

硫酸生产干吸工序低温位余热分布特性研究

于水军

包头华鼎铜业发展有限公司 内蒙古包头

【摘要】硫酸生产干吸工序中低温位余热具有能量密度高、分布集中、吸收效率显著的特征，是提高资源利用率和降低能耗的关键环节。其分布受烟气成分、酸浓分布、温度梯度及热回收塔工况影响，若未有效回收，不仅造成能源浪费，还会加剧设备腐蚀和系统负荷。通过分析分布规律，可揭示形成机制与传递路径，为余热回收利用提供理论支持。研究结果显示，低温位余热呈现阶段性与区域性耦合特征，合理利用可显著提升回收效率，促进清洁生产与节能减排。

【关键词】硫酸生产；干吸工序；低温位余热；分布特性；能量回收

【收稿日期】2025年8月17日 **【出刊日期】**2025年9月20日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250074

Study on the distribution characteristics of low-temperature waste heat in the drying and absorption process of sulfuric acid production

Shuijun Yu

Baotou Huading Copper Development Co., Ltd, Baotou, Inner Mongolia

【Abstract】The low-temperature waste heat generated in the drying and absorption process of sulfuric acid production is characterized by high energy density, concentrated distribution, and significant conversion efficiency, making it a key factor in improving resource efficiency and reducing energy consumption. Its distribution is influenced by flue gas composition, acid concentration distribution, temperature gradients, and the operating status of the heat recovery tower. Without effective recovery, this waste heat not only leads to energy waste but also exacerbates equipment corrosion and system load. By analyzing the distribution patterns, the formation mechanisms and transfer pathways can be revealed, providing theoretical support for waste heat recovery. The research results show that the low-temperature waste heat exhibits coupled stage-specific and regional characteristics, and its rational utilization can significantly enhance recovery efficiency, thereby promoting clean production and energy conservation.

【Keywords】Sulfuric acid production; Drying and absorption process; Low-temperature waste heat; Distribution characteristics; Energy recovery

引言

硫酸作为基础化工原料，其生产过程能耗高、能量利用率低，一直是行业亟待解决的问题。干吸工序是硫酸生产中的关键环节，过程中产生的大量低温位余热若未被合理利用，不仅会造成显著的能源浪费，还可能引发设备运行效率下降和环境负荷增加。近年来，随着节能降耗和绿色制造理念的深入推进，低温余热的有效分布研究逐渐成为学术界与工程界的关注焦点。系统揭示干吸工序低温位余热的分布特性，有助于明确其形成机制和影响因素，为开发高效回收技术提供科学依据。该研究也将为化工企业的能量梯级利用和生

产工艺优化提供新路径，推动行业绿色转型和可持续发展。本文的研究旨在为硫酸工业余热资源化利用提供理论支持和实践参考。

1 硫酸生产干吸工序低温位余热问题的提出与研究意义

在现代硫酸工业生产体系中，干吸工序不仅是确保三氧化硫有效吸收的关键环节，同时也是能耗相对集中的过程。该环节在运行过程中会产生大量低温位余热，这部分能量虽然单点温差较小，但总体能量密度较高，若缺乏有效利用便会造成严重的能源浪费^[1]。由于硫酸生产属于典型的高能耗行业，如何挖掘干吸工

序低温余热的分布特性并实现资源化利用，已经成为推动行业绿色化转型和节能降耗的重要研究课题。低温位余热问题的提出，不仅反映了传统工艺能源利用率偏低的现实局限，也凸显了在“双碳”目标背景下对能量梯级利用和系统优化的迫切需求。

低温位余热的存在，还对设备运行的稳定性和使用寿命产生深远影响。干吸工序中，低温位余热若长期积聚无法有效导出，会导致设备内部形成局部温度失衡的工况。例如，吸收塔内填料层、换热器管壁易因持续处于非设计温度区间，出现材料性能劣化问题，如金属部件的低温腐蚀速率加快，非金属密封件的老化周期缩短。同时，温度波动会破坏工艺参数的稳定性，导致酸浓度控制精度下降，进而引发设备内部结垢、堵塞等故障，增加停机检修频率。这些问题不仅直接降低设备连续运行的可靠性，还会因频繁维护和部件更换，大幅缩短设备整体使用寿命，显著提升硫酸生产的设备运维成本与安全风险。

