

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.2-3.001

国际水力压裂与地震关系研究进展及地质工作建议

王尧¹, 郭迟辉², 吕承训¹, 孙月¹, 刘江涛¹WANG Yao¹, GUO Chihui², LYU Chengxun¹, SUN Yue¹, LIU Jiangtao¹

1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

摘要:水力压裂技术是开采致密气、煤层气、页岩油气、干热岩等资源的一项关键技术,随着中国页岩气主产区四川盆地及周缘规模化工业开采活动的不断推进,水力压裂等工作量激增,关于水力压裂是否诱发地震的问题受到各界高度关注。综述了国际水力压裂诱发地震风险的研究进展,梳理了国际上采取的有效风险防控措施,研究表明,水力压裂通过高压注入流体使岩石产生裂缝,不可避免地会导致微震活动发生;水力压裂诱发地震活动机理研究取得进展,为风险防控提供基础;水力压裂对三级以上地震活动影响有限,自然地震较少的地区人为地震活动记录也较少;水力压裂诱发微地震可能有助于释放累积的地应力或能量,降低大震风险;目前国际上水力压裂对地震的影响尚未量化。国际上已实施了应对水力压裂诱发地震风险的工程措施、法律制度、管理措施、技术研发等系列有效防控措施。对中国页岩油气、干热岩等资源开发提出建议:加强断裂构造调查评价,将水力压裂控制在距断层一定距离以内;加强微震监测,开展水力压裂地震危害评估;加强关键科学问题研究;加大公众科普宣传力度。

关键词:页岩油气;水力压裂;地震;风险防控

中图分类号:TE357.1;P315.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)02/03-0193-08

Wang Y, Guo C H, Lyu C X, Sun Y, Liu J T. Research progress on the relationship between international hydraulic fracturing and earthquakes and suggestions for geological work. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2/3): 193-200

Abstract: Hydraulic fracturing is a key technique for exploiting resources, such as tight gas, coal seam gas, shale oil and gas, hot dry rock, and so on. With the continuous large-scale industrial exploitation activities in China's main shale gas producing areas Sichuan Basin and its surrounding areas, and increasing workloads on hydraulic fracturing, the public has paid high attention to the issue of whether earthquakes could be induced by hydraulic fracturing. This paper reviews recent progress in studies of international hydraulic fracturing inducing earthquake risk and summarizes the effective risk prevention and control measures in the world. Results show that hydraulic fracturing can cause rock fracture by injecting fluid at high pressure, which will inevitably lead to microseismic activity; progress has been made in the mechanism of hydraulic fracturing-induced seismicity, which provides a basis for risk prevention and control; the influence of hydraulic fracturing on the seismicity above magnitude three is limited, and the records of artificial seismicity in areas with less natural earthquakes are also relatively less; the micro earthquake induced by hydraulic fracturing may help to release the accumulated crustal stress or energy and reduce the risk of large earthquakes; at present, the influence of hydraulic fracturing on earthquake has not been quantified. A series of effective prevention and control measures, such as engineering measures, legal systems, management measures, technical research and development, have been implemented to deal with the seismic risk caused by hydraulic fracturing. We propose some suggestions for resources development of shale oil and gas and dry hot rock in China: strengthen the investigation and evaluation of fault structure, and control the hydraulic fracturing at a certain distance from the fault; reinforce microseismic monitoring and carry out seismic

收稿日期:2021-01-09;修订日期:2021-03-09

资助项目:中国地质调查局项目《生态保护和自然资源利用综合评价》(编号:DD20211413)

作者简介:王尧(1979-),女,博士,研究员,从事地质战略研究。E-mail:wangyaopku@pku.edu.cn

hazard assessment of hydraulic fracturing; enhancing in scientific research on key scientific issues and increasing the publicity of public science.

