

单级和两级地热发电系统能量转换分析

骆超, 马伟斌

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

摘要 地热资源是一种重要的可再生能源, 但是中国地质和地热资源复杂。为了更好地利用这种能源, 基于热力学基本原理, 采用数值计算和模拟, 对包括单级闪蒸、双工质循环、两级闪蒸和闪蒸-双工质联合地热发电的单级和两级地热发电系统的主要性能指标进行了对比和分析。结果表明, 采用直接冷却方式的单级和两级地热发电系统的各项性能指标均优于间接冷却; 两级发电系统的净发电量高于单级闪蒸的净发电量, 地热水温度较高时, 尽量采用两级发电系统; 闪蒸-双工质地热发电系统的最佳闪蒸温度较高, 产汽率较低, 既有利于减少设备体积, 也可以使发电系统处于正压运行, 可以提高系统的运行效率。

关键词 闪蒸发电; 双工质循环; 发电量; 热效率; 产汽率

中图分类号 TK529

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.14.005

Single and Double Energy Conversion of Geothermal Power Generation

LUO Chao, MA Weibin

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

Abstract Geothermal power is an important renewable energy source. China possesses complex geological conditions and geothermal resources. For better utilization of this energy, the performance of single and double geothermal power systems including single and two-stage flash system, binary power system and flash-binary power system is analyzed and compared on the basis of numerical calculation. The results show that the performance of direct cooling system is better than that of indirect cooling system; the power output of double energy conversion system is higher than that of single system. Double energy conversion system is a better choice when the geothermal temperature is high. The optimum flash temperature of the flash-binary system is higher than that of other systems, which is helpful to reducing equipment volume and keeping appropriate system pressure. The results of this study provide theoretical basis and simulation verification for applications of geothermal energy.

Keywords flash power system; binary power system; power output; thermal efficiency; steam production rate

目前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。地热发电在运行过程中不受天气、昼夜和季节的影响, 因此其利用系数(地热电站全年发电量(kW·h)与电站装机容量(kW)和运行时间(h)乘积的比值)在可再生能源中最高。已有数据表

明, 可再生能源利用系数分别为生物质发电 0.52, 水电 0.42, 潮汐发电 0.23, 风电 0.21, 太阳能光伏 0.14, 而地热发电的利用系数可达 0.72(1 年的运行时间约占 72%)^[1]。在地热发电技术中, 单级和两级系统是地热发电常用的两种形式, 主要应用于中低温地热资源。据 2010 年统计, 单级地热发电的装

收稿日期: 2013-07-31; 修回日期: 2014-02-20

基金项目: 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, 电子信箱: luochao@ms.giec.ac.cn

引用格式: 骆超, 马伟斌. 单级和两级地热发电系统能量转换分析[J]. 科技导报, 2014, 32(14): 35-41.

机容量为 5599 MW, 占地热发电总装机容量 52%, 两级地热发电的装机容量为 2092 MW, 占地热发电总装机容量 20%^[2,3]。

中国是以中低温为主的地热资源大国, 全国地热资源潜力接近全球的 7.9%。根据中国所处地质构造位置和地热背景, 地热资源主要分为 3 类: 1) 高温对流型地热资源, 分布在滇藏及台湾地区, 其中适用于发电的高温地热资源较少, 主要分布在藏南、川西、滇西地区; 2) 中低温对流型地热资源, 主要分布在东南沿海地区包括广东、海南、广西以及江西、湖南和浙江等地; 3) 中低温传导型地热资源, 主要埋藏在华北、松北、辽北、四川、鄂尔多斯等地的大中型沉积盆地中^[4]。

