



铁铬液流电池电堆空间排布对气相析出与供液均衡性的影响

唐晓敏¹, 王宏达², 叶强², 徐艳³, 陈满¹, 马志啟³

(¹南方电网调峰调频发电有限公司储能研究院, 广东 广州 511400; ²上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; ³江苏朗雄能源科技有限公司, 江苏 苏州 215236)

摘要: 铁铬液流电池在运行中的析氢副反应以及电解液降压或升温导致的溶解气体过饱和析出会导致多孔电极内气相积聚, 进而引发流动阻力增大、局部反应物短缺与供液分配失衡。这不仅降低电堆效率, 还可能引发安全隐患。在采用并联供液的大型电堆中, 由于电堆空间排布差异、流道阻力不均以及电极材料性质波动等因素, 气相积累与流动堵塞风险尤为突出。为此, 本工作建立了二维稳态气液滑移流动模型, 系统研究了不同空间排布电堆的多孔电极内气相分布特性, 重点探讨了析氢速率、入口溶解气浓度及供液压差对气相积累与电解液流量的影响。结果表明: 析氢电流密度增大会显著提高气相饱和度并降低液相相对渗透率, 且上层电堆更易发生严重气体堵塞; 入口溶解气浓度升高会引发电极入口处气体快速析出并沿流动方向持续累积, 加剧电堆间流量分配不均, 其中上层电堆流量降幅超过18%; 维持足够的供液压差对保障电解液供应和气体清除至关重要。为将平均气相饱和度控制在1%以内, 上层电堆所需压差(45 kPa)需比下层电堆(约30 kPa)高出约15 kPa。因此, 减小电堆布置高差并降低入口溶解气浓度, 是抑制气相析出、保障供液均衡性的关键措施。

关键词: 铁铬液流电池; 电堆空间排布; 气相积聚; 流动堵塞; 气液两相流

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1080

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2224-10

Impact of stack spatial arrangement on gas precipitation and flow distribution uniformity in iron-chromium flow batteries

TANG Xiaomin¹, WANG Hongda², YE Qiang², XU Yan³, CHEN Man¹, MA Zhiqi³

(¹Energy Storage Research Institute, Southern Power Grid Peak Shaving and Frequency Modulation Power Generation Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China; ²School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ³Jiangsu LongVault Energy Technology Co. Ltd., Suzhou 215236, Jiangsu, China)

Abstract: During the operation of iron-chromium flow batteries, hydrogen evolution as a parasitic reaction, together with gas release caused by electrolyte depressurization or heating (i. e., oversaturation of dissolved gases), can lead to gas accumulation within porous electrodes. This, in turn, increases flow resistance, causes local reactant starvation, and induces electrolyte maldistribution. These effects not only reduce stack efficiency but may also pose safety risks. In large stacks employing parallel electrolyte supply, this risk is particularly pronounced owing to variations in stack spatial arrangement, uneven flow-channel resistance,

收稿日期: 2025-12-04; 修改稿日期: 2025-12-23。

基金项目: 国家自然科学基金(51776120)。

第一作者: 唐晓敏(1995—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电化学、液流电池, E-mail: tangxiaomin@es.csg.cn; 通信作者: 叶强, 副教授, 研究方向为液流电池、燃料电池, E-mail: qye@sjtu.edu.cn; 陈满, 教授级高级工程师, 研究方向为电力储能, E-mail: chenman@es.csg.cn。

引用本文: 唐晓敏, 王宏达, 叶强, 等. 铁铬液流电池电堆空间排布对气相析出与供液均衡性的影响[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2224-2233.

Citation: TANG Xiaomin, WANG Hongda, YE Qiang, et al. Impact of stack spatial arrangement on gas precipitation and flow distribution uniformity in iron-chromium flow batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2224-2233.

and fluctuations in electrode material properties. To address this, a two-dimensional steady-state gas-liquid slip flow model is established to investigate gas distribution characteristics within porous electrodes across differently arranged stacks. This study specifically examines the effects of hydrogen evolution rate, inlet dissolved gas concentration, and supply pressure difference on gas accumulation and electrolyte flow rate. The results show that increasing the hydrogen evolution current density markedly raises gas saturation and decreases the relative permeability of the liquid phase, making the upper stacks more prone to severe gas blockage. Elevated inlet dissolved gas concentration triggers rapid gas precipitation at the electrode inlet, with accumulation progressing along the flow direction. This exacerbates uneven flow distribution among stacks, causing electrolyte flow rate reductions that exceed 18% in upper stacks. Furthermore, maintaining an adequate feeding pressure difference is essential for ensuring sufficient electrolyte supply and effective gas removal. To keep the average gas saturation below 1%, the required pressure difference for upper stacks (45 kPa) must be 15 kPa higher than for lower stacks (30 kPa). Therefore, reducing stack height differences and lowering inlet dissolved gas concentration are key measures for suppressing gas-phase precipitation and ensuring uniform electrolyte flow distribution.

Keywords: iron-chromium flow battery; stack spatial arrangement; gas accumulation; flow blockage; gas-liquid two-phase flow

随着社会经济发展,以化石能源为主的传统能源供应结构已难以支撑人类的可持续发展。因此,必须大力推广可再生能源,提高其在能源结构中的占比,使其逐步从辅助能源转变为主导能源。然而,太阳能、风能等可再生能源具有间歇性和不稳定性,对电网稳定运行构成严峻挑战^[1-2]。为缓解可再生能源发电随机性与间歇性对电网的冲击,提高电网对其的接纳能力,必须配备规模化、可靠的储能系统,以实现调幅调频、弥补供电缺口,保障电网持续稳定供电^[3]。氧化还原液流电池储能系统(图1)具有重要优势,如本征安全性、长循环寿命以及独立调节功率和容量的灵活性,使其成为大规模固定储能的理想技术路线。目前,实现商业化应用的液流电池体系主要包括全钒、铁铬等类型。然而,钒资源的较高价格制约了全钒液流电池的大规模推广^[4]。因此,开发低成本液流电池体系对于推动液流电池的规模化商业应用至关重要。铁铬液流电池(ICFB)以储量丰富、价格低廉的铁/铬离子为活性物质,具有显著的成本优势,因而受到广泛关注^[5-6]。

提升液流电池系统的循环能量效率对其规模化应用至关重要。电压效率的提升关键在于增强多孔电极内的传质并改善电解液分布均匀性,这通常依

赖于提高电解液流量以强化对流传质;然而,流量提升会同步增加流经电极的压降,从而显著提高循环输送泵的泵功损失,形成“传质强化-泵功增加”的内在矛盾。如图1中堆2电极局部放大图所示,气体析出是水系液流电池多孔电极中的常见现象。气泡在电极孔隙内的生成与滞留迫使电堆系统在维持性能时采用更高的供给流量,从而进一步加剧传质性能与泵功损失之间的矛盾^[7]。在实际运行中,当溶解气体饱和的电解液从电极入口流向出口时,如果经历温度升高或压力下降,可能会发生由物理因素引起的析气现象^[8]。此外,铁铬液流电池等水基强酸体系液流电池在实际运行过程中,负极电位远低于析氢反应的平衡电位(0 V vs.SHE)^[9],因此由析氢副反应引起的电化学诱导析气现象难以完全避免^[10]。

气泡的生成会堵塞多孔电极内的电解液通道,增加流动阻力;同时,气泡覆盖在电极碳纤维表面,会减小反应活性面积与传质系数,从而降低电池的整体性能与效率。此外,随着电池循环次数的增加,析氢会造成电池容量失衡,并且气体的积累可能给电池系统带来安全隐患,降低电池寿命。Ye等^[11-12]的研究表明,即使在较高表观流速(16 mm/s)条件下,仅相当于液相体积流量率0.36%的微小析气速

率,也足以在数小时内引起碳毡电极中液相相对渗透率的显著持续下降,并伴随明显的气相积累。进一步研究发现,即使是 mA/cm^2 量级析氢反应,也足以诱发明显的气相积聚,使液相相对渗透率降至 0.51 的低值。在如图 1 所示的多堆并联供液液流电池系统中,此类析氢副反应还会显著降低流经多孔电极的电解液流量;一旦压差低于某一临界阈值,流量将急剧衰减,甚至导致电解液流动完全停止^[13]。

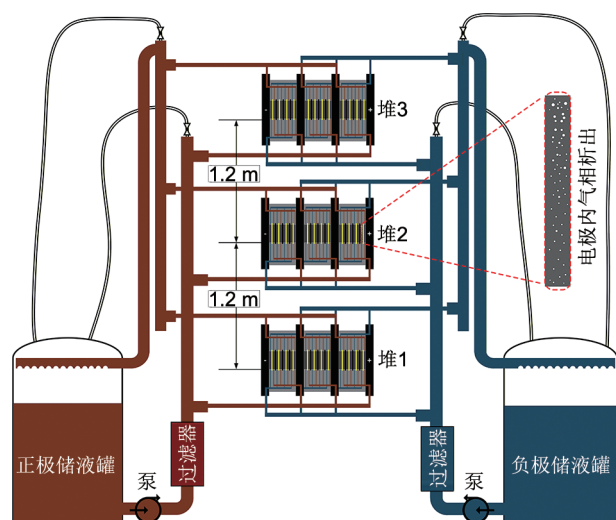


图 1 多堆排布液流电池储能系统结构示意图
Fig. 1 Multi-stack flow battery system schematic

在大型 ICFB 电堆中,由于副反应与温度场的不均匀性,各单电池内部的气泡堵塞程度往往存在差异。同时,电极之间在渗透率和亲水性方面不可避免的差异进一步加剧了这一问题。值得注意的是,在并联供液的电堆中,尽管各单电池的压降相同,流经各单电池电极的实际流量却可能不相同,这主要取决于它们各自的流动阻力。若某电极内气体大量积聚,电解液流速将因阻塞而下降。由于液相流动是气泡清除的主要驱动力,流速降低会削弱气泡冲刷效果,进一步加剧气体积聚与流动阻塞。若电堆总流量保持基本恒定,其余电极中的流量将相应增加,从而增强气泡冲刷并降低其流动阻力。如图 1 所示,液流电池系统中通常由同一储液罐同时向多个电堆供液,电堆则常采用多层排布以提高空间利用率。然而,多层电堆的排列结构会导致各电堆内部压力存在差异。这种压力差会引起电解质中气体溶解度的变化,进而导致电极内气相析出的位置与总量发生变化(图 2)。相应地,因气相阻塞引发供液分布失衡的风险也会随之增加,进而显著

增加上层电堆局部供液不足的风险^[14]。因此,在液流电池系统设计与优化中,充分考虑并缓解气体析出的负面影响至关重要。

目前,关于电堆尺度下因空间排布差异所引起的气相积累与流动堵塞现象,尚未形成系统性的统一认识。持续的气相析出显著增加了电堆运行的复杂性及潜在风险。液流电池多堆系统的实验研究成本高,且在运行过程中,一旦部分电极因气泡滞留发生堵塞,难以实时监测电堆内部参数的动态变化。因此,模拟不同电堆空间排布下的气相积累与流动堵塞行为具有重要的研究意义。本研究基于前期建立的气液滑移流动模型^[7],模拟恒压供液条件下因电堆空间排布差异所引发的电极堵塞问题进行数值模拟,重点分析电极内部的气相分布与流量分配变化规律。

1 系统简化与模型描述

1.1 几何结构与模型假设

如图 1 所示,本研究考察的铁铬液流电池系统为三层电堆排布,主要由正/负极电解液储罐、过滤器、管路、泵以及液路并联的三组电堆(堆 1、2、3)构成。电解液由泵从储罐抽出,分别流经正极和负极管路,在电堆电极中发生氧化还原反应后返回储液罐,形成闭式循环。在长期运行过程中,降压、升温及析氢副反应等因素会导致多孔电极内气泡的析出,产生的部分气泡滞留在电极空隙中,造成气相积聚与流动阻塞,从而影响传质和电堆性能。

基于上述分析,本研究对模型求解区域进行了简化:提取图 1 中的红色虚框内所示的电堆负极电极作为研究对象,并将其简化为二维模型,如图 3 所示。电解液在电极入口以压力 P_{in} 进入多孔电极,出口压力为 P_{out} ,流经距离为电极长度 L_e ,包含重力压降的总压降为 $\Delta P = P_{in} - P_{out}$ 。如图 2 所示,三组电堆沿竖向分层布置,相邻两组电堆出口的高差 ΔH 为 1.2 m,对应的压差为 $\rho g \Delta H = 15 \text{ kPa}$ 。同时保证最上层电堆出口具有 20 kPa 的正压,则设定出口表压力分别为 50 kPa、35 kPa、20 kPa,即分别对应于第一层电堆、第二层电堆、第三层电堆的负极电极的流动条件。将铁铬液流电池的标称电流密度设为 $100 \text{ mA}/\text{cm}^2$,为了避免明显的反应物供应不足(充电或放电末期反应物化学计量比至少

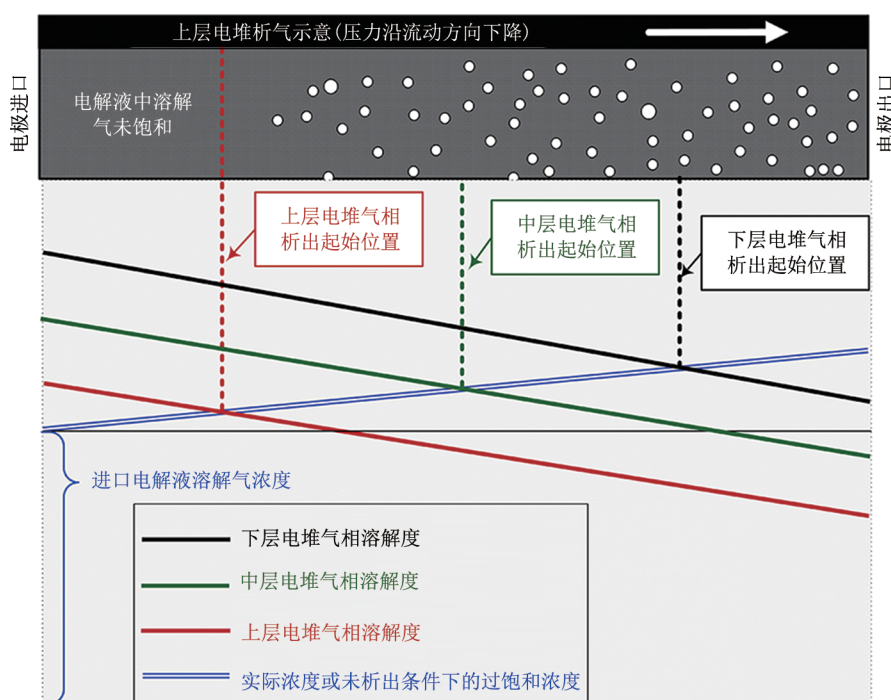


图2 三层排布电堆系统内气体溶解度沿程下降与气相起始析出位置示意图

Fig. 2 Schematic of gaseous solubility drop along the flow direction and the onset location of gas precipitation in a three-layer stack system

为 $2^{[15]}$), 此时需要保证 42 kPa 的供液压差 ΔP 。求解区域的相关参数如表 1 所示。

表1 模型参数

Table 1 Parameters of the model

参数符号	参数	参数值
L_e	电极长度	35 cm
W_e	电极宽度	60 cm
H_e	电极厚度	5 mm
ε	电极孔隙率	0.949 ^[7]
K	电极绝对渗透率	100 μm^2 ^[7]
μ_l	电解液黏度	1.5 mPa·s
ρ_l	电解液密度	1275 kg/m ³
c_{in}	入口溶解于电解液的氢气浓度 (1 atm 下饱和)	0.487 mol/m ³ ^[7]
μ_g	氢气黏度	0.009 mPa·s ^[7]
θ	电解液/电极接触角	10° ^[7]
σ	表面张力	70 mN/m ^[7]
λ	析气速率系数	5 s ⁻¹ ^[7]
T	温度	338.15 K

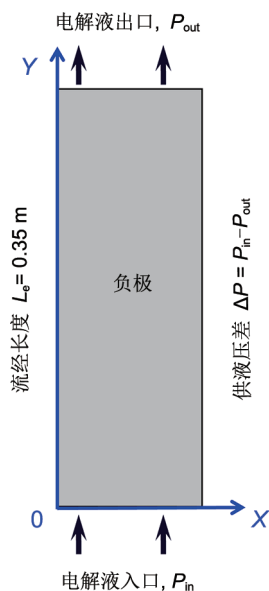


图3 二维简化模型

Fig. 3 Schematic of the simplified 2D model

1.2 模型控制方程

电极中液相的质量守恒由连续性方程描述:

$$\nabla \cdot (\rho_l v_l) = 0 \quad (1)$$

式中, 下标 l 表示液相, ρ_l 是液相密度, v_l 代表液相表观速度。

多孔电极中液相的表观速度可以用达西定律准确描述:

$$v_l = -\frac{K_l}{\mu_l} (\nabla P - \rho_l g) \quad (2)$$

式中, K_l 是液相渗透率, P 是压力, μ_l 是液相

的动力黏度, g 是重力加速度。

在流经多孔介质的气液两相流研究中, 连续相的相对渗透率通常与其饱和度相关, 即液相相对渗透率 K_{rl} 可以表示为:

$$K_{rl} = \frac{K_l}{K} = s_l^n \quad (3)$$

式中, K 是碳毡电极的绝对渗透率, n 是经验指数, s_l 是液相饱和度, 定义为液相体积与总空隙体积之比。相应的, 气相饱和度 s_g 定义为气相体积/总孔隙体积, $s_l + s_g = 1$ 。

