

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

先进绝热压缩空气储能系统 热回收技术规范

Technical specifications for heat recovery system of advanced adiabatic compressed
air energy storage

(征求意见稿)

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国机电设备工程协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 系统结构与功能要求	3
4.1 系统总体架构	3
4.2 压缩单元	4
4.3 换热单元	4
4.4 蓄热单元	4
4.5 储气单元	4
4.6 膨胀单元	4
5 性能与技术指标	5
5.1 热回收性能	5
5.2 能量品质指标	5
5.3 运行参数限值	5
5.4 安全与环保要求	5
6 试验与证实方法	6
6.1 热回收率测试	6
6.2 换热器性能测试	6
6.3 储热介质性能验证	7
6.4 系统效率测试	7
6.5 安全性能验证	7
7 检验规则	7
7.1 检验分类	7
7.2 出厂检验	8
7.3 型式检验	8
7.4 现场验收检验	8
8 标志、包装、运输与贮存	8
8.1 标志	8
8.2 包装	8
8.3 运输	8
8.4 贮存	8
9 运行维护	8
9.1 运行监控	8
9.2 定期维护	9
9.3 故障处理	9
附 录 A（规范性） 热回收率计算示例	10
附 录 B（资料性） 熔融盐物性参数表	11

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。

本文件由江苏国信苏盐储能发电有限公司提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：江苏国信苏盐储能发电有限公司、中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、中国科学院广州能源研究所、山东建筑大学、中国长江三峡集团有限公司、北京中研华采技术服务有限公司。

本文件主要起草人：杨素中、赵珈卉、宋永兴、谢宁宁、陈延柏、葛艺、常勇、杨正、张国强、郑志美、王兆福、钟声远、乐志斌、夏卫彬。

先进绝热压缩空气储能系统热回收技术规范

1 范围

本文件规定了先进绝热压缩空气储能系统（AA-CAES）热回收技术的系统结构与功能要求、性能与技术指标、性能与技术指标、试验与证实方法、检验规则、标志、包装、运输与贮存、运行维护等内容。

本文件适用于额定发电功率10 MW及以上、储热介质温度 $\geq 200^{\circ}\text{C}$ 的先进绝热压缩空气储能电站的热回收系统设计、制造、验收及运行维护。其他规模及技术路线的压缩空气储能系统可参照执行。

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 150 压力容器
- GB/T 151 热交换器
- GB 2894 安全色和安全标志
- GB/T 4975 容积式压缩机术语 总则
- GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准
- GB/T 17949.1 接地系统的土壤电阻率、接地阻抗和地面电位测量导则 第1部分：常规测量
- GB/T 21447 钢质管道外腐蚀控制规范
- GB/T 27698.1 热交换器及传热元件性能测试方法 第1部分：通用要求
- GB/T 46193 立式圆筒形熔融盐储罐技术要求
- TSG ZF001 安全阀安全技术监察规程
- TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程
- DL/T 5895 压缩空气储能电站设计规范
- NB/SH/T 0832 润滑油热表面氧化的测定 压力差示扫描量热法
- NB/T 47010 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件
- NB/T 47013.2 承压设备无损检测 第2部分：射线检测

3 术语和定义

GB/T 4975界定的下列术语和定义适用于本文件。

3.1

先进绝热压缩空气储能系统 advanced adiabatic compressed air energy storage system (AA-CAES)

