

余热发电在“双闪”铜冶炼中的应用

师立文

(中铜东南铜业有限公司, 福建 宁德 352100)

摘 要 在铜冶炼过程中产生的高温烟气通常被视作工业废汽处理, 而实际上这些烟气蕴含大量可利用的热能, 通过引入余热发电机组, 可以有效回收这部分热能, 转化为电能供冶炼厂自用, 从而实现能源的高效利用和成本节约。本文探讨了余热发电机在铜冶炼中的应用, 通过对余热资源的综合分析和梯级利用原则的探讨, 旨在为使高品质余热资源得到充分利用提供借鉴。

关键词 余热发电机; 铜冶炼; 能源效率; 节能减排

中图分类号: TM617; TF81

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.08.022

0 引言

随着全球对环境保护和资源节约的日益重视, 传统工业进程中的能效提升和废热利用成为关键议题。铜作为重要的工业金属, 其冶炼过程能耗高且伴随大量余热排放。中铜东南铜业有限公司是采用先进工艺“双闪”冶炼技术工艺, 闪速熔炼及闪速吹炼炉产生大量高温蒸汽, 硫酸一系列二系列锅炉也产生大量蒸汽, 为了有效利用蒸汽及降低生产成本节约能源, 尽管有部分蒸汽用于职工生活洗澡, 但大部分蒸汽未能得到有效利用而直接排空, 造成能源浪费和热污染。为解决这一问题, 中铜东南铜业有限公司采用了 CB5-5.1/1.7/0.7 抽背式汽轮发电机组和 SN9-0.6 凝汽式汽轮发电机组, 研究表明, 抽背式供热机组是从汽轮机的中间级抽取部分蒸汽, 供需要较高压力等级的热用户, 同时保持一定背压排汽, 供需要较低压力等级的热用户使用的汽轮机^[1]。余热发电技术不仅提升了铜冶炼企业的生产效率, 还符合环保要求, 有助于实现可持续发展目标。

1 余热发电机在铜冶炼厂的应用

以中铜东南铜业有限公司为例, 年产 40 万吨高纯阴极铜、146 万吨硫酸。该系统工艺流程采用目前世界上最先进、成熟、环保的“双闪”工艺, 该工艺主要具有技术先进、装备水平高、自动化程度高、节能、环保、高效等特点^[2]。通过综合分析和优化设计, 在生产过程中, 蒸汽进入高中低管网; 高压管网压力 5.1 MPa、中压管网压力 1.6 MPa、低压管网压力 0.6 MPa 三条饱和蒸汽管线。在生产过程中每个余热锅炉产生大量饱和蒸汽的同时也为生产提供保障, 最大限度地减少能源浪费。此外, 采用智能控制技术对余热回收

系统进行实时监控和调节, 进一步提高系统的运行效率和经济性。

1.1 高压蒸汽系统

1.1.1 高压蒸汽产户

高压蒸汽管网主要由熔炼炉产气量最高可达 78 t/h, 烟气出口温度 360 °C, 吹炼炉产气量约为 22 t/h, 烟气出口温度 360 °C 提供, 熔炼吹炼产汽锅炉额定压力为 5.5 MPa, 并网后通过高压蒸汽管网进入 6 MW 抽背式汽轮机组用于发电, 再通过高压减中压阀进入中压管网和低压管网供其余设备使用。

1.1.2 高压蒸汽用户

高压蒸汽能将部分蒸汽抽出用于供热或其他工业过程, 同时剩余蒸汽继续驱动汽轮机发电, 实现了能源的梯级利用, 提高了能源总体利用效率。可根据不同的热负荷和电负荷需求, 调整抽汽量和发电量, 在一定程度上能适应负荷的变化。在满足工业用热需求的同时还能发电, 可降低能源成本, 提高经济效益。一台为进汽压力 5.1 MPa(a)、6 MW 的抽汽背压式汽轮发电机组, 额定进汽量为 100 t/h, 抽取 25 ~ 50 t/h 压力为 1.6 MPa 的蒸汽用于冶炼工艺, 剩下的蒸汽通过中压减低压阀以 0.6 MPa(a) 的压力输出供其余设备使用。

