

ICS XX. XXX
CCS X XX

团 体 标 准

T/CIECCPA □□□—202□

柔性运行低压合成氨系统技术导则

Technical guideline for flexible operation low-pressure ammonia synthesis system

(征求意见稿)

(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。)

202□-□□-□□发布

202□-□□-□□实施

中国工业节能与清洁生产协会 发布

СЛЕДСТВИЕ

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 系统组成	2
4.1 催化反应单元	2
4.2 原料供给单元	2
4.3 工艺调控单元	2
4.4 柔性控制与安全防护单元	2
5 技术要求	2
5.1 通用要求	2
5.2 催化反应单元要求	2
5.3 原料供给单元要求	2
5.4 工艺调控单元要求	3
5.5 柔性控制单元要求	3
5.6 安全防护要求	3
5.7 能耗与环保要求	3
6 试验方法	4
6.1 催化剂性能测试	4
6.2 原料供给单元性能测试	4
6.3 工艺调控单元性能测试	4
6.4 柔性运行能力检测	5
6.5 启停性能测试	5
6.6 安全性能测试	5
6.7 能耗与环保检测	5
7 运行与维护	5
7.1 运行要求	5
7.2 维护要求	6
7.3 应急管理	6
表 1 关键参数监测精度要求	3

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。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：内蒙古电力（集团）有限责任公司、内蒙古大青山实验室有限公司、浙江臻泰能源科技有限公司、浙江大学、内蒙古科电电气有限责任公司、包头稀土研究院、内蒙古宝丰煤基新材料有限公司。

本文件主要起草人：XXX。

本文件为首次发布。

СЛЕДСТВИЕ

柔性运行低压合成氨系统技术导则

1 范围

本文件规定了柔性运行低压合成氨系统的系统组成和技术要求，描述了相应的试验方法，规定了检验规则及运行与维护。

本文件适用于以风电、光伏等可再生能源电解水制氢为氢源，反应压力不高于 7.0 MPa 的可再生能源波动工况下，柔性运行低压合成绿氨合成系统。

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 13458 合成氨工业水污染物排放标准
- GB 14554 恶臭污染物排放标准
- GB 18597 危险废物贮存污染控制标准
- GB 18599 一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准
- GB/T 20438（所有部分） 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全
- GB/T 28055 钢制压力容器疲劳设计
- GB 29436 合成氨工业大气污染物排放标准
- GB 50160 石油化工企业设计防火标准
- GB 50493 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准
- HJ 2546 排污单位环境管理台账及排污许可证执行报告技术规范 总则
- HG/T 3545 合成氨催化剂活性试验方法
- HG/T 5585 低压合成氨用铁系催化剂

