

余热资源的能级及其与ORC工质的匹配

刘伟, 包子佳, 谢攀, 刘志春 and 袁芳

Citation: [科学通报](#) **61**, 1889 (2016); doi: 10.1360/N972015-00455

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972015-00455>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/CSB/61/17>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[毛细力驱动海水淡化](#)

中国科学: 技术科学 **45**, 654 (2015);

[满足匹配律的策略参数搜索决策模型](#)

中国科学: 信息科学 **42**, 83 (2012);

[水资源系统整体模型研究](#)

中国科学E辑: 技术科学 **34**, 60 (2004);

[黄河下游水资源转化结构及其变化规律](#)

中国科学E辑: 技术科学 **34**, 103 (2004);

[中高温热泵工质的研究方法及性能分析](#)

中国科学E辑: 技术科学 **39**, 603 (2009);

第十九届国际植物学大会
XIX International
Botanical Congress

IBC

2017

2017年7月23-29日
中国·深圳·深圳会展中心

主办单位: 中国植物学会 深圳市人民政府
大会官网: www.ibc2017.cn



电话: +86-755-8307 3532 传真: +86-755-8307 3880 E-mail: office@ibc2017.cn

余热资源的能级及其与 ORC 工质的匹配

刘伟^{①*}, 包子佳^②, 谢攀^①, 刘志春^{①*}, 袁芳^①

① 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074;

② 桂林航天工业学院, 桂林 541004

* 联系人, E-mail: w_liu@hust.edu.cn; zcliu@hust.edu.cn

2015-04-27 收稿, 2015-06-01 修回, 2015-06-01 接受, 2015-08-01 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2013CB228302)资助

摘要 鉴于温度作为余热资源品位评价具有一定的局限性, 提出了基于热力学函数 e 的余热能级评价指标——可用能势 e 和可用势能级 ω , 对具有显热、潜热和压力属性的余热资源(如烟气的、水蒸气)进行定量评价. 同时, e 也是系统工质做功能力的体现, 以此作为定量指标, 有利于实现余热资源与系统工质的匹配, 为工业余热有效利用提供指导. 基于 e 分析了 ORC 系统中热源与工质的匹配特性及有机工质在蒸发器内做功能力提升途径. 结果表明: 可用能势准则可定量反映余热资源所含的显热、潜热及压力势能水平, 能够对余热资源的能源品位和利用潜力进行综合评价; 与夹点温差法相比, 可用势分析法更能反映资源与工质的匹配特性, 可作为选择 ORC 工质的一种参考.

关键词 余热资源, 可用能势, 能级, 工质匹配

“温度对口、梯级利用”的用能原则由吴仲华^[1]于 1988 年提出, 该用能原则从系统角度综合考虑不同形式及品位能源资源的合理安排以及用能设备的优化匹配等, 达到提高能源利用效率的目的. 能源的品位通常指单位能量所具有的可用能比例, 以温度作为指标对能源品位进行评价能体现余热资源中显热的直接利用, 但不能全面反映余热资源的其他属性.

焓平衡法是一种评判能源品位高低和用能系统热力性能的典型方法. Rant^[2]于 1956 提出了焓的概念, 焓分析方法以焓概念为基础, 计算系统的焓损失和焓效率, 以系统局部或总体是否达到焓平衡作为热力系统或设备性能的评判指标^[3,4]. 与热平衡相比, 焓平衡从“量”和“质”两方面综合考虑能源品位, 更为科学合理, 如美国地质委员会以地热资源的含焓量作为其品位的评价指标^[5].

夹点分析法是另一种用能系统性能的分析方法. 夹点的概念由 Linnhoff 等人^[6,7]和 Umeda 等人^[8,9]分别

提出, 它以热力学为基础, 分析系统中能量流随温度的分布, 绘制温焓图($T-H$ 图), 找到冷热负荷温焓曲线中传热温差最小距离, 即夹点, 从而对生产用能过程的系统优化设计和节能改造进行指导^[10-12]. 该方法以能源资源的温度水平和显热利用作为主要考虑因素, 余热资源的利用深度不够.

为了对能源品位高低和能源转换系统效率进行量化评价, Rant^[13]于 1961 年提出了能级概念, 即能量中焓差所占的比例. 具体表达式为

$$\Omega = \frac{\Delta E_x}{E} = \frac{\Delta E_x}{\Delta H} \quad (1)$$

其中, ΔE_x 为热功转换系统中用能单元进出口工质的焓差(kJ); E 为工质在系统中获得的总热量, 可表征为流经系统工质的进出口焓差 ΔH (kJ). 利用 Ω 指标, 可以评价余热资源与余热利用设备间的焓损失.

