


姓 名	高敦峰	性 别	男	出生年月	1987. 11	
出生地	山东东平	婚姻状况	已婚	政治面貌	中共党员	
国 籍	中国	从事专业 及关键词	物理化学, 电催化			
现工作单位及职位	德国马普学会 Fritz-Haber 研究所 博士后					
人事关系所在单位	中国科学院大连化学物理研究所					
<p>教育经历:</p> <p>(从本科开始按时间正序填写, 内容包括时间、单位、学位、所学专业时间段要连续, 准确到月份, 时间段不连续的需说明原因)</p> <p>2005.09–2009.07 中国石油大学 材料化学 理学学士</p> <p>2009.09–2015.05 中国科学院大连化学物理研究所 物理化学 理学博士</p>						
<p>工作经历:</p> <p>(请按照时间正序填写工作经历、从事专业、专业技术职务情况, 时间段要连续, 准确到月份, 时间段不连续的需说明原因)</p> <p>2015.06-2015.08 中国科学院大连化学物理研究所 临时科研人员</p> <p>2015.09-2018.08 德国波鸿鲁尔大学 博士后</p> <p>2018.09-至今 德国马普学会 Fritz-Haber 研究所 博士后</p>						

如内容较多, 本栏目填不下时, 可另纸接续(下同)。

主要学术成果、创新成果简介（主要阐述申请人取得的研究成果及贡献）：

申请人致力于高效纳米电催化剂的发展以及相关催化反应机理的研究，在国内外较早展开了 CO₂ 电化学还原反应(CO₂RR)研究，并通过先进的原位能谱和光谱表征手段来理解催化剂的活性结构和反应机理。累计发表学术论文 25 篇，其中 15 篇以第一作者(含共同一作)在 *Nature Catal.*, *Acc. Chem. Res.*, *J. Am. Chem. Soc.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, *ACS Nano*, *ACS Catal.*, *Nano Energy* 等国际期刊上，其中三项研究(*JACS* 2015/2017, *ACS Nano* 2017)被选为 ESI 高被引论文，H-因子为 14 (Google Scholar)，并申请 CO₂RR 催化剂相关的专利两项。申请人通过活性位(相)结构的设计、微观反应环境的调变等手段，实现了 CO₂RR 高选择性制备 CO、甲酸以及高附加值烯烃和醇类等燃料和化学品，并揭示了反应机理。

1. 通过设计活性位(相)结构来调变纳米钯催化剂的产物选择性

Pd 通常被认为是一种析氢催化剂，文献报道的多晶 Pd 电极上 CO₂RR 法拉第效率很低。申请人在进行了深入研究后发现并首次报道了 Pd 纳米粒子对 CO₂RR 选择性和活性的独特尺寸效应。在 -0.89 V (vs. RHE, 下同)时生成 CO 的法拉第效率从 10.3 nm Pd 上的 5.8% 增加到 3.7 nm Pd 上的 91.2% (如图 1a 所示)，这种尺寸依赖性显著不同于 Au、Ag、Cu 等金属，同时生成 CO 的电流密度增加了 18.4 倍，质量活性高于通常认为活性最高的 Au 纳米粒子。通过密度泛函理论(DFT)计算，分析了纳米粒子的平面、台阶和角位上 CO₂ 电化学还原和析氢反应的自由能，并建立了反应性能与粒径的关系。生成 CO 的转换频率(TOF)与粒径呈现火山型曲线关系，这表明可以通过改变 Pd 纳米粒子的尺寸来调变 CO₂ 吸附、中间物种 COOH* 的形成以及 CO* 的脱附等，从而实现 Pd 纳米粒子从析氢催化剂到高效 CO₂RR 催化剂的转变(*J. Am. Chem. Soc.* 2015, 137, 4288)。

