科学通报 2019 年 第 64 卷 第 2 期: 206 ~ 214
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

基于非共沸工质的热力循环三维构建方法初探

许伟聪, 赵力*, 邓帅, 李双俊

天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 300072
* 联系人, E-mail: jons@tju.edu.cn

2018-04-01 收稿, 2018-06-12 修回, 2018-06-29 接受, 2018-12-28 网络版发表
国家自然科学基金(51476110)资助

摘要 热力循环是实现能量转换的重要路径之一, 因此提高热力循环的效率仍是现阶段促进能源高效利用的重要举措, 同时也是解决能源危机的必经之路. 针对目前亚临界热力循环效率较低的现状, 本文首先以循环工质为出发点, 利用非共沸工质相变过程中组分迁移的特点, 通过增加非共沸工质的混合与分离过程, 突破单一循环工质对热力循环性能的限制, 在传统温-熵分析的基础上增加非共沸工质组分的维度, 提出亚临界热力循环三维构建方法. 其次, 将三维热力循环与传统二维热力循环进行对比, 明确热力循环三维构建的优势. 最后, 针对内燃机余热利用, 提出组分可调型有机朗肯循环, 阐述了三维构建方法的应用和功能, 对三维空间内热力循环相对于传统二维构建方法的优势给出了初步探索结果.

关键词 热力循环, 三维构建方法, 有机朗肯循环, 非共沸工质, 组分可调

面对环境和能源协同发展的艰巨挑战, 全球能源结构的调整主要体现在: 一方面需要提高现有能源技术的利用效率, 另一方面更要重视加快开发可再生能源利用技术. 到2035年, 在全球发电中的占比将增加至16%[1]. 中国在《能源发展"十三五"规划》中明确指出, 到2020年, 实现非化石能源占总能源消耗的15%[2]. 热力循环是实现太阳能、地热能、工业余热能等低品位能源高效利用的基础, 其中以朗肯循环(含有机朗肯循环)、蒸气压缩制冷循环或热泵循环为代表的亚临界热力循环的应用最为广泛.

工质作为能量转换的载体, 是亚临界热力循环的"血液", 工质的热物理性质是工质选择、热力系统设计和控制策略制定的重要基础, 直接决定着热力循环的安全性、稳定性、经济性和高效性[3]. 目前, 亚临界循环中绝大多数采用纯工质, 而以有机朗肯循环为例, 通过统计现有实验数据发现实际热力循环系统的热力学完善度普遍低于50%[4], 存在巨大的优化空间. 除了对热力学性能的要求, 新型能源系统同样注重工质的安全性及环保性[5,6], 在现有的纯工质中, 极难寻找一种能同时兼顾热力学性能、环保性和安全性的工质[7~9], 而新型工质的设计与研发又存在设计模型的准确性低[10], 商业开发的经济性差等瓶颈问题[11]. 相比之下, 利用既有纯工质简单混合而成的非共沸工质更容易满足热力系统对循环工质热物性、环保性和安全性的要求, 因此非共沸工质将是未来亚临界热力循环的主要载体之一.

非共沸工质是指由两种或两种以上沸点不同的纯工质组成的混合物[12], 在气液相平衡时, 气相和液相具有不同的组分配比, 因此非共沸工质具有温度滑移和组分迁移的典型特性, 如何合理利用非共沸工质的特点实现热力循环性能的提升已经成为国内外的研究热点. 利用非共沸工质温度滑移的特点, 可以实现在换热过程中换热流体与工质之间完美的温度匹配, 从而使热力循环逼近Lorenz循环, 减少换

引用格式: 许伟聪, 赵力, 邓帅, 等. 基于非共沸工质的热力循环三维构建方法初探. 科学通报, 2019, 64: 206–214
Xu W C, Zhao L, Deng S, et al. A preliminary approach to the 3D construction of thermodynamic cycle based on zeotropic working fluids (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 206–214, doi: 10.1360/N972018-00315

© 2018《中国科学》杂志社

热过程中的不可逆损失，提高能源利用效率[12,13]. 在逆向热力循环中，利用非共沸工质温度滑移的特点可以实现系统性能提高11.2%~25%[14,15]；在正向热力循环中，系统性能可以提升4.38%~14.9%[16,17].

组分迁移是非共沸工质应用中存在的另一个重要问题，初始向系统中充灌的非共沸工质组分(充灌组分)与系统实际循环过程中的非共沸工质组分(循环组分)之间的差距即组分迁移[18]. 导致非共沸工质组分迁移的主要原因可以归结为非共沸工质相变过程中气相和液相中的组分比例不断变化，两相之间的速度差异导致了组分迁移[19]；不同组元在润滑油中的溶解度不同导致了组分迁移[20]；实际循环系统中储液罐的存在与否、蒸发器冷凝器之间的体积差异和运行过程中的泄露情况导致了组分迁移[21]. 非共沸工质的组分迁移不仅导致热力循环性能的降低，组分迁移中的传质过程还造成了工质相变过程中传热系数的降低[22,23]. 既有研究中，较多集中于非共沸工质组分迁移预测模型的开发[24,25]和组分迁移对系统性能影响的热力学分析[26,27]，对于如何利用组分迁移的特点实现热力循环性能提升的研究有限.

