

甲烷通过熔融法热解生产绿松石氢气的研究进展

罗化峰^{1*}, 范志强², 高 龙¹, 秦至臻¹

(1. 山西大同大学煤炭工程学院, 山西 大同 037003;

2. 山东能源集团西北矿业有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 甲烷通过熔融法热解生产绿松石氢气是一种有前景的低碳氢气生成方法, 它可以解决传统甲烷蒸汽重整带来的环境问题。近5年关于甲烷热解的综述主要关注技术进步、反应器设计和催化效率等问题, 然而这些研究没有分析甲烷原料泄漏对碳排放系统以及固体碳价值对经济性的影响。本综述主要对此进行论述, 也对可再生能源与甲烷热解相结合进行讨论。结果表明, 通过管理该技术原料(如生物甲烷)获取和固体碳销售, 绿松石制氢技术有望实现低碳排放和低能耗目标, 尤其是在天然气资源和可再生资源丰富地区。绿松石制氢技术通过开发能够抵抗腐蚀和高温材料(特种合金和陶瓷), 有效热管理等可促进其大规模生产, 使其成为环境友好和经济前景良好的制氢新途径。

关键词: 甲烷熔融热解; 低碳氢; 绿松石氢; 大型化生产; 可再生能源整合

中图分类号: TQ529.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)10-0081-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.015

Research progress on the production of turquoise hydrogen from methane pyrolysis via molten medium

LUO Hua-feng^{1*}, FAN Zhi-qiang², GAO Long¹, QIN Zhi-zhen¹

(1. School of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China;

2. Shandong Energy Group Xibei Mining Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: Methane pyrolysis via molten methods to produce turquoise hydrogen is a promising low-carbon hydrogen generation approach that can address the environmental issues associated with conventional methane steam reforming. Over the past five years, the reviews on methane pyrolysis have primarily focused on technological advancements, reactor design, and catalytic efficiency. However, they have not analyzed the impact of methane feedstock leakage on carbon emissions or the influence of solid carbon value on economic viability. This review addresses these gaps and also discusses the integration of renewable energy with methane pyrolysis. Results indicate that by managing feedstock acquisition (such as biomethane) and monetizing solid carbon byproducts, turquoise hydrogen technology holds great potential for achieving low-carbon and low-energy goals, particularly in regions abundant in natural gas and renewable resources. The development of corrosion and high temperature resistant materials (e.g., specialty alloys and ceramics), along with effective thermal management, can facilitate large-scale production, positioning turquoise hydrogen as an environmentally friendly and economically viable new pathway for hydrogen production.

Key words: methane pyrolysis via molten medium; low-carbon hydrogen; turquoise hydrogen; large-scale production; integration of renewable energy

氢气是炼制原油、化肥生产、化学合成、钢铁制造和发电的关键工业原料, 同时还能为多个经济领域减碳起到重要作用^[1-2]。目前, 氢气生产主要依靠化石燃料转化, 这将伴生大量二氧化碳。因此, 开发无二氧化碳排放的经济型氢气新技术就显得尤为迫切。鉴于此, 全球已开发了一些新的低排放氢气技术, 例如在传统制氢技术的基础上耦合二氧化碳捕获和储存装置、利用可再生能源电解水、热化学分解和光催化制氢以及生物质气化^[3]。然而, 这些技术因成本高和性能下降快速, 难以大规模推广。

甲烷热解可通过催化剂或在熔融反应器中实现生产氢气, 该技术与传统方法相比显示出更高效率和能源节约。该技术与中国化学学会提出的碳捕获和储存策略相吻合^[4], 且该过程所产碳以固体形式存在, 较气体更易储存。当采用熔融金属/盐反应器时, 该技术在高温下可实现连续产氢和固体碳的自动分离, 这不仅可提高氢气产量, 还可增强经济的可行性。近年来, 甲烷热解技术随着反应器优化、催化剂开发和操作效率的不断提高, 正逐渐成为低碳制氢领域极具吸引力的技术选择。

