

در سیستم‌های الکتروشیمیایی، انتقال جرم نقش کلیدی در تعیین بازده و عملکرد فرآیند دارد. در سلول الکتروسنتر ما، جهت جریان الکترولیت عمود بر غشا نیست، که این موضوع پیچیدگی‌هایی در دینامیک انتقال جرم ایجاد می‌کند. برای حل این مشکل، یک صفحه مشبک روی غشا نصب شد تا انتقال جرم بهبود یابد و بازده فرآیند افزایش پیدا کند. این گزارش به تحلیل تأثیر صفحه مشبک بر انتقال جرم در شرایط جریان غیرعمود می‌پردازد و با ارائه بینش‌های نظری و مثال‌های عملی، نتایج را به طور تخصصی بررسی می‌کند.

۲.۱. انتقال جرم در سیستم‌های الکتروشیمیایی

انتقال جرم در سلول‌های الکتروشیمیایی شامل حرکت یون‌ها و واکنش‌دهنده‌ها به سطوح الکترودهاست. مکانیسم‌های اصلی عبارتند از:

- **همرفت (Convection):** ناشی از جریان سیال.
- **انتشار (Diffusion):** ناشی از گرادیان غلظت.
- **مهاجرت (Migration):** ناشی از میدان الکتریکی.

در سیستم‌هایی که جریان عمود بر غشا نیست، مؤلفه همرفت به‌صورت غیریکنواخت عمل می‌کند و منجر به توزیع نابرابر واکنش‌دهنده‌ها و ایجاد مناطق مرده (Dead Zones) می‌شود.

۲.۲. نقش صفحه مشبک

صفحه مشبک به عنوان یک تقویت‌کننده تلاطم و توزیع‌کننده جریان عمل می‌کند. عملکرد اصلی آن عبارت است از:

- ایجاد اختلال در جریان آرام و بهبود اختلاط.
- توزیع مجدد جهت جریان برای اطمینان از تماس بهتر با غشا.
- کاهش قطبی‌شدن غلظتی (Concentration Polarization) با بهبود دسترسی واکنش‌دهنده‌ها به سطح غشا.

۳. تحلیل تأثیر صفحه مشبک بر انتقال جرم

۳.۱. توزیع مجدد جریان

در OTCYT صفحه مشبک، جریان غیرعمود باعث ایجاد دو مشکل اصلی می‌شود:

- **کانال‌شدن جریان (Channeling):** جریان ترجیحاً از مسیرهایی با کمترین مقاومت عبور می‌کند و برخی مناطق غشا را دور می‌زند.

- **مناطق مرده (Dead Zones):** مناطقی با جریان کم که انتقال جرم ضعیفی دارند و ممکن است باعث گرفتگی (Fouling) شوند.

صفحه مشبک این مشکلات را با موارد زیر برطرف می‌کند:

- ایجاد تلاطم موضعی که جریان را به‌صورت یکنواخت‌تر توزیع می‌کند.
- شکستن گردابه‌های بزرگ مقیاس و اطمینان از تماس تمام مناطق غشا با الکترولیت.

۳.۲. بهبود انتقال جرم همرفتی

صفحه مشبک سطح مؤثر انتقال جرم را با موارد زیر افزایش می‌دهد:

- ایجاد گردابه‌های کوچک (Micro-eddies) که انتقال همرفتی را تقویت می‌کنند.
- کاهش ضخامت لایه مرزی در سطح غشا و افزایش ضریب انتقال جرم (k_m).

ضریب انتقال جرم را می‌توان با استفاده از عدد شرود (Sherwood Number) تخمین زد که با اعداد رینولدز (Re) و اشمیت (Sc) مرتبط است:

$$Sh = k_m \cdot L / D = a \cdot Re^b \cdot Sc^c$$

- L = طول مشخصه،

- D = ضریب انتشار،

- a, b, c = ثابت‌های تجربی.

صفحه مشبک عدد رینولدز (Re) را به‌صورت موضعی افزایش می‌دهد و منجر به افزایش عدد شرود (Sh) و بهبود انتقال جرم می‌شود.

۳.۳. کاهش قطبی‌شدن غلظتی

قطبی شدن غلظتی زمانی رخ می دهد که کاهش غلظت واکنش دهنده ها در نزدیکی سطح غشا، سرعت واکنش را محدود می کند. صفحه مشبک این مشکل را با موارد زیر کاهش می دهد:

- اطمینان از توزیع یکنواخت غلظت در سطح غشا.
- بهبود جایگزینی واکنش دهنده ها در سطح غشا.

