

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXX—XXXX

纯氢竖炉余热梯级回收与绿电耦合技术导则

Guidelines for integrated heat recovery and green power coupling in pure hydrogen vertical furnaces

（征求意见稿）

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 发 布

目次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 2

5 总则 3

 5.1 总体原则 3

 5.2 总体要求 3

 5.3 系统构成 3

6 余热梯级回收系统 4

 6.1 一般规定 4

 6.2 余热资源分类与品位 4

 6.3 高温段余热回收 4

 6.4 中温段余热回收 5

 6.5 低温段余热回收 6

 6.6 余热回收设备通用要求 6

7 绿电耦合系统 7

 7.1 总体要求 7

 7.2 绿电 7

 7.3 储能系统 7

 7.4 电解水制氢系统 8

8 运行与控制 8

 8.1 自动化与信息化 8

 8.2 运行模式 9

 8.3 报警与联锁 9

 8.4 启停与检修 9

9 安全、环保与职业健康要求 10

 9.1 氢安全 10

 9.2 高温与压力安全 10

 9.3 环保要求 10

 9.4 职业健康 10

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。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件首次发布。

纯氢竖炉余热梯级回收与绿电耦合技术导则

1 范围

本文件规定了纯氢竖炉余热梯级回收与绿电耦合系统（以下简称为“系统”）的总则、余热梯级回收系统、绿电耦合系统、运行与控制、安全、环保与职业健康要求等内容。

本文件适用于以体积分数不低于99%的氢气为唯一还原剂、采用竖炉作为反应器的铁矿石及其他含铁原料直接还原生产系统中，余热回收与可再生能源电力耦合设施的新建、改建、扩建和运行管理。

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（所有部分） 压力容器
- GB/T 151 热交换器
- GB 3836.1 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求
- GB/T 4272 设备及管道绝热技术通则
- GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准
- GB/T 20801.1 压力管道规范 第1部分：工业管道
- GB/T 21109.1 过程工业领域安全仪表系统的功能安全 第1部分：框架、定义、系统、硬件和应用编程要求
- GB 50016 建筑设计防火规范
- GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范
- GB 50177 氢气站设计规范
- GB 50235 工业金属管道工程施工规范
- DL/T 5044 电力工程直流电源系统设计技术规程（附条文说明）
- TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

纯氢竖炉 pure hydrogen shaft furnace

采用高纯度氢气作为还原气源，生产直接还原铁的装置。

3.2

炉顶气 top gas

从纯氢竖炉炉顶排出的、主要含未反应氢气和水蒸气的气体混合物。

3.3

余热 waste heat

在生产经营过程中由某一工艺环节产生、排出，且在当时技术经济条件下未被利用的热量。

3.4

温度品位 temperature grade

表征余热做功能力或可用性的参数，通常以余热载体（烟气、蒸汽、热水、固体物料等）的特征温度划分。

3.5

梯级回收 cascade recovery

根据纯氢竖炉不同部位余热温度、品位、介质特性进行分级利用，实现发电、供热、预热介质的分级回收利用方式。

3.6

绿电 green electricity

来自光伏发电、风力发电、水力发电、生物质发电、核能发电、潮汐能发电等可再生能源产生的电力，无化石能源燃烧碳排放的清洁电能。

3.7

绿氢 green hydrogen

利用绿电通过电解水工艺、生物质制氢等制备得到的氢气，全生命周期碳排放极低，又称可再生能源制氢。

3.8

余热介质 waste heat medium

纯氢竖炉运行过程中产生的高温炉气、炉壁辐射热、冷却水、排汽等携带热量的流体与载体。

3.9

绿电耦合 green electricity coupling

将波动性可再生能源电力通过电气连接、储能、可中断或可调节负荷及控制策略，与电解水制氢、纯氢竖炉及其余热回收系统实现时空匹配与协同运行的技术方式。

3.10

可调节负荷 adjustable load

能够在一定时间尺度内、在允许范围内主动改变用电功率而不影响主体工艺安全的负荷。

3.11

能量管理系统 energy management system; EMS

对电、氢、热、气等多能流进行实时监测、预测、优化调度与协调控制的软硬件系统。

3.12

综合能源利用效率 overall energy efficiency

余热梯级回收与绿电耦合系统输出的全部有效能量（含热量、冷量、功及氢化学能增量）与输入系统的全部一次能量之比。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