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

可再生能源波动工况 **renewable energy fluctuation condition**

风电、光伏等可再生能源发电，因自然条件变化导致电解水制氢的产量、压力、流量等参数非稳态变化的运行状态。

3.2

柔性运行 **flexible operation**

合成氨系统适应氢源、电力输入波动，实现产能宽范围连续稳定调整，且工艺、安全指标达标的运行方式。

3.3

低压合成氨 low-pressure ammonia synthesis

反应压力不高于 7.0 MPa 的合成氨生产工艺。

3.4

单装置产能调节倍数 single unit capacity regulation multiple

合成氨单装置最大设计产能与最小稳定运行产能的比值。

4 系统组成

4.1 催化反应单元

核心为低压合成氨催化剂、合成塔反应器，承担氨合成核心反应功能。

4.2 原料供给单元

包括电解水制氢、储氢、空分制氮设备，实现氢氮原料的稳定供给与精准调配。

4.3 工艺调控单元

包括压缩机、换热设备、氨分离精制设备，实现系统工艺参数动态调节与热平衡管控。

4.4 柔性控制与安全防护单元

包括控制系统、传感检测装置、安全联锁与应急防护设备，实现全流程协同调控与安全保障。

5 技术要求

5.1 通用要求

5.1.1 系统应适配可再生能源波动特性，具备宽负荷柔性运行能力，整体运行满足安全、高效、环保要求。

5.1.2 系统设计、制造、安装应符合 GB 50160 的规定，核心设备、材料、催化剂应具备合格证明文件。

5.1.3 系统设计应确保可再生能源电力消纳比例不低于 95 %，设计使用年限不应低于 15 年。

5.2 催化反应单元要求

5.2.1 催化剂应选用适配低压、波动工况的铁系或钨基合成氨催化剂，性能应符合 HG/T 5585 和 HG/T 3545 的规定。

5.2.2 催化剂适用压力应覆盖 0.5 MPa~7.0 MPa，额定工况下氨净值应不低于 10 %；波动变负荷工况下，连续运行 1000 h 活性衰减率不应高于 5 %，无明显粉化、失活。

5.2.3 合成塔反应器应适配宽负荷波动，床层径向温差不应大于 20 °C，杜绝变负荷垮温风险；设计应符合 GB/T 28055 的规定，满足抗疲劳要求，疲劳循环次数不应低于 10000 次。

5.3 原料供给单元要求

5.3.1 电解水制氢设备负荷调节范围应覆盖 20 %~120 % 额定负荷，最低可短时运行至 10 % 负荷，响应时间不应大于 2 s；供给合成系统的氢气纯度不应低于 99.9 %。

5.3.2 储氢设备有效储氢量不应低于系统额定工况 4 h 氢气消耗量，具备调峰与缓冲能力。

5.3.3 空分设备供给的氮气纯度不应低于 99.99 %，系统氢氮配比控制误差不应大于 ± 1 %。

5.4 工艺调控单元要求

5.4.1 核心压缩机应采用变频变载设计，负荷调节范围应覆盖 10 %~110 %额定负荷，额定工况下运行效率不应低于 85 %。

5.4.2 核心换热设备额定工况换热效率不应低于 90 %，系统余热回收利用率不应低于 85 %。

5.4.3 氨分离系统在 10 %~110 %负荷范围内，氨分离效率不应低于 95 %。

5.4.4 变负荷工况下，催化剂床层温度波动幅度不应大于 ± 20 °C/h，保障系统热平衡稳定。

5.5 柔性控制单元要求

5.5.1 系统应建立“电-热-氢-氨”全流程耦合动/稳态模型，模型计算与实测误差不应大于 5 %。

5.5.2 关键参数监测精度应符合表 1 规定，数据传输延迟不应大于 1 s。

表 1 关键参数监测精度要求

监测参数	精度要求
温度	± 0.5 °C
压力	± 0.01 MPa
流量	± 2 %FS
氢氮配比	± 1 %
氨浓度	± 0.5 %

5.5.3 系统单装置产能调节倍数不应低于 10，可在 10 %~110 %额定产能范围内连续稳定运行，负荷升降速率不应低于 5 %额定负荷/min。

5.6 安全防护要求

5.6.1 系统冷启停时间应小于 40 分钟，热启停时间应小于 10 min，启停过程无工艺参数超标、安全事故。

5.6.2 氢/氨泄漏检测报警系统设计应符合 GB 50493 的规定，检测报警响应时间不应大于 30 s，报警准确率 100 %；安全联锁应急响应时间不应大于 1 s，联锁动作准确率 100 %。

5.6.3 合成塔、压缩机等关键设备平均无故障工作时间（MTBF）不应低于 8000 h。

5.6.4 系统应设置独立的安全仪表系统（SIS），设计应符合 GB/T 20438 的规定，安全完整性等级不应低于 SIL2，具备紧急停车、超限联锁功能。

5.7 能耗与环保要求

5.7.1 额定工况下，系统吨氨综合电耗不应高于 10.5 MWh。

5.7.2 系统废气、废水、固废排放应符合 GB 29436、GB 13458、GB 14554、GB 18597 和 GB 18599 的规定，氨有组织排放浓度不应高于 10 mg/m³，厂界无组织氨浓度不应高于 1.5 mg/m³，生产废水回用率不应低于 95 %。

5.7.3 应建立符合 HJ 2546 要求的环境管理台账，台账保存期限不应低于 3 年；废催化剂等危险废物应合规处置。

6 试验方法

6.1 催化剂性能测试

催化剂活性、理化指标测试按 HG/T 35454 和 HG/T 5585 执行，并模拟波动变负荷工况测试催化剂宽工况适应性、长周期稳定性，验证是否符合 5.2 的要求。

