

· 科学论坛 ·

陆相中低熟页岩油富集与原位转化 科学问题及关键技术*

赵文智¹ 赵阳升² 李根生³ 胡素云¹ 朱如凯^{1**}
卞从胜¹ 刘伟¹ 李永新¹ 于晟⁴ 任建国⁴

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 太原理工大学, 太原 030024
3. 中国石油大学(北京), 北京 102249
4. 国家自然科学基金委员会 地球科学部, 北京 100085

[摘要] 围绕第 281 期双清论坛主题, 本文回顾了陆相中低熟页岩油富集与原位转化研究现状, 从陆相页岩油概念与类型、富有机质页岩形成机理、原位转化反应与传热机制、原位转化流动机制与原位开发技术五方面总结归纳了近年来的主要研究进展。从陆相有机质超量富集的环境响应与地质模型、陆相有机质超富段母质结构、能量场与产出物构成和固、液、气相有机质多相态、多场耦合流动机理三个方面归纳了关键科学问题与技术需求, 并提出了五方面研究面临的难点和挑战, 梳理了未来研究重点方向和国家自然科学基金资助的目标。

[关键词] 陆相; 中低熟; 页岩油; 富集机理; 原位转化

党中央、国务院高度关注我国能源安全问题。2020 年 4 月, 中央政治局会议首次提出“六保”要求, 保能源安全已成为关乎国计民生的重大国家战略。据国家能源局油气战略研究中心预测, 30·60“双碳”(碳达峰与碳中和)目标下, 我国油气需求量依然难以自给, 其中 2060 年碳中和环境下, 我国石油需求量达 2.3 亿~2.4 亿吨, 天然气需求量超过 3900 亿立方米, 均高于我国油气自产能力。目前, 我国原油年产 2 亿吨难度已经很大, 面临挑战很多。习近平总书记 2020 年 9 月在科学家座谈会上指出, “能源资源方面, 石油对外依存度达到 70% 以上, 油气勘探开发、新能源技术发展不足”。寻找油气勘探开发重大接替领域, 努力实现我国油气产量双倍增, 对保障国家能源安全具有重要意义。从全球地缘政治形势发展看, 未来 10~15 年是中美博弈和对抗的关键期, 因此也是我国能源安全面临挑战最严峻的时期。宜千方百计拓展油气资源勘探领域, 积极准



赵文智 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 中国工程院院士, 石油地质与油气勘探专家, 国家油气战略研究中心专家委员会主任、IGCP 中国国家委员会委员, 长期从事油气成藏理论和评价技术研究及勘探实践, 是近年来我国油气勘探新领域突破的主要开拓者之一。曾获国家科学技术进步奖一等奖、李四光地质科技奖、孙越崎能源大奖、何梁何利科技创新奖和中国石油杰出科技工作者奖等。出版学术专著八部, 发表科技论文 230 余篇。



朱如凯 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事沉积储层和非常规油气地质研究, 担任中国地质学会沉积地质专业委员会副秘书长、中国矿物岩石地球化学学会理事、石油地质勘探专业标准化委员会委员兼标准化委员会秘书长。近五年发表论文 42 篇, 出版专著 9 部, 授权发明专利 19 件, 获省部级奖 14 项。

备可实现我国油气产量规模增长的接替方向和

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-03-07

* 本文根据第 281 期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: zrk@petrochina.com.cn

目标。

尽管能源转型的趋势已经显现,但实现路径和转型节奏却存在较大不确定性和多选择性。当前,世界石油日消费量达 1 亿桶之多,加之世界各国发展水平不一,特别是处于全球经济发展最快的中国、印度和越南等国家,社会工业化程度与物质文化生活水平都远未达到西方发达国家水平,还处于发展中,所以化石能源替代需要一个较西方国家更长的历程。按国际可再生能源机构(IRENA)预测,到 2050 年化石能源仍将占全球一次能源供应总量的 20%。国际能源署(IEA)和石油输出国组织(OPEC)于 2020 年预测,到 2040 年,世界石油需求量每天不会低于 1 亿桶,且在较长时期内处于稳定状态。特别在各国的国防、航空、航海及货运等领域,石油需求难以被全部替代。而化工行业的用油需求将明显增长。未来石油作为燃料被替代的节奏会加快,但作为原料以生产更高附加值的化工材料的需求会更有前景,需求量会更高。总之,虽然全球能源转型的曙光已经出现,但石油和天然气在从化石能源向清洁能源体系转型中仍将发挥重要作用,特别是在我国能源转型发展过程中,石油的地位始终处于积极推进、努力加快发展状态。

原油产量 2 亿吨是保我国油气安全的“压舱石”,如能在 2 亿吨基础上大规模上产就是中国版的“能源革命”。美国海相页岩革命既推动实现了美国能源独立,也改变了世界油气供应版图与地缘政治格局。中国陆相中低熟页岩油存在一场革命的新机遇,一旦取得突破,将带来我国原油产量大规模增长。

