



闪蒸-双工质联合发电系统热力性能比较

罗珂^{1,2,3}, 骆超^{1,2}, 龚宇烈^{1,2}

(¹中国科学院广州能源研究所可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640; ²广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东 广州 510640; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了筛选出适宜于闪蒸-双工质联合发电系统的循环工质, 建立了闪蒸-双工质联合发电系统的热力学模型。在这个计算模型中, 采用热水温度范围为 100~150℃, 热水流量取为 36t/h, 冷却水进口温度设定为 15℃。以单位热水净发电量、热效率、炯效率和系统不可逆损失作为联合系统性能的评价指标, 研究 5 种有机工质 (R236fa、R600a、R600、R245fa、R601a) 的运行参数, 比较不同地热流体温度条件下这 5 种有机工质的做功能力, 确立了联合发电系统的最佳循环工质。研究表明: 联合系统的净发电量随着闪蒸温度的增加呈先增大后减小的趋势, 每种工质都有一个最佳的闪蒸温度使得联合系统的单位热水净发电量达到最大; 综合考虑这 5 种工质的环保性能和热力学性能, 工质 R245fa 是综合性能最好的工质, 可作为闪蒸-双工质联合发电系统的有机工质。

关键词: 闪蒸-双工质联合发电; 工质选择; 最佳闪蒸温度; 热效率; 炯效率

中图分类号: TK529

文献标志码: A

文章编号: 1000-6613(2017)04-1521-08

DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2017.04.048

Thermal performance comparison of flash-binary power system

LUO Ke^{1,2,3}, LUO Chao^{1,2}, GONG Yulie^{1,2}

(¹Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; ²Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, Guangdong, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To select a suitable working fluid for flash-binary power system (FBPS), a thermodynamic model for FBPS was established. In this calculation, the heat source temperature of the FBPS is 100—150℃ with a flow rate of 36t/h and cooling water inlet temperature is 15℃. Five organic working fluids (R236fa, R600a, R600, R245fa, R601a) were selected to analyze their work capacity based on the performance index of net power output per ton of geofluid, thermal efficiency, exergy efficiency and irreversible loss of the system. Finally, the best working fluid was determined. Results showed that the net power output of FBPS increases with the increase of flash temperature and then decreases. Each working fluid has an optimum flash temperature which makes the net power output to be maximum. Taking environmental and thermodynamic performance into consideration, R245fa is the best working fluid for the flash-binary power system.

Key words: flash-binary power system; working fluid selection; optimal flash temperature; thermal efficiency; exergy efficiency

近年来, 全球都面临着越来越严峻的能源问题, 随着我国不断推进节能减排政策, 很多研究者逐渐把能源的研究重点放在太阳能、地热能等可再生能源领域^[1]。其中, 地热能是指蕴藏在地球内部的巨大的天然热能, 全球地热资源所拥有的热能

收稿日期: 2016-09-08; 修改稿日期: 2016-10-28。

基金项目: 国家自然科学基金(5140060664)及广东省科技计划(2014A020223001)项目。

第一作者: 罗珂(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事地热能利用方面的研究。E-mail: luoke@ms.giec.ac.cn。联系人: 龚宇烈, 博士, 研究员, 主要从事地热发电和地热综合利用方面的研究。E-mail: gongyl@ms.giec.ac.cn。

约为已探明煤储量热能的 1.7 亿倍^[2]，由于其储量大、分布范围广，并且其开采利用不受昼夜和季节变化的限制，因此越来越多的科研工作者开始关注和研究地热能的开发利用^[3-4]。热水发电包括闪蒸系统和双工质循环系统两种基本的能量转换系统。闪蒸-双工质联合发电系统是由单级闪蒸和双工质发电两部分组成的。与单纯的双工质循环系统一样，联合系统中双工质循环部分有机工质的选择对循环系统性能影响也较大。

近年来，国内外的科研工作者对有机朗肯循环的有机工质进行了大量研究^[5-8]。束杨等^[9]在不同的蒸发温度下，对 8 种循环工质的热力循环性能进行计算分析，认为 R123 是适合低温热能有机朗肯循环系统的循环工质。韩中合等^[10]选取 9 种有机工质对其热力循环特性进行了计算分析，认为 R245fa 作为太阳能低温热发电朗肯循环系统的循环工质具有较高的热效率和焓效率。SALEH 等^[11]采用 BACKONE 状态方程对 31 种纯工质进行了热力学物性分析。HUNG 等^[12]采用甲苯、苯、对二甲苯、R113 和 R123 作为循环工质对回收余热 ORC 特性进行了分析，结果证明湿工质不适于 ORC 系统，同时指出在一定热源条件下，等熵工质 R113 和 R123 更适于回收低温余热。WANG 等^[13]研究了 9 种工质的物理特性，指出 R11、R113、R123 和 R141B 的热力性能较好，R245fa 和 R245ca 的环保性能最好。韩中合等^[14]对预选的 14 种有机朗肯循环工质在热力学特性和经济性两方面进行了优选。刘健等^[15]基于蒸发参数法展开了工质 R123 和 R245fa 的优选研究。李惟毅等^[16]采用了结合经济性能和焓效率的综合评价指标对有机朗肯循环的 13 种有机工质进行了多目标优选。韩中合等^[17]选用 10 种干工质，研究了内回热器对低温有机朗肯循环热力性能的影响。

