

国内营运的煤炭运输船余热发电节能技术分析

王华¹, 高汉明¹, 籍伟¹, 宋立国^{2*}

(1. 浙江富兴海运有限公司, 杭州 310007; 2. 大连海事大学, 大连 116026)

摘要: 仅通过废气涡轮增压器和废气锅炉回收的船舶余热利用方式经济性较低。余热发电能够有效提高船舶余热利用率, 提高船舶能效, 减少船舶碳排放, 是船公司实现“碳中和、碳达峰”目标的有效途径。在电加热器逐渐推广应用的背景下, 通过安装或改造船舶余热发电装置将是未来船舶余热利用的重要方式。

关键词: 煤炭运输船; 余热发电; 能效提升; 碳排放

中图分类号: U674 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 01—0081—02

1 引言

如图 1 所示, 船舶柴油机的热效率目前已到达 49% 以上, 进一步提升的空间很小。燃油转化的热量中有 50% 以上的能量通过各种方式释放到环境中, 造成了能源浪费和全球气温升高。船舶余热中废气的热量约 25.4%, 冷却扫气约 14.1%, 缸套水约 4.3%。其中船舶废气的温度高, 能量大, 回收最为便捷。缸套水温度稳定在 80℃ 左右, 也可以通过有机朗肯循环等方式有效回收。

充分利用船舶余热不仅可以减少燃油消耗, 降低成本, 提高企业综合竞争力, 还可以减少二氧化碳和其他污染物的排放, 是船舶公司实现“碳中和、碳达峰”目标的重要途径。

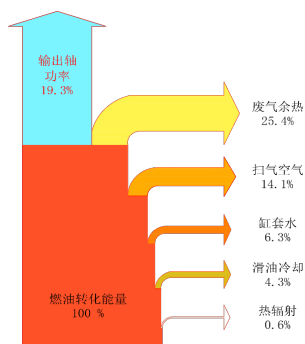


图 1 船舶燃油能量利用分布图

2 国内煤炭运输船余热利用现状

目前, 船舶废气热量的主要应用途径为废气涡轮增压器和废气锅炉。某煤炭运输船按照表 1 的环境参数进行了船舶蒸汽消耗计算。

在额定速度下, 国内运营的某煤炭运输船的燃油锅炉蒸发量为 1500 kg/h, 废气锅炉的蒸发量为 1230 kg/h。如表 2 所示, 冬季航行时, 废气锅炉的蒸发量不能满足

船舶蒸汽消耗, 需加开燃油锅炉予以补充。而 ISO 工况航行时, 船舶蒸汽消耗量仅为 730kg/h。废气锅炉产生的蒸汽量远大于船舶消耗。蒸汽余量为 500kg/h。过量的蒸汽需冷凝降温。这样非但不能利用废气热量, 还造成了能源浪费。

表 1 某轮蒸汽消耗环境参数表

	冬季 (°C)	ISO (°C)
大气温度	0	25
海水温度	5	25
压载水温度	5	25
机舱温度	15	25
热水柜温度	10	25

表 2 某轮不同工况下的蒸汽消耗量

	海上航行 (kg/h)	机动航行 (kg/h)	锚泊 (kg/h)
ISO	730	677	608
冬季	1433	1379	1298

当蒸汽压力为 7 bar 时, 对应的饱和蒸汽温度为 169.6℃, 热量约为 2762.9kJ/kg。1 小时内产生的 500kg 蒸汽的总热量为 330166.6 kcal, 相当于 383.7 kWh。按照能量利用率为 20% 计算, 发电功率约 76kW。如果考虑未来使用余热发电替代废气锅炉, 则船舶余热发电的功率预计可相当于一台常用发电机。国内运营的煤炭运输船从北方港口往南方电厂运煤的运营过程中, 船舶温度参数高于 ISO 工况的时长超过 5 个月, 因此具有较大余热回收空间。

3 余热发电技术分析

3.1 船舶废气发电技术

船舶废气发电主要有三种模式, 一种是废气直接驱动废气涡轮机进行发电; 另一种利用废气锅炉产生高压和低压过热蒸汽, 再用蒸汽驱动蒸汽涡轮进行发电; 第三种是将前两种方式联合, 废气涡轮和蒸汽涡轮并联发电。典型的废气发电技术原理如图 2 所示。

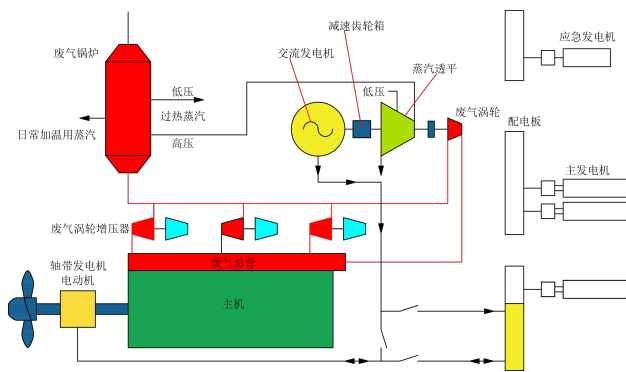


图2 船舶主机废气发电原理图^[1]

该系统将主机废气分两路：一部分废气驱动废气涡轮增压器给空气增压，另一部分废气直接驱动废气涡轮机。经废气涡轮增压器和废气涡轮后，废气进入废气锅炉加热水产生蒸汽。一部分蒸汽用于日常加温。过热的高压蒸汽和低压蒸汽则进入蒸汽透平与废气涡轮一起为交流发电机提供动力。

废气涡轮和蒸汽涡轮驱动发电机产生的电能可直接带动轴带电动机助推主机，也可和柴油发电机并电使用。当主机富裕功率较多时，轴带电机也可以作为发电机使用。其电能和涡轮发电机的电能一起汇入配电板，供日常使用。

3.2 船舶余热有机朗肯循环发电技术

有机朗肯循环发电系统主要由蒸发器、膨胀机、冷凝器、液体泵组成。其工作原理如图3所示。

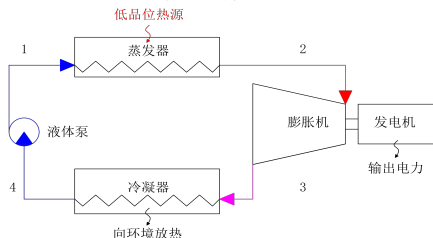


图3 有机朗肯循环发电系统图

过程1-2为有机工质在蒸发器中从低位热源吸收热量，产生具有一定压力和温度的饱和蒸气或过热蒸气；过程2-3为高温高压的有机工质蒸气在膨胀机内膨胀做功，带动发电机向外输出电能；3-4为有机工质在冷凝器中向低温热源放热变成液体的过程；过程4-1利用液体泵对有机工质液体进行加压，并使其重新回到蒸发器中。

有机朗肯循环发电可利用温度较低的热源（如缸套水余热，扫气冷却水余热等），而且可以通过多级联合的方式利用不同温度的热源。马士基在主机功率为85697kW的集装箱船上安装了有机朗肯循环发电设备，使用80℃的缸套水作为热源，发电功率达到125kW^[2]。

因此有机朗肯循环发电具有较好的船舶应用前景^[3]。

3.3 涡轮增压器液压助推技术

涡轮增压器液压助推技术^[4]是指利用液压系统回收船舶柴油机废气中的富余能量用于助推螺旋桨的余热回收技术。

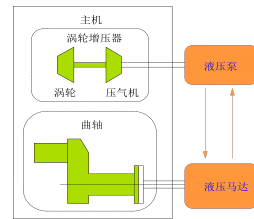


图4 涡轮增压器液压助推原理示意图

如图4所示，涡轮增压器液压助推系统是在废气涡轮增压器输出端经减速齿轮带动液压泵，将废气富余能量转换为液压能。高压液压油通过管系驱动与曲轴相连的液压马达，从而将液压能转化为助推螺旋桨旋转的机械能，实现余热回收。涡轮增压器液压助推系统具有结构紧凑、性能可靠、运行操作简便等特点，适用于新造船舶或现有船舶发动机改造安装。涡轮增压器液压助推系统在低负荷时效率较低。

4 结论

国内运营的煤炭运输船具有较大余热利用空间。通过废气涡轮发电、余热有机朗肯循环发电、涡轮增压器液压助推技术均可将一定量的船舶余热回收利用。其中有有机朗肯循环发电技术可以利用不同温度的热源，具有较好的船舶应用前景。

参考文献：

- [1] <https://mfame.guru/heat-recovery-system-operation-and-experience/>.
- [2] <https://www.calnetix.com/sites/default/files/Hydrocurrent-Commissioning-and-Operation-on-Arnold-Maersk.pdf>.
- [3] 叶文祥, 柳长昕, 刘健豪, 等. 采用温差发电-有机朗肯循环联合系统的船舶余热利用实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(08): 50-57.
- [4] <https://www.boschrexroth.com/en/xc/industries/machinery-applications-and-engineering/engines/products-and-solutions/turbo-hydraulic-system-components/th-1>.

基金项目：国家级资助项目（51709029）；富兴海运有限公司煤炭运输船能效提升技术及策略研究项目。