收稿日期: 2025-12-01; 修回日期: 2026-07-31

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2022174); 山西省高校科技创新项目(2021L397)

作者简介: 罗化峰(1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向为煤的洁净利用与煤矸石综合利用, 通讯联系人, xzyzlh@163.com。

天然气主要由甲烷组成,还含有少量其他气体,如乙烷、丙烷、二氧化碳、氮气、硫化氢、氦气和其他微量气体。在热解过程中,乙烷和丙烷等其他碳氢化合物有一定作用,但影响较小。二氧化碳、氮气和硫化氢等气体对热解影响较大,因此必须剔除。为减少二氧化碳排放,一种有效策略就是将丰富的天然气资源转化为氢气。首先,简要介绍甲烷热解与绿松石氢的基本概念。接下来,综述熔融法裂解甲烷制氢。最后,针对甲烷热解与可再生能源整合、甲烷排放与泄漏和固体碳管理等方面给出相

关建议与方案,以促进甲烷熔融法热解技术的大规模生产。

1 甲烷热解与绿松石氢气概述

1.1 甲烷热解概述

甲烷热解是一种高吸热反应,在 25℃ 时需输入 74.85 kJ/mol 热量才能裂解氢气。一般来说,较高反应温度和较低压力有利于反应发生。当前甲烷热解工艺可根据是否使用催化剂以及催化剂类型、供热方式和热源类型进行分类,如图 1 所示。

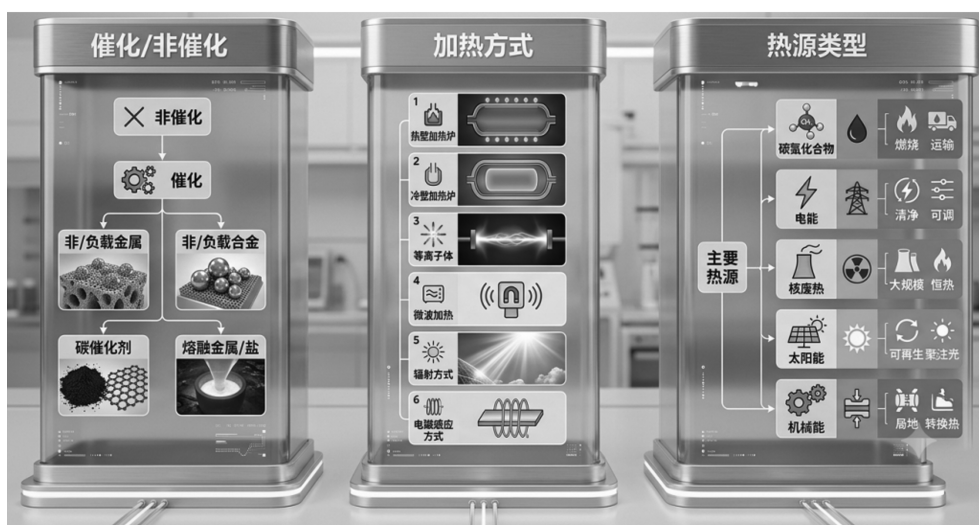


图 1 根据不同方式对甲烷热解分类

甲烷非催化热解的典型应用案例是合成炭黑, BASF 公司为此开发了一种移动床反应器。在该反应器中,天然气被送入电极直接加热至 1 400℃ 的碳颗粒床中,热解过程在碳颗粒表面进行^[5]。然而,在该转化过程中,碳颗粒是否起到催化作用,以及碳沉积物与碳颗粒能否有效分离尚不清楚。为有效降低甲烷热解温度,学者们研究和开发出各种催化剂,主要有非负载固体金属催化剂、负载金属催化剂、负载金属合金或杂原子掺杂金属催化剂、固体碳催化剂、液态或熔融金属催化剂。在高温下,非负载固体金属催化剂容易聚集成大颗粒,从而导致催化剂失活。为此,一般将小颗粒固体金属担载在各种金属氧化物或碳上,以便减缓金属聚集,但甲烷热解所产碳也会包裹金属颗粒导致催化剂失活。为提高催化剂稳定性,学者们努力探索不同金属合金或掺杂异原子金属催化剂,但至今所取效果仍然是有限的,因此,碳材料被选用于甲烷热解,但催化活性远低于金属催化剂且反应温度也更高,并且随着碳沉积增加,催化活性迅速下降。为解决上述催化剂快速失活问

