

ICS XX. XXX

CCS X. XX

# 团 体 标 准

T/CSHE XXXX—XXXX

## 压缩空气储能电站 地下储气库工程地质勘察规程

Code of Practice for Engineering Geological Investigation of  
Underground Gas Storage of Compressed Air Energy Storage Power  
Stations

(征求意见稿)

20XX—XX—XX 发布

20XX—XX—XX 实施

中国水力发电工程学会 发布



# 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总则 .....	2
5 开挖型储气库工程地质勘察 .....	2
5.1 工程地质勘察内容 .....	2
5.2 工程地质勘察方法和技术要求 .....	3
5.3 工程地质评价 .....	4
6 盐穴储气库工程地质勘察 .....	4
6.1 工程地质勘察内容 .....	4
6.2 工程地质勘察方法和技术要求 .....	4
6.3 工程地质评价 .....	5
7 利用矿洞改造型储气库工程地质勘察 .....	5
7.1 工程地质勘察内容 .....	5
7.2 工程地质勘察方法和技术要求 .....	6
7.3 工程地质评价 .....	6
8 施工地质 .....	6
9 成果报告 .....	7
附录 A (规范性) 岩石热物理指标测试要求 .....	8
附录 B (规范性) 围岩单位弹性抗力系数确定 .....	9
附录 C (规范性) 外水压力折减系数经验取值 .....	10
附录 D (规范性) 环境水腐蚀性评价 .....	11
附录 E (规范性) 盐穴储气库水密封测试 .....	13
附录 F (规范性) 盐穴储气库气密性试验 .....	14
参考文献 .....	15
表 C.1 外水压力折减系数经验取值表 .....	10
表 C.2 外水压力折减系数经验取值表 .....	10
表 D.2 环境水对混凝土腐蚀性判别标准 .....	11
表 D.3 环境水对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀性判别标准 .....	12
表 D.4 环境水对钢结构腐蚀性判别标准 .....	12

## 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。

本文件由中国水力发电工程学会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

## 1 范围

本文件确立了压缩空气储能电站地下储气库工程地质勘察的总体原则和要求,并规定了勘察内容、勘察方法、工程地质评价和施工地质以及成果报告的编制要求。

本文件适用于开挖型储气库、盐穴储气库以及利用矿洞改造型储气库工程地质勘察,其他类型地下储气库参照使用。

## 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 50287 水力发电工程地质勘察规范

NB/T 10235 水电工程天然建筑材料勘察规程

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**压缩空气储能电站** compressed air energy storage power station

利用电力系统多余电能将空气压缩储存,需要时再放出,在系统负荷需要时发电的一种储能电站,按照电网调度的需要可做调峰、填谷、储能、调频、调相及紧急事故备用运行等。

### 3.2

**地下储气库** underground gas storage

压缩空气储能电站发电空气能量存储的主体地下空间。可采用开挖方式新建,称为开挖型储气库;也可利用已有地下空间改造,利用已有采卤老腔的称为盐穴储气库,利用已有矿洞的称为利用矿洞改造型储气库。

### 3.3

**热物理指标** thermophysical index

反应岩体导热、导温、储热等能力的指标。

### 3.4

**弹性抗力系数** elastic resistance coefficient

洞室围岩在外力作用下,单位面积岩体产生单位径向变形时所需的压力。

### 3.5

**气密性试验** gas-tight test

通过向钻孔、洞室或井腔等封闭空间充气以形成气压差,并根据压力变幅或气体泄漏量与时间的关系来评价密封性的一种原位试验。

### 3.6

**盖层** cap layers

盐层上覆的非渗透性地层。

### 3.7

**采卤老腔** existing salt cavern

以采卤为目的,溶滴时对形态未经人工控制的盐腔。

### 3.8

**检测管柱 detection string**

盐穴气密性试验过程中下入井筒中的管柱，用于与待检测的井筒间形成环形空间，便于在环空中注入检测气体进行密封性检测。

**3.9****采空区 goaf**

特指地下资源开采后形成的大面积地下废弃空间，不含为开采地下资源而开挖的矿洞、竖井等。

**4 总则**

4.1 压缩空气储能电站地下储气库工程地质勘察应遵循压缩空气储能电站设计程序，勘察阶段划分应与设计阶段工作深度相适应，逐步深入进行。各阶段勘察任务应符合下列要求：

