

ICS 国际标准分类号

CCS 中国标准文献分类号

团 体 标 准

T/CERS XXX-XXXX

碱性水电解槽出厂与役前检测技术要求

Technical requirements for factory and pre service testing of
alkaline water electrolysis

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国能源研究会 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 技术要求.....	2
4.1 通用要求.....	2
4.2 基本要求.....	2
5 出厂检测试验方法.....	3
5.1 试验规范.....	3
5.2 外观和结构检测.....	3
5.3 密封性检测.....	3
5.4 管路连接检测.....	4
5.5 性能检测.....	4
6 役前检测试验方法.....	5
6.1 试验规范.....	5
6.2 外观和结构检测.....	5
6.3 密封性检测.....	5
6.4 管路连接检测.....	6
6.5 性能检测.....	6
7 设备文件要求.....	6
7.1 设计文件.....	6
7.2 搬运吊装说明.....	6
7.3 使用手册.....	6
7.4 安装维护手册.....	6
7.5 标志.....	7
附 录 A（资料性） ALK 电解槽典型结构.....	8
附 录 B（资料性） ALK 制氢系统安全联锁.....	9
附 录 C（资料性） 电解槽结构变形检测方法.....	11
附 录 D（规范性） 螺栓轴向应力检测方法.....	13
附 录 E（资料性） 氢气/氧气纯度测试方法.....	15
附 录 F（资料性） 基于交流阻抗技术的电解池状态检测方法.....	16
附 录 G（资料性） 电解槽效率衰减计算方法.....	19
参 考 文 献.....	20

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》给出的规则起草。

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这些专利的责任。

本文件由中国能源研究会提出。

本文件由中国能源研究会标准工作办公室归口。

本文件起草单位：苏州热工研究院有限公司、中国广核新能源控股有限公司、深圳市瑞麟科技有限公司、江苏东华测试技术股份有限公司、天津纳金绿能新材料科技有限公司、江苏双良氢能科技有限公司、北京化工大学、北京科技大学、湖南大学、大连理工大学、苏州科技大学、郑州大学、华东理工大学、南通安思卓新能源有限公司、常州领威特信息技术有限公司。

本文件主要起草人：赵万祥、王水勇、杨磊、王湛洋、陈明亚、马震、龚铭、康健立、王睿、韩世涛、胡松、文志伟、唐阳、杨高强、毕胜、高泽、石颀、董礼、李海明、王伟、陈东方、刘桂林、温建锋、王强、魏旭红、马官兵、高峰、田江南、杨林、张一民、罗梦琪、孙广新、刘乔、陈国平。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国能源研究会。

相关意见反馈联系方式：中国能源研究会标准执行办公室（E-mail: cers@cers.org.cn；电话：010-56284696）。

碱性水电解槽出厂与役前检测技术要求

1 范围

本文件规定了碱性水电解槽（以下简称“ALK 电解槽”）出厂与役前检测的技术要求，出厂检测试验方法、役前检测试验方法、设备文件要求。

本文件适用于产氢压力介于常压至 2.0 MPa，单槽标准产氢量介于 50 Nm³/h 至 2000 Nm³/h 之间的 ALK 电解槽。产氢压力大于 2.0 MPa，单槽标准产氢量小于 50 Nm³/h 或者大于 2000 Nm³/h 的 ALK 电解槽可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 压力容器
- GB/T 191 包装储运图示标志
- GB/T 1972.2 碟形弹簧 第 2 部分：技术条件
- GB/T 2829 周期检验计数抽样程序及表（适用于对过程稳定性的检验）
- GB/T 3634.2 氢气 第 2 部分：纯氢、高纯氢和超纯氢
- GB/T 3863 工业氢
- GB/T 3985 石棉橡胶板
- GB/T 5831 气体中微量氧的测定 比色法
- GB/T 5832.1 气体分析 微量水分的测定 第 1 部分：电解法
- GB/T 5832.2 气体分析 微量水分的测定 第 2 部分：露点法
- GB/T 6285 气体中微量氧的测定 电化学法
- GB/T 6388 运输包装收发货标志
- GB/T 8984 气体中一氧化碳、二氧化碳和碳氢化合物的测定 气相色谱法
- GB/T 19774 水电解制氢系统技术要求
- GB/T 24499 氢气、氢能与氢能系统术语
- GB/T 29729 氢系统安全的基本要求
- GB/T 37562 压力型水电解制氢系统技术要求
- GB/T 43232 紧固件 轴向应力超声测量方法
- GB/T 46104 电解水制氢系统功率波动适应性测试方法
- GB 50030 氧气站设计规范
- GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范
- GB 50177 氢气站设计规范

3 术语和定义

GB/T 19774 和 GB/T 24499 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

碱性水电解槽（简称“ALK 电解槽”） *alkaline water electrolysis*
利用碱性电解质进行电解反应，将水分解为氢气和氧气的装置。

3.2

标准状态 *normal condition*

气体在温度 0℃、压力为 101.3kPa 条件下的气体状况（引自 GB/T 19774 的 3.1 节）。

3.3

氢气泄漏 gaseous hydrogen leakage

氢气从密闭的系统、设备、管路渗出至外部的过程（引自 GB/T 24499 的 2.23 节）。

3.4**爆炸极限 limit of explosion**

在一定温度和压力下，可燃气体与空气或氧气混合，在一定浓度范围内才能被点燃并爆炸。该混合气中可燃气体的浓度范围被称为爆炸极限（引自 GB/T 24499 的 6.1 节）。

3.5**电解池 electrolyte cell**

组成水电解槽的基本单元，被称为电解池，单个电解池由阴极、阳极、隔膜和电解液构成（引自 GB/T 24499 的 3.11 节）。

3.6**质量流量计 mass flowmeter**

流量计检测元件的输出信号直接或间接反映流体质量流量的计量装置，质量流量计的输出信号与流体的物理性质如压力、温度、密度等无关（引自 GB/T 24499 的 4.38 节）。