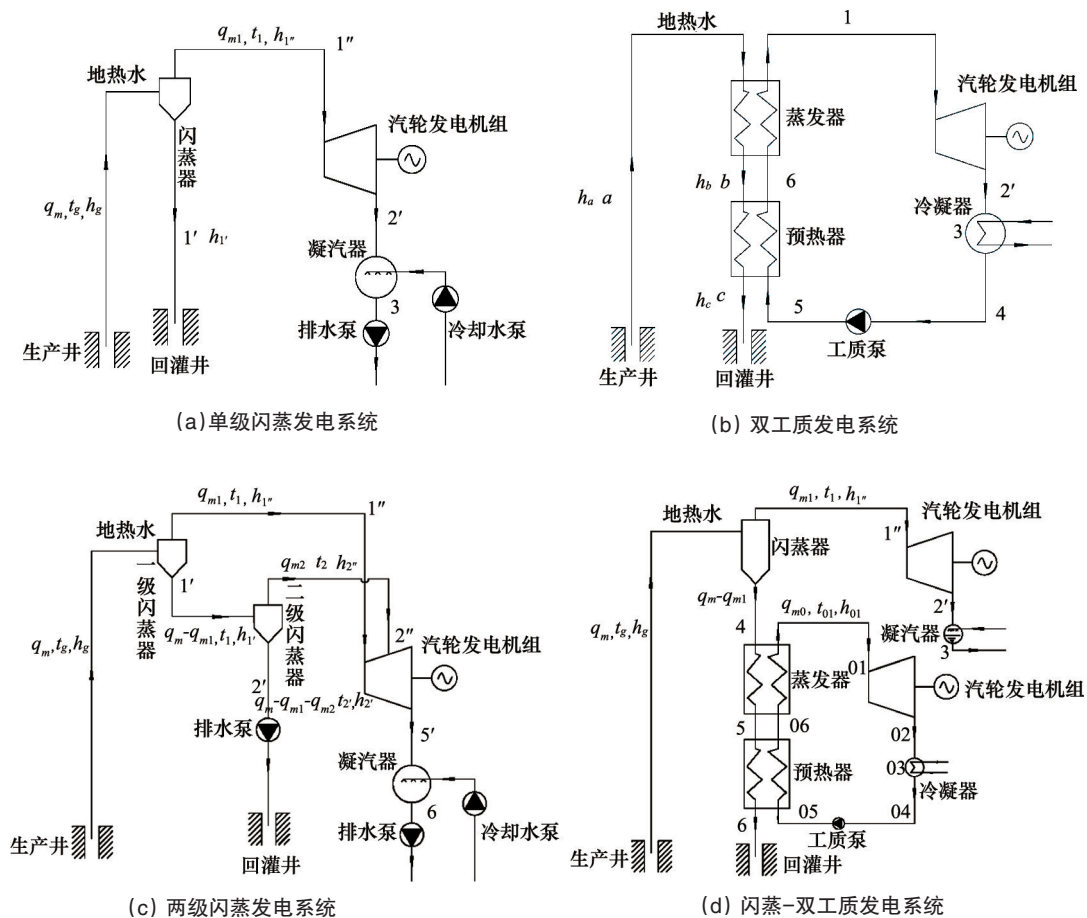
本研究运用吴志坚等^[5-7]对地热发电热力过程的计算方法, 对比分析单级和两级地热发电系统性能指标。全流-双循环地热发电系统比单级闪蒸发电系统的最大发电功率高

出 12.7%^[8], 在双工质发电系统方面, 主要进行了系统参数和工质的优化^[9-12]。地热水除上述利用方式外, 还有以混合工质(氨水、溴化锂溶液等)为循环工质的地热发电系统、单效溴化锂吸收式发电系统、单效溴化锂吸收式制冷发电联合系统^[13]、卡琳娜地热循环发电系统^[14]等。上述研究工作针对两个循环系统做了发电量的分析, 缺少发电系统的其他性能指标分析。本研究针对包括单级闪蒸、双工质循环、两级闪蒸和闪蒸-双工质联合地热发电的单级和两级的地热发电能量转换系统的主要性能指标进行对比和分析。

1 地热发电系统及计算

1.1 地热发电系统

目前, 地热发电主要有 4 种基本方式, 单级闪蒸、双工质循环、两级闪蒸和闪蒸-双工质发电系统(图 1)。



q_m, t_g, h_g 为地热水的质量流量、摄氏温度和质量焓; q_{m1}, t_1, h_1 为闪蒸后地热蒸汽的质量流量、摄氏温度和质量焓;
 q_{m2}, t_2, h_2 为二级闪蒸后地热蒸汽的质量流量、摄氏温度和质量焓; h_1 为闪蒸后地热水的质量焓;
 h_a, h_b, h_c 为状态点 a, b, c 地热水质量焓; q_{m0}, t_{01}, h_{01} 为双工质循环有机工质蒸汽的质量流量、摄氏温度和质量焓