- a) 规划阶段：了解区域地质条件和主要工程地质问题，选择符合工程地质、水文地质要求的库址，对库址选择进行地质论证；
- b) 可行性研究阶段：进行区域构造稳定性研究，并对工程场地构造稳定性和地震安全性作出评价；初步查明规划阶段选定库址的工程地质、水文地质条件，并对影响方案成立的主要工程地质问题作出初步评价，进行确定库址的地质论证；
- c) 初步设计阶段：查明可行性研究阶段选定库址的工程地质、水文地质条件，分析与评价工程地质问题，进行布置方案的地质论证；
- d) 施工地质阶段：依据开挖揭露的地质条件，检验、复核前期勘察的地质资料与结论，并针对专门性工程地质问题进行补充勘察和论证；
- e) 在地质条件简单或有可利用勘察资料的库址，可合并勘察阶段；

4.2 勘察单位在开展外业工作之前，应收集和分析已有的地质资料，并进行现场踏勘，了解工程场区的自然条件和工作条件，根据任务书或合同要求，编制勘察工作大纲。

4.3 勘察工作应目的明确、突出重点，应储气库类型和规模以及各阶段的勘察任务要求，针对关键的工程地质问题，合理布置勘察工作。勘察过程中，应综合运用各种勘探手段和方法，注意运用新技术、新方法。

4.4 勘察单位应重视分析勘察过程中可能引起环境地质条件的改变及其影响，勘探工作应避免对自然环境、地下工程等造成不良影响。

4.5 库址选择应符合下列规定：

- a) 不宜选在基本烈度为IX度及以上的强震区域；
- b) 应避让活动断裂带；
- c) 不宜选在有毒有害气体及放射性物源富集区域。

**5 开挖型储气库工程地质勘察****5.1 工程地质勘察内容**

5.1.1 开挖型储气库工程地质勘察应包括下列内容：

- a) 区域地质和地震、区域构造稳定性；
- b) 库址区地形地貌类型、特征，重点是沟谷分布、切割深度及地形完整程度等，并应分析其与岩性、构造的关系；
- c) 库址区地层岩性、岩体结构、岩相特征、矿物和化学特征，特别是松散、软弱、膨胀、易溶和岩溶化岩层的分布；

- d) 库址区各类构造的分布位置、产状、规模、性状及其组合关系;
- e) 库址区岩体风化、卸荷特征以及不良物理地质现象的成因、分布、规模、发育特征和发展趋势;
- f) 库址区地表水体的分布及其与地下水的关系, 地下水类型、埋藏条件、补给、径流与排泄条件、动态变化特征、水化学成分和岩体渗透性;
- g) 库址区岩体及结构面的物理力学性质;
- h) 库址区岩体地应力量级、方向;
- i) 库址区地温梯度以及岩石热物理指标;
- j) 有害气体和放射性物质的赋存情况;
- k) 人工骨料的储量和质量等。

## 5.2 工程地质勘察方法和技术要求

5.2.1 工程地质测绘应在收集已有地形地质资料的基础上进行; 规划阶段工程地质测绘比例尺宜为 1:10000~1:5000, 可行性研究阶段工程地质测绘比例尺宜为 1:5000~1:2000, 初步设计阶段工程地质测绘比例尺宜为 1:500~1:1000。

5.2.2 应根据地形地质条件、岩土体的地球物理特性和探测目的选择物探方法; 可采用工程物探方法探测覆盖层厚度、地下水位、古河道、隐伏断层、岩溶洞穴等。

5.2.3 勘探宜优先采用钻探手段, 地形地质条件复杂时可开展洞探工作。钻探布置应根据地质条件复杂程度、地质工作研究程度、设计方案、勘察阶段以及地形地貌、工程布置等条件进行综合确定:

a) 规划阶段可进行适量的钻探工作, 重点库址宜布置1个~2个勘探点, 勘探深度宜达到预估底板标高以下50m;

b) 可行性研究阶段应在洞身段以及浅埋、傍山、跨沟等可能存在重大工程地质问题的地段针对性布置勘探点, 勘探点间距宜为200m~300m, 勘探深度应达到设计底板标高以下30m;

c) 初步设计阶段应在洞身段以及密封塞、进出口、竖井等主要建(构)筑物地段布置勘探点, 勘探点间距宜为100m~200m, 勘探深度应达到设计底板标高以下10m~30m。

5.2.4 岩石试验应符合下列规定:

a) 应进行矿物和化学成分分析、密度试验、含水率试验、抗压试验、抗剪试验、抗拉试验、变形试验等物理力学性质试验;

b) 应测定岩石热物理指标, 测定方法应符合附录A的规定;

c) 宜测定孔隙分布和渗透特性等指标;

d) 宜进行温度和压力循环荷载试验, 试验需根据储气压力和温度等参数进行专门设计;

e) 各类岩石的物理力学性质试验均不应少于6组。

5.2.5 现场试验测试应符合下列规定:

a) 应进行声波测试、数字成像、地应力测试、钻孔径向加压试验、地温测试、有害气体测试、放射性测试等;

b) 应在钻孔内进行常规压水试验, 可开展水力劈裂和高压压水试验, 高压压水试验压力不宜小于储气库最高运行压力的1.2倍;

c) 宜通过钻孔、洞室直接进行气密性试验, 宜开展围岩单位弹性抗力系数测试等岩体现场原位变形试验。

5.2.6 地表水、地下水应进行水质分析; 应开展不少于1个水文年的地下水动态长期观测, 观测项目宜包括地下水位、水压、水量及水温等, 观测点宜包括钻孔、泉水等。

5.2.7 人工骨料的调查、勘探和试验可结合储气洞室勘察工作进行，且应符合 NB/T 10235 相应部分的规定。

### 5.3 工程地质评价

5.3.1 开挖型储气库位置选择应符合下列要求：

a) 宜选择在山体雄厚稳定、地形完整部位，避免穿越沟谷、山脊鞍部和大型岩溶汇水洼地等负地形，并应避免区域性断裂、活动断裂、强卸荷岩体、大型溶洞、暗河等；

b) 宜选择硬质岩，岩体较完整~完整，以块状、厚层状结构为主，围岩类别不宜低于 III 类；

c) 宜选择在水文地质条件简单，地下水相对贫乏，岩体透水性微弱，裂隙不发育或闭合、连通性差的位置。

5.3.2 应兼顾施工期和运行期的围岩稳定进行洞室布置和轴线方向选择。

5.3.3 储气库围岩应进行工程地质分类，围岩分类应符合 GB 50287 相应部分的规定。应提出各类围岩及结构面的物理力学参数建议值，提出支护设计和密封设计建议。