气相质量守恒方程为:

$$\nabla \cdot (\rho_g v_g) = S_{gas} \quad (4)$$

式中, ρ_g 和 v_g 分别是气相密度和表观速度。该方程中的源项 S_{gas} 代表溶解气体从液相中过饱和析出, 如式(5)。

$$S_{gas} = \lambda \cdot (c - c_{eq}) \quad (5)$$

式中, λ 是气体析出速率系数, c 表示液相中溶解气体的浓度, c_{eq} 是其饱和溶解度。

不连续气相的运动主要由液相施加的黏滞力驱动。为了在气相和液相的物理速度之间建立联系, 在这里引入气液滑移比 γ 来描述两相之间的相对运动:

$$\gamma = \frac{w_g}{w_l} \quad (6)$$

式中, w_g 和 w_l 分别代表气相和液相的物理速度。并且, 气液滑移比 γ 被表示为气体饱和度和黏度比的函数^[7]:

$$\gamma = \left(\frac{s_g}{1 - s_g} \right)^{m-1} \cdot \frac{\mu_l}{\mu_g} = \left(\frac{s_g}{s_l} \right)^{m-1} \cdot \frac{\mu_l}{\mu_g} \quad (7)$$

式中, μ_g 为气相黏度, m 为经验指数, μ_l/μ_g 代表量纲为 1 黏度, 反映液相黏度对滑移行为的影响。

对于多孔电极中的气液两相流, 表观速度 v_g 和 v_l 通过以下等式与物理速度相关联:

$$v_g = w_g \cdot \varepsilon S_g, v_l = w_l \cdot \varepsilon S_l \quad (8)$$

式中, ε 是电极的孔隙率, 气体与液体表观速度之比定义为 β

$$\beta = \frac{v_g}{v_l} = \frac{w_g}{w_l} \cdot \frac{s_g}{s_l} = \gamma \cdot \frac{s_g}{s_l} \quad (9)$$

该关系将各相的表观速度表示为相饱和度和气液滑移比 γ 的函数。结合式(8)和用于描述液相速度的达西定律[式(2)]以及上面关于 β 的定义, 气相表观速度可以表示为下式^[7,16]:

$$v_g = \beta \cdot v_l = \left(\frac{s_g}{s_l} \right)^m \cdot \frac{\mu_l}{\mu_g} \cdot \left[-\frac{K_l}{\mu_l} \nabla(\nabla P - \rho_l g) \right] \\ = - \left[\left(\frac{s_g}{s_l} \right)^m \cdot s_l^n \right] \frac{K}{\mu_g} (\nabla P - \rho_l g) \quad (10)$$

经验指数 n 和 m 通过润湿毛细管数 Ca_w 关联如下:

$$n = 4.13 + 4.51e^{-8.65 \times 10^4 Ca_w} \quad (11)$$

$$m = 3.11 + 2.43e^{-1.13 \times 10^4 Ca_w} \quad (12)$$

$$Ca_w = \frac{\mu_l v_l}{\sigma} \cdot \cos \theta \quad (13)$$

式中, θ 是液相与电极表面之间的接触角, σ 是液相表面张力。

此外, 液相中溶解气体的守恒方程为:

$$v_l \nabla c = \nabla \cdot (D_c^{\text{eff}} \nabla \cdot c) + S_c \quad (14)$$

式中, D_c^{eff} 是有效扩散系数, 可以使用 Bruggeman 关联式进行估算, 以衡量多孔电极中的扩散传输:

$$D_c^{\text{eff}} = \varepsilon^{1.5} D_c \quad (15)$$

其中 D_c 是液相中溶解气的扩散系数。若氢气析出是 ICFBs 中唯一的电化学析气副反应, 式(14)中的源项包括析氢反应和由过饱和驱动的气相析出, 如下式所示:

$$S_c = \frac{j_{\text{HER}}}{2F} - \lambda(c - c_{eq}) \quad (16)$$

式中, j_{HER} 表示析氢反应的体电流密度, F 是法拉第常数。

1.3 边界条件

在入口边界, 设定恒定压力条件; 相应地, 在出口边界同样采用恒定压力条件。所有壁面均施加无滑移边界条件 (即速度为零)。由于本工作重点研究电极内的析气效应, 而未涉及电化学反应, 因此假设氢气析出电流在电极内均匀分布。

1.4 模拟细节与网格无关性验证

气液滑移流动模型已基于先前热致析气与电化学析氢的实验数据得到了验证^[7], 表明其能够有效表征多孔电极内的气液两相传输。为兼顾计算精度与效率, 本工作进行了网格独立性检验。以第三层电堆在析氢电流密度为 0.5 mA/cm² 的工况为例, 考察了五种网格规模 (1273~20331 个单元) 下平均气相饱和度与电解液流量的网格敏感性。如图 4 所示, 当网格数量为 9231 个单元时, 计算结果与最精细网格 (20331 个单元) 相比差异已足够小, 同时计算效率显著提升, 故后续计算均采用该网格规模。

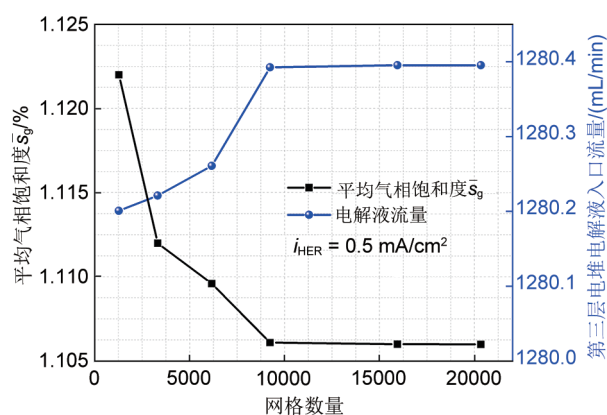


图4 网格无关性测试

Fig. 4 Grid independence test

2 结果与分析

2.1 析氢电流密度的影响

在铁铬液流电池运行过程中, 析氢副反应的强

度通常可由析氢电流密度来表征。随着析氢电流密度的增加, 副反应所产生的气体体积分数不断上升, 气泡在多孔电极内部的聚集会明显增强。由于气泡占据电解液流动通道, 局部流动阻力增加, 从而对电解液的均衡输运造成不利影响。一般而言, 析氢副反应电流不超过ICFB充电电流(标称电流密度为 100 mA/cm^2)的2%^[13]。本小节重点研究了入口溶解气浓度为 0.487 mol/m^3 (即1 atm下对应的氢气溶解度)条件下, 析氢速率($0.25 \sim 2.0 \text{ mA/cm}^2$)对电极内部气相分布与流量的影响。图5展示了不同析氢电流密度下, 不同位置电堆的电极内部气相饱和度沿着流动方向的分布情况。当 $i_{HER}=0.25 \text{ mA/cm}^2$ 时, 第一层和第二层的电堆电极的气相饱和度整体均较低, 仅在出口区域出现轻微的气相积累, 相对比, 最上面一层电堆堆3下游的气相积聚较为明显。