BPCS: 基本过程控制系统 (Basic Process Control System)

COP: 性能系数 (Coefficient of Performance)

DRI: 热态直接还原铁 (Direct Reduced Iron)

EMS: 能量管理系统 (Energy Management System)

ESD: 紧急停车系统 (Emergency Shutdown Device)

FGS: 火气系统 (Fire and Gas System)
 GWP: 全球变暖潜能值 (Global Warming Potential)
 ODP: 臭氧消耗潜能值 (Ozone Depletion Potential)
 ORC: 有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle)
 SIS: 安全仪表系统 (Safety Instrumented System)

5 总则

5.1 总体原则

- 5.1.1 安全第一原则。系统设计和运行应将安全生产放在首位, 严格遵守氢气安全、电气安全、热力安全等相关法规和标准, 建立完善的安全防护体系和应急响应机制, 确保人员、设备和环境安全。
- 5.1.2 能效优先原则。应按照能量梯级利用原则, 根据余热资源的温度品位合理配置回收技术路线, 最大化回收利用系统余热资源, 提高系统综合能源利用效率, 降低吨铁能耗和生产成本。
- 5.1.3 绿色低碳原则。还原氢气应优先采用可再生能源电解水制取的绿氢, 系统电力应优先消纳可再生能源电力, 最大限度降低全生命周期碳排放, 实现近零碳生产。
- 5.1.4 系统集成原则。应将纯氢竖炉工艺系统、余热梯级回收系统、绿电耦合系统作为有机整体进行设计和优化, 实现各子系统之间的物质流、能量流和信息流的高效协同。
- 5.1.5 稳定可靠原则。系统设计应充分考虑可再生能源波动性、氢气供应间歇性等因素, 合理配置储氢、储能和备用电源, 保障纯氢竖炉生产的连续性和稳定性, 避免因外部能源波动影响产品质量和生产安全。
- 5.1.6 经济合理原则。在满足技术要求和安全环保前提下, 应进行全生命周期技术经济分析, 优化系统配置和运行策略, 兼顾投资成本和运行效益, 实现技术先进性与经济合理性的统一。
- 5.1.7 智能高效原则。应采用先进的过程控制、在线监测和智能优化技术, 建立覆盖全系统的能量管理系统, 实现运行参数的实时优化和故障的预测性维护, 提高系统智能化运行水平。

5.2 总体要求

- 5.2.1 系统的设计、建设、运行, 除应符合本文件外, 还应符合国家现行有关安全、消防、环境保护、职业健康、电力、压力容器等法律法规和标准的规定。
- 5.2.2 系统设计宜采用“一厂一策”方式, 结合当地资源禀赋、绿电可获得性、电网条件、负荷特性、场地条件和产品方案进行专项论证, 并应编制系统能量平衡表与热经济性分析报告。
- 5.2.3 系统应设置完整的计量与监测体系, 至少覆盖电、氢、热、气、水五类介质。
- 5.2.4 系统宜具备数字化、智能化管控能力, 实现能量流的可视化、预测与优化调度。

5.3 系统构成

系统由以下部分构成:

- a) 纯氢竖炉工艺子系统, 负责核心工艺和余热资源产生:
 - 1) 原料预处理与上料系统;
 - 2) 还原气制备与加热系统;
 - 3) 竖炉反应器;
 - 4) 产品冷却与出料系统;
 - 5) 炉顶气净化与循环系统。
- b) 余热梯级回收子系统, 负责系统余热资源的分级回收和高效利用:
 - 1) 高温余热回收单元: 余热锅炉、蒸汽过热器等;
 - 2) 中温余热回收单元: 还原气预热器、ORC 蒸发器等;
 - 3) 低温余热回收单元: ORC 预热器、吸收式热泵、热水加热器等;
 - 4) 蒸汽管网与凝水回收系统;
 - 5) 辅助换热设备。
- c) 绿电耦合子系统, 负责绿氢制备、储存和供应, 以及绿电与系统用电负荷的耦合匹配:
 - 1) 可再生能源发电单元;

