

海洋温差能发电系统新型热力循环理论分析

刘蕾, 陈风云, 彭景平, 葛云征, 刘伟民*, 王泉斌

自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

摘要 海洋温差能发电系统新型热力循环在 Kalina 循环基础上增加贫氨溶液回热支路和抽气回热支路以提高热力循环效率。应用能量守恒原理和热平衡方程对新型热力循环——国海循环进行理论研究, 计算了不同的透平入口蒸汽压力、氨水混合工质浓度、温海水温度和冷海水温度条件下的循环效率。理论计算结果表明, 氨水混合工质浓度对国海循环效率影响显著, 冷热源温度确定的条件下存在最优的氨水混合工质浓度使得循环效率最高, 当温、冷海水温度分别为 26、5℃, 氨水工质浓度为 92% 时, 系统效率最大达到 4.56%; 当氨水混合物浓度不变时, 循环效率随透平入口蒸汽压力的升高先升高后降低, 存在极大值; 冷海水入口温度对循环效率影响很明显, 而温海水温度对循环效率影响较小。

关键词 海洋温差能发电; 热力循环; 循环效率

海洋温差能发电是利用海洋表层温海水与深层冷海水之间的温差所蕴藏的热能来发电的, 该设想在 1881 年由法国人 d'Arsonval 提出^[1]。海洋温差能资源稳定、储量丰富、能量密度高、绿色可再生、综合利用价值高^[2], 是海洋能中最具开发利用价值和潜力的资源^[3]。海洋温差能的开发利用对改善

能源结构、缓解能源压力、开发岛屿资源等具有重要意义。

海洋温差发电系统可供利用的温差约 20℃, 当温、冷海水温度分别为 26、4℃ 时, 卡诺循环效率仅为 7%, 考虑到各种能量的损失, 当海洋温差发电系统采用朗肯循环时, 总效率仅为 3%^[4]左右, 除去泵

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2020-12-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41976204); 中韩海洋能源开发与利用技术交流合作(PI-2018-4); 国家自然科学基金青年基金项目(51709055); 青岛市蓝色经济区建设专项(Q1402)

作者简介: 刘蕾, 研究实习员, 研究方向为海洋温差能开发利用, 电子信箱: liuleiupc@163.com; 刘伟民(通信作者), 研究员, 研究方向为海洋温差能开发利用, 电子信箱: lwmxjt@163.com

引用格式: 刘蕾, 陈风云, 彭景平, 等. 海洋温差能发电系统新型热力循环理论分析[J]. 科技导报, 2021, 39(6): 84-89; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.06.012

等自身耗功(约为2%),系统净输出效率仅为1%^[5]左右。较低的循环效率限制了海洋温差能的商业化开发利用^[6]。研究人员通过筛选最优的低沸点工质、优化运行参数、增加热源温度或减小冷源温度、降低透平背压等方式对采用基本朗肯循环的海洋温差能发电系统进行优化以提高系统效率^[7-13]。

Kalina^[14]提出利用氨水混合物替代单一工质作为工作介质的新循环——Kalina循环,由于氨和水沸点不同,因此溶液在蒸发器内变温蒸发,溶液升温过程与热源的放热过程得到更好的匹配,降低换热过程的不可逆损失;同时系统中多了一个分馏冷却子系统,透平出口乏气可以在较低的压力下冷凝,因此可以增加蒸汽在透平内的做功,系统循环效率进而得到提高。Kalina循环中贫氨溶液大部分热量在冷凝器内散失,没有被充分地利用。为了充分利用这部分热量,提高循环效率,Liu等^[15]在Kalina循环基础上增加了贫氨溶液回热支路和抽气回热支路,构建了新型热力循环——国海循环。

从理论上对国海循环进行分析,对循环中关键部件建立数学模型,模拟分析不同透平入口蒸汽压力、工质浓度、温/冷海水温度条件下发电系统效率,得到以上参数对系统效率的影响规律。