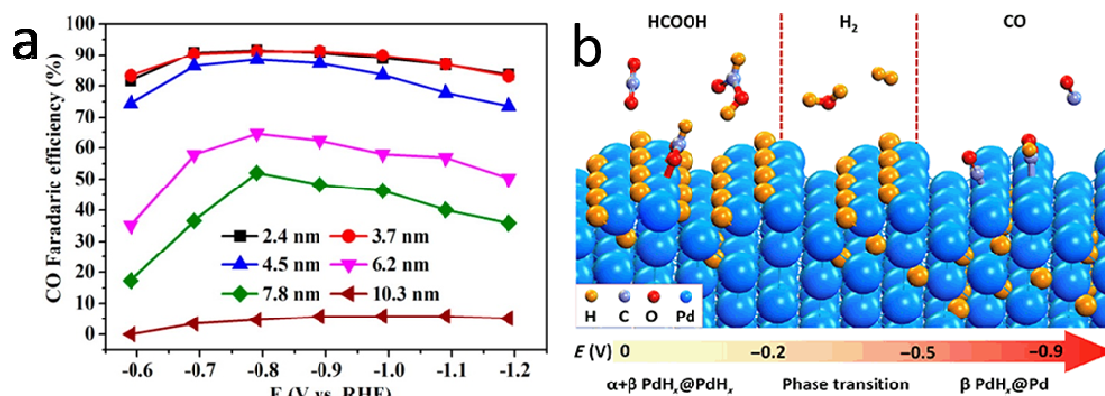


图 1. 纳米 Pd 催化剂的(a)尺寸效应和(b)活性相演变

申请人进一步研究发现 Pd 纳米粒子上的产物选择性具有很强的电势敏感性：在 0.05 V ~ -0.25 V 电势区间 CO₂ 电还原生成甲酸，最高法拉第效率达到 97.8%；而在 -0.45 V ~ -0.9 V 电势区间 CO₂ 电还原生成 CO，最高法拉第效率达到 93.4%。通过电化学原位 X 射线吸收谱、电化学原位红外光谱以及理论计算等研究发现电极电势和 CO 中间产物共同调控了 Pd 纳米粒子的活性相结构(如图 1b 所示)：以 ($\alpha+\beta$)混合相 PdH_x 为核、表面 PdH_x 为壳的活性相高效电还原 CO₂ 为甲酸；以 β 相 PdH_x 为核、金属 Pd 为壳的活性相高效电还原 CO₂ 为 CO。该研究揭示了 CO₂RR

中钯纳米粒子的活性相结构和产物选择性急剧变化的本质(*Nano Res.* 2017, 10, 2181)。申请人在高效纳米钯基 CO₂RR 催化剂的上述创新性研究, 受到了国内外研究同行的广泛关注和引用, 受邀在 *ACS Catal.* 期刊撰写 Perspective 文章(*ACS Catal.* 2018, 8, 1510)。

2. 构建金属-氧化物界面结构促进 CO₂ 吸附与活化

申请人以博士期间所在课题组提出的“纳米限域催化”概念为基础, 设计了具有金属-氧化物界面结构的 Au-CeO_x 催化剂, 在保证 Au 纳米粒子尺寸和形貌相同的情况下, 研究了 Au-CeO_x 界面与 CO₂RR 性能的内在关联。在 -0.89 V 时, Au-CeO_x 催化剂上生成 CO 的法拉第效率达到 89.1%, 远高于单独的 Au(59.0%)或 CeO_x 催化剂(9.8%), 生成 CO 的电流密度是 Au 的 1.6 倍。通过构筑 CeO_x/Au(111)模型催化剂, 利用高分辨扫描隧道显微镜和同步辐射能谱进行原位研究, 发现 Au-CeO_x 界面显著促进了 CO₂ 的吸附与活化, 以及水的存在有利于 CeO_x 表面的还原与表面吸附 CO₂ 物种的稳定。理论计算表明在后续的加氢过程中, Au-CeO_x 界面稳定了关键中间物种*COOH, 从而促进了 CO 的生成和脱附(如上图所示)。这种界面增强的 CO₂ 电催化还原在 Ag-CeO_x 催化体系上得到进一步证实, 表明金属-氧化物界面催化体系在 CO₂ 电化学还原中的普适性。该研究成果首次将界面限域效应用到 CO₂ 电催化还原反应中, 丰富和拓展了该团队提出的纳米限域催化概(*J. Am. Chem. Soc.* 2017, 139, 5652)。目前国内外许多研究组已经跟进开展和报道了更多界面体系用于 CO₂ 电化学还原的研究。