在以往的研究中，只是针对单一的有机朗肯循环有机工质进行了研究，然而对于闪蒸-双工质联合发电系统的有机工质选择，还没有相关的文献进行研究。对于单纯的闪蒸系统和双工质循环地热发电来说，只要闪蒸器采用最佳闪蒸温度、蒸发器采用最佳蒸发温度，单一系统的单位热水发电量就可以达到最大，然而对于闪蒸-双工质联合发电系统来说，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，联合系统的最佳闪蒸温度大于单一闪蒸系统的最佳

温度^[18]。联合发电系统呈现出和单一的有机朗肯循环不一样的特性，所以需要联合发电系统的有机工质进行进一步的研究。

本文以单位热水净发电量、热效率、焓效率和系统不可逆损失为性能指标，选取 5 种有机工质，通过数值计算，分析不同地热流体温度下这 5 种有机工质的做功能力以及热效率等参数随系统闪蒸温度的变化，从而确定联合发电系统的最佳循环工质。

1 有机工质的初选

由于闪蒸-双工质联合发电系统的有机工质就是应用在其有机朗肯循环部分，故联合系统有机工质选择标准和单独的有机朗肯循环系统相似，也应从以下几个方面考虑^[19]。

(1) 环保性能。应尽量选用无臭氧破坏能力和温室效应低的工质。

(2) 化学稳定性。保证有机工质在运行工况最高温度下不分解。

(3) 工质的安全性。应考虑选择无毒性或毒性低以及不易燃易爆，对设备管道无腐蚀的流体。

(4) 工质的临界参数、正常沸点及凝固温度。工质的临界温度不能太低，要高于运行中的最高温度，同时工质的凝固温度要小于循环中可能达到的最低温度。

(5) 工质的流动及换热性能。一般尽量选用对流换热系数高、黏度低的循环工质。

(6) 价格、成本要求。工质价格应较低且容易购买到。

综合考虑上述各种要求，并参考有机朗肯循环系统有机工质的选择情况^[1,2,5,10]，选取如表 1 所示的几种工质作为待选工质。这些工质的物性参数来自 NIST 提供的 REFPROP9.0 程序。

2 闪蒸-双工质联合发电系统

如图 1 所示，闪蒸-双工质联合发电是将闪蒸器

表 1 所选工质的特性参数

待选工质	临界温度/℃	临界压力/kPa	标准工况沸点/℃	ODP	GWP ₁₀₀
R236fa	124.92	3200	-1.44	0	6300
R600a	134.66	3629	-11.75	0	20
R600	151.01	3797	-0.49	0	20
R245fa	154.0	3651	15.1	0	820
R601a	187.2	3378	27.8	0	20

注：ODP 表示消耗臭氧潜能值，GWP 表示全球变暖潜能值。

分离出的蒸汽用于推动汽轮机直接发电，剩下的饱和和水则进入双工质循环部分用来加热有机工质，使之变为蒸汽推动汽轮机进行发电，这种特殊的两级能量转换系统使得地热水资源的热能得到充分利用^[20]。

由生产井通过深井泵抽出来的地热水 1 先进入闪蒸器（亦称降压扩容器）降压闪蒸，生产出一部分低压饱和蒸汽 2 及饱和水 5，然后蒸汽进入凝汽式汽轮发电机组将其热能转变为机械能及电能，残留的饱和水 5 则进入双工质循环发电系统继续利用。图 2 是与图 1 对应的联合系统中闪蒸发电部分的热力循环图；图 3 是与图 1 对应的双工质循环发电部分热力循环图。

