燃料电池金属双极板的研究进展与展望

罗海文 林 雄 刘高阳 胡 斌

(北京科技大学 冶金与生态工程学院 北京 100083)

摘 要 质子交换膜燃料电池(PEMFC)双极板材料耐腐蚀与导电性能的协同优化是实现氢能高效利用的核心挑战。本文系统评述了铝合金、钛合金、奥氏体不锈钢及铁素体不锈钢等金属双极板的性能瓶颈和改性策略:铝合金和钛合金需依赖贵金属涂层(如Au/Ni-P、CrN)以平衡耐腐蚀性能与导电性能,这导致工艺复杂、成本高昂;奥氏体不锈钢通过Cr/Mo协同优化可提升耐腐蚀性能,但其钝化膜增厚导致界面接触电阻超标;铁素体不锈钢虽然抗晶间腐蚀和点蚀能力提高,但延展性较差难以加工成型,且无涂层时其腐蚀电流密度较高。表面涂层(如CrN、导电高分子)技术虽能显著改善不锈钢双极板的耐腐蚀和导电性能,但工艺复杂且耐久性不足。本文回顾了上述各类型双极板材料的优缺点,探讨了通过高Cr铁素体不锈钢的全新合金化策略,使得在改善其成型性的同时还能在无涂层状态下同步改善耐腐蚀和导电性能。最后,对PEMFC双极板材料未来的发展方向进行了展望。

关键词 质子交换膜燃料电池(PEMFC),双极板材料,铁素体不锈钢,耐腐蚀-导电性能协同优化

中图分类号 TM911.4 **文章编号** 0412-1961(2026)02-0263-12

Progress and Perspectives on Metallic Bipolar Plates in Fuel Cells

LUO Haiwen, LIN Xiong, LIU Gaoyang, HU Bin

School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Correspondent: LUO Haiwen, professor, Tel: (010)62332911, E-mail: luohaiwen@ustb.edu.cn

HU Bin, associate professor, Tel: (010)62332911, E-mail: hubin@ustb.edu.cn

Supported by China Baowu Low Carbon Metallurgy Innovation Foundation (No.BWLCF202213)

Manuscript received 2025-05-27, in revised form 2025-09-25

ABSTRACT With the advancement of the global carbon neutrality strategy, proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs), a typical type of low-temperature fuel cell, have been widely applied in transportation power systems, portable power equipment, and distributed energy systems because of their notable technical advantages, including high energy conversion efficiency (> 60%), low operating temperatures (60-80 ℃), and near-zero carbon dioxide emissions. As a key fuel cell component, the bipolar plate serves several essential functions, including gas distribution, electron conduction, and management of reactant flow fields. The corrosion resistance and electrical conductivity of bipolar plates directly determine overall fuel cell performance, including energy conversion efficiency, durability, and manufacturing cost.

资助项目 中国宝武低碳冶金创新基金项目No.BWLCF202213

收稿日期 2025-05-27 **定稿日期** 2025-09-25

作者简介 罗海文,男,1972年生,教授,博士

通讯作者 罗海文,luohaiwen@ustb.edu.cn,主要从事先进钢铁材料的制备与研究

胡 斌,hubin@ustb.edu.cn,主要从事高强钢材料强韧化、强塑化和断裂失效机理研究

引用格式 罗海文, 林 雄, 刘高阳等. 燃料电池金属双极板的研究进展与展望 [J]. 金属学报, 2026, 62: 263-274.

Luo H W, Lin X, Liu G Y, et al. Progress and perspectives on metallic bipolar plates in fuel cells [J]. Acta Metall. Sin., 2026, 62: 263-274. DOI: 10.11900/0412.1961.2025.00142

Therefore, bipolar plates with high corrosion resistance and high conductivity for PEMFCs have recently been the focus of intensive research. This study reviews various metallic bipolar plates, their surface modification strategies, and the resulting performance, including Al/Ti alloys and austenitic/ferritic stainless steels. Both Al and Ti alloys require noble metal coatings, such as Au/Ni–P and CrN, to balance corrosion resistance and conductivity, leading to high costs and complex fabrication processes that hinder commercialization. Although the corrosion resistance of austenitic stainless steels can be enhanced through synergistic Cr/Mo alloying, the rapid thickening of the passivation layer leads to excessively high interfacial contact resistance during service. In contrast, ferritic stainless steels are prone to intergranular corrosion; however, this can be mitigated through ultralow carbon content and stabilization by Ti/Nb microalloying. Their application in bipolar plates remains constrained because of poor formability and corrosion current densities in the uncoated state that often exceed the target values set by the United States Department of Energy. Although surface coating technologies, such as CrN and conductive polymers, can improve corrosion resistance and conductivity, process complexity and coating durability remain major concerns. Furthermore, this paper introduces a novel alloying strategy for high-Cr ferritic stainless steels used as coating-free bipolar plates, which simultaneously achieves excellent ductility, high corrosion resistance, and high electrical conductivity under simulated PEMFC conditions. Finally, future development directions for PEMFC bipolar plate materials are discussed.

KEYWORDS proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), bipolar plate material, ferritic stainless steel, corrosion resistance–electrical conductivity synergy optimization

随着全球碳中和战略的推进，质子交换膜燃料电池(PEMFC)作为低温燃料电池的典型代表(结构示意图见图1)，凭借其显著的技术优势——高能量转换效率(> 60%)、低温运行特性(60~80 ℃)以及近零排放的环保特征，在交通动力系统(如燃料电池汽车)、便携式电源设备及分布式能源系统等领域实现规模化应用[1,2]。双极板作为燃料电池系统的关键组件，承担着多重核心作用：气体分配、电子传导以及反应物流场管理。双极板的耐腐蚀和导电特性直接决定了燃料电池的整体性能指标，包括能量转换效率、耐久寿命及制造成本等，因而双极板材料成为当前研究的重点方向，PEMFC双极板材料的优化研究具有重要的工程价值和商业意义。

鉴于双极板需同时满足多种相互制约的物理化学性能要求，研究人员多年来已探索了大量候选材料体系。为系统指导材料开发，美国能源部(DOE)于2020年制定了双极板材料的性能指标体系[3](详见表1)，该标准从腐蚀电流密度(i_{corr}) < 1 μA/cm²、界面接触电阻(ICR) < 10 mΩ·cm²和抗弯强度> 25 MPa等多个维度明确了材料服役性能的量化要求。这一指标体系的建立，为双极板材料的研发提供了明确的性能目标和评价基准。

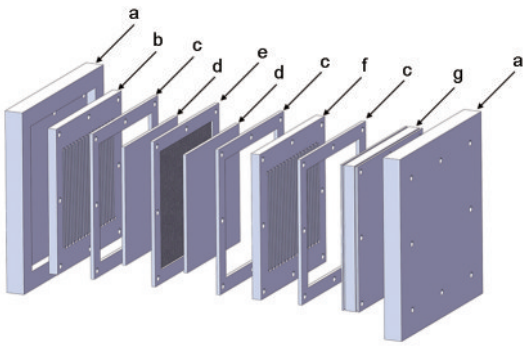


图1 质子交换膜燃料电池(PEMFC)电堆结构示意图

Fig.1 Schematic of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack structure (a: clamping plate, b: end plate, c: sealing gasket, d: gas diffusion layer, e: catalyst layer, f: bipolar plate, g: repeating unit assembly)

早期燃料电池堆采用石墨作为双极板材料。尽管石墨在燃料电池环境中具有优异的化学稳定性，但其流场需通过机械加工成型，且材料脆性大、成本高，难以满足大规模生产需求，为此，学界开展了大量研究以开发可替代石墨的双极板材料，这类材料需兼具PEMFC适用性及汽车应用适配性[2]。近年来，金属双极板由于其理想的特性(如高导电性、可