- 2) 电解水制氢单元;
- 3) 氢气纯化与压缩单元;
- 4) 储氢单元;
- 5) 电网交互与配电单元;
- 6) 能量管理系统等。
- d) 配套辅助系统, 负责为各核心子系统的安全稳定运行提供保障:
 - 1) 循环冷却水系统;
 - 2) 仪表空气系统;
 - 3) 氮气吹扫系统;
 - 4) 给排水系统;
 - 5) 消防系统;
 - 6) 通风与采暖系统;
 - 7) 自动化控制系统;
 - 8) 在线监测系统。

6 余热梯级回收系统

6.1 一般规定

6.1.1 余热回收工艺的选择应按下列顺序进行:

- a) 直接利用(预热物料、预热气体);
- b) 间接换热产生蒸汽或热媒;
- c) 余热发电;
- d) 热泵提级利用;
- e) 直接排放。

6.1.2 典型梯级回收流程宜按“高温段→中温段→低温段”的顺序依次设置换热环节, 高温段回收后的余热载体应进入中温段, 中温段回收后再进入低温段, 不应跨级跳过可用品位。

6.1.3 余热回收系统最终排烟温度应根据酸露点、水露点及经济性确定: 含硫烟气排烟温度应高于酸露点温度 20℃ 以上; 纯氢竖炉炉顶气经脱水后排烟温度可低至 80℃, 但应采取防止低温腐蚀的措施。

6.2 余热资源分类与品位

纯氢竖炉系统的余热资源按其载体形态和温度品位可按表1分类, 余热回收系统应根据各类余热资源的特点进行分级回收和梯级利用。

表 1 余热资源分类与品位

品位等级	特征温度t/℃	主要来源	推荐回收方式
I (高温)	>400	竖炉出口高温炉气、热态直接还原铁(DRI)显热	余热锅炉+蒸汽发电
II (中温)	150~400	炉体辐射热、中温循环烟气	中低压蒸汽、工艺介质预热
III (低温)	<150	低温烟气、循环冷却水、环境散热	热水、伴热、ORC、热泵提级

6.3 高温段余热回收

6.3.1 回收工艺

采用热态出料工艺时, 温度为650℃~800℃的热态直接还原铁携带大量高温显热, 应进行回收利用。回收方式应根据下游工艺配置选择:

- a) 余热锅炉冷却方式: 热态直接还原铁进入冷却滚筒或流化床冷却器, 与水或蒸汽进行间接换热, 产生中压或高压蒸汽, 可用于发电、驱动蒸汽轮机或供给其他用汽工序; 蒸汽参数的压力宜为 1.5MPa~4.0MPa, 温度 250℃~400℃;
- b) 惰性气体冷却方式: 热态直接还原铁在密闭冷却器内被循环惰性气体冷却, 加热后的惰性气体进入余热锅炉产生蒸汽, 或直接用于预热入炉原料; 惰性气体循环量应根据冷却负荷计算, 气体出口温度宜控制在 400℃~600℃。

- c) 直接热送方式：当纯氢竖炉与下游电弧炉紧邻布置时，热态直接还原铁可通过保温输送装置直接热送电炉，利用产品显热降低电炉电耗；热送电炉的 DRI 温度应不低于 600℃，输送过程温降不超过 50℃；
- d) 高温余热回收系统应设置温度、压力、流量等参数的在线监测，蒸汽产量应满足后续用汽负荷的稳定供应；余热锅炉应设置安全阀、水位计、压力表等安全附件，并符合 GB/T 150（所有部分）和 TSG 21 的规定。

