基于甲醇重整的绿色动力船舶SOFC/GT/SCO2/ORC混合动力系统的热力学和经济性分析

姚寿广，颜轩，王创，王少凡

（江苏科技大学 能源与动力学院，镇江 212000）

摘要:为了实现远洋船舶动力系统的能源高效利用和减排，本研究以一艘2.5万吨化学品船作为研究对象，提出一种基于甲醇外部重整的固体氧化物燃料电池与燃气轮机耦合的混合动力系统，进一步为实现能源高效利用，动力系统集成了超临界二氧化碳循环和有机朗肯循环以最大限度回收余热能。文中对所提出的新型动力系统进行了能源分析，㶲分析，并对系统进行了经济性分析与评价。研究结果显示，系统的净输出功率达到4668.85kWh，能够完全满足目标船舶动力需求，系统能效达到58.78%，㶲效率达到56.38%，电力生产成本达到0.07932*＄*/kWh。系统具有良好的热力学性能和经济性。

关键词: 甲醇动力船舶；余热回收；㶲分析；发电成本

1．引言

在过去的几十年里，传统化石燃料带来的环境恶化越来越显著[1]。在此背景下，作为全球最为主要的货运方式，有超过80%的贸易往来通过船舶运输来完成[2]。但船舶的传统动力主要是大功率柴油机，船舶航行时排放的温室气体和污染物已成为造成气候变暖和海洋污染的重要来源之一[3]。因此船舶行业急需发展新兴的船舶动力技术来代替传统船舶动力，进而实现提高能源效率，减少排放，保护环境的目的。

从保护环境的角度来看，目前燃料电池展示了其非常突出的优势，尤其是固体氧化物燃料电池（SOFC）因其巨大的应用潜力越来越受到人们的关注。与传统船用柴油发动机相比，通过SOFC将化学能转化成了电能，这一过程不受卡诺循环的限制，使得SOFC拥有更高的能量转换效率[4, 5]，而且SOFC运行几乎没有污染物排放[6, 7]，使得在船舶上应用SOFC技术可以显著降低船舶污染物排放。由于SOFC作为高温燃料电池，其拥有较高的反应温度，与燃气轮机（GT）的结合，能够将高温废热气体进行回收利用，从而提高了整体能源利用效率[8]。

Huang[9]等研究了SOFC运行温度和燃料利用率对加压固体氧化物燃料电池和燃气轮机混合动力系统效率的影响，结果发现，当SOFC的工作温度变高时可以提高整个动力系统的效率，当燃料利用率变高时，会导致系统整体效率下降。Meng[10]等基于SOFC-GT与跨临界二氧化碳循环的联合发电系统建立相关数学模型并进行了热力学分析评价，结果表明系统的电效率可以达到69.26%，压缩机压力比的增加还会使效率进一步提高。

同时，SOFC-GT排放的中温废气仍有利用价值，可以与其他技术结合充分利用系统排气中的余热以进一步提高系统效率，比如：卡琳娜循环，有机朗肯循环，跨临界CO2循环和超临界CO2循环等[11]。其中超临界二氧化碳循环具有装置体积小，热效率高等优势，按照能量的梯级利用原理，使用有机朗肯循环（ORC）与之结合，使得低温尾气的能量更容易得到回收[12]。Lao[13]对SOFC/SCO2循环和SOFC/GT循环进行了比较，结果表明，在中温条件下SOFC/SCO2循环比SOFC/GT循环效率低5%左右，而在低温条件下前者比后者效率高4%左右。此外，Xia[14]等基于热力学和经济学对SOFC/GT/SCO2混合系统进行了分析与优化，对系统的热力学和经济性进行评价，分析参数对混合系统的性能的影响，采用多目标遗传算法优化系统效率和成本，指出把SCO2循环置于子系统内部有利于提高系统能量效率同时降低发电成本。

目前，上述研究主要面向燃料电池相关系统的性能研究，利用燃料电池高效动力系统替代传统的船用大功率柴油发动机的研究还鲜有报道。Baccioli[15]等提出了一种由液化天然气驱动的内燃机与燃料电池结合的船舶混合动力系统，内燃机与燃料电池相互协同。在Aspen Hysys中建立系统相关数值模型，并对系统进行了优化，结果发现与传统船舶内燃机相比，混合动力系统的能源效率明显提高。Li[16]等提出一种应用于船舶的新型质子膜交换燃料电池/发动机的甲醇燃料热电联产系统(MPEC系统)，使用甲醇在线重整制氢工艺，利用能源效率，经济型，㶲效率等分析方法对系统进行综合评价，结果表明，所提出的系统的热电联产效率和发电效率分别能达到81.84%和50.46%。