1.2 中压蒸汽系统

1. 中压蒸汽产户。中压蒸汽管网额定压力 1.6 MPa, 由硫酸 1 吸 1 锅炉和 2 吸 1 锅炉产蒸汽输送到中压管网, 产气量也在 21 t/h 左右。

2. 中压蒸汽用户。中压蒸汽主要用于精炼工区铜精矿的蒸汽干燥, 两台干燥机的用气量约 43 t/h, 其余的蒸汽输送至宝钢制氧站使用, 用气量约 2 t/h。

1.3 低压蒸汽系统

1. 低压蒸汽产户。低压管网额定压力 0.6 MPa, 也有来自硫酸 1 吸 2 锅炉、1 吸 3 锅炉和 2 吸 2 锅炉 2 吸 3 锅炉 4 台低压锅炉产汽, 其产气量也在 20 t/h 左右。

2. 低压蒸汽用户。低压蒸汽用于除氧器加热使用约 16 m³/h; 硫酸环集脱硫使用约 12 t/h; 电解工区用汽: 电解净液、电解硫酸镍、电解东整流和电解西整流用汽阶段用气 25 t/h; 宝钢制氧站用汽: 厂前区洗澡加热用汽。大部分蒸汽再进入下一级的凝汽式 9 MW 汽轮发电机组发电。

2 余热发电的基本工艺原理

在该工艺中, 熔炼炉和吹炼炉产生的高温烟气是余热发电系统的主要热源。汽轮发电机组是将余热锅炉产生的蒸汽所携带的热能转换成机械能进而转化成电能的发电装置; 按照蒸汽进汽参数分为过热蒸汽汽轮机组和饱和蒸汽汽轮发电机组。中铜东南铜业有限公司设有两台饱和蒸汽汽轮发电机组: 一台为进汽压力 5.1 MPa(a)、6 MW 的抽汽背压式汽轮发电机组, 额定进汽量为 100 t/h, 抽取 25~50 t/h 压力为 1.6 MPa 的蒸汽用于冶炼工艺, 剩下的蒸汽以 0.6 MPa(a) 的压力排出, 一部分进入低压蒸汽管网供电解厂及职工生活洗澡, 剩余蒸汽再进入下一级的凝汽式 9 MW 汽轮发电机组发电, 同时回收做功的凝结水最后又进入除氧器。与 10 kV 空压站配电室 10 kV 供电线路并网, 经过输电线路供企业设备用电。这种技术不仅提高了能源利用效率, 还减少了废热排放对环境的负面影响, 实现了能源的梯级利用。

3 余热发电机的优势

在现代工业能源利用领域, 抽汽背压式汽轮发电机和凝汽式汽轮发电机占据着重要地位。抽汽背压式汽轮发电机, 其工作原理是从汽轮机中间级抽出部分蒸汽, 对外供热, 同时排汽以较高压力排出供工业生产或其他热用户使用^[3]。独特的工作模式赋予了它诸多优点。首先, 能源利用效率高, 因为能充分利用蒸汽的热能, 实现热电联产, 避免能源的单一利用和浪费; 其次, 运行灵活性较好, 可根据不同的热、电负荷需求进行灵活调节, 能适应多种工况变化; 最后, 经济效益较好, 通过合理分配蒸汽热能用于发电和供热, 减少额外的能源消耗, 降低生产成本, 从而为企业带来更高的经济回报。凝汽式汽轮发电机则有着不同的工作特性, 主要将汽轮机排汽在凝汽器中全部冷凝成水, 利用蒸汽的焓降来发电, 其突出优点是发电汽耗率低, 所以在相同的蒸汽量下, 每吨蒸汽能够发出更多的电, 有效提高了发电效率。

