

# 钢铁工业废气余热梯级利用的技术路径探索

顾权荣

宝钢湛江钢铁有限公司, 广东湛江, 524000;

**摘要:** 钢铁工业属于高能耗、高排放行业, 其生产全过程所产废气余热的温度范围宽、品位不一, 若不合理排放, 则会引发能源浪费, 加重环境负担。梯级利用基于“温度对口、能量梯次传递”原则, 可实现余热分级回收、逐级利用, 是钢铁行业节能降碳、绿色转型的关键。本文结合钢铁工业废气余热分布特征与利用现状, 重点探索适配不同品位余热的梯级利用技术路径, 分析技术核心原理与优化方向, 梳理应用瓶颈并提出改进思路, 为企业工程化应用与技术升级提供理论参考, 助力构建节能低碳的能源利用体系。

**关键词:** 钢铁工业; 废气余热; 梯级利用; 技术路径; 节能降碳

**DOI:**10.69979/3041-0673.25.02.101

## 引言

钢铁工业属于国民经济的支柱产业, 还是工业能源消耗与碳排放的重点领域, 它的能源消耗占全国工业总能耗的15%以上, 大约有30%—50%的能耗以余热的形式散失掉, 废气余热占余热总量的40%左右。伴随“双碳”目标逐步推进, 余热的回收利用成了企业降低成本, 增强自身竞争力的必然之举, 当下大多数钢铁企业均采取单一品位回收模式, 存在“高品低用、低品弃用”的情况, 余热利用率比较低, 而梯级利用技术能够按照余热品位来适应不同的利用方式, 做到多种化高效利用。本文聚焦废气余热梯级利用技术路径, 优化适配方案、破解利用瓶颈, 为钢铁行业余热高效回收提供支撑。

## 1 钢铁工业废气余热资源的分布特征与品位划分

### 1.1 废气余热资源的主要分布场景

钢铁生产的每道工序都会产生大量的废气, 其余热资源的分布表现出多场景, 多品位的特点, 烧结工序尾部的烟气温度处于300—450℃之间, 流量比较稳定, 该部分余热占废气余热总量的30%以上, 并含有粉尘和硫化物, 所以要经过预先处理才能实施回收。焦化工序中焦炉烟道气的温度在200—350℃, 并且存在焦炉煤气所含的显热, 其成分繁杂包含可燃物质, 回收的时候务必顾及安全因素。炼铁工序中高炉热风炉产生的烟气温度介于250—400℃, 高炉煤气经由净化之后仍然保留着150—250℃的显热, 这种品位差异很大, 很合适执行分级回收。炼钢及轧钢工序中, 转炉烟气温度800—1400℃(高

品位, 流量不稳定、含尘高), 轧钢加热炉烟气400—800℃(高品位, 成分简单), 轧钢冷却废气80—150℃(低品位), 各类余热构成梯级利用的资源基础。

### 1.2 废气余热的品位分级标准与核心特征

以温度作为核心判定指标, 并结合稳定性与可回收性, 把钢铁废气余热划分成高、中、低三个等级, 其中高品位( $\geq 500^\circ\text{C}$ )大多来源于转炉、轧钢加热炉烟气, 其温度较高, 能量密度较大, 所以可回收价值也比较高, 可以直接转变成高品位能量, 不过它存在流量不稳定、含尘量大、成分复杂等情况, 对于设备的耐温、耐磨、耐腐蚀性能有着很高的要求。中品位(150—500℃)包含大部分工序产生的废气, 属于余热的主要部分, 温度较为合适、流量比较稳定、分布范围很广, 可回收性较强, 可以用于工艺余热或者变成电能, 这既是梯级利用的关键之处, 也是技术改良的重点所在。低品位( $< 150^\circ\text{C}$ )则来自设备冷却以及低温烟道气, 温度较低、能量密度又小, 回收起来十分困难, 其自身所具有的直接价值也比较有限, 但是由于总量很大, 经技术提升后可用于低温供热、工艺伴热。

## 2 钢铁工业废气余热梯级利用的核心技术路径

### 2.1 高品位废气余热梯级利用技术路径

高品位废气余热( $\geq 500^\circ\text{C}$ )的梯级利用重点在于“优先高效转化、逐级降阶利用”, 鉴于其温度高, 能量密度大这一特性, 首先要将高品位热能转化为电能, 剩下的中低品位余热则用于生产工艺预热, 以此达成能量的梯次传递并做到高效利用。这项核心技术依靠余热

