

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

# T/CIEP

## 中国工业环保促进会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

### 工业低温余热回收利用系统技术规范

Technical specifications for industrial low-temperature waste heat recovery and utilization system

草案版次选择

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国工业环保促进会 发布

## 目 次

前言 .....	II
引言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总体原则与要求 .....	2
4.1 总体原则 .....	2
4.2 总体要求 .....	2
5 系统设计 .....	2
5.1 系统分类 .....	2
5.2 系统构成 .....	3
5.3 负荷分析 .....	3
5.4 热力计算 .....	3
5.5 监测与控制设计 .....	3
6 设备选型 .....	5
6.1 设备通用要求 .....	6
6.2 主要设备选型 .....	6
6.3 设备检测标准 .....	8
7 调试与验收 .....	9
7.1 调试准备 .....	9
7.2 系统调试 .....	9
7.3 性能检验 .....	10
7.4 文件验收 .....	10
7.5 验收评审 .....	11
8 运行与维护 .....	11
8.1 运行监控与工况优化 .....	11
8.2 分级维护与保养 .....	11
8.3 安全管理与应急处置 .....	12
8.4 档案与全生命周期管理 .....	12
参考文献 .....	13

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业环保促进会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

## 引 言

在当今能源短缺和环境保护的双重压力下，工业低温余热回收利用作为提高能源利用效率、减少碳排放的重要手段，具有极其重要的意义。工业生产过程中产生的大量低温余热，若能有效回收利用，不仅能降低企业的能源消耗和生产成本，还能减少对环境的热污染，为实现“碳达峰、碳中和”目标做出贡献。然而，在工业低温余热回收利用技术的发展过程中，设备选型、系统集成等方面缺乏科学依据，容易出现设备不匹配、运行故障频发等问题，影响系统的稳定性和可靠性。因此制定《工业低温余热回收利用系统技术规范》，为工业低温余热回收利用领域提供统一的技术准则和操作指南，有助于推动该技术的标准化、规范化发展，促进工业企业的节能减排和可持续发展，对于提升我国能源利用效率、优化能源结构、保护生态环境具有重要意义。

# 工业低温余热回收利用系统技术规范

## 1 范围

本文件规定了工业低温余热回收利用系统的术语和定义、基本规定、系统设计、设备与选型、调试与验收、运行与维护以及安全与环保要求。

本文件适用于以空气/烟气体、水蒸气、液体或固体为载体的工业余热回收利用系统工程，四种载体温度的上限分别为：200℃、150℃、95℃和400℃。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 150.4 压力容器 第4部分：制造、检验和验收
- GB/T 1028-2018 工业余能资源评价方法
- GB/T 2587-2009 用能设备能量平衡通则
- GB/T 10863 烟道式余热锅炉热工试验方法
- GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准
- GB/T 17719-2009 工业锅炉及火焰加热炉烟气余热资源量计算方法与利用导则
- GB/T 18430.1-2024 蒸汽压缩循环冷水（热泵）机组 第1部分：工业或商业用及类似用途的冷水（热泵）机组
- GB/T 22073 工业用热力涡轮机通用要求
- GB/T 26137-2010 高炉煤气能量回收透平膨胀机热力性能试验
- GB/T 28056 余热锅炉技术规范
- GB/T 29542-2013 工业尾气能量回收透平膨胀机
- GB/T 39091 工业余热梯级综合利用导则
- GB/T 40286-2021 低温双循环余热回收利用装置性能测试方法
- GB 50235 工业金属管道工程施工规范
- NB/T 10775-2021 农村户用储热装置
- NB/T 11272-2023 工业锅炉冷态启动与调试技术导则

## 3 术语和定义

GB/T 1028中界定的及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**低温余热 low-temperature waste heat**

常规工业生产工艺系统输出、但通过新增工艺系统可以利用的低品位热能。

注：根据GB/T 39091，利用余热的新增工艺系统通常采用空气/烟气体、水/水蒸气、液体或固体作为工作介质，本文件中介质温度上限分别为200℃、150℃、95℃和400℃。

### 3.2

**余热回收 waste heat recovery**

通过技术手段将工业生产系统中产生的余热进行回收利用的过程。

## 4 总体原则与要求

### 4.1 总体原则

工业低温余热回收利用系统的规划、设计与运行应遵循GB/T 39091中规定及以下基本原则：

- 安全可靠：设计与选型应将安全运行置于首位，确保在各种工况下稳定可靠；
- 技术先进：系统应选用成熟、高效的余热回收技术和余热回收设备，确保技术领先性和能效水平；
- 环保友好：确保系统运行符合环境保护要求，减少污染物排放；
- 经济可行：统筹考虑初投资与运行成本，提高项目经济效益，确保系统投产后具有经济性。