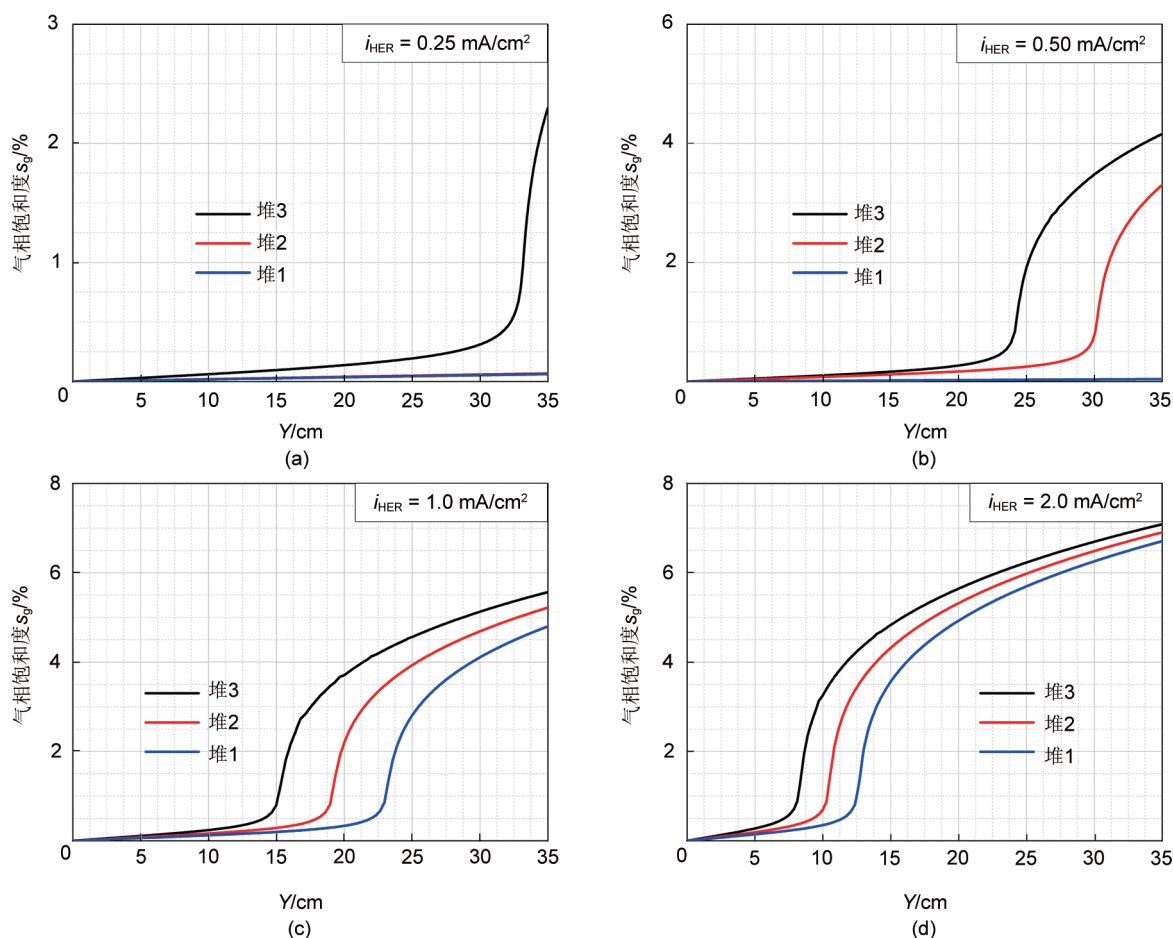


图5 不同析氢电流密度下 ($0.25, 0.5, 1.0$ 与 2.0 mA/cm^2), 三层电堆电极内部气相饱和度沿电解液流动方向 Y 的分布情况

Fig. 5 Gas saturation distributions along the electrolyte flow direction (Y) within the three stacks under different hydrogen evolution current densities ($0.25, 0.5, 1.0$, and 2.0 mA/cm^2)

随着析氢电流密度升高至 1.0 mA/cm^2 , 气体沿流动方向逐渐集聚并在电极中游至下游区域形成明显滞留, 气相饱和度迅速上升。可以看到, 堆3气相积聚明显早于且高于堆1和堆2, 说明空间排布在上方电堆更容易成为气体集聚的“重灾区”。因此, 在电堆系统设计时不宜堆叠过多层数, 否则上层电堆将更易出现严重的流动堵塞。当析氢电流密度进一步增加至 2.0 mA/cm^2 时, 气相饱和度在整个流动通道内均保持较高水平, 尤其是堆3始终处于最高气相饱和度状态。然而, 在极高电流密度下, 三层电堆的曲线逐渐趋于一致, 说明当析氢反应强烈时, 空间位置差异对整体气体分布的影响减弱, 但流动阻塞程度普遍加剧。

图6展示的各个电堆负极流经单个负极的电解液流量变化也进一步证实了这一趋势。单相条件下, 系统电解液流量维持在 1344 mL/min 。若析氢电流密度低于 0.25 mA/cm^2 , 则气相析出导致的各堆的流量下降不超过1%。随析氢电流密度增加, 堆1、堆2与堆3的流量均持续下降, 其中最上层电堆(堆3)的衰减幅度最为显著。例如在 $i_{\text{HER}} = 0.50 \text{ mA/cm}^2$ 时, 堆1的流量为 1341 mL/min , 而堆3已降至 1280 mL/min 。这表明气体析出不仅降低了液相渗透率, 还放大了不同空间排布下的流动不均衡性。析氢电流密度增加到 2 mA/cm^2 时, 不同层的电堆负极电解液流量衰减幅度均高于15%, 意味着析气导致的阻塞效应已开始引起反应物不足。