表1 2020年美国能源部设定的双极板性能指标

Table 1 Performance targets for bipolar plates established by the U.S. Department of Energy (DOE) in 2020

Property	Target value	Unit
Cost	< 3	$·kW^{-1}
Corrosion current density (i_{corr})	< 1	μA·cm^{-2}
Electrical conductivity	> 100	S·cm^{-1}
Flexural strength	> 25	MPa
Plate weight	< 0.4	kg·kW^{-1}
Interfacial contact resistance (ICR)	< 10	mΩ·cm^2
Durability with cycling	> 5000	h

成形性和可制造性、气密性和优越的力学性能)，引起广泛关注[4,5]。并且，金属板比石墨板具有更高的强度、韧性和抗冲击性，其独特的力学性能允许制造更薄的板。

尽管金属具有许多优点，但它们更容易受到腐蚀，这可能会对其性能和耐久性产生不利影响[4,6]。并且，腐蚀同时发生在运行中的PEMFC的阳极和阴极。在阳极，由于还原环境的存在，保护性金属氧化物层可能会被还原，从而导致不必要的氢化物形成和金属在水中的溶解，这可能会潜在地增加聚合物电解质膜污染的风险，并可能对催化剂层的活性产生不利影响。在阴极，其氧化环境会大大增加金属双极板的腐蚀速率，导致性能恶化，甚至导致整个燃料电池过早失效。为改善金属双极板的耐腐蚀性能，研究者们提出了表面改性技术，并开发了耐腐蚀涂层来最大限度地减少这些影响[7,8]。但是耐腐蚀涂层的开发使得金属双极板的制造工艺更加复杂且成本变高。

本文综述了目前金属双极板材料的研究进展，介绍了旨在提高其物理和化学性能的不同改性方法。同时，对比了不同金属材料作为双极板的优缺点，为进一步研发高性能、低成本金属双极板提供参考。

1 铝合金双极板

铝合金具有优异的导电性和导热性，且成本低、重量较轻，是制备金属双极板的理想材料。但是，由于Al的化学性质非常活泼，表面易生成较厚的Al_2O_3膜，从而导致表面钝化膜电阻过大[9]。因此，铝合金在PEMFC强腐蚀环境中的稳定性不足，必须通过表面改性处理才能满足双极板应用要求。表2[10~17]系统地总结了近几年铝合金双极板的基体和涂层材料，并给出了铝合金在镀涂层前后的腐蚀电流密度和界面接触电阻。如AA5083合金，涂层前基材的i_{corr}高达390 μA/cm^2，ICR为34 mΩ·cm^2；经CrN涂层改性后，i_{corr}降至57.42~79.12 μA/cm^2，ICR降至6.0 mΩ·cm^2 [10]。类似地，AA5052合金在沉积碳基复合涂层后性能显著提升，如C-TiN涂层使其i_{corr}降至0.4 μA/cm^2，ICR为4.08~6.39 mΩ·cm^2；C-CrN涂层则实现0.5 μA/cm^{2}的i_{corr}和4.08 mΩ·cm^{2}的ICR[11]。可见，铝合金表面镀涂层在很大程度上改善了其耐腐蚀和导电性能。

目前性能优异的铝合金涂层体系主要包括：(1)金属合金涂层：Ni-Mo-P涂层使AA5052合金的ICR低至0.023 mΩ·cm^2，i_{corr}维持在0~4.78 μA/cm^2 [12]；(2)贵金属涂层：Au/Ni-P涂层使AA5052合金的ICR低至4 mΩ·cm^2，i_{corr}维持在0~3.46 μA/cm^{2}范围[13]。相比之下，TiN、CrN等传统涂层虽有一定改善效果，但改性后的性能(如TiN涂层的ICR为20.8 mΩ·cm^2)仍无法满足双极板严苛的服役要求。此外，碳基复合涂层、金属合金涂层和贵金属涂层虽然使得铝合金双极板接近甚至达到DOE技术指标，但也进一步增加了双极板的制造成本。

表2 铝合金基体和涂层的电化学特征[10~17]

Table 2 Electrochemical characteristics of Al alloy substrates and coatings[10~17]

Substrate	Coating	Experimental temperature ℃	Electrolyte	i_{corr} μA·cm^{-2}	ICR mΩ·cm^2
AA5083[10]	−	70	0.5 mol·L^{-1} H_2SO_4 + 2 × 10^{-6} HF	390	34 (135 N·cm^{-2})
	CrN	70		57.42−79.12	6.0 (135 N·cm^{-2})
AA5052[11−15]	−	70	0.001 mol·L^{-1} H_2SO_4 + 2 × 10^{-6} HF	268.8	61.58 (140 N·cm^{-2})
	TiN	70	0.001 mol·L^{-1} H_2SO_4 + 0.1 × 10^{-6} HF	34.4	20.08
	CrN			36.8	7.76
	C−TiN			0.4	4.08−6.39
	C−CrN			0.5	4.08 (150 N·cm^{-2})
	Ni−Mo−P	25	0.5 mol·L^{-1} H_2SO_4 + 5 × 10^{-6} HF	0−4.78	0.023
	Au/Ni−P	25	0.5 mol·L^{-1} H_2SO_4 + 2 × 10^{-6} HF	0−3.46	4.0 (140 N·cm^{-2})
AA1060[16]	Graphene oxide	70	0.5 mol·L^{-1} H_2SO_4 + 2 × 10^{-6} HF	< 1	< 5
AA6016[17]	Polypropylene	70	1 mol·L^{-1} H_2SO_4 + 2 × 10^{-6} HF	0.33−0.36	21 (200 N·cm^{-2})

Note: The data in parentheses represents the corresponding compaction force, the same in Tables 3 and 6

2 钛合金双极板

Ti具有密度低、强度高、耐腐蚀性能及导电性优异等特点。但钛合金在高温或酸性条件下表面也会形成较厚的钝化膜，导致膜电极扩散层与双极板间的接触电阻增大，降低燃料电池的输出功率[18]。由于钛合金表面容易形成电导率低的钝化膜，钛合金不能直接作为双极板投入使用。与铝合金类似，钛合金可以通过在表面镀涂层的方法提高其耐腐蚀性能和电导率，以满足双极板的性能要求。如表3[18~21]所示，无涂层的Ti-6Al-4V合金在模拟电池环境下的i_{corr}为5.48~7.46 μA/cm^2，ICR为87 mΩ·cm^2[19]；通过在其表面镀覆一层Zr或ZrCN，其i_{corr}分别为0.97和0.336~15.7 μA/cm^2，ICR分别降至40 mΩ·cm^2[20]和11.2~11.71 mΩ·cm^2[21]。纯Ti在模拟电池环境下的i_{corr}和ICR分别为0.042 μA/cm^{2}和37 mΩ·cm^2[18]；在其表面镀TiN后，i_{corr}和ICR分别为0.0086 μA/cm^{2}和2.4 mΩ·cm^2[18]。由此可见，钛合金即使在镀层后仍然不能满足双极板的性能要求；纯Ti在镀涂层后可满足性能要求，但纯Ti的高成本限制了钛基双极板的商业化发展。

3 其他合金双极板

3.1 铜合金双极板

Cu及其合金具备优异的导电性、导热性且成本较低，被认为是具有潜力的双极板材料之一[22~25]。然而，Cu在酸性环境中耐腐蚀性能差且导电性下降[23]。因此，亟需为铜基双极板开发涂层材料。