3 闪蒸-双工质联合发电系统的热力计算模型

分别计算闪蒸系统和双工质系统的各热力学参数^[21]，计算过程如式(1)~式(15)所述。

3.1 闪蒸循环

闪蒸循环的最佳闪蒸温度

$$T_2 = \sqrt{T_1 T_{c1}}, t_2 = T_2 - 273 \quad (1)$$

参考图 1 及图 2，由闪蒸器的热平衡计算如下。

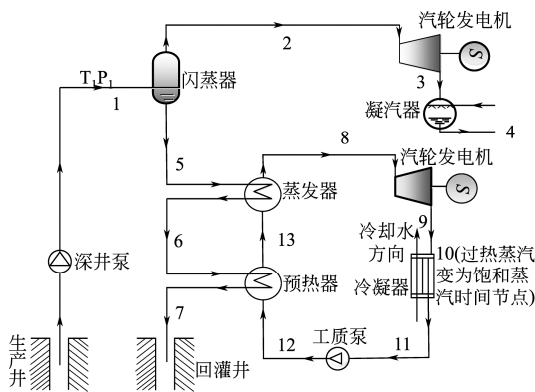


图 1 闪蒸-双工质联合发电系统

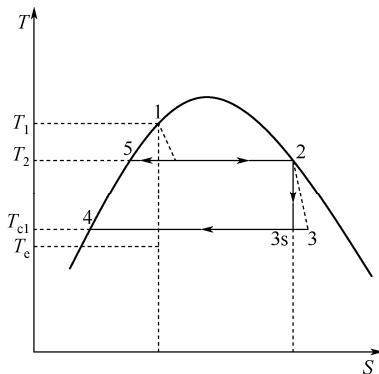


图 2 闪蒸发电系统热力循环图

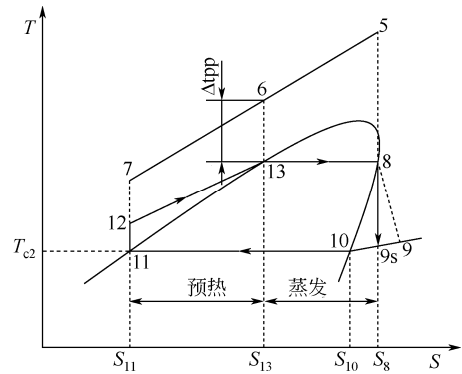


图 3 双工质系统热力循环图

闪蒸循环的蒸汽质量流量

$$q_{m1} = q_m (h_1 - h_5) / (h_2 - h_5) \quad (2)$$

闪蒸循环部分的产汽率

$$m = q_{m1} / q_m \quad (3)$$

闪蒸电站机组的净发电功率

$$W_{net1} = [q_{m1} (h_2 - h_3) (1-x) \epsilon_{oi} \epsilon_m \epsilon_g \times 10^3] / 3600 \quad (4)$$

闪蒸电站机组每吨热水净发电量 N_{e1}

$$N_{e1} = W_{net1} / q_m = [m (h_2 - h_3) (1-x) \epsilon_{oi} \epsilon_m \epsilon_g \times 10^3] / 3600 \quad (5)$$

闪蒸电站机组的净热效率

$$\eta_{net1} = 3.6 W_{net1} / [q_m (h_1 - h_4)] \quad (6)$$

3.2 双工质循环

双工质循环部分蒸发器的最佳蒸发温度

$$T_8 = \sqrt{T_5 T_{c2}}, T_5 = T_2 \quad (7)$$

$$t_8 = T_8 - 273$$

由式(7)可以清楚地看出，双工质循环的最佳蒸发温度 t_8 与闪蒸循环的最佳闪蒸温度 t_2 联系密切，由最佳闪蒸温度 t_2 和冷凝温度 T_{c2} 可以确定双工质循环的最佳蒸发温度 t_8 。参见图 1 和图 3，由换热器的热平衡公式计算出有机工质的质量流量。

$$q_{m0} = [(q_m - q_{m1})(h_5 - h_7)] / (h_8 - h_{12}) \quad (8)$$

$$h_{12} = h_{11} + w_p, w_p = [(P_8 - P_{11})v_{11}] / 10^3 \epsilon_p$$

双工质循环电站机组的净发电功率

$$W_{net2} = \{q_{m0} [(h_8 - h_9) - (h_{12} - h_{11})] \epsilon_{oi} \epsilon_m \epsilon_g (1-x) \times 10^3\} / 3600 \quad (9)$$

双工质循环电站机组每吨热水净发电量

$$N_{e2} = W_{net2} / q_m \quad (10)$$

双工质循环电站净热效率

$$\eta_{net2} = 3.6 W_{net2} / [q_{m0} (h_8 - h_{12})] \quad (11)$$

联合系统的发电净功率

$$W_{net} = W_{net1} + W_{net2} \quad (12)$$

联合系统每吨热水净发电量

$$N_e = W_{net} / q_m = (W_{net1} + W_{net2}) / q_m = N_{e1} + N_{e2} \quad (13)$$

联合系统各部分焓效率如下。

闪蒸循环

$$\eta_{e1} = W_{net1} / (q_m e_1) \quad (14)$$

双工质循环

$$\eta_{e2} = W_{net2} / (q_m e_1) \quad (15)$$

联合系统总不可逆损失

$$I = q_m e_1 - q_7 e_7 - W_{net1} - W_{net2} \quad (16)$$

4 各工质计算结果及其分析

为了解有机工质的选择对闪蒸-双工质联合发电系统的影响，选择表 1 中所列举的有机工质进行对比分析，其临界温度依次递增。计算时热水温度范围为 100~150℃；热水流量为 36t/h；冷却