6.3.2 余热回收设备

高温余热回收设备应满足以下要求：

- a) 余热锅炉：
 - 1) 余热锅炉应根据高温炉气参数选型，优先采用水管式余热锅炉，受热面应布置合理，避免局部过热和积灰。锅炉热效率应不低于 85%，排烟温度应不高于 150℃；
 - 2) 与含氢气体接触的高温换热设备，其材质应具有良好的抗氢腐蚀和抗氢脆性能；
 - 3) 高温换热设备的设计应考虑热膨胀补偿，设置膨胀节或采用 U 型管结构；设备法兰密封应采用金属缠绕垫片或八角垫，不得使用普通橡胶垫片；
 - 4) 锅炉应设置水位、压力、温度实时监测及超压、缺水联锁保护装置；
 - 5) 烟气侧设置清灰装置，防止粉尘附着降低换热效率。
- b) 换热器：
 - 1) 管壳式、板式换热器应符合 GB/T 151 的规定，根据余热介质温度、压力、介质特性选型；
 - 2) 中高温烟气换热器壳体及换热管采用耐温、抗氢脆材质；低温水侧换热器选用防腐碳钢或不锈钢；
 - 3) 换热器应设置进出口温度、压力监测接口，便于运行检测；
 - 4) 板式换热器应设置防泄漏密封结构，涉氢介质换热器气密性等级不低于 II 级。
- c) 管道：
 - 1) 高温烟气管道、蒸汽管道材质、壁厚按 GB 50235 执行，高温段管道设置热补偿装置；
 - 2) 涉氢管道全部采用无缝钢管，严禁使用有缝管；管道连接优先采用焊接，关键法兰选用金属缠绕垫片；
 - 3) 管道按介质类别涂刷识别色、流向标识，高温管道、低温管道分别设置保温层；
 - 4) 管道支吊架设置合理，避免振动、应力集中；涉氢管道设置静电跨接与接地装置；
 - 5) 高温余热回收管道应进行保温设计，保温层外表面温度不超过 60℃，保温材料应采用耐高温硅酸铝纤维或岩棉制品，保温层厚度应经计算确定且不小于 100mm。
- d) 烟气净化及附属设备：
 - 1) 炉气进入余热回收设备前应设置除尘装置，粉尘排放满足环保要求；
 - 2) 风机、水泵等动力设备选用低噪声、高效率机型，配备减振基础。

6.4 中温段余热回收

6.4.1 炉顶气余热梯级利用

炉顶气是纯氢竖炉系统最主要的中温余热资源，温度为 350℃～500℃，应按照温度由高到低的顺序进行梯级回收利用。炉顶气余热梯级利用可按下列流程进行：

- a) 第一级：还原气预热（温度区间 350℃～250℃）：炉顶气首先进入还原气预热器，将循环氢气从约 40℃～60℃预热至 200℃～300℃，预热器应采用高效板式或管壳式换热器，余热回收量占炉顶气总余热量的 40%～50%；
- b) 第二级：ORC 蒸发（温度区间 250℃～150℃）：经第一级换热后，炉顶气温度降至 250℃左右，进入 ORC 系统蒸发器，加热有机工质产生蒸汽驱动透平发电，ORC 蒸发器出口炉顶气温度降至 150℃左右；该级余热回收量占炉顶气总余热量的 20%～30%；
- c) 第三级：热水加热/供暖（温度区间 150℃～80℃）：经 ORC 换热后，炉顶气温度降至 150℃左右，进入热水加热器或供暖换热器，生产 80℃～120℃的热水，用于厂区供暖、生活热水或其他低温用热需求；该级余热回收量占炉顶气总余热量的 15%～25%；

- d) 第四级：冷凝除湿（温度区间 $80^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ）：炉顶气最终冷却至 $40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，同时使其中的水蒸气冷凝，回收冷凝水和冷凝潜热，冷凝水经处理后可回用于生产系统；该级余热回收量占炉顶气总余热量的 $5\%\sim 10\%$ ；
- e) 通过四级梯级回收，炉顶气余热综合回收率应不低于 70% ，先进值可达 85% 以上。

6.4.2 余热回收设备

中温余热回收设备应满足以下要求：

- a) 还原气预热器应采用耐氢气腐蚀的材质，与氢气接触侧宜采用 316L 不锈钢或 Incoloy 800H，换热器应进行气密性试验，泄漏率应符合 GB/T 151 的规定；
- b) ORC 系统应选用环保型有机工质，如 R245fa、环戊烷等，工质的 ODP（臭氧消耗潜能值）应为 0，GWP（全球变暖潜能值）应不高于 1500，ORC 系统额定工况热电效率应不低于 8% ，先进值不低于 11% ；
- c) ORC 系统主要设备包括蒸发器、冷凝器、透平膨胀机、发电机、工质泵和储液罐等；透平膨胀机宜采用径向透平或螺杆膨胀机，等熵效率不低于 75% 。发电机效率不低于 92% 。
- d) ORC 系统应设置完善的控制和保护系统，包括工质温度压力监测、液位控制、超温超压保护、泄漏检测和紧急停机等功能；系统应能在热源温度波动范围内稳定运行，负荷调节范围不低于 $30\%\sim 100\%$ 。

6.5 低温段余热回收

纯氢竖炉系统的低温余热资源主要包括循环压缩机冷却余热、电解槽冷却余热、冷却水系统余热、变压器和配电设备损耗热等，温度范围为 $40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。低温余热回收应根据余热温度和用户需求选择合适的回收方式：

