

# 两级闪蒸和闪蒸-双工质地热发电热力学比较

骆超<sup>①\*</sup>, 马春红<sup>②</sup>, 刘学峰<sup>②</sup>, 郭新锋<sup>②</sup>, 王廷欣<sup>②</sup>, 马伟斌<sup>①</sup>

① 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;

② 中国石化集团新星石油有限责任公司, 北京 100083

\* 联系人, E-mail: luochao@ms.giec.ac.cn

2013-01-10 收稿, 2013-12-06 接受, 2014-03-28 网络版发表

国家高技术研究发展计划(2012AA053003)和中石化科技部中低温地热发电技术前瞻性研究项目资助

**摘要** 我国中低温地热资源主要分布在东南沿海地区, 主要用于洗浴等, 使得大量热能白白浪费. 为提高我国中低温地热资源的能量转换利用率, 本文提出了两级地热闪蒸和地热闪蒸-双工质联合发电方式, 以单位热水发电量、热效率和产汽率为性能指标, 通过数值计算, 分析地热水温度对两种不同地热发电系统的性能指标影响以及地热水温度的影响, 并对两种发电系统的选用条件作了论述. 结果表明, 闪蒸-双工质联合发电系统的单位热水的发电量随温度升高的增加量大于两级闪蒸的增加量. 当热水温度在 80~130 °C 时, 两级地热闪蒸发电系统的单位热水净发电量比闪蒸-双工质联合系统的单位热水净发电量多达 19.4%; 当热水温度在 130~150 °C 时, 闪蒸-双工质联合系统的单位热水净发电量比两级地热闪蒸发电系统的单位热水净发电量多达 5.5%. 两级地热闪蒸发电系统闪蒸产汽量总和约为闪蒸-双工质发电系统闪蒸产汽量的 2~3 倍. 当热水温度低于 130 °C 并且热水水量较大时, 可以采用闪蒸-双工质联合发电系统, 当热水温度高于 130 °C, 并且地热水中的不凝气体含量低于 3% 时, 可以考虑两级闪蒸发电系统; 和两级闪蒸发电系统尾水相比, 较高温度的闪蒸-双工质发电系统尾水资源梯级利用效率更高.

## 关键词

地热发电  
两级闪蒸  
双工质循环  
闪蒸-双工质  
联合发电  
热效率

地热资源按温度分级, 分为高温( $\geq 150$  °C)、中温(90~150 °C)、低温( $< 90$  °C)三类, 世界上开发利用的地热资源都是水热型地热资源, 地热资源最能发挥优势的利用方式是地热发电. 我国高温地热资源仅分布在滇藏和川西地区, 大部分为中低温地热资源, 即温度低于 150 °C 的地热资源. 热水发电有两种基本的能量转换系统, 即闪蒸系统和低沸点有机工质的双工质循环系统, 目前, 世界上仅有菲律宾莱特岛唐古纳地热电站、新西兰怀拉基地热电站和莫凯地热电站采用闪蒸-双工质地热发电系统, 我国西藏羊八井地热电站采用两级闪蒸发电系统, 广东丰顺邓屋地热电站采用单级闪蒸发电系统<sup>[1-3]</sup>. 相同热源和冷源条件下, 由于闪蒸-双工质联合发电系统采用两台发电机组, 所以其投资成本大于两级闪蒸发电系统. 为使

地热资源能够得到高效利用, 可采用两级能量转换系统<sup>[4-9]</sup>.

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. 本文对两级地热闪蒸发电系统、闪蒸-双工质联合地热发电系统进行热力计算和比较<sup>[10-15]</sup>, 并对选用条件进行论述.