在综合焓分析方法和夹点分析法优点的基础上, 把 $T-H$ 图拓展到 $\Omega-H$ 图, 通过计算工质在某一热功转

引用格式: 刘伟, 包子佳, 谢攀, 等. 余热资源的能级及其与 ORC 工质的匹配. 科学通报, 2016, 61: 1889–1896

Liu W, Bao Y J, Xie P, et al. Energy level of residual heat resources and its matching property with ORC working medium (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1889–1896, doi: 10.1360/N972015-00455

换系统中各用能单元的进出口焓差与获得总热量的比值,可评价系统中能量利用的合理性^[14].与单纯考虑系统温度分布的夹点分析法相比,此方法指出了系统中焓的利用情况和能级匹配情况,反映了能源利用的合理程度. Feng等人^[15], Anantharaman等人^[16]和Kanoglu等人^[17]将能级计算与夹点分析法相结合,分别对合成氨变换工序、甲醇工艺流程和火力发电站朗肯循环展开能级匹配分析,确定系统节能改进方向,优化热力系统运行特性.

江亿等人^[18]定义了能质系数,为不同能源对外所能做的功与其总能量的比值,表达式为

$$\lambda = \frac{W}{Q}, \quad (2)$$

其中, W 为总能量中可以转化为功的部分(kJ), Q 为该种能源的总能量(kJ).

以(2)式为基础,江亿分别给出燃料(天然气、煤)、二次能源(热水、蒸汽、冷冻水)和耗热量、耗冷量等不同形式能源的能质系数计算公式,确定了可定量评价某建筑或园区能源转化利用的评价指标 ECC ^[18]. ECC 越大,则该建筑的冷热源选择越优,表达式为

$$ECC = \frac{Q_C \times \lambda_c + Q_H \times \lambda_H + E \times \lambda_e}{\sum_i (W_{HVAC_i} \times \lambda_i)}, \quad (3)$$

其中, Q_C , Q_H 和 E 分别为建筑的全年耗冷量、耗热量和热电联产机组输出电量, λ_c , λ_H 和 λ_e 分别为对应的能质系数, W_{HVAC_i} 为冷、热源所需消耗的第 i 种能源总量, λ_i 为第 i 种能源的能质系数.

杨东华^[19]采用能级平衡法来计算能级平衡系数,即能级差 $\Delta\Omega$ 与输入系统能量的能级间的比值,具体表达如下:

$$\Omega_{im} = (\dot{E}_{res}^+ - \dot{E}_{res}^-) / [(\dot{Q}_{res}^+ - \dot{Q}_{res}^-) + \dot{Q}_{en}^+], \quad (4)$$

$$\Omega_u = (\dot{E}_u^- - \dot{E}_u^+) / (\dot{Q}_u^- - \dot{Q}_u^+), \quad (5)$$

$$\Delta\Omega = \Omega_{im} - \Omega_u, \quad (6)$$

$$\xi_Q = \frac{\Omega_{im} - \Omega_u}{\Omega_{im}}, \quad (7)$$

其中, Ω_{im} 为设备输入能量的能级, Ω_u 为用户能量的能级, \dot{E}_{res}^+ , \dot{Q}_{res}^+ 分别为能源供给设备的输入焓率和输入能率, \dot{E}_{res}^- , \dot{Q}_{res}^- 分别为设备给回能源的输出焓率和输出能率, \dot{E}_u^+ , \dot{Q}_u^+ 分别为用户给回设备的输入焓率和输入能率, \dot{E}_u^- , \dot{Q}_u^- 分别为设备供给用户的输

出焓率和输出能率, \dot{Q}_{en}^+ 为环境供给设备的输入能率. 该方法通过比较“纯热利用”、“纯动力利用”以及“热和动力综合利用”三种情况下能级差的相对大小,直接评判资源与热功转换系统之间的匹配关系是否合理,但没有充分考虑能源转换环节的转换效率. Jing等人^[20]提出了能量利用图形(energy utilization diagram, EUD)方法,对几类动力循环系统进行了焓损分析.

在电力、炼钢、化工、冶金、建材等生产或工艺过程中,需要对不同热力属性的余热资源进行回收设备匹配和方案优化,以提高能源利用水平和余热回收系统效率. 本文通过定义“可用能势”和“可用能级”两个定量指标,计算几种典型余热资源的能势和能级水平,综合评价余热资源的品位,探讨工业余热资源利用的定量化评价准则,为建立基于能势或能级的用能原则奠定基础.

1 基于可用能势的余热资源能级

1.1 可用能势的定义

工业余热资源具有两类属性:一是温度和压力属性;二是显热和潜热属性. 传统的余热资源品位评价多以温度作为评价指标,具有一定的局限性. Liu等人^[21]定义了一个热力学参数:可用势,具体表达式为

$$e = h - T_0s = u - T_0s + pv, \quad (8)$$

其中, h 表示工质总能势,即焓(kJ/kg); T_0s 为不可能做功的工质势(kJ/kg); pv 为功势(kJ/kg). 在环境温度 T_0 一定时,可用势是一个状态量,可表达为用于热功转换的能势($u - T_0s$)与纯功势 pv 之和,表征工质在某一状态下的可逆做功能力. 同时, e 也可称为可用能势,直接用来评价余热资源的品位.