综上所述，许多学者对于燃料电池动力系统与热电联产及其在船舶方面的应用做了较多的研究，然而当前大多数研究都是集中在SOFC作为辅助动力单元，将燃料电池动力完全替代船舶主机动力的研究存在空白，目前尚无将燃料电池作为主动力与GT耦合，并集成废气余热利用系统的整体研究。

为此，本文以一艘2.5万吨化学品船作为研究对象，提出一种以甲醇为燃料的新型SOFC/GT/SCO2/ORC船舶混合动力系统。利用Aspen Plus对该混合动力系统进行建模分析，依据SOFC发电功率，系统总功率，系统效率，㶲效率以及经济性对系统进行分析评价，为该新型船舶混合动力系统的设计与进一步研究奠定基础。

2. 研究对象及系统描述

2.1研究对象

本研究的具体目标对象是一艘2.5万吨化学品船，该船的主机为瓦锡兰9L34D发动机，船舶和主机的规格参数如表1所示。

表1主机和船舶的基本参数[17]

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 数值 |
| 船宽/m | 26.70 |
| 船长/m | 165.20 |
| 吨位/t | 25000 |
| 主机最大功率/KW | 4500 |
| 主机排气温度/℃ | 381 |
| 气缸套冷却水入口温度/℃ | 90 |
| 气缸套冷却水出口温度/℃ | 75 |
| 主机进气温度/℃ | 0-45 |

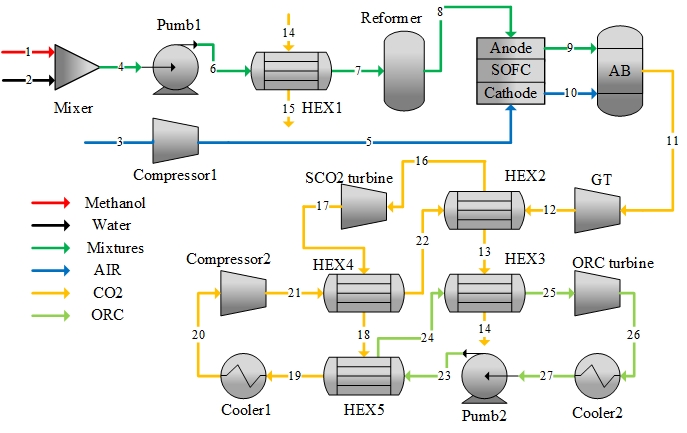
2.2系统描述

所研究的混合动力系统主要由甲醇重整模块，燃料电池模块，GT模块，超临界二氧化碳循环模块和有机朗肯循环模块5个子系统构成，系统流程示意图如图1所示。

系统工作原理如下：

甲醇和水以12.6mol/s的流量混合后经过加压泵压缩到所需的压力，被换热器（HEX1）加热后进入甲醇重整反应器，重整反应后生成一氧化碳和氢气。

在燃料电池模块中，重整反应后的富氢合成气进入燃料电池阳极。流股(11)为SOFC高温尾气，通入燃气轮机做功，流股（12）是燃气轮机废气用来当作SCO2和ORC余热回收系统的热源。

  
图1 系统流程示意图

超临界二氧化碳循环中CO2首先被换热器（HEX2）中燃气轮机排出的废气加热，随后进入SCO2涡轮膨胀做功。然后膨胀后的CO2进入回热器（HEX4）进行预热。因为回热器存在夹点问题，使得回热器出口的温度还是很高。所以流股（18）可以用来预热换热器（HEX5）中的有机工质。流股（19）首先经过冷却，随后通过SCO2压缩机（C2）进行压缩。压缩完成后的CO2流股（21）吸收回热器（HEX4）中膨胀后的CO2流股（17）的热量，最后被废气流股（12） 加热，整个超临界二氧化碳循环结束。

有机朗肯循环中，有机工质首先通过换热器（HEX5）预热，吸收超临界CO2热量，接着在换热器（HEX3）中吸收排气的热量，为了进一步降低排气温度。高温有机工质在ORC涡轮中膨胀做功。膨胀完成后的工质进入冷却器2进行冷却，随后被泵压缩。最后有机工质流入换热器（HEX5），整个循环结束。ORC的加入进一步回收了SCO2的热量，从而降低了系统排气温度，提高系统效率。

3．系统建模

Aspen Plus软件拥有丰富的热力学和物理性质数据库。在本研究中，利用其进行热力学建模和化学反应模拟。燃料电池电化学建模通过软件仿真数据根据经验公式进行模拟计算。以下详细介绍各个模块的建模工作。燃料电池及系统相关参数如表2。