6.2 原料供给单元性能测试

6.2.1 电解水制氢设备性能测试

按照设备操作规程调节输入功率，测试设备在 20 %~120 % 额定负荷区间的连续稳定运行能力，验证最低短时运行负荷下限；采用秒级计时设备测试负荷调节响应时间，记录从负荷指令发出到运行参数达到设定值的时间间隔；采用气相色谱仪测试供给合成系统的氢气纯度，验证是否符合 5.3.1 的要求。

6.2.2 储氢设备调峰能力试验

核算储氢设备在额定工作压力、有效容积下的最大可用储氢量，换算为系统额定工况下的氢气可持续供给时长，验证有效储氢量是否满足不低于系统额定工况 4 h 氢气消耗量的要求，是否符合 5.3.2 的要求。

6.2.3 氮气纯度与氢氮配比控制精度试验

采用气相色谱仪检测空分设备供给合成系统的氮气纯度；在系统稳态运行及变负荷动态工况下，连续监测氢氮混合气体的实时配比数据，统计全工况下的配比控制误差范围，验证是否符合 5.3.3 要求。

6.3 工艺调控单元性能测试

6.3.1 压缩机性能测试

在变频变载调节模式下，测试压缩机在 10 %~110 % 额定负荷区间的连续稳定运行能力；在额定工况下，采用功率分析仪、流量测试设备等计量器具，核算压缩机轴功率与有效功率，计算运行效率，验证是否符合 5.4.1 的要求。

6.3.2 换热设备与余热回收性能测试

在额定工况下，通过测试换热设备进、出口介质的温度、流量、压力参数，核算换热量与理论换热极限值，计算设备换热效率；统计系统全流程可回收余热总量与实际回收利用热量，核算余热回收利用率，验证是否符合 5.4.2 的要求。

6.3.3 氨分离效率测试

在 10 %~110 % 额定负荷全区间内，选取不少于 5 个均匀分布的负荷梯度开展测试，分别测试氨分离设备进、出口气相中的氨浓度，核算氨分离效率，验证全负荷区间内分离效率是否符合 5.4.3 的要求。

6.3.4 变负荷工况热稳定性测试

在系统升降负荷动态过程中，以不低于 5 % 额定负荷/min 的速率开展负荷调节，连续测试催化剂床层温度数据，统计每小时内的温度波动幅度，验证变负荷工况下床层温度波动幅度是否符合

合 5.4.4 条要求。

6.4 柔性运行能力检测

通过调节氢源输入、电力负荷模拟可再生能源波动工况，检测系统 10 %~110 % 额定产能的连续运行能力、单装置产能调节倍数、负荷升降速率，验证是否符合 5.5 的要求。

6.5 启停性能测试

按照操作规程开展冷启停、热启停测试，记录启停全过程时间，测试工艺参数变化，验证是否符合 5.6 的要求。

6.6 安全性能测试

开展泄漏报警模拟测试、故障联锁联动测试、安全仪表系统功能测试，验证报警响应时间、联锁动作精度、设备可靠性是否符合 5.6 的要求。

6.7 能耗与环保检测

系统额定工况连续稳定运行工况下，统计能耗数据，开展污染物排放检测，验证是否符合 5.7 的要求。

7 运行与维护

7.1 运行要求

7.1.1 操作人员应经专业培训考核合格后方可上岗，特种作业人员需持证上岗。

7.1.2 系统应在设计参数范围内运行，严禁超压、超温、超负荷运行，实时监控可再生能源出力波动，动态调整运行参数，保障系统稳定。

7.1.3 应建立完整的运行记录制度，如实记录工艺参数、设备状态、能耗物耗、故障处置等内容，记录可追溯，保存期限不应低于 3 年。

7.1.4 针对可再生能源波动工况专项运行管控，应建立可再生能源出力前置预判机制，结合风电、光伏功率预测数据，提前制定系统负荷调整计划，实现全流程协同调控。变负荷运行过程中，应严格控制氢氮配比动态平衡，同步调整压缩机、换热系统及氨分离设备运行参数，确保催化剂床层温度波动幅度始终控制在设计允许范围内，严禁无预判的骤升骤降负荷操作。针对可再生能源出力骤降、短时中断等极端工况，应执行预设的低负荷稳运行操作规程，优先保障合成塔催化剂床层热稳定，规避床层垮温、催化剂失活风险。