Key words: shale gas; hydraulic fracturing; earthquake; risk prevention and control

当前中国能源资源形势十分严峻,对页岩油气、干热岩等资源的规模开发将有助于实现中国能源结构转型升级。2013 年 6 月,美国能源情报署发布美国以外 41 个国家页岩气资源评估更新报告,报告指出中国拥有巨大的潜在可开采页岩气资源(Dittrick, 2013)。自然资源部发布的 2015 全国油气资源动态评价成果显示,全国埋深 4500 m 以浅页岩气地质资源量 $122 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量 $22 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。近年来,中国在四川盆地及其周缘地区逐渐开展了规模化的页岩气工业开采,为增大开采井附近岩层的裂隙渗透率,当前主流方法仍为水力压裂法。水力压裂技术发明于 1947 年,与水平钻井相结合,推动了美国原油和天然气产量的增长,并逐步发展成为开采致密气、煤层气、页岩油气、干热岩等资源的一项关键技术(Hubbert et al., 1957)。然而,关于水力压裂法能否引发地震一直是各界热议的话题,甚至影响天然气和页岩油气等资源的合理开发,已然成为当前必须面对的科学、技术与社会问题(张晓林等, 2013; 张东晓等, 2015)。美国《科学》杂志近年多次刊登有关水力压裂技术引发地震的研究性文章(Elsworth, 2013; Bao et al., 2016),表明注水可能引起地震,因此行业、监管者必须为压裂作业的实施奠定科学基础,公众需要确保法规适当并得到遵守。水力压裂与地震关系涉及诸多难题,尚需进一步深入研究和阐释,本文综述了国际水力压裂诱发地震风险的研究进展,梳理国际上采取的有效风险应对措施,借鉴国外的相关研究经验,对中国页岩油气和干热岩开采工作提出工作建议,以防范水力压裂诱发地震风险的问题。

1 国际水力压裂与地震关系研究进展

人类活动诱发地震的方式有多种,包括水库蓄水、地下采矿、 CO_2 固存、地下抽注流体或气体等,这些方式改变了断层上的应力状态,促使断裂发生活动。人类活动引发的地震按震级大小可区分为微地震和有感地震。微地震是由人工施加外力直接引起的地层小型震动,一般 $M_w \leq 3$ 级,多为无感地震,可以人为控制。有感地震包括人为原因引发的主要释放构造应力的地震和主要释放工业活动产生

的应力的地震,一般 $M_w > 3$ 级,需要加以监测和防范。水力压裂是一种通过增加地层与井之间流体通道(即裂缝)的数量和延伸范围来提高产量的技术(图 1),作业过程中必然产生微地震,可能诱发有感地震。

1.1 水力压裂与微地震监测技术概况

水力压裂是在高压状态下向低渗透岩石注入流体(通常是水),使岩石破裂或刺激已经存在的断层或裂缝滑移。除流体外,还注入支撑剂(例如沙子、石英砂、石子陶粒)以保持新形成的裂缝开放。从某种意义上说,水力压裂是为了没缝造缝、小缝变大缝、少缝变多缝、多缝联通成网缝,其引起地震,意图是破坏岩石,在压裂过程中,伴随着新的裂缝产生或已经存在裂缝的重新激活,会诱发大量微地震活动,通常 $M_w \leq 0$,一次水力压裂作业可记录到的微地震达数百至上万次。水力压裂引起的微地震活动被广泛应用于非常规油气生产中,用于描述裂缝网络的几何形状和评价受激储层体积(SRV)的分布,该技术被称为微震监测(MSM)(Warpinski et al., 2012; Li et al., 2019)。对水力压裂引起的弱地震波进行监测和分析,是一种辅助完井的地球物理技术,其理论基础是声发射(AE)和地震学(地震波传播)。近十几年来,微震监测技术已经成为监测和控制水力压裂规模与效果的有效手段之一(Cipolla et al., 2002; 马子涵等, 2022)。

1.2 水力压裂产生微地震机理与影响

水力压裂诱发微地震可能有助于释放累积的地应力或能量,降低强震风险。地震一般在板块边界或分布变形区等构造活动区域内发生,在这些活跃的变形带内,弹性应变能在地壳中积累,有时会积累几个世纪,然后在地震中释放出来。大陆内部也存在地震的可能性,尽管形变率很低,但板块内部或板块边界附近的剪应力水平通常接近地壳的强度极限,在这种情况下,影响断层稳定性的小扰动可以并确实触发地震。

科学家们一直在探索如何通过人工制造小地震来防止大地震,为此建立了人类诱发地震数据库(HiQuake),记录了一些由人为活动诱发的地震。该数据库记载了超过 700 个案例,时间跨度为 1868—2016 年。目前已经提出的诱发地震的人类