综上，对非共沸工质延用了纯工质研究思路和分析方法，对其本质特征(组分迁移)认识不足，进而造成了非共沸工质应用中的诸多问题. 事实上，非共沸工质与纯工质最大的差异是循环中工质组分的变化，而传统的纯工质研究思路恰恰将非共沸工质限制在单一的循环组分下，不允许其组分发生变化，这抑制了非共沸工质热力循环性能潜力的发挥. 因此，现阶段非共沸工质热力循环亟待解决的关键问题是“突破单一循环组分对热力循环的限制，从工质组分调节的角度探索提高热力循环效率的途径”. 要想解决此问题，就要合理利用非共沸工质在相变过程中组分变化的特性，本文在传统的二维温熵分析方法的基础上，通过增加工质组分浓度的维度，将传统的二维平面热力循环进行升维，构建三维热力循环.

1 热力循环三维构建

1.1 热力循环三维构建方法

本文将非共沸工质的组分分离与混合热力过程引入传统热力循环中，利用非共沸工质相变过程中组分迁移的特点，通过工质组分的分离与混合实现循环过程中工质组分的主动调节，使热力循环中各个热力过程在不同工质之间“跳跃”完成，充分考虑各组元在不同热力过程中的性能优势，通过协同兼顾全部热力过程的性能实现整体循环性能的提高.

传统的二维分析图适用于纯工质或固定工质组分的热力循环分析，不能精确表示非共沸工质的组分分离与混合过程. 本文在传统的温熵图中增加循环工质组分浓度的新坐标维度，将二维平面循环扩展到三维空间循环，提出热力循环三维构建方法，如图1所示，其中θ表示非共沸工质的组分. 工质组分变化带来了新的自由度，为循环效率提升提供了新途径.

热力循环三维构建方法如下：首先，根据热源和负荷侧情况确定具体热力过程及各热力过程适用的非共沸工质；然后，通过兼顾各个热力过程确定非共沸工质的组分配比及变化范围，增加工质的分离与混合过程实现工质设计组分间的切换；最后，将各个热力过程首尾相连，组成热力循环. 如图1所示，循环过程中非共沸工质可实现两种组分M_1和M_2之间的调节，M_1等温热力过程性能优良，能实现热量传递过程的能量损失最小；M_2等熵热力过程性能优良，能实现膨胀及压缩过程的效率最高. 以理想卡诺循环为逼近目标，循环流程为$A_1\rightarrow B_1\rightarrow B_2\rightarrow C_2\rightarrow C_1\rightarrow D_1\rightarrow D_2\rightarrow A_2\rightarrow A_1$，具体如下：

$A_1\rightarrow B_1$：此过程中非共沸工质组分为M_1，可以实现与热源的良好匹配，达到吸热过程中可用能损失最小；

$B_1\rightarrow B_2$：非共沸工质由组分M_1调节为组分M_2；

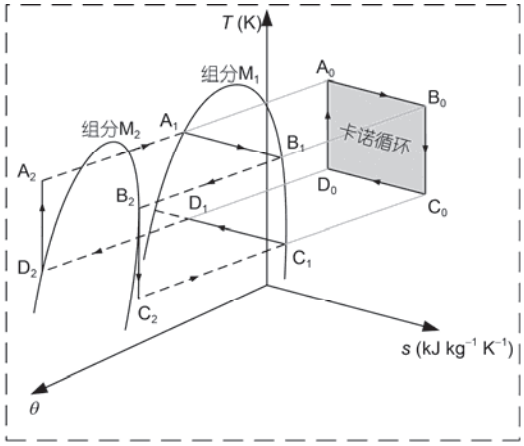


图 1 热力循环三维构建示意图

Figure 1 Schematic diagram of 3D construction of thermodynamic cycle

$B_2 \rightarrow C_2$: 此过程中非共沸工质组分为M_2, 可以实现膨胀过程的等熵膨胀, 提高膨胀过程的能量输出;

$C_2 \rightarrow C_1$: 非共沸工质由组分M_2调节为组分M_1;

$C_1 \rightarrow D_1$: 此过程中非共沸工质组分为M_1, 可以实现与热汇的良好匹配, 达到放热过程中可用能损失最小;

$D_1 \rightarrow D_2$: 非共沸工质由组分M_1调节为组分M_2;

$D_2 \rightarrow A_2$: 此过程中非共沸工质组分为M_2, 可以实现压缩过程的等熵压缩, 减少压缩过程的能量消耗;

$A_2 \rightarrow A_1$: 非共沸工质由组分M_2调节为组分M_1;

此空间热力循环在温熵图上的投影为理想卡诺循环$A_0 \rightarrow B_0 \rightarrow C_0 \rightarrow D_0 \rightarrow A_0$.

1.2 三维热力循环优势分析

相比二维平面循环, 三维空间循环具有如下优势.

1.2.1 可分析变质量系统

非共沸工质组分浓度的变化必然会涉及不同循环过程中工质质量的变化, 最常用的组分调节手段是通过对气液两相状态的非共沸工质进行相分离, 从而实现组分的分离. 因此, 工质组分浓度的坐标维度不仅能反映循环工质组分的变化, 同时也能表征循环不同过程中工质质量的变化, 因此三维空间循环可以用来分析此类变质量系统(如分液冷凝过程、正逆耦合联供系统等), 而传统二维平面循环只能分析定质量系统, 如图2所示, 图2(a)为传统定质量有机朗肯循环示意图, 图2(b)为将文献[28]中的变质量多压蒸发有机朗肯循环应用在温度-熵-质量坐标下的示意图. 将变质量系统在三维空间中进行图示, 一方面可以更加直观地表示循环的具体过程, 另一方面还可以将循环过程中的吸热量、放热量和做功量等用空间几何体的体积表示, 拓展二维空间中循环性能的几何分析方法.

