

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

盐穴式压缩空气储能系统储气技术规范

Technical specification for gas storage of salt-cavern compressed
air energy storage system

(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 总体要求	3
4.1 基本原则	3
4.2 选址与地质条件	3
4.3 储气规模与能力匹配	4
5 系统结构和功能	4
5.1 系统构成	4
5.2 功能要求	4
6 技术要求	4
6.1 盐穴设计参数	4
6.2 井筒与完井系统	5
6.3 管网与阀门	5
6.4 密闭性与渗漏控制	5
6.5 监测与控制	5
6.6 安全与环保	6
7 试验方法与验证方法	6
7.1 一般规定	6
7.2 盐穴容积与形态测定	6
7.3 水压试验	6
7.4 气密性试验	6
7.5 注采气性能试验	6
7.6 运行监测与定期验证	7

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、中盐盐穴综合利用股份有限公司、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：钟治琨、赵珈卉、谢卫炜、谢宁宁、张鹏、张健、陈留平、常勇、马修胜、徐孜俊、张国强、郑志美、王兆福、钟声远、乐志斌、夏卫彬。

盐穴式压缩空气储能系统储气技术规范

1 范围

本文件规定了盐穴式压缩空气储能系统（以下简称“盐穴 CAES 系统”）中储气部分的总体要求、系统结构和功能、技术要求、试验方法与验证方法。

本文件适用于以深井盐穴为储气空间、工作介质为空气、与压缩空气储能电站配套的盐穴储气系统的规划、设计、建设、改造、运行和维护。对于采用卤水层、天然气枯竭藏等其它地下空间进行压缩空气储气的工程，可参照本文件执行。

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 150.1 压力容器 第1部分：通用要求
- GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 20801.2 压力管道规范 工业管道 第2部分：材料
- GB/T 43687 电力储能用压缩空气储能系统技术要求
- GB 50011 建筑抗震设计标准
- GB 50016 建筑设计防火规范
- GB 50369 油气长输管道工程施工及验收规范
- GB 50447 实验动物设施建筑技术规范

3 术语和定义

GB/T 43687界定的下列术语和定义适用于本文件。

3.1

盐穴式压缩空气储能系统 salt cavern compressed air energy storage system

以地下注采盐形成的盐穴为储气空间，通过压缩机将空气压入盐穴进行能量储存，并在需要时释放高压空气驱动透平发电的储能系统。

4 总体要求

4.1 基本原则

- 4.1.1 盐穴 CAES 储气系统设计与施工应遵循安全可靠、技术先进、经济合理、节能环保和可持续发展的原则。
- 4.1.2 储气系统应与压缩机系统、膨胀机（透平）系统、地面管网系统和电站控制系统协同设计，保证整体运行效率和安全性。
- 4.1.3 储气盐穴的选址和建库应符合 GB 50369、GB 50447 及相关环保、水文、地质、地震等法规要求。

4.2 选址与地质条件

- 4.2.1 盐岩层埋深宜为 500 m~2000 m，盐岩有效厚度宜不小于 80 m；盐岩层顶、底部应具备良好的隔水层和隔气层。

- 4.2.2 储气盐穴所在区域设计基本烈度不宜大于 8 度，且应满足 GB 50011 关于地下构筑物抗震要求。
- 4.2.3 盐岩应具有较低渗透率（渗透系数 $k \leq 1 \times 10^{-18} \text{m}^2$ ），围岩完整性良好，无大规模断层和溶蚀通道。
- 4.2.4 附近不得存在与储气安全相冲突的采矿、钻井、高压管线、地铁、重要民用建筑等工程设施。安全间距宜不小于 500 m。

4.3 储气规模与能力匹配

- 4.3.1 盐穴工作气量应根据电站装机容量、设计工况（充气时间、放气时间）及循环效率经系统仿真确定。
- 4.3.2 单座电站储气总工作气量 $V_{w, \text{total}}$ 应满足下式：
- 4.3.3 单个盐穴的工作气量宜为 $50 \times 10^4 \text{Nm}^3 \sim 300 \times 10^4 \text{Nm}^3$ ；当所需总气量超过单穴合理容量时，应布置多穴并联储气群。

5 系统结构和功能

5.1 系统构成

盐穴 CAES 储气系统主要由以下部分组成：

- 地质体与盐穴主体：包括盐岩层、围岩及溶腔空间；
- 井筒与完井系统：套管、油管（气管）、封隔器、井口装置等；
- 地面集输与调压系统：集气管网、调压阀组、止回阀、排污设施等；
- 测量与监控系统：压力、温度、流量、液位及微震监测等；
- 安全防护与应急系统：安全阀、爆破片、紧急切断阀、泄放系统、火灾报警与消防设施等；
- 辅助设施：电力、通讯、道路、围栏、防雷接地等。