## 1 两级地热发电系统的热力计算

### 1.1 两级地热闪蒸发电系统的热力计算

两级地热闪蒸发电系统热力图, 如图 1 所示. 由生井口出来的地热水, 直接进入第一级闪蒸器, 产生“一次蒸汽”后进入混压式汽轮机高压缸做功; 剩余

**引用格式:** 骆超, 马春红, 刘学峰, 等. 两级闪蒸和闪蒸-双工质地热发电热力学比较. 科学通报, 2014, 59: 1040-1045

Luo C, Ma C H, Liu X F, et al. Thermodynamic comparison between two stage flash and flash-binary geothermal power system (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 1040-1045, doi: 10.1360/972013-49

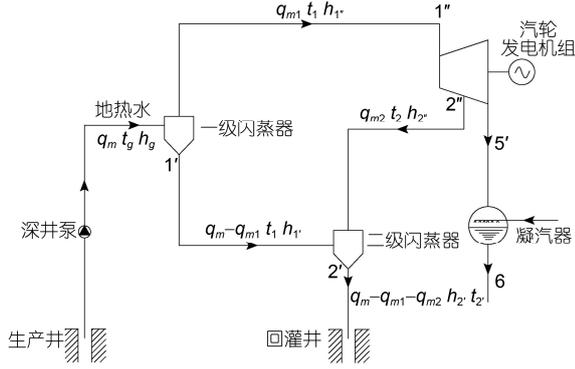


图1 两级地热闪蒸发电系统简图

的饱和水则进入第二级闪蒸器，产生压力更低的“二次蒸汽”后进入同一台混压式汽轮机低压缸做功，第二级闪蒸器闪蒸后的热水则进入回灌井。

两级地热闪蒸发电系统的热力计算过程及其主要性能指标和两级闪蒸最佳闪蒸温度的计算公式如下。

第一级最佳闪蒸温度：

$$T_{1,op} = \sqrt[3]{T_g T_c^2} \quad (1)$$

第二级最佳闪蒸温度：

$$T_{2,op} = \sqrt[3]{T_g T_c^2} \quad (2)$$

忽略闪蒸器中压降(或降温)所产生的不可逆损失，根据能量平衡，可得

第一级闪蒸器的蒸汽产量：

$$q_{m1} = \frac{q_m (h_g - h_1')}{h_1'' - h_1'} \quad (3)$$

第一级闪蒸器的产汽率：

$$m_1 = \frac{q_{m1}}{q_m} = \frac{h_g - h_1'}{h_1'' - h_1'} \quad (4)$$

第二级闪蒸器的蒸汽产量：

$$q_{m2} = \frac{(q_m - q_{m1})(h_1' - h_2')}{h_2'' - h_2'} \quad (5)$$

第二级闪蒸器的产汽率：

$$m_2 = \frac{q_{m2}}{q_m} = \frac{(1 - m_1)(h_1' - h_2')}{h_2'' - h_2'} \quad (6)$$

两级闪蒸发电净功率：

$$P_{net} = \frac{[q_{m1}(h_1'' - h_3) + (q_{m1} + q_{m2})(h_4 - h_5)](1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g \quad (7)$$

每吨热水净发电量：

$$Ne = \frac{[m_1(h_1'' - h_3) + (m_1 + m_2)(h_4 - h_5)](1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g \quad (8)$$

电站净热效率：

$$\eta_{net} = \frac{3.6 P_{2,net}}{q_m (h_h - h_c)} = \frac{3.6 Ne}{h_h - h_c} \quad (9)$$

## 1.2 地热闪蒸-双工质联合发电系统的热力计算

如图 2 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。

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：

$$T_1 = \sqrt{T_g T_c}, \quad (10)$$

$$t_1 = T_1 - 273.$$

双工质循环最佳蒸发温度：

$$T_{o1} = \sqrt{T_1 T_{oc}}, \quad (11)$$

$$t_{o1} = T_{o1} - 273,$$

式中， $T_1$  为闪蒸系统最佳闪蒸热力学温度，K； $T_g$  为地热水的热力学温度，K； $T_c$  为闪蒸系统冷凝热力学温度，K； $t_1$  为最佳闪蒸或蒸发摄氏温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_{o1}$  为双工质循环最佳蒸发热力学温度，K； $T_{oc}$  为双工质系统冷凝热力学温度，K； $t_{o1}$  为双工质循环最佳蒸发摄氏温度， $^{\circ}\text{C}$ 。由式(11)可知，工质的最佳蒸发温度  $t_{o1}$  是与

