

碱性电解水制氢（ALK）工艺计算方法研究 ——以 1000Nm³/h 系统为例

白桦¹ 马松²

1. 大连华锐重工集团股份有限公司 辽宁大连 116000; 2. 大连海心信息工程有限公司 辽宁大连 116000

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21601

[摘要] 随着绿氢需求的增长，碱性电解水（ALK）制氢技术的规模化应用对工艺计算的精确性提出了更高要求。本文旨在构建一套系统、实用的 ALK 制氢工艺计算方法。基于电化学基本原理，推导了理论分解电压与热中性电压，并建立了能量平衡与质量平衡计算模型。以 1000 Nm³/h 制氢系统为例，详细阐述了直流电耗、系统总能耗、系统效率及物料消耗的计算过程。结果表明，在操作电压 2.0 V/cell、整流效率 98%、辅机功耗占比 4% 的条件下，系统单位综合电耗约为 5.075 kWh/Nm³，系统效率（基于氢高位发热量）为 69.8%。该计算方法可为 ALK 制氢系统的工程设计、性能评估及经济性分析提供理论支持。

[关键词] 碱性电解水；制氢；工艺计算；能量平衡；质量平衡；能耗分析

引言

氢能作为实现能源结构绿色低碳转型的关键载体，其制取技术备受关注。碱性电解水(Alkaline Electrolysis, ALK)制氢技术凭借其技术成熟度高、成本相对较低、运行寿命长等优势，在当前绿氢生产中占据主导地位。精确的工艺计算是 ALK 系统设计优化、能效评估及经济性分析的核心基础。本文旨在从基本原理出发，系统梳理并建立一套完整的 ALK 工艺计算方法，并以 1000 Nm³/h 规模化系统为例，通过具体的案例计算，为相关工程应用提供参考。

1 电解水基本原理

1.1 电化学反应

碱性电解槽以 KOH 或 NaOH 水溶液为电解质，在直流电作用下，水分解生成氢气和氧气，其电极反应如下：

阴极（析氢）： $4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 \uparrow + 4\text{OH}^-$

阳极（析氧）： $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$

总反应式： $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$

1.2 关键电压参数

上述两个电压参数分别对应电解反应的热力学边界和热平衡边界。在实际工程中，电解槽操作电压通常高于理论分解电压，主要原因是电极极化、欧姆内阻以及气泡覆盖等因素会造成额外电压损失。因此，工艺计算不能仅采用理论分

解电压评价系统能耗，而应以实际运行的平均槽电压作为直流电耗计算的直接依据。对于同一产氢规模，操作电压每降低一定幅度，单位直流电耗将按比例下降，这也是后续设备选型、运行参数优化和性能考核的重要基础。

1. 理论分解电压 (U_{rev})：指水电解反应发生所需的最小电压，由反应吉布斯自由能变 (ΔG) 决定。公式为：

$$U_{\text{rev}} = \Delta G / (nF)$$

式中， n 为电子转移数 ($n=2$)； F 为法拉第常数 (96485 C/mol)。在标准状态 (25℃, 101.325 kPa) 下， $\Delta G = 237.22$ kJ/mol，计算得 $U_{\text{rev}} \approx 1.229$ V。

2. 热中性电压 (U_{tn})：指电解过程系统与外界无热交换时的电压，由反应焓变 (ΔH) 决定。公式为：

$$U_{\text{tn}} = \Delta H / (nF)$$

标准状态下， $\Delta H = 285.83$ kJ/mol，计算得 $U_{\text{tn}} \approx 1.481$ V。当操作电压低于 U_{tn} 时，电解过程吸热；高于 U_{tn} 时，则放热。

2 工艺计算模型

2.1 能量平衡模型

能量平衡是工艺计算的核心，旨在确定制氢能耗。

1. 电解电流计算

根据法拉第定律，产氢量与所需电流成正比。标准状态

下，1 Nm³ H₂的物质的量为 1000/22.4 ≈ 44.64 mol。生产 1 Nm³ H₂所需电量为 44.64 × 2 × 96485 C。因此，生产 1000 Nm³/h H₂所需的理论电流 I 为：

$$I = (1000 / 22.4) \times 2 \times 96485 / 3600 \approx 239286 \text{ A}$$

$$\text{简化计算式为：} I \text{ (A)} = \text{产氢量 (Nm}^3/\text{h)} \times 2392.86。$$

2. 直流电耗计算

直流电耗是衡量电解槽性能的核心指标。单位直流电耗 (kWh/Nm³) 与电解槽平均操作电压 (U_{cell}) 直接相关：

$$E_{DC} = U_{cell} \times (I / \text{产氢量}) = U_{cell} \times 2392.86 / 1000 = 2.39286 \times U_{cell}$$

取典型操作电压 U_{cell} = 2.0 V，则单位直流电耗 E_{DC} = 2.0 × 2.39286 ≈ 4.786 kWh/Nm³。

年产氢 1000 Nm³/h 的系统，直流总功率 P_{DC} = E_{DC} × 1000 = 4786 kW。

3. 系统总能耗计算

系统总能耗需考虑整流器损耗及辅机（泵、冷却、控制等）功耗。设整流器效率 η_{rect} = 98%，辅机功耗占直流功耗的比例 ξ_{aux} = 4%。则：

$$\text{整流输入功率 } P_{AC} = P_{DC} / \eta_{rect} = 4786 / 0.98 \approx 4883.67 \text{ kW}$$

$$\text{辅机功率 } P_{aux} = P_{DC} \times \xi_{aux} = 4786 \times 0.04 = 191.44 \text{ kW}$$

$$\text{系统总有功功率 } P_{total} = P_{AC} + P_{aux} = 4883.67 + 191.44 = 5075.11 \text{ kW}$$

$$\text{单位综合电耗 } E_{sys} = P_{total} / 1000 \approx 5.075 \text{ kWh/Nm}^3。$$

2.2 质量平衡模型

上述质量衡算以理论化学计量关系为基础。工程设计时，还应将电解液循环、设备清洗、系统排污以及气体分离过程中的损失纳入水量核算，从而形成实际补水量。需要注意的是，电解液中的 KOH 主要承担离子传导作用，并非按照总反应式被持续消耗，因此系统补充水量与电解液循环量应分别考虑。对于初步设计阶段，可先采用理论耗水量叠加一定工程裕量的方法进行估算，待设备厂家提供实际运行数据后再

进一步校核。

质量平衡用于确定原料消耗及副产物产量。

1. 纯水消耗量

由总反应式可知，每生产 2 mol H₂需消耗 2 mol H₂O。

生产 1000 Nm³/h H₂的理论耗水量为：

$$m_{H2O, \text{theo}} = (1000 / 22.4) \times 18 = 803.57 \text{ kg/h,} \\ \text{即约 } 0.804 \text{ kg/Nm}^3。$$

考虑系统排污、水汽携带等损耗（按 5%计），实际耗水量为：

$$m_{H2O, \text{act}} = 803.57 \times 1.05 \approx 844 \text{ kg/h.}$$

2. 氧气产量

根据反应计量比，产氧摩尔量为产氢量的一半。标况下，氧气产量为：

$$V_{O2} = 0.5 \times \text{产氢量} = 0.5 \times 1000 = 500 \text{ Nm}^3/\text{h.}$$

3 案例计算与结果分析

本节整合上述模型，对 1000 Nm³/h ALK 制氢系统进行完整工艺计算。

给定条件：

- 产氢规模：1000 Nm³/h
- 操作电压：2.0 V/cell
- 整流效率：98%
- 辅机能耗占比：4%

计算结果：

1. 电解电流：I = 239286 A
2. 直流功耗：单位电耗 4.786 kWh/Nm³；总功率 4786 kW
3. 系统总功耗：单位综合电耗 5.075 kWh/Nm³；总功率 5075 kW

4. 纯水消耗：理论 804 kg/h；实际 844 kg/h

5. 氧气产量：500 Nm³/h

6. 系统效率：基于氢的高热值（HHV，约 3.54 kWh/Nm³），系统效率 η_{sys} 为：

$$\eta_{sys} = (\text{氢气化学能} / \text{系统总输入电能}) \times 100\% = \\ (3.54 / 5.075) \times 100\% \approx 69.8\%$$

结果分析：

3.1 参数敏感性与工程意义

从计算关系可以看出,单位直流电耗 E_{DC} 与电解槽操作电压 U_{cell} 呈线性关系,即 $E_{DC}=2.39286 \times U_{cell}$ 。因此,在其他条件保持不变时,槽电压的变化会直接传递到系统单位电耗。相比之下,整流效率和辅机功耗占比主要影响交流侧输入功率,其优化效果取决于系统规模和设备配置。由此可见,工程优化应优先关注电解槽本体性能,同时兼顾整流系统和辅机系统的综合效率。

从物料侧看,氢气和氧气的产量由反应计量关系确定,理论上不随槽电压变化;而实际补水量则与系统排污、气体夹带及运行管理有关。因此,能量衡算与质量衡算应分别建立,并在系统边界处进行统一校核。对于工程设计人员而言,这种“能量主线+质量支线”的计算方式有利于将电解槽、整流器、循环泵、冷却系统及气液分离等单元的设计参数进行关联,为后续设备选型和公用工程条件确定提供基础。

本文计算模型适用于 ALK 制氢项目方案设计和初步工程估算,可用于快速确定整流电源容量、辅机功率、纯水需求以及氧气副产量等关键指标。当项目进入详细设计阶段时,还需根据实际电流效率、运行温度、电解液浓度、气体纯度要求、设备压力及厂家性能曲线进一步修正计算结果。特别是在不同负荷率运行条件下,槽电压和辅机功耗可能发生变化,因此不能简单地将额定工况数据直接外推至全负荷范围。通过建立不同负荷点的计算表,可进一步形成系统性能曲线,为项目运行策略和经济性评价提供依据。

3.2 计算方法的适用性

- 直流电耗是系统总能耗的主要部分,降低电解槽操作电压是提升能效的关键。

- 系统总能耗较直流电耗高出约 6%,主要由整流损耗和辅机功耗贡献,优化辅机运行策略和提升整流效率同样重要。

- 耗水量与产氧量严格遵循化学计量比,实际水耗需考虑工艺余量,以保证系统水平衡。

此外,本文所建立的计算框架具有较好的可扩展性。当

制氢规模由 $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 进一步扩大时,可直接按照产氢量对理论电流和直流功率进行比例换算,再结合设备并联数量、整流单元配置和辅机负荷进行修正。该特点使计算方法既适用于单套装置的初步设计,也可作为大型集中式绿氢项目进行多套电解系统组合计算的基础。

4 结论

1. 本文系统性地构建了碱性电解水制氢的工艺计算方法,明确了基于法拉第定律的电流计算、基于操作电压的能耗计算以及基于化学计量关系的物料衡算,形成了一套从理论到工程应用的完整计算体系。

2. 以 $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 系统为例的计算结果表明,在 2.0 V/cell 的典型工况下,系统单位综合电耗约为 5.075 kWh/Nm^3 ,系统效率 (HHV) 为 69.8%,水耗约为 844 kg/h ,产氧量为 $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。该组数据可作为同类系统设计初期性能预估的参考。

3. 该计算方法逻辑清晰,主线(能量)与支线(质量)相互印证,为 ALK 制氢系统的工程设计、性能对标及技术经济分析提供了有效的量化工具,对推动绿氢项目的技术优化具有指导意义。

[参考文献]

[1] 毛宗强. 氢能——21 世纪的绿色能源[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[2] 郭烈锦. 太阳能热化学循环制氢[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

[3] 俞红梅, 衣宝廉. 电解水制氢技术研究进展与发展趋势[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 146-152.

[4] ZENG K, ZHANG D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(3): 307-326.

[5] 张轩, 王博, 刘炜, 等. 大规模碱性水电解制氢系统能耗分析[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2345-2352.