从更宏观的角度看，研究硫酸生产干吸工序低温位余热的分布规律，还具有重要的社会与环境意义。硫酸作为化工基础原料，其生产规模庞大，能源消耗和碳排放量占比高。在当前强调清洁生产和循环经济的产业背景下，低温余热回收装置可产生0.9mpa低压饱和蒸汽，替代传统电驱设备或发电，为行业实现绿色低碳发展提供可行途径。这一研究能够为化工过程能源利用提供可推广的理论框架，对其他类似的高能耗行业也具备借鉴价值。因此，该问题的提出不仅针对硫酸工业本身，也是化工过程节能减排与可持续发展战略的重要组成部分^[3]。

2 低温位余热的产生机理与分布规律分析

硫酸生产干吸工序中的低温位余热主要源于烟气中SO₃与高温浓酸接触反应释放的反应热与稀释热。当高温气体进入热回收塔时，气液界面发生复杂的对流与扩散作用，热量逐步向塔体壁面及循环酸液传递。由于传热表面积大、气体流速差异明显，导致热量分布并非均匀呈现，而是表现出一定的空间梯度。部分热量在塔顶和塔壁区域聚集，形成典型的低温位余热区。这一机理决定了干吸工序余热并非集中式释放，而是以塔段分布、酸浓梯度驱动的形态存在，给回收利用带来技术挑战^[4]。

从热力学和传热学角度进一步剖析，低温位余热的分布不仅取决于气体组分和温度梯度，还与吸收酸浓度（99.2%~99.6%）和酸温（200~210℃）紧密相关。SO₃与浓酸反应释放的热量集中于热回收塔一段填

料层，使得局部温度出现瞬态上升，而随着气体自塔顶向下流动，逐步失去热量，则在塔体下部形成明显的低温余热富集带。流体力学研究表明，塔内湍流与层流的交替出现，酸液循环速度的波动，以及填料结构的局部阻力效应，都会改变气液接触状态和传热路径，导致余热在纵向、横向上的分布呈现复杂的非均匀性。这种差异性特征表明，低温位余热并非均质存在，而是表现为阶段性、区域性和酸浓耦合性的复合特征，因此在回收与利用环节必须结合不同分布区域制定差异化和精细化的技术方案，以实现能量的高效利用。

在实际运行中，低温位余热的分布还受到工艺参数和设备设计的制约。热回收塔进气温度、酸浓、液气比及蒸汽喷射量等操作条件的变化，都会导致余热传递效率的改变。塔体内填料的结构和布置方式，也直接影响气液接触面积和传热路径。通过对运行工况下的温度场和能量分布进行监测与建模，可以揭示低温位余热在不同工况下的分布特征，为后续的余热回收系统设计提供理论依据。这一规律性的把握，使得余热利用能够由经验性操作转变为科学化调控，提升整体能量管理水平^[5]。

3 干吸工序低温位余热回收与利用的技术途径

干吸工序低温位余热的回收，需要结合其温度区间和分布特征，选择合适的技术路径。由于余热温度普遍处于170~200℃区间，通过蒸汽发生器可稳定产出0.9MPa低压饱和蒸汽，因此必须采用低温余热回收专用装置。高温循环泵将200℃浓酸送入蒸汽发生器，与175℃脱盐水换热，生成低压饱和蒸汽，实现低品位能量的高效回收。蒸汽经升温升压后驱动SO₂主风机，为生产环节提供辅助能源。

利用低温余热驱动吸收式制冷系统已成为近年来研究与应用的重点方向。该技术基于溴化锂吸收式制冷的热力学循环原理，将低温位余热转化为冷量，从而满足厂区空调、生产设备冷却等多种需求，实现了能量的二次利用与梯级利用。此类系统的最大优势在于能够在较低温度条件下稳定运行，不仅降低了对传统电力制冷的依赖，还显著减少了能源消耗和运行成本^[6]。研究人员提出的有机朗肯循环（ORC）技术，为低温余热发电提供了新的解决思路。ORC系统能够以低沸点有机工质作为循环介质，在相对较低的温度区间高效运行，将分散余热转化为电能，提高能源附加值。尽管目前在设备投资和后期维护上仍存在一定经济压力，但随着技术成熟与规模化应用，其在余热利用领域展现出广阔的发展潜力与可持续性前景。