5.3.5 单位弹性抗力系数的确定应符合附录 B 的规定。外水压力折减系数应根据洞室围岩条件和洞室防渗排水条件，并参照附录 C 的规定进行综合确定。

5.3.6 应根据围岩工程地质及水文地质条件，提出密封塞位置选择建议。密封塞稳定性评价应包括下列内容：

a) 工程地质及水文地质条件评价；

b) 岩体结构及岩体质量；

c) 密封塞在气压差作用下的稳定性评价。

5.3.7 应进行地表水、地下水腐蚀性评价。腐蚀性评价应符合附录 D 的规定。

5.3.8 应综合收集地区地温、地热、气温等有关资料，并根据地温实测资料，确定地温梯度值，确定储气洞室地温。

5.3.9 应进行岩爆预测、涌水和突泥预测，并提出防范措施建议。

5.3.10 应进行有害气体和放射性评价，并提出防范措施建议。

5.3.11 人工骨料质量和储量评价应符合 NB/T 10235 相应部分的规定。

## 6 盐穴储气库工程地质勘察

### 6.1 工程地质勘察内容

6.1.1 盐穴储气库工程地质勘察内容除符合 5.1.1 中 a)~j) 的相关规定外，还应包括下列内容：

a) 采卤老腔埋深、体积、形态、间距等现状特征；

b) 采卤井井身结构、固井质量、井眼轨迹等现状特征。

### 6.2 工程地质勘察方法和技术要求

6.2.1 盐穴储气库工程地质测绘除符合 5.2.1 中的相关规定外，还应进行采卤老腔地质调查，应重点收集以下资料：

a) 盐矿层平面和垂向分布特征、夹层特征、盖层特征、矿石品位、含矿率等资料；

b) 盐矿区物探、化探、钻井、测井、录井等资料；



- c) 采卤老腔平面布置、腔体埋深、间距、体积、形态、顶底板岩性和厚度等资料；
- d) 采卤井井身结构、套管结构、井眼轨迹、固井质量检测成果等资料；
- e) 盐矿开采历史、开采方式、开采能力等资料。

6.2.2 岩石试验除符合 5.2.4 中的相关规定外，还应符合下列要求：

- a) 应进行盖层、夹层密闭性评价试验，包括矿物成分、孔隙度、孔隙分布特征、比表面积、渗透率、突破压力等；可进行覆压条件下的孔渗测定，可进行扩散系数测试；
- b) 应进行盐岩蠕变试验，试验方法宜采用循环加卸载条件下的三轴试验。

6.2.3 现场测试应符合下列规定：

- a) 应进行测井，测井工作宜符合下列规定：
  - 1) 采卤井测井项目宜包括声波幅度测井、井径测井、井斜测井和电磁探伤测井等；
  - 2) 新建井测井项目宜包括自然电位测井、自然伽马测井、普通电阻率测井、声波幅度测井、井径测井、井斜测井等。
- b) 应进行测腔，测腔工作应符合下列规定：
  - 1) 应采用声呐测量技术进行腔体形态、体积和连通性检测；
  - 2) 可通过地面物探手段探测腔体形态。
- c) 应进行水密封测试，测试要求应符合附录D的规定。
- d) 宜进行气密性试验，试验要求应符合附录E的规定。

### 6.3 工程地质评价

6.3.1 盐矿区选择宜符合下列要求：

- a) 区域构造稳定，构造形态简单，不存在张性断裂构造；
- b) 分布区域性的盖层，岩性宜为泥岩、蒸发岩等致密低渗岩层，盖层厚度不宜小于30m；
- c) 区内水文地质条件简单，盖层中地下水与地表水水力联系微弱；
- d) 盐岩地层总厚宜大于100m，含盐率宜大于70%，NaCl综合含量宜大于60%；
- e) 盐岩地层内部夹层数量少，厚度小，夹层总厚度宜小于30%；
- f) 盖层和夹层具有低渗透性、弱扩散能力、高毛细管压力、高突破压力等特性；
- g) 盐岩层埋深适中，宜为500m~1500m。

6.3.2 采卤老腔选择宜符合下列要求：

- a) 采卤老腔距离断层边界以及与相邻腔体间的间距宜大于2倍腔体最大直径；
- b) 盐穴形态宜符合力学稳定性要求，腔体最大高宽比宜为1.5~2.7；
- c) 盐穴顶面埋深宜为500m~1500m，不宜超过2000m；
- d) 盐腔顶界与盐层顶界盐岩厚度宜大于30m，盐腔底界与盐层底界盐岩厚度宜大于10m；
- e) 卤水开采过程中腔体状态稳定，未发生过影响采卤生产的复杂情况或重大事故。

6.3.4 应进行采卤井可利用性评价，提出采卤井利用和改造建议。

6.3.5 应进行采卤老腔可利用体积和稳定性评价，建议储气库运行压力范围。

6.3.6 应进行采卤老腔盖层、夹层的密封性以及腔体整体密封性评价。

## 7 利用矿洞改造型储气库工程地质勘察

### 7.1 工程地质勘察内容

7.1.1 利用矿洞改造型储气库工程地质勘察内容除符合5.1.1中的相关规定外，还应包括下列内容：

- a) 采空区的形态、规模、分布等；
- b) 矿洞的分布、尺寸、空间关系等；

- c) 地下空间充水情况;
- d) 地面和地下变形破坏特征。

## 7.2 工程地质勘察方法和技术要求

7.2.1 利用矿洞改造型储气库工程地质测绘除符合 5.2.1 中的相关规定外, 还应进行地下空间的调查与测绘, 且应符合下列要求:

a) 地下空间调查与测绘前应重点收集矿产普查资料以及矿区规划、设计、生产和监测等资料, 了解已实施的加固处理措施及效果;

b) 地下空间调查与测绘宜采用地表和地下相结合的方式: 地表宜重点调查和测绘地表变形破坏等物理地质现象的类型、成因、规律和发展趋势; 地下宜重点调查和测绘矿洞展布、尺寸和采空区形态、规模等地下空间要素特征以及变形破坏特征、充水情况等。

7.2.2 勘探宜优先采用洞内勘探形式; 应根据地质条件复杂程度、储气洞室规模以及矿洞分布情况, 进行勘探工作布置:

a) 可行性研究阶段宜在矿洞内布置控制性钻孔, 确定矿洞周边地质条件和验证相邻洞室的分布;

b) 初步设计阶段宜在矿洞内布置不同方向的钻孔, 深度应达到设计洞室轮廓外 30m~50m。

7.2.3 地下空间分布无规律、无法进入地下空间内进行调查和验证的地区, 应采用综合物探方法进行地下空间探测。宜结合物探成果进行地面钻探布置, 地面钻探深度应达到储气库设计底板标高以下 30m。

7.2.4 利用矿洞改造型储气库勘察方法除符合 5.2.4~5.2.7 中的相关规定外, 还宜符合下列要求:

- a) 可采用声波测试、数字成像等方式检测围岩松动圈及开采损伤情况;
- b) 可进行勘察期间采空区地表移动变形监测, 并宜与施工监测、运营监测相结合;
- c) 可对松动圈范围岩石试样进行物理力学性质试验;
- d) 可在地下空间围岩中埋设渗压计, 直接测定外水压力。

## 7.3 工程地质评价

7.3.1 利用矿洞改造型储气库位置选择应符合下列要求:

- a) 矿山所开采矿种应满足人员作业安全及环境安全要求;
- b) 矿洞宜分布平直连续、空间结构简单、相对独立;
- c) 矿洞围岩宜为硬质岩, 围岩类别不宜低于 III 类;
- d) 矿洞围岩宜透水性微弱, 现状渗水量满足改造要求;
- e) 矿洞现状稳定, 服役过程中未发生过严重的坍塌、突水等事故。

7.3.2 利用矿洞改造型储气库工程地质评价内容应符合 5.3.2~5.3.11 中的相关规定, 应对邻近地下空间地下水、岩体变形情况、稳定性、发展趋势预测以及对工程建设可能造成的影响进行评价, 提出工程处理措施建议。

## 8 施工地质

8.1 开挖型和利用矿洞改造型地下储气库施工地质工作应符合下列要求:

- a) 编录和测绘开挖揭露的地质现象, 比例尺宜选用 1:100~1:500;
- b) 分析储气库在施工过程中揭露的地质情况, 结合监测资料, 预测围岩现状稳定性及运行期稳定性, 提出支护和处理措施的复核建议;