1.2.2 揭示组分调节热力过程

在二维平面循环中, 工质的组分调节热力过程只能明确过程的起止点, 不能明确表示过程中间的状态变化, 因此组分调节过程只能用一个点或虚线(此处的虚线仅表示组分调节过程)表示, 如图3(a)所示为新型喷射式冷电联合循环在二维温熵坐标下的循环示意图[29], 工质组分调节的过程只能用虚线表示; 而在三维空间循环中可以明确实际组分调节的全过程, 揭示调节过程中的工质温度、熵等参数的变化, 有利于循环过程的准确分析, 如图3(b)所示.

1.2.3 探索减少可用能损失的新途径

所有实际热力循环都以卡诺循环为目标进行性能提升, 在二维平面中, 实际循环的热力过程向卡诺循环的理想热力过程进行逼近, 如图4(a)所示, 以蒸气动力正循环为例, 吸热与放热过程逼近等温过程, 膨胀与压缩过程逼近等熵过程, 工质组分分离、压缩和膨胀、混合热力过程的串联, 只能表现为压缩、膨胀过程(分离和混合投影到二维平面上只是一个点或是一个无意义的虚线), 难以找出降低可用能损失的新途径, 限制了理想热力过程的探索; 而在三维空间循环中, 上述串联过程可清晰地表示为三角形的两个边, 如图4(b)所示, 可以通过另一条边(虚线)作为新的多变热力过程, 从而揭示减少可用能损失的新

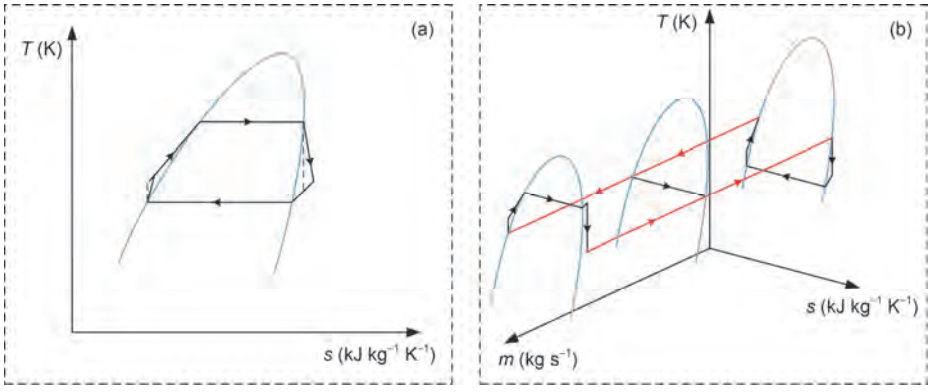


图 2 (网络版彩色)二维、三维循环示意图. (a) 二维定质量循环; (b) 三维变质量循环

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of 2D and 3D cycle. (a) 2D constant mass cycle; (b) 3D variable mass cycle

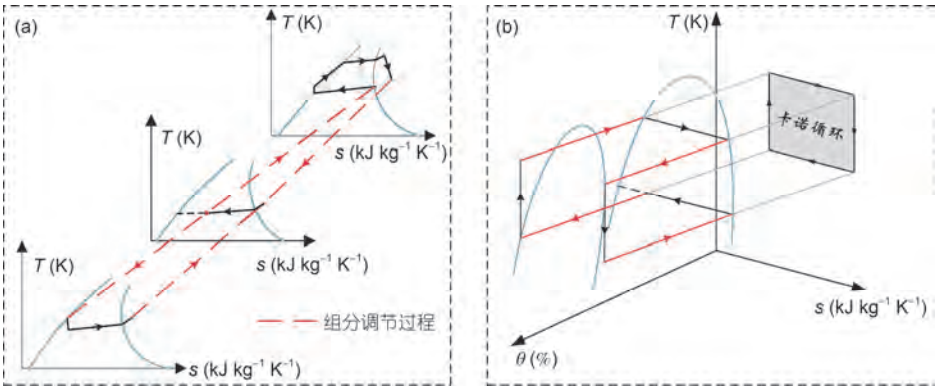


图 3 (网络版彩色)变组分循环二维与三维示意图. (a) 二维示意图; (b) 三维示意图

Figure 3 (Color online) 2D and 3D schematic diagram of variable composition cycle. (a) 2D diagram; (b) 3D diagram

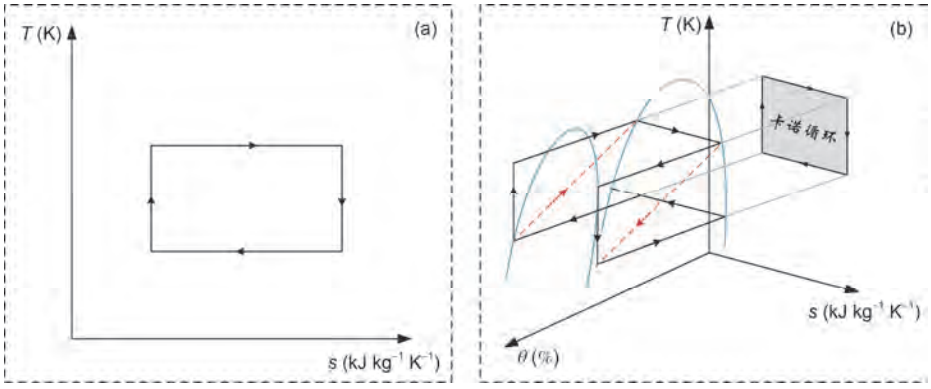


图 4 (网络版彩色)二维、三维热力循环示意图. (a) 卡诺循环示意图; (b) 三维热力循环示意图

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of 2D and 3D thermodynamic cycle. (a) Carnot cycle diagram; (b) 3D thermodynamic cycle diagram

过程, 探索实际循环向理想循环逼近的新途径.

2 案例分析

2.1 内燃机余热驱动的组分可调型有机朗肯循环

内燃机作为当前应用广泛的动力机械, 其所消耗的石油占我国石油消耗总量的60%以上, 然而燃油中有60%左右的能量以余热的形式排放到环境中[30], 因此对内燃机余热进行回收再利用, 是提高燃料热效率的有效途径, 是我国节能减排工作的重要部分.

内燃机余热通常分为排气余热和缸套水余热两种, 排气温度一般介于500~900 ℃, 缸套水温度一般介于90~100 ℃[31]. 从能量品位的角度, 内燃机余热具有多品位大温差的特点. 针对此特点, 大量学者进行了不同类型循环的设计与分析, 但是尚无公认的最优循环, 其中, 循环工质的选择是关键因素. 工质的热物性对循环效率、系统尺寸、系统安全性和环保性都有重要影响, 因此工质的选择直接影响系统的热力性能和经济性能. 传统的工质选择在确定循环结构的基础上, 通过比较不同工质应用在此循环中的热效率得到最优工质, 此类依赖枚举法的工质选择流程, 存在一定的盲目性.

从工质的角度出发, 每一种循环工质都对应其最佳适用工况. 针对内燃机余热大温差的特点, 本文选择一种临界温度较高的工质苯和一种临界温度较低的工质R245fa进行比较. 设定循环最高温度为300 K至低于其临界温度取偶数的温度点, 间隔为2 K, 每个循环固定最高温度与最低温度之差为20 K. 在此温度范围内计算以Benzene和R245fa为工质的简单有机朗肯循环的热效率和热力学完善度, 结果如图5所示. 在循环最高温度小于352 K时, 以R245fa为工质的有机朗肯循环热效率和热力学完善度较高, 而循环最高温度大于352 K时, 以Benzene为工质的有机

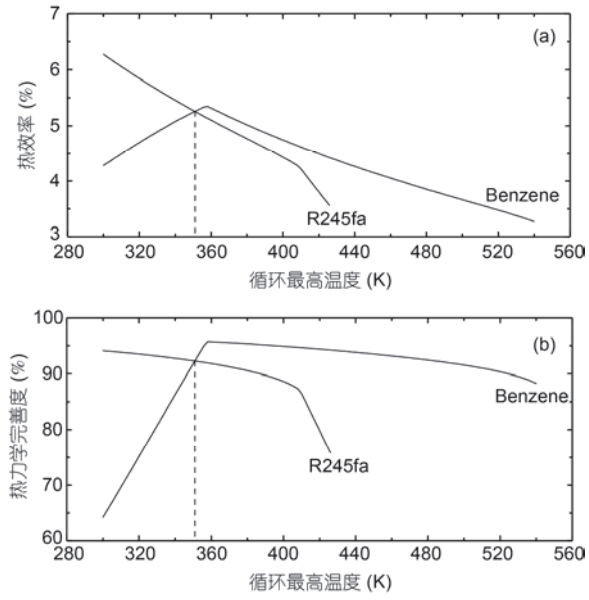


图 5 工质性能对比示意图

Figure 5 Schematic diagram working fluids performance comparison

朗肯循环热效率和热力学完善度较高. 基于此, 应用热力循环三维构建方法, 本文提出了内燃机余热驱动的组分可调型有机朗肯循环, 系统示意图如图6所示, 三维热力示意图如图7所示.

系统以非共沸工质R245fa/Benzene为循环工质, 通过工质分离器和混合器实现循环工质组分的调节, 从而实现系统性能的提升. 循环流程如下: 冷凝器中组分Ⅰ的饱和液态工质被工质泵Ⅰ增压输送至蒸发器Ⅰ, 工质在蒸发器Ⅰ中吸收来自内燃机缸套水的余热, 变为气液两相状态, 进入工质分离器; 在工质分离器中, 组分Ⅰ的气液两相工质分为组分Ⅱ的饱和气态工质和组分Ⅲ饱和液态工质; 组分Ⅱ的饱和气态工质进入膨胀机Ⅰ膨胀做功; 组分Ⅲ的饱和液态工质被工质泵Ⅱ再次增压输送至蒸发器Ⅱ, 吸收来自内燃机排气中的余热, 变为饱和气态工质, 随后进入膨胀机Ⅱ膨胀做功; 膨胀机Ⅰ和膨胀机Ⅱ出口的工质乏汽进入工质混合器, 混合之后的工质组分变为初始组分Ⅰ; 之后工质进入冷凝器冷凝为饱和液态, 完成循环.