### 4.2 总体要求

#### 4.2.1 余热源要求

余热源要求包括以下内容：

- 应明确余热源来源，全面测定余热源的相态、成分（腐蚀性成分、颗粒物含量等）、温度、流量、压力、物性参数（黏度、表面张力等）及波动范围，为设备材料选择提供依据；
- 余热应连续且稳定，不连续不稳定的余热可使用储热装置储存后利用。

#### 4.2.2 系统要求

系统配置应符合以下要求：

- 主循环泵、核心换热器以及控制系统等关键组件应使用旁路设计，以便在发生故障或维修时能够迅速切换到备用路径，减少停机时间；
- 系统应具备从30%~120%负荷范围内的稳定调节能力，以适应不同季节和生产条件下的负荷变化；
- 对于腐蚀性介质，应采用耐腐蚀材料；
- 应配置数据采集系统，系统应定期记录余热回收量、能耗、设备运行状态，便于后续优化调整。

#### 4.2.3 环保要求

系统环保要求包括以下内容：

- 噪声控制：系统设备噪声应符合GB 12348的要求；
- 废水管理：系统运行产生的废水宜实现零排放；
- 废弃物管理：系统维护保养产生的废弃油脂、化学品等应分类收集，合法处置；
- 节水要求：循环冷却水系统应设计合理，减少水资源消耗；
- 减排核算：建立碳减排核算方法，定量评估系统减排效果。

## 5 系统设计

### 5.1 系统分类

根据余热回收利用的不同目的与不同方式，可将工业低温余热回收系统分为4类，如表1所示。

表1 工业低温余热回收系统分类

分类	能量转化方式描述	典型技术与核心设备	典型应用场景
余热直接回用系统 (内部循环)	余热直接返回原工艺流程内部循环利用，无外部能量形式转换，无额外驱动能耗	工艺管道优化、智能调控阀、内部循环泵	化工反应釜夹套冷却水→预热同一工序进料 钢铁连铸二冷水→钢坯入炉前预热 食品生产线清洗废水→预清洗段回用(经简单过滤)
余热跨系统直接利用系统	通过换热器将余热传递至独立系统，热能形式不变，温度	板式/板壳式换热器(高紧凑度)	电厂循环冷却水(50~70℃)→园区冬季采暖

分类	能量转化方式描述	典型技术与核心设备	典型应用场景
	略有衰减（烟损失小）	热管换热器（防堵塞） 螺旋板换热器（含颗粒介质） 余热锅炉	玻璃窑炉烟气→锅炉给水预热（替代省煤器） 印染废水→新鲜工艺水预热（节水+节能） 烧结环冷机废气（150-200℃）→余热锅炉产汽用于厂区供暖/生料烘干；
余热提温提质利用系统	消耗少量高品位能（电/蒸汽），提升余热温度品位，拓展至更高温度需求场景	压缩式热泵（涡旋/螺杆压缩机） 第二类吸收式热泵（升温型，溴化锂系统） 吸附式热泵（硅胶-水，适用于间歇余热）	数据中心40℃冷却水→70℃建筑采暖（替代燃气锅炉） 纺织厂55℃废水→85℃染色工艺水（年节蒸汽万吨级） 污水处理厂35℃消化液→65℃污泥干化热风
余热转换利用系统	热能转换为其他能量形式（电能、冷能等），实现能量价值跃升	发电类：ORC机组（R245fa工质）、Kalina循环系统（氨水） 制冷类：第一类吸收式制冷机（溴化锂）、吸附制冷机（沸石/硅胶）	发电：水泥窑篦冷机废气（150℃）→厂内补充电力 船舶缸套水（70℃）→船载供电 制冷：化工厂80℃余热→反应釜工艺冷却；

## 5.2 系统构成

工业低温余热回收利用系统的组成部分通常有：

- 余热收集子系统：设备包括余热源接口、传输管道、调节装置等，用于收集工业生产过程中的余热资源，并输送至能量转换系统；
- 能量转换子系统：设备包括热交换器、热泵机组、余热锅炉、涡轮膨胀机、汽轮机等，用于将余热资源转换为可利用的能量形式；
- 能量分配子系统：设备包括热用户接口、能量存储设备、分配系统等，将转换后的能量输送至用户端；
- 智能控制子系统：设备包括传感器、控制器、执行设备、数据采集与监控系统等，用于系统运行状态的实时监控。

## 5.3 负荷分析

系统设计前应对热负荷进行分析，完成如下工作：

- 详细分析热用户温度要求、使用时段及负荷变化规律；
- 采用夹点分析技术优化余热源与用户之间的温度匹配；
- 采用能量平衡分析与水力工况分析确定流量、压力匹配关系；
- 根据温度、流量与压力的匹配关系，确定余热利用系统的技术路线，并初步完成系统边界，划定热力系统范围；
- 对年/季/日负荷变化进行模拟，确定系统调节范围。

