文章编号：1008－8857(2026)01－0016－10 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2026.01.003

太阳能光解水制氢研究现状与分析

郑雅倩，杨如山，杨 艳
（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘 要：氢能被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源之一。可持续的绿色产氢技术是当前能源发展中的研究重点。太阳能光催化制氢是众多产氢技术中具有代表性的制氢手段，具有低成本、高能效的特点。基于当前能源研究现状，聚焦太阳能光催化制氢，考察并分析了国内外太阳能光催化分解水制氢的研究现状，综述了太阳能光催化分解水制氢在实验和模拟两方面的研究进展：实验部分主要对催化剂以及光催化制氢系统进行介绍；模拟部分主要介绍将计算流体力学(CFD) 应用于光催化制氢的流体流动和辐射过程的进展。指出了光催化分解水制氢实验和模拟研究的现阶段特征以及不足之处，并对未来光催化制氢领域的研究提出了建议。

关键词：光催化制氢；催化剂；反应器；计算流体力学
中图分类号：TK91 **文献标志码**：A

Research status and analysis of solar water splitting for hydrogen production

ZHENG Yaqian，YANG Rushan，YANG Yan
(School of Energy and Power Engineering，University of Shanghai for Science and Technology，Shanghai 200093，China)

Abstract: Sustainable hydrogen production technology is a key research priority in the current energy landscape. Solar photocatalytic hydrogen production stands out among various methods due to its low cost and high energy efficiency. Based on the current state of energy research, this paper reviews the status of solar photocatalytic water splitting for hydrogen production, covering both experimental and simulation advances domestically and internationally. The experimental section primarily introduces catalysts and photocatalytic reactor systems, while the simulation section focuses on the application of computational fluid dynamics (CFD) for model fluid flow and radiation transport. The characteristics and limitations of current experimental and simulation research on photocatalytic water splitting are comprehensively discussed and evaluated. Based on this analysis, future research directions and recommendations are proposed.

收稿日期：2023－12－19
第一作者：郑雅倩(1998—)，女，硕士研究生。研究方向：动力工程。E-mail：15566268775@163.com
通信作者：杨 艳(1989—)，女，讲师。研究方向：氢能制备与利用过程的多相流传热传质。
E-mail：yyan@usst.edu.cn

Keywords: photocatalytic hydrogen production；catalyst；reactor；computational fluid dynamics（CFD）

化石燃料的燃烧不仅消耗了有限的自然资源，同时还会导致温室效应并产生热污染，使全球气候发生不可逆的变化。考虑到生态环境现状，世界各国越来越关注能源利用与环境问题[1]。在全球能源转型的浪潮下，氢能凭借自身清洁、高效的显著特性，以及可存储运输与契合可持续发展理念的优势脱颖而出[2−3]。许多国家都致力于将氢能作为能源转型的重要战略方向，积极布局推进氢能的发展[4]。为加速全球能源变革进程，绿色制氢技术显得尤为重要，而可再生能源制氢是坚持绿色低碳发展道路的必然选择[5]。太阳能是地球上最丰富的可再生能源之一，同时在全球范围内广泛分布。几乎所有地区都有一定的太阳辐射强度。即使在高纬度地区，太阳能也能通过优化系统设计实现高效利用以及高效转化至氢能。推动太阳能向氢能的高效转换，将引发社会能源体系的根本性变革。

光催化分解水制氢技术凭借其装置结构的简易性和工艺的可放大性，展现出显著的技术经济性潜力，被学界公认为是最具可持续发展前景的“碳中和”路径之一[6]。光催化分解水制氢的原理为：当一束能量大于半导体禁带宽度的光子照射在半导体表面时，半导体价带 (VB) 上的电子由于吸收光子能量会发生带间跃迁，从价带跃迁到导带 (CB) 上，并在导带形成光生电子 e^-，同时在价带上留下光生空穴 h^+；水在这种电子−空穴对的作用下发生电离，生成氢气和氧气。半导体在外界作用下产生电子−空穴对后会形成非平衡载流子。当外来作用消除后，这些非平衡载流子将会通过各种途径复合进而消失，并恢复至热平衡状态。按照半导体中复合过程发生位置的不同，可将复合分为表面复合和体相复合。表面复合是指半导体非平衡载流子通过表面态发生复合的过程；体相复合是指半导体非平衡载流子在物质内部发生复合的过程。光催化分解水制氢原理如图 1 所示。光催化分解水的核心在于半导体材料。半导体材料的氧化和还原能力取决于其价带与导带的相对位置，要求半导体材料的价带位置

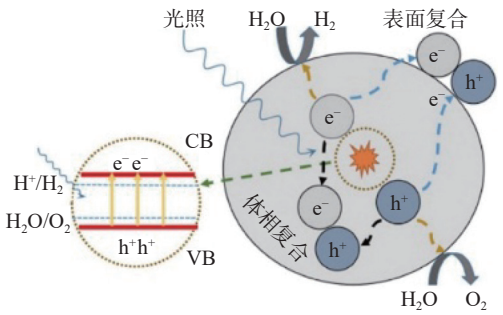


图 1　光催化分解水制氢原理[7]

Fig. 1　Principle of photocatalytic water splitting[7]