7.1.5 系统冷启停、热启停应严格执行专项操作规程，启停前完成设备状态、安全联锁、仪表监测、原料供给条件的全面确认，严格按照预设步序执行操作，严禁跳步、违规操作。负荷升降过程应匀速平稳，实时监控系统压力、温度、流量、氢氮配比等关键参数，每 5 min 记录一次核心运行数据，出现参数超限趋势时立即放缓或暂停负荷调整，待参数稳定后再继续操作。系统长期停机后重启，应先完成催化剂升温还原、系统气密性试验等前置工序，验收合格后方可转入正常运行。

7.1.6 应建立系统全流程能效对标机制，额定工况及不同负荷区间均应开展能效核算，重点监控吨氨电耗、余热回收利用率等核心指标，针对能效偏低工况及时优化调整。应结合可再生能源

出力特性，优化系统运行模式，在可再生能源大发时段满负荷运行，在低出力时段合理调控负荷，最大化提升可再生能源消纳比例，降低系统运行成本。

7.2 维护要求

7.2.1 应建立设备日常维护、定期维护制度，明确维护周期与标准，保障设备性能稳定。

7.2.2 应定期开展催化剂活性检测，根据活性情况及时再生或更换，建立催化剂全生命周期管理台账。

7.2.3 应定期对安全附件、传感检测装置、联锁系统进行校验检定，安全阀应至少每年校验 1 次，压力表应至少每半年检定 1 次。

7.2.4 设备故障应先停机排查、后规范处置，严禁带故障运行；检修作业应严格落实安全管理规定，特殊作业应办理作业许可。

7.2.5 针对合成塔反应器、原料气压缩机、电解水制氢设备、储氢容器等核心设备，应建立“日常巡检-定期维护-预知性检修”三级维护体系，结合设备频繁变负荷、宽工况运行的特点，差异化制定维护周期与技术标准。日常巡检应重点排查设备振动、异响、泄漏、温度异常等问题，每日至少开展 2 次全面巡检；定期维护应重点完成压缩机润滑油更换、变频器检测、换热器结垢清理、储氢容器气密性试验等工作；针对长周期运行设备，应采用振动监测、红外热成像等技术手段开展预知性检修，提前排查故障隐患，避免非计划停机。

7.2.6 针对废气、废水处理设施及氨回收系统，应建立专项维护制度，每日巡检环保设施运行状态，定期检查氨吸收装置、尾气处理设备、废水回用系统的运行工况，及时更换吸附剂、处理药剂，确保设施连续稳定运行，污染物达标排放。因检修需停运环保设施的，应提前报备主管部门，同步采取限产、停产等管控措施。

7.3 应急管理

7.3.1 应制定完善的生产安全事故应急预案，明确应急处置流程、责任分工、救援措施，覆盖泄漏、火灾、超压、设备故障等典型场景。

7.3.2 每年应至少组织 2 次应急演练，根据演练情况修订完善预案，提升应急处置能力。

7.3.3 应急救援器材与物资应配备充足，定期检查维护，确保应急状态下可用。

7.3.4 应建立应建立分级应急响应机制，明确一般、较大、重大突发事件的响应启动条件、处置权限与联动流程。突发事件发生后，应遵循“保人身、保设备、保环境”的首要原则，立即启动对应等级应急预案，采取切断危险源、紧急停车、人员疏散、污染防控等处置措施，严禁盲目处置导致事故扩大。应急处置结束后，应组织开展事故复盘、原因分析与损失评估，制定整改与防范措施，修订完善应急预案与操作规程，相关资料应纳入运行档案存档，存档期限不低于 3 年。

7.3.5 应建立黑启动专项保障方案，针对全厂失电、控制系统失效等极端工况，明确应急电源投用、安全停机、系统恢复的操作流程，确保极端工况下系统安全可控。