在推广应用过程中，低温位余热的回收利用还需要与工厂整体能量管理系统相结合。通过PLC1500系统实现余热回收全过程自动化控制，构建余热分布数据库与智能化监控平台，可以实现对余热回收效率的实时调控与优化。借助过程模拟和大数据分析技术，能够动态匹配余热供给与能源需求，从而提升余热回收系统的灵活性和适应性。综合考虑工艺安全、设备投资与运行成本，构建分层次、多元化的余热利用体系，既能保障硫酸生产的稳定运行，也能实现显著的节能减排效果。

4 低温位余热分布研究对工艺优化的启示

低温位余热分布规律的研究为干吸工序的工艺优化提供了新的思路。在掌握了余热产生与传递的基本机理后，可以针对性调整工艺参数以改善能量利用效率。优化热回收塔一段酸浓(99.3%)与二段酸浓(98.5%)的配比，使气液接触更为充分，从而在提升吸收效率的同时实现热量的均匀传递。通过调控工艺条件，可以避免局部余热过于集中，减轻设备腐蚀风险，为后续余热回收创造更有利条件。这种基于余热分布特征的工艺调控思路，正在成为行业内的重要优化方向。

低温位余热分布特性的研究不仅停留在理论层面，更在实际工程中为设备选型和系统设计提供了科学依据。在设备应用方面，针对于干吸工序中余热分布不均、局部环境复杂的情况，采用国内某公司研发的特殊耐高温不锈钢材料，可以显著提高设备对酸性冷凝物和温差应力的抵抗能力。在受热集中或易腐蚀区域增加局部防护措施，能够有效延长关键部件的服役周期^[7]。在系统设计环节，结合热力学模拟结果，对蒸汽发生器、脱盐水加热器、蒸发器给水加热器进行合理布置，不仅可以实现余热的多点分散回收，还能通过集中调度提升利用效率。更为重要的是，在工艺规划初期就将余热回收方案嵌入整体流程，实现能量回收与生产过程的深度融合，使系统在安全性、经济性和可持续性方面都得到明显改善。

低温位余热分布研究的深入开展，使化工行业在能源管理理念上发生了显著转变。过去，能源利用的核心关注点多集中在高温高品位能量的回收，而对于低温余热这一“隐性资源”往往缺乏重视，导致大量潜在能源被白白浪费。随着研究的推进，人们逐渐意识到低温位余热不仅数量庞大，而且在通过合理的技术路径转化后，完全能够发挥重要价值^[8]。工厂因此可以在能

源管理体系中建立全流程能源审计制度，将低温余热纳入能源平衡核算，形成覆盖生产、传输、回收各环节的动态管理框架，实现能源的精细化与系统化调控。这一转变不仅显著提升了硫酸生产的整体能效，还为行业构建绿色制造模式、落实节能减排目标和实现可持续发展战略提供了坚实的理论与实践支撑。

5 结语

本研究围绕硫酸生产干吸工序低温位余热展开分析，揭示了其产生机理、分布规律及利用途径。结果表明，低温位余热虽品位较低，却蕴含显著的利用潜力，对提升能源利用效率、保障设备安全运行具有重要价值。通过科学评估其分布特征，并将余热回收融入工艺优化与系统设计，可实现能源的梯级利用与清洁生产。该研究为硫酸工业节能减排和绿色转型提供了切实可行的参考路径。

参考文献

- [1] 黄海,黄小红,刘慧杨,等. 砷钴焙砂生产电池级硫酸钴的工艺[J].电池,2025,55(04):799-804.
- [2] 张成松,王宇佳,王邕舟. 高纯硫酸锰生产工艺分析及选择[J].稀有金属与硬质合金,2025,53(04):30-35.
- [3] 冯芝勇,黄心荣,秦汝勇,等. 硫酸体系 10 kt/a 电积钴的生产实践[J/OL].稀有金属与硬质合金,1-10[2025-09-15].
- [4] 侯欢欢,陈思,祝云飞,等. 新洋丰硫酸生产数字化转型的创新实践和模式构建[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(06):115-120.
- [5] 封培然,宋丽丽. 硫酸法钛白粉生产废水中和试验研究[J].水泥工程,2025,38(03):35-41.
- [6] 杨雄俊,马付云,徐强连. 湿法磷酸生产过程中控制硫酸钙结晶的研究[J].山东化工,2025,54(11):50-52+61.
- [7] 刘庆杰,王双全,冯哲,等. 以粗氯氧化钴为原料生产电池级硫酸钴的实践[J].有色矿冶,2025,41(02):39-41.
- [8] 韩永明. 硫化氢掺烧废硫酸装置的生产实践[J].硫酸工业,2025,(01):40-42.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS