

氧化铝生产多效蒸发器末效乏汽潜热回收发电工艺研究

宋二伟¹,周晓宇¹,王建城²,郭存悦¹,王二强^{1*}

(1.中国科学院大学化学科学学院,北京 100049; 2.滨州魏桥国科高等技术研究院,山东 滨州 256606)

摘要:为进一步提高蒸汽热量利用率、降低能耗及循环水用量,开展了有机朗肯循环发电耦合技术回收多效蒸发末效乏汽潜热利用技术研究,借助建模仿真手段对该工艺进行分析。结果表明,净发电量(热电转换效率)随着冷凝温度的降低而升高,随着工质泵出口压力的增大而升高,且不同有机工质的效率存在差别。以国内某氧化铝厂一组蒸发系统末效乏汽数据为基础,乏汽流量为 55 t/h(温度 63℃,压力 20 kPa)、冷凝温度为 20℃、工质泵压力增量为 0.25 MPa 时,净发电量为 2 309 kW。

关键词:氧化铝生产;多效蒸发;乏汽潜热回收;有机朗肯发电

中图分类号:TQ02

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)12-0209-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.12.038

Research on power generation technology utilizing latent heat of final-effect spent steam from multi-effect evaporator in alumina production

SONG Er-wei¹, ZHOU Xiao-yu¹, WANG Jian-cheng², GUO Cun-yue¹, WANG Er-qiang^{1*}

(1.School of Chemical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2.Binzhou Weiqiao National Science and Technology Higher Technology Research Institute, Binzhou 256606, China)

Abstract:In order to further improve the heat utilization rate of steam, reduce consumption of energy and circulating water, the technology for recovering latent heat of the final-effect spent steam, which comes from multi-effect evaporators, by using organic Rankine cycle power generation technology are researched by means of modeling and simulation means. It is found that the net power generation (thermoelectric conversion efficiency) increases with descending condense temperature and elevating outlet pressure of the refrigerant pump. There are differences in the efficiency of different organic working fluids. Based on the final-effect spent steam data of a group of evaporation systems in one certain Chinese alumina plant, the net power generation can reach 2,309 kW by using this process when the flow of spent steam with a temperature of 63℃ and a pressure of 20 kPa is 55 t·h⁻¹, the condense temperature is 20℃, and the pump pressure increment is 0.25 MPa.

Key words: alumina production; multi-effect evaporator; recovering latent heat from spent steam; organic Rankine cycle

在处理三水铝石矿时,拜耳法(Bayer)相比其他工艺具有流程简单、操作方便、经济性好等优点,目前世界上 90% 以上的氧化铝生产采用该工艺^[1]。氧化铝生产过程涉及许多高温反应,即溶出、蒸发和焙烧等工序都属于热耗工序,通过对这 3 个工序的乏汽、烟气、余热进行回收利用,能够极大地减少氧化铝生产系统的能源消耗,起到节约资源目的。在氧化铝生产总能耗中,溶出和蒸发工序能耗,尤其是蒸汽消耗,占有很大的比重,能否降低这 2 个工序的能耗对于整个氧化铝行业有着重大意义。

文献[2]分析了拜耳法氧化铝生产过程中,进入系统的能源品种、数量,以及各工序蒸汽消耗量的分布。发现蒸汽消耗占能源总量的 60%,蒸发所消耗的蒸汽占系统蒸汽消耗总量的 23.7%,即能量总

量的 14%。贾章椿等^[3]提出利用气冷型吸收式热泵直接回收末效蒸发器的乏汽潜热,使其成为供暖热源,该思路可以对末效乏汽潜热进行回收,但是适用条件有限,即周边居民有供暖需求。

有机朗肯循环系统(organic rankine cycle, ORC)主要由蒸发器、膨胀机、冷凝器、工质泵 4 个部件组成^[4]。热流体通过换热器将热量传给有机工质,有机工质蒸汽驱动涡轮膨胀机进行发电,以工业低温余热为驱动热源,实现热电转换,得到高品位电能。

