

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

盐穴式压缩空气储气技术规范

Technical specification for salt cavern compressed air 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	III
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	4
4 总体要求	5
4.1 设计原则	5
4.2 设计文件与论证	5
5 系统结构与功能要求	5
5.1 系统总体构成	5
5.2 功能要求	5
6 盐穴工程技术要求	5
6.1 地质条件与选址底线	6
6.2 盐穴形状与几何参数	6
6.3 盐穴完整性、衬砌与密封	6
7 设备技术要求	6
8 性能要求与运行参数	7
9 试验方法	8
10 检验规则	8
10.1 检验分类	9
10.2 型式检验	9
10.3 出厂检验	9
10.4 抽样方法	9
10.5 检验报告	9
11 安全、环境与应急	10
11.1 泄漏与爆炸防护	10
11.2 地下水与环境防护	10
11.3 应急预案	10
12 运行维护与检修	10
12.1 日常巡检与监测	10
12.2 定期检修周期	10
12.3 数据管理与性能评估	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。

本文件由中国科学院武汉岩土力学研究所提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：中国科学院武汉岩土力学研究所、珠江水利委员会珠江水利科学研究院、河南北方新能源科技有限公司、山东建筑大学、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：马洪岭、王勇、朱荣谦、宋永兴、谢卫炜、谢宁宁、万发、齐茂永、葛艺、陈留平、常勇、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“系统”）的总体要求、系统结构与功能要求、盐穴工程技术要求、设备技术要求、性能要求与运行参数、试验方法、检验规则、安全、环境与应急、运行维护与检修。

本文件适用于利用人造或改造盐穴进行空气储存的压缩空气储能系统的新建、扩建和改建项目。系统的额定功率不低于10 MW。

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 150.1 压力容器 第1部分：通用要求

GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温

GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限（AQL）检索的逐批检验抽样计划

GB/T 2887 计算机场地通用规范

GB/T 3836.1 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求

GB/T 3836.18 爆炸性环境 第18部分：本质安全电气系统

GB/T 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准

GB/T 14295 空气过滤器

GB 16297 大气污染物综合排放标准

GB/T 18430.1 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 19001 质量管理体系 要求

GB/T 20801 压力管道规范 第1部分：工业管道

JB/T 6443.2 石油、化学和气体工业用轴流、离心压缩机及膨胀机-压缩机 第2部分：离心与轴流式压缩机

DL/T 2473.6 可调节负荷并网运行与控制技术规范 第6部分：并网运行调试

QB/T 5873 岩盐盐穴控制和综合利用技术规范

SY/T 6806 盐穴地下储气库安全技术规程

SY/T 6848 地下储气库设计规范

SY/T 7689 盐穴储气库腔体设计技术要求

SY/T 7752 盐穴型储气库建库地质设计技术要求

JB/T 13407 透平机械干气密封控制系统

ISO 1217 容积式压缩机验收试验（Displacement compressors — Acceptance tests）

IEC 60034 旋转电机-所有零件（Rotating electrical machines — ALL PARTS）

3 术语和定义

SY/T 6806界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

4 总体要求

4.1 设计原则

安全可靠、可维护、经济适用、优先采用国产化主设备、便于与电网调度与能量管理系统（EMS）对接。设计宜满足长期循环稳定性，确保盐穴在设计寿命期内（通常不小于30年）无渗漏、无不可逆变形且地表沉降在可控范围内，安全符合SY/T 6806的规定。

4.2 设计文件与论证

地质选址、盐层稳定性、地下水/含盐水条件、地面与邻近构筑物影响、地下管线与设施影响需进行完整风险与可行性论证，并提交权威地勘与岩土所审核，相关选址活动符合SY/T 7689、SY/T 7752。

5 系统结构与功能要求

5.1 系统总体构成

5.1.1 地面设备

压缩机组、冷却器、干燥/除湿系统、增压与多级压缩旁路阀、进出气阀门与管道、排水/凝结水处理、控制与保护系统、发电膨胀机组/燃气轮机联动（若为补燃CAES，则含热源）以及电气系统（交流/并网柜、同步/异步发电机或燃气轮机）。

5.1.2 地下系统

盐穴主体、井口/竖井及井巷、井口压力控制装置、气封与井口密封、连接管路、缓冲井或多个联通腔体（包括多腔组合）。

5.1.3 监测系统

井下压力/温度传感、地表沉降监测、地震/微震监测、地质水文监测、气体泄漏与周边环境监测、在线数据采集与远程EMS连通。

5.2 功能要求

5.2.1 充气（充能）功能

低谷时段将电能转化为压缩空气并注入盐穴，完成正常充气周期并记录充气参数。

5.2.2 放气（放能）功能

高峰或响应指令时从盐穴释放高压空气，经膨胀发电机组驱动发电，向电网供电并进入放电循环。

5.2.3 快速调度/频率响应

系统应具备一定的快速起停能力（具体响应时间与电网要求挂钩，通常秒-分钟级响应能力由电力调度指定）。

5.2.4 安全保护功能

压阀、爆破片、泄放系统、自动停机逻辑、越限报警与冗余控制。

6 盐穴工程技术要求

6.1 地质条件与选址底线

盐层厚度、无重大断层破碎带、含水层位置与盐水相互作用需评估。盐穴选址应避开活动断层、地下工程冲突带、重要地下构筑物影响区，并符合国家/行业关于地下储气库与矿山的安全法律法规与选址技术规范。

6.2 盐穴形状与几何参数

表1为基于工程研究与示范工程经验的推荐参数区间，实际设计应依地质与工程论证结果确定。相关参数可参考公开研究与示范工程报告。

表1 盐穴形状与几何参数推荐工程参考范围

指标	推荐范围 / 说明
盐穴形状	圆柱形（长柱形）或近球形，长柱形常用于大体积储能
盐穴高度（H）	260~280 m（基于长柱形优化建议）
盐穴直径（D）	推荐 ~80 m（长柱形直径）
单腔体有效容积（ V_{eff} ）	按 H、D 计算（示例：H=270m, D=80m 时体积 $\approx \pi \cdot (40^2) \cdot 270 \approx 1.36 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，工程可用容积按安全压差及不可用区折算）
最小运行压力（ P_{min} ）	10~12 MPa（绝对压力/参考值）
最大运行压力（ P_{max} ）	16~18 MPa（绝对压力/参考值）
腔体之间墙体（pillar）最小宽度	约 2.0~2.5 × 腔体直径（若多腔并列则需更大安全距离）

6.3 盐穴完整性、衬砌与密封

若需衬砌（特殊情况）应采用耐压及耐腐蚀材料，密封系统应确保长期气密性，允许泄漏率应小于设计阈值（示例：设计泄漏率 < 0.1%/年，具体数值由工程风险评估决定并在验收中测定）。井口密封与管线防腐要求应满足石油/天然气相关工程标准）。

7 设备技术要求

设备技术要求应符合表2的规定。

表2 设备技术要求

项目名称	技术要求 / 指标	单位	允许偏差或范围	备注/参考标准
压缩机组形式	多级离心式或轴流式压缩机，带中间冷却与除湿装置	—	≥3级压缩	JB/T 6443.2
压缩机效率	总等熵效率 $\eta \geq 0.80$	—	不低于0.75	设计工况按 ISO 1217 标定
排气温度	各级出口温度 $\leq 180 \text{ }^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$	超限时应设过温保护
冷却系统	中间冷却与终冷却换热器采用水冷或风冷式，换热效率 $\geq 90\%$	%	≥ 88	GB/T 14295、GB/T 18430.1
除湿系统	压缩空气露点 $\leq -20 \text{ }^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$	防止盐穴内结冰或潮化
压缩机材料	壳体与叶轮采用耐压合金钢，压力等级 $\geq 1.25 \times P_{max}$	MPa	按设计	GB/T 150.1
管道与阀门	管道设计压力 $\geq 1.25 \times P_{max}$ ，阀门采用高压密封阀	MPa	允许偏差 $\pm 5\%$	GB/T 20801.1

	(ANSI 600 - 900级)			
储气井口装置	井口阀门、爆破片、压力监测、远程控制齐全	—	应具双重密封	参考 SY/T 6848
膨胀机组	轴流式或径向透平机组，等熵效率 ≥ 0.85	—	≥ 0.80	JB/T 13407
发电机组	同步发电机额定功率与膨胀机匹配，频率偏差 $\leq \pm 0.2$ Hz	Hz	± 0.1	DL/T 2473.6
控制与监测系统	具有SCADA+EMS接口，采样周期 ≤ 1 s，数据保存 ≥ 5 年	s	—	GB/T 2887
安全保护系统	过压、超温、泄漏、停电、地震等多级自动保护	—	自动切断延迟 ≤ 1 s	GB/T 3836.18
防爆与防腐	电气设备防爆等级 Ex d IIB T4；管道内壁防腐涂层寿命 ≥ 15 年	—	—	GB/T 3836.1
噪声控制	压缩机与膨胀机运行噪声 ≤ 85 dB(A)（距设备1m）	dB(A)	± 2	GB/T 12348
备用与冗余	关键设备（压缩机、阀门、电控）具 N+1 冗余	—	不得少于1套	满足长期安全运行要求
设备寿命	主要机械设备寿命 ≥ 20 年，控制与仪表 ≥ 10 年	年	$\pm 10\%$	IEC 60034、GB/T 19001

8 性能要求与运行参数

性能要求与运行参数应符合表3的规定。

表3 性能要求与运行参数

性能指标	推荐设计值 / 范围	单位	技术要求说明	参考标准/依据
盐穴最小运行压力 P_{\min}	10 - 12	MPa	保证盐穴稳定与防止塌陷	工程推荐值 (Li et al., 2023)
盐穴最大运行压力 P_{\max}	16 - 18	MPa	不得超过围岩屈服极限的0.8倍	SY/T 6848
压力波动速率	≤ 0.5	MPa/min	防止盐岩疲劳破裂	依据地质安全评估报告
运行温度范围	-20 ~ +60	°C	系统应在环境变化下稳定运行	GB/T 2423.2
储气体积（单腔）	$1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6$	m^3	典型长柱形腔体 ($H \approx 270$ m, $D \approx 80$ m)	计算公式 $V = \pi r^2 H$
有效储能量	150 ~ 300	MWh	取决于 P_{\min} 、 P_{\max} 及容积	工程设计计算
系统充气时间（满功率）	6 ~ 8	h	满负荷下达到 P_{\max} 所需时间	按设备功率配置计算
系统放气时间（额定输出）	4 ~ 6	h	至 P_{\min} 放气持续时间	实测或设计值
充放电循环次数	≥ 250	次/年	设计应满足调峰频率	运行寿命指标
设计寿命周期	55 - 70	年	盐穴与设备匹配寿命	QB/T 5873
系统能量转换效率 (Round-trip)	55 - 70	%	无补燃系统典型效率；补燃可至80%	工程计算与试验数据
膨胀机输出功率稳定度	± 2	%	在稳态负载下输出波动	监测数据取平均
系统响应时间（启停）	≤ 3	min	快速调频调峰要求	电网调度规定
地表沉降速率	≤ 10	mm/年	长期监测不得超限	岩体变形监测数据

盐穴泄漏率	≤0.1	%/年	以气密性试验结果计	腔体气密试验标准
环境排放标准	符合GB 16297要求	—	废气、废水达标排放	环保合规
噪声与振动	厂界噪声≤70 dB(A)	dB(A)	夜间运行时 ≤60 dB(A)	GB 12348
监测系统精度	压力精度 ±0.1 MPa; 温度 ±1 °C	—	满足数据采集要求	SCADA校准标准
自动控制可靠性	≥99.5	%	年度平均在线率	电力调度中心要求
综合可用率	≥95	%	年运行周期内设备可用率	电力调度中心要求

9 试验方法

盐穴式压缩空气储能系统的试验方法应符合表4的规定。

表4 性能要求与运行参数

技术要求项目	试验内容与方法说明	试验标准编号
压缩机组效率 ($\eta \geq 0.80$)	压缩机等熵效率测试, 按设计工况进行性能验收试验	ISO 1217
压缩机排气温度 ($\leq 180^\circ\text{C}$)	运行中各级出口温度测量, 使用校准热电偶	GB/T 19001 (质量管理体系中对测量设备的要求)
冷却系统换热效率 ($\geq 90\%$)	换热器性能试验, 测量进出口温度与流量	GB/T 18430.1
除湿系统空气露点 ($\leq -20^\circ\text{C}$)	压缩空气露点测量, 使用露点仪进行在线或抽样检测	GB/T 14295
压缩机及管道材料耐压等级	材料压力试验与无损检测	GB/T 150.1
管道与阀门密封性能	压力密封试验, 包括静压与动压测试	GB/T 20801.1
储气井口装置密封与功能	井口阀门、爆破片功能测试与密封性能试验	SY/T 6848
膨胀机组等熵效率 (≥ 0.85)	透平膨胀机性能测试, 按设计工况验收	JB/T 13407
发电机组频率偏差 ($\leq \pm 0.2 \text{ Hz}$)	发电机并网运行频率测试	DL/T 2473.6
控制与监测系统采样周期 ($\leq 1 \text{ s}$)	系统数据采集响应时间测试	GB/T 2887
安全保护系统响应时间 ($\leq 1 \text{ s}$)	模拟故障, 测试自动切断与报警响应时间	GB/T 3836.18
防爆与防腐性能	电气设备防爆性能检验与涂层寿命评估	GB/T 3836.1
噪声控制 ($\leq 85 \text{ dB(A)}$)	设备运行噪声测量, 按标准测点布置	GB/T 12348
设备冗余配置	关键设备切换功能测试, 验证N+1冗余有效性	企业标准/设计文件
设备寿命评估	依据运行记录与加速寿命试验进行评估	IEC 60034、GB/T 19001
盐穴泄漏率 ($\leq 0.1\%/年$)	腔体气密性试验, 压力保持与泄漏量检测	SY/T 6806
地表沉降速率 ($\leq 10 \text{ mm/年}$)	长期监测地表高程变化, 采用水准测量或GNSS	SY/T 7689
系统响应时间 ($\leq 3 \text{ min}$)	模拟调度指令, 测试系统从待机至满负荷时间	DL/T 2473.6
能量转换效率 (55 - 70%)	系统充放电循环测试, 计算往返效率	工程试验规程 (参考ISO 1217及系统测试标准)
环境排放合规性	废气、废水采样与分析	GB 16297

10 检验规则

10.1 检验分类

盐穴式压缩空气储能系统的检验分为型式检验和出厂检验。

10.2 型式检验

10.2.1 检验时机

有下列情形之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品试制定型鉴定；
- b) 正式生产后，如结构、材料、工艺有重大变更，可能影响产品性能时；
- c) 产品停产一年以上恢复生产时；
- d) 国家质量监督机构或行业主管部门提出型式检验要求时。

10.2.2 检验项目

型式检验应包括本规范第5章、第6章中规定的全部技术要求项目，具体见表2、表3和表4。

10.2.3 抽样与判定规则

盐穴式压缩空气储能系统的抽样与判定规则应符合下列规定：

- a) 从出厂检验合格的产品中随机抽取1套系统或关键子系统（如压缩机、膨胀机、储气井口装置等）；
- b) 所有检验项目均符合本规范要求时，判定为合格；
- c) 若有任一项不符合要求，允许整改后重新抽样检验；若仍不合格，则判定为该次型式检验不合格。

10.3 出厂检验

10.3.1 检验项目

出厂检验项目应包括但不限于：

- a) 外观与结构检查；
- b) 主要设备（压缩机、膨胀机、阀门、管道）的压力密封试验；
- c) 控制系统基本功能测试；
- d) 安全保护系统响应测试；
- e) 噪声测量；
- f) 电气设备防爆性能检查。

10.3.2 判定规则

所有出厂检验项目均合格时，判定为该台（套）产品出厂检验合格。如有不合格项，应整改后重新检验，直至合格方可出厂。

10.4 抽样方法

型式检验抽样按GB/T 2828.1执行，采用正常检验一次抽样方案，一般检验水平II，接收质量限(AQL)由供需双方协商确定；出厂检验为全数检验。

10.5 检验报告

检验完成后应出具检验报告，内容包括：

- a) 产品名称、型号、生产批号、委托单位；

- b) 检验依据、检验项目、检验环境条件；
- c) 使用的主要仪器设备；
- d) 检验结果与数据记录；
- e) 检验结论；
- f) 检验日期、检验人员及审核人员签字。

11 安全、环境与应急

11.1 泄漏与爆炸防护

设施设计应考虑高压空气泄漏可能导致的机械破坏、能量释放与温度骤降，施工与运行阶段需设泄压通道、爆破片以及紧急泄放管路。井口与地面设备区应设防爆分区并符合防爆电气规范。

11.2 地下水与环境保护

若盐穴与地下水层接近，需评估盐水迁移风险与周边含水层受影响情形，采取防渗、监测与缓解措施。运行中产生的冷凝水、油污、化学处理剂废水应集中处理并达到环保排放标准。

11.3 应急预案

完善的应急预案应包含气体泄漏、井口失稳、重大设备失效、地表沉降超限、地震/微震诱发风险等情形的响应流程与责任划分，并组织定期演练。

12 运行维护与检修

12.1 日常巡检与监测

建立 24/7 在线监测与报警机制，关键参数（腔体内压、温度、井口密封、地表沉降、微震）应有实时记录并保存。

12.2 定期检修周期

主压缩机：按运行小时或循环次数检修（每6个月/2000 h 检修一次），阀门/安全装置年度检查。

12.3 数据管理与性能评估

建立数据存档制度，按年度或重大运行事件后开展性能评估与安全评审，提出整改措施并验证。