1 国海循环系统原理

国海循环工质采用氨水混合溶液,系统采用两级透平,并设有2个回热支路:贫氨溶液回热支路和抽气回热支路,循环原理如图1所示,其中数字代表状态点位置。

系统流程为氨储液罐内的氨水混合工质通过工质泵进入回热器1,在回热器1中被贫氨溶液加热后进入回热器2中被抽气回热,之后进入回热器3中被分离器出口的贫氨溶液预热后进入蒸发器,氨水溶液在蒸发器内被温海水加热成气液两相混合物,在分离器中被分离成液体和气体:液体中氨比例较低,被称为贫氨溶液,贫氨溶液的热量通过回热器3和回热器1进行梯级利用,降温后的贫氨溶液通过节流阀进入吸收器;分离器出口的气体进入透平1和透平2内膨胀做功,做功后的气体进入吸收器,在透平1出口处部分氨气进入回热器2回热氨水混合物,之后通过节流阀进入吸收器。透平2出口气体、贫氨溶液回热支路液体及抽气回热支路液体在吸收器内混合后进入冷凝器内,被冷海水冷凝成液体后进入氨储液罐。

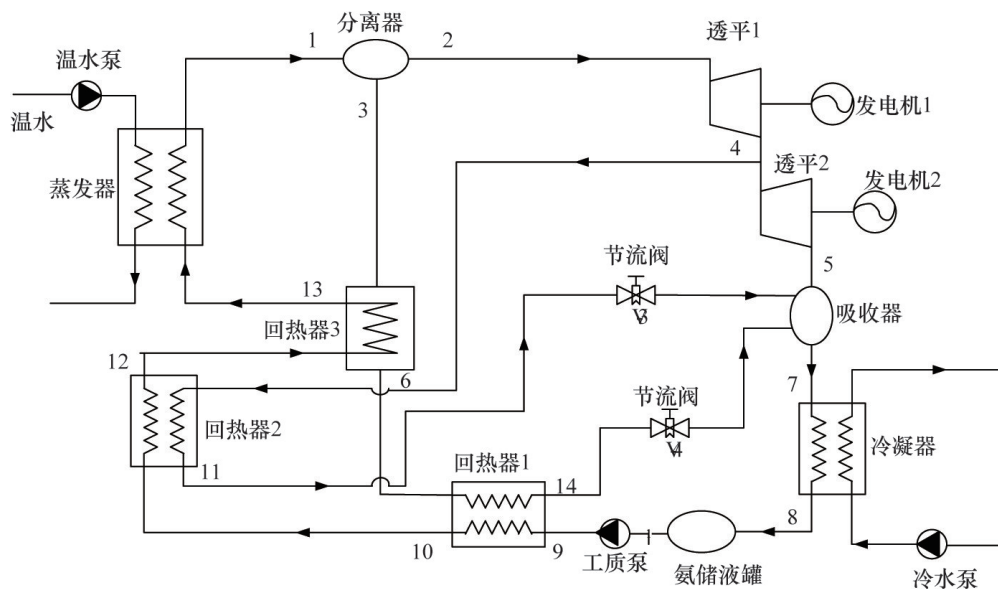


图1 国海循环系统原理示意

2 国海循环计算模型

2.1 蒸发器

氨水混合溶液在蒸发器内吸收温海水热量,温度由 T_{13} 升高到 T_1 ,氨水混合工质从液体被加热为气液两相的混合物,通过分离器被分离为贫氨溶液和氨气。蒸发器出口工质温度 T_1 根据热源温度条件确定,换热端差选取 2°C ,工质压力 P_1 应该在 T_1 对应的泡点压力和露点压力区间内。确定 T_1 、工质浓度 Z_1 、 P_1 后,分离器出口氨气和贫氨溶液的状态参数、气相比例均可以通过计算得到。