表2系统运行部分参数[18]

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 数值 |
| 电池面积S/cm2 | 961000 |
| 单电池有效面积/cm2 | 843 |
| 电池工作温度/℃ | 800 |
| 电池工作压力/MPa | 0.1 |
| 法拉第常数F/（C·mol-1） | 96485 |
| 燃料利用率/% | 0.85 |
| 交流电转化率/% | 0.92 |
| 压缩机等熵效率 | 0.95 |
| 压缩机机械效率 | 0.95 |
| 涡轮等熵效率 | 0.95 |
| 涡轮机械效率 | 0.95 |

3.1 热力学建模

甲醇和水在中低温条件下（200~300℃）发生重整反应，将甲醇和水转化成富氢合成气，重整反应主要方程式包括[19]：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | *CH3OH+H2O=3H2+CO2* | (1) |
|  | *CH3OH=CO+2H2* | (2) |
|  | *CO+H2O=CO2+H2* | (3) |

甲醇重整反应主要通过Aspen Plus中的吉布斯反应器实现，假设该过程可以充分进行。

3.2 电化学建模

在燃料电池模块中，SOFC由多孔阳极，多孔阴极和离子导电电解质构成。空气进入燃料电池阴极产生氧离子，随后氧离子移动到电池阳极和氢离子发生反应生成水和电子从而发电，SOFC的相关反应式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (4) |
|  |  | (5) |
|  |  | (6) |

可以利用合成气中成分组分和燃料电池其他相关参数计算得到燃料电池相关关键参数，如燃料电池总电流，电流密度，电压和发电功率等。

利用下式可以计算出燃料电池电流[19]。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | *I*=2× (+)×*F*× | (7) |

式中，为燃料电池的总电流，和分别表示燃料合成气中CO与H2的摩尔流量，mol/s。*F*为法拉第常数，为燃料利用率。

电池电流密度*i*可以表示为[19]:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (8) |

式中，表示燃料电池中单电池数量，代表单电池的活跃面积,cm2。

燃料电池实际电压可以表示如下[19]。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (9) |

式中，*USOFC*表示燃料电池实际电压，V；*Ur*表示电池参考电压，V；*UT*表示电池工作温度导致的电压变化，V；*UP*表示电池工作压力导致的电压变化，V；*Uan*表示电池燃料成分导致的电压变化，V；*Uca*表示氧化剂成分变化导致的电压变化，V。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | *Ur*=0.729+2×10-4×*i*-9.67×10-7×*i*2+2.63×10-10×*i*3 | （10） |
|  | *UP*=8×10-6×(*T-Tr*) *×i* | （11） |
|  | *UP*=0.076log（） | （12） |
|  | *Uan*=0.172log | （13） |
|  | *Uca*=0.092log（） | （14） |

式中，*T*表示SOFC工作温度，℃；*Tr*表示SOFC参考温度，℃；*P*表示SOFC工作压力,MPa；*Pr*表示SOFC参考压力，MPa；表示SOFC氧气压力，MPa。*Tr*为100℃，参考条件下氢气与蒸汽分压比为0.15，参考氧气压力为0.164，MPa[20]。

通过计算得到燃料电池的总电流和实际电压后，通过公式可以继续计算出燃料电池的输出功率。其计算公式如下。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | *WSOFC*=*USOFC*×*I×ηc* | (15) |

式中，*WSOFC*表示燃料电池输出功率，KW；*ηc*表示交流电转化率，%。

在整个系统中，顶层超临界二氧化碳循环与有机朗肯循环作为固体氧化燃料电池和燃气轮机余热回收系统，为了便于计算余热回收系统的性能，利用MATLAB程序来计算分析余热回收系统相关性能。

4．结果与讨论

4.1 能量分析

将Aspen Plus中模拟的相关参数代入公式(7)~(15),即可得到燃料电池相关性能参数结果。如表3所示。基于热力学第一定律，在本研究中，只存在发电模块，因此能源效率和电效率相等。因此利用电效率来评价整个系统的性能表现[19]。燃料电池发电效率可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | = | (16) |

式中，*WSOFC*表示燃料电池输出功率，kW; 表示甲醇的质量流量，kg/s；表示甲醇的低位热值，本研究取为19.7MJ/kg; *WFC*表示燃料压缩机输入功率，kW。

系统总发电效率的计算公式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | = | (17) |

式中，*WGT、WCT、WOT、WFC、WAC、WCC、Pump*分别表示燃气轮机，超临界二氧化碳循环涡轮，有机朗肯循环涡轮，空气压缩机，超临界二氧化碳循环压缩机与有机朗肯循环泵的功率，kW。

