

# 高压 CO<sub>2</sub> 喷射钻井高效破岩及携岩基础研究

## 公示材料

一、项目名称

高压 CO<sub>2</sub> 喷射钻井高效破岩及携岩基础研究

二、推荐单位意见

- 1、提名单位：西南石油大学
- 2、提名意见：提名该项目为 2025 年度四川省自然科学奖。

三、主要完成人

| 序号 | 姓名  | 技术职称/职务                        | 完成单位           | 工作单位           |
|----|-----|--------------------------------|----------------|----------------|
| 1  | 蔡灿  | 研究员/副院长                        | 西南石油大学         | 西南石油大学         |
| 2  | 陈浩  | 讲师/无                           | 西南石油大学         | 西南石油大学         |
| 3  | 王海柱 | 教授/油气资源与工程<br>全国重点实验室常务<br>副主任 | 中国石油大学<br>(北京) | 中国石油大学<br>(北京) |
| 4  | 胡毅  | 副教授/无                          | 武汉大学           | 武汉大学           |
| 5  | 杨显鹏 | 研究实习员/无                        | 西南石油大学         | 西南石油大学         |

四、主要完成单位

西南石油大学、武汉大学、中国石油大学（北京）

五、项目简介

深部地层蕴藏丰富的地热能与油气资源，是保障国家能源安全、实施“深地探测”战略的关键领域。然而，深部钻井面临机械钻速低、钻头热磨损快、井筒清洁困难等一系列世界性工程难题，亟需在高效钻井破岩力学、携岩机制与井底多相流等关键基础理论与方法上取得突破。与传统水基钻井液不同，高压 CO<sub>2</sub> 射流辅助钻井技术被 J.J.Colle、沈忠厚院士等学者视为极具潜力的下一代钻井技术。项目组在国内外首次系统开展了“高压 CO<sub>2</sub> 喷射钻井高效破岩及携岩”基础理论研究，依托国家 973 计划、国家自然科学基金优秀青年基金等重大项目，围绕 CO<sub>2</sub>在井底环境中射流相变与流动行为、射流-单齿协同破岩与携岩机制以及非球形岩屑复杂运移规律三大科学基础问题，综合采用理论建模、实验创新与数值模拟相结合的研究方法，取得以下系统性、原创性科学发现：

1、建立了高压 CO<sub>2</sub>射流双精度有限差分求解方法和半解析理论模型，首次揭示了在井底温压环境下射流流场结构、相变行为与激波的演化规律。首次构建了高压 CO<sub>2</sub>射流-PDC 齿协同作用的斜射流分区理论模型及有限差分高效算法，攻克了可压缩、相变射流模拟收敛难、精度差的难题，将流场分析速度从小时级提升至秒/分钟级，实现了对马赫盘、激波及相

变行为的精准捕捉，有力支撑了高压 CO<sub>2</sub> 射流喷射钻井工艺设计的基础理论。

2、揭示了高压 CO<sub>2</sub>射流协同 PDC 齿破岩的力学-热力耦合作用机制，阐明了射流“预损伤-实时携岩-主动冷却”三重增效原理。自主研制了国际首台回转高压射流-机械复合破岩试验系统，获得了复合破岩过程中的切削力演变、温度场分布与破岩形貌特征，在国际上首次揭示了高压 CO<sub>2</sub>射流与 PDC 切削齿协同破岩的力学-热力耦合作用机理，创建了射流-PDC 齿协同破岩与携岩的 SPH-FEM 耦合数值计算方法，首次揭示了 CO<sub>2</sub>射流-PDC 齿协同破岩与携岩的“预损伤岩石-实时运移岩屑-主动冷却齿体”三重增效原理，使 PDC 齿平均切削力降低 27%、最高切削温度下降超过 50℃。

3、首创了基于真实岩屑形态的 CFD-DEM 双向耦合数值模拟方法，揭示了非球形岩屑在复杂井底流场中的运移机制与“涡旋助推-流场调控”的携岩增强机理。采用 DEM 离散元方法揭示了岩石破裂形成至岩屑运移的细观机制，突破了传统球形颗粒简化模型的局限，首创了基于真实岩屑三维形态的高压 CO<sub>2</sub>射流 PDC 钻头携岩试验平台及 CFD-DEM 双向耦合数值方法，系统揭示了“涡旋助推-流场调控”的携岩增强机制。

