

地热闪蒸-双工质联合发电系统最佳参数选择

骆超, 徐琼辉, 姚远, 龚宇烈, 马伟斌

中国科学院广州能源研究所可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州 510640

摘要 介绍了地热闪蒸-双工质联合发电方式, 通过数学模拟, 分析地热水温度对单位热水发电量、热效率和最佳温度的影响, 计算结果表明, 地热水温度为 80℃ 时, 闪蒸系统采用直接冷却和间接冷却方式的联合发电系统的单位热水净发电量分别为 1.08 和 0.86 kW·h/t, 地热水温度为 150℃ 时, 闪蒸系统采用直接冷却和间接冷却方式的联合发电系统的单位热水净发电量分别为 6.57 和 6.35 kW·h/t; 采用直接冷却方式的联合发电系统的发电量以闪蒸发电为主, 采用间接冷却方式的联合发电系统的发电量以双工质发电为主; 当热源温度为 100、130 和 150℃ 时, 采用直接冷却和间接冷却方式的联合系统的最佳温度分别为 80 和 85℃、100 和 115℃、125 和 140℃。地热闪蒸-双工质联合发电技术可以为中国中低温地热资源开发提供技术支撑。

关键词 地热发电; 闪蒸-双工质联合发电; 最佳温度; 参数选择

中图分类号 TK529

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.15.006

Optimal Parameter Selection of Geothermal Flash-binary Power System

LUO Chao, XU Qionghui, YAO Yuan, GONG Yulie, MA Weibin

Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract The flash-binary system includes the single flash power system and the binary cycle system. The flash-binary power system enhances the production as compared with the single flash power system. In addition, compared with the two-stage flash power system, the single flash-binary power system can avoid some problems, such as the bulky equipments, the difficult installment and the high cost. Based on the numerical simulation, the effect of the geothermal water temperature on the net power output, the thermal efficiency and the optimal temperature of the flash-binary power system are discussed in this paper. The simulation results show that, when the temperature is 80℃, the net power output per geofluid is about 1.08 and 0.86 kW·h/t by the direct cooling and the indirect cooling of the flash system, respectively; when the temperature is 150℃, the values are 6.57 and 6.35 kW·h/t; when the geothermal water temperatures are 100, 130 and 150℃, the optimal temperatures of the combined system are 80 and 85℃, 100 and 115℃, 125 and 140℃ by the direct cooling and the indirect cooling of the flash system, respectively. In addition, the power output of the flash-binary system by the direct cooling is dominated by the flash power generation, while that by the indirect cooling is dominated by the binary power generation. The flash-binary power system could provide a technical support for the geothermal resource utilization in China.

Keywords geothermal power; flash-binary power system; optimal temperature; parameter selection

0 引言

商业化的发电技术主要有地热干蒸汽发电、地热闪蒸发电和地热双工质发电, 地热干蒸汽发电技术主要用于高温干蒸汽资源, 地热闪蒸和双工质发电技术主要用于中低温地热资源, 采用 3 种发电技术的电站装机容量分别占世界地热发

电总装机容量的 27%、61% 和 11%, 闪蒸地热电站的汽轮机生产厂家主要有日本三菱、东芝和富士、美国 General Electrics, 意大利 Ansaldo、Nuovo Pignone 等公司; 双工质机组主要有美国 UTC、Infinity Turbine、Mafi Trench、意大利 Turboden 和以色列 Ormat 公司。全球地热总装机容量为 10715 MW, 中国地热

收稿日期: 2013-01-18; 修回日期: 2013-02-26

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAB12B01); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA053003)

作者简介: 骆超, 助理研究员, 研究方向为中低温地热发电技术, 电子邮箱: luochao@ms.giec.ac.cn

装机总容量仅为 24MW, 据统计, 中国中低温地热资源的发电潜力约为 3704MW^[1-3], 地热闪蒸-双工质联合发电技术可为中国中低温地热资源开发提供技术支撑。