Lee等[24]对Cu-5.3Cr基双极板进行了热氮化处理，以促进Cr元素最终转变为Cr_2N。结果表明，随着温度升高，Cr元素向表面偏聚并形成致密的Cr_2N相。经过该工艺处理的样品表现出优良的导电性能，并在阳极环境中具备良好的耐腐蚀性能；然而，在阴极条件下，涂层的保护效果不足，导致Cu基体发生Cu的氧化及O的还原，其i_{corr}为1480 μA/cm^2，耐腐蚀性能未能达到DOE标准，限制了其实际应用。

表3 钛合金基体和涂层的电化学特征[18~21]

Table 3 Electrochemical characteristics of Ti alloy substrates and coatings[18~21]

Substrate	Coating	i_{corr}	ICR
		μA·cm^{-2}	mΩ·cm^2
Ti-6Al-4V[19~21]	–	5.48–7.46	87 (140 N·cm^{-2})
	Zr	0.97	40 (140 N·cm^{-2})
	ZrCN	0.336–15.7	11.2–11.71 (140 N·cm^{-2})
Pure Ti[18]	–	0.042	37 (200 N·cm^{-2})
	TiN	0.0086	2.4 (200 N·cm^{-2})

Note: Testing conditions: 0.5 mol/L H_2SO_4 + 2 × 10^{-6} HF, 70 ℃ (simulated PEMFC cathode environment)

Pan等[25]采用电化学方法在Cu基板上成功构建了聚吡咯/聚苯胺复合涂层。该双层聚合物膜因具备特殊的离子选择性渗透结构，在酸性环境中同时展现出优异的导电性与腐蚀防护能力，其i_{corr}为1.62 μA/cm^2，140 N/cm^{2}条件下ICR约为3 mΩ·cm^2，显示出良好的应用前景。

3.2 镍合金双极板

Ni是一种具有磁性、高硬度、良好延展性和耐腐蚀性能的金属，常用于不锈钢及其他耐腐蚀合金的制备[26~28]。然而，由于Ni的成本显著高于Ti、Al等金属，其在双极板方面的研究相对有限。

Ghorbani等[29]采用阴极弧蒸发(CAV)技术在镍基合金表面沉积TiN涂层。当表面粗糙度(R_a)为230 nm、涂层厚度为1.5 μm时，i_{corr}和ICR分别达到0.17 μA/cm^{2}和8.47 mΩ·cm^2，满足DOE技术指标。

Ben Jadi等[30]通过恒电流法在糖精钠电解液中于Ni基体表面沉积聚吡咯涂层。X射线光电子能谱(XPS)和扫描电子显微镜(SEM)分析结果表明，该涂层结构连续且致密，与基体结合良好，开路电位正向位移了约150 mV，显著提升了镍基双极板在腐蚀环境中的稳定性，其性能提升主要归因于涂层的高附着性和均匀性。

目前对铜基和镍基双极板及其涂层材料的研究仍较为有限，关注重点更多集中于不锈钢、铝和钛等合金体系。

4 不锈钢双极板

铝合金和钛合金在PEMFC双极板应用中存在显著局限性。尽管有研究尝试通过表面改性(如钛合金镀贵金属涂层)改善铝/钛合金双极板导电性，但此类涂层及相关工艺通常成本高昂，这从根本上限制了这两类材料在双极板中的应用。相比之下，不锈钢材料在成本、导电性、成形性及耐腐蚀性能之间实现了较好的平衡，是目前最具实用价值的金属双极板基材。目前，用作双极板的不锈钢材料主要有奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢。

4.1 奥氏体不锈钢双极板

近年来，通过成分优化(如高Cr/Mo合金化、超低碳化、稳定化元素添加)和表面改性(导电涂层、钝化处理)，奥氏体不锈钢的耐腐蚀性能显著提升。例如，316L (Mo强化)和904L (高Ni/Cr/Mo)钢展现出

优于304系列钢的抗局部腐蚀能力[31,32]，而Ti/Nb稳定化型(如321、347钢)可抑制晶间腐蚀风险[33]。表4[34~36]列出了这些奥氏体不锈钢的化学成分要求。

研究[36~39]表明，过渡金属元素(如Cr、Mo、Ni等)可有效提升奥氏体不锈钢的耐腐蚀性能。Wang等[36]系统评估了349TM、904L、317L及316L不锈钢的耐腐蚀性能，证实高Cr含量(如349TM钢含20.2%Cr，质量分数，下同)可显著提升钝化膜稳定性和耐腐蚀性能，但表面形成的富Cr_2O_3钝化膜因厚度增加可导致界面接触电阻急剧升高。该研究揭示了Cr元素合金化的双重效应：一方面通过促进致密氧化层的形成抑制基体腐蚀，另一方面因钝化膜增厚引发导电性能劣化，凸显了双极板材料耐腐蚀性能与导电性能之间的固有矛盾。

Kumagai等[40]对310S、304及316L不锈钢的耐腐蚀性能进行了对比研究。实验结果表明，在电流密度为0.5 A/cm^{2}的苛刻条件下，仅310S不锈钢未出现明显腐蚀现象。研究者将此归因于其过高的Cr含量(22%)。随着研究的深入，更多学者发现不锈钢中其他合金元素同样会影响钝化膜的形成特性。Zhang等[38]研究表明，Mo元素会显著改变不锈钢的耐蚀行为，其作用机制与Cr元素具有协同效应。Davies等[34]通过系统实验证实，Ni元素的存在会调控不锈钢的腐蚀电化学特性，钝化膜外层区域存在的Ni元素会与O结合形成Ni的氧化物，该氧化物与Cr/Fe氧化物复合后可协同提升钝化膜的导电性能。同时指出材料表面电阻与钝化膜厚度呈显著正相关，这一发现为理解合金元素-钝化膜-导电性能的关系提供了重要依据。

虽然在奥氏体不锈钢中通过加入合金元素可以提高钝化膜的导电性能，见表5[36,41]总结的不同奥氏体不锈钢在无涂层下的i_{corr}和ICR (其中，i_{corr}在0.5~20 μA/cm^{2}范围，ICR在70~180 mΩ·cm^{2}区间)，但现有无涂层的奥氏体不锈钢材料均难以同时满足DOE对导电性能和耐腐蚀性能的双重指标要求。

4.2 不锈钢涂层

奥氏体和铁素体不锈钢通过合金化(如添加Cr、Mo等元素)可以改善钝化膜的导电性能，但其提升幅度难以满足DOE技术指标。因此，直接采用未经处理的传统不锈钢作为PEMFC双极板存在很大技术风险，使得研究者们将目光转移到了不锈钢表面涂层技术上。

目前，传统不锈钢双极板领域主要采用SS304、SS316和SS446三种不锈钢作为基体材料，表6[42~55]总结了这三种不锈钢双极板的基体和涂层材料，并给出了在镀涂层前后的i_{corr}和ICR。可以看出，无涂层传统不锈钢在模拟电池环境中的初始性能表现欠佳，其i_{corr}和ICR均未达到DOE技术指标。为改善这一状况，研究者开发了多种表面改性技术：当SS304不锈钢采用NbC涂层时，可使i_{corr}大幅降低至0.051~0.058 μA/cm^2，ICR显著下降至

表5 不同奥氏体不锈钢无涂层时的腐蚀电流密度(i_{corr})和界面接触电阻(ICR)[36,41]

Table 5 i_{corr} and ICR of uncoated austenitic stainless steels[36,41]