2.2 性能分析

压缩过程Ⅰ(1→2):

$$W_{\text{pumpI}}=\frac{q_m(h_2-h_1)}{\eta_{\text{pumpI}}}, \tag{1}$$

蒸发过程Ⅰ(2→3):

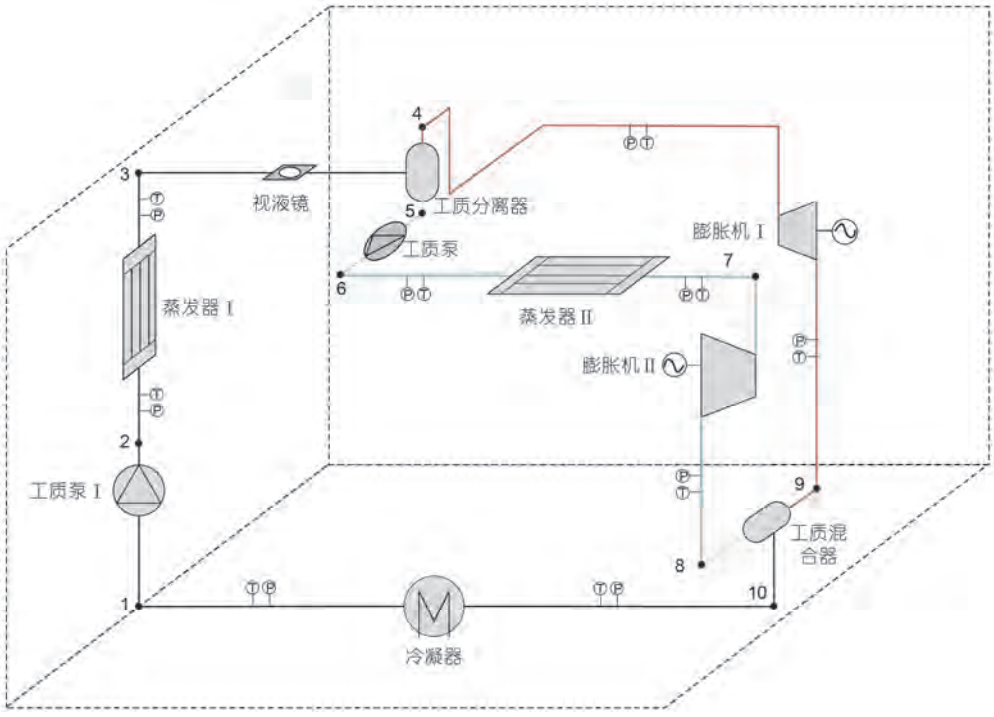


图 6 (网络版彩色)内燃机余热驱动的组分可调型有机朗肯循环结构示意图

Figure 6 (Color online) Structure schematic diagram of variable composition ORC driven by waste heat of internal combustion engine

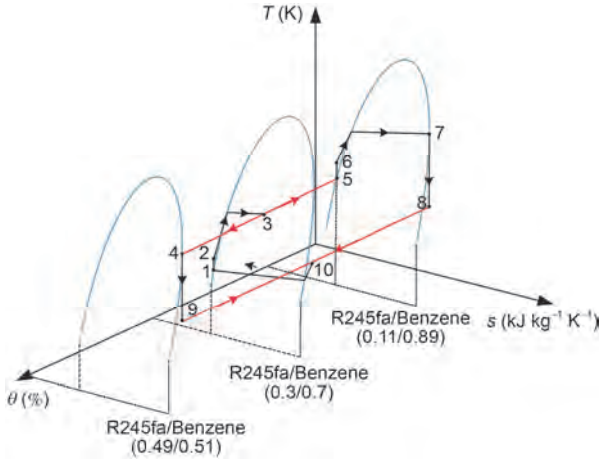


图 7 (网络版彩色)内燃机余热驱动的组分可调型有机朗肯循环三维热力示意图

Figure 7 (Color online) 3D thermodynamics schematic diagram of variable composition ORC driven by waste heat of internal combustion engine

$$Q_{evaI} = q_m\left(h_3 - h_2\right), \tag{2}$$

组分调节过程(3→4, 3→5):

$$W_{sep}=q_{mI}\left(h_4 - T_0S_4\right)+q_{mII}\left(h_5 - T_0S_5\right)-q_m\left(h_3 - T_0S_3\right), \tag{3}$$

膨胀过程 Ⅰ (4→9):

$$W_{expI}=q_{mI}(h_4 - h_9)\eta_{expI}, \tag{4}$$

压缩过程 Ⅱ (5→6):

$$W_{pumpII}=\frac{q_{mII}(h_6 - h_5)}{\eta_{pumpII}}, \tag{5}$$

蒸发过程 Ⅱ (6→7):

$$Q_{evaII} = q_{mII}\left(h_7 - h_6\right), \tag{6}$$

膨胀过程 Ⅱ (7→8):

$$W_{expII}=q_{mII}(h_7 - h_8)\eta_{expII}, \tag{7}$$

冷凝过程(10→1):

$$Q_{con} = q_m\left(h_{10} - h_1\right), \tag{8}$$

热效率为

$$\eta_I = \frac{W_{expI}+W_{expII} - W_{pumpI} - W_{pumpII}}{Q_{evaI}+Q_{evaII}}, \tag{9}$$