Pasek^[4]利用 Aspen HYSYS 软件对印度尼西亚 Lahendong 地热电站从工质蒸发压力、闪蒸压力方面对联合发电系统的净发电功率进行了模拟, 指出闪蒸-双工质联合发电系统存在最佳蒸发压力和闪蒸压力, Michaelides 等^[5,6]从有用功和经济性两方面对双工质-闪蒸发电系统进行了分析, 也指出联合系统存在最佳蒸发温度, Rosyid 等^[7,8]对双工质联合电站的敏感性做了分析, 在地热水温度恒定的条件下, 改变蒸发温度, 对发电系统的热效率和资源利用率影响不大, 吴治坚等^[9]对闪蒸-双工质联合发电系统进行了计算, 指出联合发电系统的最大功率比闪蒸或双工质系统单独发电时的最大功率高出 20% 以上。从理论上讲, 热水发电的能量转换级数愈多, 发电量就愈大, 但级数越多, 发电量增加有限, 而设备投资则增加较大, 故一般以两级为好, 为避免闪蒸系统带来的设备体积庞大、安装困难和造价过高等问题, 本文对地热闪蒸-双工质联合发电系统的最佳参数进行热力计算和比较^[10]。

1 地热闪蒸-双工质发电系统的热力计算

如图 1 所示, 地热闪蒸-双工质联合发电, 实际上是将闪蒸器产生的蒸汽直接用于发电, 而产生的饱和水则用于低沸点有机工质发电。这种特殊的能量转换系统包括闪蒸系统发电和双工质循环发电两部分, 能使地热资源得到充分利用, 其中闪蒸系统的冷却方式有直接冷却和间接冷却两种方式, 直接冷却就是冷却水与汽轮机排汽直接混合, 将汽轮机排汽冷凝为水的冷却方式, 间接冷却就是冷却水和汽轮机排汽通过管束进行换热, 将汽轮机排汽冷凝为水的冷却方式, 其热力循环图如图 2、图 3 所示^[9]。图 1~图 3 中的参数表示如下: q_m 为水质量流量, t/h; q_{m1} 为闪蒸器的蒸汽质量流量, t/h; q_{m0} 为工质质量流量, t/h; t_g 为地热水温度, °C; h 为流体质量焓, kJ/kg; h_{1r} 为饱和汽质量焓, kJ/kg; h' 为饱和液质量焓, kJ/kg; t_1 为闪蒸

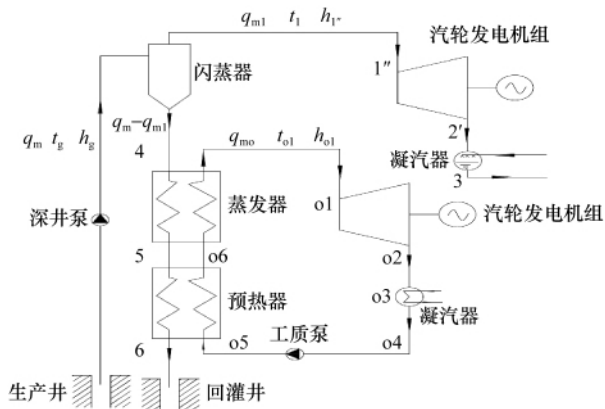


图 1 地热闪蒸-双工质联合发电系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of flash-binary system

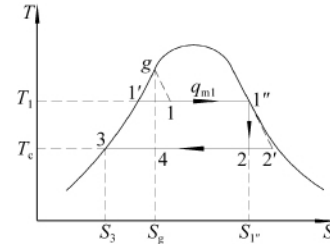


图 2 地热闪蒸发电系统热力循环图

Fig. 2 Thermodynamic cycle of flash system

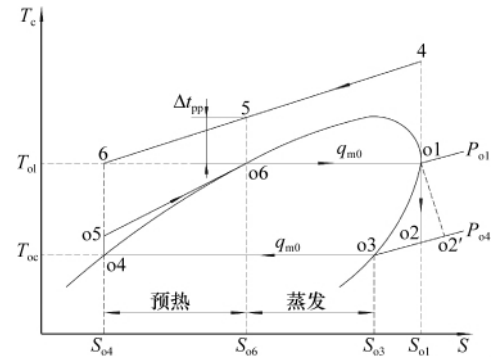


图 3 地热双工质发电热力循环图

Fig. 3 Thermodynamic cycle of binary system

或蒸发的摄氏温度, °C; t_{o1} 为双工质循环最佳蒸发的摄氏温度, °C; t_c 为冷凝温度, °C; T_c 为冷凝热力学温度, K; T_g 为热水的热力学温度, K; T_1 为闪蒸系统最佳闪蒸的热力学温度, K; T_{o1} 为双工质循环最佳蒸发的热力学温度, K; S 为流体质量熵, kJ/(kg·K); S' 为饱和汽质量熵, kJ/(kg·K); S' 为饱和液质量熵, kJ/(kg·K); Δt_p 为传热温差, °C; P_{o1} 为蒸发器蒸发压力, Pa; P_{o4} 为凝汽器冷凝压力, Pa。

