

气体组成对钯膜反应器分离氢气的影响

屈慧珠^{1,2}, 梁心茹¹, 王晓胜¹, 李然家^{1*}, 余长春¹, 张岩³, 刘琦³

(1. 中国石油大学(北京)新能源与材料学院, 北京 102249;

2. 中钢设备有限公司低碳冶金与能源工程部, 北京 100080;

3. 国能氢创科技(北京)有限责任公司, 北京 100007)

摘要:利用钯膜对氢气的选择透过性可以实现甲烷蒸汽重整的反应-分离一体化制氢,但钯膜的分离效果受气体组成及工艺条件的影响较大。根据甲烷蒸汽重整产品气的典型组成配制模拟甲烷蒸汽重整产品气,在固定床钯膜反应器上考察了CO₂、水蒸气等杂质气体和工艺条件对钯膜反应器分离氢气效果的影响。结果表明,CO₂及水蒸气等组分都会与氢气发生竞争吸附,从而影响钯膜反应器分离氢气的效果。非氢气组分对氢气的渗透存在一定的抑制作用,并且伴有副反应发生,降低了钯膜对氢气的分离效果。此外,工艺条件能够显著影响钯膜反应器的氢气分离效果。当跨膜压差一定时,同一温度下,渗透侧氢气的纯度随膜两侧气体压力的增加而降低;同一压力下,渗透侧氢气的纯度随温度的增加而降低。这说明过高的反应温度和原料压力会大大降低钯膜对氢气的选择透过性,降低分离得到氢气的纯度。

关键词:气体组成;氢气;钯膜;膜分离;影响

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0281-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.052

Influence of gas composition on hydrogen separation in palladium membrane reactor

QU Hui-zhu^{1,2}, LIANG Xin-ru¹, WANG Xiao-sheng¹, LI Ran-jia^{1*},
YU Chang-chun¹, ZHANG Yan³, LIU Qi³

(1.College of New Energy and Materials, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;

2.Low-carbon Metallurgy & Energy Division, Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd., Beijing 100080, China;

3.CHN Energy Hydrogen Innovation Technology Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract:The reaction-separation integrated hydrogen production in methane steam reforming process can be realized by utilizing the selective permeability of palladium membrane to hydrogen. However, the separation effect of palladium membrane is greatly affected by gas composition and reaction conditions. A simulated product gas is made up according to the typical composition of product gas from methane steam reforming process, and used to evaluate the influences of impurity gases, such as CO₂ and steam, and reaction conditions on the separation of hydrogen by palladium membrane reactor on a fixed bed palladium membrane reactor. The evaluation results indicate that the components such as CO₂ and steam may compete with hydrogen for adsorption, thereby affecting the separation efficiency of hydrogen in palladium membrane reactor. Non-hydrogen gas components have a certain inhibitory effect on the permeation of hydrogen, which accompany by the occurrence of side reactions, reducing the separation effect of palladium membrane to hydrogen. In addition, the process conditions can significantly affect the separation effect of hydrogen on the palladium membrane reactor. As the transmembrane pressure difference remains constant, the purity of hydrogen on the permeation side decreases with the increase of gas pressure on both sides of the membrane at the same temperature. As the pressure remains constant, the purity of hydrogen on the permeation side decreases with the increase of temperature at the same pressure. It is indicated that excessively higher reaction temperature and feeding pressure will greatly reduce the selective permeability of palladium membrane to hydrogen gas, thereby declining the purity of hydrogen gas obtained from the separation.

Key words:gas composition; hydrogen; palladium membrane; membrane separation; influence

1868年, Motay 等^[1-2]首次报道了利用蒸汽将碳氢化合物转化为氢气的反应过程。此后,该过程被应用于天然气大规模制氢,即天然气蒸汽重整制氢工艺(Steam Methane Reforming, 简写 SMR),并逐渐迭代完善成为最成熟、最高效的制氢工艺^[3]。目

前,每年通过 SMR 工艺生产的氢气约占全球氢气实际供应量的 50%^[4]。为了维持较高的热力学平衡转化,天然气蒸汽重整制氢工艺的反应温度一般需要超过 800℃^[5-6]。较高的反应温度对加热炉及反应器等材料都提出了较为苛刻的要求,同时也带来

收稿日期:2025-01-22;修回日期:2025-03-25

基金项目:中石油-中国石油大学(北京)战略合作专项(ZLZX2020-04);国家自然科学基金(22008260);中国氢能联盟 2023 政研项目(CHA2023RP005)

作者简介:屈慧珠(1996-),女,硕士,助理工程师,研究方向为低碳冶金,quhuizhu@mecc.sinosteel.com;李然家(1974-),男,博士,讲师,研究方向为清洁能源高效利用,通讯联系人,lij@cup.edu.cn。

了能耗较高的问题。

钯膜反应器的出现给天然气重整制氢工艺提供了一个良好的解决方案^[7-8]。膜反应器可以利用自身独特的选择透过性将产品气中的氢气分离出来从而打破化学平衡,促使反应向氢气生成的方向不断进行,提高产物在体系中的比例。早在 1863 年就有研究者发现氢气可以透过钯膜,后续研究者发现在室温下钯可以吸收很多倍超过自身体积的氢气^[9]。为了高效制氢,钯膜反应器的制备及改进受到了关注^[10]。1964 年 Johnson Matthey 实现致密钯膜用于富氢气体净化的首次商业应用,获得杂质含量仅 0.1 ppm 的高品质氢气,他们利用该项技术为英国南极考察队实现了利用甲醇蒸汽重整反应制高纯氢。在日本,东京燃气公司开发了首个用于中试规模生产高纯氢的钯膜反应器^[11]。1969 年,Setzer 等^[12]将钯膜反应器应用于烃类蒸汽重整反应制氢中,也取得了良好的效果。众多的实验结果表明^[13-15],金属钯及其合金膜对氢气有着良好的选择透过性,是商业化透氢膜的首选^[16]。

在理论上,没有缺陷的钯膜只对氢气有选择透过性,但在实际应用中大多数的薄膜都含有一定程度的孔隙,非渗透组分的气体就会渗透过钯膜,又考虑到膜工作条件的差异,这对于钯膜对氢气选择性都会存在一定的影响。将钯膜反应器应用于甲烷蒸汽重整制氢,体系中非渗透组分及其含量的不同会影响渗透侧的气体组成,这是由于重整气体会在氢气渗透过程中与其产生竞争吸附,抑制氢气渗透,最终影响钯膜对氢气的分离。因此,有必要研究甲烷蒸汽重整制氢气体产物中其他组分对钯膜分离氢气效果的影响。

根据课题组前期的实验结果,甲烷蒸汽重整反应的产品干气组分含量由高到低依次为 H_2 、 CH_4 、 CO_2 、 CO ,其中 CH_4 可视为渗透过程中的惰性气体组分。本研究针对其中含量较多的非渗透气体 CO_2 、 CO 及水蒸气等组分,通过配比不同比例非渗透气体的方式,对非渗透气体含量对钯膜分离氢气效果的影响进行了考察。

1 实验部分

1.1 钯膜反应器及蒸汽重整催化剂的制备

钯膜反应器尺寸为 $\Phi 10 \times 1.0$ mm,钯膜厚度为 2 μm ,具体的制备过程参考文献^[17]。制备的钯膜反应器置于外径 14 mm、壁厚 1.0 mm 的不锈钢反应器中,内部装填蒸汽重整催化剂,两端用石英棉固

定。钯膜反应器与不锈钢反应器通过卡套连接。钯膜反应器的结构如图 1 所示。

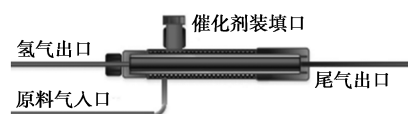


图 1 钯膜反应器结构图

1.2 气体组成对钯膜气体分离性能影响的评价

气体组成对钯膜气体分离性能影响的评价在自行搭建的固定床反应装置上进行,固定床反应装置的流程图如图 2 所示。按比例将 H_2 、 CO 、 CO_2 等气体配成模拟混合气,并引入预先升至一定温度的钯膜反应器中,渗透侧气体进入色谱中检测其组成,渗余侧气体放空。

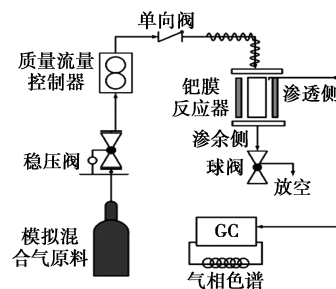


图 2 气体组成对钯膜气体分离性能影响评价装置流程图

1.3 气体分析及数据处理

在气相色谱中采用双柱并联的方式分析可能含有 H_2 、 CH_4 、 CO_2 、 CO 和 N_2 等气体的渗透侧气体。产物通过双 TCD 进行检测,其中 TCD-A 选用 N_2 作载气来分析产品干气中的 H_2 ;TCD-B 选用 H_2 作载气来分析产品干气中的 N_2 、 CH_4 、 CO 和 CO_2 。按照归一化法计算渗透侧气体组成,以氢气的纯度代表分离效果。

2 实验结果与讨论

2.1 CO_2 含量的影响

钯膜反应器的耐温范围一般低于 $650^\circ C$,其能够在 $600^\circ C$ 稳定工作。因此在温度为 $600^\circ C$ 、渗余侧压力为 1.0 MPa、渗透侧压力为 0.1 MPa(即跨膜压差为 0.9 MPa)条件下,分别将 CO_2 体积分数为 5%、10%、15%和 20%的 CO_2 与 H_2 混合气通入钯膜反应器。控制混合气体总流量为 100 mL/min,测量两个出口的气体流量并对渗透侧气体在线检测气体组成。

表 1 为混合气中 CO_2 含量对渗透侧氢气纯度

的影响。由表可知, H_2/CO_2 混合气体中的 CO_2 体积分数增加会使渗透侧的 H_2 纯度降低。 CO_2 含量由 5% 增加至 20% 时, 渗透侧 H_2 的纯度由 100% 降低至 99.22%, 降低了 0.78 个百分点, 说明进气混合气中 CO_2 含量对钌膜分离氢气存在一定影响。混合气中 CO_2 含量为 5% 时, 渗透侧只检测到 H_2 , 说明该钌膜致密性良好, 在低 CO_2 浓度范围条件下能够保持对氢气的高选择透过性; 提高混合气中 CO_2 含量至 20%, 在渗透侧气体中检测到少量的 CO_2 , CO 和 CH_4 , 这说明在此条件下 CO_2 和 H_2 发生反应生成了 CO , 即发生了逆水气变换反应 (RWGS)。RWGS 是温和的吸热反应, 高温有利于该反应的进行, 即有利于生成 CO 。 CO 和 CO_2 都可能与 H_2 发生甲烷化反应, 钌膜催化 CO 或 CO_2 与 H_2 发生了甲烷化反应, 因此有 CH_4 被检测到。在该条件下, 检测到 CO 含量为 0.08%, CH_4 含量为 0.57%, CO_2 含量为 0.13%。 H_2 不断透过钌膜从体系中分离, 使混合气(渗余侧)组分中 CO_2 含量上升, 因此也会促进逆水气变换反应和甲烷化反应的发生。以上结果说明, 在混合气中 CO_2 含量较低时, CO_2 对氢气的抑制作用较小; 随着 CO_2 含量的增加, 更多的 CO_2 会占据 H_2 在膜上的吸附点位, 阻碍氢气渗透, CO_2 的竞争吸附效应更加明显。 CO_2 对氢气的渗透存在一定的抑制作用, 并且伴有副反应的发生, 降低了钌膜对氢气的分离效果。

表 1 混合气 CO_2 含量对渗透侧氢气流量和纯度的影响

混合气 CO_2 体积含量/%	渗透侧 H_2 流量/ ($mL \cdot min^{-1}$)	渗透侧 H_2 纯度/%
5	98.51	100.00
10	92.96	100.00
15	88.51	100.00
20	83.89	99.22

2.2 CO_2 和 H_2O 含量的影响

为考察水蒸气量对氢气渗透的影响, 通过调节气体质量流量控制器, 使 H_2 与 CO_2 以 4:1 进行混合, 气体总流量为 $100 mL/min$, 然后分别以 0.05 、 $0.10 mL/min$ 和 $0.15 mL/min$ 的进水速率将水添加至混合气体中, 液态水经汽化炉汽化后与 H_2/CO_2 混合气混合, 从原料气入口进入到钌膜反应器中进行分离, 分离温度为 $600^\circ C$, 渗余侧气体压力为 $1.0 MPa$, 渗透侧气体压力为 $0.1 MPa$, 保持跨膜压差为 $0.9 MPa$, 测量膜两侧出口的气体流量, 并对渗透侧的气体组成进行在线分析。