۴. مثال های عملی و شواهد

۴.۱. Case Study

در یک سلول الکتروسنتر مشابه برای تولید پراکسید هیدروژن، استفاده از صفحه مشبک نتایج زیر را به دنبال داشت:

Fractional conversion	$X_A = \frac{n(0) - n(t)}{n(0)}$	$n(0)$ initial amount
Current efficiency	$\phi = \frac{q_{\text{product}}}{q} = \frac{wzF}{Mq}$	$n(t)$ amount at time t q_{product} , charge passed to produce product q , total charge M , molar mass
Selectivity	$S_p = \frac{n_{\text{product}}}{n_{\text{total}}}$	n_{product} , amount of product n_{total} amount of all species produced
Specific energy consumption for electrolysis	$= \frac{-zFE_{\text{cell}}}{\phi M}$	
Energy efficiency during electrolysis	$= \frac{\Delta G \phi}{E_{\text{cell}} z F}$	
Active electrode area per unit volume	$A_E = \frac{A}{V_R}$	
Mass transport coefficient	$k_L = \frac{I_L}{zAFc}$	I_L , mass transport limiting current c concentration of the electroactive species
Mass transport coefficient associated to the electroactive area	$k_{LA_E} = \frac{k_L A}{V_R} \text{ or } k_{LA_E} = \frac{k_L A}{V_E}$	A_E , electrode area per unit electrode volume V_E , electrode volume
Space-time	$\tau_{ST} = \frac{V_R}{Q}$	Q , volumetric flow rate.
Space-velocity	$s = \frac{Q}{V_R}$	
Space-time yield	$\rho_{ST} = \frac{w}{t} \times \frac{1}{V_R}$	
Normalised space-time velocity	$s_N = \frac{I \phi}{(c(t) - c(0)) V_R z F} \log \left(\frac{c(0)}{c(t)} \right)$	
Normalised space time yield	$\rho_N = \frac{I \phi M (0.9)}{V_R z F X_A} \log \left(\frac{c(0)}{c(t)} \right)$	

- افزایش ۲۵ درصدی بازده جریان به دلیل بهبود انتقال جرم.
- کاهش ۱۵ درصدی مصرف انرژی به دلیل کاهش پتانسیل اضافی ناشی از کاهش قطبی شدن غلظتی.

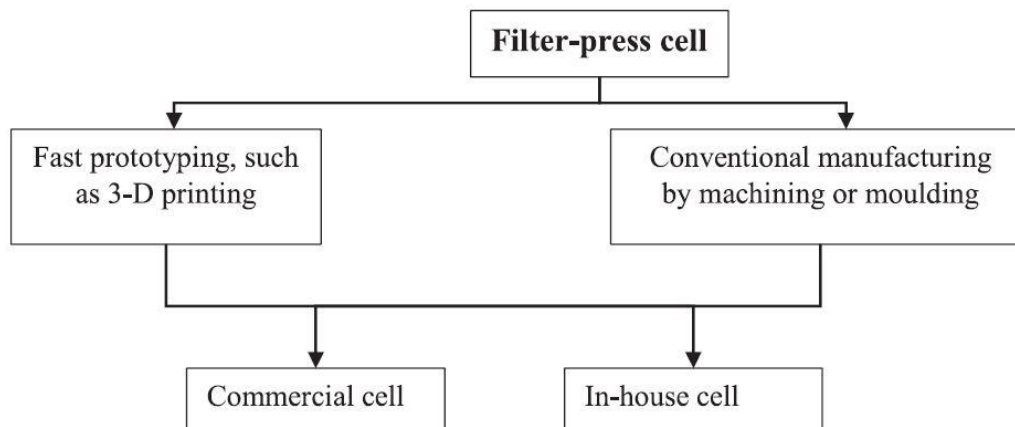
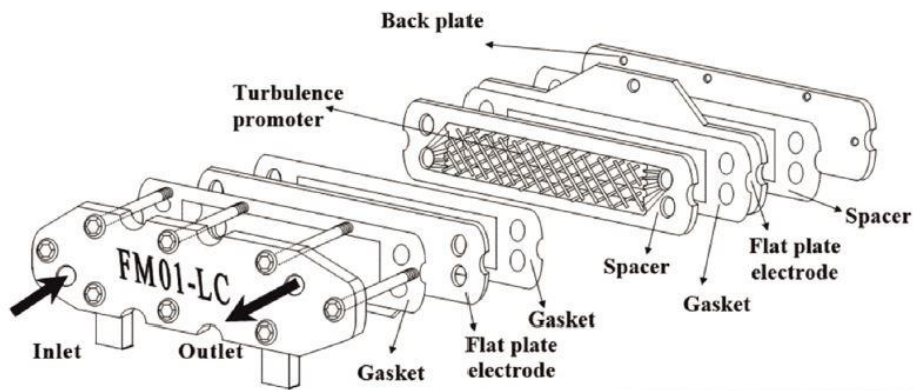
۴.۲. شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