比水的氧化电位更低，其导带位置比质子还原的电位更高。

本文对太阳能光催化分解水制氢技术在实验和模拟方面的研究现状进行了综述，以期为后续该技术的大规模应用提供指导。

1　光催化分解水制氢实验研究现状

1.1　催化剂

自光催化技术被发现以来，开发高效光催化剂一直是研究的重点。不同种类的催化剂光催化活性不同，且越来越多的学者采用贵金属沉积、离子掺杂、光催化剂纳米化等手段进行高性能光催化剂研发。光催化剂种类繁多，具有代表性的有金属氧化物、金属硫化物、氮化物、硫氧化物、氮氧化物及复合材料。以下对多种催化剂及其改性研究分别进行介绍。

Fujishima 等[8]在 1972 年首次发现可在 TiO_2 电极上光催化分解水，自此 TiO_2 因其化学性质稳定、寿命长，低成本且无毒等优势被广泛应用[9]。TiO_2 有 3 种常见晶相：锐钛矿、金红石和板钛矿[10]。不同的晶形结构会对 TiO_2 光催化分解水制氢活性产生影响。除 TiO_2 之外，一些传统金属氧化物也广受关注。例如，ZnO 和 WO_3 等材料具有优异的电子迁移率、丰富的表面形貌以及良好的环境相容性，但由于其带隙值和导带价带位置不利于光解水制氢，需要通过改性手段

进行优化。例如，郭叶飞[11]利用 Ag 掺杂方法对 ZnO 进行了改进，提高了 ZnO 在可见光照射下的光催化性能。孟无霜[12]对复合光催化材料 WO_3/Ag_3PO_4 进行了研究，结果表明：复合材料光催化性能均比单一的 WO_3 有所提升，其中 WO_3 质量分数为 25% 时，WO_3/Ag_3PO_4 复合材料的光催化性能是 WO_3 单体的 3.9 倍；多次循环试验证明该材料具有良好的稳定性和可重复性。

金属硫化物半导体中 ZnS 和 CdS 以及两者形成的 $Zn_{1-x}Cd_xS$ 固溶体应用最为广泛。Xiong 等[13]为提高 ZnS 产氢活性，构建了 ZnS/ZnO 复合材料。将该材料在波长 $\lambda > 400$ nm 的可见光照射下反应 0.5 h 后，发现 ZnO 质量分数为 6.9% 的样品具有最佳的析氢活性，分别为纯 ZnS 和 ZnO 的 7.0 倍和 12.3 倍。CdS 具有合适的带隙值和导带价带位置，然而载流子快速重组和光腐蚀严重是该材料产氢性能进一步提升的障碍[14]。研究发现，通过构建异质结能够有效克服上述缺点[15]。蹇齐燕[16] 以磷化钨纳米颗粒作为助催化剂来修饰 CN/CdS 异质结的设计，实现了光电子的有效分离和定向转移。张乾坤等[17]讨论了将异质结的设计、同质结和缺陷工程的构建等手段应用于 CdS 基光催化剂的改性研究，并对 CdS 基光催化剂的研究方向和可能面临的挑战作出了展望。

氮化物由于含有可促进光生电荷传递和利用的共价键，在光催化领域同样具有较广阔的发展前景。陈玉芳[18]围绕 g−C_3N_4 光吸收能力低和光生电子−空穴对易复合等关键问题，通过与半导体复合、非金属掺杂等方法对其进行改性，使其产氢效果显著提升。Zhou 等[19]利用氮化镓铟光催化剂分解纯水，在聚光条件下实现了 9.2% 的高能量转化效率。

有关硫氧化物的研究和应用也不胜枚举。梁慧荣等[20]考察了反应温度和反应时间对 $Cu_2MoS_4O_x$ 催化剂产氢活性的影响。结果发现：140 ℃ 水热 24 h 合成的催化剂平均产氢速率为 10.7 μmol/(h·g)，表观量子效率为 0.36%。晁明坤等[21]采用出射光波长大于 420 nm 的氙灯作为光源，在牺牲剂为 Na_2S 和 Na_2SO_3 的体系中，利用 $Sm_2Ti_2S_2O_5$ 颗粒光催化分解水的产氢活性最高可达 35 μmol/h，并且能稳定产氢 20 h 以上。

氮氧化物的光吸收性能和稳定性相较于氧化物和氮化物而言更有优势。迄今为止已有包括 TaON、$SrNbO_2N$、$LaTiO_2N$、$BaTaO_2N$ 在内的多种光阳极材料被成功应用于制氢领域，其中 TaON 因具有吸收可见光的带隙较窄、化学稳定性良好、制备工艺简单等优点受到广泛关注，但由于其表面活性位点不足、内部量子效率低以及光生电子空穴分离效率低等缺点，其催化活性并不理想。晏金胜[22]分别以 $TaCl_5$ 和氨气作为钽源和氮源，采用水热法制备前驱体，以此得到具有表面氧空位层的 TaON 颗粒，以增强其光催化活性；通过阳极氧化法和氮化法制备规整的 TaON 纳米管，在改变 TaON 纳米管阵列形貌的同时，增大比表面积，调控阳极氧化时间，最终达到增强 TaON 光催化活性的目的。Wu 等[23]分析了 Ta 含量对 $CaTa_xZr1-_xO_{3-x}N_x$ 光催化剂产氢活性的影响，发现变量 x=0.8 时的产氢速率比 x=0 时提高了 4.22 倍，为后续氮氧化物催化剂的优化提供了指导。