4 技术要求**4.1 通用要求**

4.1.1 ALK 电解槽是电解制氢系统的主要设备，典型结构如附录 A 所示。

4.1.2 ALK 电解槽的使用环境应按厂家的制造标准和用户的应用要求进行协商确定。

4.1.3 ALK 电解槽的运行参数、结构设计、操作条件应以降低生产单位氢气的电能消耗、减少制造成本、延长使用寿命、提高设备性能为基本要求。

4.1.4 ALK 电解槽在最低和最高负荷之间以稳定功率运行时，ALK 电解槽出口氢气中所含氧气的体积分数不应超过 1%，氧气中所含氢气的体积分数不应超过 2%（远离氢气爆炸极限）。

4.1.5 ALK 电解槽的工作温度宜为 75℃~95℃。

4.1.6 ALK 电解制氢系统运行中，电解液质量要求应符合表 1 的规定。

表 1 碱性 KOH 水电解制氢系统电解液质量要求

名称	单位	指标
浓度	%	27.0~33.0
CO ₃ ²⁻ 含量	mg/L	<100.0
铁离子含量	mg/L	<3.0
氯离子含量	mg/L	<800.0

4.1.7 有关氢气制备相关设备的安全标准应符合 GB/T 19774 和 GB 29729 的要求。

4.1.8 检测过程中，若有突发电解液、氢气等泄漏事件，应及时切断电源，并对泄漏污染区进行通风，排除泄漏污染区可能存在的点火源。

4.2 基本要求**4.2.1 外观和结构**

4.2.1.1 对 ALK 电解槽的结构表面进行外观检测。检查表面应无裂纹、异常变形等缺陷；密封面应平整光洁，无划伤、磕碰损伤，确保密封性能可靠，防止电解液泄漏及气体窜混。

4.2.1.2 框架材料的厚度设计应保障设备长期运行无异常变形、开裂风险。

4.2.1.3 碟形弹簧应无松动、开裂、异常变形等情况，其制造要求应符合 GB/T 1972.2 的规定。

4.2.1.4 焊缝不应出现气孔、夹渣和裂纹等缺陷。

4.2.1.5 拉杆螺栓轴向应力测量应符合 GB/T 43232 的要求，以保障设备组装后密封均匀、受力平衡，避免因预紧力不足导致电解液泄漏，或预紧力过大造成螺栓异常变形、垫片异常变形、端板开裂等。

4.2.1.6 ALK 电解槽的电镀零部件的质量、检查应符合下列要求：

- a) 镀件的镀层表面不得鼓泡、起皮、局部无镀层和划伤等严重缺陷；
- b) 镀件的镀层厚度、结合强度及孔隙率的检验抽样和抽样方法应符合 GB/T 2829 的要求。

4.2.2 垫片及密封性

4.2.2.1 垫片需与密封面贴合紧密，避免松动、错位，压缩量应符合设计要求。

4.2.2.2 密封圈/垫、隔膜密封结构等要保证材质无龟裂、异常变形等，其质量应符合 GB/T 3985 的要求。

4.2.2.3 安装时密封面应清洁无杂质，密封预紧力均匀。

4.2.2.4 在进行额定工况测试时，要保证无电解液渗漏、氢氧气体泄漏，以保障设备初始密封可靠性。

4.2.2.5 密封垫片的选择应确保 ALK 电解槽在工作状态不渗漏，并能承受电解槽开、停车时的工作状态变化。

4.2.3 接地保护

4.2.3.1 ALK 电解槽应按结构特点进行接地电阻检查。对两端分别接入直流电源正负极的 ALK 电解槽，其对地绝缘电阻应不小于 $1\text{ M}\Omega$ 。

4.2.3.2 氢气设备、管道的法兰、阀门等连接处跨接电阻应小于 $0.03\ \Omega$ 。

4.2.3.3 电气设备的接地，应设单独接干线，不得采取串接方式。

4.2.3.4 氢气、氧气放空管应设置防静电接地，ALK 电解槽等相关联锁要求参见附录 B。

4.2.4 气液管路连接

4.2.4.1 与 ALK 电解槽连接的气体管路宜采用无缝钢管制作。

4.2.4.2 与 ALK 电解槽连接的氢气管路附件的材质选择应符合 GB 50177 的要求，氧气管路附件应符合 GB 50030 的要求。

5 出厂检测试验方法

5.1 试验规范

5.1.1 试验前准备

5.1.1.1 在试验前，应检查制造厂家提供的各种合格证、技术文件、包括全部例行试验记录和证书、图纸资料、压力容器产品的安全性能监督检验证书等文件、资料齐全后方可进行试验。

5.1.1.2 在进行测试时，整套制氢系统应依据制造厂家说明书组装完成，并确保其系统设备在试验检测中的工况与真实工况相同或相似。

5.1.1.3 试验场地的测试环境符合设计要求，各生产辅助系统均应达到开车所应具备的条件。

5.1.2 试验要求

5.1.2.1 制造厂家应向用户提供下列检测记录、资料和报告，或相关的合格证书：

- a) 所订购设备在制造厂家的检测试验资料或报告；
- b) 订货合同规定的所有检测项目的检测记录、资料和报告。

5.1.2.2 检测用仪器、仪表和所有相关材料，均应符合有关标准或合同的规定。检测用仪器、仪表均应在有效认证时限内，且精度符合测试要求。

5.2 外观和结构检测

5.2.1 部件变形检测

部件在受力或温度变化等因素作用下引起变形的程度可以用挠度进行衡量。挠度可用挠度仪进行检测，各部件的挠度要符合 ALK 电解槽结构的设计要求，ALK 电解槽结构形变的检测方法可以参见附录 C，检测结果应符合 4.2.1 的要求。