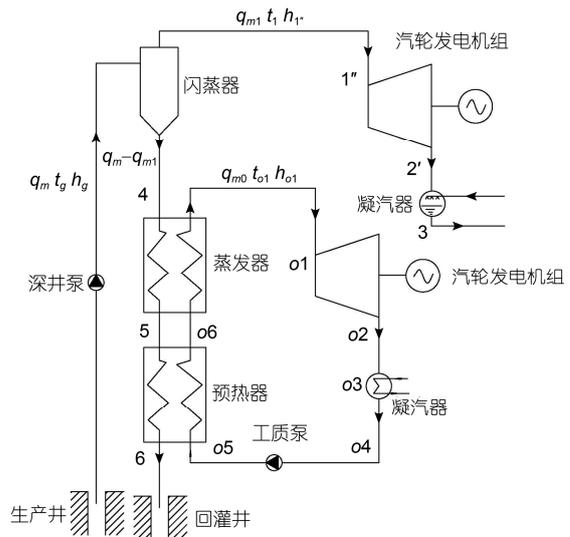


图2 地热闪蒸-双工质联合发电系统简图

最佳闪蒸温度  $t_1$  有关系的. 确定了最佳温度  $t_1$  及  $t_{o1}$  之后, 联合发电系统的热力学参数计算如下.

(1) 闪蒸系统

根据闪蒸器的热平衡得如下结果.

闪蒸器的蒸汽产量:

$$q_{m1} = \frac{q_m(h_g - h_4)}{h_{1r} - h_4}, \quad (12)$$

闪蒸器的产汽率:

$$m = \frac{q_m}{q_{m1}} = \frac{(h_g - h_4)}{h_{1r} - h_4}, \quad (13)$$

电站净功率:

$$P_{net1} = \frac{q_{m1}(h_{1r} - h_2)(1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g, \quad (14)$$

电站净热效率:

$$\eta_{net1} = \frac{3.6 P_{net1}}{q_m(h_g - h_3)}, \quad (15)$$

式中,  $q_m$  为地热水质量流量, t/h;  $h_g$  为地热水质量焓, kJ/kg;  $h_4$  为状态点 4 地热水质量焓, kJ/kg;  $h_{1r}$  为状态点 1'' 饱和汽质量焓, kJ/kg;  $h_2$  为状态点 2' 饱和液质量焓, kJ/kg;  $X$  为厂用电率, %;  $\eta_{oi}$  为汽轮机相对内效率, %;  $\eta_m$  为机械效率, %;  $\eta_g$  为电机效率, %;  $h_3$  为状态点 3 流体质量焓, kJ/kg.

(2) 双工质循环

由蒸发器及预热器热平衡得工质质量流量:

$$q_{mo} = \frac{(q_m - q_{m1})(h_4 - h_6)}{(h_{o1} - h_{o5})}, \quad (16)$$

其中,

$$h_{o5} = h_{o4} + w_p, \text{ 而 } w_p = (P_{o1} - P_{o4})v_{o4} / (10^3 \eta_p).$$

双工质循环的发电净功率(kW):

$$P_{net2} = \frac{q_{mo} [(h_{o1} - h_{o2}) - (h_{o5} - h_{o4})] (1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g. \quad (17)$$

电站净热效率:

$$\eta_{net2} = \frac{3.6 P_{net2}}{q_{mo} (h_{o1} - h_{o5})}. \quad (18)$$

闪蒸-双工质循环发电净功率:

$$P_{net} = P_{net1} + P_{net2}. \quad (19)$$

每吨地热水净发电量:

$$Ne = \frac{P_{net}}{q_m} = \frac{P_{net1}}{q_m} + \frac{P_{net2}}{q_m} = Ne_1 + Ne_2. \quad (20)$$

$h_6$  为状态点 6 地热水质量焓, kJ/kg;  $h_{o1}$  为状态点  $o1$  工质流体质量焓, kJ/kg;  $h_{o5}$  为状态点  $o5$  工质流体质量焓, kJ/kg;  $h_{o4}$  为状态点  $o4$  工质流体质量焓, kJ/kg;

$h_{o2}$  为状态点  $o2$  工质流体质量焓, kJ/kg;  $w_p$  为泵压缩功, kJ/kg;  $P_{o1}$  为蒸发器蒸发压力, Pa;  $P_{o4}$  为凝汽器冷凝压力, Pa;  $v_{o4}$  为冷凝工质的质量体积,  $m^3/kg$ ;  $\eta_p$  为工质压缩泵的效率, %.