项目成果在 JPSE、SPE Journal 等国内外高水平期刊发表 SCI/EI 论文 105 篇，获授权发明专利等 36 件，6 篇代表性论文他引 418 次，单篇他引最高 143 次，知网高 PSI 论文 5 篇，SPE J 主编 Hughes, Stacie 评价代表性论文“I believe it is new and it makes sense to reduce temperature of PDC cutters in drilling.”。科技查新显示该项目在上述国内外文献检索范围内未见相同研究的文献报道。以李根生院士、罗治斌教授、黄中伟教授等组成的 973 项目验收专家组认为该成果属于原创性成果，被推荐为 973 项目重大研究成果之一。彭苏萍院士牵头专家组鉴定为“该成果整体达到国际先进水平，其中高压 CO<sub>2</sub>射流-PDC 齿的复合破岩机理方面达到国际领先水平”。

六、代表性论文专著目录

| 序号 | 论文（专著）<br>名称/刊名<br>/作者  | 年卷页<br>码<br>(xx 年<br>xx 卷<br>xx 页)           | 发表时<br>间（年<br>月<br>日） | 通讯作<br>者（含<br>共同） | 第一<br>作者<br>（含<br>共同） | 国内作者                               | 他引<br>总次<br>数 | 检索数<br>据库                       | 论文署<br>名单位<br>是否<br>包含<br>国外<br>单位 |
|----|---|--|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 1  | 单齿冲击作用下破岩<br>机制分析/岩土力学/<br>蔡灿、伍开松、廉<br>栋、袁晓红  | 2015 年<br>第 36 卷<br>1059-<br>1666+16<br>75 页 | 2015<br>年 6 月<br>19 日 | 蔡灿                | 蔡灿                    | 蔡灿、伍<br>开松、廉<br>栋、袁晓<br>红          | 48            | CNKI<br>、SCI                    | 否                                  |
| 2  | Mechanism of<br>supercritical carbon<br>dioxide (SC-CO <sub>2</sub> )<br>hydro-jet<br>fracturing/Journal of | 2018 年<br>第 26 卷<br>第 575-<br>578 页          | 2018<br>年 7 月<br>1 日  | 康勇                | 蔡灿                    | 蔡灿、康<br>勇、王晓<br>川、胡<br>毅、陈<br>浩、袁晓 | 111           | CNKI<br>、<br>SCI、<br>SCOP<br>US | 否                                  |

|     |  |                            |                 |     |     |                       |     |                 |   |
|-----|--|----------------------------|-----------------|-----|-----|-----------------------|-----|-----------------|---|
|     | CO <sub>2</sub> Utilization/Can Cai, Yong Kang, Xiaochuan Wan, Yi Hu, Hao Chen, Xiaohong Yuan, Yang Cai  |                            |                 |     |     | 红、蔡阳                  |     |                 |   |
| 3   | Experimental and theoretical analysis of a supercritical carbon dioxide jet on wellbore/ Yi Hu, Yong Kang, Xiaochuan Wang, Xiaohong Li, Man Huang, Mingxing Zhang  | 2016 年第 36 卷 108-116 页     | 2016 年 11 月 1 日 | 康勇  | 胡毅  | 胡毅、康勇、王晓川、李晓红、黄满、张明星  | 51  | NKI、SCI、SCOP US | 否 |
| 4   | Composite rock-breaking of high-pressure CO <sub>2</sub> jet polycrystalline-diamond-compact (PDC) cutter using a coupled SPH/FEM Model/ International Journal of Mining Science and Technology/ Can Cai, Pei Zhang, Daping Xu, Xianpeng Yang, Yingfang Zhou | 2022 年第 32 卷 第 1115-1124 页 | 2022 年 9 月 1 日  | 蔡灿  | 蔡灿  | 蔡灿、张沛、徐大萍、杨显鹏         | 50  | NKI、SCI、SCOP US | 是 |
| 5   | 超临界 CO <sub>2</sub> 连续油管钻井可行性分析/石油勘探与开发/沈忠厚、王海柱、李根生  | 2010 年第 37 卷 743-747 页     | 2011 年 1 月 7 日  | 王海柱 | 沈忠厚 | 沈忠厚、王海柱、李根生           | 143 | CNKI、SCI        | 否 |
| 6   | 高压 CO <sub>2</sub> 射流—PDC 齿复合破岩流场及携岩增强机理/天然气工业/蔡灿、高超、王海柱、蒲治成、谭政博、杨显鹏   | 2021 年第 41 卷 第 101-108 页   | 2021 年 11 月 5 日 | 高超  | 蔡灿  | 蔡灿、高超、王海柱、蒲治成、谭政博、杨显鹏 | 15  | CNKI、SCI        | 否 |
| 合 计 |  |                            |                 |     |     |                       | 418 | /               | / |