5.2.2 拉杆螺栓轴向应力检测

ALK 电解槽出厂前应对拉杆螺栓的轴向应力进行检测，螺栓轴向应力检测的一般方法可参见附录 D，检测结果应符合 4.2.1.5 的要求。

5.3 密封性检测

5.3.1 气密性检测

5.3.3.1 对压力型 ALK 电解制氢系统以干燥、洁净空气或氮气进行气密性试验。

5.3.3.2 气密性试验压力为设计压力，试验开始后逐渐升压，达到规定压力后，保持 30 min，检查所有连接处，包括但不限于焊接、法兰、垫片等连接处，以无漏气为合格。

5.3.3.3 对于常压型 ALK 电解制氢系统的气密性试验，试验压力为 0.05 MPa 或注满水静置试验。

5.3.2 泄漏率试验

对压力型 ALK 电解槽在气密性试验合格后，以干燥、洁净空气或氮气进行泄漏率试验。试验压力为系统设计压力，试验时间为 24h。泄漏率试验过程中记录系统内气体的温度和压力。以平均每小时泄漏率不超过 0.1%/h 为合格，平均每小时泄漏率 A 按公式(1)计算。

$$A = \frac{100}{t} \left(1 - \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2} \right) \quad (1)$$

式中：

A ——平均每小时泄漏率，%/h；

t ——试验时间，h；

P_1, P_2 ——试验开始、结束时的绝对压力，MPa；

T_1, T_2 ——试验开始结束时的气体绝对温度，K。

5.3.3 差压试验

5.3.3.1 ALK 电解槽在装配完成后应进行内漏和外漏试验。

5.3.3.2 内漏和外漏的具体检测方法应依据制造厂家的设计标准和实际情况参照进行。

5.4 管路连接检测

5.4.1 对 ALK 电解槽进液管、出液管、氢气管路、氧气管路连接部位进行检测，检查管路连接是否松动。

5.4.2 检查管路与接头焊接、法兰连接的焊缝质量，螺纹连接要求无滑丝、松动，确保流体及气体传输通道密封，避免介质泄漏引发安全风险。

5.4.3 管路连接的检测结果应符合 4.2.4 的要求。

5.5 性能检测

5.5.1 检测前准备

5.5.1.1 对 ALK 电解制槽应符合设计要求，达到开车所应具备的基本条件。

5.5.1.2 开车后，逐渐增加负荷直至氢气/氧气纯度、工作压力、工作温度、氢气产量达到设计工况，并稳定运行后，开始进行检测、记录。

5.5.1.3 性能参数检测内容包含氢气产量、氢气/氧气纯度、直流电压和电流、单位制氢电耗等运行参数。进行上述监测的同时，并记录系统工作压力、工作温度、原料水耗量、电解液浓度等参数。

5.5.2 性能参数检测

5.5.2.1 氢气产量的检测应符合以下要求：

- ALK 电解槽的氢气产量检测方法有质量流量计法、容积法和直流电流测试值计算法；
- 直流电流测试值计算方法应符合 GB/T 37562 附录 C 的规定。

5.5.2.2 氢气/氧气纯度检测应符合以下要求：

- 普通氢气纯度和氢中杂质含量采用连续分析仪器检测，参见附录 E.1。纯氢中杂质含量应符合 GB/T 3634.2 的要求；采用 GB/T 5831、GB/T 5832.1、GB/T 5832.2、GB/T 6285 和 GB/T 8984 的方法进行检测。
- 氧气纯度和氧中杂质含量采用连续分析仪器检测，参见附录 E.2。氧中杂质含量应符合 GB/T 3863 的要求，可采用 GB/T 5832.1 和 GB/T 5832.2 的方法进行检测。
- 氢气/氧气的纯度检测的取样点，应在制氢系统中气液分离器之后，纯化系统之前。

5.5.2.3 直流电压、电流的检测应符合以下要求：

- ALK 电解槽的总直流电流（槽电流）用直流电流表检测，电流表的精度等级不低于 0.5 级。

- b) ALK 电解槽的总直流电压（槽电压）用直流电压表检测检测位置在 ALK 电解槽的正极、负极端板处。电压表的精度等级不低于 0.5 级。
- c) 每个电解池电压采用万用表或专用电压表检测。仪器精度等级不低于 0.5 级。ALK 电解槽的各个电解池电压应分布均匀（电解池电压最大值减去最小值不超过 0.2 V）。

5.5.2.4 ALK 电解制氢系统单位制氢的直流电耗应符合 GB/T 46104 9.2.3.5.2 和 9.2.3.5.3 的规定。

5.5.2.5 在不同电流密度、温度、碱液流量、压力条件下实时监测阳极侧氧中氢数值，检测结果应符合 4.1.4 节要求。

5.5.3 电解池一致性检测

5.5.3.1 ALK 电解槽的单电解池的一致性状态可以通过测试各电解池的电压进行比对验证。

5.5.3.2 电解池一致性状态也可通过极化曲线、电化学阻抗谱、交流阻抗分析方法进行比对分析。

5.5.3.3 交流阻抗分析技术可以实现同时对多个电解池的状态检测，且可以得到每个独立电解池的内部运行状态，包括极化电压、催化层失效、碱液流速、碱液浓度、温度、健康状态等。交流阻抗检测方法可以参见附录 F。

5.5.4 效率衰减

制造厂家应对 ALK 电解槽在动态或长期运行条件下的效率衰减做出说明，ALK 电解槽效率衰减的计算方法参见附录 G。在 ALK 电解槽效率衰减测试过程中，应对电解槽的电压、电流等特性进行实时监测，通过与出厂时电解槽能量转换效率的对比判断电解槽的效率衰减。

6 役前检测试验方法

6.1 试验规范

6.1.1 试验前准备

6.1.1.1 检查电解槽的合格证、技术文件、试验记录、特种设备产品安全质量监督检验证书和使用登记证等，确保文件资料齐全且核对无误。

6.1.1.2 役前检测的试验前准备的其它内容和出厂检测的内容保持一致，应参考 6.1.1 的内容。

6.1.2 试验要求

6.1.2.1 役前检测是电解槽经生产制造、出厂检测、运输颠簸、到地安装后在用户现场进行检测的项目。该阶段的电解槽已经通过了出厂检测的要求。

6.1.2.2 役前检测的试验要求的其它内容和出厂检测的内容保持一致，应参考 6.1.2 的内容。

6.2 外观和结构检测

6.2.1 部件变形检测

役前检测的气密性检测内容和出厂检测的内容保持一致，应参考 6.2.1 的内容。

6.2.2 拉杆螺栓轴向应力检测

ALK 电解槽在服役前会因厂家生产、运行测试、运输颠簸、到地安装等操作对槽体产生影响，需要对拉杆螺栓的轴向应力进行检测，防止运行中因螺栓轴向应力不足引发设备振动、气体泄漏等安全隐患，可采用超声应力、螺栓轴向应力装置检测和扭矩复校等方法，以检测螺栓轴向应力变化。若发现单螺栓轴力下降明显，则需排查密封面磨损、螺栓松弛原因，必要时更换螺栓并重新按照出厂标准复紧。

拉杆螺栓轴向应力检测方法参照附录 C，检测结果应符合 4.2.1.5 的要求。

6.3 密封性检测

6.3.1 气密性检测

役前检测的气密性检测内容和出厂检测的内容保持一致，应参考 5.3.1 的内容。

6.3.2 泄漏率试验

役前检测的泄漏率试验内容和出厂检测的内容保持一致，应参考 5.3.2 的内容。

6.3.3 差压试验

役前检测的差压试验内容和出厂检测的内容保持一致，应参考 5.3.3 的内容。

6.4 管路连接检测

管路连接的检测试验内容和出厂检测的内容保持一致，应参考 5.4 的内容。

6.5 性能检测

役前检测的性能检测试验内容和出厂检测的内容保持一致，应参考 5.5 的内容。

7 设备文件要求

7.1 设计文件

制造厂家应提供 ALK 电解槽在安装、运行、维护中所需的图纸。制造厂家需提供的图纸应包括但不限于下列内容：

- a) 工艺流程图,包括控制点、管径等;
- b) 电解槽设备总图(应有接管、接线标注);
- c) 组件内设备及管线图;
- d) 需土建施工的基础条件图。

7.2 搬运吊装说明

7.2.1 制造厂家应提供 ALK 电解槽各类单体设备、组件的安全搬运、吊装说明；必要时以图示说明吊装、搬运方法。

7.2.2 搬运吊装说明应确定 ALK 电解槽重心，以便起重机、叉车搬运。

7.2.3 根据 ALK 电解槽的规格、尺寸和重量制定吊装、就位方案，进行充分准备后再就位安装。

7.3 使用手册

制造厂家应提供 ALK 电解槽使用手册，使用手册至少应包括以下内容：

- a) 公用条件要求，如：电源电压、频率和容量、原料碱液品质要求及用量、仪表用压缩空气、冷却水品质要求及用量等；
- b) 制氢设备的额定技术参数，如产气量、气体纯度、产气压力、直流电压、直流电流、能耗指标等；
- c) ALK 电解槽运行开始、停止步骤等工艺操作规程及注意事项；
- d) ALK 电解槽长期放置的注意事项；
- e) 设备可能出现的故障、故障原因分析并提供应急解决方案，同时提供所涉及的危险物质（氢气、氧气）的处理方法及安全注意事项。

7.4 安装维护手册

7.4.1 制造厂家应提供安装、维护的要求和指导原则。ALK 电解槽的现场布置和设计应符合 GB 50177 的要求。

7.4.2 ALK 电解槽应附有安装手册，安装手册至少应包括以下内容：

- a) 设备基础、设备就位、电气接线、自控仪表和控制阀等的安装要求；
- b) 对防爆电器及其配线安装的要求；
- c) 通风、易燃材料和明火管制要求等；
- d) 各种需定期更换或清洗的零部件的说明以及更换、清洗的要求；
- e) ALK 电解槽的维护说明；
- f) 拆解和运输的推荐方法。

7.4.3 安装维护手册应包含所有 ALK 电解槽部件日常维护的要求，并指出这些维护的必要性和最低频率。

7.4.4 安装维护手册应对 ALK 电解槽的周期性检查提出要求，检查应由专业人士进行。

7.4.5 安装维护手册应对 ALK 电解槽的维修进行具体介绍。

7.4.6 安装维护手册中应包含相应的安全技术要求。

7.5 标志

7.5.1 标志应符合 GB/T 191-2008 和 GB/T 6388-1986 的规定。

7.5.2 ALK 电解槽设备上应有铭牌，应包括设备名称、型号。

7.5.3 设备说明手册中应包含以下标志：商标、企业名称与地址、设备型号及名称、生产日期。

附录 A
(资料性)
ALK 电解槽典型结构

ALK 电解槽的结构一般由多个电解池（又称“电解小室”）单元、碱液通道和气体通道共同组成，单个电解池结构包括阳极电极、阴极电极、隔膜和电解液。其典型结构组成如图 A.1 所示。

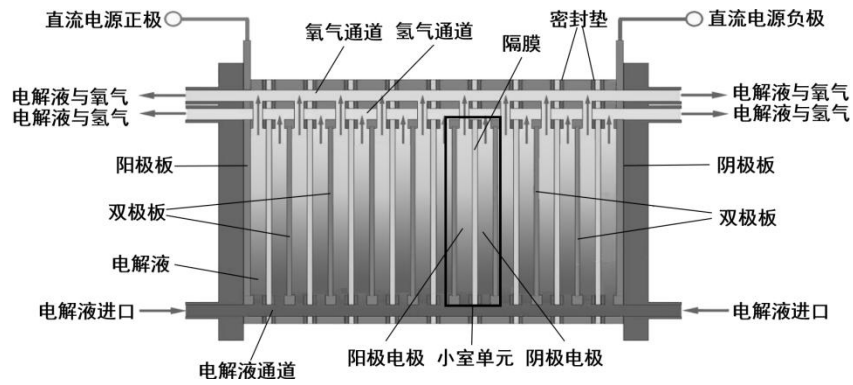


图 A.1 ALK 电解槽典型结构示意图

附录 B
(资料性)
ALK 制氢系统安全联锁

B.1 气体泄漏联锁**B.1.1 泄漏监控触发**

在相对封闭、通风条件有限的空间，气体泄漏联锁应该按照如下要求进行操作：

- a) 当运行环境中氢气浓度 $\geq 0.4\%$ 时，进行声光报警并启动事故风机或氮气吹扫系统；
- b) 当运行环境中氢气浓度 $\geq 1\%$ 时，切断电解槽电源停止设备运行。

在露天、通风良好的户外空间，气体泄漏联锁应该按照如下要求进行操作：

- a) 当运行环境中氢气浓度 $\geq 0.4\%$ 时，进行声光报警；
- b) 当运行环境中氢气浓度 $\geq 1\%$ 时，启动事故风机；
- c) 当运行环境中氢气浓度 $\geq 1.6\%$ 时，切断电解槽电源停止设备运行。

B.1.2 联锁复位条件

泄漏联锁触发后，需人工确认：

- a) 泄漏点已修复；
- b) 连续 3 次（间隔 5min）检测，氢气浓度 $\leq 0.1\%$ ；
- c) 事故通风、氮气吹扫系统运行正常。满足条件后，运行期间持续监测气体浓度，防止二次泄漏，直至可以长时间稳定正常运行。

B.2 压力异常联锁**B.2.1 超压联锁响应**

ALK 电解制氢系统的压力容器主要用于气液分离和储存。各种压力容器的设计、制造、检验和验收应符合 GB 150 的要求。各类压力容器的材质选择，应充分考虑该容器氢侧和氧侧不同的使用要求和运行状态。制造厂家应在设计文件清单中明确给出设备运行时的最佳工作压力范围以及设备正常运行时的最小、最大压力值，当 ALK 电解制氢系统压力超过制造厂家所设置的最大压力值时触发联锁：

- a) 立即切断整流器电源；
- b) 打开安全阀旁路泄压阀。

B.2.2 欠压联锁保护

若 ALK 电解制氢系统压力低于制造厂家所设置的最小压力值时触发联锁：

- a) 降低负荷运行，如果情况严重甚至进行停机操作；
- b) 启动补水/补气装置（依据欠压原因，补水至液位正常或补氮气至压力稳定）；
- c) 若 3min 内压力未恢复，强制停机，排查管路泄漏、泵阀故障，修复后手动重启，避免低压运行导致气体纯度下降、设备空转磨损。

B.3 温度异常联锁**B.3.1 超温联锁保护**

ALK 电解制氢系统的压力容器主要用于气液分离和储存。各种压力容器的设计、制造、检验和验收应符合 GB 150 的要求。各类压力容器的材质选择，应充分考虑该容器氢侧和氧侧不同的使用要求和运行状态。制造厂家应在设计文件清单中明确给出设备运行时的最佳工作压力范围以及设备正常运行时的最小、最大压力值，当 ALK 电解制氢系统压力超过制造厂家所设置的最大压力值时触发联锁：

- c) 立即切断整流器电源；

- d) 打开安全阀旁路泄压阀。

B.3.2 低温联锁预警

当 ALK 电解槽电解液温度低于设备设计下限温度导致设备性能未能充分发挥或设备产生故障时触发联锁：

- a) 在允许负荷范围内提高负荷；
- b) 降低冷却水循环流量。

附录 C (资料性) 电解槽结构变形检测方法

C.1 原理

电解槽形变的本质在于材料的伸缩变化，从结构形式上看，无论是垫片的变形还是螺栓预紧力的松弛，最终都会反应在拉杆的变化上，拉杆在不同的工作周期内处于动态的变化，可细分为生产阶段、运输阶段、工作阶段。

C.1.1 生产阶段

如图 C.1 示例，生产阶段拉杆主要受到自身重力 (G)、螺栓对拉杆的拉力 ($F_{拉}$)、工装夹具对拉杆的支撑力 ($F_{支}$)，其中重力与支撑力相互抵消。因此，生产阶段拉杆主要承受由螺栓预紧产生的轴向拉力。

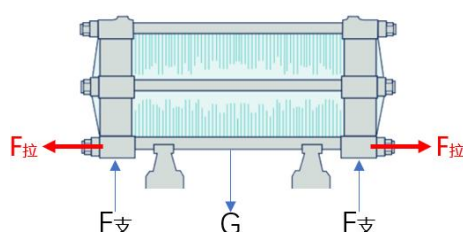


图 C.1 生产阶段受力分析

C.1.2 运输阶段

如图 C.2 示例，运输阶段拉杆主要受到自身重力 (G)、螺栓对拉杆的拉力 ($F_{拉}$)、车辆对拉杆的支撑力 ($F_{支}$)，其中运输颠簸、吊装会产生突变的拉力 ($F_{变}$) 变化。因此，运输阶段主要受到生产阶段已有的拉力和外部因素导致的突变力。ALK 电解槽在运输阶段中宜安装三维冲撞记录仪。

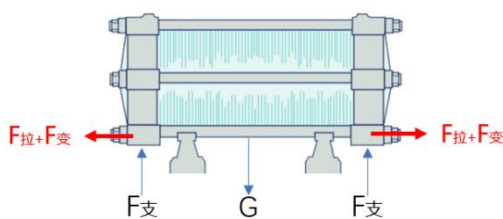


图 C.2 运输阶段受力分析

C.1.3 工作阶段

如图 C.3 示例，工作阶段拉杆主要受到自身重力 (G)、螺栓对拉杆的拉力 ($F_{拉}$)、端板对拉杆的支撑力 ($F_{支}$)，其中内部压力变化会产生波动的拉力 ($F_{变}$) 变化。因此，工作阶段主要受到生产阶段已有的拉力和内部因素导致的突变力。

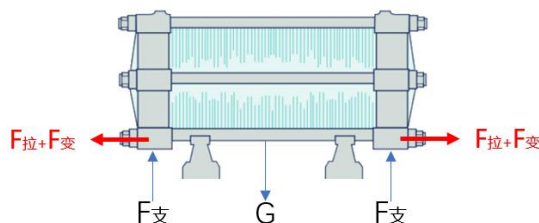


图 C.3 工作阶段受力分析

综上所述，电解槽的形变可归结为拉杆的变形，力学特性为螺栓对拉杆产生的拉力，其拉力主要由生产阶段拧紧螺栓时产生，次要由内、外因素导致的突变拉力。

C.2 变形检测方法

如图 C.4 示例，从以上受力分析可知，拉杆主要受到生产阶段的静拉力和内外部因素的动拉力。其力学模型视为纯受拉杆件，因此对拉杆的形变监测主要集中在拉力方向上。目前采用电阻应变计对电解槽拉杆进行实时监测。电阻应变计直接安装在拉杆表面，拉杆的形变会引起应变计敏感栅的阻值变化，通过测量仪器精确测量阻值的变化即可得到拉杆的形变量，根据实测的形变量评估电解槽整体的变形状态，结合有限元仿真结果判断碱液泄漏区域。



图 C.4 电阻应变计实物图

附 录 D
(规范性)
螺栓轴向应力检测方法

D.1 螺栓轴向应力检测原理

螺栓预紧力检测通过数字信号量化轴力信息间接测量轴向应力。其使用原理为系统搭载的螺柱受外力影响使得轴力弹性体微量机械变形，粘贴在弹性体上的组桥应变片阻值随之变化，引起电桥不平衡，以 mV 级信号输出，该信号输入到数传板进一步放大，再经模数转换，变成数字信号给处理器进行数据处理，这间接把机械力变成了数字信号，最后通过串口线送入外部总线。

具体操作内容如下：应变式轴力传感器串行安装在螺栓紧固件中间，传感器通过贴在弹性体上的应变片把螺栓预紧力测量出来；其中应变片组成惠斯通电桥，通过应变片把受力导致的微小形变转化为电阻变化，再由惠斯通电桥把电阻变化转化为电压变化，再经过放大、转换电路，转化为可视的应力信息，同时具备温度检测功能。其轴力传感器示意图如 D.1 所示。

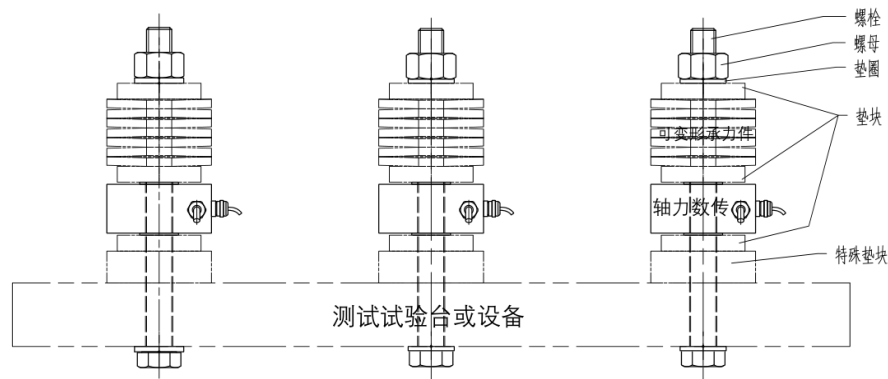


图 D.1 轴力传感器示意图

D.2 单波法测量原理

单波法通过测量单一波型的超声脉冲在螺栓施加应力前和施加应力后沿其轴向传播的声时，间接测量轴向应力，见图 D.2。

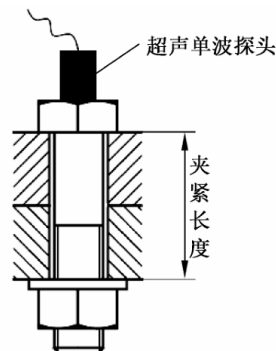


图 D.2 单波法测量示意图

以纵波为例，螺栓的轴向应力变化与纵波沿螺栓轴线方向的传播声时变化之间的关系见公式 (D-1)：

$$\sigma = K_L \frac{T_L - T_{L0}}{T_{L0}} \quad (D-1)$$

通过标定螺栓的纵波应力系数 K_L ，测量被测螺栓无应力状态下超声纵波在其中的传播声时 T_{L0} ，测量被测螺栓 σ 应力状态下超声纵波在其中的传播声时 T_L ，即可由上式计算得到螺栓中的轴向应力 σ 。

D.3 双波法测量原理

双波法通过测量纵波和横波两种波型超声脉冲沿螺栓轴向传播的声时，间接测量轴向应力，见图 D.3。

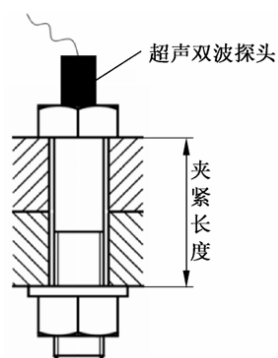


图 D.3 双波法测试原理

由螺栓的轴向应力变化与纵波、横波声速变化之间的关系，可得螺栓的轴向应力变化与纵波、横波在螺栓中传播声时变化的关系，见公式 (D-2)：

$$\sigma = \frac{\left(\frac{T_S}{T_L}\right) - \left(\frac{T_{S0}}{T_{L0}}\right)}{\frac{1}{K_S \left(\frac{T_{S0}}{T_{L0}}\right)} - \frac{1}{K_L \left(\frac{T_S}{T_L}\right)}} \quad (D-2)$$

通过标定螺栓材料的纵波应力系数 K_L 和横波应力系数 K_S ，及无应力状态下超声纵波在螺栓中的传播声时 T_{L0} 和超声横波在螺栓中的传播声时 T_{S0} ，实测时，利用仪器测量 σ 应力状态下超声纵波在螺栓中的传播声时 T_L 和超声横波在螺栓中的传播声时 T_S ，即可由上式计算得到螺栓中的轴向应力 σ 。

可根据测量和精度要求，在公式 (D-2) 基础上进行修正和补偿。

附 录 E
(资料性)
氢气/氧气纯度测试方法

E.1 氢气纯度

E.1.1 测试仪器

分析氢气中氧含量，按照 GB/T 3634.2 中对氧气含量采用同手工分析或气相色谱仪对比过的仪表进行分析。分析仪的量程 0-1%O₂，刻度值小于 0.01%。

E.1.2 氢气纯度测试方法

将氢气送入分析仪进口接头，分析仪就直接显示出体积氧含量值。氢气纯度计算方法参考公式 (E-1) (仅对氧含量规定)。

$$C_{H_2} = (1 - C_{XO}) \times 100 \quad (E-1)$$

式中：

C_{H_2} ——氢气纯度，用 (%) 表示；

C_{XO} ——仪表显示氧含量值。

E.2 氧气纯度

E.2.1 测试仪器

分析氢气中氧含量，按照 GB/T 3634 中对氧气含量采用同手工分析或气相色谱仪对比过的仪表进行分析。分析仪的量程 0-1%H₂，刻度值小于 0.01%。

E.2.2 氧气纯度测试方法

将氧气送入分析仪进口接头，分析仪就直接显示出体积氢含量值。氧气纯度计算方法参考公式 (E-2)。

$$C_{O_2} = (1 - C_{XH}) \times 100 \quad (E-2)$$

式中：

C_{O_2} ——氧气纯度，用 (%) 表示；

C_{XH} ——仪表显示氢含量值。

附录 F

(资料性)

基于交流阻抗技术的电解槽状态检测方法

F.1 交流阻抗测试原理

电解槽在电解水制氢的过程中涉及到包括电荷传递、离子吸脱附、电荷转移、离子扩散等电化学反应动力学过程，每一个过程的反应快慢（即响应速度）不一致，因此在不同频率的激励下，体系会呈现出不同的响应反馈信号，根据各频率下的阻抗信息从而可获得电解槽的内部信息。

如图 F.1 所示，交流阻抗测试与分析系统产生一系列不同频率的小幅正弦电流信号 ($X = i(\omega)$) 施加到电解槽上，会得到相应的同频正弦电压信号反馈 ($Y = u(\omega)$)，则可通过传递函数计算得到电解槽的阻抗 ($G = Y/X$)，通过阻抗的响应变化可以推测电解槽的内部状态。

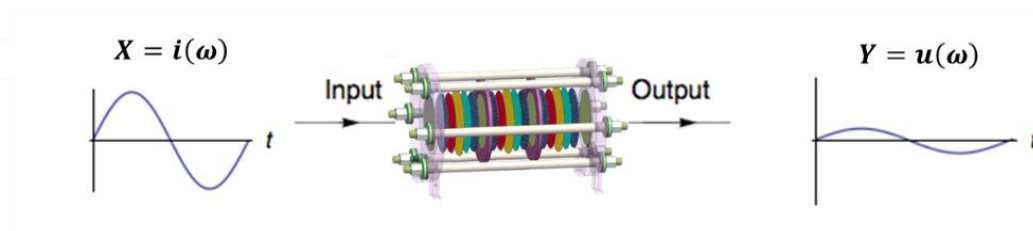


图 F.1 阻抗测试原理图

如图 F.2 所示，电解槽电解的总电压 E_{Cel} 是由电极正逆反应的可逆平衡电压 E_{Rev} （即水在标准环境中的理论分解电压 1.23V）、电解槽的欧姆阻抗电压 IR_{Cel} 、阳极析氧的极化过电压 η_{Ano} 、阴极析氢的极化过电压 η_{Cat} 以及电解槽内表示质量传输限制的扩散过电压 η_{MT} 构成。

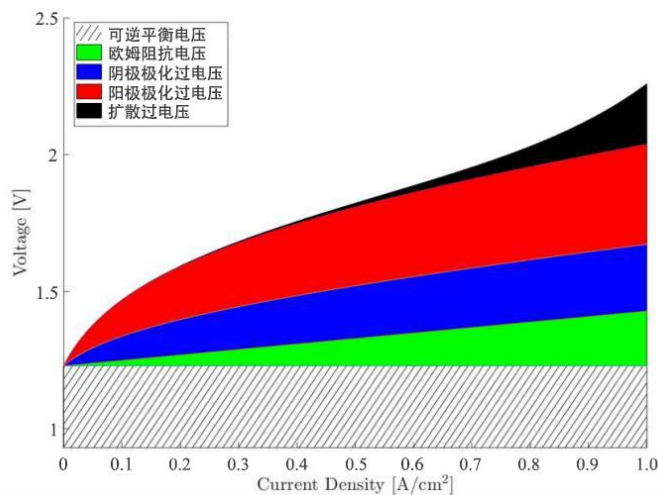


图 F.2 电解电压组成分量情况

F.1.1 阻抗测试方案

如图 F.3 所示，交流阻抗测试仪的激励源正极端接在电解槽待测电解池串联电堆的阳极端，激励源的负极端则接在电解槽待测电解池串联电堆的阴极端，用于给待测的整个电解池串联电堆施加交流扰动信号。阻抗仪的电压采集通道输入端与电解槽待测区所有单电解池的阳极与阴极连接，以获得每个电解池因扰动而产生的响应电压。而电流采集通道则与在串联在电路中的电流传感装置/取样电阻连接，采集其电压值并通过 I/E 转换器获得电解槽的真实扰动交流电流值。