图 1 地热发电系统示意

Fig. 1 Scheme of geothermal power system

1) 单级闪蒸地热发电, 如图 1(a) 所示, 来自生产井的热水首先进入闪蒸器, 闪蒸器内维持着比地热水饱和压力还要低的压力, 使得地热水降压闪蒸并将产生的低压蒸汽送往汽

轮机膨胀做功, 闪蒸后的水排入回灌井^[15,16]。闪蒸系统比较简单, 运行和维护较方便, 闪蒸器结构简单, 金属消耗量少, 造价低; 同时也存在汽轮机的尺寸较大, 易结垢、腐蚀, 需要容

量大的抽气器维持高真空等缺点。

2) 双工质地热发电, 又称双循环地热发电或中间介质法, 如图1(b)所示, 通过地热水与低沸点工质的间接热交换, 产生低沸点工质蒸气去推动气轮机发电, 然后再冷凝为液态工质, 用循环泵再泵入换热器, 形成连续的循环发电方式^[15,16]。按照循环方式不同, 有朗肯循环和卡琳娜循环两种发电方式, 本研究采用有机朗肯循环。

3) 两级闪蒸地热发电, 如图1(c)所示, 当井口地热流体为热水时, 热水先进入第1级闪蒸器, 产生的蒸汽进入汽轮机的高压部分, 从第1级闪蒸器底部出来的热水再进入第2级闪蒸器, 产生2次闪蒸蒸汽, 进入汽轮机中压部分做功^[15,16]。

4) 闪蒸-双工质联合地热发电, 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^[15,16]。如图1(d)所示, 这种特殊的能量转换系统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。

1.2 地热发电系统计算

1.2.1 单级闪蒸地热发电系统

单级闪蒸最佳闪蒸温度为

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

根据闪蒸器的热平衡得到单级闪蒸系统产汽率为

$$m_1 = \frac{q_{m1}}{q_m} = \frac{h_h - h_{1'}}{h_{1'} - h_{1'}} \quad (2)$$

电站净功率为

$$P_{\text{net}} = \frac{q_{m1}(h_{1'} - h_2)(1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g \quad (3)$$

每吨热水净发电量为

$$Ne = \frac{P_{\text{net}}}{q_m} = \frac{m_1(h_{1'} - h_2)(1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g \quad (4)$$

电站净效率为

$$\eta_{\text{net}} = \frac{3.6 P_{\text{net}}}{q_m(h_h - h_3)} = \frac{3.6 Ne}{h_h - h_3} \quad (5)$$

式中, t_1 为最佳闪蒸摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$; T_h 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 ; q_{m1} 为闪蒸器闪蒸地热水的质量流量, t/h ; q_m 为地热水的质量流量, t/h ; h_h 为状态点 h 地热水质量焓, kJ/kg ; $h_{1'}$ 为状态点 $1'$ 饱和液质量焓, kJ/kg ; $h_{1''}$ 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, $\%$; η_{oi} 为汽轮机相对内效率, $\%$; η_m 为机械效率, $\%$; η_g 为电机效率, $\%$; h_3 为状态点 3 流体质量焓, kJ/kg 。

1.2.2 双工质地热发电系统

单级双工质循环最佳蒸发温度为

$$t_1 = \sqrt{T_h T_c} - 273 \quad (6)$$

由蒸发器及预热器的热平衡得

$$q_{m0} = \frac{h_a - h_c}{h_1 - h_5} q_m \quad (7)$$

由蒸发器的热平衡得

$$q_m(h_a - h_b) = q_{m0}(h_1 - h_6) \quad (8)$$

电站净功率为

$$P_{\text{net}} = \frac{q_{m0}[(h_1 - h_2) - (h_5 - h_6)](1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g \quad (9)$$

单位热水发电量为

$$Ne = \frac{P_{\text{net}}}{q_m} \quad (10)$$

电站净效率为

$$\eta_{\text{net}} = \frac{3.6 P_{\text{net}}}{q_{m0}(h_1 - h_5)} \quad (11)$$

式中, t_1 为最佳蒸发摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$; T_h 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 ; q_{m0} 为工质质量流量, t/h ; q_m 为热水的质量流量, t/h ; h_a, h_b, h_c 为状态点 a, b, c 地热水质量焓, kJ/kg ; h_1, h_2, h_4, h_5, h_6 为状态点 $1, 2, 4, 5, 6$ 工质质量焓, kJ/kg 。