地热闪蒸-双工质联合发电系统的热力计算过程及其主要性能指标如下。

闪蒸系统最佳闪蒸温度为

$$T_1 = \sqrt{T_g T_c} \quad t_1 = T_1 - 273 \quad (1)$$

双工质循环最佳蒸发温度为

$$T_{o1} = \sqrt{T_1 T_{oc}} \quad t_{o1} = T_{o1} - 273 \quad (2)$$

由式(2)可知, 双工质的最佳蒸发温度 t_{o1} 与闪蒸系统最佳温度 t_1 有关联。确定了最佳温度 t_1 及 t_{o1} 后, 联合发电系统的热力学参数计算如下。

(1) 闪蒸系统。

参看图 1 及图 2, 根据闪蒸器的热平衡, 得闪蒸器的蒸汽产量为

$$q_{m1} = \frac{q_m (h_g - h_4)}{h_{1r} - h_4} \quad (3)$$

电站净功率为

$$P_{net1} = \frac{q_{m1} (h_{1r} - h_{2'}) (1 - X)}{3.6} \eta_a \eta_m \eta_g \quad (4)$$

其中, P 为电站功率, kW; P_{net} 为闪蒸-双工质发电系统的发电

净功率, kW; P_{net1} 为闪蒸系统的发电净功率, kW; P_{net2} 为双工质循环的发电净功率, kW; η_{ai} 为汽轮机相对内效率, %; η_m 为机械效率, %; η_g 为电机效率, %; X 为厂用电率, %。

电站净热效率为

$$\eta_{net1} = \frac{3.6P_{net1}}{q_m(h_g - h_3)} \quad (5)$$

其中, η_{net} 为电站净效率, %。

(2) 双工质循环。

参看图 1 和图 3, 由蒸发器和预热器热平衡, 得出工质质量流量为

$$q_m = \frac{(q_m - q_{ml})(h_4 - h_6)}{(h_{o1} - h_{o5})} \quad (6)$$

其中, $h_{o5} = h_{o4} + w_p$, 而 $w_p = (P_{o1} - P_{o4})v_{o4} / (10^3 \eta_p)$ 。 v_{o4} 为冷凝工质的质量体积, m^3/kg ; w_p 为压缩功, kJ/kg ; η_p 为工质压缩泵的的效率, %。

双工质循环的发电净功率为

$$P_{net2} = \frac{q_m[(h_{o1} - h_{o2}) - (h_{o5} - h_{o4})](1 - X)}{3.6} \eta_{ai} \eta_m \eta_g \quad (7)$$

电站净热效率为

$$\eta_{net2} = \frac{3.6P_{net2}}{q_m(h_{o1} - h_{o5})} \quad (8)$$

闪蒸-双工质循环发电量为

$$P_{net} = P_{net1} + P_{net2} \quad (9)$$

每吨地热水净发电量为

$$N_e = \frac{P_{net}}{q_m} = \frac{P_{net1}}{q_m} + \frac{P_{net2}}{q_m} = N_{e1} + N_{e2} \quad (10)$$

其中, N_{e1} , N_{e2} 分别为闪蒸系统和双工质循环每吨地热水净发电量。

2 地热闪蒸-双工质联合发电系统的影响因素分析

为了进行比较, 根据系统的实际情况设定相应的参数, 利用式(1)~式(10)进行计算。计算时热水温度范围为 80~150℃; 冷却水进口温度为 20℃; 传热端部温差取 $\Delta t_{tp} = 5^\circ C$; 地热闪蒸-双工质联合发电系统的热力学参数取单位热水净发电量最大值时的数值; 取厂用电率 $X = 0.3$; 地热发电系统各效率取 $\eta_{ai} = 0.76$, $\eta_m = 0.98$, $\eta_g = 0.97$; 双工质循环所用工质为 R245fa。

联合发电系统在直接冷却和间接冷却两种方式下, 分析热源温度对联合发电系统最大单位热水净发电量的影响, 热源温度对联合系统中闪蒸和双工质净发电效率的影响, 闪蒸温度对联合发电系统净发电量的影响, 联合发电系统的最佳温度和闪蒸系统的最佳温度的关系。

2.1 地热水温度对联合发电系统净发电量的影响

图 4 给出了地热水温度对地热闪蒸-双工质联合发电系统单位热水净发电量的影响, 此时, 联合发电系统的单位热水净发电量取最大值, 从图 4 可以看出, 地热联合发电系统的最大单位热水净发电量随着地热水温度的增加而增加, 采用直接冷却方式的联合系统单位热水最大发电量大于间接