- a) 有机朗肯循环发电：对于温度在 $80^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的低温余热，可采用低温型 ORC 系统发电。低温 ORC 系统应选用低沸点工质，在 80°C 热源条件下热电效率不低于 5% ，在 120°C 以上热源条件下热电效率不低于 8% ；
- b) 吸收式热泵升温：对于温度在 $50^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 的低温余热，可采用溴化锂吸收式热泵将余热温度提升至 $80^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ ，用于供暖或生产用热。吸收式热泵性能系数（COP）应不低于 1.5，驱动热源可采用中温余热或蒸汽；
- c) 直接供热利用：对于温度在 60°C 以上的低温余热，可直接用于厂区供暖、生活热水、原料烘干、采暖通风等；应根据余热温度和用户用热温度匹配情况，设置直接换热或混水换热系统；
- d) 吸附式制冷：对于有制冷需求的场所（如控制室、配电室降温），可利用低温余热驱动吸附式制冷机组，制取 $7^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 的冷冻水。

6.6 余热回收设备通用要求

6.6.1 换热器设计要求

余热回收系统用换热器应符合以下设计要求：

- a) 换热器设计应符合 GB/T 151 的规定，压力容器部分应符合 GB/T 150（所有部分）和 TSG 21 的规定，压力管道部分应符合 GB/T 20801.1 的规定；
- b) 换热器型式应根据流体性质、温度、压力和清洁度选择，高温高压含氢气体换热宜采用管壳式换热器；中低温清洁气体换热可采用板式换热器；含尘气体换热应采用防堵型结构或设置前置除尘；
- c) 换热器传热面积应留有不低于 15% 的设计裕量，以应对结垢、积灰和工况波动导致的传热性能下降。换热器端差（冷热流体出口温度差）应根据技术经济比较确定，气-气换热器端差宜为 $20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，气-液换热器端差宜为 $10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ；
- d) 换热器应设置必要的温度、压力、流量监测仪表和排污、放空、吹扫接口；对于可能发生冷凝的换热器，应设置冷凝液排放口和液位控制。

6.6.2 材质选择要求

余热回收设备与管道的材质应根据接触介质的温度、压力和腐蚀性选择，并应考虑氢腐蚀、氢脆和高温氧化等特殊因素，具体材质推荐见表2。

表 2 余热回收设备与管道材质

温度区间	介质类型	推荐材质	备注
>500℃	含氢气体	Incoloy 800H、Inconel 600、2¼Cr-1Mo	—
400~500℃	含氢气体	2¼Cr-1Mo (SA-387 Gr 22)、Incoloy 800H	控制壁温低于氢腐蚀起始温度
250~400℃	含氢气体	1¼Cr-½Mo (SA-387 Gr 11)、304/316L不锈钢	高压时优先选用Cr-Mo钢
100~250℃	含氢气体	304/316L奥氏体不锈钢、双相不锈钢S32304	—
<100℃	含氢气体	304/316L不锈钢、镀锌碳钢（干燥气体）	湿氢环境禁用镀锌
>200℃	水蒸气/热水	20G锅炉钢、16MnR、304不锈钢	按压力容器规范选材
100~200℃	热水/导热油	20#钢、Q345R、304不锈钢	应考虑氧腐蚀和结垢
<100℃	冷却水	镀锌碳钢、304不锈钢、铜合金	应考虑水质腐蚀性
注：材质选择应结合具体工况（温度、压力、氢分压、杂质含量）进行专业评估和腐蚀试验验证。			

7 绿电耦合系统

7.1 总体要求

- 7.1.1 绿电耦合系统整体能源综合利用率不应低于 75%。
- 7.1.2 系统所有涉氢区域、高温区域电气设备应采用防爆型，防爆等级应符合 GB 3836.1 的要求。
- 7.1.3 系统应设置全自动监控、主/被动故障报警、智能感知紧急停机联锁保护功能。
- 7.1.4 管道、设备保温应完整，表面散热损失符合工业设备保温相关标准。
- 7.1.5 系统布局应满足设备检修、人员通行、消防疏散要求。