2.2 入口溶解气浓度的影响

图7展示了负极不同入口溶解气浓度条件下($c_{\text{g,in}} = 0.244$ 、 0.487 、 0.731 mol/m^3 , 分别对应于 0.5 、 1.0 、 1.5 atm 下的饱和溶解度)的气相分布及电解液流量变化规律。结果表明, 随着入口溶解气浓度的升高, 电极内部的气相饱和度显著增加, 且沿流动方向的累积效应愈加突出。如图7(a)所示, 在较低入口浓度($c_{\text{g,in}} = 0.244 \text{ mol/m}^3$)下, 堆1内部的气相饱和度几乎保持在 0.1% 以下, 仅在出口附近出现轻微气体聚集。当入口浓度提高至 1 atm 下的饱和条件($c_{\text{g,in}} = 0.487 \text{ mol/m}^3$)时, 析气现象显著增强, 堆1的气相饱和度峰值接近 5% , 同时堆3的饱和度也升至 5.6% 。如图7(c)所示, 当电极入口溶解气浓度为 0.731 mol/m^3 (对应 1.5 atm 下的饱和条件)时, 入口区域更易趋近于饱和状态。溶解于

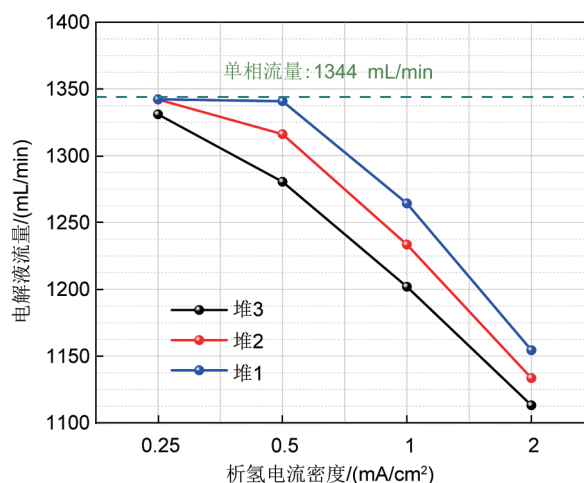


图6 不同析氢电流密度下, 三层电堆单个负极的电解液流量变化情况

Fig. 6 Variations of electrolyte flow rate in the negative electrodes of the three stacks under different hydrogen evolution current densities.

电解液的气体在入口即开始快速析出并沿电极流动方向持续累积, 导致堆3的气相饱和度超过 6% 。这表明在进入电极的气相越接近饱和条件下, 气泡极易在多孔电极中析出聚集, 有可能诱发明显的流动堵塞。

从图7(d)可以发现, 气相积累对电解液输运造成了直接影响。在单相流条件下, 流量可维持在 1344 mL/min , 而当 $c_{\text{g,in}}$ 从 0.244 mol/m^3 升至 0.731 mol/m^3 时, 堆3的流量由约 1158 mL/min 急剧下降至 1098 mL/min , 相较于单相时流量降幅超 18% ; 堆1的流量下降幅度相对较小, 但在高饱和度和条件下亦明显低于单相基准值。可见, 入口溶解气浓度的升高不仅增加了气体析出的总量, 同时影响了电堆间的流量分配, 加剧了局部电极的流动阻塞效应。因此, 如果电堆长时间出现析气, 势必会提高储罐内的电解液溶解气量增加, 增大电极入口溶解气浓度, 从而进一步恶化电解液流动, 加剧堆内流量失衡。长此以往, 这会造成电堆电极内局部反应物不足和增大副反应发生的风险。

2.3 供液压差的影响

保持足够高的供液压差是维持电极内足够的液体速度的直接有效的方法, 从而降低气相饱和度。然而, 供液压差的增加会导致更高的泵送损失。图8展示了在析氢电流密度 $i_{\text{HER}} = 0.5 \text{ mA/cm}^2$ 条件下, 电堆电极内平均气相饱和度 $\bar{s}_g$ 与液相相对渗透率 $\bar{K}_a$ 随供液压差变化的规律。 $\bar{s}_g$ 超过 5% 的区域(上面的