水进口温度为 15℃；传热温差取 $\Delta t_{pp}=5℃$ ；联合发电系统的热力学参数取单位热水净发电量最大时的数值；厂用电率取 $x=0.2$ ；汽轮机相对内效率取 $\varepsilon_{oi}=0.76$ ；机械效率取 $\varepsilon_m=0.98$ ；发电机效率取 $\varepsilon_g=0.97$ ；闪蒸循环部分采用直接冷却的方式，双工质循环部分采用间接冷却方式。另外，忽略预热器、蒸发器、冷凝器和管道中的压力损失；忽略系统的摩擦损失和环境散热损失。表 2 列出了热水温度 100~150℃条件下，不同工质的热力性能参数。

4.1 单位热水净发电量随闪蒸温度变化的影响

单位热水净发电量是评价有机工质做功能力的重要指标。图 4 为热水温度在 100~150℃范围内，

表 2 不同热水温度条件下的性能参数

待选工质	热水温度 /℃	单位热水净发电量 /kW·h·t ⁻¹	闪蒸系统热效率	双工质系统热效率	联合系统焓效率	不可逆损失 /kW
R236fa	100	4.936	0.04167	0.04404	0.4544	164.7
	110	6.279	0.04591	0.04950	0.4646	206.8
	120	7.780	0.04995	0.05476	0.4739	253.1
	130	9.441	0.05376	0.05986	0.4827	303.9
	140	11.260	0.05727	0.06486	0.4911	359.0
	150	13.250	0.06040	0.06979	0.4993	418.6
R600a	100	4.922	0.04185	0.04421	0.4532	164.0
	110	6.258	0.04618	0.04971	0.4630	205.7
	120	7.749	0.05036	0.05500	0.4720	251.5
	130	9.395	0.05435	0.06013	0.4804	301.5
	140	11.200	0.05813	0.06511	0.4883	355.7
	150	13.160	0.06166	0.06999	0.4959	414.1
R600	100	4.919	0.04192	0.04471	0.4529	162.6
	110	6.251	0.04631	0.05027	0.4626	203.6
	120	7.736	0.05057	0.05563	0.4713	248.6
	130	9.375	0.05468	0.06080	0.4793	297.6
	140	11.170	0.05862	0.06581	0.4869	350.5
	150	13.110	0.06240	0.07069	0.4940	407.3
R245fa	100	4.924	0.04185	0.04483	0.4534	162.2
	110	6.259	0.04621	0.05044	0.4631	203.1
	120	7.748	0.05042	0.05586	0.4720	248.0
	130	9.392	0.05447	0.06110	0.4802	296.8
	140	11.190	0.05835	0.06618	0.4879	349.4
	150	13.140	0.06205	0.07114	0.4953	406.0
R601a	100	4.918	0.04195	0.04485	0.4528	161.8
	110	6.248	0.04637	0.05042	0.4624	202.5
	120	7.731	0.05066	0.05578	0.4710	247.1
	130	9.366	0.05483	0.06094	0.4789	295.6
	140	11.150	0.05886	0.06592	0.4862	347.8
	150	13.090	0.06276	0.07075	0.4932	403.8

联合系统单位热水净发电量随闪蒸温度变化的曲线。随着闪蒸温度的升高，闪蒸-双工质联合发电系统的单位热水净发电量先增大后减小。当单位热水净发电量最大时，此时的闪蒸温度就是联合系统的最佳闪蒸温度，并且随着热水温度的升高，系统的最佳闪蒸温度也不断升高。从图 4 中可以明显看出，当热水温度在 100~150℃时，在闪蒸温度小于系统最佳闪蒸温度时，5 种工质的单位热水净发电量区别并不明显；在闪蒸温度大于系统最佳闪蒸温度时，随着热水温度的升高，5 种工质的单位热水净发电量差距越来越明显。这是由于闪蒸温度较低时，系统发电量主要来自于闪蒸部分，随着闪蒸温

度越来越高，双工质发电部分地位才越来越凸显。从图中可以看出，当联合系统采用最佳闪蒸温度时，R236fa 的单位热水净发电量最大，R600a 次之，R601a 的单位热水净发电量最小。

4.2 热效率随闪蒸温度变化的影响

热水进口温度和流量不变时，由于闪蒸系统的热效率由闪蒸温度确定，所以闪蒸系统在闪蒸温度相同时，采用不同工质的热效率相同。这里只对双工质系统的热效率随闪蒸温度的变化进行研究。热水进口温度选为 150℃，图 5 表示出双工质循环部分的热效率随着闪蒸温度的变化情况。从图 5 中可以看出，5 种工质的热效率都是随着闪蒸温度的提