整个系统输出总功率为4624.16kW，其中燃料电池输出功率为3174.16kW,燃料电池效率为39.9%。GT输出功率为1320.8kW,超临界二氧化碳循环输出功率为38.31kW,有机朗肯循环输出功率288.5kW。燃料电池输出功率在整个系统输出功率中占比最多。考虑系统其他耗功设备，系统净输出功率为4624.16kW，系统效率为58.21%。表4显示了系统输出性能结果。

表3 燃料电池性能参数

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 数值 |
| SOFC总电流（A） | 6184050 |
| SOFC电流密度（mA/cm-2） | 230.27 |
| 参考电压（V） | 0.726 |
| SOFC实际电压(V) | 0.558 |
| SOFC输出功率(kW) | 3174.16 |

表4系统输出性能结果

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 数值 |
| 燃料电池输出功率（kW） | 3174.16 |
| 燃料电池效率(%) | 39.96 |
| GT输出功率（kW） | 1320.84 |
| SCO2输出功率（kW） | 41.64 |
| ORC输出功率（kW） | 288.58 |
| 系统总输出功率（kW） | 4825.22 |
| 系统净输出功率（kW） | 4598.22 |
| 系统能量效率（%） | 58.21 |

4.2 㶲分析

系统㶲分析可以反映出系统中能源利用的具体情况，揭示系统和部件的㶲损部位和程度，所以本研究对系统进行㶲分析。

对于系统流股的㶲[19]可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (18) |

式中，和分别代表系统流股的物理㶲和化学㶲，kW。

物理㶲可以表示为[21]：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | [(h-)-(s-)] | (19) |

式中，表示流股的质量流量，kg/s；*h*和*h0*表示给定状态和环境状态下的比焓，kJ/kg；*s*和*s0*表示给定状态和环境状态下的比熵，kJ/(kg·K)；*T0*表示环境温度，K。取值为278.15K。

化学㶲可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (20) |

式中，和*Vg*分别代表流股中液相和气相的摩尔流量，mol/s；和表示物质*i*在液相和气相中的摩尔分数，%；和分别表示为物质*i*在液相和气相中的标准化学㶲，kJ/kg。所需物质的标准化学㶲如表5所示。

整个系统的㶲效率可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (22) |

式中，,和Q分别表示系统总输出㶲，系统总输入㶲和系统输入热量，kW; Win和Wout分别表示系统总输入功率和系统总输出功率，kW。

表5物质标准化学㶲[22]