## 5.4 热力计算

系统设计时应根据类型选择相应的热力计算标准，如GB/T 1028-2018、GB/T 2587-2009、GB/T 17719-2009等，完成全面的热力计算。

## 5.5 监测与控制设计

### 5.5.1 参数监测

系统应对表2中关键参数进行实时监测，系统监测仪表分为一次仪表和二次仪表两类，其设置、显示与远传应符合下列规定：

- 一次仪表为直接与被测介质接触、完成参数检测或信号转换的现场设备，包括：温度传感器、压力/差压变送器、流量计、液位计、电量传感器、环境传感器等；
- 二次仪表为接收一次仪表信号，完成显示、转换、运算、调节、远传的设备，包括：数字显示仪表、调节器、记录仪、PLC、DCS、上位机、控制柜仪表、多功能电力仪表等。

c) 一次监测仪表的精度、量程和安装位置应满足表 2 的要求。

表 2 关键监测参数与仪表配置要求

监测类别	安装要求	参数名称	精度要求	量程要求	就地/远传要求	控制用途
温度	余热源进出口直管段无涡流	温度 ( $T_1$ 、 $T_2$ )	$\pm 0.5\%$ FS 或 $\pm 0.3^\circ\text{C}$	正常工况 20%~70% FS	就地显示 + 远传至控制室	核心控制、能效计算
	用户侧进出口直管段无涡流	温度 ( $T_3$ 、 $T_4$ )	$\pm 0.5\%$ FS 或 $\pm 0.3^\circ\text{C}$	正常工况 20%~70% FS	就地显示 + 远传至控制室	核心控制、能效计算
	热泵蒸发/冷凝侧	温度	$\pm 0.3^\circ\text{C}$	正常工况 20%~70% FS	就地显示 + 远传至系统	热泵机组安全与优化控制
	关键设备轴承座	温度	$\pm 1.5\%$ FS	正常工况 20%~70% FS	就地显示 + 远传报警	设备安全预警
压力/压差	泵/风机进出口稳定管段	压力 ( $P$ )	$\pm 0.5\%$ FS	正常工况 30%~70% FS	就地显示 + 远传至控制室	设备状态、流量间接判断
	换热器进出口两侧取压	压差 ( $\Delta P$ )	$\pm 1.0\%$ FS	正常工况 20%~80% FS	就地显示 + 远传报警	堵塞预警、清灰控制
	蒸汽/有机工质主管稳定段	压力 ( $P$ )	$\pm 0.5\%$ FS	正常工况 30%~70% FS	就地显示 + 远传至控制室	安全联锁、工况判断
流量	余热源主管, 满足前后直管段;	流量 ( $F_1$ )	$\pm 1.5\%$ FS	常用流量 30%~80% FS	就地显示 + 远传计量	热量计算、负荷调节
	用户侧主管, 满足前后直管段;	流量 ( $F_2$ )	$\pm 1.5\%$ FS	常用流量 30%~80% FS	就地显示 + 远传计量	热量计算、负荷调节
物位	膨胀水箱/储热罐垂直稳定段	液位 ( $L$ )	$\pm 10$ mm	正常液位 20%~80% FS	就地显示 + 远传至控制室	系统补水、安全联锁
	余热锅炉汽包标准液位取源部位	液位 ( $L$ )	$\pm 10$ mm	正常液位 30%~70% FS	就地显示 + 远传 + 联锁	紧急停炉联锁
电力	配电柜内	电量 ( $\text{kW}\cdot\text{h}$ 、 $\text{kW}$ )	0.5S 级	按额定容量配置	仅远传 (柜面显示)	电量统计
状态	泵/风机本体及变频器; 信号取自控制回路	运行状态、频率	—	—	仅远传	设备启停、频率控制

监测类别	安装要求	参数名称	精度要求	量程要求	就地/远传要求	控制用途
环境	通风良好无热源直射区域	环境温湿度、CO	±0.5℃； ±3%RH； ±1%RD	覆盖环境极值	远传至上位机	系统运行工况修正

### 5.5.2 控制系统

控制系统包括以下内容：

- a) 温度控制：在稳态工况下，用户侧出口温度控制偏差不应大于 1.5℃；
- b) 压力控制：应设置设备静态和工作状态下的压力和压差值，并宜以设计压力的 90%作为报警值（锅炉除外）；
- c) 流量控制：应设置最低流量保护，防止换热器干烧、泵空转、汽蚀和介质滞留导致的设备腐蚀加剧问题；
- d) 设备控制：
  - 1) 宜具备远程启停功能和负荷显示功能，应能接收主机的故障报警信号，并触发系统级联停机；
  - 2) 从操作员指令发出到现场执行器开始动作应小于等于 2s。
- e) 安全连锁：安全仪表系统应独立于基本过程控制系统，其设定值应为不可随意修改的硬保护值，关键设备关键安全连锁设定参数见表 3；
- f) 数据采集：
  - 1) 模拟量数据采集周期应小于等于 500ms；开关量采集周期应小于等于 100ms；
  - 2) 操作界面中动态数据刷新周期应小于等于 2s；
  - 3) 所有过程变量历史数据存储时间大于等于 3 年，事故追忆数据精确到毫秒级。