任意两个状态点间的可用势差可表示为

$$\Delta e = e_1 - e_2 = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) = \Delta h - T_0\Delta s. \quad (9)$$

由(9)式可知, Δe 是热力系统中两个不同状态点的工质可用势之差,表征工质由状态1变化至状态2过程中所能做出的可逆功. 当状态1为任意,状态2为环境时,(9)式成为

$$e_x = e - e_0 = (h - h_0) - T_0(s - s_0), \quad (10)$$

式中, e_x 为工质的焓焓,是一个过程量,其物理意义为系统工质从任意状态可逆地变化到与环境相平衡

的状态时所作出的最大有用功^[22]. h_0 和 s_0 分别为在环境温度 T_0 和环境压力 p_0 下的焓和熵. 由此可见, e_x 为工质所做可逆功的最大值. (8)~(10)式表征了可用势与可用能(焓)的区别.

1.2 余热资源的品位评价

为了合理评价余热资源的品位, 本文提出可用势能级指标 ω , 其定义为余热资源的可用能势 e 和焓 h 的比值, 反映单位质量余热资源总能势中可用能势所占份额, 具体表达式为

$$\omega = \frac{e}{h}, \quad (11)$$

尽管(11)式与环境温度 T_0 有关, 但它不以环境作为计算基准点, 即在环境状态下, 余热资源是可能具有利用价值的. 为了统一所涉及工质焓和熵的基准态, 可选择0℃及以上, 环境温度以下的某一点作为计算基准. 由于可用能势 e 体现了余热资源的温度、压力属性以及显热、潜热属性, 因此, 可用势能级 ω 是一个普适准则, 可反映余热资源的能势水平和热力系统余能的可利用度.

2 余热资源能级评价

2.1 水蒸气能级品位

水蒸气是工业生产中常见的加热媒介或伴生气体, 也是典型的工业余热资源. 根据温度、压力的高低, 水蒸气可用于推动汽轮机做功、加热产品或物料、用作厂区供暖、供热水等. 然而, 单纯采用温度或压力不能直接衡量水蒸气能源品位, 例如, 处于两相区的湿饱和蒸汽的温度和压力为定值, 而随着蒸汽干度的变化, 其焓和熵均会发生变化, 可用能势 e 也随之变化.

本文设定水蒸气温度变化范围为150~500℃(间隔为50℃), 压力变化范围为0.4~2 MPa (间隔为0.4 MPa), 计算水蒸气的焓、可用能势与可用势能级(以0℃为计算基准), 计算结果如图1所示. 图1(a)可见, 等压线上各点的焓、可用能势随着温度升高而增大, 等温线上各点的可用能势随着压力提高而增加. 可见, 利用水蒸气的 $e-h$ 图, 可综合反映水蒸气的显热、潜热和压力水平, 定量评价水蒸气的能源品位. 图1(b)~(c)分别为水蒸气的 $\omega-h$ 和 $\omega-t$ 图, 图中可见,