通过多级绝热压缩回收压缩热并储存在蓄热介质中，释能时利用储存的压缩热加热高压空气驱动透平膨胀机做功，无需燃料补燃的压缩空气储能系统。

4 系统结构与功能要求

4.1 系统总体架构

先进绝热压缩空气储能系统热回收子系统应由压缩单元、换热单元、蓄热单元、储气单元、膨胀单元及控制单元组成，典型系统流程见图1。

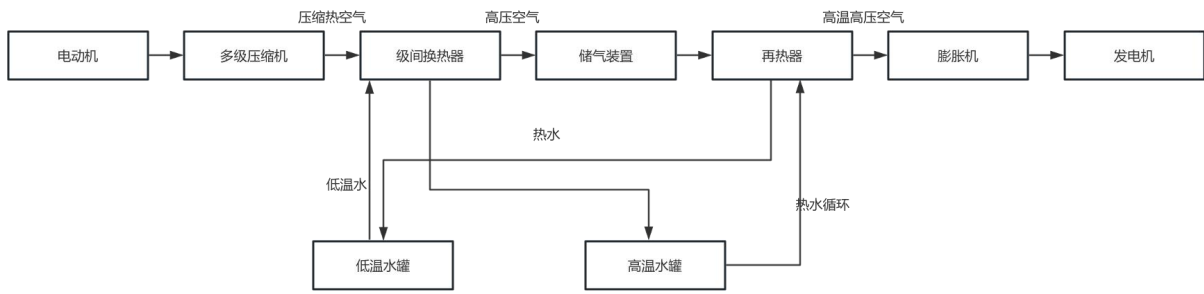


图1 AA-CAES系统热回收流程示意图

4.2 压缩单元

4.2.1 压缩单元应采用两级或多级压缩结构，级间压缩比分配应均衡，总压缩比 $\geq 40:1$ （储气压力10 MPa/大气压力0.1013 MPa）。

4.2.2 压缩机形式可为离心式、轴流式或螺杆式，额定工况下等熵效率应符合下列要求：

- a) 离心式压缩机： $\geq 87\%$
- b) 轴流式压缩机： $\geq 89\%$
- c) 螺杆式压缩机： $\geq 85\%$

4.2.3 末级压缩机排气温度不应超过 400°C ，进入储气装置前的压缩空气温度应控制在 50°C 以下。

4.3 换热单元

4.3.1 换热单元应包含级间换热器和释能再热器，换热器型式宜采用管壳式或板式结构。

4.3.2 级间换热器设计参数应满足下列要求：

- 设计压力： $\geq 12.5\text{ MPa}$ （考虑1.25倍安全系数）
 设计温度： $\geq 450^{\circ}\text{C}$
 传热有效度： ≥ 0.95
 热损系数： $\leq 0.02\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

4.3.3 换热器材质应与储热介质兼容，高温侧材料应选用不锈钢或耐热合金钢，符合NB/T 47010要求。

4.4 蓄热单元

4.4.1 蓄热系统应采用双罐布置（高温罐和低温罐），储热介质可选用水、导热油或熔融盐。

4.4.2 当储热温度 $> 350^{\circ}\text{C}$ 时，应采用熔融盐作为储热介质，其技术特性应满足：

- a) 凝固点： $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 工作温度上限： $\geq 550^{\circ}\text{C}$ ；
- c) 比热容： $\geq 1.5\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；
- d) 密度偏差： $\pm 2\%$ （工作温度范围内）。

4.4.3 储热罐设计应符合GB 150和TSG 21要求，保温层应采用岩棉或硅酸铝纤维，厚度经热工计算确定，确保表面温升 $\leq 15^{\circ}\text{C}$ 。

4.5 储气单元

4.5.1 储气装置可采用地下盐穴、硬岩洞穴或地面高压储罐，设计压力宜为10 MPa~16 MPa。

4.5.2 地面高压储罐应符合GB/T 150规定，材料选用Q345R或更高级别钢材，设计寿命 ≥ 30 年。

4.5.3 储气装置有效容积应满足系统额定出力持续运行4~8h所需压缩空气量。

4.6 膨胀单元

4.6.1 膨胀机应采用多级膨胀结构，级前配置再热器，入口空气温度应 $\geq 300^{\circ}\text{C}$ 。

4.6.2 膨胀机等熵效率应 $\geq 91\%$ ，额定工况下机械效率 $\geq 98\%$ 。

4.6.3 末级膨胀机排气温度应 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ ，防止析湿腐蚀。

5 性能与技术指标

5.1 热回收性能

5.1.1 热回收率

系统在额定工况下的热回收率应 $\geq 85\%$ ，按公式（1）计算：

$$\eta_{hr} = \frac{Q_{act}}{Q_{theo}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

Q_{act} ——实际回收热量，单位为兆焦（MJ）；

Q_{theo} ——理论最大压缩热量，按公式（2）计算：

$$Q_{theo} = m \cdot c_p \cdot T_0 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2)$$

其中：

M ——空气质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

c_p ——空气定压比热容，取1.005 kJ/(kg·K)；

T_0 ——环境绝对温度，单位为开尔文（K）；

p_2/p_1 ——总压缩比；

k ——绝热指数，取1.4。

5.1.2 蓄热效率

储热系统保温8 h后的蓄热效率应 $\geq 97\%$ ，16 h后应 $\geq 95\%$ 。

5.1.3 系统综合效率

AA-CAES系统电-电转换效率应 $\geq 65\%$ ，基于热耗法的效率计算按DL/T 5895执行。

5.2 能量品质指标

5.2.1 储热介质温度分层度

高温储热罐垂直方向温度分层度应 $\leq 15^\circ\text{C}$ ，底部与顶部温差应 $\geq 150^\circ\text{C}$ 。

5.2.2 压缩热品位

储热介质最高温度应 $\geq 300^\circ\text{C}$ ，优选 $350^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ 区间，以提高系统做功能力。