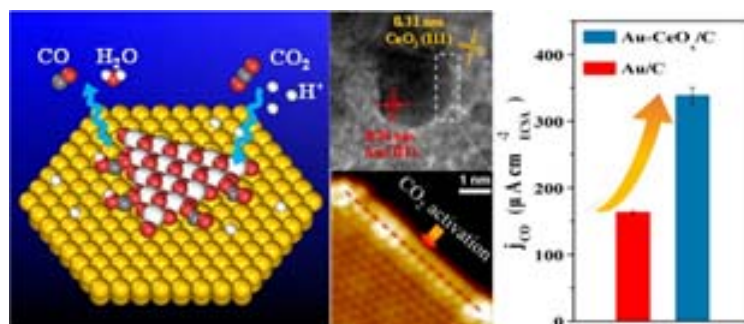


图 2. Au-CeO_x 界面结构促进 CO₂ 吸附与 CO 生成

3. 利用电解质溶剂化效应促进多碳产物的生成

电极-电解质界面是电化学反应发生的位点, 因此理性设计和调变电解质组成是除发展催化剂以外提高催化性能的另一路径。申请人在博士后期间开展了利用电解质溶剂化效应促进 CO₂RR, 旨在可以将 CO₂ 还原为 CO 和甲酸以外的更高附加值的乙烯和醇类等多碳产物(C₂₊)。氧等离子体活化的铜表现出较高的乙烯和多碳醇选择性, 申请人在电解质中添加卤素离子, 可以进一步显著提高 C₂₊产物的电流密度, 同时保持很高的 C₂₊法拉第效率(65%)。这种性能提高主要归因于卤素离子在氧化铜表面吸附的增强(*ACS Catal.* 2017)。通过耦合较大的碱金属(Cs⁺)和卤素(I⁻)离子, 在 -1.0 V 时 C₂₊法拉第效率和电流密度分别达到 69%和 45.5 mA cm⁻², 达到了目前文献最高的 C₂₊生产速率(H 型电解池)。Cs⁺和 I⁻的共同存在显著改变了等离子体活化铜催化剂的表面形貌, 使得一价(Cu⁺)物种以 CuI 粒子形式存在于反应过程中, 促进了碳碳键的耦合(如下图所示)。理论计算表明吸附在铜表面的碱金属离子半径越大, 越有利于稳定 CO*, OCCO*, OCCOH*等碳碳键耦合的中间体, 而次表层物种的存在又促进了碱金属离子的吸附(*ACS Catal.* 2018)

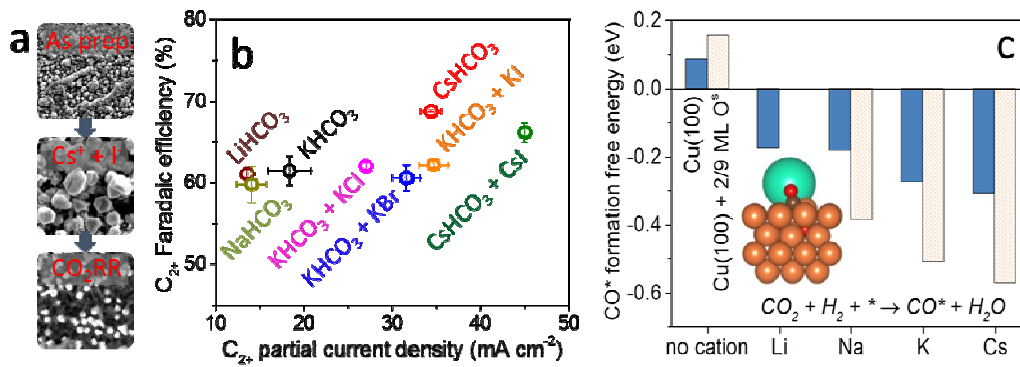


图 3. (a) CuO_x 催化剂在 CO₂RR 过程中的形貌演变, (b) 通过电解质设计提高 C₂₊ 产物的生成, (c) 碱金属离子和次表层物种对生成 C₂₊ 产物