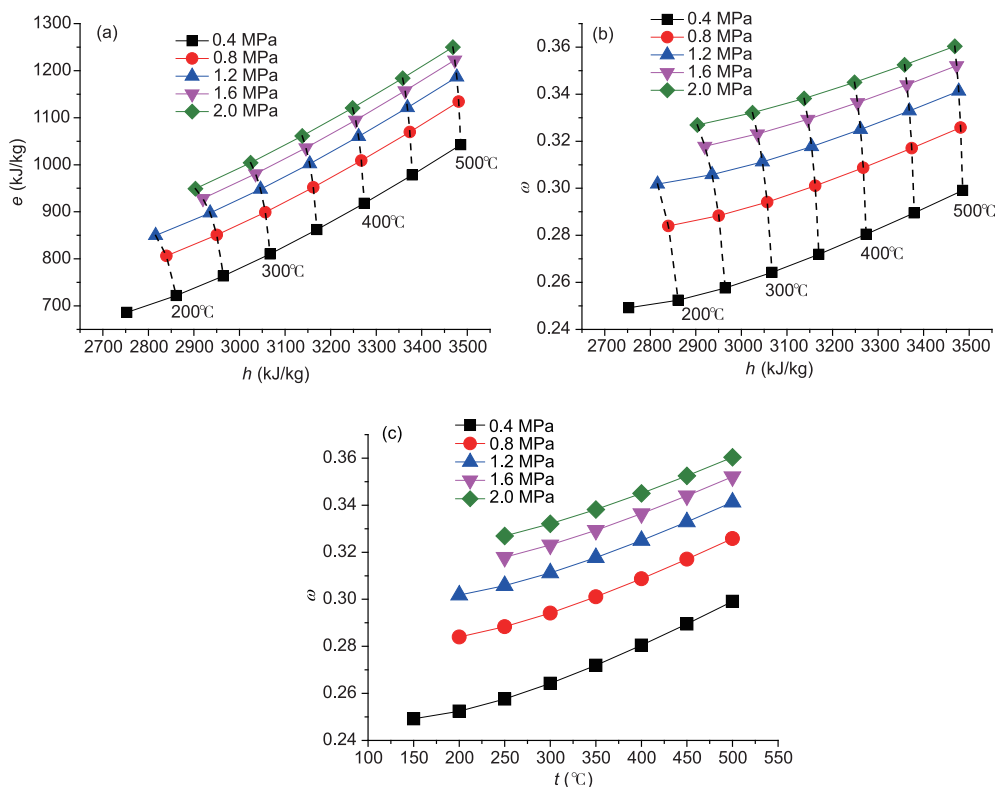


图1 (网络版彩色)水蒸气的能级品味图(150~500℃). (a) 水蒸气的 $e-h$ 图; (b) 水蒸气的 $\omega-h$ 图; (c) 水蒸气的 $\omega-t$ 图
 Figure 1 (Color online) Energy level grade of water vapor (150~500℃). (a) $e-h$ of water vapor; (b) $\omega-h$ of water vapor; (c) $\omega-t$ of water vapor

可用势能级 ω 随温度、压力的变化规律呈现出与可用能势变化相同的趋势. 由水蒸气的 $e-h$ 图, 可以定量评估某种余热资源释放单位质量能量所具有的做功能力. 尽管有些余热资源本身不直接做功, 但某种工质一经获得余热能量后, 就具备了可能做功的能力. 此外, 水蒸气的 $e-t$ 图则反映在同等温度水平下余热资源品位的高低, 可见仅依据温度尚不能全面反映余热资源的能量品位.

2.2 工业烟气能级品位

工业炉的排烟温度往往较高, 烟气中携带了大量余热, 为了提高工业炉的热效率, 需要采用节能技术回收烟气的余热. 按照“温度对口, 梯级利用”的用能原则, 对于高温烟气和中低温烟气应采用不同的装置回收余热. 如前者可利用蒸气动力循环系统, 后者可采用有机朗肯循环系统或直接用热交换器回收余热. 然而, 对于天然气、焦炉煤气等含氢量较高的燃气, 其燃烧产物中含有较多水蒸气, 在冷凝过程中

将释放大相变潜热, 具有广阔的余热回收前景. 对于这类烟气, 不仅可回收显热, 也可回收潜热.

本文选取部分典型工业烟气(烟气组分见表1), 在标准大气压下, 分别计算在100~500℃(间隔为50℃)和30~100℃(间隔为10℃)两个温度区间内烟气的可用能势与可用势能级(以0℃为计算基准), 对不同烟气的能源品位进行定量评价.

当温度为100~500℃时, 烟气中所含水蒸气处于过热状态. 图2(a)可见, 在同一温度下, 组分不同的各种烟气的焓值和可用能势不同, 其中水蒸气含量

表1 典型工业烟气组成成分

烟气种类	NO ₂	CO ₂	O ₂	H ₂ O
玻璃窑炉烟气	74.2%	13.8%	4.8%	7.2%
高炉煤气烟气	85.2%	9.8%	1.7%	3.3%
转炉煤气烟气	75.9%	20.3%	1.7%	2.1%
天然气烟气	72.2%	8.1%	3.3%	16.4%
焦炉煤气烟气	69.9%	6.5%	3.1%	20.5%

