1}$$

式中: P —发电功率, W; U —发电电压, V; I —发电电流, A。

电压 U 由泊松方程计算:

$$\Delta^2 V = - \frac{\delta}{\epsilon_0 \epsilon_r} \tag{2}$$

式中: ϵ_0 —真空中的介电常数, F/m; ϵ_r —工作流体的相对介电常数, F/m; δ —电荷密度, $\mu\text{C}/\text{m}^3$ 。

电荷密度 δ :

$$\delta = \frac{I}{u_p A} \tag{3}$$

式中: A —发电通道横截面积, m^2 ; u_p —带电粒子速度, m/s 。

流体速度 u_p :

$$u_p = u + \lambda \cdot E \tag{4}$$

式中: λ —电荷迁移率, m^2/Vs ; E —电场强度, V/m 。

假定电气体发电机内工作流体一维流动,电荷的密度恒定且迁移率 $\lambda = 0$ 。将式(2)积分并代入式(1)可得:

$$P = \frac{I^2 L^2}{2u_0 A_0 \epsilon_0 \epsilon_r} \tag{5}$$

式中: u_0 —发电喷管喉部的工质流速, m/s ; A_0 —发电喷管喉部的横截面积, m^2 。

1.2.2 焓效率

根据热力学第二定律,电气体发电的 ORC 系统焓效率可表示为:

$$\eta_{ex} = \frac{0.001(P + \dot{m}_g e_k)}{\dot{m}_f e_0} \tag{6}$$

传统的 ORC 系统焓效率可表示为:

$$\eta'_{ex} = \frac{\eta_G \dot{m}_g (h_4 - h_5)}{\dot{m}_f e_0} \tag{7}$$

式中: e_k —工质在单位时间内离开发电装置的出口能量 J/s ; h —各点的焓值 kJ/kg ; e_0 —地热流体进口焓值 kJ/s ; \dot{m}_g 和 \dot{m}_f —循环工质和地热流体的质量流量 kg/s ; η_G —机电效率。

2 热力学分析结果和讨论

工质的选择对热力系统性能有着十分重要的影

响,选择工质应考虑其热力学特性、可燃性、挥发性、腐蚀性、臭氧消耗潜值(ODP)、全球变暖潜能值(GWP)等因素^[11]。本研究主要根据工质的热力学性质,选择了7种不同工质^[12-13],其参数列于表1。

表1 工质性质参数

Tab.1 Parameters of the properties of the working medium

工质	摩尔质量/ $g \cdot mol^{-1}$	临界温度/K	工质类型
HFE7100	250	468.45	干工质
n-hexane	86.17	507.85	干工质
R11	137.4	471.15	等熵工质
R123	152.9	456.86	等熵工质
R134a	102.03	374.25	湿工质
R717	17.03	405.45	湿工质
R718	18.02	647.15	湿工质

以地热流体为研究对象,其进口温度范围423.15-493.15 K。环境温度设为298.15 K,冷凝温度为313.15 K,喷管喉部直径和长度分别为0.003和0.01 m,机电效率 η_c 为0.98,汽轮机相对内效率 η_T 为0.9。分析计算中假设:(1)喷管效率为0.9;(2)忽略管道内压降和其它不可逆因素;(3)假设整个循环处于稳态;(4)忽略泵功及其能量损耗;(5)不考虑击穿电压。

2.1 蒸发温度对发电功率、焓效率的影响

亚临界状态下,地热流体进口温度为423.15 K时,所选7种工质蒸发温度对系统发电功率、焓效率的影响分别如图3和图4所示。

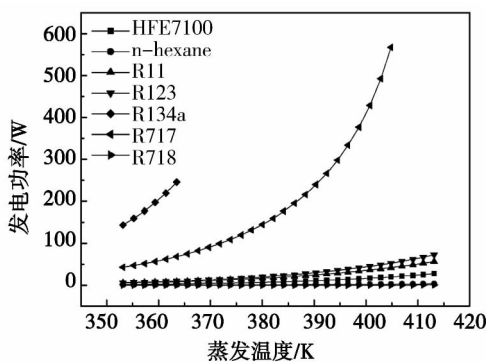
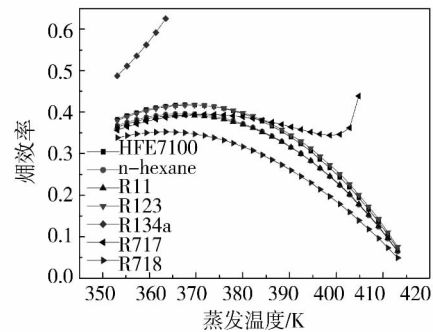