- c) 校核并修正围岩分类，必要时应进行专门性工程地质问题的补充勘察；
- d) 参与地质相关的评价、验收工作；

8.2 盐穴地下储气库施工地质工作应符合下列要求：

- a) 进行充放气井钻井地质工作；
- b) 分析钻井资料，核实地层和盐穴条件，进行工程地质条件复核评价；
- c) 参与地质相关的评价、验收工作。

## 9 成果报告

9.1 开挖型和利用矿洞改造型储气库工程地质勘察报告正文宜包括：概述、自然地理条件、区域地质与构造稳定性、工程基本地质条件、岩体质量分析、工程布置地质分析、围岩稳定性评价、气密条件评价、天然建筑材料、结论与建议等。

9.2 开挖型和利用矿洞改造型储气库工程地质勘察报告附图宜包括：工程地质平面图、工程地质剖面图、采空区分布图（适用于利用矿洞改造型）、主要钻孔柱状图等。附件宜包括：物理力学性质试验成果、物探测试成果、水质分析成果、密封性测试成果、地震安全性评价报告、地质灾害危险性评估报告和相关照片等。

9.3 盐穴储气库工程地质勘察报告正文宜包括：概况、自然地理条件、区域地质与构造稳定性、工程基本地质条件、采卤井可改造性分析、腔体稳定性分析、腔体密封性分析、结论与建议等。

9.4 盐穴储气库工程地质勘察报告附图宜包括：工程地质平面图、工程地质剖面图等。附件宜包括：盐岩及夹层物理力学性质试验成果、测井成果、测腔成果、密封性测试成果、地震安全性评价报告、地质灾害危险性评估报告和相关照片等。

附录 A  
(规范性)  
岩石热物理指标测试要求

A.1 宜采用面热源法测定岩石热物理指标。

A.2 面热源法可依据测试参数，按下列公式计算得到导温系数、导热系数和比热容：

a) 导温系数：

$$\alpha = \frac{d^2}{4\tau' y^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$B(y) = \frac{\theta'(\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_2 - \tau_1})}{\theta_2 \sqrt{\tau'}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$\alpha$ ——导温系数(m<sup>2</sup>/h)；

$\tau'$ ——距热源面 d(m)温度升高 $\theta'$ 时的时间(h)；

$B(y)$ ——自变量为  $y$  的函数值；

$\tau_1$ ——关掉加热器的时间(h)；

$\tau_2$ ——加热停止后，热源上温度升高为 $\theta_2$ 时的时间。

b) 导热系数：

$$\lambda = \frac{I^2 R \sqrt{\alpha} (\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_2 - \tau_1})}{S \theta_2 \sqrt{\pi}} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$\lambda$ ——导热系数[W/(m·K)]；

$I$ ——加热电流(A)；

$R$ ——加热器电阻( $\Omega$ )；

$S$ ——加热器面积(m<sup>2</sup>)。

c) 比热容：

$$C = 3.6 \frac{\lambda}{\alpha \rho} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$C$ ——比热容[kJ/(kg·K)]；

$\rho$ ——密度(kg/m<sup>3</sup>)。

附录 B  
(规范性)  
围岩单位弹性抗力系数确定

B.1 围岩的单位弹性抗力系数可按下列一种或多种方法综合确定:

a) 围岩的单位弹性抗力系数可按下列下式估算:

$$K_0 = \frac{E}{(1 + \mu)R} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$K_0$ ——围岩的单位弹性抗力系数, MPa/cm;

$E$ ——围岩的弹性模量或变形模量, MPa;

$\mu$ ——围岩泊松比;

$R$ ——100cm。

b) 在专门试验洞内, 可采用径向液压枕法或水压法直接测试围岩单位弹性抗力系数。

c) 可根据围岩类别和已建工程类比, 确定各类围岩的单位弹性抗力系数。

## 附录 C

(规范性)