中低熟页岩油资源潜力巨大,据估算,布伦特油价 60~65 美元/桶条件下,我国经济可采资源量为石油 200 亿~250 亿吨、天然气 20 万亿~25 万亿立方米。原位转化是实现中低熟页岩油工业化开发的可行技术,技术的成熟程度近 95%。且先导试验在国外已有成功经历,国内先导试验正在自组织推进中,主要由中石油在组织实施,分别在鄂尔多斯和松辽两个盆地进行。如果中低熟页岩油先导试验获得成功,预计我国原油产量将会在年产 2 亿吨基础上出现大幅度增长,届时我国原油对外依存度将会显著下降,能源安全形势将会大大改善^[1]。

1 中低熟页岩油富集与原位转化的研究现状

1.1 陆相页岩油的基本类型与地质特征

陆相页岩油是指埋藏深度大于 300~500 m、 R_o

值大于 0.5% 的陆相富有机质页岩层系中赋存的液态石油烃和多类有机物的总称,包括地下已经形成的石油烃、各类沥青物和尚未热降解转化的固体有机质。页岩油不同于油页岩油,后者是指埋藏深度小于 300~500 m、含有丰度极高的尚未转化为液态石油烃的有机质页岩层,其中多数有机物以固态形式存在^[2]。按照有机质丰度和热成熟度,陆相页岩油可划分为中低熟页岩油和中高熟页岩油两大类型(图 1),二者地质特征明显不同。中低熟页岩油具有可转化资源潜力巨大、滞留液态烃油质偏稠、可动油比例偏低、固体有机物占比高、常规压裂改造技术难以适用等特征。有机质热成熟度不高, R_o 值多小于 1.0%,有机碳含量一般大于 6%。中低熟页岩油以重质油、沥青和尚未转化的有机质为主,必须采用地下原位加热转化技术,才能获得经济产量。

中高熟页岩油具有以成熟的液态石油烃为主、油质较轻、可动油比例较高、依靠常规水平井和压裂技术可开发动用等特征。有机质热演化程度较高, R_o 值多大于 1.0%,以 1.0%~1.4% 为最佳,有机碳含量一般大于 2%。液态烃多赋存于页岩的页理、微裂缝、构造缝以及建设性成岩作用形成的次生孔隙中,以中质—轻质油为主,保存条件较好情况下的气油比相对较高、可流动性较好、地层压力系数多大于 1.2。

1.2 富有机质页岩形成机理

富有机质页岩在浅水与深水环境均可规模发育,受气候韵律性和水动力条件、物源混积、有机质

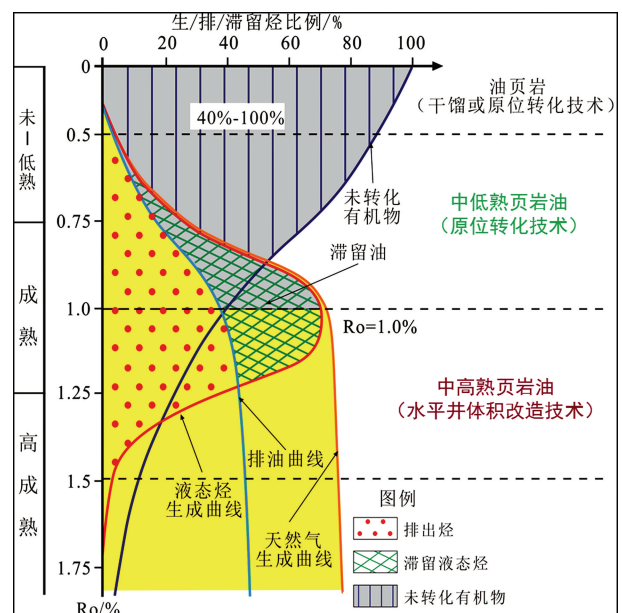


图 1 页岩生、排、滞留烃模式

絮凝等多因素影响,页岩层系广泛发育纹层构造。富有机质页岩的形成受原始有机物生产力和同沉积期及后期保存条件的双重控制。有4种机制可导致有机质富集:一是火山灰沉落与深部热液注入导致的“肥沃效应”;二是放射性物质促生物超量超速生长,提高生烃能力;三是咸化与水体分层利于有机质高效率捕获和保存;四是深水厌氧环境与低沉积速率确保有机物堆积不被稀释^[3, 4]。

火山喷发是导致地球表层发生重大变化的关键过程之一,火山喷发携带的酸性气体及火山灰表面盐类的溶解、有毒元素的释放驱动了水体酸化和生物大量死亡,这一系列地球化学过程又可以显著影响烃源岩中的有机质富集程度和类型。

几乎所有富有机质页岩均富铀,测井曲线显示高自然伽马值。铀在放射性衰变过程中释放的粒子和能量对生物生长和有机质向烃类转化均有促进作用。适当高浓度的富氮磷营养物质和放射性物质能够促进蓝细菌的生长,提高古生产力。生烃模拟实验揭示铀的参与可提高烃源岩生烃产率,表现为总烃量增加,并可降低烃源岩生烃门限温度,即在相对较低热演化阶段便可生成液态烃。