شبیه سازی های CFD از سیستم ما با و بدون صفحه مشبک نشان داد:

- بدون صفحه مشبک: کانال شدن جریان و مناطق مرده قابل توجه، که منجر به توزیع نابرابر چگالی جریان می‌شود.

- با صفحه مشبک: توزیع یکنواخت جریان و افزایش ۳۰ درصدی ضریب انتقال جرم متوسط.

A

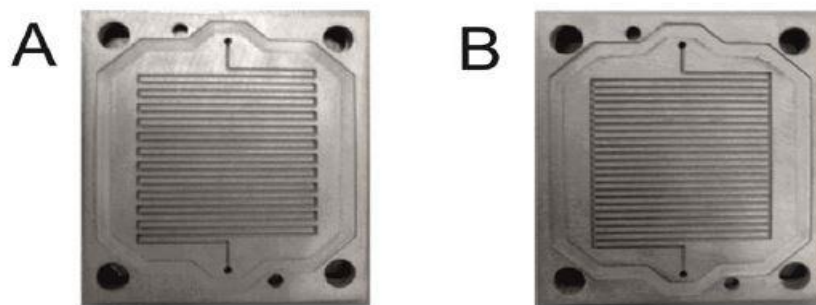


پیشنهادهای بررسی شده در سایر مقالات :

Rotating disc and cylinder electrode reactors.—Rotating disc electrodes (RDEs) are staples in electrochemical laboratories thanks to their well-defined and reproducible electrolyte flow and mass transport profiles, with the transport rate being proportional to the square root of the rotation rate.^{109,110} An extension to this design is the rotating ring disc electrode (RRDE), which has a secondary ring electrode on the outside of the central disc. Electroactive species produced at the disc are detected at the ring, allowing in situ quantification of electrochemically generated products. Samples of interest can be drop-cast onto glassy carbon substrates, or affixed to the electrode surface, provided mathematical considerations are made for the sample shape and thickness.¹¹¹ This provides an attractive option to assess the impact of flow rate on a reaction in a simplified set up, before moving to a more complex flow cell design.

Rotating cylinder electrodes (RCEs) have received less attention than RDEs. Like the RDE, the rate of mass transport is defined by its rotation rate. The RCE offers a substantially larger surface area along with controlled turbulent flow conditions, making it suitable for up-scaling to industrial applications.¹¹² Primarily, the large RCE surface area has been employed for electrodeposition applications, including metal recovery and metal powder production.^{113,114}

Porous, 3D electrodes in a flow cell.—The choice of porous material depends on the flow profile employed within the cell, primarily whether the electrolyte flows-by or -through the electrode.⁶⁰ Flow-by configurations flow electrolyte within a channel over the surface of the porous structure, usually assisted by turbulence promoters to maximise interaction between the electrolyte and the inner porous structure. Flow-through instead fills the channel with the porous structure, requiring the electrolyte to permeate the whole structure during the flow. While maximising the interaction between electrode and electrolyte, the flow-through configuration is practically limited due to pressure drop across the porous electrode material.⁸⁹ Flow through configurations therefore are most often employed to very thin electrodes in microfluidic devices.^{90,91}



Flow field designs.—The challenge in flow field design is to provide optimal flow conditions for reactant supply to and product removal from the electrode surface, while simultaneously minimising the pressure drop between inlet and outlet. To this end, a number of different flow field designs have been employed (Fig. 8). Within these categories, multiple works have investigated varied flow channel widths, depths and orientations, with both experimental and computational approaches probing the flow profile, pressure drop and potential distribution across the electrode surface.⁹⁸ Comparison of different flow fields is challenging since varied experimental conditions affect reactor functionality alongside changes in the flow field design. However, some experimental and computational works indicate that serpentine fields outperform the other related designs.^{99,100,101}