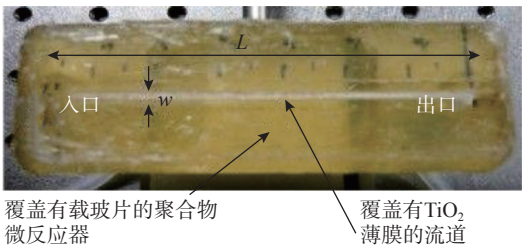
在大量新型和改性光催化剂中，多金属氧酸盐 (POM) 作为阴离子金属−氧簇，是重要的无机材料。由于极多功能性、高结构稳定性和特殊性能，POM 被合成化学家们广泛研究。将 POM 开发为高活性催化系统的一个有应用潜力的策略是将 POM 与金属有机配位络合物结合，以构建基于具有金属有机骨架 (MOF) 结构或高维超分子网格的 POM 结晶无机−有机杂化结构。同时，随着催化领域各项技术的发展，单原子催化剂 (SACs) 因可用来克服传统金属纳米粒子原子利用率低的缺点，在光催化分解水方面显示出巨大的潜力[24]。SACs 的反应机理本质上可以理解为单个金属原子和载体间产生了相互作用，从而影响光催化分解水的过程，且 SACs 在光收集支架中引入单个金属原子，从而有利于调整能带结构和电子结构，促进电荷转移动力学。Zuo 等[25]通过将预先形成的与卟啉配位的单铂原子前体组装到超薄厚度为 (2.4±0.9) nm 的独立 MOF 纳米片中，采用表面活性剂稳定配位策略制成铂负载量 (质量分数) 高达 12.0 % 的二维 SAC。二维 SAC 是基于二维 MOF 的 SAC 的首个实例，且与已

报道的基于 MOF 的光催化剂相比，其在可见光（波长 λ>420 nm）照射下通过分解水实现的光催化 H_2 演化率达到了创纪录的 11 320 μmol/(h·g)。

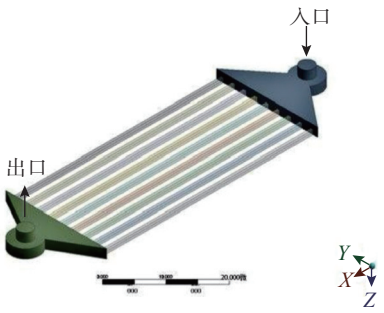
1.2　反应器研究现状

光催化反应器按照尺寸可分为微型反应器、小型反应器和规模化反应器三类。微型反应器的通道包括单一的矩形通道[26]、多通道[27]、曲线通道[28]，如图 2 所示。反应器内通道的设计形式会直接影响光催化反应的效率。

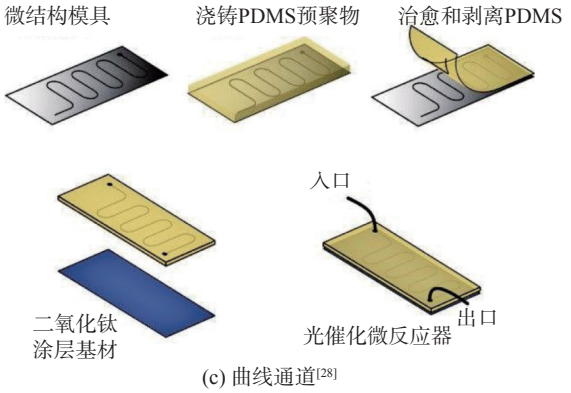
小型反应器可分为光源外置式反应器、光源内置式反应器，其中光源外置式反应器中平板和管式结构的应用较多[29–30]，如图 3 所示，其中：DMS 为二甲基硫醚；LED 为发光二极管；GC−FPD 为气相色谱−火焰光度检测器；DC 为直流电。光源内置式中环状结构应用较多[31–32]，如图 4 所示，其中 r_0、r_1、r_2 分别为 LED 光源半径、负载二氧化钛催化剂薄膜的反应器内壁半径以及反应器外壳半径。



(a) 矩形通道[26]



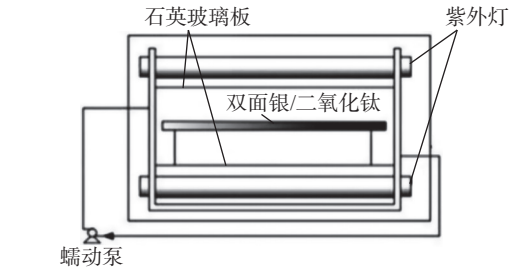
(b) 多通道[27]



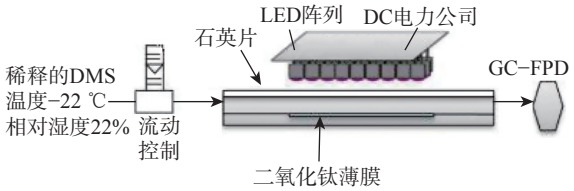
(c) 曲线通道[28]

图 2　微通道反应器

Fig. 2　Microreactors with various channel configurations



(a) 光源外置式平板反应器[29]



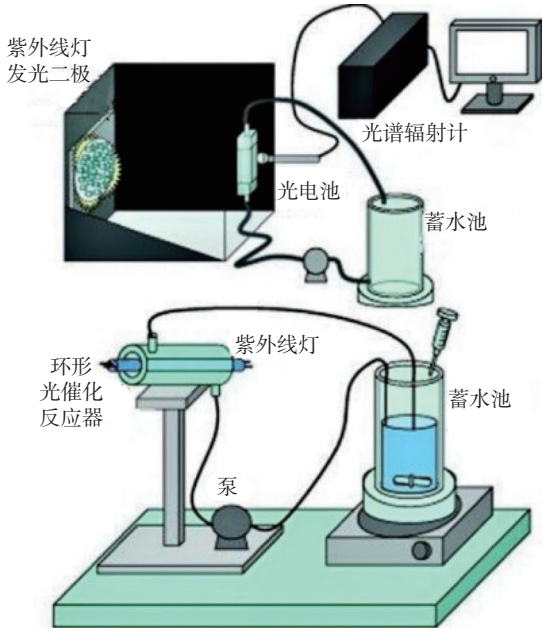
(b) 光源内置式反应器[30]