7.2 绿电

7.2.1 来源

绿电耦合系统的电力来源应优先采用可再生能源发电，包括但不限于以下类型：

- a) 风力发电：包括陆上风电和海上风电，风电具有明显的季节性和日波动性，出力波动大，需要配合储能和电解槽动态调节实现消纳；
- b) 光伏发电：包括集中式光伏电站和分布式光伏，光伏出力具有日间周期性和天气波动性，中午出力大、夜间为零，需要与储氢或储能配合实现连续供氢；
- c) 水力发电：包括常规水电和抽水蓄能，水电出力相对稳定，具有较好的调峰能力，可作为绿电基荷电源；
- d) 其他可再生能源发电：包括生物质发电、地热发电、海洋能发电等，可根据当地资源条件作为补充电源；
- e) 电网绿电交易：当自建可再生能源发电不足时，可通过电网购买绿色电力证书（绿证）或参与绿电交易，确保系统用电的绿色属性。

7.2.2 接入要求

- 7.2.2.1 光伏、风电等绿电接入系统应符合 DL/T 5044 相关要求，实现自发自用、余电储能、并网备用模式。
- 7.2.2.2 绿电母线电压、频率波动范围满足纯氢竖炉、余热设备、制氢设备运行要求。
- 7.2.2.3 绿电接入柜、配电柜、电缆均采用防爆型，涉氢区域电缆采用阻燃防爆电缆。
- 7.2.2.4 系统设置双向计量装置，分别计量绿电发电量、自用电量、上网电量。
- 7.2.2.5 绿电系统与电网设置并网/离网切换装置，切换过程不影响主设备连续运行。

7.3 储能系统

- 7.3.1 储能系统应根据绿电波动平抑、负荷削峰填谷、备用容量及孤网黑启动等需求配置，可采用电化学储能、压缩空气储能、飞轮储能、氢储能或混合储能。
- 7.3.2 功率型储能（电化学、飞轮）宜用于平抑秒级至分钟级功率波动，响应时间宜不大于 200ms，

持续时长宜按 15min~4h 配置。

7.3.3 能量型储能（氢储能、压缩空气）宜用于跨小时至跨日能量转移，氢储能容量可根据电解槽与竖炉的日、周负荷差设计。

7.3.4 储能电站应布置在独立防爆隔间内，设置烟感、温感、气体探测、消防灭火系统。

7.3.5 储能系统应具备恒功率充放电、负荷跟踪、削峰填谷功能，与绿电、制氢系统联动调节。

7.3.6 储能系统应设置过充、过放、过流、过温、短路多重保护。

7.3.7 储能系统应符合国家现行储能电站安全规范，设置电池管理系统、热失控预警及消防系统；氢储能设施应符合本文件中第 9 章的安全要求。

7.4 电解水制氢系统

7.4.1 电解水制氢系统应具备宽负荷调节能力，负荷调节范围宜为 20%~110%额定负荷，调节速率宜不低于 5%/min。电解水制氢系统产生的氧气应回收利用或安全放散，不得直接排入氢系统区域。

7.4.2 电解水制氢负荷宜作为系统的一级柔性负荷，优先跟踪绿电出力，实现“电多则产氢、电少则降负荷”。当绿电出力高于电解槽最大负荷时，多余电量宜按下列顺序消纳：为电池储能充电；提升储氢压力或增加产氢量；向电网售电；经 EMS 指令弃电。当绿电出力低于电解槽最低稳定负荷时，宜按下列顺序补充：释放电池储能；降低电解槽负荷；由电网购电补充。

7.4.3 电解水制氢系统与纯氢竖炉之间应设置氢气缓冲储罐，罐容应满足不少于 4h 的竖炉额定耗氢量，或在电网故障时维持竖炉安全停运所需的氢气量，取二者较大值。储氢压力等级应根据电解槽出口压力与竖炉入口压力确定，储氢设施应符合 GB 50177 的要求。

7.4.4 电解槽运行参数应实时监测和自动控制，包括直流电压、直流电流、电解温度、电解压力、氢气纯度、氧气纯度、电解液浓度、液位等。关键参数应设置报警和联锁保护。