题,学者们提出 2 种新的解决方案。一种是采用价格低廉的天然材料,如铁矿石或沙子。另一种是采用熔融液态催化剂,主要为低熔点金属或合金以及碱金属盐,当甲烷通过熔融液态催化剂时,生成碳会从活性催化位点分离,因此催化剂不会失活^[6]。

甲烷热解需要解决的一个关键问题就是如何有效为反应提供热量,当前主要有 6 种供热方式。第一种是热壁炉加热方式,工业规模反应器一般采用较大热阻的燃气燃烧器,实验室则常使用小型热壁炉,内部配有电加热器,如图 2(a) 所示。但是,上述二者在反应过程中,甲烷热解碳会在炉壁表面沉积,从而阻碍反应器内部气体流动。为此,分别开发出流化床反应器和旋转床反应器。在流化床反应器中,甲烷流速能够使催化剂颗粒悬浮,催化剂被碳包裹可通过后续旋风分离器分离。在旋转床反应器中,甲烷在倾斜和旋转反应器表面上流动,碳包覆催化剂可从反应器中抽出。第二种是冷壁炉加热方式,采用冷壁炉,炉内加热部件直接提供热量,如图 2(b) 所示。第三种是等离子体加热方式,通过等离

子体向甲烷直接提供热量,该过程可以有或没有催化剂。尽管等离子体供热可带来均匀且快速加热,但通常需要更多能量输入,如图 2(c)所示。第四种是微波加热方式,微波加热属于介电加热,能够对甲烷反应位点进行非接触式加热,如图 2(d)所示。第

五种是辐射加热方式,集中太阳能直接照射反应器,为甲烷热解提供热量,如图 2(e)所示。第六种是感应加热方式,感应加热利用交流电产生磁场,当铁磁材料置于磁场中时,会感应出电流以产生热量,为甲烷热解提供热量,如图 2(f)所示^[7]。