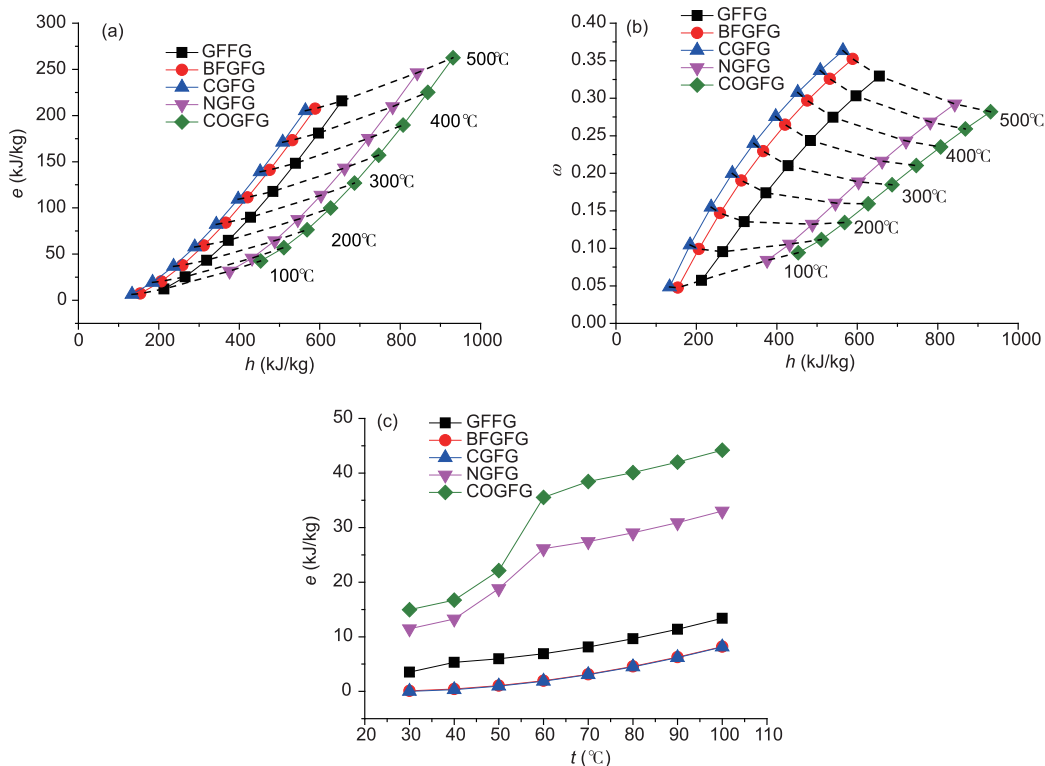


图2 (网络版彩色)工业烟气的能级品位图(30~100℃). (a) 工业烟气的 $e-h$ 图; (b) 工业烟气的 $\omega-h$ 图; (c) 工业烟气的 $e-t$ 图. GFFG: 玻璃窑炉烟气; BFGFG: 高炉煤气烟气; CGFG: 转炉煤气烟气; NGFG: 天然气烟气; COGFG: 焦炉煤气烟气

Figure 2 (Color online) Energy level grade of industry flue gases (30–100°C). (a) $e-h$ of industry flue gases; (b) $\omega-h$ of industry flue gases; (c) $e-t$ of industry flue gases. GFFG: the glass furnace flue gas; BFGFG: the blast furnace gas flue gas; CGFG: the converter gas flue gas; NGFG: the flue gas of natural gas; COGFG: the coke oven gas flue gas

的影响最大. 在可用能势相等时, 烟气中水蒸气含量越大, 即汽化潜热量越大, 则焓值越大; 在焓值相等时, 烟气的温度越高, 即显热越大, 则可用能势越大. 因此, 相同压力下, 工业烟气的 $e-h$ 图可以体现不同种类烟气资源显热和潜热品位的高低, 图2中, 横向为烟气潜热增大的方向, 纵向为烟气显热增大的方向. 可见, 利用 $e-h$ 图可指导烟气潜热和显热的回收.

当温度为100~500℃时, 工业烟气的可用能级随焓值的变化如图2(b)所示. 随着温度增加, 同种烟气的焓值与能级呈递增趋势. 对于不同组分的烟气, 在相同温度下, 烟气中水蒸气含量越高, 则焓值越大, 其可用能级反而越小. 这是由于水蒸气的熵随温度升高的增幅大于其他气体组分熵的增幅, 因此, 含水蒸气较多的烟气焓值虽随着温度的升高而增加, 但可用能势所占比例反而比水蒸气含量少的烟气小.

本文考察表1中工业烟气(1 atm下玻璃窑炉、高炉煤气、转炉煤气、天然气、焦炉煤气烟气的露点温度分别为39.71, 25.84, 18.43, 56.04, 60.81℃)在30~100℃温度区间内的可用能势随温度的变化规律, 结果如图2(c)所示. 由图可见, 在相同温度下, 烟气中水蒸气含量越高, 则可用能势越大, 其能量品位也就越高. 其中, 水蒸气含量较少的转炉煤气烟气、高炉煤气烟气和玻璃炉窑烟气的可用能势随温度变化相对平缓, 而水蒸气含量较高的天然气烟气和焦炉煤气烟气在温度降低至水蒸气露点温度时, 可用能势的下降幅度急剧变化, 可用能势差 Δe 较大, 说明这类烟气具有较大的潜热回收价值.