表 3 设备与选型关键安全连锁设定参数

连锁保护项目	监测点	报警值	连锁动作值	核心连锁动作
超温保护	用户侧出口	SP + 3℃	SP + (5℃~8℃)	关闭余热源切断阀，打开旁通阀
超压保护	系统最高压力点	设计压力的 90%	设计压力的 95%~100%	停泵/风机，开启安全阀
低温防冻保护	用户侧/蒸发器	5℃	3℃	启动电伴热，停循环泵
液位超低	膨胀水箱/储热罐等	低报：20%	低低报：10%	连锁启动补水泵
液位超高	膨胀水箱/储热罐等	高报：80%	高高报：90%	连锁停止补水泵
电机过载	泵/风机	—	电流超过设定值	立即断电，声光报警
易燃易爆介质浓度保护（含煤气）	易燃易爆介质储存、输送及使用区域	爆炸下限的 25%（LEL）	爆炸下限的 50%（LEL）	触发声光报警，上传信号至值班室；切断介质供应，启动防爆通风设备，必要时联动系统停机

## 6 设备选型

## 6.1 设备通用要求

所选设备应符合以下要求：

- a) 具备用户规定的负荷特性，设计工况下的满足性能要求。设备出厂前应完成制造商性能试验，并提供出厂性能测试报告；对系统关键核心设备，应按要求进行第三方性能检测，并提供第三方检测报告；
- b) 设备材质应与余热介质特性适配：腐蚀性介质、含硫烟气、酸性水及固体磨损场景，优先选用耐腐蚀、耐磨材质（不锈钢、钛合金、陶瓷涂层、耐热钢等），保证设备使用寿命，降低维护成本；
- c) 设备选型应综合权衡初投资、运行能耗、维护成本及投资回收期，在保证能效达标、运行稳定的前提下，选择经济性最优的设备型号；
- d) 所有设备应配套对应的监测、控制及安全装置，符合控制系统相关要求，确保设备安全、稳定、高效运行，实现实时监控、数据采集、越限报警及联锁保护。

## 6.2 主要设备选型

### 6.2.1 回用系统设备选型

#### 6.2.1.1 内部循环泵技术要求：

- a) 宜选用低能耗、防堵塞型离心泵；
- b) 泵的流量应、扬程应满足回收余热、输送距离及管路阻力需求，并预留 10%~15%的裕量；
- c) 泵应持手动/自动启停，可与流量、压力仪表联动实现精准调控；
- d) 材质选择应适配介质特性，无腐蚀介质选用碳钢，腐蚀性介质选用 304 或 316 不锈钢，含杂质介质选用耐磨铸铁；
- e) 配套减震底座及进出口阀门，便于检修维护。

#### 6.2.1.2 智能调控阀技术要求

- a) 宜采用电动调节阀；
- b) 阀门的调节精度应不低于 $\pm 1.0\%$  FS，调节范围应在 0~100%范围内连续可调，响应时间不超过 2s。
- c) 阀门的防护等级不低于 IP65，可适应工业现场复杂环境；
- d) 支持 4mA~20mA 模拟量信号，能与控制系统联动调控。
- e) 阀体材质选用碳钢或不锈钢，阀芯选用不锈钢，腐蚀性场景可选用哈氏合金阀芯。
- f) 配套位置反馈装置，实时反馈阀门开度。

#### 6.2.1.3 简易过滤设备技术要求：

- a) 选用精密过滤器或篮式过滤器，过滤精度根据介质杂质含量调整，设计压力不低于系统工作压力的 1.25 倍。
- b) 运行过程中压差应控制在 0.1MPa 以内，支持在线排污或拆洗操作。
- c) 壳体材质选用碳钢或不锈钢，滤芯选用不锈钢滤网或 PP 熔喷滤芯。
- d) 配套压差监测仪表，当压差超标时及时发出报警信号。

### 6.2.2 直接换热系统设备选型

#### 6.2.2.1 热交换器选型

主要热交换器类型及适用场景见表4。

表 4 主要热交换器类型及适用场景

类型	核心特点	最佳适用场景
板式换热器	传热效率高，结构紧凑	清洁流体，空间受限的改造项目

类型	核心特点	最佳适用场景
管壳式换热器	耐高压、高温，结构坚固	高温、高压及含颗粒物的场合
热管式换热器	传热效率高，等温性好，源汇分离	气-气能量回收，防交叉污染场合