8 运行与控制

8.1 自动化与信息化

8.1.1 系统应采用分层分布式控制架构，由现场仪表层、控制层、监控层和管理层构成，各层之间应通过工业以太网或现场总线连接。

8.1.2 系统应对关键过程参数进行连续在线监测，并设置合理的报警阈值和联锁保护。部分关键过程参数和报警要求可参照表 3 的规定。

表 3 关键过程参数监测要求

监测对象	监测参数	测量范围	精度要求	报警/联锁
竖炉本体	炉顶气温度/℃	0~600	±0.5%FS	高报警/高高联锁
	炉顶气压力/MPa	0~1.0	±0.2%FS	高/低报警
	炉内压差/kPa	0~100	±0.5%FS	高报警
	料位/%	0~100	±2%	高/低报警
还原气系统	入炉温度/℃	0~1200	±0.5%FS	高/低报警
	入炉压力/MPa	0~1.0	±0.2%FS	低报警/低低联锁
	氢气纯度/%	80~100	±0.5%	低报警
	氧气含量/%	0~2	±0.1%	高报警/高高联锁
炉顶气系统	氢气含量/%	0~100	±1%	趋势监测
	含尘量/(g/Nm³)	0~50m	±5%FS	高报警
余热回收	蒸汽温度/℃	0~500	±0.5%FS	高/低报警
	蒸汽压力/MPa	0~5.0	±0.2%FS	高报警/高高联锁
	ORC工质温度/℃	0~200	±0.5%FS	高/低报警
电解制氢	直流电压/V	0~500	±0.5%	高/低报警
	直流电流/A	0~10000	±0.5%	高报警
	电解温度/℃	0~120	±0.5℃	高/低报警
	氢气纯度/%	95~100	±0.1%	低报警/低低联锁
	氧气中氢含量/%	0~5	±0.1%	高报警/高高联锁
储氢系统	储氢压力/MPa	0~50	±0.2%FS	高报警/高高联锁

	储氢温度/℃	-50~100	±1℃	高/低报警
储氢区域	氢气泄漏浓度/%LEL	0~100	±5%FS	25%LEL报警/50%联锁
电气系统	有功功率	0~额定值	±0.5%	趋势监测
	电能质量	—	A级	越限报警

8.1.3 监测数据采样周期宜不大于 1s，统计与存档周期宜不大于 1min。运行数据应保存不少于 3 年，事故及异常数据应永久保存。

8.2 运行模式

8.2.1 正常运行模式下，系统应维持下列状态：

- a) 竖炉还原区温度稳定在工艺设定值±15℃范围内；
- b) 入炉氢气纯度不低于工艺规定值（宜不低于 99%，体积分数）；
- c) 系统循环氢压力波动不超过±0.01MPa；
- d) 余热回收系统各换热环节进出口温度、压力处于设定范围；
- e) 绿电渗透率不低于设计值。

8.2.2 变工况运行模式下，系统应通过调节电解槽负荷、储能充放功率及余热回收参数维持平衡；竖炉入口还原气温度、压力与流量的变化率应不超过设备允许值，防止温度冲击导致炉料粘结或换热面损坏。

8.2.3 故障运行模式下，当绿电完全丧失且电网故障时，系统应自动切换至储氢与储电支撑模式，优先保证竖炉安全停运；当余热回收系统发生故障时，应自动切除故障单元并启用旁路，保证竖炉连续运行；当氢系统发生泄漏、超压或氧含量超标时，应执行第 9 章规定的安全联锁动作。

8.3 报警与联锁

8.3.1 报警分级

报警应分为三级，各级报警应有明显的声光区分：

- a) 一级报警（提示），提醒运行人员关注参数变化；
- b) 二级报警（警告），要求运行人员及时采取措施；
- c) 三级报警（紧急），触发自动联锁保护动作。

8.3.2 安全仪表系统（SIS）

涉及人身安全和重大设备安全的保护应采用独立的安全仪表系统，SIS应符合GB/T 21109.1的规定，安全完整性等级（SIL）不低于SIL 2。SIS应与基本过程控制系统（BPCS）物理隔离，独立配置传感器、逻辑控制器和最终执行元件。

8.3.3 紧急停车系统（ESD）

应设置全厂紧急停车按钮和自动ESD逻辑，在发生重大安全隐患（如氢气大量泄漏、火灾、爆炸风险等）时，能够一键或自动触发全厂安全停车，包括切断氢气供应、启动氮气吹扫、停运相关设备等。