4. 利用电解质驱动的纳米化策略发展高效纳米铜催化体系

申请人基于对电解质溶剂化效应对反应性能的深入理解, 发展了电解质驱动的 CO₂RR 催化剂合成方法, 分别在 KCl, KBr, KI 和 K₂CO₃ 中利用特定的电化学方法氧化铜箔, 得到高 C₂₊ 选择性的纳米铜催化剂, 在 KHCO₃ 中最高 C₂₊ 法拉第效率达到 80% (目前文献最高的 C₂₊ 法拉第效率)。原位 X 射线吸收谱表明这些催化剂中存在少量卤化铜和氧化亚铜物种, 并与 C₂₊ 选择性具有正相关联系。而利用 KCl 制备了铜纳米立方体, 并利用低温等离子体技术, 分别对其进行 O₂, H₂ 和 Ar 等离子体后处理, 调变了铜纳米立方体的形貌 (Cu(100) 晶面和粗糙度) 及铜氧化态 (表面 Cu⁺ 及次表层氧含量)。通过变量控制比较发现, Cu(100) 晶面并不是决定乙烯乙醇等 C₂₊ 产物的唯一因素, 而铜的氧化态甚至起到了更加重要的决定性作用 (如图 4a 所示)。该研究成果首次解决了从铜单晶模型催化剂到具有特定晶面形貌催化剂中多种活性位点复杂性的问题 (*ACS Nano* 2017)。为了进一步排除基底铜箔的影响, 申请人制备了碳负载的尺寸和形貌可控的无表面配体的铜纳米立方体催化剂, 研究发现碳载体上铜纳米立方体选择性的生成甲烷, 准原位 X 射线光电子能谱表明, 这些碳负载的铜纳米结构是纯金属态, 进一步验证了 Cu⁺ 对 C₂₊ 产物生成的重要性。原位电化学原子力显微镜 (EC-AFM) 表征 (如图 4b 所示) 阐明了铜纳米立方体催化剂的失活与反应中表面形貌的演变直接相关 (*Angew. Chem. Int. Ed.* 2018)。

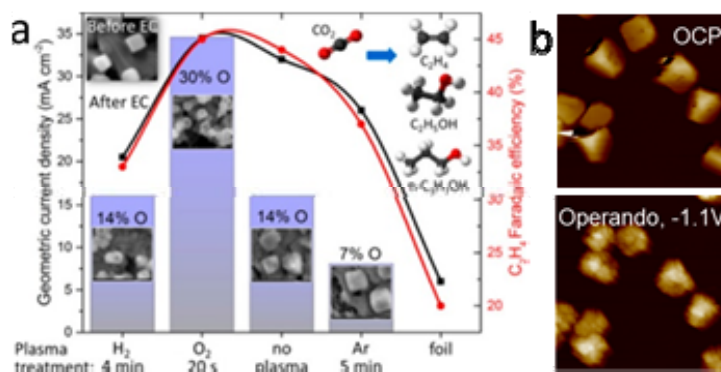


图 4. 铜纳米立方体的 (a) 活性和选择性与形貌、氧化态关系以及 (b) 在反应过程中的形貌演变

主要论著目录:

- (1. 论文作者、题目、期刊名称、年份、卷期、页、总引次数、他引次数、期刊影响因子;
2. 著作: 著者、书名、出版社、年份)

目录列表最后请注明论文总引次数、他引次数、期刊影响因子的查询截止时间和查询数据库。

[#]These authors contributed equally.