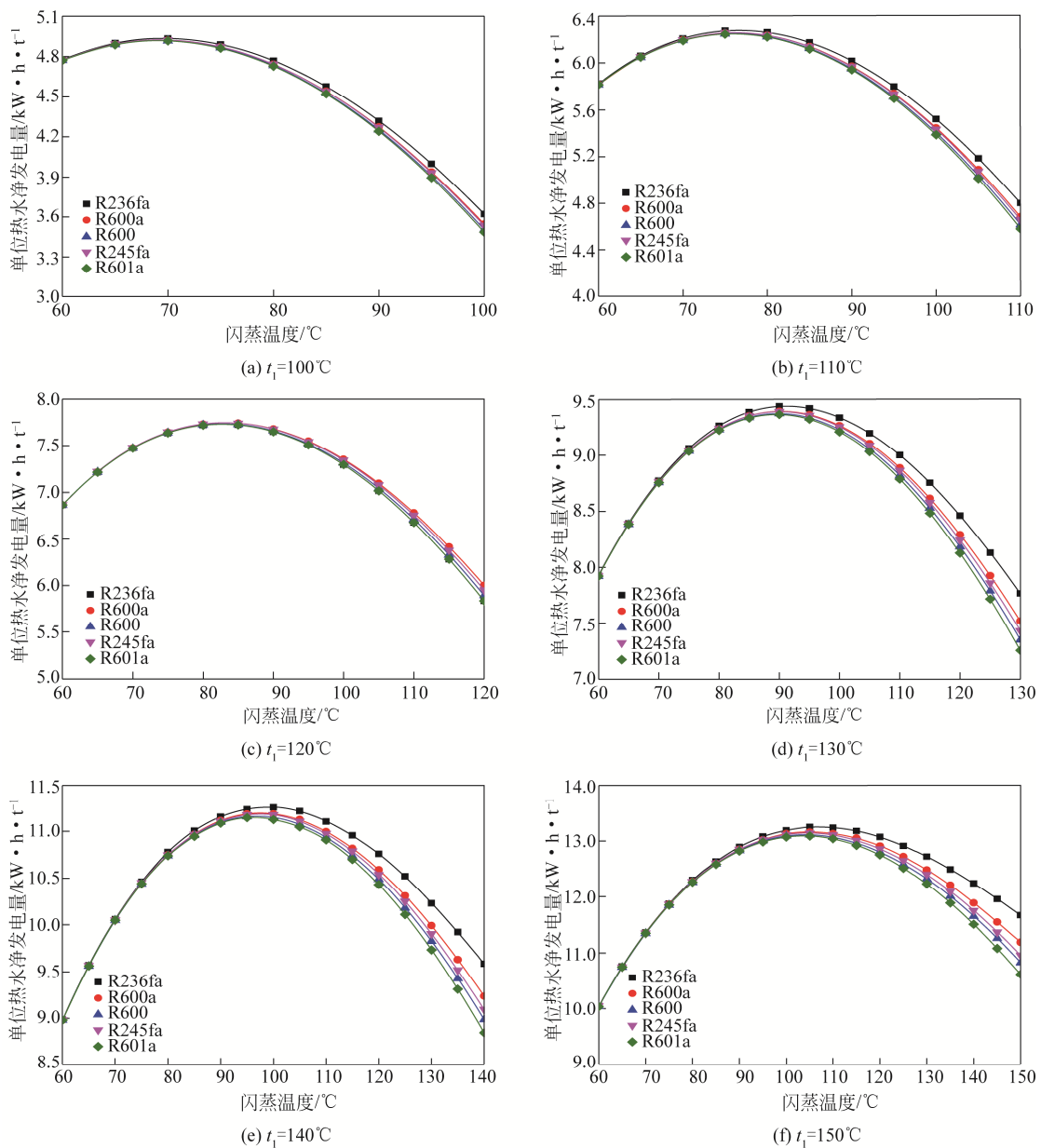


图 4 闪蒸温度对单位热水净发电量的影响

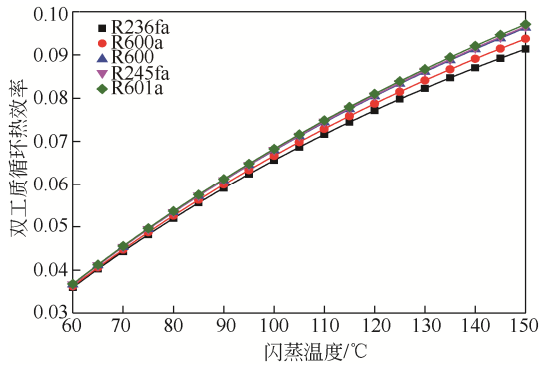


图 5 闪蒸温度对热效率的影响

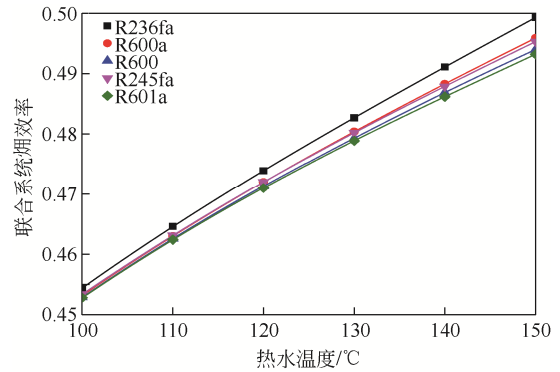


图 7 热水温度对联合系统焓效率的影响

高而升高。其中，R601a 和 R245fa 的热效率最高，并且二者相差不大；R236fa 的热效率最低。

由于闪蒸-双工质联合发电系统不同于单独的闪蒸系统和双工质系统，为了比较联合系统选择不同有机工质时的热效率，以联合系统的最大单位热水净发电量作为评价指标，对于每一种热水进口温度，系统都对应一个最佳的闪蒸温度。图 6 给出了热水温度为 100~150℃时，在与热水温度对应的最佳闪蒸温度下，联合系统各部分热效率的变化趋势。从图 6 可以看出，对于闪蒸系统，R601a 的热效率最高，R600 次之，R236fa 的热效率最低，如热水温度为 150℃时，在最佳闪蒸温度条件下，R601a 的热效率为 6.28%，R236fa 的热效率为 6.0%；对于双工质系统，R245fa 的热效率最高，R601a 次之，R236fa 的热效率最差，如热水温度为 150℃时，在最佳闪蒸温度条件下，R245fa 的热效率为 7.12%，R236fa 的热效率为 6.98%。由此可见，不管是闪蒸系统还是双工质系统，这 5 种工质的热效率相差都不是很大。

4.3 焓效率随热水温度变化的影响

焓效率是基于热力学第二定律得到的性能评价指标，更能够反映出系统能量的利用程度。这里