8.3.4 火气系统（FGS）

应设置火灾和可燃气体检测系统，覆盖所有氢气处理和储存区域。FGS应与ESD、消防系统、事故通风系统联锁，检测到火灾或氢气泄漏达到设定阈值时自动启动相应保护措施。

8.3.5 联锁管理

所有安全联锁应建立联锁清单，明确联锁触发条件、动作逻辑、复位条件和试验周期。联锁的投用、摘除和修改应执行严格的审批程序，联锁摘除期间应制定相应的安全措施。联锁应定期进行功能试验，试验周期不超过1年。

8.4 启停与检修

8.4.1 系统启动应按下列顺序进行：

- a) 氮气置换，确认系统氧含量低于规定限值（宜低于 0.1%，体积分数）后方可通氢；
- b) 依次启动绿电接入、电解水制氢与储氢系统；

- c) 启动竖炉加热与还原气循环，逐步建立温度与压力；
- d) 待竖炉工况稳定后，逐步投入余热回收系统，由高温段至低温段依次投运。

8.4.2 系统停运应按下列顺序进行：

- a) 逐步降低竖炉负荷与电解槽负荷；
- b) 切断氢气供应，以氮气置换系统至无氢状态；
- c) 余热回收系统按低温段至高温段的顺序逐步退出；
- d) 储氢、储热设施按规程泄压或保压。

8.4.3 检修作业应制定专项方案，对氢系统检修应执行动火作业许可、气体检测与隔离置换制度；对高温余热设备检修应待设备冷却至 60℃ 以下，并落实防烫、防坠落措施。

9 安全、环保与职业健康要求

9.1 氢安全

9.1.1 纯氢竖炉及其余热回收、绿电耦合系统涉及氢气的使用、储存与输送，其防火、防爆设计应符合 GB 50016、GB 50058、GB 50177 的规定。

9.1.2 氢气生产设备、管道、阀门、法兰及连接部位的设计、制造、安装与检验应符合国家现行压力容器与压力管道安全技术规范；承压壳体应进行消氢热处理，规避氢脆与氢致开裂风险。氢系统区域应设置氢气泄漏检测报警装置，检测点应按释放源分区布置，报警设定值宜为爆炸下限的 20%，连锁设定值宜为爆炸下限的 40%。区域内电气设备、仪表及通信设备应选用符合爆炸危险区域划分要求的防爆型产品。

9.1.3 开炉通氢前应以氮气对系统进行置换，取样分析氧含量低于 0.1%（体积分数）后方可通氢；停炉或检修时应先切断氢源，再以氮气吹扫至无可燃气检出；系统应设置紧急氮气惰化设施，在泄漏、超温、超压等事故工况下自动投入。

9.1.4 高温纯氢加热装置应设置氢气泄漏、超温、超压三重连锁切断，并设置安全阀、爆破片等泄放设施。泄放气体应引至安全地点燃烧或高空排放。

9.2 高温与压力安全

9.2.1 余热回收系统的压力容器、锅炉、蒸汽管道应按国家现行安全技术规范进行设计、制造、安装、检验与定期检验。

9.2.2 换热器应设置旁路、温度调节与压差监测，防止传热面结垢、堵塞导致局部超温。

9.2.3 高温设备与管道应按 GB/T 4272 设置保温层，外表面温度不应高于 50℃（距外表面 25mm 处测得）。

9.3 环保要求

9.3.1 系统废气排放应满足国家及地方现行大气污染物排放标准。纯氢竖炉炉顶气经脱水后循环利用，外排量应控制在工艺允许的最小值；外排气体中的颗粒物、氮氧化物、硫氧化物浓度应满足排放标准要求。

9.3.2 泵、风机、压缩机、膨胀机等设备的噪声排放应符合 GB 12348 的规定，厂界噪声昼间不应高于 65dB（A），夜间不应高于 55dB（A）。

9.3.3 冷凝脱水产生的废水、设备清洗废水应经处理达标后回用或排放；废催化剂、废保温材料、废滤芯等固体废物应按其性质分类收集、贮存与处置，危险废物应交由有资质的单位处理。

9.4 职业健康

9.4.1 系统应设置完善的有毒有害气体、粉尘与噪声监测设施，作业场所职业接触限值应符合国家现行职业卫生标准。

9.4.2 对电解水制氢岗位的碱液（或酸液）接触风险，应设置洗眼器、冲淋设施及个人防护用品。

9.4.3 对高温作业岗位，应采取隔热、通风、降温措施，作业环境温度不应超过职业接触限值。