咸化水体可以促进有机质絮凝,进而提升有机质捕获效率。物理模拟实验结果表明,当盐度从1%增加到3%时,有机质捕获效率提高300%;当沉积物浓度从2%上升至4%时,有机质捕获效率提高100%。同时,咸化湖盆易产生水体分层,可以保持相对良好的缺氧还原环境,利于有机质堆积与保存^[4, 5]。

湖盆水体低含氧量和厌氧环境对有机质保存和富集必不可少。剖面 and 钻井资料揭示长7段沉积速率偏低,低陆源碎屑补偿速度对有机质稀释作用降低,有利于富有机质页岩的形成。

1.3 原位转化技术与传热机制

壳牌、埃克森美孚、道达尔等多家国际大石油公司非常重视页岩资源开发利用,很早就致力于页岩(R_o 值小于0.5%)原位转化技术研发和现场试验。目前以壳牌的原位转化技术最成熟。从各油公司原位转化技术内涵看,小井距水平井(水平井井距6~20 m)、井眼轨迹精确控制技术、加热管、自控温技术与加热方式等是原位转化技术的核心。统计全球10余家公司的原位加热方式,主要有热传导、对流+传导、辐射+传导等3种(表1)。壳牌致力页岩原位加热转化技术研发,已有20余年的室内和现场试验历史,累计投入研发经费约30亿美元,

在美国科罗拉多州、加拿大阿尔伯达省、约旦等地进行了38个井组现场试验,技术成熟度超过90%,加热工艺与关键设备等技术难题基本得到解决^[6-8]。

国内也非常关注油页岩及中低熟页岩油资源开发利用问题,原位转化技术研究也有新进展。

(1) 电加热原位开采技术。2013年以来,中国石油勘探开发研究院与壳牌合作,对准噶尔盆地二叠系芦草沟组页岩和鄂尔多斯盆地延长组长7段富有机质页岩开展基础研究,经过近5年攻关,在原有技术基础上,针对中国陆相中低熟富有机质页岩特点,研究提出利用地下“水平井电加热轻质化”高效转化技术,开发利用页岩油资源。该技术的优点是技术较成熟、采出率高,可达60%~70%、油品质量好;但也存在工艺复杂、周期长、国内技术尚在发展初期阶段且成熟度不够等缺点。(2) 高温气体热对流原位开采技术。2014年,众城公司利用该技术对吉林省扶余一长春岭青山口组页岩开展油页岩原位转化+化学干馏先导试验,初试期间产油5.20吨,中试期间产油8.86吨。该技术具有气体介质导热速度快、钻井数量较少,工艺相对简单等优点,但热能波及范围较小、需压裂、传热能力较差,安全性有待考证,且成本高。(3) 热化学反应原位开采技术。2015年,吉林大学与以色列合作,开展近临界水法(SCW)油页岩原位转化先导试验,产出了少量原油。该技术的优势是采用自加热模式,反应启动后仅需少量外部能源,并可通过注入C、H类化合物,促进干酪根转化,且工艺相对简单,较安全。缺点是需井筒内加热,要求加热器功率大、稳定性高,成本高^[9, 10]。(4) 油页岩原位注热开采技术,以太原理工大学为代

表1 油页岩原位转化加热方式基本情况表

加热方式	公司	方法
热传导	Shell	电加热棒加热
	EGL	蒸汽循环管线加热
	IEP	燃料电池棒加热
	美孚石油	电介质加热
对流+传导	PetroProbe	热有机气体加热
	Mountain West	
	雪佛龙	热CO ₂ 气体加热
辐射+传导	雷神	电磁波
	LLNL	
	凤凰石油	微波加热

表。首先在地面布置施工井群,钻井达至油页岩矿层段,对群井压裂,使注汽井与产油井连通。通过地面管网将温度 $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过热锅炉蒸气通过注汽井注入油页岩矿层中,使油页岩矿层有机质受热分解形成油气。然后通过低温蒸气或冷凝水将油气采至地面,再经过换热器使油气水分离^[11, 12]。

1.4 页岩油原位转化的流动机制

富有机质页岩中一般具有较高含量的黏土矿物,黏土矿物直径小,比表面积大,对有机质有较强的吸附作用和催化作用。黏土矿物对页岩油赋存、运移也起重要作用,黏土矿物吸附是页岩油的主要赋存状态之一。在蒙脱石向伊利石转化过程中,层间水的析出有助于原油的初次运移,层间距减小有利于降低其膨胀性,增大储层孔隙度与渗透率,提高石油的天然气的运移能力。黏土矿物表面还能选择性吸附原油重质组分形成“黏土—油絮凝体”,而轻质组分则容易从其表面解吸,使油的粘附性降低,也有利于初次运移。