5.2.3 热能输送损失

换热器至储热罐间管道热损失应 \leq 输送热量的1.5%。

5.3 运行参数限值

5.3.1 压力限值

运行压力限值应符合下列要求：

a) 压缩机出口最大压力： \leq 储气装置设计压力的95%；

b) 储热系统最高工作压力： $\leq 1.6 \text{ MPa}$ （水或导热油系统）或 $\leq 0.8 \text{ MPa}$ （熔融盐系统）。

5.3.2 温度限值

运行温度限制应符合下列要求：

a) 压缩机轴承温度： $\leq 95^\circ\text{C}$ ；

b) 电机绕组温度： $\leq 150^\circ\text{C}$ （F级绝缘）或 $\leq 180^\circ\text{C}$ （H级绝缘）；

c) 储热罐壁温： \leq 设计温度且 \geq 介质凝固点+ 50°C 。

5.4 安全与环保要求

5.4.1 安全阀设置

储热罐、换热器应设置安全阀，开启压力为设计压力的1.1倍，回座压力不低于设计压力的0.9倍。

5.4.2 噪声控制

距设备1 m处噪声声压级应 ≤ 85 dB(A)，厂界噪声应符合GB 12348中3类标准（昼间 ≤ 65 dB(A)，夜间 ≤ 55 dB(A)）。

5.4.3 环境保护

系统应无燃烧产物排放，结构完整性检测周期应符合GB/T 21447规定。

6 试验与证实方法

6.1 热回收率测试

6.1.1 试验条件

热回收率测试条件符合下列规定：

- 环境温度： $15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ；
- 相对湿度： $45\% \sim 75\%$ ；
- 电源电压偏差： $\pm 5\%$ 额定电压；
- 系统连续运行时间： ≥ 2 h（达到热稳定状态）。

6.1.2 测量参数

热回收率测量参数符合下列规定：

- 需同步测量以下参数，采样频率 ≥ 1 Hz；
- 压缩机进出口空气压力、温度（精度：压力 $\pm 0.5\%$ FS，温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ）；
- 空气质量流量（采用孔板流量计，精度 $\pm 1.5\%$ ）；
- 换热器进出口储热介质流量（电磁流量计，精度 $\pm 0.5\%$ ）；
- 储热介质温度分布（热电偶阵列，测量不确定度 $\leq \pm 1^{\circ}\text{C}$ ）。

6.1.3 试验步骤

热回收率试验按照下列步骤进行：

- 启动系统，在额定工况下连续运行至热稳定状态（温度变化率 $\leq 1^{\circ}\text{C}/30$ min）；
- 记录30 min内各测点稳态数据，计算算术平均值；
- 按5.1.1公式计算热回收率；
- 重复试验3次，取算术平均值为最终结果。

6.1.4 数据处理

试验结果应满足表1要求。

表1 热回收性能测试合格判据

参数名称	设计值	合格范围	测量不确定度
热回收率	$\geq 85\%$	83.0%~100%	$\pm 2.0\%$
蓄热效率（8h）	$\geq 97\%$	95.5%~100%	$\pm 1.5\%$
蓄热效率（16h）	$\geq 95\%$	93.5%~100%	$\pm 1.8\%$
储热罐温度分层度	$\leq 15^{\circ}\text{C}$	0~17 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.8^{\circ}\text{C}$

6.2 换热器性能测试

传热有效度测试

按GB/T 27698.1规定的方法进行，测试介质为空气-水/油/熔盐，试验压力为设计压力的1.1倍。

6.2.1 压力损失测试

在额定流量下测量换热器进出口压差，空气侧压降应 ≤ 50 kPa，介质侧压降应 ≤ 30 kPa。

6.2.2 热损系数测试

储热罐在额定工作温度下静置8 h，按公式（3）计算热损系数：

$$U_L = \frac{Q_{loss}}{A \cdot \Delta T_m}$$

式中：

U_L ——热损系数，单位为千瓦每平方米开尔文 [$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$];

Q_{loss} ——散热量，通过介质温降计算，单位为千瓦 (kW)；

A ——储热罐表面积，单位为平方米 (m^2)；

ΔT_m ——储热罐平均温度与环境温度之差，单位为开尔文 (K)。

6.3 储热介质性能验证

6.3.1 熔融盐物性测试

熔融盐物性测试应包括下列内容：

a) 凝固点测定：采用差示扫描量热法 (DSC)，按NB/SH/T 0832执行，允许偏差 $\pm 3^\circ\text{C}$

b) 比热容测定：按GB/T 46193规定测试，测试温度区间 $200^\circ\text{C} \sim 550^\circ\text{C}$ ，允许偏差 $\pm 2\%$