1. **Dunfeng Gao**, Rosa M. Arán-Ais, Hyo Sang Jeon, Beatriz Roldan Cuenya, Rational catalyst and electrolyte design for CO₂ electroreduction towards multicarbon products, *Nature Catal.* 2019, DOI: 10.1038/s41929-019-0235-5

2. **Dunfeng Gao**,[#] Hu Zhou,[#] Jing Wang, Shu Miao, Fan Yang, Guoxiong Wang, Jianguo Wang, Xinhe Bao, Size-Dependent Electrocatalytic Reduction of CO₂ over Pd nanoparticles, *J. Am. Chem. Soc.* 2015, 137 (13), 4288–4291. (ESI 高被引论文) 影响因子: 14.357, 总引 276 次, 他引 256 次

3. **Dunfeng Gao**,[#] Yi Zhang,[#] Zhiwen Zhou,[#] Fan Cai, Xinfei Zhao, Wugen Huang, Yangsheng Li, Junfa Zhu, Ping Liu, Fan Yang, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Enhancing CO₂ Electroreduction with the Metal-Oxide Interface, *J. Am. Chem. Soc.* 2017, 139 (16), 5652-5655. (ESI 高被引论文) 影响因子: 14.357, 总引 67 次, 他引 59 次

4. **Dunfeng Gao**,[#] Ioannis Zegkinoglou,[#] Nuria J. Divins, Fabian Scholten, Ilya Sinev, Philipp Grosse, Beatriz Roldan Cuenya, Plasma-Activated Copper Nanocube Catalysts for Efficient Carbon Dioxide Electroreduction to Hydrocarbons and Alcohols, *ACS Nano* 2017, 11(5), 4825–4831. (ESI 高被引论文) 影响因子: 13.709, 总引 57 次, 他引 49 次

5. Philipp Grosse,[#] **Dunfeng Gao**,[#] Ilya Sinev, Hemma Mistry, Fabian Scholten, Beatriz Roldan Cuenya, Dynamic Changes in the Structure, Chemical State and Catalytic Selectivity of Cu Nanocubes during CO₂ Electroreduction: Size and Support Effects, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2018, 57 (21), 6192-6197. 影响因子: 12.102, 总引 7 次, 他引 4 次

6. Rosa M. Aran Ais,[#] **Dunfeng Gao**,[#] Beatriz Roldan Cuenya, Structure- and Electrolyte- Sensitivity in CO₂ Electroreduction, *Acc. Chem. Res.* 2018, 51 (11), 2906–2917. 影响因子: 20.955, 总引 1 次, 他引 1 次

7. **Dunfeng Gao**, Ian T. McCrum, Shyam Deo, Yong-Wook Choi, Fabian Scholten, Weiming Wan, Jingguang G. Chen, Michael J. Janik, Beatriz Roldan Cuenya, Activity and Selectivity Control in CO₂ Electroreduction to Multicarbon Products over CuO_x Catalysts via Electrolyte Design, *ACS Catal.* 2018, 8 (11), 10012–10020. 影响因子: 11.384, 总引 2 次, 他引 1 次

8. **Dunfeng Gao**, Fabian Scholten, Beatriz Roldan Cuenya, Improved CO₂ Electroreduction Performance on Plasma-Activated Cu Catalysts via Electrolyte Design: Halide Effect, *ACS Catal.* 2017, 7 (8), 5112–5120. 影响因子: 11.384, 总引 16 次, 他引 10 次

9. **Dunfeng Gao**, Hu Zhou, Fan Cai, Jianguo Wang, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Pd-Containing Nanostructures for Electrochemical CO₂ Reduction Reaction, *ACS*

Catal. 2018, 8 (2), 1510–1519. 影响因子: 11.384, 总引 14 次, 他引 14 次

10. Zhen Yin,[#] **Dunfeng Gao**,[#] Siyu Yao, Bo Zhao, Fan Cai, LiLi Lin, Pei Tang, Guoxiong Wang, Ding Ma, Xinhe Bao, Highly selective palladium-copper bimetallic electrocatalysts for the electrochemical reduction of CO₂ to CO, *Nano Energy* 2016, 27, 35–43. 影响因子: 13.12, 总引 40 次, 他引 36 次