原位转化过程中干酪根热解反应、孔隙和裂缝演化影响储层微纳多孔隙骨架结构,从而进一步影响微纳受限空间中油/水/气多相多组分流动与传热规律。胥蕊娜等基于微纳多孔介质中的吸附、相变和多相多组分输运问题开展研究,发现纳米通道中流体毛细流动、毛细驱替显著低于常规通道流动,当通道小于 100 nm 时, $\text{CO}_2\text{—C}_{10}$ 混相压力逐渐大幅度提高。纳米孔隙孔径降低了气体凝聚压力,在纳米孔隙中出现相变。提出多孔介质中热量传递的三方方程模型,实现了纳米单通道、多孔结构制备以及微纳多孔内流体相界面和速度场的定量表征^[13]。研究结果初步揭示了受限效应对多孔介质内流体物性以及热质传递的影响规律,为页岩油原位转化中复杂热质传递过程的深入认识提供了前期研究基础。

1.5 中低熟页岩油原位开发技术

中低熟页岩油原位转化面临单井产量低、能量投入较大、经济效益比较差的挑战,国内众多学者正致力探索高效、经济的中低熟页岩油原位开发新技术。李根生等基于提高页岩油原位转化的开发效率角度提出了径向井立体压裂原位开采新技术,并开展了现场试验和建模研究,该技术通过垂直井眼多层次沿径向钻出多条水平井眼,实施立体压裂、注入高温流体或助燃剂原位燃烧加热方式,期望达到提高加热速度,缩短开发周期,增加单井产量,提高经济效益^[14, 15]。

郭烈锦等基于多年的超临界水多相流研究成果,提出可建立注超临界水页岩油地下原位转化与高效无污染开采新技术。该技术需解决的关键多相流科学问题包括三个方面,一是超临界水中油气水多相流体相态及热化学转化机制,二是超临界水原位转化过程中多尺度多相渗流,三是原位转化过程中页岩油藏多物理场动态演变规律^[16]。

中低熟页岩油加热原位改质中,不仅需要快速加热,更需要均衡加热以提高开发效率。邱爱慈等基于高电压大电流脉冲功率与放电等离子体技术,研发了可控冲击波技术,以单点重复多次、分时多点连续的方式对待加热层反复进行冲击,既可以利用冲击波的强度致裂页岩层,还可以利用多次冲击的疲劳效应扩展页岩层的裂隙。在对页岩层实施加热前,首先利用可控冲击波对页岩层实施整体无水改造,各向同性的冲击波作用可在页岩层产生全方位的复杂微裂隙系,可以扩大热工质对页岩层的加热体积、提高加热速度和加热效率^[17-19]。

吴青等基于靶向化学反应的重油原位增效低碳开采改质一体化技术在超重油开采方面应用效果良好,包括催化剂体系、靶向化学反应体系、室内实验验证及油藏数值模拟研究等,其在化学反应较大幅度提升热采效果的同时,化学反应产物因属于重油的稀释类溶剂而具有进一步增强采收率效果,既较大幅度减少二氧化碳排放,还增加了原油的产量并改善了重油品质,从而实现开采—改质一体化。以加拿大 Long Lake 油田为模型通过数值模拟计算,初步核算实施该技术后相对于常规技术,单井注入蒸汽量减少 30% 以上,采收率可以提高 $7\%\sim 10\%$ ^[20]。

2 中低熟页岩油富集与原位转化的关键科学问题

基于上述研究现状和进展,结合陆相中低熟页岩油富集和原位转化关键点,认为核心科学问题是陆相有机质超量富集成因、母质结构与原位转化动力学。包括了三个方面的科学问题。

一是陆相有机质超量富集的环境响应与地质建模,回答有机质超量富集的主控因素,建立地质模型,指导选区选段,具体包括放射性物质^[1, 21]、深部热液、气候、海侵等因素与生物超量繁盛关系;沉积速率、外源物质输入、内源沉积贡献与有机质富集关系;不同成岩阶段黏土矿物成分、含量、晶格、孔隙结构等演化及其对有机质吸附作用的影响;富集段/区

形成机理和关键参数量化赋值的富集层定量评价方法等。

二是陆相有机质超富段母质结构、能量场与产出物构成,主要回答有机质热转化能量场与产出物构成图谱,指导最佳开采方式选择,具体包括有机质超量富集段母质结构类型、组成与形成机制;有机质分布均质与非均质性、滞留烃数量与有机质吸附性、丰度;不同母质类型有机质的能量密度分布及其控制因素;不同温度场下有机质产出物的构成图谱与最佳温度场的选择等。

三是有机物固/液/气多相态/多场耦合动力学与流动过程,回答制约中低熟页岩油最佳流动问题,指导采收率、资源潜力、经济性与富集区选择。具体包括多相多场及复杂岩性组合热传导机制与多相态烃类增能流动机理;地下原位转化增能临界温度及非稳态传热耦合作用规律;地下原位转化后中低熟页岩油及矿体物性变化规律;高温覆压页岩力学特性及渗流通道生成机理;高温状态下页岩岩心中多相渗流和传热规律;提高传热传质效率、增加控制体积和换热效率的方法等。