3 基于可用势的余热资源与系统工质匹配

3.1 有机朗肯循环

有机朗肯循环(ORC)是一种利用有机工质回收

中低温余热的热力循环装置, 近年来受到学术界和工业界的广泛关注^[23~25]. 为了研究余热资源与热力系统工质的匹配, 考察一个典型的ORC系统, 如图3(a)所示. 图中, ORC由蒸发器、冷凝器、工质泵和膨胀机等构成, 作为热源余热资源可以为水蒸气、热水或烟气的任一种. 在图3(b)所示的循环中, 1~2为膨胀过程, 2~3为冷凝-放热过程, 3~4为加压过程, 4~1为蒸发-吸热过程. 通常, 可用夹点温差(PPTD)来评价某种热源与系统工质的匹配是否优良. 夹点温差越小, 两者匹配越好. 显然, 夹点温差(PPTD, e)取决于工质的蒸发温度, 蒸发温度越高, 夹点温差越小, 热源与工质匹配越好.

3.2 热源与工质的匹配

为了分析ORC系统余热资源与工质的匹配特性, 分别选取水蒸气或热水作为系统热源, 以Butane (丁烷)、R600a等作为ORC的计算工质. 计算参数为: 水蒸气温度为100℃; 水蒸气压力为1 atm; 热水温度为90℃; 蒸发器进口的工质温度为30℃; 蒸发器出口的工质温度为85℃; 工质蒸发温度为80℃. 图4显示了8种不同的工质在ORC蒸发器中可用势的变化情况, 图中右侧的纵坐标为水蒸气的可用势. 由图可见, 在蒸发器中吸收相同的热量, Butane可用势的提升幅度最大, R600a次之, 而8种工质中R227ea可用势的提升幅度最小. 此外, 由于工质压力较高的原因, 在不同的焓差下, 热水的可用势可能会小于工质的可用势(见图中虚线).

图5显示了在蒸发器中液体过冷、蒸发相变和蒸气过热段可用势的提升趋势. 显然, 蒸发器出口单位质量工质的可用势越高, 在膨胀机中工质的做功能力就越强. 图中可见, 蒸发器蒸发段中可用势的提升

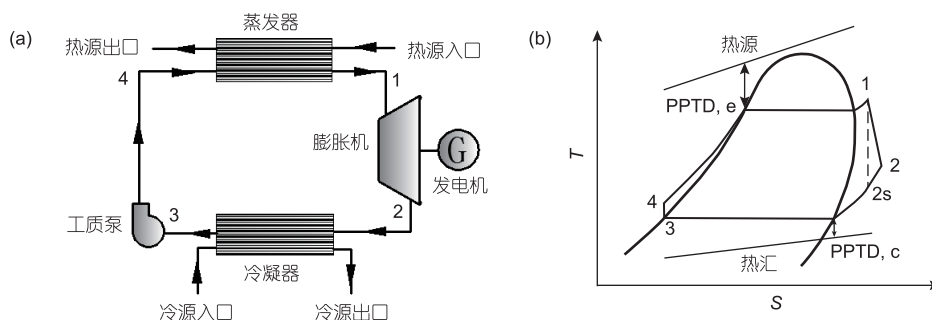


图3 有机朗肯循环(ORC)系统与循环示意图. (a) 系统图; (b) 循环图. PPTD, e, 蒸发器内的夹点温差; PPTD, c, 冷凝器内的夹点温差
 Figure 3 Schematic diagram of basic system of Organic Rankine Cycle. (a) System diagram; (b) basic cycle. PPTD, e, pinch temperature difference in the evaporator; PPTD, c, pinch temperature difference in the condenser

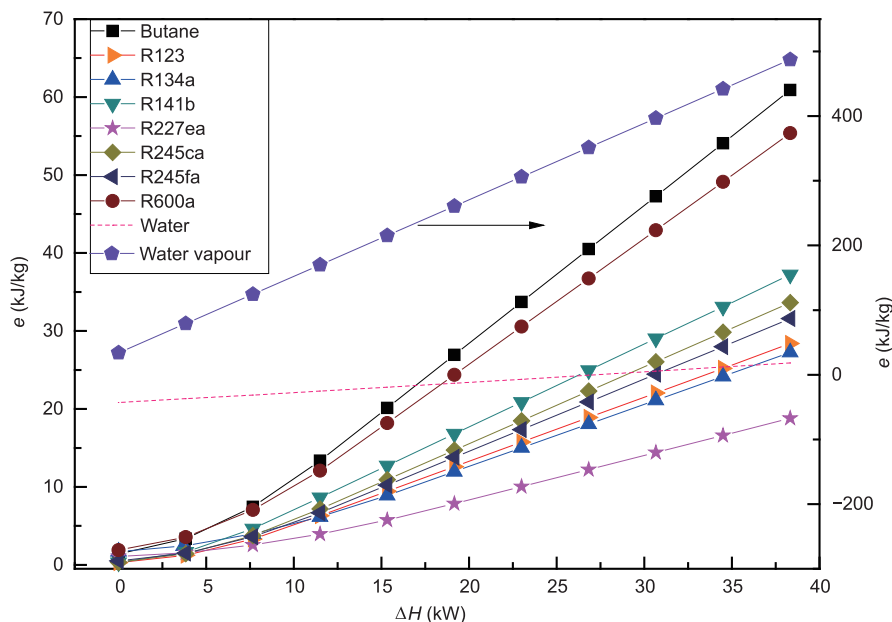


图4 (网络版彩色)不同工质在ORC蒸发器中与热源的匹配示意图

Figure 4 (Color online) The matching property of heat source and different organic fluids in the evaporator