1.2.3 两级闪蒸地热发电系统

两级闪蒸最佳闪蒸温度计算公式

第一级最佳闪蒸温度为

$$T_{1,0P} = \sqrt[3]{T_g T_c} \quad (12)$$

第二级最佳闪蒸温度为

$$T_{2,0P} = \sqrt[3]{T_g T_c^2} \quad (13)$$

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为

$$q_{m1} = \frac{q_m(h_g - h_{1'})}{h_{1'} - h_{1'}} \quad (14)$$

第一级闪蒸器的产汽率为

$$m_1 = \frac{q_{m1}}{q_m} = \frac{h_g - h_{1'}}{h_{1'} - h_{1'}} \quad (15)$$

第二级闪蒸器的蒸汽产量为

$$q_{m2} = \frac{(q_m - q_{m1})(h_{1'} - h_2)}{h_{2''} - h_2} \quad (16)$$

第二级闪蒸器的产汽率为

$$m_2 = \frac{q_{m2}}{q_m} = \frac{(1 - m_1)(h_{1'} - h_2)}{h_{2''} - h_2} \quad (17)$$

两级闪蒸发电净功率为

$$P_{\text{net}} = \frac{[q_{m1}(h_{1'} - h_3) + (q_{m1} + q_{m2})(h_4 - h_5)](1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g \quad (18)$$

每吨热水净发电量为

$$Ne = \frac{[m_1(h_{1'} - h_3) + (m_1 + m_2)(h_4 - h_5)](1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g \quad (19)$$

电站净热效率为

$$\eta_{\text{net}} = \frac{3.6 Ne}{h_h - h_6} \quad (20)$$

式中, 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 ; q_m 为地热水质量流量, t/h ; h_g 为地热水质量焓, kJ/kg ; $h_{1'}, h_2$ 为状态点 $1', 2'$ 地热水质量焓, kJ/kg ; $h_{1''}, h_{2''}$ 为状态点 $1'', 2''$ 饱和汽质量焓, kJ/kg ; h_3, h_4, h_5 为状态点 $3, 4, 5$ 地热水质量焓, kJ/kg ; h_6 为状态点 h 地热水质量焓, kJ/kg 。

1.2.4 闪蒸-双工质地热联合发电系统

闪蒸系统最佳闪蒸温度为

$$T_1 = \sqrt{T_g T_c} \quad (21)$$

双工质循环最佳蒸发温度为

$$T_{o1} = \sqrt{T_1 T_{oc}} \quad (22)$$

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_{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。

由式(22)可知, 工质的最佳蒸发温度 T_{o1} 是与最佳闪蒸温度 T_1 有关联的。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到, 闪蒸器的蒸汽产量为

$$q_{m1} = \frac{q_m(h_g - h_4)}{h_{1v} - h_4} \quad (23)$$

闪蒸器的产汽率为

$$m = \frac{q_m}{q_{m1}} = \frac{(h_g - h_4)}{h_{1v} - h_4} \quad (24)$$

电站净功率为

$$P_{net1} = \frac{q_m(h_{1v} - h_2)(1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g \quad (25)$$

电站净热效率为

$$\eta_{net1} = \frac{3.6 P_{net1}}{q_m(h_g - h_3)} \quad (26)$$

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_{1v} 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; 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到, 工质质量流量为

$$q_{mo} = \frac{(q_m - q_{m1})(h_4 - h_6)}{(h_{o1} - h_{o5})} \quad (27)$$

式中, $h_{o5} = h_{o4} + w_p$, $w_p = (P_{o1} - P_{o2}) \nu_{o4} (10^3 \eta_p)$ 。

双工质循环的发电净功率为

$$P_{net2} = \frac{q_{mo}[(h_{o1} - h_{o2}) - (h_{o5} - h_{o4})](1 - X)}{3.6} \eta_{oi} \eta_m \eta_g \quad (28)$$

电站净热效率为

$$\eta_{net2} = \frac{3.6 P_{net2}}{q_m(h_{o1} - h_{o5})} \quad (29)$$

闪蒸-双工质循环发电净功率为

$$P_{net} = P_{net1} + P_{net2} \quad (30)$$

每吨地热水净发电量为

$$Ne = \frac{P_{net}}{q_m} = \frac{P_{net1}}{q_m} + \frac{P_{net2}}{q_m} = Ne_1 + Ne_2 \quad (31)$$