3 陆相中低熟页岩油富集与原位转化的研究难点和挑战

3.1 有机质超量富集的环境响应

有机质超量富集是在特定的环境下形成的,包括烃源岩形成的气候与水体环境、火山与热液等物质的作用、海侵和重力流等事件的影响,以及黏土矿物等与有机质絮凝和吸附等作用。研究表明,全球重大气候变化和重大生物事件对于烃源岩沉积具有重要控制作用,如几大冰期和极热事件后通常对应烃源岩的集中发育,黑色页岩的非均质性和纹层结构和天文旋回^[22]、太阳活动周期^[23]都具有良好的对应关系。中国陆相有机质超量富集的气候—水体—地质环境响应,以及时空展布及非均质性,是未来有机质超量富集形成环境研究的重要挑战和目标。

火山活动可以带来丰富的营养物质,促进藻类等生物大量勃发,提高有机质的初始生产力^[24-27]。同时,火山物质的放射性也能促使生物发生遗传变异,导致个体和生产速度均变大。但是火山作用形成的火山灰和放射性同时对生物也有毒害作用,导致生物死亡^[28-30]。因此,火山喷发强度和频度、火山物质成分以及火山与湖盆距离等因素与有机质超量富集的定量关系到底如何,也是未来研究的难点和

挑战。

中低熟页岩油赋存的页岩黏土矿物含量高,黏土矿物对于页岩有机质的富集和保存和生烃、液态烃的吸附等具有重要影响。黏土矿物与有机质可形成絮凝作用,实现对有机质的捕获和吸附,提高有机质的沉积速率^[31-33],但黏土矿物的类型和成分与有机质形成絮凝作用的机制不清。另外,如何通过微生物作用把蒙脱石向高岭石和绿泥石方向转化,从而降低矿物比表面积^[34],减小对页岩油吸附作用,从而提高页岩油的流动性和开发效率,也是黏土矿物研究重要的挑战。

3.2 有机质超富段母质结构与产出物构成

有机地球化学研究将有机质的母质类型分为I、II、III型共三种类型,有机质的母质又称干酪根,每种类型有机母质结构均不同^[35, 36],其中I型母质富氢,原始有机质多为藻类,热解生成的石油量大,且多为直链烷烃的轻质油。III型母质富含氧和大分子官能团,原始有机质多为陆生植物,热解产物多为天然气和少量石油,但总量较少。由于有机母质结构复杂,分子量大,到目前为止,不同类型的有机质干酪根结构特征不清楚^[37-39],能量密度不同,其在不同温度下热解产出物也不明确。对于中低熟页岩油原位转化来说,难点和挑战是需要明确不同的温度场、不同的有机质类型和母质结构,所生成的烃类类型和数量,从而找到生成大量高品质页岩油的最佳温度场范围。

3.3 固/液/气相有机质转化的增能效应和热传导动力学

页岩油原位转化过程中形成固液气多相有机质,它们在不同温度场和压力场作用下的转化关系、能量场变化规律,传热机制等均不相同。主要挑战包括四个方面,一是探索经济高效的加热技术,目前原位转化加热技术加热周期长、加热效率低、能耗大、加热能力不足、经济成本高,强化能量利用,需要探索经济高效的加热技术。二是数值模拟研究,涉及加热过程中固/液/气相有机质温度场、压力场、浓度场等的耦合及变化规律^[40],以及如何实现干酪根转化的油气动态数值模拟^[41]。三是页岩复杂多孔结构中多组分热质传递规律与预测方法不明确。四是原位改质动态参数的监测,现有热场和应力参数测量技术均是基于物质成分不变的条件,如何实现干酪根转化条件下多相物质的热场及应力场参数的测量。

3.4 页岩油原位转化的流动机理与排驱效率

页岩油原位转化过程中由于有机质生成油气,

页岩的结构和有机质相态发生变化,生成的油气通过开发井采出地表,在此过程中,烃类流体的流动过程和排驱效率直接影响开发效率,该项研究面临的挑战包括以下几个方面:一是原位转化过程中,地下温压场变化导致页岩孔渗变化特征与流动通道^[42]形成机理不明;二是多相物质在多场中耦合流动机制和流动模型的建立;三是通过注超临界水或二氧化碳^[43]提高烃类流动性的方法中,油气水多相流体相态及热化学转化机制,以及多尺度多相渗流机理研究等。

3.5 中低熟页岩油富集区富集机制与评价优选

中低熟页岩油资源富集机制方面面临的挑战包括三个方面,一是富有机质页岩形成环境与有机质富集关系不清,有机质丰度与页岩层系滞留烃数量之间关系不清,有机质对液态烃吸附数量随丰度的变化关系不清,导致中低熟页岩油资源潜力评价有不确定性、选区有盲目性;二是常规油资源潜力评价方法基于生烃潜力模型建立,评价方法^[44, 45]尚不适用于中低熟页岩油,评价参数取值标准尚未建立,参数取值合理性有待研究落实;三是由于页岩油易挥发,老井岩心、露头采样与新井密闭取芯样品分析,滞留烃数量差异大,而滞留烃数量是影响潜力评价的重要参数,页岩滞留烃影响因素及取值标准,亟待研究确定。