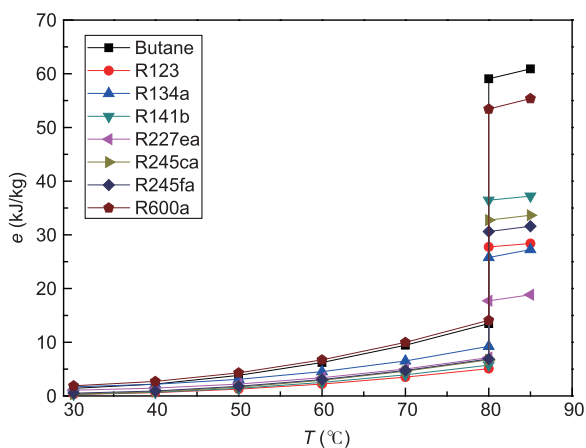


图5 (网络版彩色)不同工质在ORC蒸发器中可用势的提升示意图

Figure 5 (Color online) The increase of available potential of different organic fluid in the evaporator

幅度最大,即工质的汽化潜热在提高工质势中起重要作用.若以可用势的提升程度来考察余热资源和系统工质间的匹配,Butane和R600a是较好的选择,而制冷设备中常用的R134a不太适合用于ORC系统.

可见,与夹点温差法相比,可用势分析法更能定量反映工质与资源的匹配特性,同时能够直观体现工质提质(蒸发器内吸热)过程做功能力变化特性,可作为选择ORC工质的一种参考.而夹点温差分析方法始终是基于温度的一种分析方法,只能通过计算夹点温差大小来反映资源与工质的换热特性,同时不能对工质做功能力进行评价.

4 结论

本文定义了可用势函数,提出了可用能势 e 和可用能势级 ω ,并以水蒸气、工业烟气等余热资源为例,探讨了以 e 和 ω 作为评价余热资源能源品位的量化标准,同时,利用可用势的概念,分析了不同的余热资源与系统工质的匹配特性.结果表明:通过建立可用能势准则,可定量反映余热资源所含的显热、潜热及压力水平,对余热资源的能源品位和利用潜力进行综合评价;通过可用势分析法,可为选择ORC工质提供参考.

参考文献

- 1 Wu Z H. The cascade utilization of energy and total energy system of gas turbine (in Chinese). Beijing: China Machine Press, 1988 [吴仲华. 能的梯级利用与燃气轮机总能系统. 北京: 机械工业出版社, 1988]
- 2 Rant Z. Exergie, ein neues Wort für technische Arbeitsfähigkeit. Forsch Ingenieurwes, 1956, 22: 36-37