式中, 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_{o2} 为凝汽器冷凝压力, Pa; ν_{o4} 为冷凝工质质量体积, m³/kg; η_p 为工质压缩泵的效率, %。

上述 4 种发电方式中, 闪蒸系统的冷却方式有直接冷却和间接冷却 2 种方式, 本文在 2 种冷却方式下, 对 4 种发电方式的性能指标进行了分析。

2 地热发电系统性能评价指标

基于热力学第一定律, 对 4 种发电系统的各个组成部件及系统进行能量和质量的平衡分析, 得出地热发电系统的主要评价指标^[15,16]:

1) 电站单位热水净发电量, 即每吨地热水的净发电量, 中低温地热发电系统每吨地热流体净发电量同样也视地热流体温度而定, 一般在 1.5~5.0 kW·h/t 之间。

2) 发电系统净热效率是指电站输出净功率的热当量与地热流体的循环加热量之比, 中低温地热发电系统发电效率视地热流体温度而定, 一般在 4%~13% 之间。

3) 发电系统最佳蒸发温度, 它是指闪蒸器内能使热水热能转换成最大机械能时的蒸发温度, 也就是能够用最少水量生产 1 kW·h 电能的温度。

4) 发电系统的产汽率是指电站每发出 1.0 kW·h 电所消耗的蒸汽量, 一般在 3%~13% 之间。

3 地热发电系统性能讨论

单级闪蒸、两级闪蒸和闪蒸-双工质联合发电系统的闪蒸冷却方式有直接冷却和间接冷却。本文在两种冷却方式下, 分别阐述地热水温度对性能指标的影响。

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; 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五氟丙烷(R245fa)。

图 2 为直接和间接冷却条件下, 单级闪蒸、双工质、两级闪蒸和闪蒸-双工质 4 种发电系统的净发电量和地热水温度的关系, 采用间接冷却发电系统的净电量低于直接冷却。如图 2(a) 所示, 直接冷却条件下, 闪蒸-双工质发电系统的发电量比单级闪蒸高出 10.2%~36.6%, 热水温度大于 130℃ 时, 闪蒸-双工质联合系统净发电量大于两级闪蒸; 如图 2(b) 所示间接冷却条件下, 闪蒸-双工质联合循环的净发电量明显大于其他发电系统, 闪蒸-双工质发电系统的发电量比单级闪蒸高出 34.4%~58.8%, 双工质地热发电的发电量比单级闪蒸高出 34%~57.8%, 热水温度越高, 双工质系统的发电量越接近闪蒸-双工质发电系统, 热水温度大于 90℃ 时, 双工质发电系统的净发电量大于两级闪发电系统。

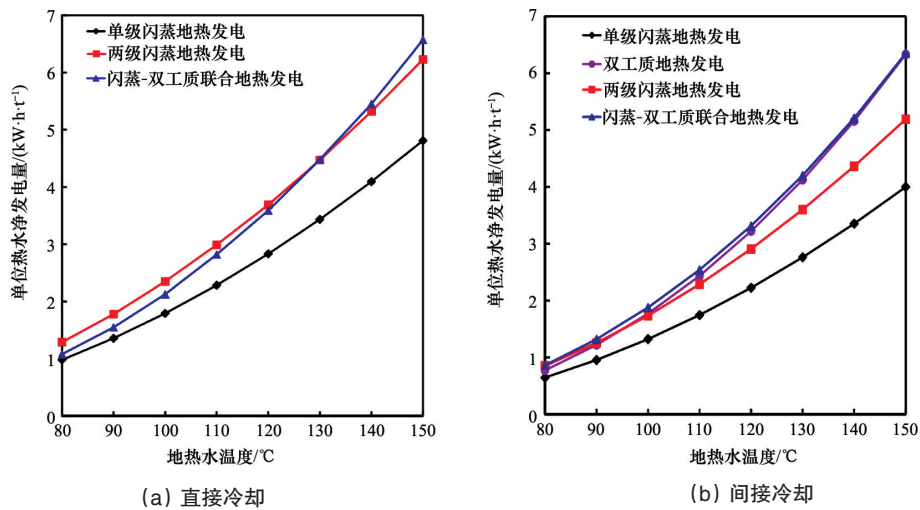


图2 单位热水净发电量和地热水温度的关系

Fig. 2 Influence of geothermal water temperature on net power output

图3为直接和间接冷却条件下,单级闪蒸、两级闪蒸和闪蒸-双工质3种发电系统的闪蒸系统发电热效率和地热水温度的关系,采用间接冷却发电系统的发电热效率低于直接冷却。如图3(a)所示,直接冷却条件下,两级闪蒸地热发电热效率比单级闪蒸高29.6%~31.7%;如图3(b)所示,间接冷却