工质在蒸发器内吸热量根据能量守恒方程确定

$$Q_E = C_w m_E (T_{w1} - T_{w0}) = m_1 (h_1 - h_{13}) \quad (1)$$

分离器质量守恒方程

$$m_1 = m_2 + m_3 \quad (2)$$

式中, Q_E 为工质在蒸发器内的吸热量; C_w 为温海水比热容; m_E 为温海水流量; T_{w1} 为温海水进口温度; T_{w0} 为温海水出口温度; m_1 为工质流量; h_1 为蒸发器出口处工质焓; h_{13} 为蒸发器进口处工质焓。

2.2 冷凝器

贫氨溶液回热支路液体、抽气回热支路液体和透平 2 出口的气体在吸收器内混合后,进入冷凝器被冷海水冷凝为饱和和液体后进入氨储液罐,随后进入工质泵。冷凝器出口工质温度 T_8 根据冷海水温度确定,换热端差选取 2°C ,确定温度后可以确定冷凝器内的工作压力 P_8 。

吸收器出口的工质流量 m_7 根据质量守恒确定,即

$$m_7 = m_5 + m_{11} + m_{14} \quad (3)$$

式中, m_5 为透平 2 出口处的气体流量; m_{11} 为抽气回热支路工质流量; m_{14} 为贫氨溶液回热支路工质流量。

吸收器出口的工质浓度 Z_7

$$Z_7 = Z_8 = Z_1 \quad (4)$$

根据能量守恒原理,吸收器出口工质的焓 h_7 为

$$h_7 = \frac{m_5 h_5 + m_{11} h_{11} + m_{14} h_{14}}{m_7} \quad (5)$$

忽略管道及换热器内工质压力损失,有

$$P_7 = P_8 \quad (6)$$

温度、压力和浓度参数确定后,就可以算出吸收器出口和冷凝器出口工质的焓值,工质在冷凝器内的换热量根据能量守恒定律确定,7点和8点工质之间的焓差即为单位质量工质在冷凝器内的换热量

$$Q_C = m_7 (h_7 - h_8) \quad (7)$$

氨水工质通过工质泵加压后进入回热器 1,工质泵出口工质焓 h_9 根据能量守恒定律确定

$$W_P = \int_{P_8}^{P_9} v dp \approx \bar{v} (P_9 - P_8) \quad (8)$$

$$h_9 = h_8 + \frac{W_P}{m_8} \quad (9)$$

式中, W_P 为工质泵对氨水混合工质所做的机械功。

2.3 回热器

回热器部分包括回热器 1、回热器 2 和回热器 3,假设通过贫氨溶液回热和抽气使得回热器 3 出口工作介质被加热至泡点状态。

根据能量守恒定律,有

$$m_{13} h_{13} - m_9 h_9 = m_3 h_3 - m_{14} h_{14} + m_{11} h_4 - m_{11} h_{11} \quad (10)$$

式中, $m_{13}=m_9$, $m_3=m_{14}$ 。

2.4 透平

国海循环透平为两级透平,在两级透平之间为抽气点。透平 1 出口工质压力选取为透平 1 进口和透平 2 出口压力的平均值

$$P_4 = \frac{P_2 + P_3}{2} \quad (11)$$

透平 1 出口工质焓值由以下公式确定

$$h_4 = h_2 - (h_2 - h_{T_{1,OST}}) \eta_1 \quad (12)$$

式中, η_1 为透平的等熵效率,计算时取值为 0.85; $h_{T_{1,OST}}$ 为蒸汽等熵膨胀到透平 1 出口蒸汽压力对应的焓值。

氨气在透平 1 内的做功为

$$W_{T_1} = m_2 (h_2 - h_4) \quad (13)$$

氨气在透平 2 内的做功为

$$W_{T_2} = m_4 (h_4 - h_5) \quad (14)$$

2.5 节流阀

经过换热后的贫氨溶液及在回热器 2 内放热

后的抽气通过节流阀降压后进入吸收器内。选取贫氨溶液回热支路上的节流阀进行分析,部分工质物性参数关系式如下:

$$P_{14'} = P_5 \quad (15)$$

$$Z_{14'} = Z_{14} = Z_3 \quad (16)$$

$$h_{14'} = h_{14} \quad (17)$$

由上述分析可以确定系统中各节点的工质温度、压力、浓度、焓等参数,系统循环热效率为

$$\eta = \frac{m_2(h_2 - h_4) + m_4(h_4 - h_5) - W_p}{m_1(h_1 - h_{13})} \quad (18)$$

3 结果与分析

根据第2节可以确定系统各节点参数,分别改变透平入口蒸汽压力、氨水混合工质浓度、温海水温度和冷海水温度等参数计算得到国海循环效率。

3.1 透平入口蒸汽压力对循环效率的影响

当温、冷海水温度分别为26、5℃条件下,根据冷热源温度条件可以确定蒸发器出口温度、冷凝器出口工质温度(换热端差选取为2℃)。当改变透平入口蒸汽压力及氨水混合工质浓度,可以计算得到不同的循环效率,计算结果如图2所示。

从图2可以看出,当氨水混合工质浓度确定时,循环效率随透平1入口蒸汽压力的增大而增大,增加到一定程度后,压力再增大,循环效率减小。当氨水混合工质浓度为88%时,透平1入口蒸汽压力从600 kPa增加到830 kPa,对应的循环系统效率由1.84%逐渐提高到4.44%;如果压力继续增大,循环效率却开始下降,当压力为840 kPa,系统效率为4.41%。透平1出口工质压力超过840 kPa时,循环效率骤降。造成这种现象的主要原因是当氨水混合工质浓度确定时,随着透平1入口蒸汽压力增加,透平入口氨气焓也会相应增加,因此单位质量工质在透平内的焓降增大,即单位质量工质的做功量相应增加。如果压力继续增大将导致分离器出口气液混合工质中气相比比例降低,使分离器出口氨气流量骤降,进入透平内做功的氨气流量减小,氨气做功总量减少,从而引起循环效率的变化。

从图2可以看出,当国海循环采用的氨水混合工质浓度不同时,对应最高循环效率的透平入口蒸汽压力不同。

从图2还可以看出,当混合工质中氨的浓度较高时,系统工作压力范围较宽,这是因为相同压力条件下,随着氨水混合工质浓度的升高,蒸发器出口气液两相溶液中气相比比例较高。当工作压力较高,而氨水混合工质浓度较低时,蒸发器出口混合溶液气相比比例较小,导致进入透平内做功的氨蒸汽质量流量减小,当压力增加到一定值时,分离器气相出口工质流量为零,系统没有输出功。

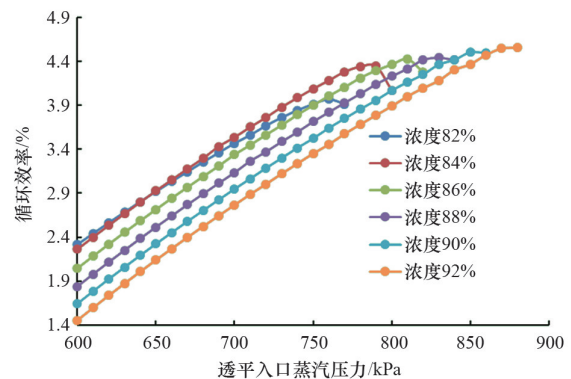


图2 不同工质浓度条件下循环效率随透平入口蒸汽压力的变化情况

3.2 温、冷海水温度对循环效率的影响

考虑到海水温度随季节、海域的变化,以及抽取、输送过程中温、冷海水与周围环境换热,进入海洋温差发电系统温海水、冷海水温度会发生变化,影响海洋温差能循环效率,因此研究了国海循环效率随温、冷海水温度的变化关系。分别改变温、冷海水温度,计算氨水工质浓度为90%、透平入口压力为830 kPa,不同温、冷海水温度下系统循环效率,结果如图3所示。