4 陆相中低熟页岩油富集与原位转化研究方向与资助重点

陆相中低熟页岩油潜力巨大,是有规模的重大战略资源接替领域,存在一场革命新机遇,一旦取得理论技术新突破,有望带来我国油气产量与安全形势的巨大变化,值得国家基金项目高度关注。陆相中低熟页岩油开采难度大,在优质资源富集分布、三维温度场均匀快捷建立、热传输机制与多相态烃物质流动机理与原位转化烃产物产出机理等方面存在若干重大科学问题,存在科学发现和技术创新的良好前景,急需国家基金的重点支持,以尽力缩短陆相页岩油革命发生的历程。中低熟页岩油原位转化领域科学问题明确,资源规模巨大,一旦攻关取得突破,可以满足国家重大需求,符合基金项目支持要求。

通过聚焦陆相中低熟页岩油富集与原位转化科学问题和面临的挑战,进一步明确了未来研究的方向与基金资助的重点,主要包括以下五个方面。

一是研究有机质超量富集的环境响应与外物质

介入作用。有机质超量富集是指有机质丰度(TOC) $>6\% \sim 8\%$ 的页岩层系中的有机物堆积(常规油藏烃源岩 TOC 多为 $1\% \sim 2\%$;中高熟页岩油 $>2\%$)。有机质超量富集必有不同于常态的环境响应。拟开展有机质超量富集段沉积动力条件、有机物堆积速率、保存条件与外物质(即来自湖盆以外的物质介入作用,如火山喷出物与地球深部热液等)研究,分析有机质来源、显微组成及与各类矿物的共生关系,建立有机质超量富集段成因模型;研究有机质分布的非均质性及其主控因素,为水平井最佳井眼轨迹设计提供地质基础。

二是研究有机质超富段母质结构、能量场与产出物构成。选择重点层段页岩大尺寸、多维度样品,通过全样品(岩芯)CT 扫描、有机地球化学分析与超高分辨率电镜等设备,确定不同类型有机母质结构分布、数量与空间变化;通过模拟实验,揭示不同母质组份裂解反应机理和母质自身固有的能量密度与热转化条件下的能量场(物质相态转化产生的体积)变化特征,确定升温速率对有机物裂解生烃过程、产出物构成与产出速率的控制作用^[46, 47],落实原位转化产出物对环境伤害与友好性,为油气最佳产出机理、开发方式选择、资源潜力评价与“富集区”优选等提供科学基础。

三是研究有机质多相转化热传导动力学。开展大尺度岩心热传导模拟实验,建立页岩不同岩性与矿物组合热传导数学模型,揭示固/液/气相有机物动态耦合高效传热机制,构建热力—应力—物质动态平衡理论模型,为最佳加热方案设计提供科学依据。

四是研究烃物质多相态多场耦合流体场与原位转化烃排驱效率。通过对不同温压场、烃类物性参数变化和近地下真环境的生排烃动力学模拟实验,结合数值模拟^[48],建立多尺度多场多相态耦合流动模型;研究有机质地下原位转化油气动态生成过程,建立油气排驱动态理论模型。指导最佳加热速率和温度窗口设计。

五是研究中低熟页岩油富集机理与资源分布。通过实例解剖与模拟实验,综合考虑有机质丰度下限、母质类型与构成、热成熟度、页岩集中段厚度、埋深与分布、目的层段封闭条件、断层及地层水分布等因素,明确中低熟页岩油集中段分布控制因素,建立富集区评价标准并评价资源潜力与分布,为开辟先导试验开发区进而指导工业建产提供科学指导。

通过上述五方面研究,阐明陆相有机质超量富集(TOC>6%~8%)主控因素,建立中低熟页岩油富集分布地质模型;明确有机质超富段母质结构与分布,建立逼近地下环境有机质内源与热转化能量场及产出物构成;揭示固/液/气相有机物多相态、多场耦合流动机理,建立数学模型,回答中低熟页岩油富集分布、资源潜力与安全高效开发面临的科学问题,为有效开发利用巨量中低熟页岩油资源和大幅度提高页岩油产量提供科学支撑。

5 围绕国家能源独立的其他领域与技术方向建议

5.1 其他领域建议

从更高更远的能源战略考虑,我们认为要在生态目标下实现能源供给安全,保证供给安全,要考虑能源格局的变化、富油煤聚集机理及开发利用、油页岩原位转化开采、原位清洁转化的煤资源分布与规模气化利用、核废料的保存等都可以综合考虑,实现真正能源革命,在保证能源安全的前提下实现碳中和目标。

5.2 原位转化技术与重大装备

(1) 需要进一步研讨原位转化加热方式与前置技术,如:① 超临界水加热(22 MPa/375 °C);② 水蒸汽加热(450~550 °C);③ 电加热;④ 局部化学法(TS法);⑤ 注入加热+自加热(注入能量可省50%);⑥ 可控冲击波前置;⑦ 钴60前置;(2) 原位转化产出物环境伤害与友好性问题:① 超临界水加热与有水环境CO₂产出物增加;② 电加热与无水环境CO₂产出物减少;(3) 页岩油能量密度与原位转化能量投入产出比问题:① 油页岩含油率8%~10%,能量密度300 kCal/kg。页岩油含油率15%~19%,能量密度500~600 kCal/kg;② 页岩油原位转化能量投入产出比是1:3还是1:6~8;(4) 页岩油原位转化提高效率问题:① 可再生能源利用与电加热技术;② 化学生物法转化黏土矿物,改善页岩渗透性;③ 原位转化添加纳米催化剂+H₂,降低黏度,改善流动性,避免焦炭形成。

参 考 文 献

[1] 赵文智,胡素云,侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 537—545.
[2] 赵文智,张斌,王晓梅,等. 陆相源内与源外油气成藏的烃源灶差异. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 464—475.