热力学第二定律效率为

$$\eta_{II} = \frac{\eta_I}{\eta_{Carnot}}, \tag{10}$$

其中, W_{exp}, W_{pump}和W_{sep}分别表示膨胀机的输出功、工质泵的消耗功和组分调节过程中的最小分离功, 单位为kW; Q_{eva}和Q_{con}分别表示蒸发的吸热量和冷凝的放热量, 单位为kW; h表示工质的焓值, 单位为kJ kg^{-1}; S表示工质的熵值, 单位为kJ kg^{-1} K^{-1}; q_m, $q_{mⅠ}$和$q_{mⅡ}$为工质在总路和之路中的质量流量, 单位为 kg s^{-1}; T_0为环境温度, 单位为K; $\eta_Ⅰ$, $\eta_Ⅱ$和η_{Carnot}分别表示循环的热力学第一定律效率、热力学第二定律效率和相同温度下的卡诺循环效率.

为研究组分可调型有机朗肯循环的优越性, 将其热力学性能与纯工质简单有机朗肯循环和非共沸工质简单有机朗肯循环进行了理论层面的对比分析, 纯工质简单有机朗肯循环的性能参数取自文献[32], 非共沸工质简单有机朗肯循环和组分可调型有机朗肯循环的性能参数通过建立热力学模型并在相同的冷热源条件下优化得到. 纯工质简单有机朗肯循环的工质是R245fa, 组分可调型有机朗肯循环和非共沸工质简单有机朗肯循环的工质都是R245fa/Benzene (0.3/0.7).

为了证明三维热力循环的优势, 分别以非共沸工质的组分浓度和循环工质的质量流量为新增维度, 将组分可调型有机朗肯循环进行热力学图形化分析, 图7所示是基于温度-熵-浓度的三维热力循环图, 浓度坐标中的数值表示循环工质中R245fa的组分比例, 红色实线表示循环中组分的调节过程. 图8所示是基于温度-熵-质量的三维热力循环图, (a)表示工质在蒸发器 Ⅰ 中的吸热过程 Ⅰ, (b)表示工质在蒸发器 Ⅱ 中的吸热过程 Ⅱ, (c)表示工质的放热过程, 阴影部分的体积表示工质在此过程中的热量变化.

表1所列为3种循环的性能对比情况. 结果显示, 以R245fa为工质的简单有机朗肯循环净发电量为13.7 kW, 热效率为9.4%, 热力学第二定律效率为27.17%; 以R245fa/Benzene(0.3/0.7)为工质的简单有机朗肯循环净发电量、热效率和热力学第二定律效率分别为15.6 kW, 11.4%和30.94%; 组分可调型有机朗肯循环的发电量为39.84 kW, 热效率为15.42%, 热力学第二定律效率为40.92%. 无论从净发电量, 热效率还是热力学第二定律效率分析, 组分可调型有机朗肯循环都具有一定的优势.

3 结论

(1) 利用非共沸工质组分迁移的特点, 在传统温-熵分析的基础上增加非共沸工质组分的维度, 提出亚临界热力循环三维构建方法.

(2) 与传统二维热力循环进行对比, 明确三维热力循环具有可分析变质量系统, 揭示组分调节热力过程和探索减少可用能损失新途径的优势.

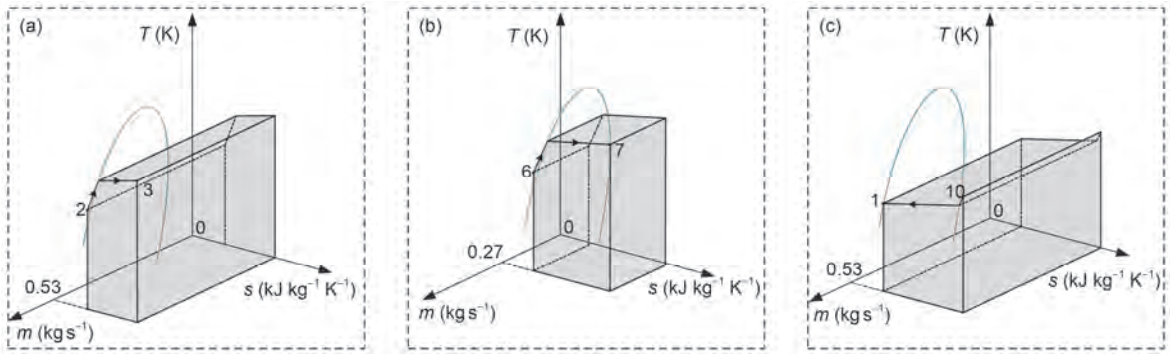


图 8 (网络版彩色)基于温度-熵-质量的三维热力循环图. (a) 吸热过程 I; (b) 吸热过程 II; (c) 放热过程

Figure 8 (Color online) 3D thermodynamic cycle diagram based on *T*-*s*-*m*. (a) Endothermic process I; (b) endothermic process II; (c) exothermic process