冷却方式, 地热水温度为 80, 110 和 150℃时, 直接冷却和间接冷却联合系统的最大单位热水发电量分别为 1.08 和 0.86 $kW \cdot h/t$, 2.82 和 2.56 $kW \cdot h/t$, 6.57 和 6.35 $kW \cdot h/t$, 分别比间接冷却方式高出 25.6%, 10.2% 和 3.5%; 若条件允许, 一般采用直接冷却方式的联合发电系统。

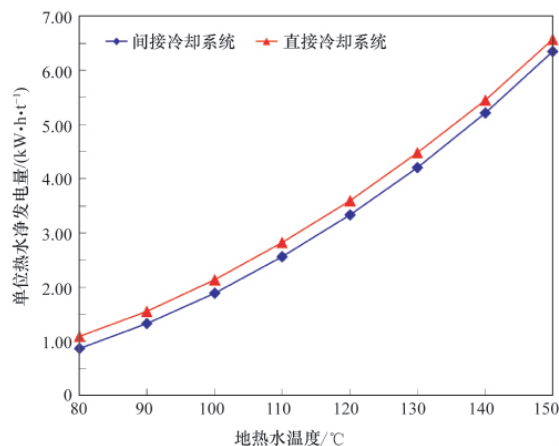


图 4 地热水温度对单位热水净发电量的影响
Fig. 4 Influence of geothermal water temperature on net power output

2.2 地热水温度对联合发电系统净热效率的比较

图 5 为地热水温度对地热闪蒸-双工质联合发电净热效率的影响, 从图 5 看出, 随着地热水温度的升高, 联合电系统中双工质发电净热效率逐渐增加, 而闪蒸发电净热效率是先增加后减小; 采用直接冷却方式的闪蒸发电净热效率高于间接冷却方式, 而采用间接冷却方式的双工质发电净热效率高

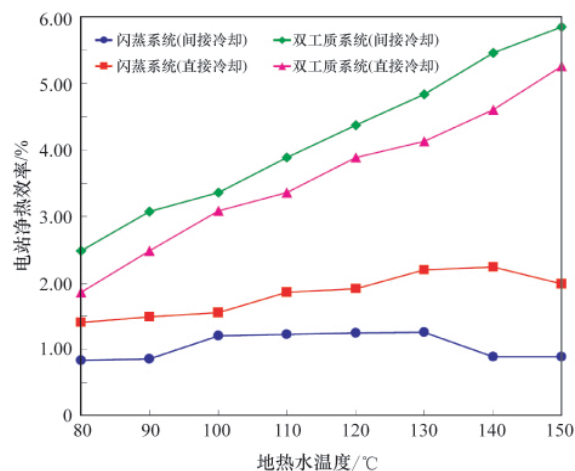


图 5 地热水温度对电站净热效率的影响
Fig. 5 Influence of geothermal water temperature on thermal efficiency

于直接冷却,因此,采用直接冷却方式的联合发电系统的发电量以闪蒸发电为主,采用间接冷却方式的联合发电系统的发电量以双工质发电为主,此外,由于闪蒸-双工质发电系统的闪蒸发电净热效率是先增大后减小,地热水温度越高,对闪蒸-双工质联合发电系统中双工质发电就越有利。

2.3 闪蒸温度对联合系统净发电量的影响

图6为地热水温度80~150℃范围内,闪蒸温度对联合系统单位热水净发电量的影响。随着闪蒸温度的升高,联合发电系统的单位热水发电量先增大后减小。当联合系统的单位热水发电量达到最大时的温度即为联合系统的最佳温度,从