[3] 赵文智,朱如凯,胡素云,等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1079—1089.
[4] 胡素云,赵文智,侯连华,等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819—828.
[5] 胡素云,朱如凯,吴松涛,等. 中国陆相致密油效益勘探开发. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 737—748.
[6] Hou LH, Ma WJ, Luo X, et al. Characteristics and quantitative models for hydrocarbon generation-retention-production of shale under ICP conditions: example from the Chang 7 member in the Ordos Basin. Fuel, 2020, 279: 118497.
[7] 杨兆中,朱静怡,李小刚,等. 微波加热技术在非常规油资源中的研究现状与展望. 化工进展, 2016, 35(11): 3478—3483.
[8] Yang ZZ, Zhu JY, Li XG, et al. Experimental investigation of the transformation of oil shale with fracturing fluids under microwave heating in the presence of nanoparticles. Energy & Fuels, 2017, 31(10): 10348—10357.
[9] 孙友宏,郭威,邓孙华. 油页岩地下原位转化与钻采技术现状及发展趋势. 钻探工程, 2021, 48(1): 57—67.
[10] Guo W, Zhang M, Sun YH, et al. Numerical simulation and field test of grouting in Nong'an pilot project of *in situ* conversion of oil shale. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106477.
[11] 赵阳升,梁卫国,冯子军,等. 原位改性流体化采矿科学与技术. 煤炭学报, 2021, 46(1): 25—35.
[12] Kang ZQ, Zhao YS, Yang D, et al. A pilot investigation of pyrolysis from oil and gas extraction from oil shale by *in situ* superheated steam injection. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 186: 106785.
[13] 胥蕊娜,姜培学. 流体在微多孔介质内对流换热实验研究. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1377—1379.
[14] 李根生,黄中伟,李敬彬. 水力喷射径向水平井钻井关键技术研究. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 1—9.
[15] 王海柱,李根生,郑永,等. 超临界CO₂压裂技术现状与展望. 石油学报, 2020, 41(1): 116—126.
[16] 郭烈锦,赵亮,吕友军,等. 煤炭超临界水气化制氢发电多联产技术. 工程热物理学报, 2017, 38(3): 678—679.
[17] 邱爱慈,张永民,蒯斌,等. 脉冲功率技术应用. 北京:煤炭工业出版社, 2012: 1112—1115.
[18] 张永民,邱爱慈,周海滨,等. 面向化石能源开发的电爆炸冲击波技术研究进展. 高电压技术, 2016, 42(4): 1009—1017.
[19] 隋义勇,张永民,李加强,等. 脉冲冲击波有效作用距离影响因素模拟分析. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 118—122.