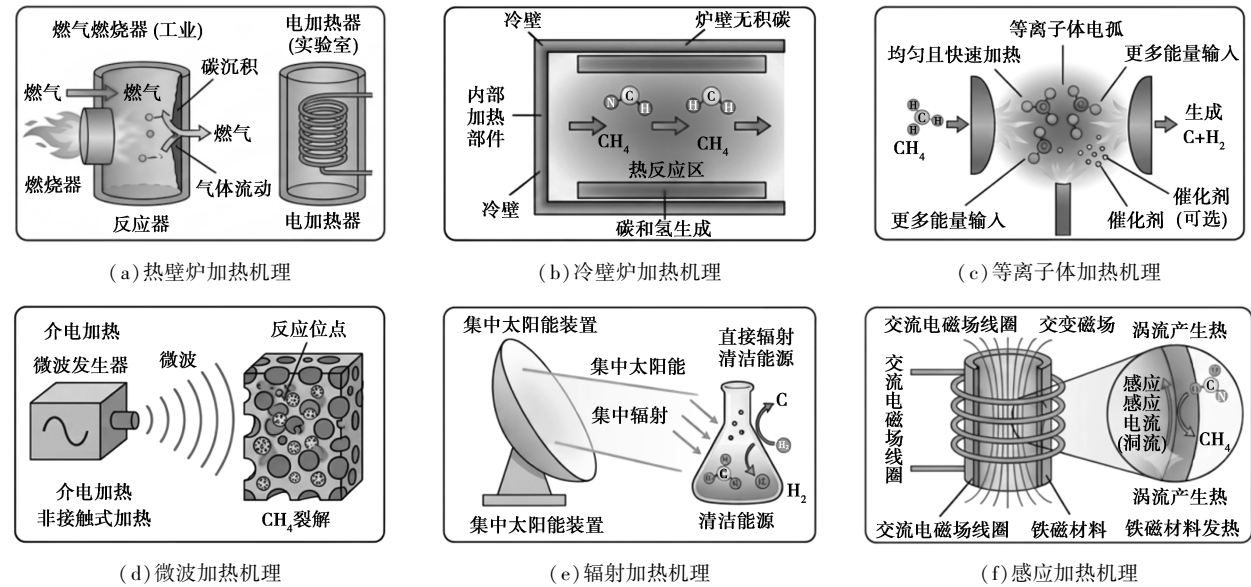


图 2 不同加热方式甲烷裂解制氢反应机理

1.2 绿松石氢气概述

鉴于上述论述,当甲烷热解能够与可再生资源相结合时,能够显著减少温室气体排放,该制氢技术所产氢气称为绿松石氢。绿松石氢可利用现有天然气基础设施,通过在天然气资源附近生产,减少运输难题。另一个重要优势在于甲烷热解所产固体碳具有重要经济价值,例如,炭黑和碳纳米管等碳材料能在橡胶、电子和航空航天等领域广泛应用,这将为该技术提供潜在收入来源,使得甲烷热解相比传统的氢气生产方法(甲烷蒸气重整)更具成本竞争力。因此,甲烷热解技术将在其双重优势下不断发展。

2 熔融甲烷热解制氢概述

2.1 熔融金属甲烷热解

近几年,甲烷热解技术的一个重大进步就是使用流化熔融金属芯来保持理想温度梯度,优化甲烷分解,高效分离碳,反应器在优化条件下可接近理论最大产氢量。固体活性金属催化剂(如镍和钯)在中等温度可实现较高转化率,但因其高熔点特性,会快速失活且难以液化。相比之下,低熔点金属(如锡、铋和锑)则表现出较差活性。为解决这一问题,学者们开发出由活性金属(镍和钯)与低熔点金属

(锡、铋和锑)组成的合金作为液态催化剂。合金成分会显著影响催化性能,对反应会产生正向促进或负面抑制的不同效果。近 5 年熔融金属甲烷热解常用金属和研究最新进展,如表 1、表 2 所示。Zaghloul 等^[8]开发出一种甲烷热解熔融金属气泡柱反应器,探讨了氢气产量和碳分离效率,结果表明,气泡柱结构可增强气液相互作用,从而提高氢产率。Pérez 等^[9]在熔融镓气泡柱反应器进行甲烷热裂解,结果表明,镓是一种优良介质,可实现高氢产率,在 1 119℃

表 1 甲烷热解常用金属的物理性质和毒性

种类	金属	熔点/ ℃	沸点/ ℃	相对 密度/ (g·cm ⁻³)	热导率/ (W·m ⁻¹ · K ⁻¹)	价格/ (美元· kg ⁻¹)	毒性
过渡金属	Fe	1538	2862	7.87	80	67	无
	Ni	1455	2730	8.91	91	77	中等
	Cu	1085	2562	8.93	400	27	中等
碱土金属	Mg	650	1091	1.74	160	37	无
非金属	Te	450	988	6.23	3	240	中等
后过渡金属	Pb	327	1740	11.34	35	15	重度
	Bi	272	1564	9.80	8	110	无
	Sn	232	2602	7.28	67	80	中等
	In	157	2072	7.31	82	600	无
	Ga	30	2400	5.91	29	2200	无