从图3可以看出,国海循环效率随着冷海水温度的升高而降低,并且降低速度比较明显。如果冷海水温度从4℃升高到9℃时,对应的循环效率从4.62%降低到3.24%,冷海水温度升高5℃的条件下,循环效率却下降了30%。出现这种变化的原因是冷海水温度升高,对应的冷凝温度升高,导致透平2出口氨气压力升高,进口参数不变的条件下,

氨气在透平内的焓降减少,透平做功量减少,循环效率降低。因此,海洋温差能电站选址时要考虑在较低的投资成本下获取温度较低的冷海水,同时还需要在发电系统中做好冷海水输送管道的保温。

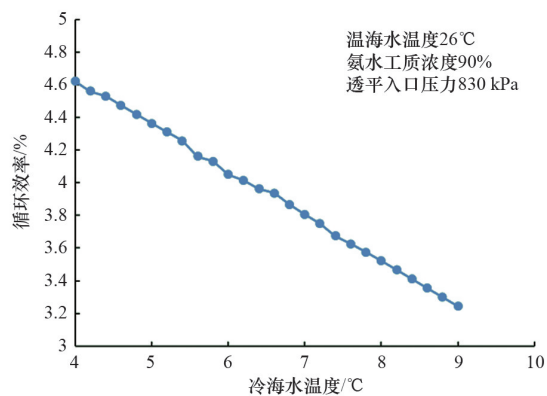


图3 循环效率随冷海水温度变化趋势

从图4可以看出,温海水温度的升高时国海循环效率增加,但是变化趋势不大。当温海水温度由25°C升高至30°C时,循环效率从4.26%升高到4.40%,温海水温度升高了5°C,循环效率仅仅提高3%。这是因为随着温海水温度的升高,进入透平的按蒸汽焓增大,在透平出口压力不变的条件下,单位工质在透平内做功增加。同时,由于工质在蒸发器内的吸热量也相应增加,导致循环效率提高幅度不大。

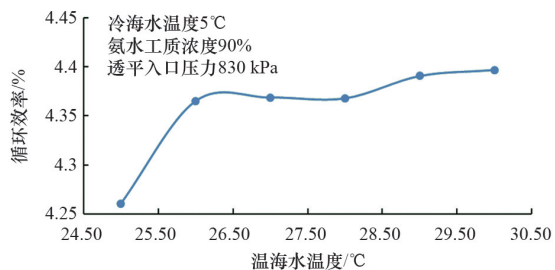


图4 循环效率随温海水温度的变化趋势

4 结论

通过对国海循环计算,得到了国海循环效率随透平入口蒸汽压力、冷海水温度、温海水温度、氨水混合工质浓度等参数的变化关系。

1) 氨水混合工质浓度对国海循环效率影响显著。冷热源温度确定的条件下存在最优的氨水混合工质浓度使得循环效率最高。当温、冷海水温度分别为26、5°C,氨水工质浓度为92%时,系统效率最大达到4.56%。

2) 氨水混合物浓度不变时,循环效率随透平入口蒸汽压力的升高先升高后降低,存在极大值。

3) 冷海水入口温度对循环效率影响很明显,随着冷海水温度升高,循环效率线性下降,因此海洋温差能电站选址时需要在较低的成本条件下获取温度最低的冷海水。

4) 温海水温度对循环效率影响较小,随着温海水温度的升高,循环效率提高,但变化趋势不大。

因此,对于给定冷热源温度条件下,存在最优的透平入口蒸汽压力和工质浓度使得循环热效率最高。

参考文献 (References)