条件下,两级闪蒸地热发电热效率比单级闪蒸高29.8%~32.0%。闪蒸-双工质联合发电系统是由闪蒸和双工质发电两部分组成,其闪蒸发电热效率先增大后减小,并且在同一热源温度下,相比单级和两级发电系统,其闪蒸发电热效率中最低。

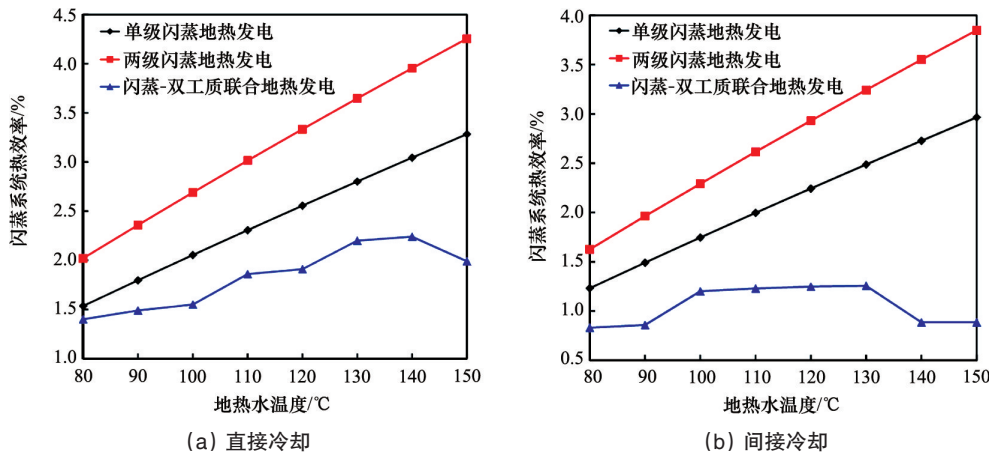


图3 闪蒸系统热效率和地热水温度的关系

Fig. 3 Influence of geothermal water temperature on thermal efficiency of flash system

图4为双工质系统发电热效率随地热水温度的关系。随着热水温度的增加,双工质系统的发电热效率逐渐增加,同一热源温度下,双工质地热发电的热效率明显高于闪蒸-双工质联合系统中双工质发电系统的热效率,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5为直接和间接冷却条件下,单级闪蒸、两级闪蒸和闪蒸-双工质3种发电系统的最佳闪蒸温度和地热水温度的关系,采用间接冷却发电系统的最佳闪蒸温度高于直接冷却。闪蒸-双工质联合发电系统的最佳蒸发温度比单级和两级都高,单级闪蒸地热发电的最佳闪蒸温度介于两级闪蒸地热发电系统的第一级和第二级最佳闪蒸温度之间。最佳闪蒸温

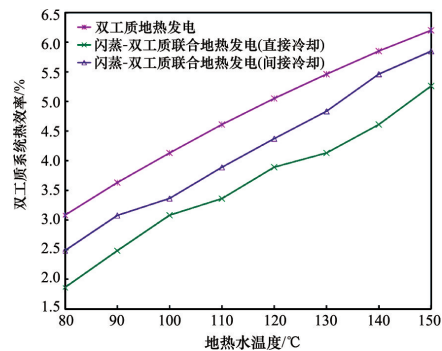


图4 双工质系统热效率和地热水温度的关系

Fig. 4 Influence of geothermal water temperature on thermal efficiency of binary system