图 3　小型反应器

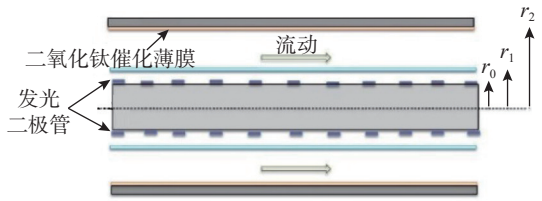
Fig. 3　Reactor with external light source

直接太阳能反应器可按照是否聚光分为两类：非聚光型反应器[33]和聚光型反应器[34]。非聚光型反应器结构简单，操作方便，但反应速率较慢；聚光型反应器一般采用抛物槽或抛物面收集器来聚集太阳光并将其辐射在能透过紫外光的中心管上，可利用直射和反射的光线，在一定程度上克服了非聚光型反应器的缺点。两种反应器如图 5 所示。

多年来人们为优化光催化产氢效率提出了多种不同的光反应器设计方法。Pagliaro 等[35]为提高装置的安全性，提出利用双床组合方式进行反应，使得气体分离更容易，水分解更高效。Ruban 等[36]研发了一种优化催化剂受光程度的新型台式管状光催化反应器，使用 CdS−ZnS/TiO_2 核壳 NPs(纳米颗粒)，对批量循环模式下的操作变量进行实验研究。结果表明，在硫离子浓度为 0.05 mol/L、亚硫酸根离子浓度为 0.2 mol/L、pH 为 11.3、催化剂质量浓度为 0.5 g/L、循环流速为 18 L/h 下氢气生成量最大。Goto 等[37]设计了一种固定 Al 掺杂 $SrTiO_3$ 催化剂的太阳光驱动水分解平板型反应器。该反应器在接收自然光面积



(a) 反应器系统图[31]



(b) 反应器横截面图[32]

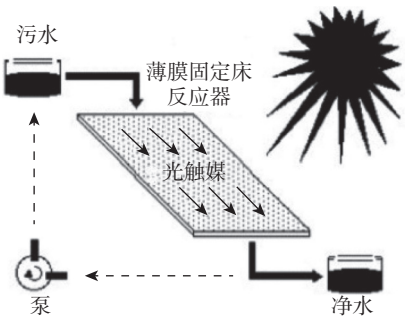
图 4 光源内置式环状反应器

Fig. 4 Reactor with built-in light source and annular structure

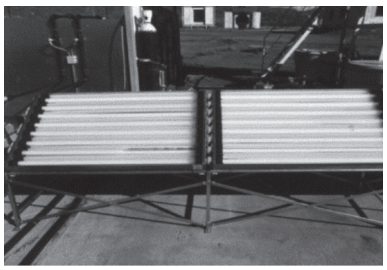
为 1 m^2 时，水分解制氢转化效率达到 0.4%。Cao 等[38]将六个南北朝向、角度每月可调的截断式复合抛物面聚光器(CPC)与一个立管、一个导流管和一个冷凝管并联设计成一个自然循环光反应器，并对吸收管上的辐射分布以及太阳辐照度、管内临界流速和氢气生产率等反应器性能参数进行了估算和测量。通过一系列实验发现，在夏季一周和春季一周可分别获得 36.1 L/d 和 20.5 L/d 的氢气产量。

1.3 光催化制氢体系的研究进展

按照光催化制氢体系中是否含有牺牲剂，光解水制氢可分为牺牲剂体系和纯水体系。孙尚聪等[39]将两类分别具有氧化和还原特性的助催化剂负载在半导体上用于纯水体系，从而在促进电荷的空间分离的同时调控氢气和氧气的生成速率。他们提出的在不添加任何牺牲剂条件下全解水产



(a) 非聚光型反应器[33]



(b) 聚光型反应器[34]

图 5 直接太阳能反应器

Fig. 5 Direct solar reactor

氢更具挑战性。而 Yan 等[40]在以 Na_2S−Na_2SO_3 为牺牲剂的条件下，Pt−PdS/CdS 在 420 nm 处的表观产氢量子效率可高达 93%。Velázquez 等[41]进行了光催化分解纯水和以醇类为牺牲剂的产氢实验，得到含有甲醇牺牲剂和纯水体系的表观活化能分别为 23.3 kJ/mol 和 17.5 kJ/mol。

按照反应物的循环方式，光解水制氢分为间歇式体系和连续式体系。近年来，由于可扩展性、连续反应监控和高效性，连续式光催化反应器越来越受欢迎。但 Zeng 等[42]提出了一种新的工作模式，即利用设计简便的通道式光催化反应器，间歇性地使浆液反应流停止，从而提高制氢量。该研究获得了最合适的启动/停止时间比，其产氢量远高于连续式反应器。该研究也为类似装置的研制提供了指导。

按照光催化反应器中催化剂的存在形式可将反应体系分为悬浮型和负载型。悬浮型体系中催化剂能在溶液中均匀分散而表现出较高的光催化活性[43]，但是由于光催化剂在溶液中的颗粒非常小，即便团聚后也仅有 μm 级，因此利用传统的分离方法如离心、沉淀等很难将其彻底分离[44]。总体来说，悬浮型体系由于催化剂的高表面积在催化效率上表现得更为出色，且在量子产率及传

质方面也优于负载型体系。负载型体系相对于悬浮型体系的最大优点在于可以较易从反应液中分离出催化剂，从而实现再利用[45]。与颗粒悬浮系统相比，固定颗粒系统更容易扩大规模。

2015 年李平等[46]提出与植物光合作用相似的 Z 型光催化材料体系。Z 型光催化材料体系是由电子传输介质、光还原剂和光氧化剂组成的双光子体系，借助双光子激发过程，在不同光催化剂上分别完成氧化反应和还原反应，从而有效促进了光生电荷的分离和迁移。由于 Z 型体系对光催化剂材料热力学性能限制的放宽，大量可见光响应材料被成功地用作 H_2 或 O_2 进化光催化剂，从而促进电子从 O_2 进化光催化剂转移到 H_2 进化光催化剂[47]。光催化还原位点和氧化位点分别在两个光催化半导体上，因此还原和氧化过程相互分离，从而有效抑制逆反应的发生。这是实现高效 Z 型整体水分离的关键。Z 型反应体系中的光催化剂只需分别满足各自的光激发过程和对应的半反应，这为光催化材料的选择和设计提供了很大的空间。同时 Z 型反应体系表现出宽光谱响应、高稳定性、高光生载流子的分离效率、强氧化还原能力，具有广阔的应用前景。Li 等[48]提出由 Cr_2O_3/Pt/$BaTaO_2N$:Zr、$FeCoO_x$/Ir/$BiVO_4$ 和 $[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$组成的 Z 型水分离系。该系统按比例生成了 H_2 和 O_2，并在接近大气压的 98 kPa 背景氩气压力下实现了 0.08 % 的太阳能制氢效率（STH）；利用 Cr_2O_3 对 Pt/$BaTaO_2N$:Zr 进行表面改性，有效抑制了 $[Fe(CN)_6]^{3-}$ 离子的还原反应且在抑制产物 H_2 和 O_2 反应生成水方面也发挥了关键作用，从而实现了常压下的高效水分离。

2　光催化分解水制氢模拟研究现状

光催化过程是一个涉及辐射场、组分运输、质量和能量平衡的多相反应及流动过程，针对该过程的数值模拟研究因其所处反应器、反应物质、光源、流动条件及催化剂的形态不同而变得复杂。

近些年来，计算流体力学（CFD）已被用于模拟光反应器内流体流动和预测单相或多相光化学反应领域[37−38]。2013 年 Kumar 和 Bansal 首次将 CFD 应用于光催化过程，对将催化剂固载在环形反应器内壁面的光催化降解染料过程进行建模，在假设反应器内部辐射分布均匀且为常数的前提下，建立了染料降解速率与初始浓度、雷诺数和反应时间的多项式，并通过实验对多项式的系数进行拟合[49]。其后也有不少学者利用 CFD 来优化操作参数及反应器的设计。

Boyjoo 等[50]考虑到辐射参与化学反应后光催化颗粒会产生复杂的光散射效应，且其水动力学特性对于评估光催化剂颗粒的相分布至关重要，因此利用 CFD 方法，同时考虑多相流体动力学、光强分布和反应动力学进行建模，讨论了光催化反应器 CFD 建模设置边界条件的影响因素。Ren 等[51]为了提高制氢量建立了光催化反应器的三维耦合数学模型，并通过实验数据进行验证。该框架还为后续光催化反应器的结构设计、工况参数调试提供了参考。Yang 等[52]以 $Cd_{0.5}Zn_{0.5}S$ 为光催化剂，针对带太阳能聚光器的光催化管式反应器建立了计算流体力学模型，从而在欧拉框架内集成了流场、辐射场和反应场。由实验结果得出的氢气产生率用修正的 Langmuir−Hinshelwood 型方程表示，从而得到了与辐射强度、反应温度和反应物浓度无关的本征光催化产氢速率常数；采用离散法结合反应溶液的光学特性求解反应器内的辐射场，分析了反应器内辐射和多相流的分布特征。综合模型的建立为今后光催化反应器的设计改进和系统的优化运行提供了可能。

De Brito Lira 等[53]将 CFD 模型与光反应器的设计相结合，成功预测了不同几何配置的光反应器性能，介绍了整体光反应器、光催化膜反应器和光微反应器在质量和光子传输方面的优势和局限性，通过模拟最大限度增加了污染物和催化剂的接触且提高整个光催化剂表面的光照效率。Moreira 等[54]利用 CFD 方法模拟环形光催化反应器，采用离散有序模型（DOM）和各向同性散射的六通量模型（SFM）求解辐射传输方程（RTE），证实了将辐射传输、流体动力学和反应动力学耦合对光催化反应器进行建模的重要性，并计算出光催化氧化水污染物的反应动力学常数。Yusuf 等[55] 通过模拟太阳辐射估算了循环和单程光催