#### 6.2.2.2 板式/板壳式换热器技术要求

板式/板壳式换热器选型包含以下内容：

- 水-水换热场景下宜选择板式/板壳式换热器；
- 换热器传热系数不低于  $1500\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ，温度范围不宜超过  $-20^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 、压力不低于  $1.6\text{MPa}$ ，泄漏率应不大于  $1\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ ；
- 换热器宜采用防堵塞设计，如采用板片间距控制在  $3\text{mm} \sim 5\text{mm}$  的宽流道方案。
- 换热器采用可拆卸式结构，便于清洗检修。
- 腐蚀性介质场景换热器板片材应根据介质类型选用不锈钢或钛合金，以满足防腐要求；
- 换热器密封垫宜选用丁腈橡胶、氟橡胶等具备耐高温、耐腐蚀性能的材料。

#### 6.2.2.3 热管换热器

选用重力式或吸液芯式热管换热器，传热温差不超过  $5^{\circ}\text{C}$ ，设计温度范围为  $50^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ ，适配中低温烟气余热回收。热管工质选用碳钢-水，适配中低温场景；流道设计光滑，不易积灰，配套灰斗便于排灰，换热效率不低于  $85\%$ 。热管材质选用碳钢或不锈钢，壳体选用碳钢，换热管选用不锈钢。

#### 6.2.2.4 螺旋板换热器

采用螺旋形流道设计，流道宽度为  $10\text{mm} \sim 20\text{mm}$ ，适配含颗粒介质余热回收；气-水换热场景下，传热系数不低于  $800\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ，设计温度范围为  $-30^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ ，设计压力不低于  $1.6\text{MPa}$ 。流道无死区，便于机械清灰，泄漏率不大于  $1\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$ 。壳体材质根据介质腐蚀性选择，无腐蚀场景选用碳钢，轻度腐蚀场景选用不锈钢，螺旋板选用不锈钢。

#### 6.2.2.5 余热锅炉

余热锅炉选型应符合 GB/T 28056 中要求，根据余热温度及介质特性，合理选择烟道式、管壳式或直流锅炉等结构形式与布置方式，确保余热回收效率与主工艺系统兼容。材质选择应耐受余热介质特性，普通烟气场景选用优质碳素钢或低合金耐热钢；含硫、腐蚀性烟气及固体颗粒换热场景，受热面应选用耐腐蚀合金材料；固-气混合介质场景，除选用耐磨材质外，还应优化烟气流速与流向设计，降低磨损风险。针对固体介质余热及含尘烟气场景，应配置高效清灰措施。烟气含尘量高时，可配置吹灰器或设计专用清灰门、检修口，确保换热面长期清洁。锅炉本体的烟气阻力应在主工艺风机的能力范围内，宜预留不小于  $15\%$  的压头裕量。

#### 6.2.2.6 固体介质余热直接换热回收设备

宜选用埋管式、螺旋盘管式或板翅式专用换热设备，优先采用间接换热形式，避免固体物料直接冲刷换热面造成磨损或堵塞。设计温度适配固体余热参数，设计压力不低于  $1.6\text{MPa}$ ，传热系数根据换热介质调整。材质选用高强度耐磨耐腐蚀合金，换热管选用耐热钢或陶瓷涂层钢管，壳体选用碳钢并做耐磨防腐处理，耐受固体物料冲刷磨损。结构设计预留清灰、清堵接口，配置刮板式或振动式清灰装置，定期清理换热面附着的固体粉尘或物料，防止传热效率下降。

#### 6.2.2.7 辅助设备

含尘烟气及固体物料换热场景宜配套旋风除尘器，除尘效率不低于  $90\%$ ，阻力不大于  $1500\text{Pa}$ ，壳体选用碳钢并做内壁防腐涂层，配套灰斗及排灰装置，定期清理积灰。各类换热管路及固体换热设备需配套保温设备，保温层厚度不低于  $50\text{mm}$ ，导热系数不大于  $0.04\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，保温后表面温度不超过  $50^{\circ}\text{C}$ ；保温层选用岩棉或玻璃棉，外护板选用彩钢板，接口密封严密，防止热量损耗。

### 6.2.3 提质系统设备选型

#### 6.2.3.1 压缩式热泵

小型场景选用涡旋式压缩机，大型场景选用螺杆式压缩机，额定工况下COP不低于3.5，宜支持变频调节，适配负荷波动场景。压缩机壳体选用铸铁，换热器选用不锈钢，酸性介质场景应做防腐涂层处理，管路选用铜管或不锈钢管。