度越高,系统闪蒸压力越大,有利于发电系统处于正压运行。

图6为直接和间接冷却条件下,单级闪蒸、两级闪蒸和闪蒸-双工质3种发电系统的产汽率和地热水温度的关系,采用间接冷却发电系统的产汽率低于直接冷却。随着地热水温度升高,单级和两级闪蒸地热发电系统的闪蒸蒸汽量呈直线上升的趋势,而闪蒸-双工质联合发电系统闪蒸发电的产汽量先缓慢增加后逐渐减小。如图6(a)所示,直接冷却条件下,单级闪蒸发电系统产汽率为5%~12.5%,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;如图6(b)所示,间接冷却条件下,单级闪蒸发电系统产汽率为4.1%~11.5%,两级闪蒸发电系统一级产汽率为2.8%~8.1%,二级产汽率约为2.6%~6.3%,闪蒸-双工质联合发电系统的产汽率约为1.8%~2.9%,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3~4倍。产汽量越大,不仅使发电设备的体积增加,也使系统处于负压运行,不利于发电系统提高效率。

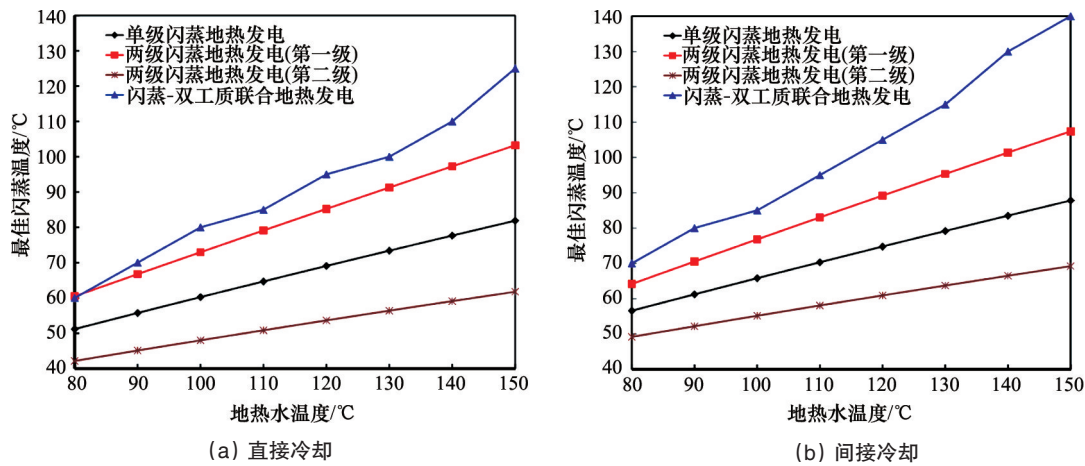


图5 最佳闪蒸温度和地热水温度的关系

Fig. 5 Influence of geothermal water temperature on optimal flash temperature

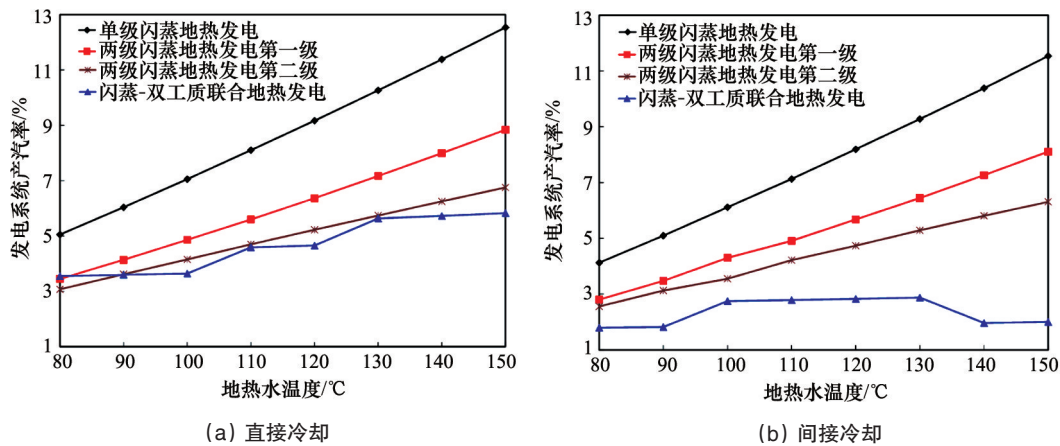


图6 发电系统产汽率和地热水温度的关系

Fig. 6 Influence of geothermal water temperature on steam production rate

4 结论

1) 单级和两级地热发电系统的各项性能指标在直接冷却方式的条件下均优于间接冷却,客观条件允许情况下,地热发电尽量采用直接冷却的方式。

2) 两级发电系统的净发电量高于单级闪蒸的净发电量,

温度高于90°C时,双工质发电系统的净发电量高于两级闪蒸。热水温度低于100°C时,考虑设备安装和发电成本尽量采用单级闪蒸系统;地热水温度高于120°C时,综合考虑电站投资和经济收益等因素,优先选择两级发电系统。