表 2 为进水速率对渗透侧氢气纯度的影响。在 $600^\circ C$ 、膜两侧压差为 $0.9 MPa$ 、 H_2/CO_2 混合气的条件下, 渗透侧氢气纯度随进水量增加而提高, 这是因为水蒸气的加入会减小甲烷化反应的发生, 减少 CH_4 的生成。表明增加进水量有利于提高氢气的纯度, 蒸汽在钌膜表面的竞争吸附削弱了气体中非氢气体的吸附与渗透, 有利于提高氢气的纯度。蒸汽还可以与钌膜表面的含碳物种转化为 CO_2 和 H_2 , 并且钌膜表面存在的积碳也可以被蒸汽反应消除。当进水速率为 $0.05 mL/min$ 时, 渗透侧气体组成中 CH_4 含量为 0.57%, CO 含量为 0.07%, CO_2 含量为 0.44%; 增加进水速率至 $0.15 mL/min$ 时, 渗透侧的气体组成中 CO 含量为 0.01%, CO_2 含量为 0.23%, 没有检测到 CH_4 。说明较多蒸汽条件下可以显著抑制逆水气变换反应和甲烷化反应。

表 2 进水速率对渗透侧氢气流量和纯度的影响

H_2O 流量/ ($mL \cdot min^{-1}$)	渗透侧 H_2 流量/ ($mL \cdot min^{-1}$)	渗透侧 H_2 纯度/%
0.00	83.89	99.22
0.05	77.80	99.49
0.10	68.03	99.71
0.15	60.71	99.75

由表 2 可知, 提高进水量可以减少生成 CO 和 CH_4 的副反应, 但也会降低渗余侧氢气的分压, 从而降低渗透侧氢气流量。一方面是因为混合气体中水蒸气含量越多, 渗余侧氢气在混合气中的浓度就越低, 使膜两侧氢气分压差值减小, 氢气的渗透通量随膜两侧压差的减小而减小; 另一方面, 提高水蒸气的含量, 会使更多的蒸汽吸附在膜的表面, 对氢气渗透的抑制作用就越强, 氢气的渗透通量随之降低。

为进一步验证水蒸气对渗透侧气体组成影响, 停止加入水蒸气后, 仅将 H_2/CO_2 的混合气通入膜反应器内进行气体分离, 检测到渗透侧气体中含有 1.13% 的 CO_2 , CO_2 含量的提高证实了蒸汽的引入降低了渗透侧 CH_4 和 CO 含量, 使膜对氢气的选择性增加。将膜的初末状态进行对比, 氢气的纯度由 99.22% 降低至 97.88%, 说明蒸汽的存在会影响钌膜性能, 因此在实际应用中应选择合适的蒸汽添加量。

2.3 工艺条件对钌膜反应器 H_2 分离效果的影响

由以上实验结果可知, 钌膜反应器针对单一组分气体和对组分气体原料的分离效果有较大差异, 因此有必要考察钌膜反应器在不同工艺条件下对甲

烷蒸汽重整的全组分气体的分离效果。

2.3.1 温度的影响

根据前期实验结果,模拟配制了典型的甲烷蒸汽重整的全组分干气,具体气体组成包括:40.76% H₂、27.72% CO₂、17.50% CH₄、8.06% N₂、5.96% CO。气体总流量控制在 93 mL/min,调节进料压力,使渗透侧气体压力为 0.1 MPa、渗余侧压力为 1.0 MPa(跨膜压差为 0.9 MPa),考察温度为 550、550℃ 和 600℃ 条件下重整气体对氢气分离的影响。

不同温度下钌膜反应器对典型甲烷蒸汽重整全组分干气的分离效果如图 3 所示,渗透侧气体具体组成列于表 3。由图 3 可知,渗透侧氢气的纯度随温度升高而降低,而 CH₄、CO₂、CO 及 N₂ 等杂质气体含量都随着温度升高而不断增大。这说明温度越高,会有越多的杂质透过钌膜。在温度为 600℃ 时,渗透侧 H₂ 的纯度为 88.36%,此时不利于获取纯度较高的氢气。膜两侧氢气分压越大,驱动力越大,会加速氢气渗透,但同时也会使相对较多的杂质组分渗透过钌膜。

表 3 不同温度下渗透侧气体组成

温度/℃	含量/%				
	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	N ₂
500	2.68	1.15	2.37	92.80	1.00
550	3.21	1.83	2.57	91.20	1.20
600	3.90	3.42	2.81	88.36	1.51