6.3.2 介质兼容性测试

储热介质与罐体材料、换热器管材在最高工作温度下浸泡500 h，腐蚀速率应 $\leq 0.1 \text{ mm/a}$ 。

6.4 系统效率测试

6.4.1 电-电转换效率测试

在额定工况下，按公式（4）计算系统效率：

$$\eta_{sys} = \frac{E_{output}}{E_{input}} \times 100\%$$

式中：

E_{output} ——发电输出电能，单位为兆瓦时 (MW·h)；

E_{input} ——储能消耗电能，单位为兆瓦时 (MW·h)。

6.4.2 测试周期

应完成至少3个完整的“储能-储热-释能”循环，效率算术平均值应 $\geq 65\%$ ，单次效率不应低于63%。

6.5 安全性能验证

6.5.1 安全阀校验

按TSG ZF001规定，开启压力误差 $\leq \pm 3\%$ ，密封试验压力为0.9倍开启压力，保压10 min无泄漏。

6.5.2 接地电阻测试

系统接地电阻应 $\leq 4 \Omega$ ，采用接地电阻测试仪测量，按GB/T 17949.1执行。

6.5.3 绝缘电阻测试

电动机、发电机绕组对地绝缘电阻应 $\geq 100 \text{ M}\Omega$ (500 V兆欧表测量)，按GB/T 20160执行。

7 检验规则

7.1 检验分类

检验分为出厂检验、型式检验和现场验收检验。

7.2 出厂检验

每台设备应进行出厂检验，检验项目见表2。

表2 出厂检验项目与要求

检验项目	检验方法	合格标准
外观与尺寸	目视、量具测量	符合设计图纸
水压试验	GB/T 151	无泄漏，无可见变形
焊缝无损检测	NB/T 47013.2	II级合格
保温层厚度	钢针插入法	不小于设计值95%
电气绝缘测试	6.5.3	绝缘电阻 $\geq 100\text{ M}\Omega$

7.3 型式检验

有下列情况之一时应进行型式检验：

- a) 新产品试制定型鉴定；
- b) 结构、材料、工艺有重大改变；
- c) 停产一年后恢复生产；
- d) 国家质量监督机构提出要求。
- e) 型式检验项目应包括本文件第5章和第6章全部内容。

7.4 现场验收检验

系统安装调试完成后应进行现场验收检验，检验项目包括系统热回收率、蓄热效率、电-电转换效率、安全阀动作性能、噪声测试。

8 标志、包装、运输与贮存

8.1 标志

设备铭牌应包含：产品名称、型号规格、设计压力、设计温度、额定流量、制造单位、出厂编号、制造日期；安全警示标识应符合GB 2894规定。

8.2 包装

换热器、储热罐应采用木质底座固定，易损部位应加装防护罩；随机文件应包括：产品合格证、质量证明书、安装使用说明书、竣工图。

8.3 运输

运输过程中应保持设备竖直，倾斜角度 $\leq 15^\circ$ ；熔融盐介质应在设备就位后现场填充，运输重量不应包含介质重量。

8.4 贮存

设备应贮存在干燥通风的室内，环境温度 $-10^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ ；熔融盐介质应密封贮存，防止吸潮变质。

9 运行维护

9.1 运行监控

应实时监测压缩机排气温度、储热罐温度分布、储气压力等关键参数，采样周期 ≤ 1 s；控制系统应具备异常工况报警功能，报警响应时间 ≤ 2 s。

9.2 定期维护

定期维护应包括下列内容：

- a) 每月检查保温层完整性，修补损坏部位；
- b) 每季度校验安全阀、压力表、温度计等安全附件；
- c) 每年进行一次全面性能测试，包括热回收率、蓄热效率，测试方法按第6章执行；
- d) 每三年进行一次储热罐内部检查，采用内窥镜或机器人检测，评估腐蚀状况。

9.3 故障处理

当储热介质泄漏时，应立即停运系统，启动应急收集装置，防止环境污染；当温度或压力超过报警值时，应自动开启旁路阀门，并切断热源。

附 录 A
(规范性)
热回收率计算示例

A.1 热回收率计算示例

某100 MW AA-CAES系统，压缩空气质量流量 $m=120\text{kg/s}$ ，总压缩比 $p_2/p_1=40$ ，环境温度 $T_0=293\text{K}$ 。

A.2 理论压缩热量计算：

$$Q_{theo} = 120 \times 1.005 \times 293 \times \left(40^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1\right) / 1000 = 128.6\text{MJ/s} \cdots \cdots (3)$$

A.3 实测回收热量

$Q_{act}=110.3 \text{ MJ/s}$ 。

A.4 热回收率

$$\eta_{hr} = \frac{110.3}{128.6} \times 100\% = 85.8\%$$

附 录 B
(资料性)
熔融盐物性参数表

表 B.1 常用熔融盐热物性参数

表B.1 常用熔融盐热物性参数

介质名称	凝固点 (°C)	工作上限 (°C)	比热容 [kJ/(kg·K)]	密度 (kg/m ³)	导热系数 [W/(m·K)]
Solar Salt	220	600	1.53	1870	0.52
Hitec XL	120	500	1.42	1640	0.45
低熔点混合盐	150	550	1.51	1750	0.48