11. **Dunfeng Gao**,[#] Hu Zhou,[#] Fan Cai,[#] Dongniu Wang, Yongfeng Hu, Bei Jiang, Wen-Bin Cai, Xiaoqi Chen, Rui Si, Fan Yang, Shu Miao, Jianguo Wang, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Switchable CO₂ electroreduction via engineering active phases of Pd nanoparticles, *Nano Research* 2017, 10 (6), 2181–2191. 影响因子: 7.994, 总引 24 次, 他引 20 次

12. **Dunfeng Gao**, Jing Wang, Haihua Wu, Xiaole Jiang, Shu Miao, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, pH effect on electrocatalytic reduction of CO₂ over Pd and Pt nanoparticles, *Electrochem. Commun.* 2015, 55, 1–5. 影响因子: 4.66, 总引 24 次, 他引 14 次

13. **Dunfeng Gao**, Fan Cai, Qinqin Xu, Guoxiong Wang, Xiulian Pan, Xinhe Bao, Gas-phase electrocatalytic reduction of carbon dioxide using electrolytic cell based on phosphoric acid-doped poly benzimidazole membrane, *J. Energy Chem.* 2014, 23 (6), 694–700. 影响因子: 3.886, 总引 13 次, 他引 6 次

14. **Dunfeng Gao**, Fan Cai, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Nanostructured heterogeneous catalysts for electrochemical reduction of CO₂, *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2017, 3, 39–44. 总引 10 次, 他引 2 次

15. **Dunfeng Gao**, Chengcheng Yan, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Pd/C Catalysts for CO₂ Electroreduction to CO: Pd Loading Effect, *J. Electrochem.* 2018, 24 (6), 757–765.

16. Fan Cai, **Dunfeng Gao**, Hu Zhou, Guoxiong Wang, Ting He, Huimin Gong, Shu Miao, Fan Yang, Jianguo Wang, Xinhe Bao, Electrochemical promotion of catalysis over Pd nanoparticles for CO₂ reduction, *Chem. Sci.* 2017, 8, 2569–2573. 影响因子: 9.063, 总引 9 次, 他引 7 次

17. Jing Wang, **Dunfeng Gao**, Guoxiong Wang, Shu Miao, Haihua Wu, Jiayuan Li, Xinhe Bao, Cobalt nanoparticles encapsulated in nitrogen-doped carbon as a bifunctional catalyst for water electrolysis, *J. Mater. Chem. A* 2014, 2, 20067–20074. 影响因子: 9.931, 总引 107 次, 他引 102 次

18. Juan J. Velasco-Vélez¹, Travis Jones, **Dunfeng Gao**, Emilia Carbonio, Rosa Arrigo, Cheng-Jhih Hsu, Yu-Cheng Huang, Chung-Li Dong, Jin-Ming Chen, Jyh-Fu Lee, Peter Strasser, Beatriz Roldan Cuenya, Robert Schlögl, Axel Knop-Gericke, Cheng-Hao Chuang, The role of the copper oxidation state in the electrocatalytic reduction of CO₂ into hydrocarbons, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019, 7 (1), 1485–1492. 影响因子: 6.14, 总引 0 次, 他引 0 次

19. Jing Wang, Haihua Wu, **Dunfeng Gao**, Shu Miao, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, High-density iron nanoparticles encapsulated within nitrogen-doped carbon nanoshell as efficient oxygen electrocatalyst for zinc-air battery, *Nano Energy* 2015, 13, 387–396. 影响因子: 13.12, 总引 129 次, 他引 124 次