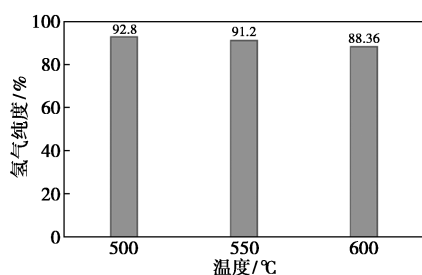


图 3 不同温度对渗透侧 H₂ 纯度的影响

在跨膜压差为 0.9 MPa,温度为 600℃ 条件下,对重整气体进行分离。随着温度的增加,在渗透侧的气体组成中除 H₂ 外的杂质组分含量越来越高。当温度在 550℃ 以下时,杂质中 CH₄ 的含量最高,其次为 CO₂、CO,最低为 N₂;温度在 600℃ 时,CO 的含量高于 CO₂,表明高温下碳氧化物与氢气之间的竞争吸附作用增强,降低了氢气的渗透通量。因此在分离温度较高时,降低原料气中杂质气体含量有利于提高氢气的纯度。对于钌膜而言,在较高的工作

温度下工作会降低其使用寿命,因此在使用时应选取合适的分离温度,以高效获取高纯氢气。

2.3.2 原料压力的影响

保持跨膜压差为 0.9 MPa,渗余侧气体压力分别为 1.0、1.5 MPa 和 2.0 MPa,对应的渗透侧气体压力依次为 0.1 MPa、0.6 MPa 和 1.1 MPa,在温度为 500℃ 和 600℃ 下,考察渗余侧压力对钌膜分离氢气纯度的影响,图 4 为实验结果。

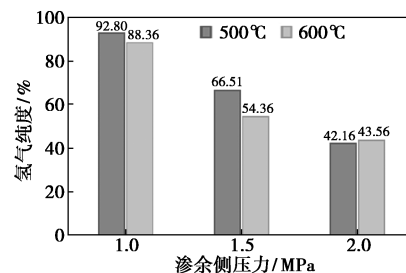


图 4 不同温度下渗余侧压力对 H₂ 纯度的影响

由图 4 可知,在 500℃、渗余侧气体压力由 1.0 MPa 增加至 2.0 MPa 时,渗透侧氢气纯度由 92.80% 降低至 42.16%;相同压力下,温度提升至 600℃,氢气纯度由 88.36% 降低至 43.56%。这些结果表明当跨膜压差一定时,同一反应温度下,渗透侧氢气的纯度随膜两侧气体压力的增加而降低;同一压力下,渗透侧氢气的纯度随温度的增加而降低。渗余侧压力达到 2.0 MPa 时,不论温度高低,渗透侧氢气的纯度与渗余侧进料氢气含量 40.76% 已经非常接近,说明较高压力下膜可能因压力较高结构产生破损,失去了分离氢气的作用。

由表 4 可知,在 500℃ 和 600℃ 下,渗透过钌膜的气体组分含量受压力的影响变化较大,其中 CH₄、CO 和 CO₂ 含量均随两侧压力的增加而增加,说明氢气与其他杂质气体混合时,膜两侧压力越高,钌膜对氢气的分离效果越差,使得更多的杂质组分渗透过钌膜,难以获取高纯度的氢气。当渗余侧压力由 1.0 MPa 增至 2.0 MPa 时,渗透侧的氢气含量下降近一半,已经与进料待分离氢气含量很接近了。

表 4 不同温度和压力下渗透侧气体组成

温度/℃	渗余侧压力/MPa	渗透侧压力/MPa	含量/%			
			CH ₄	CO	CO ₂	H ₂
500	1.0	0.1	2.68	1.15	2.37	92.80
	1.5	0.6	13.11	6.68	8.93	66.51
	2.0	1.1	22.98	11.94	15.34	42.16
600	1.0	0.1	3.90	3.42	2.81	88.36
	1.5	0.6	17.81	11.12	10.73	54.36
	2.0	1.1	22.33	12.13	14.63	43.56

由此可见,在不考虑抑制作用时,理论上增加原料压力有利于 H_2 的渗透,提高氢气的渗透通量。然而通过以上模拟蒸汽重整产品干气对 H_2 的研究表明,非渗透气体组分共吸附的抑制作用,导致原料压力过高会严重影响膜的氢气渗透分离能力,并且该效应对氢气分离的影响较为显著。