目前尚未见到有机朗肯循环用于氧化铝行业多效蒸发乏汽余热的回收发电的报道,本文中采用有机朗肯循环发电技术对部分潜热进行回收发电,借助建模仿真手段对该工艺技术进行分析研究,以期氧化铝等高耗能产业应对“双碳政策”节能降碳

收稿日期:2023-02-28;修回日期:2023-10-08

基金项目:魏桥国科低碳技术专项(GYY-DTFZ-2022-016)

作者简介:宋二伟(1989-),男,博士,工程师,研究方向为化工过程技术开发、余热回收利用, songerwei15@mailsucas.ac.cn;王二强(1976-),男,博士,副教授,研究方向为过程工程强化、余热回收利用等,通讯联系人, wangerqiang@ucas.ac.cn。

新思路提供理论及数据支撑。

1 模型搭建及物性方法选择

有机工质作为 ORC 的能量载体,实现了有机朗肯热力学循环,其选择及运行工况对整个工艺流程至关重要,很大程度上决定 ORC 系统的性能。本文中采用 Aspen Plus^[5]商业软件进行氧化铝多效蒸发工艺末效乏汽潜热回收发电工艺流程的模拟,其中物性方法选择对于模拟仿真结果至关重要,直接影响流程收敛与否及计算结果的可靠性。根据本研究物性体系特点,选择 NRTL 物性方程^[6]。

利用 Aspen Plus 自带模块组合搭建氧化铝多效蒸发工艺末效乏汽潜热回收发电工艺模拟模型(见图 1)。本研究中,利用末效乏汽潜热将有机工质加热至过热蒸汽,膨胀机内膨胀后产生的低温过热蒸汽经冷凝器等压冷凝为饱和液相,饱和液相经工质泵增压至过冷液相。

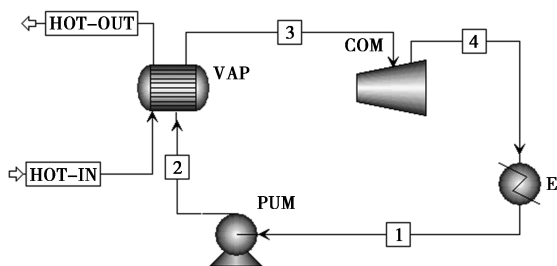
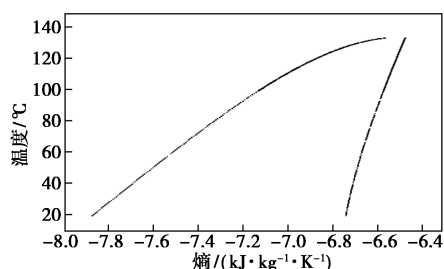


图 1 末效乏汽潜热发电回收工艺模拟模型

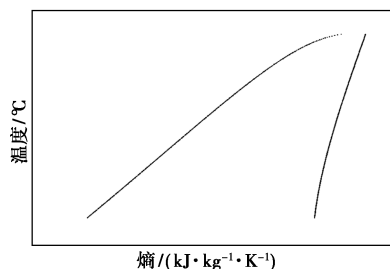
2 工艺模拟及结果分析

基于国内某氧化铝一组多效蒸发工序生产装置现状,末效乏汽参数选择如下:乏汽质量流量 55 t/h,温度 63℃,压力 20 kPa。选择合适的工质不仅要考虑热力学性质以及工质物性,如循环临界温度、运行压力、工质在膨胀机出口状态、化学稳定性等因素,还要考虑所选工质与实际系统设计是否可以匹配。湿流体在膨胀机(或透平)出口可能处于湿蒸汽状态,会冲蚀膨胀机(或透平)的叶片,且考虑到换热器成本问题,本文中选定等熵流体或干流体作为候选工质^[7-8]。通过理论计算及仿真数据分析,得到 R245FA(五氟丙烷)和异丁烷的温熵图(图 2),满足本文中对有机工质的要求。

借助流程模拟软件 Aspen Plus 得到的数据对氧化铝生产多效蒸发末效乏汽潜热进行有机朗肯发电热力学过程进行分析(如图 3)。饱和液相有机工质经过工质泵绝热增压至过冷液相状态点(2),然后



(a) 异丁烷



(b) 五氟丙烷

图 2 2 类有机工质的温-熵(T-S)图

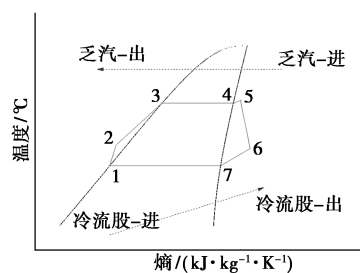


图 3 废气潜热发电有机朗肯循环的温熵(T-S)图

经过蒸发器等压蒸发至过热气相状态点(5),过热蒸汽进入膨胀机绝热膨胀做功进行发电,自身变为低温过热蒸汽(6),低温过热蒸汽经等压冷凝回到饱和液相状态(1),完成一次循环。

为了对多效蒸发乏汽潜热回收发电系统热电转换效率进行衡量,分别从热力学第一定律及热力学第二定律进行分析^[9]。基于热力学第一定律定义净热电转换效率 η_i ,为涡轮机机械做功发电量与工质泵耗电之差占乏汽潜热的百分比,计算公式如下:

$$\eta_i = (W - W_p) / Q \quad (1)$$

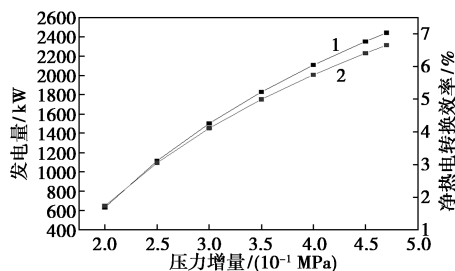
式中, η_i 为净热电转换效率; W 为有机工质气体膨胀做功转化为电能的能量,kW; W_p 为工质泵消耗的能量,kW; Q 为乏汽潜热,kW。

焓效率可从“质”的角度反映出系统在能量传递转化过程中做功能力的高低,ORC 系统的焓效率定义为系统的净输出功率与余热所提供的焓的比值^[10-11]。本研究废热回收目标是对氧化铝生产中多效蒸发末效乏汽潜热进行回收发电,则蒸汽输入系统的焓总量不变,该研究中焓效率变化趋势与净

输出功率一致,不再单独对乏汽潜热回收朗肯循环发电系统进行焓效率分析。

2.1 工质泵出口压力对热电转换效率的影响

如图1工艺所示,冷凝后的有机工质(1)为25℃饱和液相,经过工质泵增压后工质流体变为过冷液相(2)。调整工质泵出口压力保证乏汽潜热完全传递给有机工质,分析工质泵增压数值对净热电转换效率的影响,结果如图4所示。



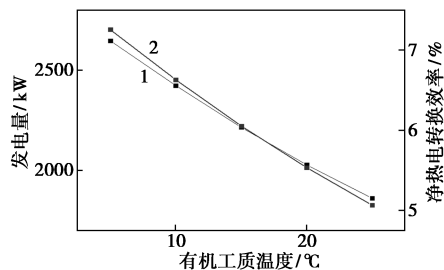
1—发电量;2—净热电转换效率

图4 工质泵压力增量对发电量及净热电转换效率的影响

由图4知,工质泵压力增量在0.20~0.47 MPa之间变化时,随着压力增量的增加,蒸汽出口温度增大,即图3中状态点(3)位置上移,红色区域面积增大,乏汽潜热用来产生的电量增加,且净热电转换效率也随之增大,与热力学基本原理相符合。但是有机朗肯发电是基于过热有机蒸汽推动膨胀机做功,所以经过蒸发器换热后有机工质必须转化为气相,即工质泵压力增量存在极限值。为了获得更大的净热电转换效率,在有效压力增量范围内,应尽量增加工质泵出口压力。

2.2 冷凝温度对热电转换效率的影响

由有机朗肯发电工艺流程知有机工质在系统中打循环,为了进一步研究冷凝温度对热电转换效率的影响,对物流4(图1)的温度进行分析研究,工质泵压降选择0.2 MPa,有机工质为R245FA,结果如图5所示。