化微反应器中 4-硝基苯酚光降解的吸附率和表观动力学速率常数；利用 COMSOL Multiphysics 动力学动态传输模型预测了在循环模式下改变 4-硝基苯酚初始浓度对传输过程的影响；通过将三维模型与实验数据进行拟合，估算出吸附和动力学速率常数。研究结果可为未来光催化微反应器在废水处理应用中污染物转化的建模、设计和优化研究奠定基础，所开发的模型为估算污染物的表观动力学常数提供了途径，同时还能简单、快速地筛选光催化剂。Deng 等[56]采用 CFD 模拟方法研究了乙烯在三个环形反应器中的降解过程，利用 ANSYS Fluent 软件对控制方程进行求解，利用实验数据对 U 型反应器的速度进行了验证。Rouhani 等[57]针对紫外-发光二极管光催化降解空气中的化学污染物建立了 CFD 模型，并将其应用于紫外-发光二极管反应器中甲苯的氧化过程。利用该模型可以确定催化剂表面传质过程受限程度最大的位置，且可以优化紫外发光二极管和光催化剂的布置，从而优化反应器性能。Da Silva 等[58]利用动量和质量守恒方程开发 CFD 模型，模拟 TiO_2 涂层光催化反应器中的乙烯降解过程，并将结果与实验值进行比较。利用该模型可以获得乙烯和二氧化碳的转化率、选择性和浓度信息，且与该文献报道的在不同实验条件下使用一维塞流模型的结果相似。Rasul 等[59]利用 CFD 方法研究了挡板的位置和高度对平板光催化反应器中流体流动过程的影响，分析了顶部和底部挡板高度对流体流动的影响，并将模拟结果与实验结果进行了对比。结果表明，两者的流速和入口速度随时间变化的函数关系非常吻合，变化率小于 5%。

3 结束语

尽管目前光催化制氢技术已取得显著发展，但在实验和模拟两个方面仍面临很多挑战。

实验方面首先是催化剂和反应体系仍存在很多问题，比如催化剂在可见光区响应的活性低且几乎都存在光腐蚀现象、使用牺牲剂提高活性但经济性下降、能量转化效率低等问题，这些都阻碍了光解水技术的实际应用。因此高效催化剂的制备仍是提升光催化性能的主要途径。其次，高效反应器的选型与设计也是光催化制氢面临的挑战。虽然不同研究小组设计并制造了具有各种反应室和带有运输通道的气体收集器的光反应器，比如连续流光化学反应器以及其他按照光源照射方式和催化剂存在形式划分的反应器，但是考虑到这些反应器具有各自的安装要求、制造成本和工程可行性方面的限制，仍存在优化空间。

模拟方面主要是通过 CFD 方法模拟光催化制氢过程。这方面的研究成果还不够丰富，因此需要研究人员进一步了解光解水制氢反应机理，采用合适的数学模型描述反应动力学过程，从而为反应器的设计优化以及确定最佳产氢条件等提供指导。

参考文献：

[1] 郑文静. “双碳”政策对能源结构转型的影响及对策优化——基于利益冲突的视角 [D]. 太原: 山西财经大学, 2023.

[2] 孙培锋, 吴守城, 卢海勇, 等. 新能源制氢及氢能应用浅述 [J]. 能源研究与信息, 2021, 37(4)：207－213.

[3] 殷甜甜. 可再生能源发电制绿氢和氢能储运技术现状与发展分析 [J]. 能源研究与信息, 2024, 40(2)：89－93.

[4] KOVAČ A, PARANOS M, MARCIUŠ D. Hydrogen in energy transition: A review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(16)：10016－10035.

[5] 李亮荣, 彭建, 付兵, 等. 碳中和愿景下绿色制氢技术发展趋势及应用前景分析 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(6)：508－520.

[6] HUANG N, LI C, GAN S L, et al. Photosynthesis of hydrogen and its synchronous application in a hydrogen fuel cell: a comprehensive experiment in the undergraduate teaching laboratory[J]. Journal of Chemical Education, 2022, 99(9)：3283－3288.

[7] 李亮荣, 杨小喆, 陈楚欣, 等. 半导体核壳材料光催化剂分解水制氢研究进展 [J]. 无机盐工业, 2023, 55(3)：10－20.

[8] FUJISHIMA A, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972, 238(5358)：37－38.

[9] NAKATA K, FUJISHIMA A. TiO_2 photocatalysis: design and applications[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 2012,