锅炉加蒸汽轮机发电形成，再加上高温空气预热技术，创建起“发电-工艺预热”的梯级利用系统。余热锅炉加蒸汽轮机发电技术属于高品位废气余热回收的主要技术，其主要原理就是把高品位废气送进余热锅炉，用它来加热给水从而生成高压蒸汽，然后高压蒸汽推动蒸汽轮机旋转，再由蒸汽轮机带动发电机发电，这样就达成了热能向电能的高效转换。此技术适用于转炉烟气、轧钢加热炉高温烟气等情形，其发电效率可达到18%-22%，可以较为充分地利用高品位余热所蕴含的能量价值。在发电过程中，经过余热锅炉换热后的废气温度会降至300-400℃，此时可将其引入高温空气预热器，用来预热炼钢和炼铁流程所需要的燃烧空气，从而改善燃烧效率并缩减燃料用量，做到余热的二次利用。对于转炉烟气流量起伏较大的情况，可以采用蓄热式余热回收技术，利用陶瓷蓄热体轮流吸收和释放热量来稳定余热供应，防止发电系统频繁开关机，进而巩固梯级利用系统的稳定性。

## 2.2 中品位废气余热梯级利用技术路径

中品位废气余热（150-500℃）属于钢铁工业废气余热的主要部分，其梯次利用的关键在于“契合生产需求并多种化协同利用”，鉴于这部分余热具有温度适宜、流量稳定的特性，主要被用来作为生产工艺的预热源，剩下的低品位余热则用以满足供暖、制冷之类的辅助需求，从而形成“工艺预热-辅助供热”这样一种梯次利用的架构，最大程度上符合企业和居民生活方面的需求。其中所包含的核心技术涵盖热媒式换热器预热技术、有机朗肯循环（ORC）低温发电技术以及吸收式热泵技术等等，按照余热的品位高低和利用目的的不同来灵活地加以融合运用。温度在300-500℃范围内的中高品位细分余热，比如烧结机环冷机烟气，焦炉烟道气等，可以利用热媒式换热器预热技术，通过导热油等热媒介质吸收废气余热，再将热媒输送至烧结混合料预热、焦炉煤气管网预热等工序，替代传统燃料加热，减少能源消耗，该技术换热效率高、运行稳定，能够精准匹配生产工艺的温度需求，可降低燃料消耗30%左右。对于温度150-300℃的中低品位细分余热，若企业有电能补充的需求，就可以采用有机朗肯循环（ORC）低温发电技术，选择低沸点有机工质，依靠废气余热来加热工质使其蒸发生成高压气体，进而推动ORC涡轮机发电，这种方法不需要高压蒸汽系统，占地面积小、安全风险也低，发电效

率能达到15%-18%，很合适场地受限的老厂改造。

## 2.3 低品位废气余热梯级利用技术路径

低品位废气余热（<150℃）虽然能量密度小、直接利用价值有限，但总量较大，其梯级利用核心是“品位提升、规模化利用”，通过技术手段提升余热品位，适配低品位需求场景，构建“品位提升-多元适配”的梯级利用体系，实现余热资源的最大化回收。核心技术包括吸收式热泵技术、相变储热技术、低温换热供暖技术等，重点解决低品位余热回收效率低、利用场景有限的问题。吸收式热泵技术是低品位废气余热品位提升的核心技术，其核心原理是利用低品位余热驱动热泵系统，将环境中的低位热能与废气余热相结合，提升至可用的中低温热能，用于厂区供暖、生活热水供应、工艺伴热等场景，该技术可实现余热品位的跨级提升，换热效率高，能够有效利用80-150℃的低温废气余热，首钢京唐等企业的应用实践已证明，该技术可大幅减少燃煤消耗，提升节能效益。相变储热技术利于解决低品位余热供应不稳定的情况，选取恰当的相变材料，把低温废气余热储存起来，在余热供应短缺或者需求量的时候释放出来，从而做到余热的错峰利用，保证利用过程的连续性，选择相变储热材料的时候要综合考虑储热密度、相变温度和成本，首先应采用成本低而且环保的无机相变材料。此外，针对30-80℃这种超低温余热，可以利用低温换热器直接回收，用在绿化灌溉加温，设备保温加温等方面，还要整合低品位余热源，改善换热设备，控制板式换热器两端差不超过3℃，解决回收不划算、效率低的难点。

## 3 钢铁工业废气余热梯级利用技术的优化策略与发展趋势

### 3.1 策略

#### 3.1.1 技术适配优化：构建差异化梯级利用体系

钢铁企业的各个工序中废气余热的品位，流量以及成分存在很大差别，技术的适配情况会直接左右梯级利用的效率，所以要按照企业的实际生产状况来形成多种不同的梯级利用体系，达成技术与余热资源以及利用需求之间的精确契合。第一，全面地调查废气余热的相关情况，准确把握各个工序废气的温度，流量，成分，波动系数等参数，认清不同品位余热的分布规律及其可回收可能性，给技术选择和体系创建给予数据支持，防止