Material	i_{corr} μA·cm^{-2}	ICR mΩ·cm^2
SS310[41]	0.8 (+0.6 V, air)	80
SS316[36]	15 (+0.6 V, Air), 50 (−0.1 V, H_2)	150
SS317L[36]	17 (+0.6 V, Air), 21 (−0.1 V, H_2)	148
SS904L[36]	9.5 (+0.6 V, Air), 9.4 (−0.1 V, H_2)	134
SS349[36]	10 (+0.6 V, Air), 15 (−0.1 V, H_2)	100

表4 奥氏体不锈钢的化学成分[34~36]

Table 4 Chemical compositions of austenitic stainless steels[34~36]

(mass fraction / %)

Grade	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Others	Fe
SS304L	18−20	10.5−14.5	2.0	1.0	−	C < 0.03, P < 0.003, S < 0.0045	Bal.
SS316	16.5−18.5	10−13	2.0	1.0	2.0−3.0	C < 0.08, P < 0.003, S < 0.0045	Bal.
SS316L	16−18	10−14	2.0	1.0	1.2−2.75	C < 0.03, P < 0.003, S < 0.0045	Bal.
SS317	18−20	11−15	2.0	1.0	4−5	C < 0.08, P < 0.003, S < 0.0045	Bal.
SS310S	24−26	19−22	2.0	1.2	−	C < 0.08, N < 0.1−0.16, P < 0.003, S < 0.0045	Bal.
SS904L	19−23	23−28	2.0	1.0	4−5	C < 0.02, P < 0.03, S < 0.02, Cu = 1.0−2.0	Bal.
SS349™	20−24	13−15	1.5	1.4	−	C < 0.05	Bal.
SS347	17−20	9−13	2.0	1.0	−	C < 0.08, P < 0.003, S < 0.0045, Ti = 10.0 (< Cr + Ni)	Bal.

表6 不锈钢基体和涂层的电化学特征[42~55]

Table 6 Electrochemical characteristics of stainless steel substrates and coatings[42~55]

Substrate	Coating	i_{corr} / (μA·cm^{-2})	ICR / (mΩ·cm^2)
SS304[42,43,49,50]	–	2.6	140 (140 N·cm^{-2})
	Polypyrrole polyaniline	0.1−1.0	0.08−1.00
	Nb−C	0.051−0.058	8.47 (140 N·cm^{-2})
SS316[44,45,47,48,51~54]	–	5.7	123 (150 N·cm^{-2})
	Tr−(Ti, Cr)N−CrN	0.12	4.9 (150 N·cm^{-2})
	Zr−C/a-C (amorphous carbon)	0.49	3.63 (140 N·cm^{-2})
	CrN + Cr_2N	0.136−0.145	7.0 (150 N·cm^{-2})
	TaN_x	1−10	42−82
	PbO_2	8.0	–
	Chromium-containing carbon	0.00316−0.316	2.8 (120 N·cm^{-2})
SS446[46,55]	–	10−15	190 (140 N·cm^{-2})
	N_2	0.1−1.0	6.0 (140 N·cm^{-2})

8.47 mΩ·cm^2[42,43]；选用聚吡咯、聚苯胺等导电高分子涂层时[43]，性能可进一步提升至0.1~1.0 μA/cm^{2}和0.08~1.0 mΩ·cm^2，展现出优异的综合性能。相较于SS304不锈钢，S316不锈钢的ICR略低(123 mΩ·cm^2)，但i_{corr}较高(5.7 μA/cm^2)[44]。通过CrN + Cr_2N复合涂层表面改性技术实现0.136~0.145 μA/cm^{2}的腐蚀电流密度和7.0 mΩ·cm^{2}的界面接触电阻[45]。通过在碳膜中掺杂Cr元素形成的涂层材料展现出卓越的综合性能，其i_{corr}范围(0.00316~0.316 μA/cm^2)和ICR (2.8 mΩ·cm^2)完全满足双极板的严苛要求[46]。此外，Ti-(Ti, Cr)N-CrN、Zr-C/a-C等涂层体系也表现出良好的应用潜力。而TaN_x、PbO_2等涂层材料由于与基体结合性欠佳，其性能参数(如TaN_x的ICR达42~82 mΩ·cm^2)未能达到使用标准[47]。对于SS446铁素体不锈钢，其较高的初始腐蚀电流密度(10~15 μA/cm^2)和ICR (190 mΩ·cm^2)限制了应用[48]。但通过表面渗氮处理可将i_{corr}和ICR分别提升至0.1~1.0 μA/cm^{2}和6.0 mΩ·cm^2。

总体而言，奥氏体和铁素体不锈钢材料在强酸性工作环境中面临腐蚀与导电的双重挑战，通过表面涂层改性技术可显著提升其综合性能，但其工艺复杂度与耐腐蚀性能-导电性能的权衡关系仍需进一步优化，以实现低成本、高性能双极板的规模化制备。

4.3 铁素体不锈钢双极板

奥氏体不锈钢因Ni含量较高从而成本高，同时还需要昂贵的镀层，为此研究者提出了用铁素体不锈钢作为替代材料。从合金成分角度而言，铁素体不锈钢以低Ni或无Ni为特征，显著降低了材料成本(奥氏体不锈钢通常含Ni 8%~12%)，同时铁素体不锈钢通过高Cr (Cr ≥ 16%)与Mo (0.9%~3.5%)的协同作用，在Cl^-环境中形成富Cr-Mo的稳定钝化膜，其点蚀电位高于奥氏体不锈钢[56~58]，但铁素体不锈钢成形性能相对较差，其延伸率在20%~25%[59]。目前针对双极板应用研究的典型铁素体不锈钢包括SS430、SS434、SS436、SS441、SS444及SS446等牌号，其化学成分要求详见表7[58~62]。

Cr作为铁素体不锈钢钝化膜形成的核心元素，其含量显著影响材料的耐腐蚀性能。研究[63]表明，当Cr含量超过26%时，临界点蚀温度(CPT)提升> 20 ℃。Wang和Turner[58]对比分析SS434~SS446系列铁素体不锈钢时发现，随Cr含量由SS434不锈钢的16.3%逐步增加至SS446不锈钢的28.4%，材料在阳极/阴极环境下的耐腐蚀性能排序分别为SS446 > SS444 > SS436 > SS434 > SS441 (图2a[58])和SS446 > SS444 > SS436 > SS441 > SS434 (图2b[58])，极化行为与奥氏体不锈钢(Ni/Mo主导钝化膜特性)迥异，证实Cr在铁素体不锈钢中通过调控钝化膜致密性和连续性起决定性作用。

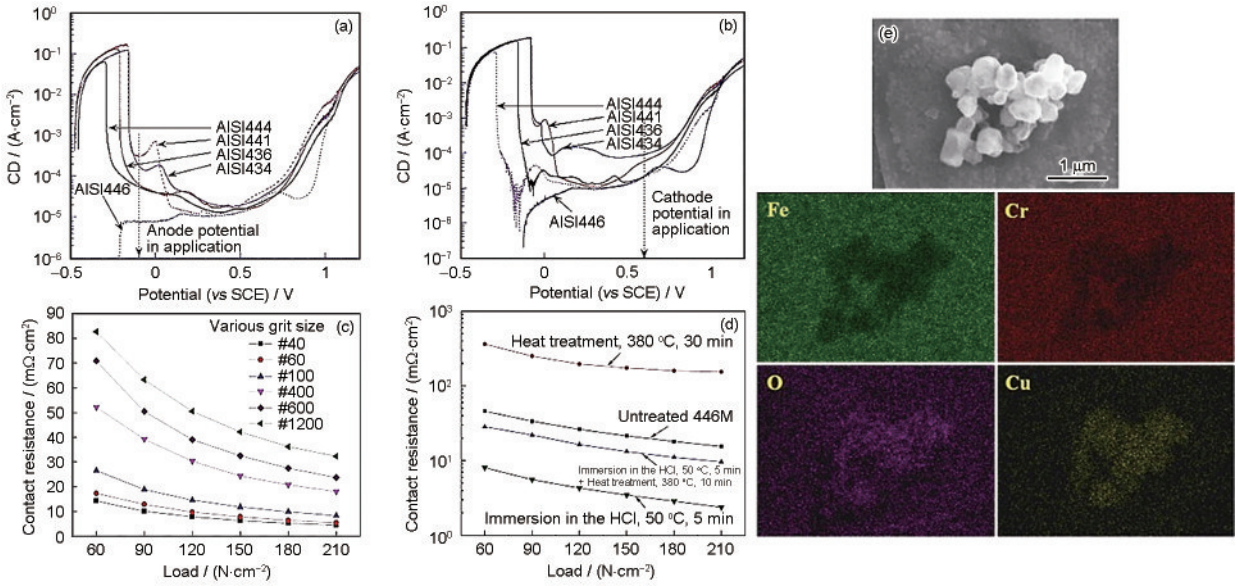
其次，Mo的添加显著改善了材料在含Cl^-环境中的局部腐蚀抗力。对比SS430 (无Mo)与SS444 (1.76%Mo)不锈钢，后者在0.1 mol/L NaCl溶液中的点蚀电位可提高300~400 mV，其机理在于Mo^{6+}以MoO_4^{2-}形式富集于钝化膜缺陷处，通过空间位阻效应抑制Cl^-渗透[64]。而稳定化元素(Ti、Nb)和超低碳设计共同解决了晶间腐蚀问题。SS436 (Ti = 0.2%，

表 7 铁素体不锈钢的化学成分[58~62]

Table 7 Chemical compositions of ferritic stainless steels[58~62]

(mass fraction / %)

Grade	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Others	Fe
SS430	16−18	0.75	1.00	1.00	−	C < 0.12	Bal.
SS434	17.946	−	0.289	0.285	0.938	C < 0.12	Bal.
SS436	18.101	−	0.505	0.370	1.037	Nb = 0.3, Ti = 0.2	Bal.
SS441	18.230	−	0.519	0.506	0.033	Nb = 0.69, Ti = 0.27	Bal.
SS444	18.485	−	0.186	0.382	1.763	Ti + Nb ⩽ 0.80	Bal
SS446	28.367	2.958	0.434	0.424	3.502	Ti + Nb ⩽ 0.75	Bal.
SS446M	26.63	0.183	< 1.50	< 1.00	2.04	Ti < 0.06, Cu < 0.50, C < 0.004, P < 0.005, S < 0.005	Bal.
Fe20Cr4V	20.29	−	0.08	0.06	−	C < 0.05, S < 0.001, V = 3.91	Bal.
POS470FC	25−32	0.5	0.2	0.4	−	C < 0.02, P < 0.04, S < 0.03, Cu = 2.0	Bal.



Color online

图 2 不同铁素体不锈钢的阳极和阴极极化行为[58]，不同表面粗糙度 446M 不锈钢的界面接触电阻[60]，及 446M 不锈钢经不同表面处理后测得的界面接触电阻和钢表面 Cu 析出的 EDS 分析[68]

Fig.2 Anodic (a) and cathodic (b) polarization behaviors of different ferritic stainless steels[58]; interfacial contact resistance of 446M stainless steel with varying surface roughness (c)[60]; interfacial contact resistance of 446M stainless steel after different surface treatments (d)[68] and EDS analysis of Cu precipitation on the surface of 446M stainless steel (e)[68] (CD—current density, SCE—saturated calomel electrode)

Nb = 0.3%)不锈钢通过形成稳定的 TiC 和 NbC，将晶界 Cr 贫化区宽度控制在 5 nm 以下[65]。需要特别指出的是，Fe20Cr4V 中 3.91%V 的添加开辟了新的优化路径。V^{5+}在钝化膜中以 V_2O_5 形式存在，其半导体特性降低了膜电阻，同时维持了良好的保护性[66,67]。这种成分创新的铁素体不锈钢作为双极板为平衡耐腐蚀性能-导电性能提供了新思路。

Kim 等[60]通过系统研究揭示了双极板表面特性对界面接触电阻的调控机制，SS446M 不锈钢表面粗糙度的增加可显著降低界面接触电阻(图 2c[60])，这归因于粗糙试样的微凸体穿透气体扩散层氧化膜形成更多导电通道。进一步研究[68]发现，HCl 处理诱导表面 Cu 析出(图 2e[68])并提高粗糙度，协同优化导电性能，使界面接触电阻降至最低水平(图 2d[68])。但化学处理可能加剧局部腐蚀敏感性，而热处理虽可提升耐腐蚀性能却无法改善导电性能。这种“耐腐蚀性能-导电性能”的互斥关系，本质上源于传统合金设计难以协调钝化膜的防护功能和导电功能。

表 8[58,59,62,69,70]总结了无涂层铁素体不锈钢材料的腐蚀电流密度、界面接触电阻及延伸率。其中，i_{corr}

在 15~500 μA/cm² 范围，ICR 在 90~400 mΩ·cm² 范围，延伸率在 20%~22%。所以尽管铁素体不锈钢在双极板应用中展现出显著的成本优势和良好的耐腐蚀性能，但其综合性能仍难以满足 DOE 技术指标。

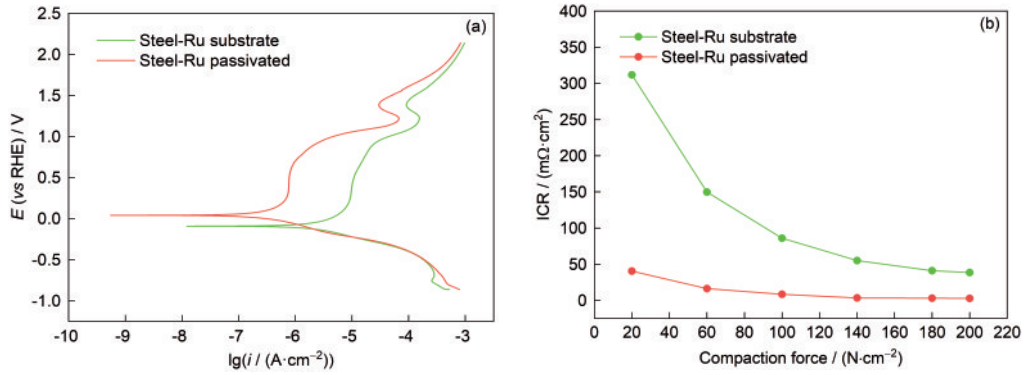
奥氏体和铁素体不锈钢均面临耐腐蚀性能-导电性能协同优化难题，需依赖复杂表面涂层工艺弥补性能缺陷。其中，奥氏体不锈钢因高 Ni 合金化设计导致成本激增，并且钝化膜增厚导致界面接触电阻超标；传统铁素体不锈钢虽通过低 Ni/无 Ni 成分降低了成本，却因合金设计局限存在相对较低的延展性。本文作者团队提出了基于高 Cr 铁素体不锈钢的新型 Ru 合金化体系(Steel-Ru)。在成分设计方面，该材料采用(28%~35%)Cr 和(2%~4%)Mo 的优化配比，相较于 Fe20Cr4V (20%Cr，无 Mo)和 POS470FC (30%Cr，无 Mo)钢，通过超高 Cr 含量确保了 Cr_2O_3 钝化膜的连续性，并借助 Mo 元素显著抑制了局部腐蚀倾向。同时，通过 Ti/Nb 微合金化和精确控制间隙原子含量($C + N < 150 \times 10^{-6}$)，有效抑制了 $Cr_{23}C_6$ 析出导致的晶界贫 Cr 现象，消除了晶间腐蚀敏感性。进一步通过 Ru 的合金化，并协同表面改性技术，促进钝化膜中形成 Ru 的导电相，从而降低界面接触电阻。在模拟 PEMFC 环境中(pH = 2~3)将 i_{corr} 控制在 0.5~1.0 μA/cm² 范围内。通过对含甘油磷酸电解液的脉冲电流控制的新型电化学抛光技术，降低了表面粗糙度，避免了传统机械抛光引入的残余应力。初步测试结果表明，该含 Ru 铁素体不锈钢综合性能优异，其延伸率高达 30.3%，i_{corr} 仅为 0.66 μA/cm²，在 140 N/cm² 压紧力下 ICR 低至 3.4 mΩ·cm² (相关电化学性能见图 3，低于 10 mΩ·cm²，满足 DOE 技术指标要求)，且摒弃了贵金属涂层工艺，所形成的相关技术已经申请国家知识产权[71]。