13(3)：169－189.
[10] 吴芝, 孙岚, 林昌健. 太阳能光催化制氢研究进展 [J]. 电化学, 2019, 25(5)：529－552.
[11] 郭叶飞. ZnO、掺杂 ZnO 的制备与光催化性能的研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
[12] 孟无霜. 可见光驱动型 WO_3 基光催化剂的制备及其光降解性能研究 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2022.
[13] XIONG J H, WANG X X, WU J L, et al. In situ fabrication of N-doped ZnS/ZnO composition for enhanced visible-light photocatalytic H_2 evolution activity[J]. Molecules, 2022, 27(23)：8544.
[14] WANG W C, TAO Y, FAN J C, et al. Fullerene–graphene acceptor drives ultrafast carrier dynamics for sustainable CdS photocatalytic hydrogen evolution[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(23)：2201357.
[15] REN Y J, LI Y F, PAN G X, et al. Recent progress in CdS-based S-scheme photocatalysts[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 171：162－184.
[16] 蹇齐燕. CdS 和 g-C_3N_4/CdS 异质结光催化材料的构筑及其分解水制氢性能研究 [D]. 银川: 北方民族大学, 2021.
[17] 张乾坤, 梁海欧, 白杰, 等. CdS 基光催化材料的研究进展 [J]. 化学通报, 2023, 86(10)：1181－1187.
[18] 陈玉芳. g-C_3N_4 基光催化材料的结构调控与性能研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
[19] ZHOU P, NAVID I A, MA Y J, et al. Solar-to-hydrogen efficiency of more than 9% in photocatalytic water splitting[J]. Nature, 2023, 613(7942)：66－70.
[20] 梁慧荣, 郭烈锦. 铜钼基硫氧化物催化剂及其光催化产氢性能 [J]. 太阳能学报, 2009, 30(10)：1331－1334.
[21] 晁明坤, 马贵军. 混合熔盐法低温合成 $Sm_2Ti_2S_2O_5$ 及其光催化分解水产氢 [J]. 无机化学学报, 2021, 37(1)：16－22.
[22] 晏金胜. TaON 的改性及其光催化产氢性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
[23] WU P, SHI J W, ZHOU Z H, et al. $CaTaO_2N$–$CaZrO_3$ solid solution: Band-structure engineering and visible-light-driven photocatalytic hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(18)：13704－13710.
[24] HE J S, LIU P Y, RAN R, et al. Single-atom catalysts for high-efficiency photocatalytic and photoelectrochemical water splitting: distinctive roles, unique fabrication methods and specific design strategies[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(13)：6835－6871.
[25] ZUO Q, LIU T T, CHEN C S, et al. Ultrathin metal-organic framework nanosheets with ultrahigh loading of single Pt atoms for efficient visible-light-driven photocatalytic H_2 evolution[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2019, 58(30)：10198－10203.
[26] CHARLE G, ROQUES-CARMES T, BECHEIKH N, et al. Determination of kinetic constants of a photocatalytic reaction in micro-channel reactors in the presence of mass-transfer limitation and axial dispersion[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2011, 223(2-3)：202－211.
[27] CASTEDO A, URIZ I, SOLER L, et al. Kinetic analysis and CFD simulations of the photocatalytic production of hydrogen in silicone microreactors from water-ethanol mixtures[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 203：210－217.
[28] VISAN A, RAFIEIAN D, OGIEGLO W, et al. Modeling intrinsic kinetics in immobilized photocatalytic microreactors[J]. Applied catalysis B: environmental, 2014, 150-151: 93-100.
[29] XU Y C, YOU H. TiO_2 modified with Ag nanoparticles synthesized via ultrasonic atomization-UV reduction and the use of kinetic models to determine the acetic acid photocatalytic degradation[J]. Applied Surface Science, 2014, 321：481－487.
[30] WANG Z, LIU J, DAI Y, et al. CFD modeling of a UV-LED photocatalytic odor abatement process in a continuous reactor[J]. Journal of hazardous materials, 2012, 215：25－31.
[31] CASADO C, MARUGÁN J, TIMMERS R, et al. Comprehensive multiphysics modeling of photocatalytic processes by computational fluid dynamics based on intrinsic kinetic parameters determined in a differential photoreactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 310：368－380.
[32] KHODADADIAN F, DE BOER M W, POURSAEIDESFAHANI A, et al. Design, characterization and model validation of a LED-based photocatalytic reactor for gas phase applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 333：456－466.
[33] BAHNEMANN D. Photocatalytic water treatment: solar energy applications[J]. Solar Energy, 2004, 77(5)：445－459.
[34] BLANCO J, MALATO S, FERNÁNDEZ P, et al. Compound parabolic concentrator technology development to commercial solar detoxification

applications[J]. Solar Energy, 1999, 67(4-6)：317－330.

[35] PAGLIARO M, KONSTANDOPOULOS A G, CIRIMINNA R, et al. Solar hydrogen: fuel of the near future[J]. Energy & Environmental Science, 2010, 3(3)：279－287.

[36] RUBAN P, SELLAPPA K. Development and performance of bench-scale reactor for the photocatalytic generation of hydrogen[J]. Energy, 2014, 73：926－932.

[37] GOTO Y, HISATOMI T, WANG Q, et al. A particulate photocatalyst water-splitting panel for large-scale solar hydrogen generation[J]. Joule, 2018, 2(3)：509－520.

[38] CAO F, WEI Q Y, LIU H, et al. Development of the direct solar photocatalytic water splitting system for hydrogen production in Northwest China: Design and evaluation of photoreactor[J]. Renewable Energy, 2018, 121：153－163.

[39] 孙尚聪, 张旭雅, 刘显龙, 等. 光催化全解水助催化剂的设计与构建 [J]. 物理化学学报, 2020, 36(3)：1905007.

[40] YAN H J, YANG J H, MA G J, et al. Visible-light-driven hydrogen production with extremely high quantum efficiency on Pt–PdS/CdS photocatalyst[J]. Journal of Catalysis, 2009, 266(2)：165－168.

[41] VELÁZQUEZ J J, FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ R, DÍAZ L, et al. Effect of reaction temperature and sacrificial agent on the photocatalytic H_2-production of Pt-TiO_2[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 721：405－410.

[42] ZENG Z L, SUN L J, LIU H, et al. Should the tubular photocatalytic reactors work continuously or in an intermittent manner instead?[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(12)：4610－4621.

[43] XIAO Y T, XU S S, LI Z H, et al. Progress of applied research on TiO_2 photocatalysis-membrane separation coupling technology in water and wastewater treatments[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(14)：1345－1353.

[44] AUGUGLIARO V, LITTER M, PALMISANO L, et al. The combination of heterogeneous photocatalysis with chemical and physical operations: A tool for improving the photoprocess performance[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 2006, 7(4)：127－144.

[45] 姚林飞. 悬浮型和负载型光催化反应体系的研究进展 [J]. 轻工科技, 2012, 28(7)：41－42,45.