2 两级地热发电系统的比较

为了进行比较, 根据系统的实际情况设定相应的参数, 利用公式(1)~(20)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  $\Delta t_{pp}=5^\circ\text{C}$ ; 两级地热闪发电系统的闪蒸温度取最佳值, 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; 两级闪蒸和闪蒸-双工质发电系统的闪蒸系统均采用直接冷却的方式. 取厂用电率  $X=0.3$ ; 两级地热发电系统各效率取  $\eta_{oi}=0.76$ ,  $\eta_m=0.98$ ,  $\eta_g=0.97$ ; 双工质循环所用工质为 R245fa.

以电站单位热水净发电量、电站净效率、产汽率和尾水温度为性能指标, 分析地热水温度性能指标的影响, 其中对地热闪蒸-双工质联合发电系统, 分别单独计算闪发电系统和双工质发电系统的电站净效率.

2.1 两级地热发电系统单位热水净发电量的比较

图 3 给出了地热水温度对两种不同发电系统单位热水净发电量的影响. 可以看出地热发电系统的单位热水净发电量随着地热水温度的增加而增加, 其

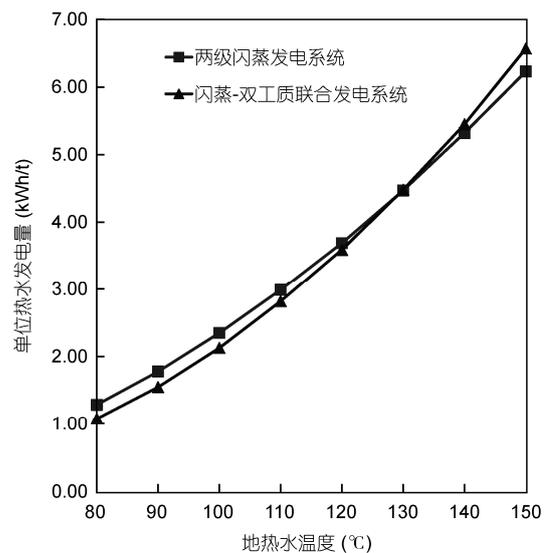


图 3 地热水温度对单位热水发电量的影响

中, 地热闪蒸-双工质联合发电系统的发电量随热水温度升高增加的更快, 当热源温度约为 130℃时, 两级闪蒸发电系统和闪蒸-双工质联合发电系统的净发电量接近; 当热水温度在 80~130℃时, 两级地热闪蒸发电系统的单位热水净发电量比闪蒸-双工质联合发电系统的单位热水净发电量多达 19.4%; 当热水温度在 130~150℃时, 闪蒸-双工质联合发电系统的单位热水净发电量比两级地热闪蒸发电系统的单位热水净发电量多达 5.5%。

### 2.2 两级地热发电系统净热效率的比较

图 4 为地热水温度对两级闪蒸和联合发电系统中闪蒸发电净热效率的影响, 可以看出两级闪蒸的净热效率明显高于联合系统单级闪蒸的热效率, 随着地热水温度的升高, 两级闪蒸发电系统的发电净热效率逐渐增加, 闪蒸-双工质发电系统的闪蒸发电净热效率先增加后减小; 图 5 为地热水温度对联合发电系统净热效率的影响, 闪蒸-双工质发电系统的双工质发电净热效率随着地热水温度的升高而增加, 由于联合发电系统的最大发电量是由闪蒸和双工质发电两部分组成, 在给定地热水温度的情况下, 联合发电系统中闪蒸发电净热效率并不一定是最佳值, 因此, 图 4 中闪蒸-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-双工质联合发电系统闪蒸温度对发电量的影响

图 6 为闪蒸-双工质联合发电系统中, 闪蒸温度对系统净发电量的影响。闪蒸温度采用试选的方法, 以观察其对发电功率的影响, 其范围在冷凝温度和热源温度之间。在同一热源温度下, 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。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; 从图 6 可以看出, 当热水温度为 80℃和 150℃时, 其最佳闪蒸温度为 60℃和 125℃。