采取“一刀切”的技术选择方法。第二,对于不同规模、不同生产工艺的钢铁企业来说,制订不同的梯级利用计划,大型钢铁企业可以搭建起包含“高品位发电-中品位工艺预热-低品位供暖制冷”的全过程梯级利用系统,整合好各个工序的余热资源,做到协同利用;中小型钢铁企业应当依照自身余热资源的特性,首先着重于核心工序余热的回收,用“单个品位梯级拓展”的办法,慢慢扩充利用范围,削减投资费用。同时,优化技术组合方式,根据余热品位变化,合理搭配不同回收技术,如高品位余热采用“余热锅炉发电+高温预热”组合,中品位余热采用“工艺预热+ORC发电”组合,低品位余热采用“热泵提升+相变储热”组合,提升技术协同效应,最大化发挥余热价值。

### 3.1.2 系统协同优化:提升梯级利用整体效能

钢铁工业废气余热梯级利用并非单一技术、单一系统的独立运行,而是需要各工序、各系统的协同配合,因此需加强系统协同优化,打破各回收系统的壁垒,提升梯级利用的整体效能。其一,搭建起统一的余热资源调度平台,依靠物联网、大数据、人工智能等技术,及时监测各工序废气余热的产生量、温度变化情况,还有各个回收系统的运行状况,达成余热资源的智能调度和恰当分配,按照生产负荷和利用需求,随时调节余热流动方向,保证高价值利用情形,防止余热被浪费掉。其二,促使余热利用系统深入融入钢铁生产工艺系统当中,把余热回收利用纳入生产工艺全过程的计划里面去,改良生产工艺的相关参数,做到余热产生和利用相适应,比如调整烧结机、加热炉的运行参数,缩减余热的损失,改良余热的品质,而且还要改良余热回收设备的设置,减小换热管道的长度,削减管道散热造成的能量损失。此外,加强企业内部多能源协同,将废气余热梯级利用与绿电、储能等能源形式相结合,构建“余热、绿电、储能”协同体系,从而稳定余热发电的波动情况,并改进能源供应的稳定性,还要推进余热资源在不同工序,不同区域之间的利用,可以拿钢铁企业的低品位余热给周边社区供暖、工业园区供热,这样就能拓展利用范围,进一步改进余热的综合价值。

### 3.2 未来发展趋势

钢铁行业向绿色低碳方向转变持续深入,智能化技

术极速发展,在此情形下,钢铁工业废气余热梯级利用技术会朝着智能化、低碳化方向发展,渐渐达成余热资源的高效、全量回收利用。智能化层面依靠数字孪生、人工智能、大数据等技术创建余热梯级利用系统的虚拟模型,做到对系统运行状况的及时模拟、故障警报并加以改良控制,经由LSTM神经网络等算法来预估热网负荷,改善调度计划,缩减管网损失,改进系统运行效率;而且,推行智能检测和预测性守护技术,凭借传感器及时采集设备运行的数据,用机器学习算法剖析设备故障风险,预先开展守护工作,削减设备故障率,提高设备利用率。在低碳化方面,聚焦“双碳”目标,优化梯级利用技术路线,提升余热发电比例,替代化石能源消耗,减少碳排放;同时,研发环保型换热材料、相变储热材料,降低技术应用过程中的环境影响,推动余热利用与碳捕捉、碳封存技术的协同发展,构建低碳化的余热利用体系。

## 4 总结

钢铁工业废气余热梯级利用是行业节能降碳、绿色转型的关键,核心是根据余热品位匹配利用技术,实现分级回收、逐级利用。本文分析了废气余热分布特征与利用现状,明确了三品级余热的核心特征与痛点,探索了各品位对应的梯级利用技术路径,提出了技术适配、系统协同的优化策略,展望了智能化、低碳化、规模化发展趋势。研究表明,三品级余热各有适配路径,构建差异化体系、加强协同调度是提升效能的关键。

### 参考文献

- [1]周玉龙.工业企业余热回收与梯级利用技术探索[J].石化技术,2025,32(1):379-381.
- [2]刘莹莹.烧结矿冷却废气余热利用技术应用进展[C]//2023全国冶金烧结绿色低碳关键技术研讨会.中冶北方(大连)工程技术有限公司,2023.
- [3]古晓倩.工业余热回收技术在钢铁行业的应用与效益分析[J].资源节约与环保,2025(10):30-35.
- [4]李晨娜.含工业余热的综合能源系统优化调度[D].东北石油大学,2021.
- [5]原梓洛.基于(火积)耗散的工业余热利用优化实例分析[D].山东建筑大学,2020.