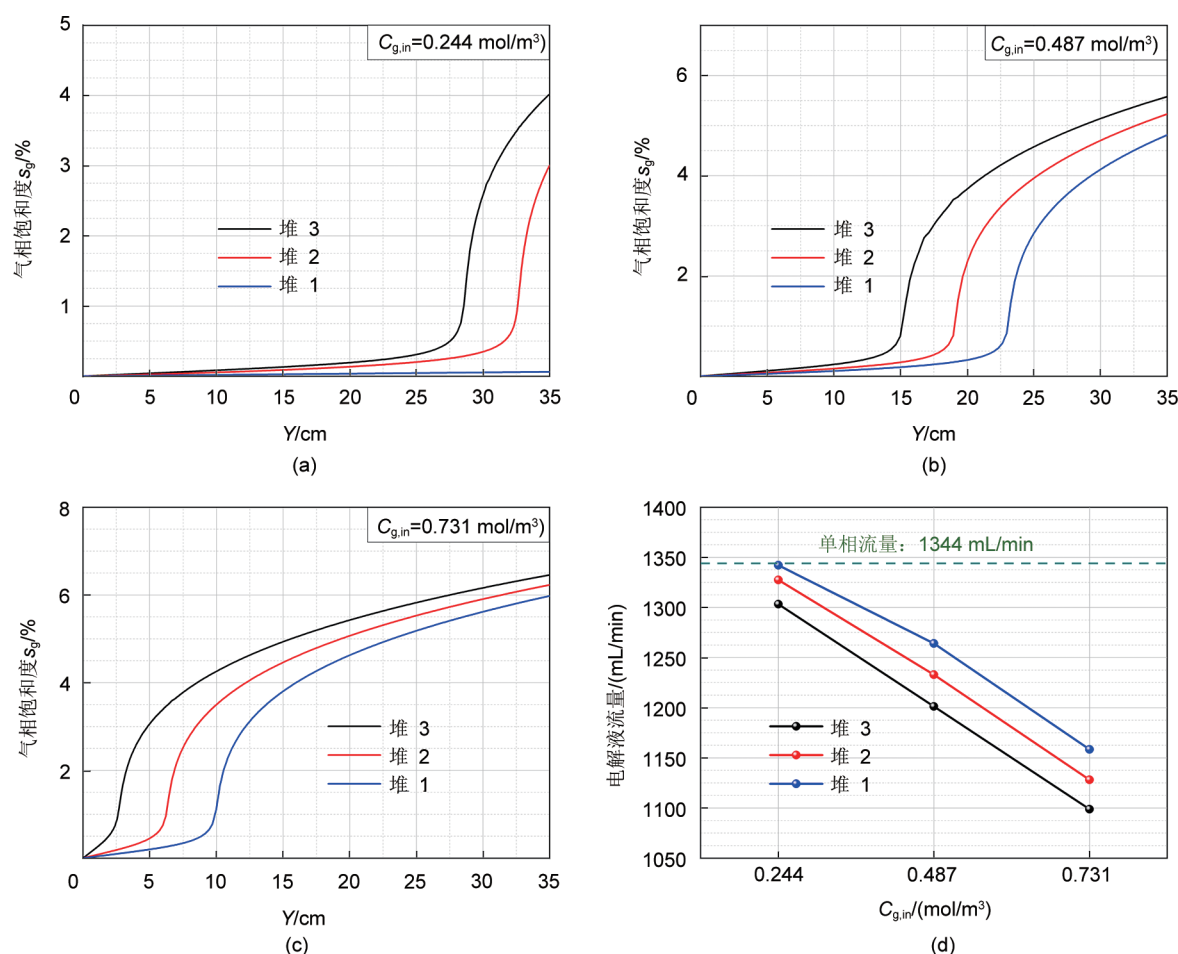


图7 不同入口溶解气浓度条件下(0.244、0.487、0.731 mol/m³), 三层电堆内气相饱和度沿电解液流动方向 Y 的分布情况与电解液流量变化情况, 其中 $i_{HER}=1.0$ mA/cm²

Fig. 7 Gas saturation distributions along the electrolyte flow direction (Y) and electrolyte flow rate variations in three stacks under different inlet dissolved gas concentrations (0.244, 0.487, and 0.731 mol/m³), with $i_{HER}=1.0$ mA/cm²

灰色阴影) 直接对应于 $\bar{K}_n$ 低于 0.8 的区域 (下面的灰色阴影), 表示显著的气体积聚和受限的电解质流动。相比之下, 当 $\bar{s}_g$ 保持在 1% 以下时, $\bar{K}_n$ 通常保持在 0.95 以上, 表明气体积聚可以忽略不计。中间区域 (浅灰色阴影) 表示 $\bar{s}_g$ 范围在 1%~5%, 相应的 $\bar{K}_n$ 约在 0.8~0.95。

在低供液压差工况下 (<10 kPa), 三组电堆的气相饱和度均保持在较高水平, 几乎超过 10%。高含气率导致液相通道严重受阻, 液相相对渗透率低于 0.6, 此时电极内的流量相当于不足单相时的 60%。随着供液压差逐渐升高, 液体流速增强, 气泡清扫作用明显增强, 气相饱和度快速下降, $\bar{K}_n$ 随之升高。为了将 $\bar{s}_g$ 保持在 1% 阈值以下, 在低至 0.5 mA/cm² 的 HER 电流密度下, 堆 3 的供液压差需要达到近 45 kPa, 而堆 1 需要 30 kPa, 堆 2 介于

二者之间。

值得注意的是, 在常规的供液压差条件下 (42 kPa, 电极内表观流速相当于 8 mm/s), 三组电堆的气相分布与平均液相相对渗透率存在明显差异。堆 3 气相饱和度始终高于堆 1 和堆 2, 对应的 $\bar{K}_n$ 也略低。说明在并联供液的工况下, 即便整体压差相同, 析气造成不同位置的电堆间的流动状态存在差异, 这种不均一性可能进一步放大局部反应物不足的风险。

3 结 论

本工作基于气液滑移流动模型, 系统研究了铁铬液流电池电堆中因空间排布差异引发的气相积聚与流动阻塞现象, 重点考察了析氢电流密度、入口溶解气的饱和度以及供液压差三方面的影响, 得到

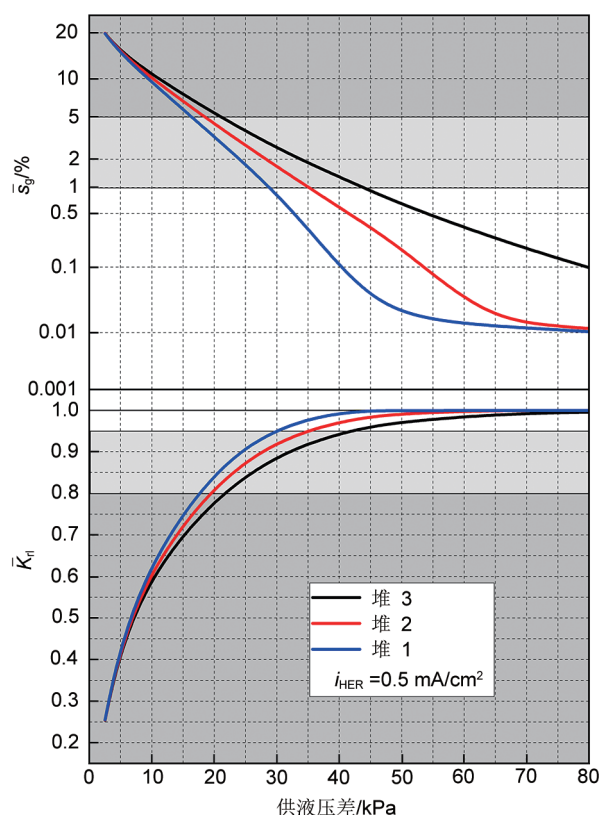


图8 不同供液压差条件下 (2.5~80 kPa), 三层电堆的平均气相饱和度 $\bar{s}_g$ 与液相相对渗透率 $\bar{K}_r$ 的变化规律, 其中 $i_{HER} = 0.5 \text{ mA/cm}^2$