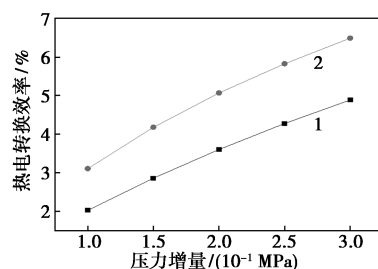
1—发电量;2—净热电转换效率

图5 有机工质冷凝温度对净发电量和净热电转换效率影响

由图5知,有机工质冷凝温度在5~25℃变化时,随着冷凝温度升高,工质泵进口处工质流体温度升高,为保证乏汽潜热能够完全进入有机工质,工质泵出口压力不变,即工质泵压力增量降低,对应工质膨胀做功阶段压力降数值降低,乏汽潜热用来产生的电量降低,净热电转换效率也随之降低,与文献[4]结论一致。但是降低有机工质的冷凝温度存在极限值,如温熵图所示,为保证一定的换热温差(换热面积适中),有机工质冷凝温度不能过低,同时冷凝温度越低,也会造成冷源成本的增加。为了获得更大的净热电转换效率,可以适当降低有机工质冷凝温度,但需要综合考虑。

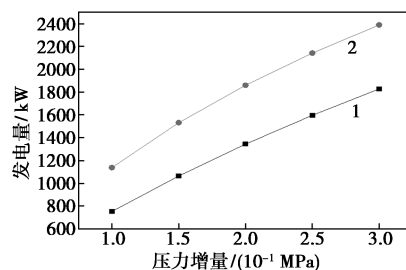
2.3 不同有机工质对热电转换效率的影响

为了进一步研究不同有机工质对热电转换效率的影响,选择异丁烷作为对比工质,工质泵增压相同的条件下,比较2种工质热电转换效率,结果见图6、图7。



1—异丁烷;2—R245FA

图6 不同有机工质对热电转换效率的影响



1—异丁烷;2—R245FA

图7 不同有机工质对发电量的影响

由图6、图7可知,随着工质泵出口压力的增加,乏汽潜热回收发电量及净热电转换效率均增大。相比异丁烷,R245FA对应的发电量及热电转换率更高,但是循环有机工质的用量也较大,即工质泵耗电量增加。因此,在对该工艺进行有机朗肯发电工艺设计时,应充分考虑到不同有机工质的特性,进行有机工质的比选。

3 结论

借助建模与仿真手段对氧化铝生产蒸发器末效乏汽潜热回收利用工艺进行研究,结果表明,末效乏汽潜热可以用来生产优质电能,提高乏汽潜热利用效率的同时生产更好品位的能源。净热电转换效率(发电量)受工质泵出口压力、有机工质种类及有机工质冷凝温度的影响,即在一定范围内,随着压力增量的增加,乏汽潜热用来产生的电量增加,且净热电转换效率也随之增大;有机工质冷凝温度在一定范围内,随着冷凝温度升高,乏汽潜热用来产生的电量降低,且净热电转换效率也随之降低;不考虑循环工质用量的前提下,R245FA 的循环效率比异丁烷更好。为了最大限度提高热电转换效率(发电量),应综合考虑现场工艺条件及操作参数,尽量降低有机工质冷凝温度、提高工质泵出口压力、选择效率更高的有机工质或混合有机工质等。以国内某氧化铝厂为例,某一组蒸发器蒸发原液 800 m³/h,末效乏汽 55 t/h(温度 63℃,压力 20 kPa),该部分乏汽潜热利用有机朗肯循环工艺发电,冷凝温度为 20℃,工质泵压力增量为 0.25 MPa,有机工质选择 R245FA,每小时净发电量为 2 309 kW,年创效 923.6 万元。