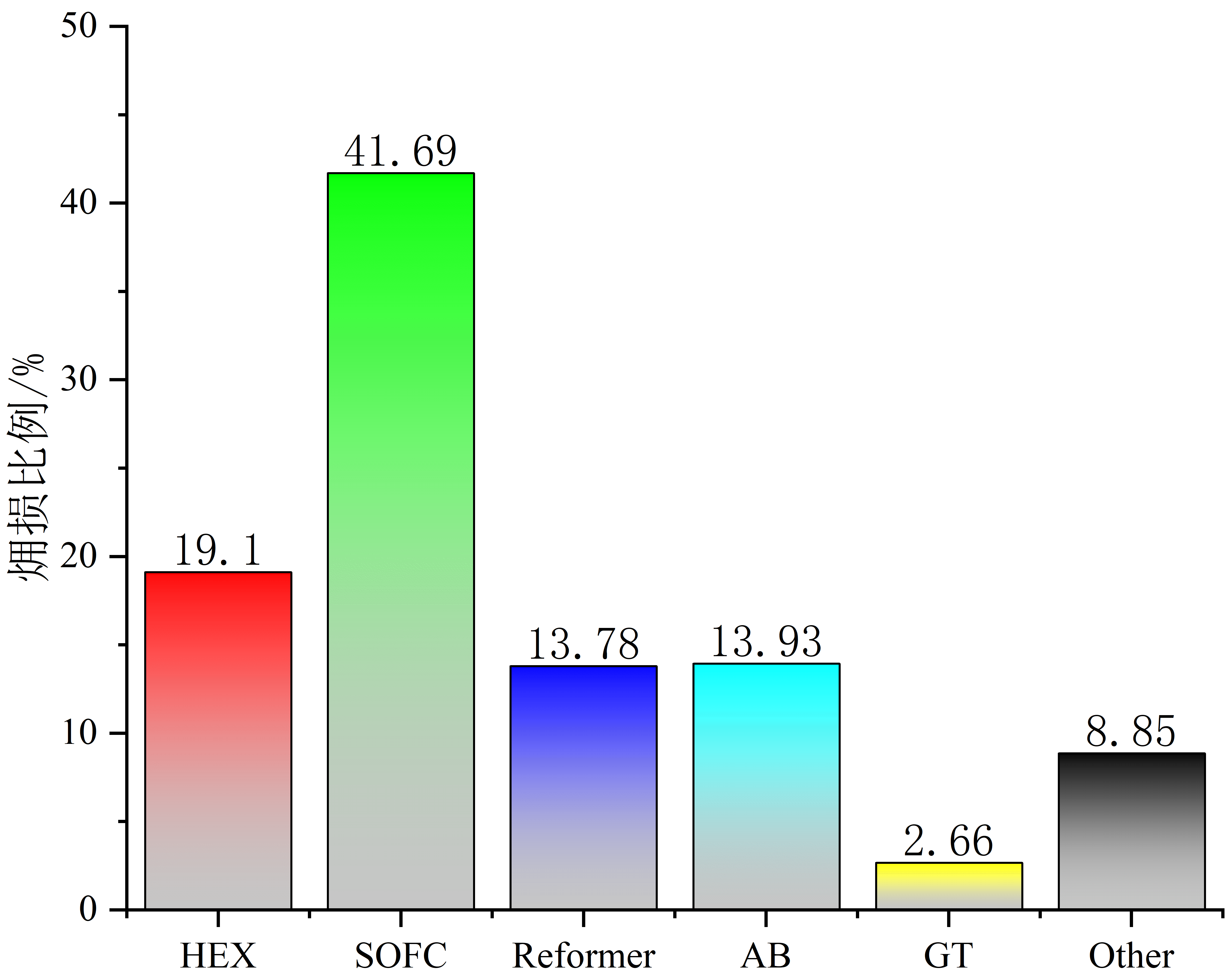
|  |  |
| --- | --- |
| 物质 | 标准化学㶲(kJ/mol) |
| H2 | 235.22 |
| CO | 275.35 |
| H2O(g) | 8.62 |
| H2O(l) | 0.90 |
| N2 | 0.71 |
| O2 | 3.93 |
| CH3OH | 754.69 |

表6显示了整个系统和各个部件模块的㶲损失和㶲效率，系统总㶲损失为3579.26kW,总㶲效率为56.38%。其中㶲损失最多的部件是SOFC，占比41.69%。泵的㶲损失最小。

为了进一步直观地展示系统各设备的㶲损失比例，绘制了系统各设备的㶲损比例分布图，如图2所示 。SOFC是系统主要的㶲损来源，主要是因为系统中SOFC运行温度维持在800℃，运行过程中许多电池热量流失到环境中，能量损失不可避免。其次㶲损占比较多的是换热器，主要原因是系统中换热器较多，冷热流体换热温差大，导致㶲损提高。

表6系统部件㶲分析结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 部件 | EF (kW) | EP (kW) | ex | ED (kW) |
| HEX1 | 44.37 | 18.37 | 0.41 | 25.99 |
| HEX2 | 41.55 | 34.77 | 0.84 | 6.78 |
| HEX3 | 953.32 | 309.11 | 0.32 | 644.22 |
| HEX4 | 3.97 | 3.29 | 0.83 | 0.68 |
| HEX5 | 11.44 | 5.59 | 0.49 | 5.834 |
| SOFC | 4666.21 | 3174.16 | 0.68 | 1492.04 |
| AC | 206.84 | 188.13 | 0.90 | 18.72 |
| GT | 1416.06 | 1320.84 | 0.93 | 95.22 |
| CT | 39.76 | 38.31 | 0.96 | 1.45 |
| CC | 15.60 | 14.94 | 0.95 | 0.66 |
| OT | 304.29 | 288.58 | 0.94 | 15.70 |
| Reformer | 1478.34 | 984.96 | 0.67 | 493.38 |
| AB | 2197.89 | 1699.40 | 0.77 | 498.49 |

  
图2 系统设备㶲损失分布比例

4.3 经济性分析

对于船舶上的发电动力系统来说，尽管系统输出功率和效率是首要考虑的因素，但同时其经济性也同样不容忽视。所以本研究利用经济性指标发电成本(EPC)来分析评价船舶动力系统，同时分析系统各个部件的成本占比。

其中系统投资成本包括设备初始成本和设备维护运行成本，表达式为[23]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (23) |

式中，表示设备初始投资成本，表示系统设备维护运行成本。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (24) |

式中，表示系统设备投资成本，表示系统设备维护运行系数(本研究中取值为1.06)，N表示系统年运行时间(本研究取值为6000h)。CRF表示资本回收系数，表达式为[24]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (25) |