#### 6.2.3.2 第二类吸收式热泵

可采用溴化锂-水工质系统，额定工况下COP不低于1.7，溴化锂溶液泄漏率不大于 $1 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ 。发生器、冷凝器选用不锈钢，溶液管路选用不锈钢，密封件选用氟橡胶，具备耐溴化锂腐蚀性能。

#### 6.2.3.3 吸附式热泵

可采用硅胶-水工质对。吸附床选用碳钢并做内壁防腐涂层，换热器选用不锈钢，管路选用铜管或不锈钢管。

### 6.2.4 转换系统设备选型

#### 6.2.4.1 发电类设备

##### 6.2.4.1.1 ORC 机组

宜优先选用R245fa环保工质，机组等熵效率不低于80%。设计温度、压力适配余热参数，运行过程中无明显振动和噪音。核心部件选用耐腐蚀材质，蒸发器、冷凝器选用不锈钢，涡轮膨胀机叶轮选用高强度耐腐蚀合金，配套超速保护、振动监测等安全装置。

##### 6.2.4.1.2 Kalina 循环系统

可采用氨水工质对，设计参数应匹配余热介质的温度、压力、流量，运行稳定，可实现连续发电。核心换热设备选用不锈钢，管路做防腐处理。

#### 6.2.4.2 制冷类设备

##### 6.2.4.2.1 第一类吸收式制冷机

可采用溴化锂-水工质系统，设计制冷量适配工艺冷却需求，发生器、冷凝器、蒸发器选用不锈钢，密封件选用氟橡胶，配套冷却塔、溶液泵，保障制冷系统循环稳定。

##### 6.2.4.2.2 吸附制冷机

可采用沸石/硅胶-水工质对，制冷量根据使用需求确定，吸附/解吸周期可调节。吸附床选用碳钢并做防腐处理，换热器选用不锈钢。

#### 6.2.4.3 辅助设备

发电类设备宜配套涡轮膨胀机、发电机及安全保护装置（超速保护、振动监测），涡轮膨胀机选型符合GB/T 22073要求，叶轮等关键部件采用高强度耐腐蚀合金；制冷类设备配套冷却塔、溶液泵，冷却塔散热效率适配制冷负荷，溶液泵运行稳定、无泄漏。所有设备均应配套电量、温度、压力监测仪表，符合控制系统相关要求，实现能量转换过程的实时监控与数据采集。

### 6.2.5 储热装置

储热装置选型应符合以下要求：

- 根据温度和经济性，选择显热储热（如水、导热油、陶瓷）或潜热储热（相变材料）；
- 根据不平衡量和调节需求，确定合理的储热容量；
- 采用高效保温材料，24h 内的热损失率应小于等于 5%；
- 应考虑热应力变化，防止泄漏和变形。

### 6.3 设备检测标准

### 6.3.1 通用检测要求

所有设备在出厂前应进行严格检测，提供产品合格证和检测报告，关键设备应进行第三方检测。

### 6.3.2 检测标准

应按照表5中要求对设备结构、机械性能、电气性能进行检测。

表 5 设备检测项目与要求

设备类型	检测标准	主要检测项目	主要性能要求
热交换器	GB/T 27698.2-2023	传热系数、压降、密封性等	符合设计工况要求
热泵机组	GB/T 18430.1-2024	COP、制热量、输入功率等	COP 达到能效标准
余热锅炉	GB/T 10863	热效率、阻力、排放温度等	热效率不低于设计值
涡轮膨胀机	GB/T 26137-2010 GB/T 29542-2013	等熵效率、轴功率、振动等	等熵效率大于等于 80%
储热装置	NB/T 10775—2021	热容量、热损失、耐久性等	24h 热损失小于等于 5%
注：主要检测项目和要求不代表所有检测项目和要求。			

## 7 调试与验收

### 7.1 调试准备

#### 7.1.1 技术准备

系统调试前应做好以下技术准备：

- 编制详细的调试大纲和实施方案，收集所有与系统相关的技术文件，核对文件与现场的一致性；
- 建立调试组织机构，明确职责分工，提前确定调试的核心参数基准（设计值、安全阈值）及测试方法；
- 提前检查硬件设备、软件程序及辅助系统的完好性；
- 制定详细的调试方案和应急处置预案，确保调试按流程推进，同时能快速应对突发问题；
- 调试技术文件应通过审批手续。

#### 7.1.2 现场准备

系统调试前应做好以下现场准备：

- 清除现场杂物、规整作业区域，防止环境因素（如堵塞、遮挡）影响调试操作或引发安全风险；
- 检查现场设备、管路、仪表的安装状态与完好性，确保硬件无故障、连接无缺陷，避免调试中出现泄漏、卡涩问题；
- 现场安全设施齐全、有效，明确风险区域与防护要求，防止调试中发生人员伤害或设备损坏；
- 备齐调试所需的检测工具、耗材、备用零件，防止因物资短缺导致调试流程中断；
- 明确现场人员分工、沟通机制，划定作业区域，无关人员不得干扰调试流程。