### 2.4 两级地热发电系统最佳闪蒸温度的比较

图 7 为两级发电系统的最佳闪蒸温度和产汽率

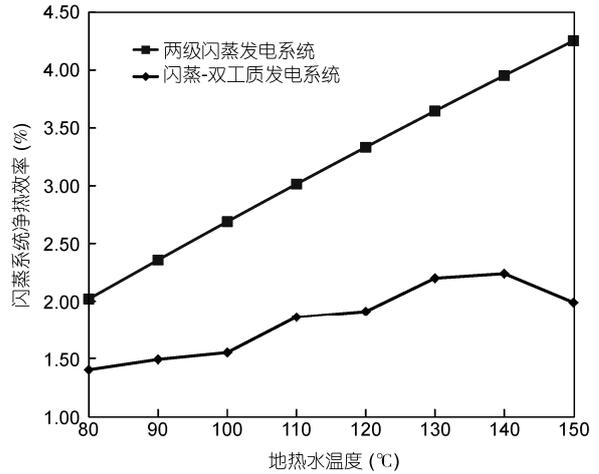


图 4 地热水温度对闪蒸电站净热效率的影响

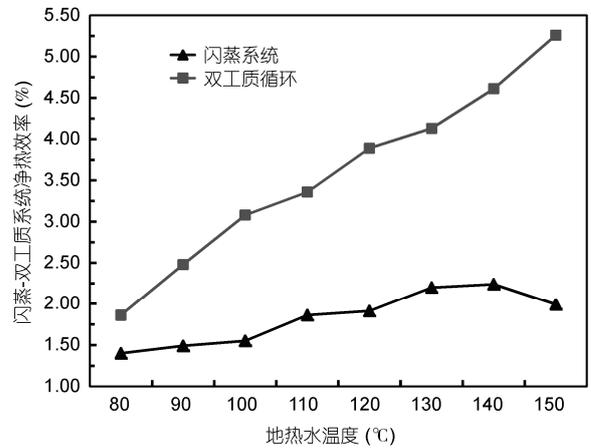


图 5 地热水温度对闪蒸-双工质电站净热效率的影响

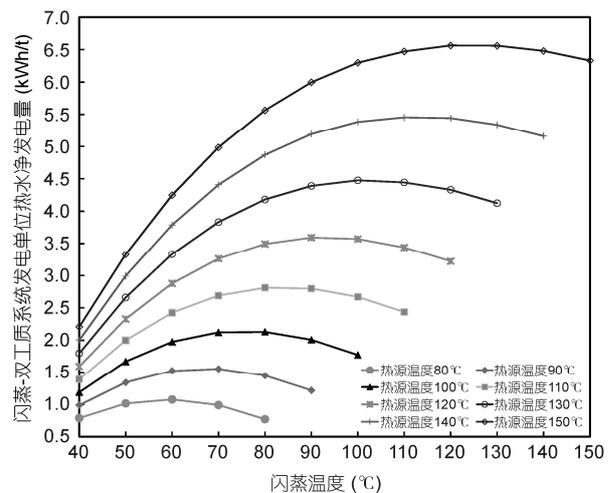


图 6 闪蒸温度对联合系统净发电量的影响

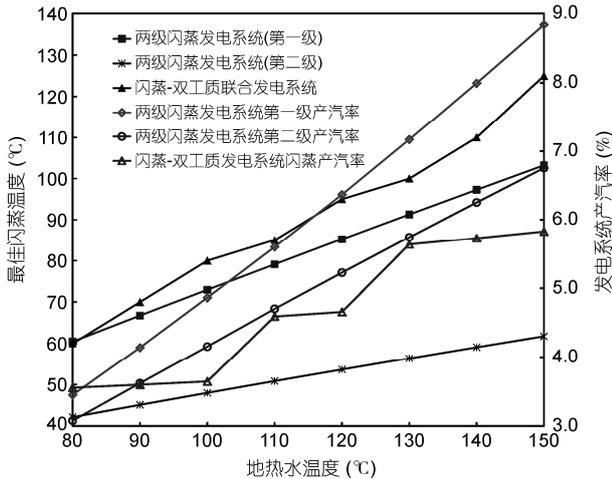


图7 地热水温度对最佳闪蒸温度和产汽率的影响

与地热水温度的关系, 闪蒸-双工质联合发电系统的最佳蒸发温度高于两级闪蒸发电系统, 最佳闪蒸温度越高, 系统的闪蒸压力也越大, 也有利于发电系统处于正压运行. 随着地热水温度越高, 两级闪蒸发电系统的闪蒸蒸汽量呈直线上升的趋势, 增加速度较快, 而闪蒸-双工质联合发电系统闪蒸发电的产汽量增加缓慢. 两级闪蒸发电系统一级产汽率为 3.5%~8.8%, 二级产汽率约为 3.1%~6.8%, 闪蒸-双工质联合发电系统的产汽率约为 3.6%~5.8%, 两级闪蒸发电系统闪蒸发电产汽量总和约为闪蒸-双工质的 2~3 倍, 地热水温度越高, 两者之间的差值就越大.

当热水温度低于 130℃, 虽然两级地热闪蒸发电系统的单位热水净发电量较大, 但是由于两级闪蒸的压力都较低(尤其第二级), 整个机组都在负压下运行, 蒸汽的质量体积很大, 将造成设备体积庞大、设备造价过高; 而闪蒸-双工质联合发电系统的最佳蒸发温度不但提高, 而且闪蒸产生的蒸汽质量约为两级闪蒸发电系统的一半, 这不仅有利于减少设备体积还有利于双工质提高发电量和发电净热效率. 因此, 在热水温度低于 130℃且水量较大时, 可以考虑采用地热闪蒸-双工质联合发电系统.