3 结论

本文在固定床钯膜反应器上考察了甲烷蒸汽重整产品气中 CO_2 、水蒸气等杂质气体和工艺条件对钯膜反应器分离氢气效果的影响。结合评价结果,可得以下结论:

(1) CO_2 及其他非氢组分等都会对钯膜反应器分离氢气的效果产生不利的影响。在非氢气组分含量较低时,其对氢气的抑制作用较小;随着非氢气组分含量的增加,更多的非氢气组分会占据氢气在膜上的吸附点位,阻碍氢气渗透, CO_2 及水蒸气等与氢气分子的竞争吸附效应更加明显。非氢气组分会发生副反应,也会降低钯膜对氢气的分离效果。

(2) 反应工艺条件能够显著影响钯膜反应器的 H_2 分离效果。当跨膜压差一定时,同一反应温度下,渗透侧氢气的纯度随膜两侧气体压力的增加而降低;同一压力下,渗透侧氢气的纯度随温度的增加而降低。过高的反应温度和原料压力会大大降低钯膜对氢气的选择透过性,降低分离得到氢气的纯度。

参考文献

- [1] Adris A M, Pruden B B, Lim C J, *et al.* On the reported attempts to radically improve the performance of the steam methane reforming reactor[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1996, 74(2): 177-186.
- [2] HASAN K A, ALI A H T. A CFD model of natural gas steam reforming in a catalytic membrane reactor: Effect of various operating parameters on the performance of CMR[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 56: 780-796.
- [3] Faramawy S, Zaki T, Sakr A A E. Natural gas origin, composition, and processing: A review[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 34-54.
- [4] Voldsund M, Jordal K, Anantharaman R. Hydrogen production with CO_2 capture[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(9): 4969-4992.
- [5] Ngan D T, Hweeung K, Minseong P, *et al.* Carbon-neutral hydrogen production from natural gas via electrified steam reforming: Techno-economic-environmental perspective [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 279: 116758.
- [6] Noor Y, Fares A, Saad A S A S. Onshore hydrogen production from boil-off gas (BOG) via natural gas steam reforming process: Process simulation and techno-economic analysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52(PC): 1046-1057.
- [7] A H M, Azazul H M, Aadesh H, *et al.* Palladium-alloy membrane reactors for fuel reforming and hydrogen production: Hydrogen Production Modeling [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 49: 103359.
- [8] Al-Mufachi N A, Rees N V, Steinberger-Wilkens R. Hydrogen selective membranes: A review of palladium-based dense metal membranes [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47: 540-551.
- [9] Buxbaum R S R E, Park J H, Smith D L. Hydrogen transport and embrittlement for palladium coated vanadium-chromium-titanium alloys [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1996, 233-237: 510-512.
- [10] Jiang P, Feng Z, Wang X. Palladium-related metallic membranes for hydrogen separation and purification: A review [J]. *Fuel*, 2025, 386: 134192.
- [11] Iulianelli A, Liguori S, Wilcox J, *et al.* Advances on methane steam reforming to produce hydrogen through membrane reactors technology: A review [J]. *Catalysis Reviews*, 2016, 58(1): 1-35.
- [12] Setzer H J, Eggen A C W. Method for catalytically reforming hydrogen-containing carbonaceous feed-stocks by simultaneous abstractions through a membrane selectively permeable to hydrogen [Z]. US3450500A [P]. 1969.
- [13] Omidifar M, Babaluo A A. Hydrogen flux improvement through palladium and its alloy membranes: Investigating influential parameters-A review [J]. *Fuel*, 2025, 379: 133038.
- [14] S M J, A F, M T, *et al.* The recent areas of applicability of palladium based membrane technologies for hydrogen production from methane and natural gas: A review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(16): 6451-6476.
- [15] Sutar P R, Yadav G D. Exploring the environmental performance of electroless plated palladium alloy membranes for H_2 separation: A cradle-to-gate life cycle study [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 79: 1464-1471.
- [16] Gallucci F, Fernandez E, Corengia P, *et al.* Recent advances on membranes and membrane reactors for hydrogen production [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 92: 40-66.
- [17] A H M, Aadesh H, Stephen P, *et al.* Palladium-alloy membrane reactors for fuel reforming and hydrogen production: A review [J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(7): 5558-5593. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号 82—67。