式中，n表示为系统寿命，本研究取值为10年。k代表年利率，取值为14%[25]。针对系统其他设备的投资成本，依照其他研究引用经验公式[26-28]如表7所示。

系统中甲醇重整设备的成本使用规模因子法来计算，表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (26) |

式中，C表示甲醇重整设备的实际价格，表示甲醇重整设备的参考价格，S是甲醇重整反应设备实际规模，kg/s；是甲醇重整反应设备参考规模，kg/s；*f*表示缩放因子。

在本研究中C取值为6882美元，取值为0.00749kg/s，取值为0.0025kg/s，*f*为0.6。

此外燃料成本也是系统发电成本的重要部分，本研究根据文献[29]取甲醇的成本为137美元/t，燃料成本表达式为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (27) |
|  |  | (28) |

表7系统各组分设备成本公式

|  |  |
| --- | --- |
| 模块 | 设备投资成本公式 |
| SOFC | (2.96) |
| GT | 494.16exp (0.036)+1] |
| AB |  |
| pump | [] |
| HEX1-5 |  |
| Cooler | () |
| OT |  |
| AC |  |
| CC |  |
| CT |  |

通过将模拟数据带入相关公式，得到EPC为0.07932*＄*/kWh，表8展示了各个部件的投资成本。其中SOFC的成本最高为3409281.31美元，图3展示了除SOFC以外的系统各部件的投资成本占比，燃气轮机占比最高，达到31.65%。因此，如果进一步提高本文系统的经济可行性，需要将燃料电池的投资成本降低。然而对于燃料电池而言，较高的电压和低的电流密度可以保证电池拥有高的电池效率。但这意味着需要大量的电池数量，这是燃料电池投资成本高的重要原因。