当热水温度高于 130℃, 地热两级闪蒸发电系统和闪蒸-双工质发电系统比较, 存在单位热水净发电量小的缺点, 但是两级闪蒸发电系统可以在正压下运行, 且资源利用率较高, 因此, 在热水高于 130℃且不凝气体质量含量较少时, 可以考虑采用地热两级闪蒸发电系统. 我国西藏羊八井地热电站就是采用这种系统, 该系统在技术上已较为成熟, 能长期稳

定运行, 具有较好的经济效益.

### 2.5 两级地热发电系统尾水温度的比较

图 8 为地热水温度对两级地热联合发电系统尾水温度的影响, 从图 8 可以看出地热水温度越高, 尾水排放温度越高, 闪蒸-双工质联合系统的尾水温度排放温度比两级闪蒸系统高 10℃左右, 因此, 可以考虑利用联合发电系统的尾水进行供热、洗浴等梯级利用, 提高地热资源利用率.

## 3 结论

为了有效地利用我国中低温地热资源和提高地热发电的经济性, 本文提出地热水发电的两级能量转换系统, 并对两级地热闪蒸和闪蒸-双工质联合发电系统的单位热水净发电量、电站净效率等热力学性能进行比较, 得出如下结论.

(1) 地热闪蒸-双工质联合发电系统的单位热水净发电量随地热水温度的增加量比地热两级闪蒸发电系统大, 当热水温度在 80~130℃时, 两级地热闪蒸发电系统的单位热水净发电量比闪蒸-双工质联合系统的单位热水净发电量多达 19.4%; 当热水温度在 130~150℃时, 闪蒸-双工质联合系统的单位热水净发电量比两级地热闪蒸发电系统的单位热水净发电量多达 5.5%.

(2) 随着地热水温度的升高, 两级闪蒸发电系统的发电净热效率逐渐增加, 闪蒸-双工质发电系统的闪蒸发电净热效率先增加后减小, 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.