- [1] Vega L A. Ocean Thermal energy conversion primer[J]. Marine Technology Society Journal, 2002, 36(4): 25-35.
- [2] Nihous G C. A preliminary assessment of ocean thermal energy conversion resources[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2007, 129(1): 10-17.
- [3] Heydt G T. An assessment of ocean thermal energy conversion as an advanced electric generation methodology [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 81(3): 409-418.
- [4] Avery W H, Wu C. Renewable energy from the ocean: A guide to OTEC[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1996, 21(1): 66.
- [5] Trimble L C, Owens W L. Review of mini-OTEC performance[C]//Proceedings of the Fifteenth Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Seattle: Energy to the 21st Century, 1980: 1331-1338.
- [6] Yang M H, Yeh R H. Analysis of optimization in an OTEC plant using organic Rankine cycle[J]. Renewable Energy, 2014, 68: 25-34.
- [7] Yoon J I, Son C H, Baek S M, et al. Efficiency comparison of subcritical OTEC power cycle using various working fluids[J]. Heat & Mass Transfer, 2014, 50(7): 985-996.
- [8] Chen F Y, Liu L, Peng J P, et al. Theoretical and experi-

- mental research on the thermal performance of ocean thermal energy conversion system using the rankine cycle mode[J]. *Energy*, 2019, 183: 497–503.
- [9] Kim N J, Ng K C, Chun W. Using the condenser effluent from a nuclear power plant for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer: A Rapid Communications Journal*, 2009, 36(10): 1008–1013.
- [10] Ganic E N, Wu J. On the selection of working fluids for OTEC power plants[J]. *Energy Conversion & Management*, 1980, 20(1): 9–22.
- [11] Idrus N H M, Musa M N, Yahya W J, et al. Geo-Ocean Thermal Energy Conversion (GeOTEC) power cycle/plant [J]. *Renewable energy*, 2017, 111(Oct.): 372–380.
- [12] Arcuri N, Bruno R, Bevilacqua P. LNG as cold heat source in OTEC systems[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 104(Aug.1): 349–358.
- [13] Yamada N, Hoshi A, Ikegami Y. Performance simulation of solar-boosted ocean thermal energy conversion plant [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(7): 1752–1758.
- [14] Kalina A I. Combined-cycle system with novel bottoming cycle[J]. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 1984, 106(4): 737–742.
- [15] Liu W M, Xu X J, Chen F Y, et al. A review of research on the closed thermodynamic cycles of ocean thermal energy conversion[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 119.

Theoretical analysis of a novel thermodynamic cycle for ocean thermal energy conversion

LIU Lei, CHEN Fengyun, PENG Jingping, GE Yunzheng, LIU Weimin*, WANG Quanbin

The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

Abstract In the new type thermodynamic cycle for the ocean thermal energy conversion system, the Guohai cycle, a lean ammonia solution and the steam extraction of the turbine heat recovery branch on the basis of the Kalina cycle are adopted in order to increase the thermodynamic efficiency. This paper applies the principle of the energy conservation and the equation of the heat balance to calculate the efficiency of the Guohai cycle under different steam pressures at the turbine inlet, in warm and cold water temperatures, and with various concentrations of the working fluid. The results show that the concentration of the ammonia and water mixture has a significant effect on the efficiency. When the temperatures of the cold and warm source are fixed, there is an optimal concentration of the ammonia and water mixture, with a higher cycle efficiency. If the temperatures of the surface warm water and the deep cold water are 26 and 5 °C, respectively, the maximum efficiency of the system is 4.56% as the concentration of the ammonia and water is 92%. The cycle efficiency first increases and then decreases with the increase of the steam pressure at the turbine inlet, with a maximum value in-between. The deep cold water temperature has an influence on the cycle efficiency, while that of the surface warm water has little effect on the cycle efficiency.

Keywords ocean thermal energy conversion; thermodynamic cycle; cycle efficiency ●



(责任编辑 刘志远)