交流阻抗测试仪输出设定频率范围内确定幅值的扫频正弦交流电流信号（碱性电解槽通常为10000Hz~0.1Hz），可获得相应频率下的响应电压值，通过计算从而获得每个特定频率下的阻抗值，因此可知频域下的阻抗值及变化情况。

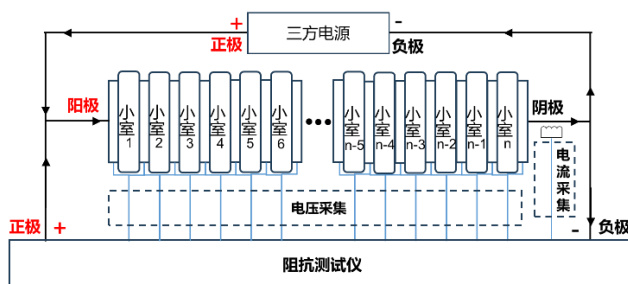


图 F.3 阻抗测试方案示意

F.1.2 阻抗测试示例与分析

每个频率下响应的电压信号（ $u(t) = U \sin(2\pi ft + \phi_2)$ ）经过转换、处理并与激励的电流（ $i(t) = I \sin(2\pi ft + \phi_1)$ ）运算后，输出可反映电解槽特定状态的阻抗信息。通过改变正弦波的频率，可获得一系列不同频率的阻抗数据，其包括阻抗模值（ $|Z|$ 和相位角 ϕ 对频率的谱（Bode图）或阻抗的实部值 Z_{re} 与虚部值 Z_{im} 的谱图（Nyquist图）。阻抗的模值、相位、实部、虚部及复数形式可用以下式子表示：

$$|Z| = \frac{|E \sin(2\pi ft + \phi)|}{I \sin(2\pi ft)} \quad (F-1)$$

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (F-2)$$

$$Z_{re} = |Z| \cdot \cos \phi \quad (F-3)$$

$$Z_{im} = |Z| \cdot \sin \phi \quad (F-4)$$

$$Z = Z_{re} + jZ_{im} = |Z| \cdot e^{j\phi} \quad (F-5)$$

如图 F.4 所示，利用交流阻抗谱研究电解槽的电化学系统时，它的基本思路是将其看作是一个等效电路，这个等效电路是由电阻（R）、电容（C）、电感（L）等基本电子元器件及常相角元件（CPE）按串联或并联等不同方式组合而成。通过交流阻抗可以定量地测定这些元件的大小，利用这些元件在电解水过程中的电化学动力学物理化学意义，来分析电解槽的结构完整性及电解水过程的电化学反应状态与演变情况。交流阻抗测试系统实物图参见 F.5。

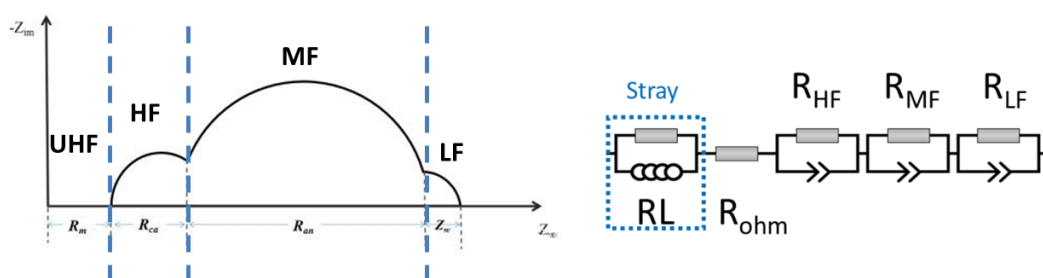


图 F.4 交流阻抗数据的等效电路分析与电解槽等效电路示意图



图 F.5 交流阻抗测试系统实物图

附 录 G
(资料性)
电解槽效率衰减计算方法

G.1 范围。

在 ALK 电解槽设备进行型式试验或抽样检查时进行。

G.2 电解槽效率衰减计算方法参考公式(G-1)。

$$\eta_{\text{Deg}} = \frac{1000 \times (\eta_1 - \eta_2)}{\eta_1 \times (t_{2n} - t_{1n})} \times 100\% \quad (G-1)$$

式中：

η_{Deg} —— 电解槽效率衰减，%/1000 h；

η_1 —— 出厂时电解槽在额定功率下的能量转换效率；

η_2 —— 实际运行一定时间后电解槽在额定功率下的能量转换效率；

t_{1n} —— 实际运行开始时刻，h；

t_{2n} —— 实际运行结束时刻，h。

参 考 文 献

- [1] GB/T 29729 氢系统安全的基本要求
 - [2] GB/T 37562 压力型水电解制氢系统技术要求
 - [3] GB/T 43232 紧固件 轴向应力超声测量方法
 - [4] 杨高强, 解志强, 赵万祥, 等. 电解水制氢技术与原理[M]. 机械工业出版社, 2025.
 - [5] Zhao W, Xu C, Chen M, et al. Impact of Multiple Inlet and Outlet Structures of Bipolar Plate Channel on the Mass Transport in ALK Electrolyzers. *Energies* 2025, 18, 2771.
 - [6] Deng L, Jin L, Yang L, et al. Bubble Evolution Dynamics in Alkaline Water Electrolysis. *eScience*, 2024.
-