- 3 Wang H Y, Zhao L L, Zhou Q T, et al. Exergy analysis on the irreversibility of rotary air preheater in thermal power plant. *Energy*, 2008, 33: 647–656
- 4 Chen Q, Han W, Zheng J, et al. The exergy and energy level analysis of a combined cooling, heating and power system driven by a small scale gas turbine at off design condition. *Appl Therm Eng*, 2014, 66: 590–602
- 5 The economic implications of the exergy and thermal efficiencies. ISECC, 9000, 1981
- 6 Linnhoff B, Flower J R. Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks. *AIChE J*, 1978, 24: 633–642
- 7 Linnhoff B. Pinch analysis—A state-of-the-art overview: Techno-economic analysis. *Chem Eng Res Des*, 1993, 71: 503–522
- 8 Umeda T, Itoh J, Shiroko K. Heat-exchange system synthesis. *Chem Eng Prog*, 1978, 74: 70–76
- 9 Umeda T, Niida K, Shiroko K. A thermodynamic approach to heat integration in distillation systems. *AIChE J*, 1979, 25: 423–429
- 10 Kemp I C. *Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2011
- 11 Aspelund A, Berstad D O, Gundersen T. An extended pinch analysis and design procedure utilizing pressure based exergy for subambient cooling. *Appl Therm Eng*, 2007, 27: 2633–2649
- 12 Yoon S G, Lee J, Park S. Heat integration analysis for an industrial ethylbenzene plant using pinch analysis. *Appl Therm Eng*, 2007, 27: 886–893
- 13 Rant Z. Towards the estimation of specific exergy of fuels. *Allg Wärmetech*, 1961, 10: 172–176
- 14 Xia X M. Study on energy saving technology of aromatics disproportionation system based on energy level analysis method and fields synergy principle (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2010 [夏翔鸣. 基于能级分析和场协同原理的歧化系统节能技术研究. 博士学位论文. 上海: 华东理工大学, 2010]
- 15 Feng X, Zhu X X. Combining pinch and exergy analysis for process modifications. *Appl Therm Eng*, 1997, 17: 249–261
- 16 Anantharaman R, Abbas O S, Gundersen T. Energy level composite curves—A new graphical methodology for the integration of energy intensive processes. *Appl Therm Eng*, 2006, 26: 1378–1384
- 17 Kanoglu M, Dincer I, Rosen M A. Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants. *Energy Policy*, 2007, 35: 3967–3978
- 18 Jiang Y, Liu X H, Xue Z F, et al. Study on assessment critical of energy conversion system (in Chinese). *China Energy News*, 2004, 26: 27–31 [江亿, 刘晓华, 薛志峰, 等. 能源转换系统评价指标的研究. 中国能源, 2004, 26: 27–31]
- 19 Yang D H. *Analysis of Exergy and Energy Level* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1986 [杨东华. 焓分析和能级分析. 北京: 科学出版社, 1986]
- 20 Jing H G, Lshid M. Graphical exergy analysis of complex cycles. *Energy*, 1993, 18: 615–625
- 21 Liu W, Jia H, Liu Z C, et al. The approach of minimum heat consumption and its applications in convective heat transfer optimization. *Int J Heat Mass Trans*, 2013, 57: 389–396
- 22 Cengel Y A, Boles M A, Kanoglu M. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. New York: McGraw-Hill, 2011
- 23 Tchanche B F, Lambrinos G, Frangoudakis A, et al. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—A review of various applications. *Renew Sust Energy Rev*, 2011, 15: 3963–3979
- 24 Hung T C, Shai T Y, Wang S K. A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 1997, 22: 661–667
- 25 Long R, Bao Y J, Huang X M, et al. Exergy analysis and working fluid selection of organic Rankine cycle for low grade waste heat recovery. *Energy*, 2014, 73: 475–483

Energy level of residual heat resources and its matching property with ORC working medium

LIU Wei¹, BAO YuJia², XIE Pan¹, LIU ZhiChun¹ & YUAN Fang¹

¹ School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

² Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China

Reducing energy consumption and improving energy utilization efficiency are the inevitable measures to solve the energy problems in China. It is of great significance to achieve the strategic objectives of energy reduction that industrial sector, as a major energy-consuming areas, improves its energy efficiency and waste heat recycling level, follows the principle of matching temperature requirement and cascaded utilization, evaluates reasonably and makes full use of the waste heat, especially the one in low temperature. Considering certain limitations of using temperature as the grade evaluation of residual heat resources, available potential e and available potential energy level ω were proposed to quantitatively appraise the residual heat resources (such as flue gas, water vapor) which with sensible heat, latent heat and pressure properties. This paper details physical significance of available potential and available potential energy level and derivation process of their formulas, and calculates the available potential and the available potential energy level of water vapor and industrial flue gas in different temperature and pressure conditions to quantitative analysis the energy level grade of these two kinds of waste heat resources. Meaning while, due to e can represent the working capacity of working medium in a system, taking it as a quantitative evaluation index, is a tentative way to match the residual heat resources and the working medium of the system, and can provide guidance for efficient utilization of residual heat resources. On the basis of e , this paper analyses the matching properties between heat source and working medium of the ORC (Organic Rankine Cycle) system and puts forward some approaches for the increase of working performance in the evaporator of the ORC system. The results show that the enthalpy and available potential of water vapor increase with the rising of temperature when pressure is constant and the available potential on the point of the isotherm increase with the increasing of pressure, and the change regularity of available potential level along with the change of temperature and pressure has the same trend with available potential; Besides, the composition of industrial flue gas has a great influence on its enthalpy and available potential, especially the content of water vapor. The available potential level of specified flue gas decreases with the increasing of temperature when pressure is constant, and the available potential level of different kinds of industrial flue gas those who have the same temperature decreases with the increasing of the content of water vapor, in other words, the higher content of water vapor of industrial flue gas lead to the lower proportion of available potential of enthalpy. In general, the available potential criteria could quantitative reflect the sensible heat, latent heat and pressure potential of residual heat resources and comprehensive evaluate the energy level and utilization potential of residual heat resources; comparing with the pinch analysis method, the available potential analysis method was more intuitive to assess the matching properties between resource and working medium of the ORC system, which could be an alternative reference for choosing working medium of an ORC system.

residual heat resources, available potential, energy level, matching property of working medium

doi: 10.1360/N972015-00455