采用热水温度 100~150℃，计算联合系统在最佳闪蒸温度条件下的焓效率。从图 7 可以看出，不管对于何种工质，联合系统的焓效率均随热水温度的升高而升高。这是因为随着热水温度的升高，输入系统的焓值增高，而闪蒸系统的净输出功率增加比例小于系统焓值增加比例，双工质系统的净输出功率增加比例大于焓值增加比例，联合系统总的净输出功率增加比例大于系统焓值增加比例。这也从侧面说明，热水温度的升高更加有利于双工质系统。对于联合系统而言，R236fa 的焓效率最高，R601a 的焓效率最低。比如在热水温度为 150℃时，R236fa 的焓效率比 R601a 高 0.61%。

4.4 不可逆损失随热水温度的变化

如图 8 所示，对于同一工质，系统在最佳闪蒸温度条件下，不可逆损失都是随着热水温度的升高而升高。这是因为，随着热水温度的升高，输入系统的焓数值越来越大，输出系统的焓数值基本变化不大，而系统减少的焓本身不可能全部用来输出为电能，而是消耗在系统中的不可逆过程造成的焓损上，所以，整体上系统总的不可逆损失越来越大。从图 8 可以看出，R601a 的不可逆损失最小，R245a 次之，R601a 和 R245fa 的不可逆损失相差不大，

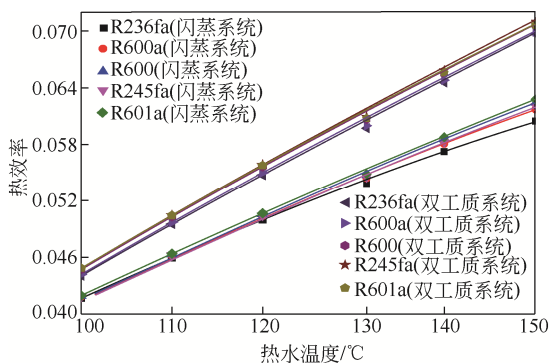


图 6 热水温度对热效率的影响

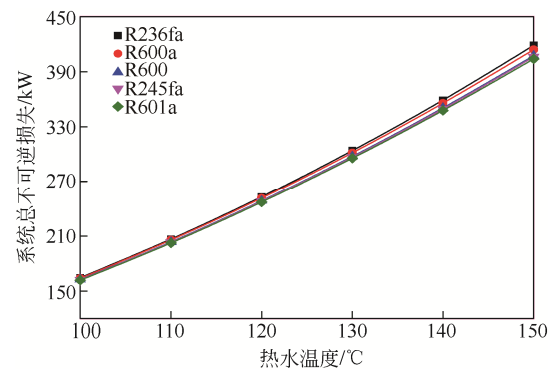


图 8 热水温度对系统不可逆损失的影响

R236fa 的不可逆损失最大, 其中在热水温度为 150℃时, R236fa 比 R601a 的不可逆损失高 3.67%。

5 结论

本文在闪蒸-双工质联合发电系统的基础上, 为了能够选出合适的有机工质, 对经过初步筛选的 5 种有机工质 (R236fa、R600a、R600、R245fa、R601a) 进行对比研究, 探讨了每种工质用于联合系统在单位热水净发电量、热效率、焓效率和不可逆损失方面的性能参数, 得出如下结论。