Fig. 8 Variations of average gas saturation $\bar{s}_g$ and liquid-phase relative permeability $\bar{K}_r$ in three stacks under different feeding pressure differences (2.5—80 kPa), with $i_{HER} = 0.5 \text{ mA/cm}^2$

以下结论。

(1) 随着析氢电流密度升高, 电极内饱和度显著增加, 导致液相相对渗透率下降。其中, 位于上层的电堆更易发生气体积聚与流动阻塞, 流量衰减幅度最大, 表明空间位置对气体滞留具有显著影响。

(2) 当电解液入口接近或超过饱和状态时, 气体在电极入口即快速析出并沿流动方向累积, 诱发显著的气体堵塞。随着入口溶解气浓度的提高, 电堆间流量分配差异加剧, 堆3的流量降幅超过18%, 增加了局部反应物不足和副反应加剧的风险。

(3) 适当提高供液压差能够增强液体流速和气泡清扫作用, 有效降低气相饱和度并提升液相相对渗透率。但若压差不足, 三层电堆均表现出超过10%的气相积聚和低于0.6的液相相对渗透率, 流

动堵塞严重。结果表明, 供液压差的合理选择对于兼顾泵功损失与能效优化至关重要。

综上所述, 电堆空间排布差异显著影响气体析出行为与流动分布, 易在上层电堆中形成“气堵”效应。为提高ICFB系统的运行稳定性与能效, 未来电堆设计与运行应综合考虑电堆堆叠方式、供液条件及气液两相耦合效应, 以减缓局部反应物不足和副反应风险。作为二维的宏观均相模型, 本研究未考虑三维效应对两相传输的影响, 如实际流道几何引起的局部非均匀性, 这些方面值得在未来的工作中进一步研究。

参考文献

- [1] ZHANG H M, LU W J, LI X F. Progress and perspectives of flow battery technologies[J]. *Electrochemical Energy Reviews*, 2019, 2 (3): 492-506. DOI:10.1007/s41918-019-00047-1.
- [2] WEBER A Z, MENCH M M, MEYERS J P, et al. Redox flow batteries: A review[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2011, 41(10): 1137-1164. DOI:10.1007/s10800-011-0348-2.
- [3] ZENG Y K, ZHAO T S, ZHOU X L, et al. The effects of design parameters on the charge-discharge performance of iron-chromium redox flow batteries[J]. *Applied Energy*, 2016, 182: 204-209. DOI:10.1016/j.apenergy.2016.08.135.
- [4] 房茂霖, 张英, 乔琳, 等. 铁铬液流电池技术的研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(5): 1358-1367.
FANG M L, ZHANG Y, QIAO L, et al. Research progress of iron-chromium flow batteries technology[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(5): 1358-1367.
- [5] 周洋, 韩培玉, 牛迎春, 等. 金属有机框架衍生的 C-Bi/CC 电极制备及其在铁铬液流电池中的电化学性能[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13 (2): 381-389.
ZHOU Y, HAN P Y, NIU Y C, et al. Fabrication of metal-organic framework-derived C-Bi/CC electrode materials and their electrochemical properties in ICRFB[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(2): 381-389.
- [6] WU M, NAN M J, YE Y J, et al. A highly active electrolyte for high-capacity iron-chromium flow batteries[J]. *Applied Energy*, 2024, 358: 122534. DOI:10.1016/j.apenergy.2023.122534.
- [7] WANG H D, YE Q, CHENG P, et al. A gas-liquid slip flow model for predicting bubble distribution and electrolyte blockage in porous electrodes of flow batteries[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 251: 127357. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127357.
- [8] YE Q, DAI J C, CHENG P, et al. Gas evolution induced vicious cycle between bubble trapping and flow choking in redox flow battery stacks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 221: 125100. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125100.
- [9] 杨基鹏, 叶强. 基于 Bi^{3+} 过膜缓释策略的在线铋沉积对铁铬液流电池

- 性能的影响[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1075-1082.
- YANG J P, YE Q. Effects of electrodeposition of bismuth in an operating ironchromium redox flow battery base on a strategy of slow release of Bi^{3+} across the membrane[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1075-1082.
- [10] ZHANG Y J, YE Q, NI M. The impact of *in-situ* hydrogen evolution on the flow resistance of electrolyte flowing through the carbon felt electrode in a redox flow battery[J]. Journal of Power Sources, 2023, 564: 232837. DOI: 10.1016/j.jpowsour. 2023. 232837.
- [11] YE Q, ZHANG Y J, CHENG P, et al. Effects of wettability and flow direction on gas retention and flow resistance of water flowing through carbon felts with thermally induced gas evolutions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 156: 119911. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119911.
- [12] YE Q, SHAN T X, CHENG P. Thermally induced evolution of dissolved gas in water flowing through a carbon felt sample[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 2451-2461. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.097.
- [13] DAI J C, YE Q, ZHAO T S. Increased electrolyte flow resistance and blockage due to hydrogen evolution in a flow battery single cell under stack electrolyte feeding conditions[J]. Journal of Power Sources, 2025, 628: 235940. DOI: 10.1016/j.jpowsour. 2024.235940.
- [14] 王瑄, 叶强. 全钒液流电池电堆局部供液不足导致副反应加剧的现象[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1455-1467.
- WANG X, YE Q. The aggravation of side reactions caused by insufficient localized liquid supply in an all-vanadium redox flow battery stack[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1455-1467.
- [15] YOU X, YE Q, CHENG P. Scale-up of high power density redox flow batteries by introducing interdigitated flow fields[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 75: 7-12. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.021.
- [16] WANG H D, DAI J C, YE Q, et al. Three-dimensional modeling of gas-liquid flow in iron-chromium flow battery negative electrodes featuring interdigitated flow fields[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 169: 109961. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109961.