表 2 熔融金属甲烷热解研究综述

学者	年份	熔融介质	反应器类型	重大发现
Zaghloul 等	2021	—	液态金属气泡柱	通过气泡塔配置增强氢气生产
Pérez 等	2021	Ga	气泡柱	通过技术和经济分析镓在氢气生产的重要性
Kudinov 等	2021	Sn	层状反应器	流体力学在高效甲烷转化中的作用
Msheik 等	2022	Sn	管状(太阳能驱动)	太阳能条件下熔锡反应器有利碳回收
Sorcar 等	2023	各种金属	多相反应器	反应器设计可实现氢气高产量
Abdollahi 等	2023	各种金属	—	工艺配置可降低热解温度
Scheiblehner 等	2023	Cu 合金	—	二元铜合金可提高氢气产量
Scheiblehner 等	2023	Cu-Ni-Sn 合金	—	合金成分可提升催化活性
Wi 等	2023	In, Ga, Bi, Sn, Cu	电磁悬浮	绿氢生产潜力下催化剂的识别
Busillo 等	2024	各种金属	—	物理特性对碳和氢气的影响
Msheik 等	2024	各种金属	太阳能气泡柱	太阳能整合用于可持续甲烷热解

和常压下,甲烷最大转化率可达 91%。Kudinov 等^[10]研究了熔融锡热解甲烷中流体动力学、传热和扩散机制,结果表明,锡可提高甲烷转化率和碳分离效率。Msheik 等^[11]在太阳能供热条件下,比较了气相裂解甲烷和熔融锡裂解甲烷热解,结果表明,熔融锡反应器在碳回收和氢产率方面效果更优,突显了熔融介质在太阳能驱动过程优势。Sorcar 等^[12]开发出一种多相反应器以提升甲烷热解效率,通过对比多种熔融金属裂解甲烷转化率,确定出最佳反应条件,并实现高氢产率和低碳沉积。Abdollahi 等^[13]评估了多种金属和合金组成对甲烷热解影响,重点关注了生产工艺配置对甲烷热解反应效率和氢产率影响。Scheiblehner 等^[14]研究了熔融铜合金热解甲烷过程,重点关注合金成分对氢产率和碳分离影响,强调二元铜合金在保持反应稳定性方面的优势。Scheiblehner 等^[15]也研究了铜-镍-锡合金热解甲烷的转化率和氢产率,重点分析合金成分影响,结果表明,该合金系统不仅反应稳定,而且催化活性高。Wi 等^[16]采用电磁悬浮技术测量了不同熔融金属热解甲烷速率,重点关注了铜、镓、铋、锡和铜的反应性并确定绿松石氢生产所需最优催化剂。Busillo 等^[17]研究了熔融介质物理特性和热解甲烷影响,并对不同熔融金属的催化效果进行了比较。Msheik 等^[18]通过熔融金属气泡柱反应器,研究了太阳能驱动的热解甲烷技术,结果表明,整合太阳能可使热解甲烷过程持续时间更长。

2.2 熔盐与熔融金属甲烷热解对比

熔融金属因优异催化性能而备受关注,在甲烷

热解过程中不仅可提高氢气产量,还能有效分离沉积固体碳,然而熔融金属也带来运营成本高和处理复杂的问题,而且还有腐蚀和熔点高的问题。

熔盐较熔融金属在甲烷热解过程中具有多项优势。极大地减少熔盐与反应器所用材料的相互作用,从而保持反应器结构的长期完整性,减少频繁维修,简化反应器的维护工作,这将极大地提高反应过程的效率和寿命。然而,熔盐的最大缺点是催化活性要比熔融金属低,这可导致甲烷分解率和氢产率降低^[19]。鉴于此,学者们将熔盐与金属混合应用于甲烷热解,使得金属催化优势与盐的稳定性结合起来。

3 甲烷热解制氢技术工业化影响因素

3.1 甲烷热解与可再生能源整合

当甲烷热解使用可再生能源作为动力时,碳排放接近于零,与甲烷水蒸气重整技术的高排放对比鲜明。此外,甲烷热解通过直接生成固体碳作为副产品,也可避免一氧化碳排放。据估计,当采用可再生能源时,甲烷热解可减少 50%~80% 的温室气体排放;而与碳捕捉技术结合使用时,这一比例可达 90%。因此,与传统制氢方法相比,甲烷热解成为一种最有前景的制氢方法