表 1 组分可调型有机朗肯循环与简单有机朗肯循环性能对比

Table 1 Performance comparison between variable composition ORC and simple ORC

参数	纯工质简单有机朗肯循环[32]	非共沸工质简单有机朗肯循环	组分可调型有机朗肯循环
内燃机尾气温度(K)	771.15	771.15	771.15
内燃机尾气质量流量(kg s^{-1})	0.2586	0.2586	0.2586
缸套水温度(K)	365.25	365.25	365.25
缸套水质量流量(kg s^{-1})	2.1	2.1	2.1
冷却水入口温度(K)	288.15	288.15	288.15
工质	R245fa	R245fa/Benzene(0.3/0.7)	R245fa/Benzene(0.3/0.7)
净发电量(kW)	13.7	15.6	39.84
热效率(%)	9.4	11.4	15.42
第二定律效率(%)	27.17	30.94	40.92

(3) 以内燃机余热驱动的组分可调型有机朗肯循环为案例, 分别阐述了三维构建方法的应用和功能, 对三维空间内热力循环构建方法的优势给出了初步探索结果.

参考文献

1 Ibrahim A. Renewable energy sources in the Egyptian electricity market: A review. Renew Sust Energ Rev, 2011, 16: 216–230

2 National Development and Reform Commission. “13th Five-Year” renewable energy development planning(in Chinese). Solar Energ, 2017, (1): 78 [国家发展和改革委员会. 可再生能源发展“十三五”规划. 太阳能, 2017, (1): 78]

3 Bao J J, Zhao L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. Renew Sust Energ Rev, 2013, 24: 325–342

4 Landelle A, Tauveron N, Haberschill P, et al. Organic Rankine cycle design and performance comparison based on experimental database. Appl Energ, 2017, 204: 1172–1187

5 Khetib Y, Larkeche O, Meniai A, et al. Group contribution concept for computer-aided design of working fluids for refrigeration machines. Chem Eng Technol, 2014, 36: 1924–1934

6 Larkeche O, Meniai A H, Cachot T. Modelling the absorption refrigeration cycle using partially miscible working fluids by group contribution methods. Mol Phys, 2012, 110: 1305–1316

7 Palma-Flores O, Flores-Tlacuahuac A, Canseco-Melchor G. Optimal molecular design of working fluids for sustainable low-temperature energy recovery. Comput Chem Eng, 2015, 72: 334–349

8 Lampe M, Stavrou M, Bücker H M, et al. Simultaneous optimization of working fluid and process for organic rankine cycles using PC-SAFT. Ind Eng Chem Res, 2014, 53: 8821–8830

9 Su W, Zhao L, Deng S. Simultaneous working fluids design and cycle optimization for organic Rankine cycle using group contribution model. Appl Energ, 2017, 202: 618–627

10 Linke P, Papadopoulos A I, Seferlis P. Systematic methods for working fluid selection and the design, integration and control of organic Rankine cycle—A review. Energies, 2015, 8: 4755–4801

11 Su W, Zhao L, Deng S. Group contribution methods in thermodynamic cycles: Physical properties estimation of pure working fluids. Renew Sust Energ Rev, 2017, 79: 984–1001

12 Abadi G B, Kim K C. Investigation of organic Rankine cycle with zeotropic mixtures as a working fluid: Advantages and issues. Renew Sust Energ Rev, 2017, 73: 1000–1013

13 Zhao L, Bao J J. Thermodynamic analysis of organic Rankine cycle using zeotropic mixtures. Appl Energ, 2014, 130: 748–756

14 Yilmaz M. Performance analysis of a vapor compression heat pump using zeotropic refrigerant mixtures. Energ Convers Manage, 2003, 44: 267–282

15 Yoon W J, Seo K, Chung H J, et al. Performance optimization of a Lorenz–Meutzner cycle charged with hydrocarbon mixtures for a domestic refrigerator-freezer. Int J Refrig, 2012, 35: 36–46

16 Liu G L, Xu J L, Miao Z. Optimal of mixtures working fluids for geothermal organic Rankine cycle system (in Chinese). J Eng Thermodyn, 2015, 36: 2716–2720 [刘广林, 徐进良, 苗政. 地热有机朗肯循环系统混合工质优化. 工程热物理学报, 2015, 36: 2716–2720]

17 Feng Y Q, Hung T C, He Y L, et al. Operation characteristic and performance comparison of organic Rankine cycle (ORC) for low-grade waste heat using R245fa, R123 and their mixtures. Energ Convers Manage, 2017, 144: 153–163

18 Gholamreza B A, Eunkoo Y, Kyung C K. Experimental study of a 1kw organic Rankine cycle with a zeotropic mixture of R245fa/R134a. Energy, 2015, 93: 2363–2373

19 Youbi-Idrissi M, Bonjour J, Meunier F. Local shifts of the fluid composition in a simulated heat pump using R-407C. Appl Therm Eng, 2005, 25: 2827–2841

20 Hong H, Gong M Q, Zhang Y, et al. The composition change of refrigerant mixtures due to the different solibility of refrigerant in lubricant (in Chinese). J Eng Thermodyn, 2006, 27: 76–78 [洪辉, 公茂琼, 张宇, 等. 润滑油溶解对混合工质组分浓度改变的实验研究. 工程热物理学报, 2006, 27: 76–78]