5.2 功能要求

5.2.1 储气系统应能实现以下基本功能：

- 连续或分段充气（压缩机排气接入盐穴）；
- 稳定放气（向透平或发电系统提供设计压力与流量的空气）；
- 安全泄压与紧急切断；
- 运行状态监测与历史数据记录；
- 异常工况报警与联锁停机。

5.2.2 系统应具备远程监控及自动控制能力，重要阀门和设备应实现 DCS/SCADA 集中控制，并与电站主控系统互联。

6 技术要求

6.1 盐穴设计参数

6.1.1 几何形状与体积控制

6.1.1.1 盐穴宜采用“胡萝卜形”“酒瓶形”或“灯泡形”等上小下大、竖向近似轴对称结构，避免“上大下小”的形状以降低顶板失稳风险。

6.1.1.2 盐穴高度 H 、直径 D 和顶板埋深 h 的典型设计控制值可参照表1。

表 1 盐穴几何参数推荐值

项目	符号	推荐范围	说明
盐穴高度	H	80 m ~ 250 m	宜根据盐层厚度确定
最大腔室直径	D_{max}	40 m ~ 80 m	D_{max}/H 一般为 0.2~0.5
顶板埋深	h	500 m ~ 1500 m	不宜小于 500 m
腔室体积	V	$10 \times 10^4 \text{m}^3 \sim 80 \times 10^4 \text{m}^3$	按工作气量和运行压力设计

顶板厚度	ht	≥ 50 m	盐岩 + 盖层合计有效厚度
------	----	-------------	---------------

6.1.2 运行压力与枕气

6.1.2.1 盐穴最高运行压力 p_{\max} 不应超过该深度盐岩地层静水压力的 80 %~90 %，并应考虑岩石力学稳定性研究结果。静水压力计算如公式（1）：

$$P_h = \rho_w g h \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ρ_w ——地下水密度，通常取 1000 kg/m³；

g ——重力加速度，9.81 m/s²；

h ——盐穴顶板埋深（m）。

当 $h = 1000$ m 时， $p_h \approx 9.81$ MPa， p_{\max} 一般不大于 8.0 MPa。

6.1.2.2 最低运行压力 p_{\min} 应满足顶板稳定、安全防渗及避免卤水返流等要求，一般不应低于 3.0 MPa。

6.1.2.3 盐穴枕气压力 p_{buffer} 不宜低于 0.4 p_{\max} ，枕气量 V_{buffer} 不宜小于盐穴总容积的 20 %~30 %。

6.2 井筒与完井系统

6.2.1 套管强度、抗挤毁和抗拉设计应满足 GB/T 20801.2 和 GB 150.1 的规定，设计压力不小于 p_{\max} 的 1.1 倍，设计温度范围不大于 -20 °C~150 °C。

6.2.2 封隔器应采用适用于盐穴储气工况的高可靠性结构，耐压等级不低于 1.2 p_{\max} ，并具有耐腐蚀和补偿管柱伸缩的能力。

6.2.3 井口装置应具备双重密封和紧急切断功能，防护等级不低于 GB/T 4208 规定中的 IP54。

6.3 管网与阀门

6.3.1 储气井与地面集输管网的连接管线应按 GB/T 20801.2 进行设计，管道设计压力 $P_d \geq p_{\max}$ ；当介质最高温度超过 120 °C 时需校核高温强度。

6.3.2 储气系统主要阀门（井口主阀、集气总阀、紧急切断阀）应采用金属硬密封球阀或闸阀，额定压力不低于 CLASS 900（约 15 MPa），阀门的关闭时间应可调，一般取 5 s~30 s。

6.3.3 地面管网宜采用环状或分区布置形式，满足多穴并联运行的调度灵活性，并设置必要的旁通、放空和排污设施。

6.4 密闭性与渗漏控制

6.4.1 盐穴整体泄漏率 Q_{total} 在稳定运行阶段不宜超过 1 %/年，即一年内工作气量损失占比应 ≤ 1 %。

6.4.2 井筒、管线、阀门等设备的泄漏率应满足表 2 要求。

表 2 设备允许泄漏率推荐值

部位	单点泄漏率限值 (Nm ³ /h)	说明
单个法兰连接	≤ 0.1	按标准状态折算
单个阀门填料	≤ 0.05	正常运行状态
单口焊缝缺陷	≤ 0.01	经无损检测合格后实际应显著低于限值
井口总成	≤ 0.2	包括所有连接点

6.4.3 盐穴密闭性评价应结合注气-回采试验、压力恢复试验及地表微渗漏监测综合判断。

6.5 监测与控制

6.5.1 每个盐穴至少应配置以下测点：

a) 孔口压力、井底压力；

b) 孔口和井下温度（可选）；

c) 注气/采气流量；

d) 顶板和周边区域微震监测点；

e) 井场地面沉降监测点。

6.5.2 压力和温度测量仪表应满足以下要求：

压力测量精度等级不低于 0.5 级，量程为 $0 \sim 1.5 p_{\max}$ ；温度测量精度 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，量程 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

6.5.3 监控系统应具备数据实时采集、历史记录和趋势分析功能，重要参数记录时间间隔不大于 1 min。

6.6 安全与环保

6.6.1 储气井场应布置防火分区，并按照 GB 50016 的规定配置消防设施，满足室外甲、乙类生产装置防火间距要求。

6.6.2 应设置紧急泄压系统，当压力超过设定安全值不高于 $1.05 p_{\max}$ 时能够自动泄放到安全区域。

6.6.3 盐穴运行过程中不得造成地面明显隆沉、塌陷或环境污染，环境监测指标应符合当地生态与环保相关法规要求。

7 试验方法与验证方法

7.1 一般规定

7.1.1 盐穴储气系统在投运前应进行完整性试验、容积测定试验、密闭性试验及系统功能试验。

7.1.2 试验过程中应优先使用空气或惰性气体，不得使用易燃、易爆或剧毒介质。

7.1.3 试验数据应至少保存 30 年，以满足储气库长期安全评估要求。

7.2 盐穴容积与形态测定

7.2.1 可采用声波测井、超声扫描、压力体积法等方法综合确定盐穴的几何形态与体积，具体程序参照 GB 50369 和相关行业标准。

7.2.2 声波测井点位间距不宜大于 1 m；测量误差应控制在 $\pm 2 \%$ 以内。

7.2.3 容积计算可采用分段积分法或三维数值建模法，允许偏差不应大于 $\pm 3 \%$ 。

7.3 水压试验

7.3.1 井筒及地面管网的水压试验压力应为设计压力 P_d 的 1.25 倍~1.5 倍，且不小于 $1.1 p_{\max}$ 。

7.3.2 升压过程应分级进行，每级升压幅度不宜大于 P_d 的 25 %；每级稳压时间不少于 10 min。

7.3.3 在最高试验压力下稳压 60 min，压力降不应超过 1 %，且各连接部位不得出现渗漏和异常变形。

7.4 气密性试验

7.4.1 在完成水压试验并干燥后，使用空气进行气密性试验。试验压力一般为设计压力 P_d 的 1.1 倍。

7.4.2 稳压 24 h 期间，压力降折算为标准状态泄漏率应不超过表 2 中规定的限值总和，其值占试验气量的比例不应超过 0.2 %。

7.4.3 通过皂液检漏、声波检测或红外成像等方法对可疑泄漏点进行定位。

7.5 注采气性能试验

7.5.1 目的在于验证盐穴的注采能力是否满足设计要求，并校核工作气量和枕气量。

7.5.2 注采气试验应至少包括一个完整充气-放气循环，典型工况要求见表 3。

表 3 注采气性能试验工况建议

阶段	入口/出口压力 (MPa)	流量范围 (Nm^3/h)	持续时间 (h)	备注
充气阶段	$3.0 \rightarrow p_{\max}$	$1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$	8 ~ 24	分段提升压力
稳压阶段	P_{\max}	0	≥ 24	观测压力恢复与温度变化
放气阶段	$p_{\max} \rightarrow p_{\min}$	$1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$	4 ~ 12	按实际发电运行工况模拟

7.5.3 通过 P-V-T 数据拟合，验证实际工作气量与设计值偏差不大于 $\pm 5 \%$ ；注采能力（最大注采流量）不低于设计值的 95 %。

7.6 运行监测与定期验证

7.6.1 盐穴投运后应及时开展基线监测，包括：压力、温度、微震活动及地表沉降。

7.6.2 至少每 3 年进行一次综合评估，包括：

- a) 工作气量与枕气量重新核算；
- b) 盐穴形态变化预测（基于蠕变模型）；
- c) 密闭性复核试验；
- d) 井筒与管网完整性检测（包括内窥检测、磁粉/超声无损检测）。

7.6.3 当监测数据出现异常趋势（包括年沉降速率 $> 10 \text{ mm/a}$ 、微震事件显著增多、泄漏率 $> 1 \%/a$ ）时，应立即启动专项评估并采取减压、补强或停运等安全措施。