- [20] 吴青. 悬浮床加氢裂化——劣质重油直接深度高效转化技术. 炼油技术与工程, 2014, 44(2): 1—9.
- [21] Duggen S, Olgun N, Croot P, et al. The role of airborne volcanic ash for the surface ocean biogeochemical iron-cycle; a review. Biogeosciences, 2010, 7(3): 827—844.
- [22] Hofmann P, Wagner T. ITCZ controls on Late Cretaceous black shale sedimentation in the tropical Atlantic Ocean. Paleogeography, 2011, 26(4): 2011PA002154.
- [23] Zhang S, Wang X, Hammarlund EU, et al. Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago. PNAS, 2015, 112(12): E1406—E1413.
- [24] Procesi M, Ciotoli G, Mazzini A, et al. Sediment-hosted geothermal systems; review and first global mapping. Earth-Science Reviews, 2019, 192: 529—544.
- [25] Wright VP. Lacustrine carbonates in rift settings: the interaction of volcanic and microbial processes on carbonate deposition. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 370(1): 39—47.
- [26] Xie SC, Pancost RD, Wang YB, et al. Cyanobacterial blooms tied to volcanism during the 5 m. y. Permo-Triassic biotic crisis. Geology, 2010, 38(5): 447—450.
- [27] 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 深部流体及有机—无机相互作用下油气形成的基本内涵. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(3): 499—520.
- [28] Payne JL, Turchyn AV, Paytan A, et al. Calcium isotope constraints on the end-Permian mass extinction. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(19): 8543—8548.
- [26] 殷鸿福, 宋海军. 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(10): 1539—1552.
- [27] McKnight DM, Feder GL, Stiles EA. Toxicity of volcanic-ash leachate to a blue-green alga. Results of a preliminary bioassay experiment. Environmental Science & Technology, 1981, 15(3): 362—364.
- [28] Gong Q, Wang XD, Zhao LS, et al. Mercury spikes suggest volcanic driver of the Ordovician-Silurian mass extinction. Scientific Reports, 2017, 7: 5304.
- [30] Jones DS, Martini AM, Fike DA, et al. A volcanic trigger for the Late Ordovician mass extinction? Mercury data from South China and *Laurentia*. Geology, 2017, 45(7): 631—634.
- [31] Keil RG, Mayer LM. Mineral matrices and organic matter. Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2014: 337—359.
- [32] Tansel B. Morphology, composition and aggregation mechanisms of soft bioflocs in marine snow and activated sludge; a comparative review. Journal of Environmental Management, 2018, 205: 231—243.
- [33] 袁鹏. 纳米结构矿物的特殊结构和表—界面反应性. 地球科学, 2018, 43(5): 1384—1407.
- [34] Lanson B, Sakharov BA, Claret F, et al. Diagenetic smectite-to-illite transition in clay-rich sediments; a reappraisal of X-ray diffraction results using the multi-specimen method. American Journal of Science, 2009, 309(6): 476—516.
- [35] Krevelen DWV. Coal: typology, chemistry, physics, constitution. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company Inc, 1961.
- [36] Tissot BP. Recent advances in petroleum geochemistry applied to hydrocarbon exploration. AAPG Bulletin, 1984, 68: 545—563.
- [37] 刘振宇. 煤化学的前沿与挑战: 结构与反应. 中国科学: 化学, 2014, 44(9): 1431—1439.
- [38] Ungerer P, Collett J, Yiannourakou M. Molecular modeling of the volumetric and thermodynamic properties of kerogen; influence of organic type and maturity. Energy & Fuels, 2015, 29(1): 91—105.
- [39] Wang Q, Pan S, Bai JR, et al. Experimental and dynamics simulation studies of the molecular modeling and reactivity of the Yaojie oil shale kerogen. Fuel, 2018, 230: 319—330.
- [40] 高孝巧, 杨浩, 熊繁升, 等. 油页岩原位加热井下温度场及热应力研究. 断块油气田, 2014, 21(3): 373—377.
- [41] Fan Y, Durlofsky LJJ, Tchelepi HAA. Numerical simulation of the *in situ* upgrading of oil shale. SPE Journal, 2010, 15(2): 368—381.
- [42] Saif T, Lin QY, Gao Y, et al. 4D *in situ* synchrotron X-ray tomographic microscopy and laser-based heating study of oil shale pyrolysis. Applied Energy, 2019, 235: 1468—1475.
- [43] 王海柱, 李根生, 郑永, 等. 超临界 CO₂ 压裂技术现状与展望. 石油学报, 2020, 41(1): 116—126.
- [44] 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展. 石油实验地质, 2020, 42(4): 489—505.
- [45] Li JB, Wang M, Lu SF, et al. A new method for predicting sweet spots of shale oil using conventional well logs. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 104097.
- [46] Le Doan TV, Bostrom NW, Burnham AK, et al. Green River oil shale pyrolysis: semi-open conditions. Energy & Fuels, 2013, 27(11): 6447—6459.
- [47] Zhao S, Lü XS, Sun YH, et al. Thermodynamic mechanism evaluate the feasibility of oil shale pyrolysis by topochemical heat. Scientific Reports, 2021, 11: 5365.
- [48] Zheng Y, Lei GL, Yao CJ, et al. A calculation model about reservoir thermal efficiency of *in situ* upgrading for oil shale via steam injection. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 192: 107267.

Scientific Problems and Key Technologies of Enrichment and In-situ Transformation of Mid-low Mature Shale Oil in Continental Facies

Wenzhi Zhao¹ Yangsheng Zhao² Gensheng Li³ Suyun Hu¹ Rukai Zhu^{1*}
Congsheng Bian¹ Wei Liu¹ Yongxin Li¹ Sheng Yu⁴ Jianguo Ren⁴

1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083*

2. *Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024*

3. *China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249*

4. *Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

Abstract Based on the 281th Shuangqing forum, this paper reviews the research status of enrichment and in-situ conversion of continental mid-low mature shale oil, and summarizes the main research progress in recent years from five aspects: the concept and type of continental shale oil, formation mechanism of organic rich shale, in-situ conversion reaction and heat transfer mechanism, in-situ conversion flow mechanism and in-situ development technology. This paper puts forward the key scientific issues and technical requirements from three aspects: environmental response and geological model of excessive enrichment of continental organic matter, parent material structure of ultra-rich section of continental organic matter, composition of energy field and products, and multiphase and multi field coupling flow mechanism of solid-liquid-gas phase organic matter, and propose five research difficulties and challenges, and the future research direction and the key objectives of National Natural Science Foundation of China.

Keywords continental facies; mid-low mature; shale oil; enrichment rule; in-situ transformation

(责任编辑 刘敏 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: zrk@petrochina.com.cn