(1) 联合系统的净发电量随着闪蒸温度的增加呈先增大后减小的趋势, 每种工质都有一个最佳的闪蒸温度使得联合系统的单位热水净发电量达到最大; 随着热水温度的升高, 闪蒸系统焓效率呈缓慢下降趋势, 双工质系统焓效率呈升高趋势, 系统总的焓效率呈上升趋势, 说明热水温度的升高更加有利于双工质系统。

(2) 工质 R236fa 的单位热水净发电量最大, 焓效率最高, 但是热效率无论是在闪蒸系统, 还是在双工质系统, 都是最低的, 不可逆损失也最大, 并且 GWP 值较高 (为 6300), 环保性能不是很好; 工质 R601a 的不可逆损失最小, 但是焓效率最低, 单位热水净发电量也最小; R600a 的单位热水净发电量和焓效率都排在第 2 位, 其热效率在闪蒸系统和双工质系统都较高, 但是其不可逆损失也排在第 2 位; R245fa 的各种性能都处于中间位置, 并且与 R600a 的各方面性能差距不是很大; 综合考虑, R245fa 具有良好的环境友好性与循环性能, 适宜在闪蒸-双工质联合发电系统中使用。

符号说明

e_1 ——进入闪蒸器热水焓值, kJ/kg
 e_7 ——进入回灌井尾水焓值, kJ/kg
 h_1 ——热水质量焓, kJ/kg
 h_2 ——饱和蒸汽质量焓, kJ/kg
 h_3 ——闪蒸循环汽轮机出口蒸汽实际质量焓, kJ/kg
 h_4 ——闪蒸循环冷凝器出口冷凝水质量焓, kJ/kg
 h_5 ——闪蒸器出口饱和水质量焓, kJ/kg
 h_7 ——回灌尾水质量焓, kJ/kg
 h_8 ——双工质循环汽轮机入口热水质量焓, kJ/kg
 h_9 ——双工质循环汽轮机出口有机工质蒸汽实际质量焓, kJ/kg
 h_{11} ——工质泵入口工质质量焓, kJ/kg

h_{12} ——工质泵出口工质质量焓, kJ/kg
 I ——闪蒸-双工质联合发电系统总不可逆损失, kW
 m ——联合发电系统闪蒸产气率, %
 N_e ——闪蒸-双工质联合发电系统每吨热水净发电量, kW·h/t
 N_{e1} ——闪蒸系统每吨热水净发电量, kW·h/t
 N_{e2} ——双工质系统每吨热水净发电量, kW·h/t
 P_8 ——蒸发器蒸发压力, Pa
 P_{11} ——凝汽器冷凝压力, Pa
 q_m ——热水质量流量, t/h
 q_{m1} ——闪蒸器产生的蒸汽质量流量, t/h
 q_{m0} ——有机工质质量流量, t/h
 T_1 ——地热水开尔文温度, K
 T_2 ——闪蒸循环的最佳闪蒸热力学温度, K
 T_5 ——蒸发器入口热源侧开热力学温度, K
 T_8 ——双工质循环最佳蒸发热力学温度, K
 T_{c1} ——闪蒸循环的冷凝热力学温度, K
 T_{c2} ——双工质循环的冷凝热力学温度, K
 t_1 ——地热水温度, °C
 t_2 ——闪蒸循环的最佳闪蒸温度, °C
 t_8 ——双工质循环最佳蒸发温度, °C
 Δt_{pp} ——传热温差, °C
 W_{net} ——闪蒸-双工质联合发电系统发电净功率, kW
 W_{net1} ——闪蒸循环净输出功率, kW
 W_{net2} ——双工质循环净输出功率, kW
 w_p ——工质泵压缩功, kJ/kg;
 V_{11} ——冷凝工质的质量体积, m³/kg
 x ——厂用电率, %
 ε_g ——发电机效率, %
 ε_m ——机械效率, %
 ε_{oi} ——汽轮机相对内效率, %
 ε_p ——工质压缩泵效率, %
 η_{e1} ——闪蒸系统电站焓效率, %
 η_{e2} ——双工质系统电站焓效率, %
 η_{net1} ——闪蒸系统电站净热效率, %
 η_{net2} ——双工质系统电站净热效率, %