[46] 李平, 李海金, 涂文广, 等. Z 型光催化材料的研究进展 [J]. 物理学报, 2015, 64(9)：094209.

[47] WANG Z, LI C, DOMEN K. Recent developments in heterogeneous photocatalysts for solar-driven overall water splitting[J]. Chemical Society Reviews, 2019, 48(7)：2109－2125.

[48] LI W P, LI H H, MA Y W, et al. Enhanced Z-scheme water splitting at atmospheric pressure with suppression of reverse reactions using Zr-doped BaTaO2N as hydrogen evolution photocatalyst[J]. Journal of Catalysis, 2023, 428：115187.

[49] KUMAR J, BANSAL A. Photocatalytic degradation in annular reactor: Modelization and optimization using computational fluid dynamics (CFD) and response surface methodology (RSM)[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, 1(3)：398－405.

[50] BOYJOO Y, ANG M, PAREEK V. Some aspects of photocatalytic reactor modeling using computational fluid dynamics[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 101：764－784.

[51] REN T, WANG L, CHANG C, et al. Machine learning-assisted multiphysics coupling performance optimization in a photocatalytic hydrogen production system[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 216：112935.

[52] YANG Y, JING D W, ZHAO L. Computational fluid dynamics modeling of reactive multiphase flow for suspended photocatalytic water splitting of hydrogen production system[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 173：115220.

[53] DE BRITO LIRA J O, RIELLA H G, PADOIN N, et al. An overview of photoreactors and computational modeling for the intensification of photocatalytic processes in the gas-phase: State-of-art[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(2)：105068.

[54] MOREIRA R P M, PUMA G L. Multiphysics computational fluid-dynamics (CFD) modeling of annular photocatalytic reactors by the discrete ordinates method (DOM) and the six-flux model (SFM) and evaluation of the contaminant intrinsic kinetics constants[J]. Catalysis Today, 2021, 361：77－84.

[55] YUSUF A, PALMISANO G. Three-dimensional CFD modelling of a photocatalytic parallel-channel microreactor[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 229：116051.

[56] DENG B Q, JIANG Y Z, GAO L, et al. CFD modeling of ethylene degradation in gas-phase photocatalytic

reactors[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(9)：24132－24142.
[57] ROUHANI S, TAGHIPOUR F. Modeling of UV-LED photocatalytic reactors for the degradation of gaseous volatile organic compounds (VOCs) in indoor environments[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(3)：107657.
[58] DA SILVA J C G, ALVES J L F, MUMBACH G D, et al. Photocatalytic degradation of ethylene in tubular microreactor coated with thin-film of TiO_2: mathematical modeling with experimental validation and geometry analysis using computational fluid dynamics simulations[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2023, 196：101－117.
[59] RASUL M G, AHMED S, SATTAR M A, et al. Modelling and analysis of hydrodynamics and flow phenomena of fluid with formic acid as pollutant in the reactive area of a flat plate photocatalytic reactor with top and bottom turbulence promote[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 466：142760.

信息

国产首台抽水蓄能电压源型静止变频器在南宁成功并网

2 月 11 日，国产首台抽水蓄能电压源型静止变频器(SFC)在广西南宁抽水蓄能电站 3 号机组一次性并网成功，主要技术指标优于预期，标志着我国新型抽水蓄能变频器的自主研制取得成功，有力提高了储能产业链和供应链的安全性，促进了新型电力系统构建。

新型静止变频器采取电压源型的全新技术路线，运用先进的控制策略和功率模组设计，显著降低了输出电流中的谐波成分，减少了对电网稳定性的影响。在南宁抽水蓄能电站 3 号机组并网的首台静止变频器，谐波总畸变率仅为 0.9%，远低于 3% 的设计要求。经实测，该电压源型静止变频器控制电机由静止状态到额定转速的加速性能较原有电流源型静止变频器提高了 35% 以上。

世界首台 630 ℃ 火电机组完成单体调试

3 月 10 日，大唐郓城 630 ℃ 超超临界二次再热国家电力示范项目完成单体调试工作，标志着该项目建设取得重要阶段性成果，即将转入机组点火启动阶段。该项目首次工程化应用我国自主研发的 G115 新型耐热钢，攻克高温材料长期依赖进口的“卡脖子”难题；在全球范围内率先将燃煤火电机组蒸汽温度提升至 630 ℃ 等级，推动发电热效率突破 50%，机组主蒸汽压力达 35.5 MPa、供电煤耗低至 256.28 g/(kW·h)，是目前全球压力最高、温度最高、效率最高、煤耗最低的单轴百万 kW 二次再热火电机组。该项目投产后，与常规百万 kW 火电机组相比，每年可节约标准煤约 20.8 万 t，减少 CO_2 排放约 54 万 t，节能降碳效益显著。

长三角首台“华龙一号”核电机组并网发电

3 月 12 日，长三角地区首台“华龙一号”核电机组——中广核浙江三澳核电项目 1 号机组首次并网成功。该机组于 2020 年 12 月 31 日开工建设。并网后经现场确认，机组运行状态良好，各项技术指标符合设计预期。机组后续将进入带负荷试运行阶段，按计划开展功率提升及各项性能试验，预计于 2026 年上半年正式投产发电。

该项目全部建成后，年发电能力预计超 540 亿 kW·h，接近温州市当前全社会用电总量，可满足超 500 万人口的年度生产生活用电需求，每年等效减少标煤消耗超 1 635 万 t，降低 CO_2 排放约 5 000 万 t。

（王　波）