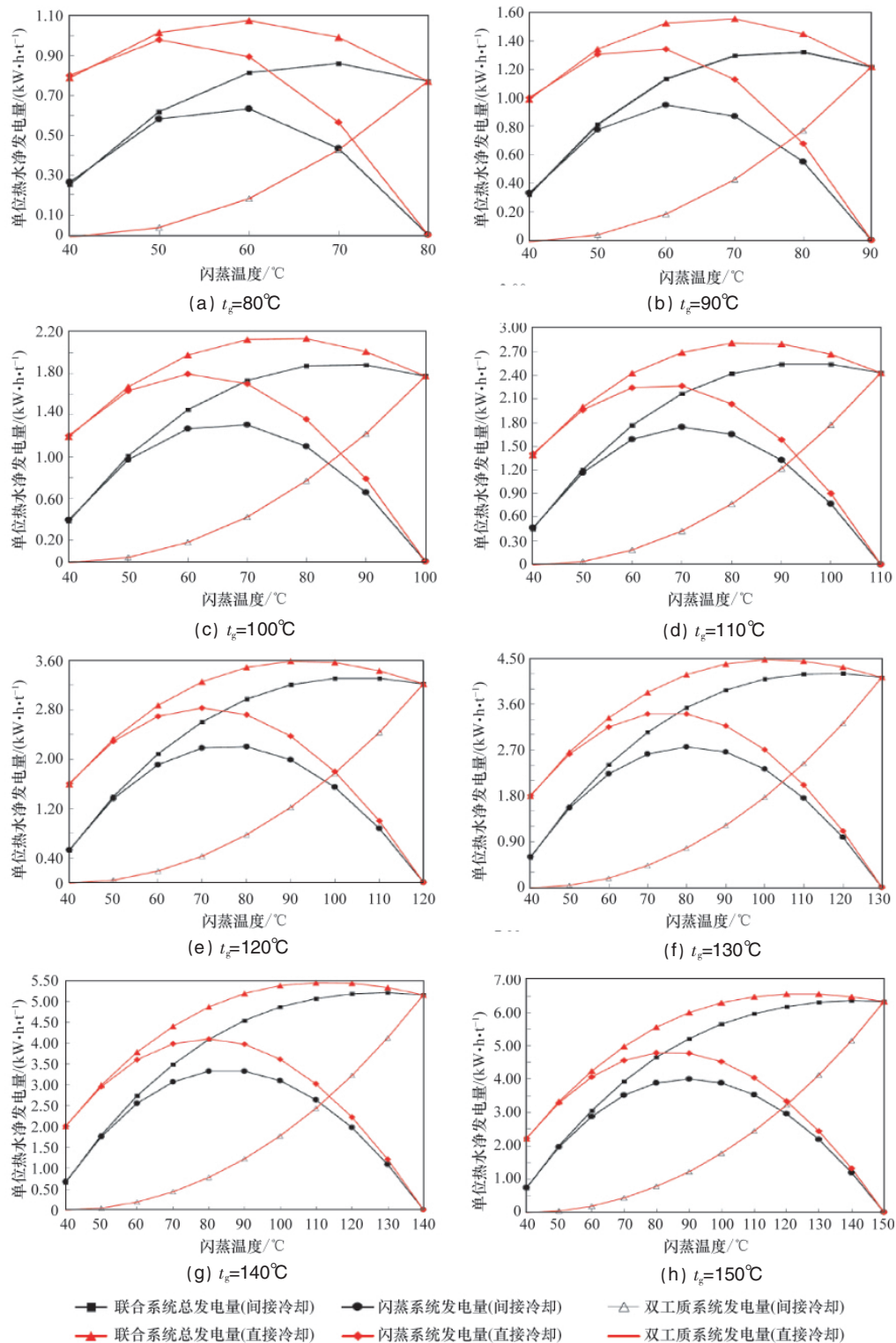


图6 闪蒸温度对单位热水净发电量的影响

Fig. 6 Influence of flash temperature on net power output

图中可以看出,联合系统的最佳温度在闪蒸系统的冷凝温度和热源温度之间,且联合系统最佳温度大于闪蒸系统的最佳值;地热水温度不同,联合系统最佳温度的取值也不同,地热水温度越高,联合系统最佳温度越高;当联合系统的闪蒸温度为闪蒸系统的冷凝温度时,闪蒸系统汽轮机的焓降为0,当闪蒸温度为热源时,进入闪蒸系统汽轮机的蒸汽量为0,因此,联合系统中的闪蒸系统的单位发电量是一个完整的抛物线;直接冷却和间接冷却联合系统的双工质发电系统的单位热量随着热源温度的升高而增加;联合系统的单位热水发电量达到最大时,即为联合系统的最佳热水温度。从图6可以看出,当热源温度为80、110和150℃时,直接冷却和间接冷却联合系统的最佳温度分别为60和70℃、85和95℃、125和140℃。