参考文献

- [1] 刘超, 徐进良. 中低温地热发电有机朗肯循环工质筛选[J]. 可再生能源, 2014, 32 (8): 1188-1194.
LIU C, XU J L. Working fluid selection for organic Rankine cycle in mid-temperature and low-temperature geothermal power plant[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32 (8): 1188-1194.
- [2] 王辉涛, 王华, 葛众, 等. 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(自然科学版), 2012(1): 41-46.
WANG H T, WANG H, GE Z, et al. 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(1): 41-46.
- [3] 罗兰德·洪恩, 李克文. 世界地热发电新进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 11-17.
ROLAND N H, LI K W. New progress in the world geothermal power generation[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 11-17.
- [4] 武强, 孙海洲, 徐生恒, 等. 基于单井循环浅层地热能开发的数值模拟与分析[J]. 工程勘察, 2015, 43(1): 45-50.
WU Q, SUN H Z, XU S H, et al. Numerical simulation and result analysis on the development of shallow geothermal energy resources based on single well heat circulation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(1): 45-50.
- [5] 朱江, 鹿院卫, 马重芳, 等. 低温地热有机朗肯循环(ORC)工质选择[J]. 可再生能源, 2009, 27(2): 76-79.
ZHU J, LU Y W, MA C F, et al. Working fluid selection for organic Rankine cycle(ORC) in low temperature geothermal power generation system[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(2): 76-79.
- [6] DESAI N B, BANDYOPADHYAY S. Process integration of organic Rankine cycle[J]. Energy, 2009, 34(10): 1674-1686.
- [7] LAKEW A A, BOLLAND O. Working fluids for low-temperature heat source[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(10): 1262-1268.
- [8] 朱启的, 孙志强, 周子民. 工质类型对回收中低温余热有机朗肯循环性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1215-1220.
ZHU Q D, SUN Z Q, ZHOU J M. Effect of working fluid types on performance of organic Rankine cycle for low-and-medium temperature waste heat recovery[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 1215-1220.
- [9] 束杨, 孙淑凤, 孙立佳, 等. 低温热能有机朗肯循环工质选择及性能分析[J]. 低温与超导, 2015(8): 57-63.
SHU Y, SUN S F, SUN L J, et al. Working fluid selection and thermodynamic analysis for low-temperature organic Rankine cycle system[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2015(8): 57-63.
- [10] 韩中合, 叶依林, 刘赞. 不同工质对太阳能有机朗肯循环系统性能的影响[J]. 动力工程学报, 2012, 32(3): 229-234.
HAN Z H, YE Y L, LIU Y. Effect of working fluids on performance of solar organic Rankine cycles[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(3): 229-234.
- [11] SALEH B, KOGLBAUER G, WENDLAND M, et al. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles[J]. Energy, 2007, 36(1): 199-211.
- [12] HUNG T C, SHAI T Y, WANG S K. A review of organic Rankine cycles(ORCs) for the recovery of low-grade waste heat[J]. Energy, 1997, 22(7): 661-667.
- [13] WANG E H, ZHANG H G, FAN B Y, et al. Study of working fluid selection of organic Rankine cycle(ORC) for engine waste heat recovery[J]. Fuel & Energy Abstracts, 2011, 36(5): 3406-3418.
- [14] 韩中合, 杜燕, 王智. 有机朗肯循环低温余热回收系统的工质选择[J]. 化工进展, 2014, 33(9): 2279-2285.
HAN Z H, DU Y, WANG Z. Medium selection of organic Rankine cycle(ORC) in low temperature waste heat[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(9): 2279-2285.
- [15] 刘健, 王辉涛, 张淞源, 等. 工质 R123 和 R245fa 的有机朗肯循环热力性能[J]. 可再生能源, 2016, 34(1): 112-117.
LIU J, WANG H T, ZHANG S Y, et al. Thermal performance comparative study of R123 and R245fa for organic Rankine cycle[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(1): 112-117.
- [16] 李惟毅, 高静, 李子申, 等. 基于经济性和焓效率的有机朗肯循环工质优选[J]. 化工进展, 2016, 35(2): 369-375.
LI W Y, GAO J, LI Z S, et al. Working fluids optimization based on economy analysis and exergy efficiency for low-temperature organic Rankine cycle[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(2): 369-375.
- [17] 韩中合, 潘歌, 范伟, 等. 内回热器对低温有机朗肯循环热力性能的影响及工质选择[J]. 化工进展, 2016, 35(1): 40-47.
HAN Z H, PAN G, FAN W, et al. Effect of internal heat exchanger on thermodynamic performance of low temperature organic Rankine cycle and working fluid selection [J]. Chemical Industry and Engineering progress, 2016, 35(1): 40-47.
- [18] 骆超, 徐琼辉, 姚远, 等. 地热闪蒸-双工质联合发电系统最佳参数选择[J]. 科技导报, 2013, 31(15): 39-43.
LUO C, XU Q H, YAO Y, et al. Optimal parameter selection of geothermal flash-binary power system[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(15): 39-43.
- [19] 王华, 王辉涛. 低温余热发电有机朗肯循环技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 39-42.
WANG H, WANG H T. Low temperature waste heat power generation technology of organic Rankine cycle[M]. Beijing: Science Press, 2010: 39-42.
- [20] 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研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(3): 316-321.
WU Z J, GONG Y L, MA W B, et al. Research on geothermal power generation by flash system combined with binary cycle[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(3): 316-321.
- [21] 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 Z J. New energy and renewable energy utilization [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007: 237-251.