无涂层传统不锈钢与本文作者团队开发的含 Ru 铁素体不锈钢的拉伸性能及不锈钢作为双极板材料在模拟 PEMFC 环境中的 i_{corr} (耐腐蚀性能)和 ICR (导电性能)的对比[3,36,41,44,45,48,55,56]见图 4。可见，传统不锈钢双极板难以协同优化腐蚀电流密度与界面接触电阻这一相互制约的性能指标，需借助复杂的涂层工艺方才能使两者性能同时达到 DOE 标准，本团队开发的含 Ru 铁素体不锈钢在未涂覆状态下其

表 8 无涂层铁素体不锈钢的 i_{corr}、ICR 和延伸率[58,59,62,69,70]

Table 8 i_{corr}, ICR, and elongations of uncoated ferritic stainless steels[58,59,62,69,70]

Material	i_{corr} / (μA·cm^{-2})	ICR / (mΩ·cm^2)	Total elongation / %
SS430[59,69]	15.8 (+0.6 V, Air)	199.96	22
SS434[58,59]	90 (+0.6 V, air), 180 (−0.1 V, H_2)	145	22
SS436[58,59]	20 (+0.6 V, air), 63 (−0.1 V, H_2)	110	22
SS444[59,70]	20 (+0.6 V, air), 90 (−0.1 V, H_2)	90	20
SS446[59,70]	20 (+0.6 V, air), 7 (−0.1 V, H_2)	170	20
Fe−20Cr−4V[62]	500 (+0.84 V, air), 20 (+0.14 V, H_2)	400	–



Color online

图 3 新开发的含 Ru 铁素体不锈钢在模拟 PEMFC 酸性介质中的耐腐蚀性能(动电位极化曲线)，及压紧力对含 Ru 铁素体不锈钢界面接触电阻的影响

Fig.3 Corrosion resistances in a simulated PEMFC acidic medium (potentiodynamic polarization curves) (a) and effects of compaction force on the interface contact resistance (b) of our newly developed Ru-containing ferritic stainless steel (Steel-Ru) (RHE—reversible hydrogen electrode, *i*—current density, *E*—potential)

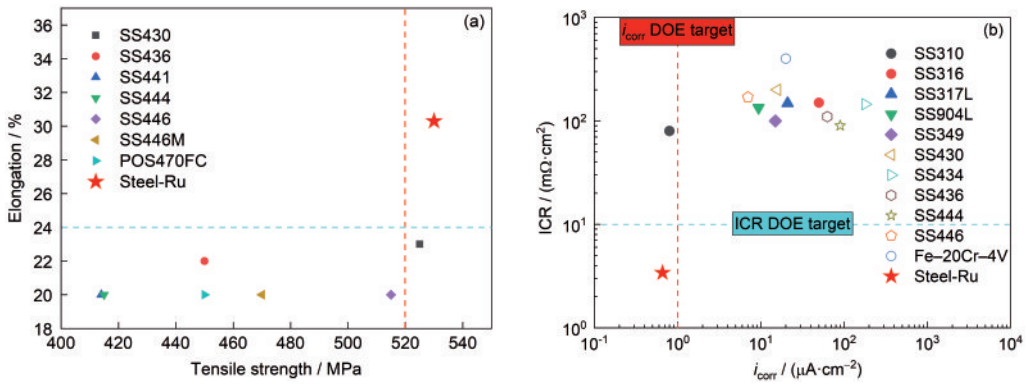


图 4 传统铁素体不锈钢及作者团队研发的新型含 Ru 铁素体不锈钢的拉伸性能，及不锈钢作为双极板材料的 ICR-i_{corr} 对比

Fig.4 Comparisons of tensile properties (a) and the service performance including ICR and i_{corr} (b) between our newly developed Steel-Ru for bipolar plates and the existing commercial ferritic stainless steels, the latter were measured in the uncoated state

i_{corr} 和 ICR 均已满足 DOE 要求，体现出显著的材料性能优势和应用潜力。

5 总结和展望

PEMFC 双极板作为多物理场耦合作用下的关键功能组件，其材料体系的开发需在耐腐蚀性、导电性、成形性与经济性等多目标约束下实现协同优化。本文系统梳理了金属双极板材料的研发现状和技术瓶颈，总结了不同材料体系的本征性能与改性技术路径的内在矛盾。结果表明，传统铝合金和钛合金双极板受限于表面钝化膜的高电阻特性，需依赖贵金属涂层或复合镀层实现性能提升，但由此引发的成本激增及工艺复杂度显著制约了其商业化进程；奥氏体不锈钢虽通过 Cr/Mo 协同合金化和表面钝化膜调控改善了耐腐蚀性能，但其钝化膜增厚导致界面接触电阻难以满足 DOE 指标；传统铁素体不锈钢通过超低碳、Ti/Nb 稳定化抑制晶间腐蚀，但无涂层材料的腐蚀电流密度仍高于 DOE 标准，并且其成形性较差，尤其是 POS470FC 钢虽然通过高 Cr 合金化提升了耐腐蚀性能，但其伸长率仅能达到 20%，这一数值显著低于双极板冲压成形工艺所需的临界塑性阈值。

针对上述挑战，近年来开发双极板用新型铁素体不锈钢的研究日益活跃。作者团队近期的研究也证实，通过超高 Cr 含量((28%~35%)Cr)与 Mo、Ru 等新型合金化策略，可形成连续稳定的富 Cr-Mo-Ru 钝化膜，并结合 Ti/Nb 微合金化与超低碳氮控制($C + N < 150 \times 10^{-6}$)消除晶间腐蚀敏感性，可以开发出耐腐蚀性、导电性和成形性均满足要求的新型铁素体不锈钢。

PEMFC 金属双极板材料的未来发展将向低成本、长寿命及极薄化方向继续推进，其中摆脱昂贵、复杂的表面涂层依赖，开发兼具本征耐腐蚀性能与优异导电性能的新型合金材料，是突破燃料电池商业化瓶颈的关键路径。基于这一发展趋势，未来研究重点应聚焦于以下三个方面。