2.4 地热水温度对最佳温度的影响

对于闪蒸-双工质联合发电系统,由于联合发电系统的净发电量是由闪蒸和双工质发电两部分组成,在单级闪蒸的最佳闪蒸温度下,联合系统的单位热水发电量不能达到最大,联合系统的最佳温度大于闪蒸系统的最佳温度。从图7可以看出,当热源温度为100、130和150℃时,直接冷却联合系统的最佳温度和闪蒸系统的最佳温度分别为80和60.4℃、100和73.5℃、125和82℃;间接冷却联合系统的最佳温度和闪蒸系统的最佳温度分别为85和65.9℃、115和79.3℃、140和87.9℃。直接冷却联合系统的最佳温度小于间接冷却联合系统的最佳温度;与间接冷却相比,直接冷却联合系统两个最佳温度的温差也比较小,因此闪蒸系统采用直接冷却方式对联合系统的发电功率也更有利。

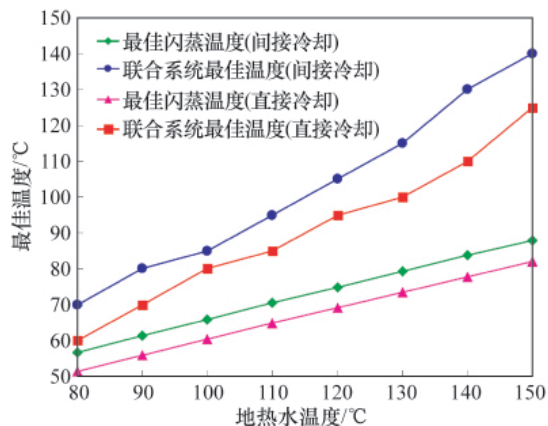


图7 地热水温度对最佳温度的影响

Fig. 7 Influence of geothermal water temperature on optimal temperature

3 结论

本文介绍了地热闪蒸-双工质联合发电系统及其数学计算方法,研究了热水温度和闪蒸温度对单位热水净发电量、

电站净热效率、最佳温度等参数的影响,得出如下结论。

(1) 地热水温度为80、120和150℃时,闪蒸系统采用直接冷却和间接冷却方式的联合发电系统的单位热水经发电量分别为1.08和0.86kW·h/t,3.59和3.33kW·h/t,6.57和6.35kW·h/t,分别比间接冷却方式高出25.6%,7.8%和3.5%。

(2) 地热闪蒸-双工质联合发电系统的净发电量是由闪蒸和双工质发电两部分组成,采用直接冷却方式的联合发电系统的发电量是以闪蒸发电为主,采用间接冷却方式的联合发电系统的发电量是以双工质发电为主。

(3) 闪蒸系统采用直接冷却方式的联合发电系统的最佳温度小于间接冷却联合系统;当热源温度为100、130和150℃时,直接冷却和间接冷却闪蒸系统的最佳温度分别为60.4和65.9℃、73.5和79.3℃、82和87.9℃,采用直接冷却和间接冷却方式的联合系统的最佳温度分别为80和85℃、100和115℃、125和140℃。

参考文献 (References)

- [1] Bertani R. Geothermal power plant in the world 2005-2010 update report[J]. Geothermics, 2012, 41: 1-29.
- [2] 汪集暘. 地热利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. Wang Jiyang. Geothermal resource utilization technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] Luo C, Huang L C, Gong Y L, et al. Thermodynamic comparison of different types of geothermal power plant systems and case studies in China[J]. Renewable Energy, 2012, 48: 155-160.
- [4] Pasek A D, Soelaiman T A F, Gunawan C V. Thermodynamics study of flash-binary cycle in geothermal power plant [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 5218-5223.
- [5] Michaelides E E, Scott G J. A binary-flashing geothermal power plant[J]. Energy, 1984, 9(4): 323-331.
- [6] Jalilinasrabadya S, Itoia R, Valdimarsson P, et al. Flash cycle optimization of Sabalan geothermal power plant employing exergy concept [J]. Geothermics, 2012, 43: 75-82.
- [7] Rosyid H, Koestoer R. Sensitivity analysis of steam power plant-binary cycle[J]. Energy, 2010, 35(9): 3578-3586.
- [8] Koch C, Czieleska F, Tsatsaronis G. Optimization of combined cycle power plants using evolutionary algorithms [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2007, 46(11): 1151-1159.
- [9] 吴治坚, 龚宇烈, 马伟斌, 等. 闪蒸-双工质循环联合地热发电系统的研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(3): 316-321. Wu Zhijian, Gong Yulie, Ma Weibin, et al. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2009, 30(3): 316-321.
- [10] 吴治坚. 新能源和可再生能源的利用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 237-251. Wu Zhijian. New energy and renewable energy utilization [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007: 237-251.

(责任编辑 刘志远)