在国家双碳政策深入推进下,节能降耗已成为企业生存及增强核心竞争力的关键,尤其对于高能耗企业如氧化铝厂。利用蒸发器末效乏汽潜热进行

回收发电,不仅可以增加系统热利用效率,同时可以得到高品位的电能,具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 毕诗文.氧化铝生产工艺[M].北京:化学工业出版社,2006.
 - [2] 王占兴,李志国,肖枫.拜耳法生产氧化铝过程中几个节能措施分析[J].轻金属,2011,(5):22-24.
 - [3] 贾章椿,陈茂波,毛鹏.氧化铝蒸发工艺末效乏汽的余热回收利用[J].有色冶金节能,2021,37(3):40-43.
 - [4] 叶竹,张云贺.烧结机烟气温度的有机朗肯循环发电[J].材料与冶金学报,2022,21(5):371-375.
 - [5] 孙兰义.化工流程模拟实训:Aspen Plus 教程[M].北京:化学工业出版社,2012.
 - [6] Renon H, Prausnitz J M. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures[J]. AIChE Journal, 1968, 14: 135-144.
 - [7] Györke G, Deiters U K, Groniewsky A, et al. Novel classification of pure working fluids for organic Rankine Cycle[J]. Energy, 2018, 145: 288-300.
 - [8] Badr O, Probert S D, O'Callaghan P W. Selecting a working fluid for a rankine-cycle engine[J]. Applied Energy, 1985, 21: 1-42.
 - [9] 傅献彩.普通高等教育十五国家级规划教材:物理化学(上)[M].北京:高等教育出版社,2005.
 - [10] Rad, Ehsan, Amiri, et al. Energetic and exergetic optimized Rankine cycle for waste heat recovery in a cement factory[J]. Applied Thermal Engineering Design Processes Equipment Economics, 2018, 132: 410-422.
 - [11] 沈维道,童钧耕.工程热力学[M].北京:高等教育出版社,2007: 173-174. ■
- (上接第 208 页)
- ### 参考文献
- [1] Tian X, Zhang X, Wei L, et al. Multi-scale simulation of the 1,3-butadiene extraction separation process with an ionic liquid additive[J]. Green Chemistry, 2010, 12: 1263-1273.
 - [2] 赵蕾.丁二烯萃取精馏的模拟研究及优化分析[D].上海:华东理工大学,2014.
 - [3] Yang X, Yin X. Simulation of 1,3-butadiene production process by dimethylformamide extractive distillation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, 17(1): 27-35.
 - [4] Kim Y, Kim S, Lee B. Simulation of 1,3-butadiene extractive distillation process using N-methyl-2-pyrrolidone solvent[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2012, 29(11): 1493-1499.
 - [5] Manting J, Anton A. Enhanced process for energy efficient extraction of 1,3-butadiene from a crude C₄ cut[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 267: 118656.
 - [6] 白锦川.丁二烯萃取精馏装置工艺设计及模拟优化分析[D].兰州:兰州理工大学,2016.
 - [7] 李家乐,秦胜,陈豹,等.乙腈法丁二烯装置溶剂含水量的控制优化研究[J].当代化工,2019,48(12):2904-2907.
 - [8] Jugal N, Dnyaneshwar R, Jitendra S. Effect of guest-dependent reference hydrate vapor pressure in thermodynamic modeling of gas hydrate phase equilibria, with various combinations of equations of state and activity coefficient models[J]. Fluid Phase Equilibria, 2022, 556: 113356.
 - [9] 王益龙.以无限稀释活度系数估算 C₄-DMF 体系 Wilson 方程二元参数[J].炼油技术与工程,2021,51(11):38-42.
 - [10] Chen J, Cui C, Liu S, et al. Design of an energy saving ACN-based butadiene production process by using dividing wall columns[J]. Chemical Engineering Transactions, 2018, 69: 415-420.
 - [11] Si Z, Chen H, Cong H, et al. Energy, exergy, economic and environmental analysis of a novel steam-driven vapor recompression and organic Rankine cycle intensified dividing wall column[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 295: 121285.
 - [12] Wang M, Li L, Wang E. Purification of methyl isobutyl ketone via dividing wall column with an internal boiling point of a heterogeneous azeotrope[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2022, 179: 109053.
 - [13] 杨德明,蒋宇,朱碧云,等.带中间再沸器的大温差体系热泵精馏工艺[J].化学工程,2017,45(1):1-4.
 - [14] Shi T, Liu Y, Yu H, et al. Improved design of heat-pump extractive distillation based on the process optimization and multi-criteria sustainability analysis[J]. Computers and Chemical Engineering, 2022, 156: 107552. ■