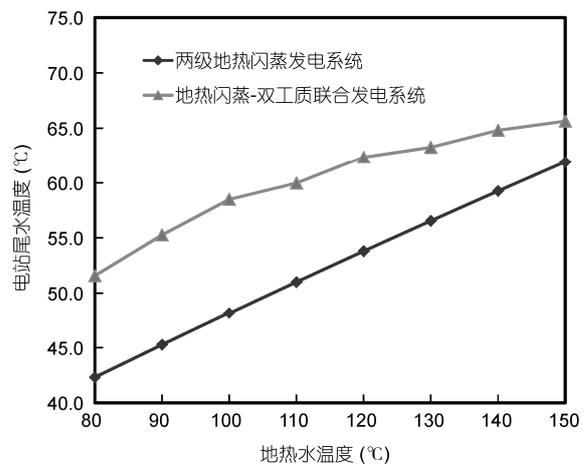


图8 地热水温度对电站尾水温度的影响

(3) 两级地热闪蒸发电系统闪蒸产汽量总和约为闪蒸-双工质发电系统闪蒸产汽量的 2~3 倍, 地热水温度越高, 两者之间的差值就越大。

(4) 闪蒸-双工质地热联合发电系统的尾水温度高于两级闪蒸发电系统, 可以考虑地热尾水的梯级利用。

## 参考文献

- 1 王集暘. 地热利用技术. 北京: 化学工业出版社, 2004. 5-12
- 2 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. *Renew Energ*, 2012, 48: 155-160
- 3 Enrico B. Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renew Sust Energ Rev*, 2002, 6: 3-65
- 4 吴治坚. 新能源和可再生能源的利用. 北京: 机械工业出版社, 2007. 237-251
- 5 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. *Appl Energ*, 2011, 80: 2740-2754
- 6 Chamorro C R, Mondéjar M E, Ramos R, et al. World geothermal power production status: Energy, environmental and economic study of high enthalpy technologies. *Energy*, 2012, 42: 10-18
- 7 Mortaza Y. Exergetic analysis of various types of geothermal power plants. *Renew Energ*, 2010, 35: 112-121
- 8 Alessandro F, Marco V. Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields. *Geothermics*, 2009, 38: 379-391
- 9 Jalilinasrabad S, Itoi R, Valdimarsson P. Flash cycle optimization of Sabalan geothermal power plant employing exergy concept. *Geothermics*, 2012, 43: 75-82
- 10 Michaelides E E, Scott G J. A binary-flashing geothermal power plant. *Energy*, 1984, 9: 323-331
- 11 Pasek A D, Fauzi Soelaiman T A, Gunawan C. Thermodynamics study of flash-binary cycle in geothermal power plant. *Renew Sust Energ Rev*, 2011, 15: 5218-5223
- 12 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. *太阳能学报*, 2009, 30: 316-321
- 13 Cerci Y. Performance evaluation of a single-flash geothermal power plant in Denizli. *Turkey Energy*, 2003, 28: 27-35
- 14 Rosyid H, Koestoer R, Putra N. Sensitivity analysis of steam power plant-binary cycle. *Energy*, 2010, 35: 3578-3586
- 15 Kanoglu M, Bolatturkb A. Performance and parametric investigation of a binary geothermal powerplant by exergy. *Renew Energ*, 2008, 33: 2366-2374

## Thermodynamic comparison between two stage flash and flash-binary geothermal power system

LUO Chao<sup>1</sup>, MA ChunHong<sup>2</sup>, LIU XueFeng<sup>2</sup>, GUO XinFeng<sup>2</sup>, WANG YanXin<sup>2</sup> & MA WeiBin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Guangzhou Institute of Energy Conversion, Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

<sup>2</sup>Sinopec Star Petroleum Co., LTD, Beijing 100083, China

To increase the energy conversion efficiency of geothermal resource, the authors propose the two-stage geothermal power system. The thermodynamic performance and applicable conditions of double flash and flash-binary power systems were compared and discussed based on numerical simulation. The double flash system showed a 19.4% higher net power output than flash-binary system when the geothermal resource temperature was between 80°C and 100°C. The flash-binary geothermal system showed a maximum of 5.5% net power output than the double flash system when the geothermal resource temperature was between 130°C and 150°C. The total steam production of the double power system was 2-3 times of the flash stage of the flash-binary power system. Compared with the two stage flash geothermal power system, the temperature of the geothermal tail water of flash-binary system was higher, which indicated a higher efficiency on cascade utilization of the geothermal resources.

**geothermal power, two-stage flash, binary cycle, flash-binary power system, thermal efficiency**

doi: 10.1360/972013-49