首先，金属双极板应摆脱对复杂涂层技术的过度依赖，开发具有“自钝化-导电”双重特性的新型基体材料是降低双极板成本的根本路径。未来的合金设计需突破传统不锈钢的思维定式，通过多元素协同微合金化调控钝化膜的电子能带结构。例如，在超高 Cr 含量确保钝化膜耐腐蚀性能的基础上，探索引入 Mo、Ru、Sn 等元素修饰钝化膜半导体特性。作者团队近期提出的含 Ru 铁素体不锈钢即证实了通过微合金化在钝化膜中构建导电通道的可行性。未来研究应进一步解析不同合金元素在钝化膜中的微观存在形式及其协同机理，探索保证优异耐腐蚀性能和导电性能所需的临界合金含量，以低成本实现材料本征性能的突破。

其次，随着电堆功率密度的提升，双极板向极薄化(< 0.1 mm)演进，这对材料的成形能力提出了严峻挑战。针对铁素体不锈钢本征延展性较差的问题，未来的研究需将材料开发与成形工艺紧密结合：一方面通过冶金手段(如晶粒细化、织构控制、间隙原子调控)提升材料的极限塑性，将延伸率提升至 30% 以上；另一方面，需发展针对极薄板材的精密冲压成形和回弹控制技术，解决微流道成形过程中的减薄和破裂难题。

最后，目前大多数研究仍停留在静态模拟环境测试阶段，难以反映材料在真实服役条件下的性能演变。未来的评价体系需从静态半电池测试向动态单电池及电堆测试转变，全面评估材料在变载、启停、冷启动及震动等真实复杂工况下的服役稳定性。

特别是对于新型免涂层材料，需结合原位表征技术，深入研究长时运行过程中的离子溶出行为，为材料的工程化应用提供可靠依据。

参 考 文 献

[1] Du Z Z, Wang J, Wang J, et al. Research progress of key materials in proton exchange membrane fuel cell [J]. J. Mater. Eng., 2022, 50(12): 35
(杜真真, 王 珺, 王 晶等. 质子交换膜燃料电池关键材料的研究进展 [J]. 材料工程, 2022, 50(12): 35)

[2] Hermann A, Chaudhuri T, Spagnol P. Bipolar plates for PEM fuel cells: A review [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2005, 30: 1297

[3] U.S. Department of Energy. Targets for bipolar plates [R]. DOE/GO-102020-5486, 2020

[4] Hung Y, Tawfik H, Mahajan D. Durability and characterization studies of polymer electrolyte membrane fuel cell's coated aluminum bipolar plates and membrane electrode assembly [J]. J. Power Sources, 2009, 186: 123

[5] André J, Antoni L, Petit J P. Corrosion resistance of stainless steel bipolar plates in a PEFC environment: A comprehensive study [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2010, 35: 3684

[6] Wilkinson D P, Zhang J J, Hui R, et al. Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Materials Properties and Performance [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 1

[7] Wang H, Turner J A. Reviewing metallic PEMFC bipolar plates [J]. Fuel Cells, 2010, 10: 510

[8] Hamilton P J, Pollet B G. Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) flow field plate: Design, materials and characterisation [J]. Fuel Cells, 2010, 10: 489

[9] Lee D, Lim J W, Lee D G. Cathode/anode integrated composite bipolar plate for high-temperature PEMFC [J]. Compos. Struct., 2017, 167: 144

[10] Barranco J, Barreras F, Lozano A, et al. Influence of CrN-coating thickness on the corrosion resistance behaviour of aluminium-based bipolar plates [J]. J. Power Sources, 2011, 196: 4283

[11] Fetohi A E, Hameed R M A, El-Khatib K M, et al. Study of different aluminum alloy substrates coated with Ni–Co–P as metallic bipolar plates for PEM fuel cell applications [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2012, 37: 10807

[12] Mawdsley J R, Carter J D, Wang X P, et al. Composite-coated aluminum bipolar plates for PEM fuel cells [J]. J. Power Sources, 2013, 231: 106

[13] Tsai S Y, Lin C H, Jian Y J, et al. The fabrication and characteristics of electroless nickel and immersion Au-polytetrafluoroethylene composite coating on aluminum alloy 5052 as bipolar plate [J]. Surf. Coat. Technol., 2017, 313: 151

[14] Hou K H, Lin C H, Ger M D, et al. Analysis of the corrosion behavior of Al alloy bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) under operating thermal conditions [J]. Int. J. Green Energy, 2012, 9: 71

[15] Tsai S Y, Bai C Y, Lin C H, et al. The characteristics and performance of electroless nickel and immersion Au plated aluminum alloy bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. J. Power Sources, 2012, 214: 51

[16] Aukland N, Boudina A, Eddy D S, et al. Alloys that form conductive and passivating oxides for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates [J]. J. Mater. Res., 2004, 19: 1723

[17] Dincer I. Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2002, 27: 265

[18] Zhang D M, Duan L T, Guo L, et al. TiN-coated titanium as the bipolar plate for PEMFC by multi-arc ion plating [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2011, 36: 9155

[19] Qian Y, Xu J. Properties of ZrC nanocrystalline coating on Ti alloy bipolar plates in simulated PEMFC environments [J]. Rare Met. Mater. Eng., 2017, 46: 1033
(钱 阳, 徐 江. 模拟PEMFC环境下纳米晶ZrC涂层钛合金双及板的性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46: 1033)

[20] Qian Y, Xu J. Properties of Zr nanocrystalline coating on Ti alloy bipolar plates in simulated PEMFC environments [J]. Acta Phys.-Chim. Sin., 2015, 31: 291

[21] Xu J, Huang H J, Li Z Y, et al. Corrosion behavior of a ZrCN coated Ti alloy with potential application as a bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell [J]. J. Alloys Compd., 2016, 663: 718

[22] Hsieh S S, Huang C F, Feng C L. A novel design and microfabrication for copper (Cu) electroforming bipolar plates [J]. Micron, 2008, 39: 263

[23] Tran T Q, Lee J K Y, Chinnappan A, et al. High-performance carbon fiber/gold/copper composite wires for lightweight electrical cables [J]. J. Mater. Sci. Technol., 2020, 42: 46

[24] Lee H Y, Lee S H, Kim J H, et al. Thermally nitrided Cu–5.3Cr alloy for application as metallic separators in PEMFCs [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2008, 33: 4171

[25] Pan T J, Zuo X W, Wang T, et al. Electrodeposited conductive polypyrrole/polyaniline composite film for the corrosion protection of copper bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells [J]. J. Power Sources, 2016, 302: 180

[26] Ashok Kumar P, Vasanth Kumar D, Davis Hans S J, et al. Investigation of stainless steel 316 coated with nickel [J]. Mater. Today Proc., 2022, 62: 2376

[27] Mohanty S, Kumar Senapati A. Study on wear behavior of low nickel austenitic stainless steel by using ball on disc [J]. Mater. Today Proc., 2022, 66: 1961

[28] Song S, Yu L, Xiao X, et al. Outstanding oxygen evolution reaction performance of nickel iron selenide/stainless steel mat for water electrolysis [J]. Mater. Today Phys., 2020, 13: 100216

[29] Ghorbani M M, Taherian R, Bozorg M. Investigation on physical and electrochemical properties of TiN-coated Monel alloy used for bipolar plates of proton exchange membrane fuel cell [J]. Mater. Chem. Phys., 2019, 238: 121916

[30] Ben Jadi S, El Jaouhari A, Aouzal Z, et al. Electropolymerization and corrosion resistance of polypyrrole on nickel bipolar plate for PEM fuel cell application [J]. Mater. Today Proc., 2020, 22: 52

[31] Sun Y T, Tan X, Lei L L, et al. Revisiting the effect of molybdenum on pitting resistance of stainless steels [J]. Tungsten, 2021,