在铜冶炼行业中, 余热发电系统是节能减排、提高资源利用效率的关键环节。抽汽背压式汽轮发电机和凝汽式汽轮发电机在该行业的余热发电系统中得到了广泛应用。在铜冶炼过程中, 会产生大量的高温废气, 这些废气若直接排放, 不仅会造成能源的巨大浪费, 还会对环境产生严重污染。而余热发电系统利用这些废气的热量产生蒸汽, 驱动抽汽背压式和凝汽式汽轮发电机发电, 不仅有效减少了废气散热造成的能源浪费, 将原本白白流失的热量转化为电能, 还降低了因废气排放带来的环境污染。

从实际运行数据来看, 这套余热发电系统成效显著, 其能源回收效率大幅提高, 为企业带来了显著的经济效益, 降低了企业的用电成本, 增加了额外的电力收益。同时, 环境效益也十分突出, 减少了废气排放对空气的污染, 践行了绿色发展理念。此外, 随着科技的不断进步, 智能控制系统在余热发电系统中得以应用^[4]。通过该系统, 能够实现对整个余热发电系统的实时监控, 及时发现运行中的问题和隐患, 还能对系统进行优化管理, 根据实际工况调整设备运行参数, 确保系统的长期稳定运行, 进一步提升能源利用效率和发电稳定性。

4 余热发电系统的技术经济分析

4.1 投资成本分析

余热发电系统的投资成本主要包括设备购置、安装调试、工程建设和其他相关费用。以抽汽背压式汽轮发电机和凝汽式汽轮发电机系统为例, 其投资成本涉及以下几个方面:

1. 设备购置: 抽汽背压式汽轮发电机和凝汽式汽轮发电机及相关辅助设备。根据市场调研数据, 一套完整的抽汽背压式汽轮发电机系统设备造价约为 1 300 万元。一套完整的凝汽式汽轮发电机系统设备造价约为 2 400 万元。

2. 安装调试: 设备运输、安装及调试费用, 约占设备购置费用的 10%~15%, 即 370 万至 550 万元。

3. 工程建设: 包括土建工程、管道铺设、除氧器及给水系统、电气系统建设等, 约占总投资的 20%~30%, 即 740 万至 1 110 万元。

4. 其他费用: 涵盖工程设计、环保措施及不可预见的费用等, 约占总投资的 10%~20%, 即 370 万至 740 万元。

综合考虑以上各项因素, 两套背压式汽轮发电机和凝汽式汽轮发电机余热发电系统的总投资约为 5 180 万至 6 100 万元。

4.2 运营成本与维护费用

余热发电系统的运营成本主要包括燃料费用、人

工成本、维护保养费用以及相关的管理和环保支出。具体如下:

1. 燃料费用: 余热发电系统利用的是铜冶炼过程中产生的废热, 理论上不需要额外的燃料供应, 因此燃料费用几乎为零。

2. 人工成本: 系统运行和维护需要专业技术人员, 人工成本每年约为 350 万元。

3. 维护保养: 设备的定期检修和维护费用, 按照设备购置费用的 3% 计算, 每年约为 110 万元。

4. 管理和环保支出: 包括环保设施运行费用、监测费用及管理费用等, 每年约为 150 万元。

综上, 一个式汽轮机余热发电系统的年运营成本约为 610 万元。

4.3 经济性评价与风险分析

4.3.1 经济评价

余热发电系统经济性的指标主要包括内部收益率、投资回收期 and 净现值等。假设项目总投资为 1 亿元, 年运营收入增加 5 000 万元, 年运营成本为 650 万元:

1. 年发电量: 估计在 5 782 ~ 5 976 万度之间。

2. 收益: 按 0.5 元一度电计算: 2 891 ~ 2 988 万元。

3. 投资回收期: 约为 3 ~ 4 年。

4.3.2 风险分析与应对策略

1. 技术风险: 余热发电技术依赖于高效稳定的设备运行, 操作人员的操作方式错误会给设备带来极大的损失。管网波动低存在优先供应其他分厂用汽从而使机组存在解列停机状态。时间长存在低压管网压力不足使凝气式汽轮机推力瓦磨损加剧, 动静部分磨损, 叶片损伤, 汽轮机金属部件产生永久性变形, 金属产生裂纹, 影响汽轮机使用寿命^[6]。为有效应对技术风险, 需要定期进行技术升级, 引入先进的余热发电技术和设备, 提高设备的稳定性和可靠性^[6]。同时, 加强人员培训, 组织操作人员参加专业技能培训课程, 提升其操作水平和应急处理能力。此外, 建立完善的设备维护制度, 定期对设备进行全面检查、保养和维修, 及时发现并解决潜在的设备问题。

2. 政策风险: 环保法规、政策的变化可能对余热发电项目的运营成本产生重大影响。例如, 新的排放标准可能要求企业投入更多资金用于环保设备的升级和改造, 进而满足更严格的废气、废水排放要求。能源政策的调整也可能影响余热发电的上网电价和补贴政策, 降低项目的收益。对此, 企业应积极关注政策动向, 设立专门的政策研究小组, 及时收集和分析相关政策法规的变化。根据政策变化, 及时调整项目的

运营策略, 提前做好环保设备的升级规划和资金准备, 合理安排生产计划, 降低政策变化带来的不利影响。

3. 运营风险: 管理制度不完善是导致运营风险的主要因素之一。如果缺乏健全的运维管理制度, 在设备巡检、故障处理、物资管理等方面可能出现混乱, 导致设备故障不能及时发现和解决, 物资浪费和丢失等问题, 从而降低运行效率。同时, 缺乏有效的培训体系, 员工的专业技能和责任心得不到提升, 也会影响整个项目的运营效果。基于此, 需建立健全的运维管理制度, 明确各岗位的职责和工作流程, 规范设备操作、维护、检修等环节的工作标准。同时, 完善培训体系, 定期组织员工进行业务培训和安全教育, 提高员工的专业素养和责任意识, 确保项目的高效、稳定运行。

5 结束语

铜冶炼过程中产生大量余热: 这些余热主要集中在熔炼炉、吹炼炉和硫酸工序中。其中, 熔炼炉产气量最高可达 78 t/h, 烟气出口温度 360 °C, 吹炼炉产气量约为 22 t/h, 烟气出口温度 360 °C, 硫酸工序的产气量也在 40 t/h 以上。如果不及时加以利用, 将对企业产生巨大经济损失和环境造成严重的热污染。通过引入先进的余热发电系统, 用于自发电, 这不仅减少了能源浪费, 还显著提高了企业的经济效益。余热发电系统的应用减少了二氧化碳等温室气体的排放。同时, 由于余热发电系统使用的是废弃热能, 不消耗额外的燃料, 因此在运行过程中几乎不会产生新的污染物排放。余热发电系统不仅可以为企业提供稳定的电力供应, 还可以降低运营成本。此外, 随着技术的不断进步和设备的日益成熟, 余热发电系统的初始投资成本也在逐渐降低, 经济性更加突出。

参考文献:

- [1] 付怀仁, 宋春节, 丛春华. 燃煤电厂供热改造技术浅析 [J]. 区域供热, 2019(02):74-78.
- [2] 张小红, 朱逸慧. 一流铜业看东南: 记部优工程中铝东南铜业铜冶炼基地项目 [J]. 中国有色金属, 2020(20):44-46.
- [3] 郝宗凯, 夏冰. 试分析热力发电厂汽轮机设备安装与检修 [J]. 能源与节能, 2019(07):159-160.
- [4] 徐礼都. 三钢余热发电技术应用实例与探讨 [J]. 福建冶金, 2024, 53(06):54-58.
- [5] 李健, 宋成. 汽电双驱拖动技术在铜冶炼节能中的运用 [J]. 金属世界, 2024(03):33-38.
- [6] 魏广敬, 辛庚嘉. 浅谈余热发电在“双闪”铜冶炼中的应用 [J]. 设备管理与修, 2022(12):98-99.