3.2 原料泄露对甲烷热解影响

以甲烷作为原料对热解环境的影响,主要来源是天然气开采和加工过程的泄露,即使微量甲烷泄漏,也可能抵消甲烷热解技术的减排效果。因而,甲烷泄漏的实时有效监测对维持该技术的可持续发展

至关重要,如光学气体成像和卫星监测等技术。

3.3 固体碳产品利用

甲烷热解所产固体碳可被封存、再利用或者销售,这既符合该技术的经济目标,也符合环保目标。固体碳作为再利用的一种应用是将其用于建筑材料,尤其是混凝土。另一种应用是高纯度碳,如炭黑在轮胎制造和其他工业应用。炭黑因增强性能,是轮胎、油漆、油墨和塑料中重要的添加剂。此外,附加值更高的固体碳,如石墨烯或碳纳米管,能在电子、储能和高强度复合材料领域广泛应用,市场价格远高于传统炭黑。

3.4 熔融甲烷热解经济分析

与传统甲烷蒸气重整和煤气化相比,甲烷热解的碳排放量也很低,但利用可再生能源电解水产生绿色氢气技术碳排放几乎为零。然而,该技术的氢气生产周期成本 and 环境影响与技术选择和资源可用性有着重要关联。熔融金属裂解甲烷热解制氢具有显著优势,温室气体排放量远低于传统制氢技术,而且固体碳出售不仅可降低生产成本,也能增加该技术的经济价值,使其成为当下符合脱碳目标的过渡技术,特别在天然气和可再生能源资源丰富地方。另外,甲烷热解与熔盐结合并与太阳能供热可利用可再生能源为热解供电,降低整体成本并减少碳排放,从而实现氢气生产路径脱碳。

4 绿松石制氢技术与其他技术比较

目前,氢气生产领域主要的技术有 2 种,分别是甲烷蒸气重整与碳捕捉整合技术和可再生能源电解水制氢技术,与二者相比,绿松石制氢技术作为一种过渡技术,存在以下优缺点。

(1)绿松石制氢技术较甲烷蒸气重整和电解水制氢所需能耗要低。甲烷蒸气重整由于基础设施成熟,成本较低,但碳捕获和储存需要额外费用。绿氢因依赖可再生能源电力而成本较高,但其副产固定碳能够平衡成本。

(2)绿松石制氢技术可获得显著效益,接近于零碳强度。固体碳的应用范围广泛,从轮胎的炭黑到高价值材料如石墨烯和碳纳米管,销售价值将极大地提高绿松石氢技术收益。

5 结论与展望

近 5 年关于甲烷热解的综述主要关注技术进步、反应器设计和催化效率等问题,然而这些研究没有分析甲烷原料泄露对碳排放系统以及固体碳价值

对经济性的影响。本综述主要对此进行论述,也对可再生能源与甲烷热解相结合进行讨论。通过整合这些独特视角,该综述不仅丰富了现有文献,还为推进绿松石制氢技术提供切实可行的见解。结果表明,通过管理该技术原料(如生物甲烷)获取和固体碳销售,绿松石制氢技术有望实现低碳排放目标,尤其是在天然气资源和可再生资源丰富地区。绿松石制氢技术通过开发能够抵抗腐蚀和高温材料(特种合金和陶瓷),有效热管理等可促进其大规模生产,使其成为环境友好和经济前景良好的制氢新途径。鉴于上述论述,为尽早实现该技术工业化,今后应该对以下几个方面重点关注。

(1)通过先进的甲烷泄漏检测技术对甲烷热解全流程进行监测,可进一步开发的主要技术有光学气体成像技术、卫星监测技术、固定传感器网络技术和无人机技术。

(2)在氢经济中,为实现有效甲烷排放的控制,需要建立强有力的监管框架,这既能激励减排措施,又能确保合法,其中关键政策手段包括:政府可强制规定甲烷泄漏的最大允许率、提供补贴和税收减免、甲烷排放碳税制度和全球范围的甲烷减排标准化。

(3)甲烷热解与可再生能源结合能显著降低工业装置运行费用和碳排放,需进一步整合的内容有:可再生能源供热、生物甲烷原料、储能系统和电网协同效应。

参考文献

- [1] Dawood F, Anda M, Shafiuallah G M. Hydrogen production for energy: An overview [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2020, 45(7): 3847–3869.
- [2] Yue M L, Lambert H, Pahon E, *et al.* Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2021, 146: 111180.
- [3] Safari F, Dincer I. A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production [J]. *Energy Convers Manag*, 2020, 205: 112182.
- [4] Shen M, Kong F, Tong L, *et al.* Carbon capture and storage (CCS): Development path based on carbon neutrality and economic policy [J]. *Carbon Neutral*, 2022, 1(1): 37.
- [5] Yousefi M, Donne S. Technical challenges for developing thermal methane cracking in small or medium scales to produce pure hydrogen—A review [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2022, 47(2): 699–727.
- [6] Pakinso B, Patzschke C F, Nikolis D, *et al.* Methane pyrolysis in monovalent alkali halide salts: Kinetics and pyrolytic carbon properties [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2021, 46(9): 6225–6238.

(下转第 91 页)

- Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 105: 103229.
- [8] Fang Z, Yang C, Wang R. Monitoring technologies for CO₂ storage in coal seams and enhanced coalbed methane recovery: A review of field applications [J]. Fuel Processing Technology, 2025, 276: 108274.
- [9] 包琦, 赵文韬, 王春凯, 等. 玄武岩 CO₂ 矿化反应效率与封存潜力评价[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 110–119.
- [10] Deng H, Yu C, Jiang Q, *et al.* Accelerated CO₂ mineralization in basalt via reaction process control: Mineralization effect, mineral evolution, and reservoir property implications[J]. Gas Science and Engineering, 2025, 140: 205648.
- [11] Yang S, Liu S, Zhang K, *et al.* The sorption behaviors of barium during reinjection of gas field produced water into sandstone reservoir: An experimental water-rock interaction study [J]. Sustainability, 2023, 15(10): 8132.
- [12] Cai M, Li X, Zhang K, *et al.* Coupled hydro-mechanical-chemical simulation of CCUS-EOR with static and dynamic microscale effects in tight reservoirs[J]. Fuel, 2024, 357: 129888.
- [13] 纪泳丞, 魏浩然, 李晗. MICP 在土壤与水泥基材料中加固修复应用进展[J]. 中国水土保持科学, 2025: 1–14.
- [14] 孟凡柳, 屠袁哲, 李南骏, 等. 碳酸酐酶生物矿化固定 CO₂ 研究及应用进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(5): 1861–1873.
- [15] Wang J, Pang S, Zhan X, *et al.* Improving recycled concrete aggregate performance via microbial-induced calcium carbonate precipitation: Effects of bacterial strains and mineralization conditions[J]. Buildings, 2025, 15(5): 825.
- [16] Wang Y N, Li S K, Li Z Y, *et al.* Exploring the application of the MICP technique for the suppression of erosion in granite residual soil in Shantou using a rainfall erosion simulator[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(6): 3273–3285.
- [17] 王晓丽, 张文, 王新红, 等. MICP 修复盐渍环境混凝土裂隙的关键影响因素与修复效能研究[J]. 材料导报, 2026, 40(8): 100–106.
- [18] 于洋, 刘琦, 吕静, 等. 碳酸酐酶固定及在二氧化碳捕集应用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 69–78.
- [19] 刘鹏, 曹源兴, 程钰, 等. 碳酸酐酶增强微生物矿化固土效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2554–2564.
- [20] 刘清, 刘奇, 潘琦, 等. ZIF-8 基仿生碳酸酐酶构建及对 CO₂ 高效矿化[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2023, 48(6): 1404–1413.