3) 闪蒸-双工质地热发电系统的最佳闪蒸温度较高,产

汽率较低,既有利于减少设备体积,也可以使发电系统处于正压运行,提高系统的运行效率,热水温度高且热量较大时,优先选择闪蒸-双工质发电系统。

参考文献(References)

- [1] 郑克桢, 潘小平. 中国地热发电开发现状与前景[J]. 中外能源, 2009, 14(2): 45-48.
Zheng Keyan, Pan Xiaoping. Status and prospect of geothermal generation development in China[J]. Sino-global Energy, 2009, 14(2): 45-48.
- [2] Bertani R. Geothermal Power Plant in the World 2005-2010 Update Report[C]//Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia: The International Geothermal Association, April 25-30, 2010.
- [3] Velez F, Segovia J, Martin M. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012(16): 4175-4189.
- [4] 王集暘, 马伟斌, 龚宇烈. 地热利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-24.
Wang Jiyang, Ma Weibin, Gong Yulie. Geothermal utilization technology [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2005, 1-24.
- [5] 吴治坚, 龚宇烈, 马伟斌. 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: 316-321.
Wu Zhijian, Gong Yulie, Ma Weibin. Research on geothermal power generation by flash system combined with binary cycle[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30: 316-321.
- [6] Luo chao. Thermodynamic analysis of geothermal binary power system [C]//2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring. Changsha, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers. March 5-6, 2012: 804-807.
- [7] 吴治坚, 龚宇烈, 骆超. 余热发电两级能量转换系统的研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(5): 91-95.
Wu Zhijian, Gong Yulie, Luo Chao. Research on two stage energy conversion system for waste heat power generation[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(5): 91-95.
- [8] 王心悦, 余岳峰. 全流-双循环地热发电系统分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(4): 560-564.
Wang Xinyue, Yu Yuefeng. Analysis of geothermal power generation by total flow system with binary cycle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(4): 560-564.
- [9] 王辉涛, 王华. 中低温地热发电有机朗肯循环工质的选择[J]. 昆明理工大学学报, 2012, 37(1): 41-46.
Wang Huitao, Wang Hua. Selection of working fluid for organic rankine cycle used in mid and low temperature geothermal power plant[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2012, 37(1): 41-46.
- [10] 刘继芬, 王景甫, 马重芳. 中低温地热发电循环参数的优化[J]. 化工学报, 2011, 62(S1): 190-196.
Liu Jifen, Wang Jingfu, Ma Chongfang. Optimization of cycle parameters in low-medium temperature geothermal power generation [J]. CIESC Journal, 2011, 62(S1): 190-196.
- [11] Walraven D, Laenen B, William D. Comparison of thermodynamic cycles for power production from low-temperature geothermal heat sources[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 66: 220-233.
- [12] Kanoglu M, Bolatturk A. Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by energy[J]. Renewable Energy, 2008, 33: 2366-2374.
- [13] 梁泽德, 王树杰. 基于温泉地热能利用的动力循环系统研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(4): 81-84.
Liang Zede, Wang Shujie. Study on power cycle system of hot springs geothermal energy[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(4): 81-84.
- [14] 朱家玲, 卢志勇, 张伟. Kalina 地热发电循环分析[J]. 科技导报, 2012, 30(21): 46-50.
Zhu Jialing, Lu Zhiyong, Zhang Wei. Kalina cycle of geothermal power production[J]. Science and Technology Review, 2012, 30(21): 46-50.
- [15] 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.
- [16] 严陆光, 顾国彪. 中国电气工程大典[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 610-642.
Yan Lugang, Gu Guobiao. China electrical engineering canon[M]. Beijing: China Electrical Press, 2009: 610-642.

(编辑 季超)


 科技
导报
SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。