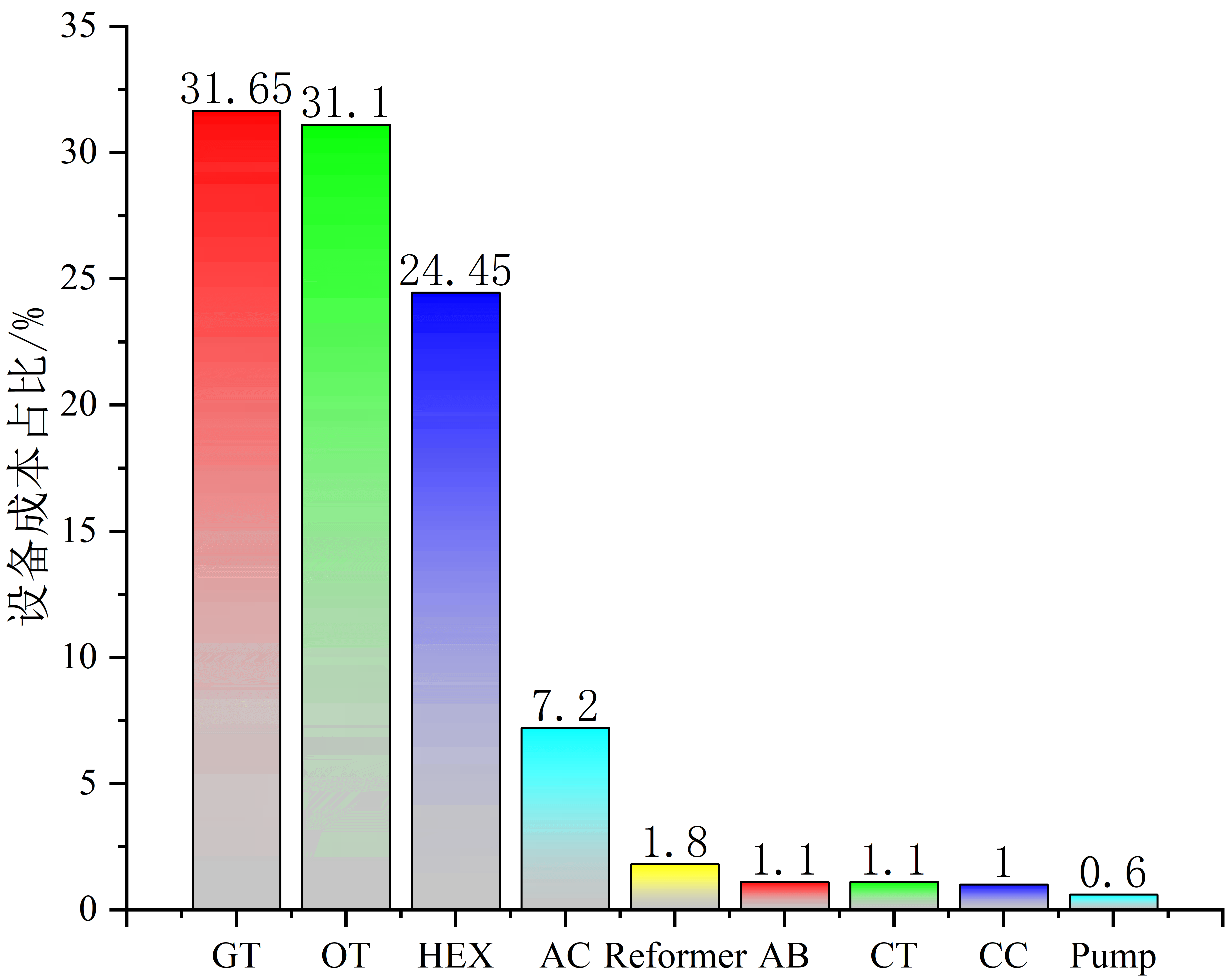


图3系统各设备成本投资占比

表8各部件的投资成本

|  |  |
| --- | --- |
| 模块 | 设备成本/＄ |
| SOFC | 3409281.31 |
| GT | 236354.53 |
| AB | 8298.17 |
| Pump | 4291.47 |
| AC | 54019.15 |
| CT | 8369.09 |
| CC | 7448.27 |
| Reformer | 13293.51 |
| HEX1 | 2326.07 |
| HEX2 | 690.91 |
| HEX3 | 4811.41 |
| HEX4 | 211.88 |
| HEX5 | 605.77 |
| OT | 232017.45 |
| Cooler2 | 3292.91 |
| Cooler1 | 132880.03 |
| Other | 37756.98 |

7．结论

本研究以一艘2.5万吨化学品船作为研究对象，提出了一种基于甲醇重整的能够实现能源高效利用的SOFC/GT/SCO2/ORC的新型船舶集成混合动力系统，利用热力学与经济性指标对系统进行了评价。得出以下结论：

（1）基于本研究的2.5万吨化学品船，所提出的混合动力系统能够获得4668.85kW的净输出功率，满足该船舶动力功率需求。研究了系统的热力学性能和㶲性能，结果表明，系统总能源效率达到58.78%，总㶲效率达到56.38%。

（2）在本研究所提出的混合动力系统设计方案中，针对甲醇重整式SOFC的高温尾气，利用SOFC与GT耦合，并将SCO2与ORC循环集成废气余热利用系统，该设计方案可以充分回收利用系统尾气，能量回收利用率高。

（3）通过㶲分析表明，系统总㶲损失为3579.26kW，其中㶲损失最多的部分是SOFC，其次是换热器和后燃室，分别占比为41.69%，19.10%和13.93%。通过重点优化SOFC，换热器和后燃室的性能可以进一步提高系统㶲效率。

（4）本研究系统拥有较高的热力学性能，能够高效利用甲醇燃料，单位发电成本达到0.07932*＄*/kWh，拥有良好的经济性。

参考文献

[1] Wang, et al. Conceptual design and assessment of a novel energy management system for LNG fueled ships with air separation. Thermal Science and Engineering Progress. 2021;26.

[2] Wang, et al. Energy, exergy and economy (3E) investigation of a SOFC-GT-ORC waste heat recovery system for green power ships. Thermal Science and Engineering Progress. 2022;32.

[3] Shi. Are greenhouse gas emissions from international shipping a type of marine pollution? Marine Pollution Bulletin

2016;113(1-2):187-192.

[4] Guo, et al. Performance analysis and multi-objective optimization for a hybrid system based on solid oxide fuel cell and supercritical CO2 Brayton cycle with energetic and ecological objective approaches. Applied Thermal Engineering. 2023;221.

[5] Wei, et al. Proposed combined cold and power system integrated SOFC, sSCO2 power cycle and compression-absorption refrigeration with [Na(Tx-7)]SCN/NH3 as working fluid. Energy Conversion and Management. 2022;251.

[6] Fukuzumi, et al. Fuel Production from Seawater and Fuel Cells Using Seawater. ChemSusChem. 2017;10(22):4264-4276.

[7] Dhahad, et al. Energy, exergy, and exergoeconomic evaluation of a novel CCP system based on a solid oxide fuel cell integrated with absorption and ejector refrigeration cycles. Thermal Science and Engineering Progress. 2021;21.

[8] B, et al. Coupling impacts of SOFC operating temperature and fuel utilization on system net efficiency in natural gas hybrid SOFC/GT system - ScienceDirect. Case Studies in Thermal Engineering. 2022;31.