20. Xiaole Jiang, Haobo Li, Jianping Xiao, **Dunfeng Gao**, Rui Si, Fan Yang, Yanshuo Li, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Carbon dioxide electroreduction over imidazolate ligands coordinated with Zn(II) center in ZIFs, *Nano Energy* 2018, 52, 345–350. 影响因子: 13.12, 总引 1 次, 他引 0 次
21. Chengcheng Yan, Long Lin, **Dunfeng Gao**, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Selective CO₂ electroreduction over oxide-derived gallium Catalyst, *J. Mater. Chem. A* 2018, 6, 19743–19749. 影响因子: 9.931, 总引 0 次, 他引 0 次
22. Fan Cai, **Dunfeng Gao**, Rui Si, Yifan Ye, Ting He, Shu Miao, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Effect of metal deposition sequence in carbon-supported Pd-Pt catalysts on activity towards CO₂ electroreduction to formate, *Electrochem. Commun.* 2017, 76, 1–5. 影响因子: 4.66, 总引 7 次, 他引 6 次
23. Jiayuan Li, Jing Wang, **Dunfeng Gao**, Xingyun Li, Shu Miao, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Silicon carbide supported iron nanoparticles encapsulated in nitrogen-carbon for oxygen reduction reaction, *Catal. Sci. Tech.* 2016, 6, 2949–2954. 影响因子: 5.365, 总引 8 次, 他引 7 次
24. Xiaole Jiang, Fan Cai, **Dunfeng Gao**, Jinhua Dong, Shu Miao, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Electrocatalytic reduction of carbon dioxide over reduced nanoporous zinc oxide, *Electrochem. Commun.* 2016, 68, 67–70. 影响因子: 4.66, 总引 25 次, 他引 20 次
25. Jiayuan Li, **Dunfeng Gao**, Jing Wang, Shu Miao, Guoxiong Wang, Xinhe Bao, Ball-milling MoS₂/carbon black hybrid material for catalyzing hydrogen evolution reaction in acid medium, *J. Energy Chem.* 2015, 24 (5), 608–613. 影响因子: 3.886, 总引 7 次, 他引 6 次

以上目录中的论文总引累计 844 次、他引累计 745 次, 引用次数和期刊影响因子来源 Web of Science core collection, 查询截止时间 2019.03.01

申请专利:

1. 金属-氧化铈催化剂的制备及其在二氧化碳电催化还原中的应用, 汪国雄, **高敦峰**, 姜晓乐, 包信和, 专利申请号 2015102406692
2. Größen- und formdefinierte lösemittelgesteuerte Nano-Strukturierung von Oberflächen und Nanopartikel-Synthese (Size- and Shape-Dependent Solvation-Controlled Nanostructuring of Surfaces and Nanoparticles - Synthesis), Philipp Grosse, **Dunfeng Gao**, Beatriz Roldan Cuenya, German patent: 10 2017 011 341.6

已承担或正在承担的科研项目：

(项目来源、项目名称、经费、个人在其中的作用)

1. 国家自然科学基金, 21103178, 参与 经费 25 万元
2. 国家 973 计划, 2012CB215502, 2013CB933103, 参与, 经费分别是 164.6 万元和 124 万元
3. 德国科学基金(DFG), RESOLV (EXC 1069), 参与
4. 德国联邦教育及研究部(BMBF), CO2EKAT (03SF0523C), 参与
5. 德国科学基金(DFG), Plasma Catalysis (SFB 1316), 参与

重要科研获奖情况:

(项目名称、奖项、获奖时间、本人在其中的作用及排名、获奖总人数)

担任国际学术会议重要职务及在国际学术会议做大会报告、特邀报告情况, 其他获奖及荣誉称号情况:

获各类荣誉奖情况:

2015 “大连化物所延长石油三等奖学金”, 中国科学院大连化学物理研究所

2015 “大连市自然科学优秀学术论文特等奖”, 大连市科协

2012 “优秀学生干部”, 中国科学院大学

2009 “山东省优秀毕业生”, 山东省人事厅

2008 “中国石油大学一等奖学金”, 中国石油大学

2007 “国家奖学金”, 教育部

2006 “中国石油大学二等奖学金”, 中国石油大学

期刊审稿人:

ACS Catalysis

Communications Chemistry

Chemical Communications

Frontiers in Chemistry

Catalysis Communications

Catalysts

Applied Science

Surfaces