## 外水压力折减系数经验取值

C.1 前期勘察阶段,可按表 C.1 预测外水压力折减系数。

表 C.1 外水压力折减系数经验取值表

岩土体渗透性等级	渗透系数 K (cm/s)	透水率 q (Lu)	外水压力折减系数 $\beta_e$
极微透水	$K < 10^{-6}$	$q < 0.1$	$0 \leq \beta_e < 0.1$
微透水	$10^{-6} \leq K < 10^{-5}$	$0.1 \leq q < 1$	$0.1 \leq \beta_e < 0.2$
弱透水	$10^{-5} \leq K < 10^{-4}$	$1 \leq q < 10$	$0.2 \leq \beta_e < 0.4$
中等透水	$10^{-4} \leq K < 10^{-2}$	$10 \leq q < 100$	$0.4 \leq \beta_e < 0.8$
强透水	$10^{-2} \leq K < 1$	$q \geq 100$	$0.8 \leq \beta_e \leq 1.0$
极强透水	$K \geq 1$		

C.2 储气库施工期间或有探洞时,可按表 C.2 预测外水压力折减系数。

表 C.2 外水压力折减系数经验取值表

级别	地下水活动状态	地下水对围岩稳定的影响	折减系数
1	洞壁干燥或潮湿。	无影响	0~0.20
2	沿结构面有渗水或滴水。	软化结构面的充填物质,降低结构面的抗剪强度,软化软弱岩体。	0.1~0.40
3	沿裂隙或软弱结构面有大量滴水、线状流水或喷水。	泥化软弱结构面的充填物质,降低其抗剪强度,对中硬岩体发生软化作用。	0.25~0.60
4	严重滴水,沿软弱结构面有少量涌水。	地下水冲刷结构面中的充填物质,加速岩体风化,对断层等软弱带软化泥化,并使其膨胀崩解及产生机械管涌。有渗透压力,能鼓开较薄的软弱层。	0.40~0.80
5	严重股状流水,断层等软弱带有大量涌水。	地下水冲刷带出结构面中的充填物质,分离岩体,有渗透压力,能鼓开一定厚度的断层等软弱带,并导致围岩塌方。	0.65~1.0

注:当岩溶暗河、洞穴与地表水连通良好时,折减系数取 1。

**附录 D**  
**(规范性)**  
**环境水腐蚀性评价**

D.1 判别环境水腐蚀性时，应收集工程场地的气候条件、冰冻资料、高程，岩土性质，环境水的补给、排泄、循环、滞留条件和污染情况以及类似条件下工程建筑物的腐蚀情况。

D.2 环境水对混凝土的腐蚀性判别，应符合表 D.2 的规定。

**表 D.2 环境水对混凝土腐蚀性判别标准**

腐蚀性类型		腐蚀性判定依据	腐蚀程度	界限指标	
分解类	溶出型	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 含量 (mmol/L)	微腐蚀 弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >1.07 1.07≥HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >0.70 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ≤0.70 ——	
	一般酸性型	pH值	微腐蚀 弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	pH>6.5 6.5≥pH>6.0 6.0≥pH>5.5 pH≤5.5	
	碳酸型	侵蚀性 CO <sub>2</sub> 含量 (mg/L)	微腐蚀 弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	CO <sub>2</sub> <15 15≤CO <sub>2</sub> <30 30≤CO <sub>2</sub> <60 CO <sub>2</sub> ≥60	
分解结晶复合类	硫酸镁型	Mg <sup>2+</sup> 含量 (mg/L)	微腐蚀 弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	Mg <sup>2+</sup> <1000 1000≤Mg <sup>2+</sup> <1500 1500≤Mg <sup>2+</sup> <2000 Mg <sup>2+</sup> ≥2000	
结晶类	硫酸盐型	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 含量 (mg/L)	微腐蚀 弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	普通水泥 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <250 250≤SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <400 400≤SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <500 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ≥500	抗硫酸盐水泥 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <3000 3000≤SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <4000 4000≤SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <5000 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ≥5000

注 1：本表规定的判别标准所属场地应是不具有干湿交替或冻融交替作用的地区和具有干湿交替或冻融交替作用的半湿润、湿润地区。当所属场地为具有干湿交替或冻融交替作用的干旱、半干旱地区以及高程 3000m 以上的高寒地区时，应进行专门论证。