21 Bao J J, Zhao L, Song W D. Theoretical investigation on the influence of composition shift on the heat exchange during the phase change using R407C. J Mech Eng, 2011, 47: 127–132 [鲍军江, 赵力, 宋卫东. 组分迁移对 R407C 相变换热影响的理论分析. 机械工程学报, 2011, 47: 127–132]

22 Li J, Liu Q, Duan Y Y, et al. Performance analysis of organic Rankine cycles using R600/R601a mixtures with liquid-separated condensation. Appl Energ, 2017, 190: 376–389

23 Luo X L, Liang Z H, Guo G Q, et al. Thermo-economic analysis and optimization of a zoetropic fluid organic Rankine cycle with liquid-vapor separation during condensation. Energ Convers Manage, 2017, 148: 517–532

24 Gong M Q. Analysis on the composition shift for low-temperature mixed-refrigerant caused by phase holdup in a horizontal pipe (in Chinese). J Eng Thermodyn, 2006, 27: 45–48 [公茂琼. 水平管内相积存造成深冷混合工质变浓度分析. 工程热物理学报, 2006, 27: 45–48]

25 Xu X W, Liu J P, Cao L, et al. Local composition shift of mixed working fluid in gas–liquid flow with phase transition. Appl Therm Eng, 2012, 39: 179–187

26 Zhou Y D, Zhang F Y, Yu L J. The discussion of composition shift in organic Rankine cycle using zeotropic mixtures. Energ Convers Manage, 2017, 140: 324–333

27 Bao J J, Zhao L. Experimental research on the influence of system parameters on the composition shift for zeotropic mixture (isobutane/pentane) in a system occurring phase change. Energ Convers Manage, 2016, 113: 1–15

28 Li J, Ge Z, Duan Y Y, et al. Parametric optimization and thermodynamic performance comparison of single-pressure and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles. Appl Energ, 2018, 217: 409–421

29 Zhao L, Yang X Y, Deng S, et al. Performance analysis of the ejector-expansion refrigeration cycle using zeotropic mixtures. Int J Refrig, 2015, 57: 197–207

30 Li X N. Research on design and performance optimization of diesel engine waste heat recovery bottoming system and exhaust heat exchanger (in Chinese). Doctor Dissertation. Tianjin: Tianjin University, 2014 [李晓宁. 柴油机余热回收底循环系统及排气换热器设计与性能优化. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2014]

31 Wang T Y, Zhang Y J, Peng Z J, et al. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle. Renew Sust Energ Rev, 2011, 15: 2862–2871

32 Yu G P, Shu G Q, Tian H, et al. Simulation and thermodynamic analysis of a bottoming organic Rankine cycle (ORC) of diesel engine (DE). Energy, 2013, 51: 281–290

Summary for “基于非共沸工质的热力循环三维构建方法初探”

A preliminary approach to the 3D construction of thermodynamic cycle based on zeotropic working fluids

Weicong Xu, Li Zhao*, Shuai Deng & Shuangjun Li

Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, Ministry of Education of China, Tianjin University, Tianjin 300072, China
* Corresponding author, E-mail: jons@tju.edu.cn

Thermodynamic cycle is one of the important ways to convert energy. Improving the efficiency of thermodynamic cycle is still an important way to promote the efficient use of energy at the present stage, and it is also the efficient way to solve the energy crisis. Organic Rankine cycle (ORC), with advantages of simple structure, less maintenance and possibility of small scales, has been widely applied for various types of source in recent years. In exiting researches, the working fluid, as the “blood” of ORC, is commonly considered to play a vital role in the cycle: (1) relative to ideal cycle, the actual power cycles in the engineering field cannot operate without working fluid; (2) energy efficiency, considering the analysis of second-law efficiency, of actual cycle has a significant decrease due to the introduction of working fluid. The thermos-physical properties parameters, transport parameters and other parameters of working fluid could directly affect the efficiency, safety, stability and economy of ORC. With the increasing requirements on working fluids, it is difficult to find a pure working fluid not only with satisfied thermodynamic performance but also permissible environmental protection and safety. In contrast, zeotropic working fluid, which is mixed with two or more pure working fluids, is easier to meet the requirements of thermos-physical properties, environmental and safety. But at the present stage, the application of zeotropic working fluids in ORC still adapts or employs the methodology originated from what we learn from pure working fluids, which leads to the fact that the efficiency of the ORC using zeotropic working fluids is still low. This paper takes the working fluid as the starting point and uses the characteristics of the component shift to break the limitation of the thermodynamic cycle performance of the single circulating working fluids by adding the mixing and separation processes of zeotropic working fluids. Firstly, the 3D construction method of ORC is proposed by adding the dimensionality of the zeotropic component on the basis of the transmission temperature entropy analysis. Subsequently, the 3D ORC is compared with the traditional 2D ORC, and the advantages of 3D construction of thermodynamic cycle are clearly defined: (a) analysis of variable mass system; (b) reveal the thermodynamic process of composition regulation; (c) explore new ways to reduce the loss of exergy. At last, in view of the utilization of waste heat of internal combustion engine, a component adjustable ORC is proposed, and the application and function of the 3D construction method are expounded. The preliminary exploration results are given for the advantages of the thermodynamic cycle in 3D space relative to the traditional 2D construction method.

thermodynamic cycle, 3D construction method, organic Rankine cycle, zeotropic working fluids, component adjustable

doi: 10.1360/N972018-00315