### 7.2 系统调试

不同工艺系统调试应符合表6中内容和以下要求：

- 单机调试：

- 1) 检查设备壳体无变形，裂纹、螺栓紧固无松动，转动部件转动灵活、无异常异响，阀门开关灵活，阀位指示与实际状态一致，配套仪表安装牢固、显示归零，电气接线无松动，绝缘测试合格；
  - 2) 采用手动模式启动设备，进行 2h 的设备空载运行试验，实时监测关键参数；
  - 3) 逐步增加负载至满负荷运行，满负荷运行时间大于 1h，监测参数应符合设计或设备说明书要求。
- b) 冷态调试：
- 1) 对系统管路进行彻底冲洗，直至清洁度合格；
  - 2) 进行气密性试验，检查系统泄漏情况；
  - 3) 检查系统所有仪表的指示和传输准确性。
- c) 热态调试：
- 1) 按 25%、50%、75%、100% 负荷阶段进行调试。逐步提升系统压力、温度至设计值，过程中密切监控设备、管道有无泄漏和变形；
  - 2) 在 100% 负荷下进行 72h 连续运行试验；
  - 3) 记录系统在额定负荷下的关键参数，如流量、压力、温度、能耗等，与设计指标进行比较；
  - 4) 在带负荷状态下，故意触发预设的故障信号（如超温、超压），观察系统反应情况。

表 6 不同工艺系统调试要求

系统内主要设备	调试要求
锅炉	NB/T 11272-2023
压力容器	GB/T 150.4
管道	GB 50235

### 7.3 性能检验

#### 7.3.1 检验程序

性能验收测试应按照 GB/T 40286-2021 执行，主要程序应包括以下内容：

- a) 确认系统状态稳定，仪表准备就绪；
- b) 在额定工况下进行基准性能测试；
- c) 进行部分负荷和变工况测试；
- d) 整理测试数据，计算系统性能指标。

#### 7.3.2 检验标准

检验标准应符合以下要求：

- a) 回收热量大于等于  $95\% \pm 5\%$ ；
- b) 系统 COP 大于等于  $92\% \pm 8\%$ ；
- c) 排放温度达到系统排放温度设计值。

#### 7.3.3 检验报告

检验后应填写检验报告，检验报告应包括以下内容：

- a) 系统简介、设计参数和测试条件；
- b) 测试依据、仪表信息和测点布置；
- c) 原始数据记录和数据处理结果；
- d) 性能评估、问题分析和改进建议；
- e) 检验结论和后续工作建议。

### 7.4 文件验收

系统验收时应提供以下技术文件：

- a) 竣工图：包括系统原理图、平面布置图、管道仪表图等；
- b) 设备资料：包括设备说明书、合格证、维护手册等；

- c) 调试报告：包括单机调试和系统调试记录与报告；
- d) 性能测试报告：由具备资质的第三方出具的测试报告；
- e) 运行维护手册：包括操作规程、维护规程和故障处理指南。

## 7.5 验收评审

系统检验后应组织专家对系统进行全面评审，重点评估技术性能、工程质量、文件完整性、运行可靠性。

## 8 运行与维护

### 8.1 运行监控与工况优化

运行监控应结合现场巡检与智能在线监测，实现对系统运行状态的全维度把控，并根据余热源及用户侧工况变化动态优化运行参数，确保系统能效达标，具体包含以下内容：

- a) 在线监测应依托系统智能控制子系统，对温度、压力/压差、流量、液位、电量等关键参数进行 24h 连续采集，参数超报警值时应立即触发声光报警并推送至值班终端，值班人员应在规定时间内核实处置；
- b) 现场巡检实行分班制，巡检人员需按预设路线检查核心设备（泵、风机、换热器、热泵机组、ORC 机组等）的运行状态，重点排查泄漏、异响、异常振动、阀位偏差等问题，做好巡检记录，异常情况需即时上报并停机排查；
- c) 定期开展系统性能核算，每周完成余热回收量、换热效率、COP、发电量/制冷量等核心指标的计算，对比设计值分析偏差原因；每月结合生产工况，优化负荷调节、流量配比等运行参数，确保系统在 30%~120% 负荷范围内稳定调节；
- d) 针对间歇式余热源或负荷波动较大的场景，结合储热装置运行状态，合理调整系统启停时间和负荷分配，避免介质滞留、泵体空转、设备频繁启停等问题，降低能耗与设备损耗。