注 2：当混凝土建筑物直接接触污染源时，污染源对混凝土的直接腐蚀作用应专门研究。

D.3 环境水对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀性判别，应符合表 D.3 的规定。

表 D.3 环境水对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀性判别标准

腐蚀性判定依据	腐蚀程度	长期浸水	干湿交替
Cl <sup>-</sup> 含量 (mg/L)	微腐蚀	<10000	<100
	弱腐蚀	10000~20000	100~500
	中等腐蚀	——	500~5000
	强腐蚀	——	>5000

注：当环境水中同时存在氯化物和硫酸盐时，表中的 Cl<sup>-</sup>含量是指氯化物中的 Cl<sup>-</sup>与硫酸盐折算后的 Cl<sup>-</sup>之和，即 Cl<sup>-</sup>含量=Cl<sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>×0.25，单位为 mg/L。

D.4 环境水对钢结构的腐蚀性判别，应符合表 D.4 的规定。

表 D.4 环境水对钢结构腐蚀性判别标准

腐蚀性判定依据	腐蚀程度	界限指标
pH 值、 (Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) 含量(mg/L)	弱腐蚀 中等腐蚀 强腐蚀	pH 值 3~11、(Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )<500 pH 值 3~11、(Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )≥500 pH<3、(Cl <sup>-</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )任何浓度

注 1：表中是指氧能自由溶入的环境水。  
注 2：如环境水的沉淀物中有褐色絮状物沉淀(铁)、悬浮物中有褐色生物膜、绿色丛块，或有硫化氢臭味，应做铁细菌、硫酸盐还原细菌的检查，查明有无细菌腐蚀。



**附录 E**  
**(规范性)**  
**盐穴储气库水密封测试**

- E.1 应对采卤老腔和采卤井筒进行水密封测试。
- E.2 测试前应编制水密封测试工作大纲。
- E.3 应根据盐腔条件及卤水数据综合确定测试压力，测试压力应能保证腔体和井筒的稳定性和安全性，并折算为井口压力值。
- E.4 水密封测试阶段，随时间推移，井口压力会有所下降，需额外注入卤水以补充漏失量，从而保证压力稳定。
- E.5 若井口压力下降幅度和日注水量（漏失量）随测试次数的增加而逐渐变小，最终趋于零并保持稳定，则该腔体试压合格。
- E.6 对于采卤井密封性较差的井腔或对流井采卤老腔，评价条件可适当放宽，试验阶段井口压力和漏失量下降幅度经多次测试有明显变小趋势时，可认为该腔体初评合格。

附录 F  
(规范性)  
盐穴储气库气密性试验

- F.1 宜对采卤老腔和采卤井筒进行气密性试验。
- F.2 测试前应编制气密性试验工作大纲。
- F.3 应根据腔体条件、井筒现状和预估的储气库运行工况综合确定测试压力，测试压力应能保证腔体和井筒的稳定性和安全性。
- F.4 检测介质宜为氮气。
- F.5 检测设备精度应满足检测和计算要求。
- F.6 应根据井口气体测试压力、温度及记录的气水界面深度等参数计算气体泄漏量，绘制24h内泄漏率与时间的关系曲线。
- F.7 评价标准应符合下列规定：
- a) 若24h检测时间内气水界面深度变化值小于1m，且气体泄漏率曲线逐渐减小并趋近于零，则密封性合格；
  - b) 若24h检测时间内气水界面深度变化值小于1m，但气体泄漏率曲线未逐渐减小，可延长检测时间或根据现场具体情况综合分析判断腔体密封性；
  - c) 若24h检测时间内气水界面深度变化值不小于1m，则密封性不合格。

## 参 考 文 献

- [1] GB 50021 岩土工程勘察规范
- [2] GB 55017 工程勘察通用规范
- [3] GB 50487 水利水电工程地质勘察规范
- [4] NB/T 10241 水电工程地下建筑物工程地质勘察规程
- [5] SY/T 7644 盐穴型储气库井筒及盐穴密封性检测技术规范