3: 329

[32] Malik A U, Siddiqi N A, Ahmad S, et al. The effect of dominant alloy additions on the corrosion behavior of some conventional and high alloy stainless steels in seawater [J]. Corros. Sci., 1995, 37: 1521

[33] Kim J K, Kim Y H, Lee B H, et al. New findings on intergranular corrosion mechanism of stabilized stainless steels [J]. Electrochim. Acta, 2011, 56: 1701

[34] Davies D P, Adcock P L, Turpin M, et al. Stainless steel as a bipolar plate material for solid polymer fuel cells [J]. J. Power Sources, 2000, 86: 237

[35] Davies D P, Adcock P L, Turpin M, et al. Bipolar plate materials for solid polymer fuel cells [J]. J. Appl. Electrochem., 2000, 30: 101

[36] Wang H L, Sweikart M A, Turner J A. Stainless steel as bipolar plate material for polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. J. Power Sources, 2003, 115: 243

[37] Chanda U K, Behera A, Roy S, et al. Evaluation of Ni−Cr−P coatings electrodeposited on low carbon steel bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2018, 43: 23430

[38] Zhang M, Kim K H, Shao Z G, et al. Effects of Mo content on microstructure and corrosion resistance of arc ion plated Ti−Mo−N films on 316L stainless steel as bipolar plates for polymer exchange membrane fuel cells [J]. J. Power Sources, 2014, 253: 201

[39] Peng S, Xu J, Xie Z H, et al. Titanium bipolar plates augmented by nanocrystalline TiZrHfMoW coatings for application in proton exchange membrane fuel cells [J]. Appl. Surf. Sci., 2022, 591: 153200

[40] Kumagai M, Myung S T, Katada Y, et al. Stability of type 310S stainless steel bipolar plates tested at various current densities in proton exchange membrane fuel cells [J]. Electrochim. Acta, 2016, 211: 754

[41] Myung S T, Kumagai M, Asaishi R, et al. Nanoparticle TiN-coated type 310S stainless steel as bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. Electrochem. Commun., 2008, 10: 480

[42] Wang Z Y, Feng K, Li Z G, et al. Self-passivating carbon film as bipolar plate protective coating in polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2016, 41: 5783

[43] Joseph S, McClure J C, Chianelli R, et al. Conducting polymer-coated stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2005, 30: 1339

[44] Lee S H, Kakati N, Maiti J, et al. Corrosion and electrical properties of CrN- and TiN-coated 316L stainless steel used as bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Thin Solid Films, 2013, 529: 374

[45] Mani S P, Rajendran N. Corrosion and interfacial contact resistance behavior of electrochemically nitrided 316L SS bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells [J]. Energy, 2017, 133: 1050

[46] Fu Y, Lin G, Hou M, et al. Optimized Cr-nitride film on 316L stainless steel as proton exchange membrane fuel cell bipolar plate [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2009, 34: 453

[47] Mendizabal L, Oedegaard A, Kongstein O E, et al. TaN_x coatings deposited by HPPMS on SS316L bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: Correlation between corrosion current, contact resistance and barrier oxide film formation [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2017, 42: 3259

[48] Turner J A, Wang H L, Brady M P. Corrosion protection of metallic bipolar plates for fuel cells [R]. Golden: National Renewable Energy Lab. (NREL), 2005

[49] Zhang D M, Duan L T, Guo L, et al. Corrosion behavior of TiN-coated stainless steel as bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2010, 35: 3721

[50] Wang L X, Sun J C, Kang B, et al. Electrochemical behaviour and surface conductivity of niobium carbide-modified austenitic stainless steel bipolar plate [J]. J. Power Sources, 2014, 246: 775

[51] Wang S L, Hou M, Zhao Q, et al. Ti/(Ti, Cr)N/CrN multilayer coated 316L stainless steel by arc ion plating as bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells [J]. J. Energy Chem., 2017, 26: 168

[52] Bi F F, Peng L F, Yi P Y, et al. Multilayered Zr−C/a-C film on stainless steel 316L as bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells [J]. J. Power Sources, 2016, 314: 58

[53] Allahkaram S R, Mohammadi N. Corrosion behavior of two candidate PEMFC's bipolar plate materials [J]. Anti-Corros. Methods Mater., 2017, 64: 293

[54] Wu B, Lin G Q, Fu Y, et al. Chromium-containing carbon film on stainless steel as bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2010, 35: 13255

[55] Fu Y, Lin G, Hou M, et al. Carbon-based films coated 316L stainless steel as bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2009, 34: 405

[56] Ujiro T, Yoshioka K, Staehle R W. Differences in corrosion behavior of ferritic and austenitic stainless steels [J]. Corrosion, 1994, 50: 953

[57] Jun S, Hong Y B, Xin L, et al. The effect of copper and molybdenum on pitting corrosion and stress corrosion cracking behavior of ultra-pure ferritic stainless steels [J]. Corros. Sci., 2012, 57: 89

[58] Wang H L, Turner J A. Ferritic stainless steels as bipolar plate material for polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. J. Power Sources, 2004, 128: 193

[59] ASTM. ASTM A240/A240M-08 Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications [S]. West Conshohocken: ASTM, 2008

[60] Kim K M, Kim S N, Kim J H, et al. Study on surface topography of 446M stainless steel as a bipolar plate on interfacial contact resistance of polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. J. Power Sources, 2012, 220: 42

[61] Kim J, Jo K, Kim Y, et al. Stainless steel for polymer fuel cell separator and method for preparing same [P]. U.S. Pat, 20110294042, 2011

[62] Brady M P, Abd Elhamid M, Dadheech G, et al. Manufacturing and performance assessment of stamped, laser welded, and nitrid-

ed FeCrV stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2013, 38: 4734

[63] Moretti G, Quartarone G, Tassan A, et al. Pitting corrosion behavior of superferritic stainless steel in waters containing chloride [J]. Mater. Corros., 1993, 44: 24

[64] Clayton C R, Lu Y C. A bipolar model of the passivity of stainless steel: The role of Mo addition [J]. J. Electrochem. Soc., 1986, 133: 2465

[65] Sun J L, Tang H J, Wang C L, et al. Effects of alloying elements and microstructure on stainless steel corrosion: A review [J]. Steel Res. Int., 2022, 93: 2100450

[66] Olsson C O A, Landolt D. Passive films on stainless steels—Chemistry, structure and growth [J]. Electrochim. Acta, 2003, 48: 1093

[67] Sun Y L, Xie Z P, Li Y W. Enhanced lithium storage performance of V_2O_5 with oxygen vacancy [J]. RSC Adv., 2018, 8: 39371

[68] Kim K M, Park J H, Kim J H, et al. Effect of chemical and heat treatment on the interfacial contact resistance and corrosion resistance of 446M ferritic stainless steel as a bipolar plate for polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2011, 36: 9926

[69] Cui J L, Yao Z D, Cui Y F, et al. Electrochemical properties of tungsten-alloying-modified AISI 430 stainless steel as bipolar plates for PEMFCs used in marine environment [J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2016, 29: 920

[70] Wang H L, Turner J A, Li X N, et al. Process modification for coating SnO_2: F on stainless steels for PEM fuel cell bipolar plates [J]. J. Power Sources, 2008, 178: 238

[71] Luo H W, Lin X. Ferritic stainless steel for bipolar plate of fuel cell and preparation method of ferritic stainless steel [P]. Chin Pat, 202510151353.X, 2025
(罗海文, 林 雄. 一种燃料电池双极板用铁素体不锈钢及其制备方法 [P]. 中国专利, 202510151353.X, 2025)

(责任编辑:李海兰)