### 8.2 分级维护与保养

系统维护保养遵循预防为主、分级实施、按需检修的原则，根据设备类型、运行工况及重要程度，分为日常维护、定期检修、专项维护三类：

- a) 日常维护（每班/每日）：
  - 1) 做好设备及管路的清洁工作，清除表面灰尘、油污、积灰，保持作业区域整洁；
  - 2) 检查泵、风机等转动设备的润滑状态，确保润滑油/脂液位达标、油质无变质，按需补充并做好记录；
  - 3) 对过滤设备、换热器进行压差检查，过滤设备压差超 0.1MPa 时及时在线排污或清洗滤芯；
  - 4) 核实仪表显示与远传数据的一致性，检查阀门、执行器开关灵活度，确保阀位指示与实际状态匹配。
- b) 定期检修（月度/季度/年度）：
  - 1) 月度检修：校准智能调控阀、温度/压力变送器仪器仪表，确保调节精度与检测精度符合要求；检查循环泵、密封件的泄漏情况，对余热锅炉、热管换热器的灰斗进行清灰处理；
  - 2) 季度检修：拆洗板式/螺旋板换热器板片，去除结垢与杂质，恢复传热效率；对压缩机、涡轮膨胀机的轴承温度、振动数据进行复测，检查易损件磨损情况；对储热装置进行密封性检测，确保 24h 热损失率不大于 5%；
  - 3) 年度检修：对系统管路进行壁厚检测与耐压试验，排查腐蚀、磨损隐患；对热泵、ORC 机组等核心设备的内部部件进行拆检，更换老化易损件；全面校准 PLC/DCS 控制系统，确保连锁保护功能准确有效。
- c) 专项维护：
  - 1) 针对含腐蚀性、颗粒物、易燃易爆介质的余热系统，缩短换热器、管路的检查周期，定期进行材质腐蚀检测，及时更换超标部件；
  - 2) 余热锅炉、余热发电设备应按特种设备管理要求，开展专项检测与维护；

- 3) 系统停炉/停机超过 72h 时, 做好管路排空、设备防腐、仪表保护等工作, 重新投运前进行冷态调试, 确认无故障后再逐步提温提压。

### 8.3 安全管理与应急处置

系统运行维护的安全管理应将人身安全与设备安全置于首位, 建立健全安全管理制度, 落实安全责任, 完善应急处置机制, 防范各类安全事故发生:

- a) 制定针对性的安全操作规程, 明确设备启停、负荷调节、检修作业的操作步骤与安全注意事项, 严禁违章操作; 特种作业(有限空间、高处、动火、设备拆检等)应执行作业许可制度, 作业前进行风险评估, 落实现场监护与安全防护措施;
- b) 确保安全设施(安全阀、泄压阀、紧急切断阀、防爆通风设备、消防设施、静电接地装置等)齐全、有效, 安全阀每年至少校验 1 次, 其他安全装置按规范定期检测, 做好检测记录; 危险区域设置明显安全警示标识, 配备必要的防护用品;
- c) 结合系统工艺特点, 编制应急处置预案, 涵盖超温超压、介质泄漏、设备故障、火灾爆炸、触电等常见事故类型, 明确应急组织机构、响应流程、处置措施及应急物资储备; 每年至少组织 2 次应急演练, 根据演练结果及时修订预案;
- d) 对操作人员、维护人员开展岗前及定期安全培训, 培训内容包括设备原理、操作规程、安全知识、应急处置方法, 考核合格后方可上岗; 及时传达工艺调整、设备更新后的安全注意事项, 提升人员安全操作与应急处置能力;
- e) 加强危险介质与废弃物管理, 腐蚀性、易燃易爆、有毒介质的管路应定期检查密封性, 防止泄漏; 维护产生的废弃油脂、废化学品、废旧滤芯等废弃物, 分类收集、密封储存, 交由有资质的单位合法处置, 做好处置记录。

### 8.4 档案与全生命周期管理

应符合以下要求:

- a) 建立系统全生命周期运行维护档案, 实现运行、维护、检修、故障处理等环节的资料可追溯, 为系统后期优化、大修及设备更新提供依据;
- b) 档案内容包括: 系统设计参数、设备技术资料(合格证、说明书、检测报告)、运行记录(巡检记录、参数监测数据、性能核算报告)、维护检修记录(维护时间、内容、人员、设备状态)、故障处理台账(故障现象、原因、处置措施、恢复时间)、安全检测与应急演练记录等;
- c) 所有记录采用电子化与纸质化双重存档方式, 模拟量、开关量等运行数据存储时间不小于 3 年, 事故追忆数据精确到毫秒级, 档案资料专人管理、分类存放, 便于查阅;
- d) 系统运行每 2~3 年进行一次全生命周期评估, 结合运行数据、设备磨损情况、能效变化, 评估系统整体运行状态, 制定大修或设备更新计划, 确保系统能效始终符合设计要求。

### 参 考 文 献

- [1] GB 17167 用能单位能源计量器具配备和管理通则