图3 蒸发温度和发电功率的关系

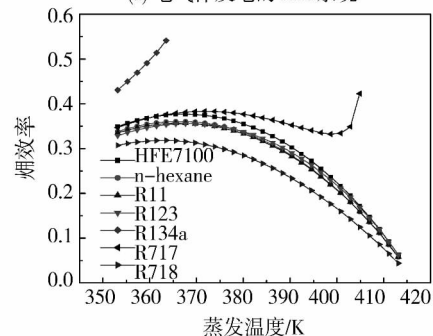
Fig.3 Relationship between the evaporation temperature and power generated

因R134a临界温度较低,其蒸发温度区间取为353.15-363.49 K。从图3可以看出,循环的发电功率随蒸发温度的增加而增加。相同蒸发温度区

间,R134a发电功率最大,其次是R717和R123。从式(5)可知,喷管一定,发电功率P只与电流I和喉部流速 u_0 有关,而影响两者的因素是蒸发温度。随蒸发温度增加,电流I、喉部流速 u_0 均增加。另外,输出功率还受限于工质临界温度以及最大击穿强度^[10]。



(a) 电气体发电的ORC系统



(b) 传统的ORC发电系统

图4 蒸发温度和焓效率的关系

Fig.4 Relationship between the evaporation temperature and exergy efficiency

从图4可看出,在相同的工作条件下,电气体发电的ORC系统与传统的ORC系统焓效率随蒸发温度变化趋势相似。传统的汽轮机-发电机产生的交流电功率,可达十千瓦级,而电气体发电的ORC系统产生的交流电功率仅达百瓦级。针对电气体发电功率较小的问题,可通过集成电气体发电机组、增加喷管的长度及带电粒子的荷质比来提高系统的发电功率大小。其中,电气体发电系统产生的较大动能,可增加喷射器产生制冷效益,实现热、电、冷三联产,从而更加合理的利用地热能。除此之外,电气体发电装置无转动部件,相比常规的汽轮机-发电机热力循环系统,结构紧凑、维护要求更低。结合表1可知,本研究所构建的电气体发电的ORC系统焓效率的高低不仅取决于工质本身的性质,而且受其临界温度的制约。

2.2 热源进口温度对系统炯效率的影响

以 HFE7100(干工质)、R123(等熵工质)以及 R134a(湿工质) 3 种工质为例,对比分析热源进口温度对系统炯效率的影响。

图 5 分别示出窄点温差为 6 K 时,针对 HFE7100、R123、R134a 3 种工质,不同地热流体进口温度对系统炯效率的影响曲线。

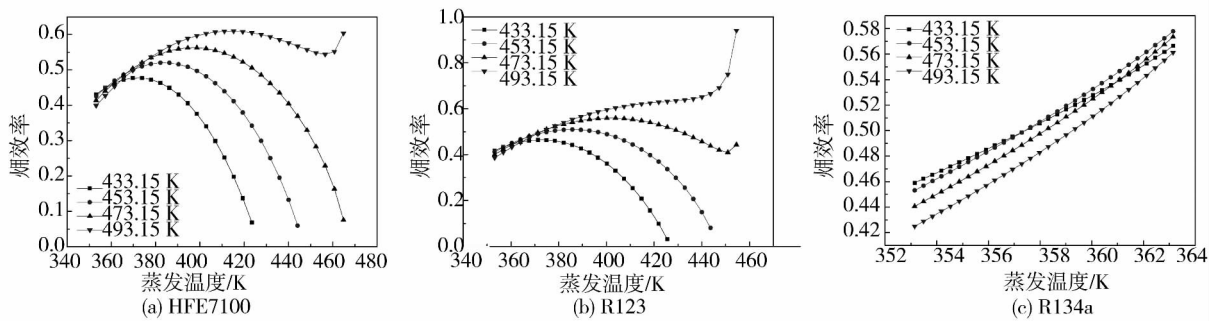


图 5 热源进口温度对系统炯效率的影响

Fig. 5 Influence of the temperature at the inlet of the heat source on the exergy efficiency

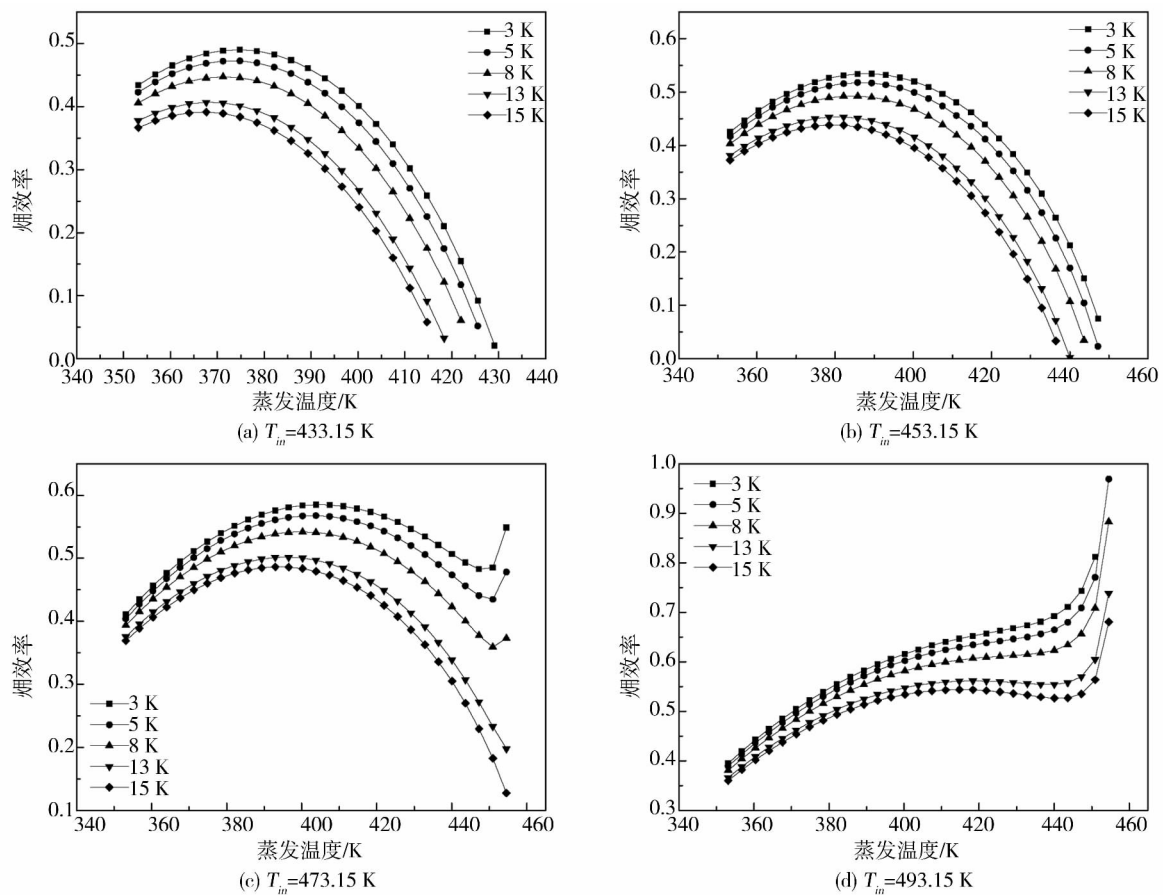


图 6 R123 窄点温差对炯效率的影响

Fig. 6 Influence of the temperature difference of R123 at its pinch point on exergy efficiency

由图 5(a)、图 5(b) 可以看出,当热源进口温度低于工质临界温度时,系统炯效率随蒸发温度增加

先增大后减小,呈开口向下“抛物线”形状,并且热源进口温度增大,系统炯效率也增加;由图 5(c) 可

以看出, R134a 焓效率随蒸发温度升高而单调递增, 这是因为 R134a 临界温度为 374.25 K, 热源进口温度均高于其临界温度。通过图 5 以及其它工质的计算可知, 当热源进口温度低于工质的临界温度时, 系统焓效率均呈开口向下“抛物线”形状, 系统焓效率随蒸发温度增加先升高后降低; 当热源进口温度高于临界温度约 2 倍窄点温差时, 且当蒸发温度接近于工质临界温度时, 系统焓效率将随蒸发温度增加而变大; 但当热源进口温度高于工质临界温度时, 焓效率急剧增大。但是高温热源对应的焓效率并无优势, 而略低于低温热源对应的焓效率。另外, 对于其它工质, 当蒸发温度低于 350 K 时, 高温热源所对应的焓效率也是略低于低温热源所对应的焓效率。

2.3 窄点温差对系统焓效率的影响

选取 3、5、8、13 和 15 K 5 个不同的窄点温差, 分析其对系统焓效率的影响。通过计算分析可得, 对与本研究所选的工质, 窄点温差对系统焓效率的影响类似。以等熵工质 R123、湿工质 R134a 为例进

行分析。

从图 6 和图 7 可看出, 当热源进口温度分别为 433.15、453.15、473.15、493.15 K 时, 窄点温差对工质 R123、R134a 系统焓效率的影响。对于等熵工质 R123, 不同窄点温差下, 系统焓效率基本呈“抛物线”状。当热源温度 473.15 K、蒸发温度 450 K、窄点温差分别为 3、5、8 K 时, 系统焓效率存在一极小值。当热源进口温度高于临界温度 2 倍窄点温差时, 随蒸发温度增加, 系统焓效率单调递增, 不存在极值点。对于湿工质 R134a, 因其临界温度低于热源进口温度, 系统焓效率随蒸发温度增加而单调递增。同样地, 高温热源对其焓效率并没有优势, 相反, 略低于较低温热源。

结合表 1 可发现, 热源进口温度不高于循环工质临界温度时, 系统焓效率随蒸发温度增加先升高后降低, 有一极大值; 同一热源进口温度, 窄点温差越大, 系统焓效率越低, 能量利用程度降低。这是由于窄点温差越大, 工质和余热间不可逆换热温差越大, 换热不可逆损失越大。

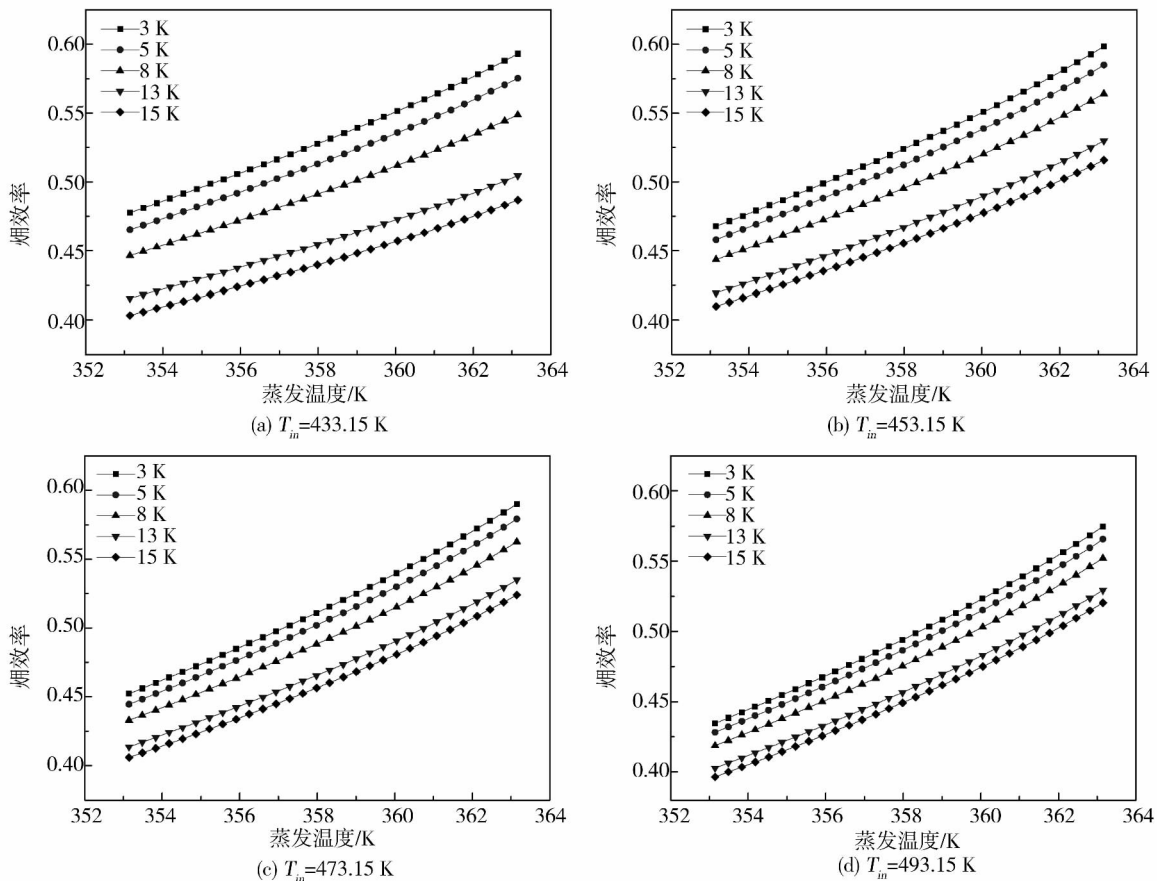


图 7 R134a 窄点温差对焓效率的影响

Fig. 7 Influence of the temperature difference of R134a at its pinch point on exergy efficiency

3 结 论

基于热力学和电学理论编程,对比于传统的汽轮机-发电机的发电方式,数值计算并分析了 7 种工质发电功率和系统焓效率的特性,得出结论:

(1) 亚临界状态下,随蒸发温度升高,系统发电功率增加。

(2) 余热温度对系统焓效率影响显著。热源进口温度高于临界温度约 2 倍的窄点温差、且当蒸发温度接近于工质临界温度时,系统焓效率随蒸发温度的增加而变大;反之,则存在最佳蒸发温度,使焓效率最大。但是,当蒸发温度约低于 350 K 时,高温热源所对应的焓效率略低于低温热源所对应的焓效率。

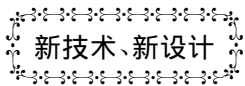
(3) 窄点温差对相同性质的工质系统焓效率的影响类似。窄点温差越小,系统的焓效率越大。

参考文献:

- [1] 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): 115-120.
GU Wei, WENG Yi-wu, CAO Guang-yi, et al. The latest research findings concerning low-temperature heat energy-based power generation and its development trend [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(2): 115-120.
- [2] ZHANG S J, WANG H X, GUO T. Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation [J]. Applied Energy, 2011, 88(8): 2740-2754.
- [3] Walsh E M. Electrogasdynamic energy conversion [J]. Spectrum,

- IEEE, 1967, 4(12): 57-62.
- [4] Gourdine M C, Kahn B. Electrogasdynamic power generation [J]. AIAA Journal, 1964, 2(8): 1423-1427.
- [5] 陈昕宽, 章燕谋, 温龙等. 新能源发电 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
CHEN Ting-kuan, ZHANG Yan-mou, WEN Long, et al. New heat source power generation [M]. Beijing: Machine Press, 1989.
- [6] Marks A M. Heat Electrical Power Conversion Through the Medium of a Charged Aerosol [P]. USA: 2638555, 1953.
- [7] Marks A M. Electrothermodynamic Power Converter With Converging Flows [P]. USA: 4677326, 1987.
- [8] Szaboles Varga, Oliveira. Simulation study of an electrogasdynamic power converter using CFD [J]. International Journal of Low Carbon Technologies, 2006, 1(3): 245-261.
- [9] Khalid Eissa. Electrogasdynamic converter incorporated in a trigeneration system [J]. Chapnet Newsletter, 2004, 4(9): 4-8.
- [10] Oliveira. Riffat. Study of Electrogasdynamic Power Conversion [A]. Clement M. Lefebvre. Electric Power: Generation, Transmission and Efficiency [C]. New York: Nova Science Publishers, 2007: 171-200.
- [11] 张军辉, 刘娟芳, 陈清华. 有机朗肯循环系统最佳蒸发温度和分析 [J]. 化工学报, 2013, 64(3): 820-826.
ZHANG Jun-hui, LIU Juan-fang, CHEN Qing-hua. Optimal evaporation temperature and analysis of an organic Rankine cycle [J]. CIESC Journal, 2013, 64(3): 820-826.
- [12] Drescher U, Brüggemann D. Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(1): 223-228.
- [13] BADR O, PROBERT S D, O'Callaghan P W. Selecting a working fluid for a Rankine-cycle engine [J]. Applied Energy, 1985, 21(1): 1-42.