[9] Lai, et al. Corrigendum to “Design and eco-technoeconomic analyses of SOFC/GT hybrid systems accounting for long-term degradation effects” [International Journal of Hydrogen Energy 46.7 (2021): 5612–5629]. International Journal of Hydrogen Energy. 2022;47(42):18530-18531.

[10] Meng, et al. Thermodynamic analysis of combined power generation system based on SOFC/GT and transcritical carbon dioxide cycle. International Journal of Hydrogen Energy. 2017;42(7):4673-4678.

[11] Mirjavadi, et al. A comparison of using organic Rankine and Kalina cycles as bottom cycles in a solar‐powered steam Rankine cycle. Energy Science & Engineering. 2022;10(8):2714-2731.

[12] Kang, et al. Thermodynamic and economic comparison of novel parallel and serial combined cooling and power systems based on sCO2 cycle. Energy. 2021;215:119008.

[13] Xingsheng, et al. Comparative Study on Performance of SOFC/GT and SOFC/SCO 2 Turbine Combined Cycle System. IOP Conference Series Earth Environmental Science. 2020;619:012048.

[14] Xia, et al. Analysis and multi-objective optimization of SOFC/GT/SCO2 hybrid power system based on thermodynamics and economics. Applied Thermal Engineering. 2023;232.

[15] Baccioli, et al. Hybridization of an internal combustion engine with a molten carbonate fuel cell for marine applications. Applied Energy. 2021;298.

[16] Li, et al. 4E analysis of a novel proton exchange membrane fuel cell/engine based cogeneration system with methanol fuel for ship application. Energy. 2023;282.

[17] Yao, et al. Design and optimization of LNG-powered ship cold energy and waste heat integrated utilization system based on novel intermediate fluid vaporizer. Case Studies in Thermal Engineering. 2022;40.

[18] Hou, et al. Thermodynamic performance study of the integrated MR-SOFC-CCHP system. Energy. 2018;150:434-450.

[19] B, B. Performance analysis of the SOFC–CCHP system based on H 2 O/Li–Br absorption refrigeration cycle fueled by coke oven gas. Energy. 2015;91:983-993.

[20] A, et al. Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlusTM unit operation models - ScienceDirect. Energy Conversion Management. 2005;46(2):181-196.

[21] Mahabadipour, et al. An exergy analysis methodology for internal combustion engines using a multi-zone simulation of dual fuel low temperature combustion. Applied Energy. 2019;256:113952.

[22] Li, et al. Conceptual design and techno-economic analysis for a coal-to-SNG/methanol polygeneration process in series and parallel reactors with integration of waste heat recovery. Energy Conversion and Management. 2020;214.

[23] Eisavi, et al. Thermo-environmental and economic comparison of three different arrangements of solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) hybrid systems. Energy Conversion and Management. 2018;168:343-356.

[24] Entezari, et al. Systematic analysis and multi-objective optimization of integrated power generation cycle for a thermal power plant using Genetic algorithm. Energy Conversion Management. 2021;241:114309.

[25] Lee, et al. Exergetic and exergoeconomic evaluation of a solid-oxide fuel-cell-based combined heat and power generation system. Energy Conversion and Management. 2014;85:154-164.

[26] Marchionni, et al. Techno-economic assessment of Joule-Brayton cycle architectures for heat to power conversion from high-grade heat sources using CO 2 in the supercritical state. Energy. 2018;148:1140-1152.

[27] Yan, et al. Techno-economic analysis of low-carbon hydrogen production by sorption enhanced steam methane reforming (SE-SMR) processes. Energy Conversion Management. 2020;226:113530.

[28] Wang, et al. Design and performance evaluation of a novel hybrid solar-gas power and ORC-based hydrogen-production system. Energy. 2022;251.

[29] Battaglia, et al. Methanol synthesis through CO2 capture and hydrogenation: Thermal integration, energy performance and techno-economic assessment. Journal of CO2 Utilization. 2021;44:101407.

【作者简介】

姚寿广 男 1962.10 江苏科技大学能源与动力学院二级教授。长期以来一直从事船舶与海洋工程领域能源动力设备、装置与系统的性能优化及能源高效利用的科研、教学与研究生培养工作。先后主持完成包括国家自然科学基金、国防重点攻关及预研、省产业化和高技术前瞻科技项目以及行业研究所、企业技术开发与服务合同项目50余项。获省、部级科技进步二、三等奖7项；在国内外学术刊物上发表论文240余篇，出版专著及全国重点规划教材4部；获国家发明专利授权18件，美日韩国际专利4件。