- [21] 程文煜, 姜华瑀, 熊卓, 等. 燃煤电厂增效降碳发展路径分析[J/OL]. 煤炭转化, 2025: 1–25. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jit-Bskw5eSPT5u_MbTp9g5EebqiqYA9uuYViMGdxGSXuSRte8Tsp4gferNyWhAJ2JdCvR1dJ22twZGnOyd06VP4w97m_NNthZBVptLgHmkD4IczclsSHb0cfgo7ncYyHaR-mtauxKiqQhauH-wq7i08pPXYCZxy97rdIQ34n6sXS0Y80VPLLeg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [22] 刘文昊, 陈庆彩, 徐腾飞. 双碳战略背景下的钢渣固碳技术研究进展[J]. 环境工程, 2024, 42(5): 172–182.
- [23] Hang Y, Qi L, Qi B, *et al.* Review on in-situ CO₂ mineralization sequestration: Mechanistic understanding and research frontiers[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2025, 12(1): 15. ■
- (上接第 85 页)
- [7] Prabowo J, Lai L, Chivers B, *et al.* Solid carbon co-products from hydrogen production by methane pyrolysis: Current understandings and recent progress[J]. Carbon, 2024, 216: 118507.
- [8] Zaghoul N, Kodama S, Sekiguchi H. Hydrogen production by methane pyrolysis in a molten-metal bubble column [J]. Chem Eng Technol, 2021, 44(11): 1986–1993.
- [9] Pérez B J L, Jiménez J A M, Bhardwaj R, *et al.* Methane pyrolysis in a molten gallium bubble column reactor for sustainable hydrogen production: Proof of concept & techno-economic assessment[J]. Int J Hydrog Energy, 2021, 46(7): 4917–4935.
- [10] Kudinov I V, Pimenov A A, Kryukov Y A, *et al.* A theoretical and experimental study on hydrodynamics, heat exchange and diffusion during methane pyrolysis in a layer of molten tin [J]. Int J Hydrog Energy, 2021, 46(17): 10183–10190.
- [11] Msheik M, Rodat S, Abanades S. Experimental comparison of solar methane pyrolysis in gas-phase and molten-tin bubbling tubular reactors[J]. Energy, 2022, 260: 124943.
- [12] Sorcar S, Rosen B A. Methane pyrolysis using a multiphase molten metal reactor[J]. ACS Catal, 2023, 13(15): 10161–10166.
- [13] Abdollahi M R, Nathan G J, Jafarian M. Process configurations to lower the temperature of methane pyrolysis in a molten metal bath for hydrogen production[J]. Int J Hydrog Energy, 2023, 48(100): 39805–39822.
- [14] Scheiblehner D, Neuschitzer D, Wibner S, *et al.* Hydrogen production by methane pyrolysis in molten binary copper alloys [J]. Int J Hydrog Energy, 2023, 48(16): 6233–6243.
- [15] Scheiblehner D, Antrekowitsch H, Neuschitzer D, *et al.* Hydrogen production by methane pyrolysis in molten Cu-Ni-Sn alloys [J]. Metals, 2023, 13(7): 1310.
- [16] Wi T G, Park Y J, Lee U, *et al.* Methane pyrolysis rate measurement using electromagnetic levitation techniques for turquoise hydrogen production: Liquid In, Ga, Bi, Sn, and Cu as catalysts [J]. Chem Eng J, 2023, 460: 141558.
- [17] Busillo E, Damizia M, De Fillippis P, *et al.* Methane pyrolysis in molten media: The interplay of physical properties and catalytic activity on carbon and hydrogen production [J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2024: 106752.
- [18] Msheik M, Rodat S, Abanades S. Solar methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor: Effect of medium type and gas injection configuration [J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2024, 183: 106756.
- [19] Cooper-Baldock Z, Perrelle T D L, Phelps C, *et al.* Preliminary evaluation of methods for continuous carbon removal from a molten catalyst bubbling methane pyrolysis reactor [J]. Energies, 2024, 17(2): 290. ■