(丛敏 编辑)



新技术、新设计

利用数值分析方法提高涡轮叶片的冷却效率

据《Теплоэнергетика》2013 年 2 月刊报道,俄罗斯“航空发动机”无限股份公司的专家分析了未来燃气轮机装置涡轮第 1 级静叶的新结构。

在共轭概念的基础上,利用软件包 MNSYS CFX13.0 数值模拟了叶片的热力状态。

根据热流分布确定了叶片的危险部位,分析了提高冷却效率的措施。

上述成果可使叶片金属的最高工作温度显著降低(50-100 °C)。

(吉桂明 摘译)

The authors have conducted a study of the influence of the participation of a supercritical high power unit in the primary frequency modulation of the power grid on the loss in service life of the steam turbine. Established a finite element model for the fatigue life of the rotor of the turbine under various operating conditions and calculated and analyzed the transient temperature field and elastic and plastic stress field of the rotor when the unit was taking part in the primary frequency modulation of the power grid. It has been found that when the load changes in a range of 10%, the maximum stress on the surface of the shaft at the dangerous location is 82.18 MPa, the variation value of the stress is 69.18 MPa, the maximum stress at the center of the shaft is less than 20 MPa and the variation value of the stress is less than 17 MPa, showing that the stress is very low and the thermal stress is also very small. The primary frequency modulation has a small influence on the temperature variation at all stages in HP and MP cylinder and the thermal stress and the influence on the service life of the unit can be neglected, thus the unit is capable of safely taking part in the primary frequency modulation of the power grid. **Key Words:** supercritical unit, primary frequency modulation, temperature field, stress field, steam turbine life

基于电气体发电的 ORC 系统热力学分析 = **Thermodynamic Analysis of an ORC System Based on the Electro-gas Power Generation** [刊, 汉] SUN Wan-min, LIU Juan-fang, CHEN Qing-hua, ZHU Gui-tong (College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014, 29(4). -374-379

Set up was an ORC system based on the electro-gas power generation and with the power generation power output and exergy efficiency serving as the target function, based on the thermodynamics and electricity theory, calculated and analyzed were the corresponding targets of seven working media in the subcritical state when compared with the traditional steam turbine-generator power generation mode. It has been found that with an increase in the evaporation temperature, the power generated by the system will increase. Under the same conditions, R134a will have a relatively large output power. When the inlet temperature of the heat source is constant, the smaller the pinch point temperature difference, the higher the exergy efficiency of the system. At a same pinch point temperature difference, when the inlet temperature of the heat source is not approximately two times higher than the pinch point temperature difference, the exergy efficiency will have its maximum value. In the contrary, the exergy efficiency will monotonely increase with an increase of the evaporation temperature. The foregoing can offer theoretical guide for selection of working media and performance optimization of novel ORC power generation technologies. **Key Words:** electro-gas power generation, power generation efficiency, exergy efficiency, pinch point temperature difference

芳烃蒸馏过程低温余热发电系统影响因素分析 = **Analysis of the Factors Influencing a Waste Heat Power Generation System in an Aromatic Hydrocarbon Distillation Process** [刊, 汉] YANG Ping, WENG Yi-wu (Ed-