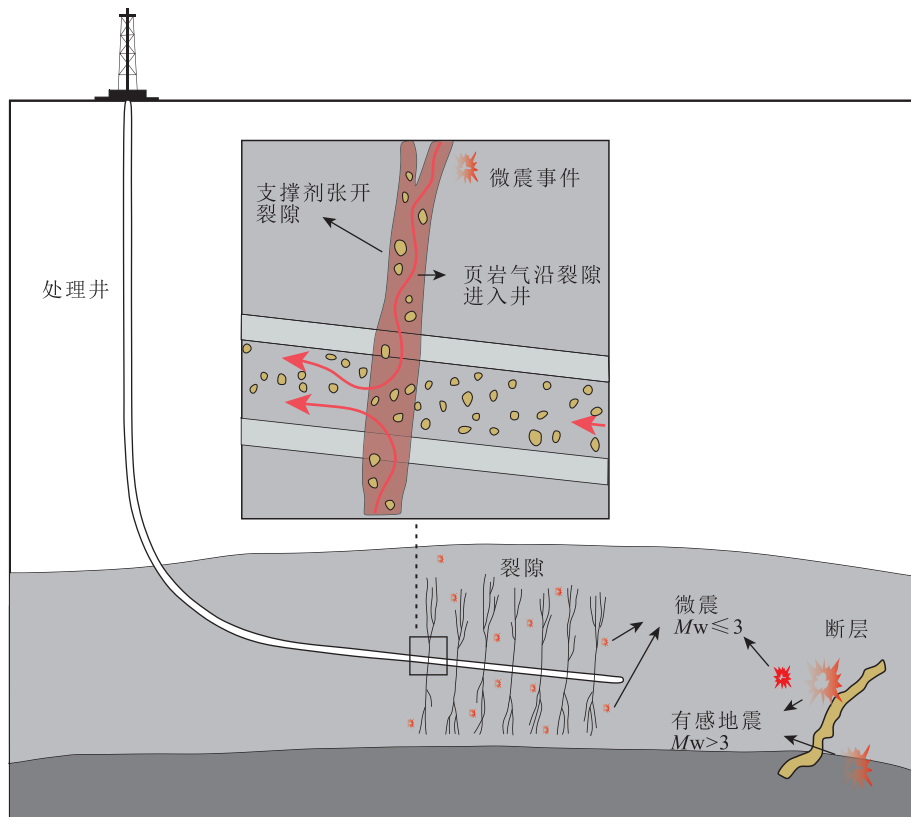


图 1 水力压裂原理与地震关系示意图(据 Li et al., 2020)

Fig. 1 Schematic diagram of relationship between hydraulic fracturing principle and earthquake

活动包括蓄水,建造高层建筑,海岸工程,采石,开采地下水、煤炭、矿物、天然气、石油和地热流体、挖掘隧道,以及向地下添加材料、废物处理、石油回收、水力压裂、天然气储存、碳封存等。早在 1965 年,美国联邦科学技术委员会建议在全美进行一项为期 10 年的地震研究计划(陈英方等,2006),以期找出预测、化解和预防甚至改变地震的方法。他们采用的研究方法很简单:向地下岩石注入液体,释放压力,逐渐产生一系列微小的地震或震动,而不是剧烈的震动。在地震活跃区,通过水力压裂诱发地震释放了累积的地应力或能量,可能有利于减小强震的危害。

1.3 国际水力压裂诱发地震机理研究进展

孔隙流体压力的增加或应力状态的变化可能导致现有断层或裂缝的重新激活。当激活附近断层的滑动时,可能诱发更高强度的地震活动($M_w > 3$)。

1.3.1 注入的流体通过 4 种方式诱发地震

①流体的注入增加了断层内部的孔隙-流体压力;②注入的流体填充并挤压孔隙内部原有的液

体,使孔隙发生形变(孔隙-弹性效应);③注入的流体温度低于周围岩体,导致岩体发生热弹性变形;④断层中流体压力的增大会降低断层上的有效法向应力。在断层上,有效法向应力往往通过垂直于断层作用来抵抗断层滑动,当这种有效法向应力被降低后,可能会造成断层的滑动,触发断层上存在的应变能的释放(Rubinstein et al., 2015)。

1.3.2 流体注入诱发地震需具备 4 个必要条件

4 个条件包括存在产生有感地震的断层、产生地震的应力、从注入点到断层的流体作用路径,以及向断层施加足够大的流体压力。并非所有的水力压裂都会诱发地震,诱发有感地震需要多种因素的结合。加拿大阿尔伯塔省地质调查局的团队研究了自 2013 年以来在该省 Duvernay 地区开发石油和天然气引发的数百次地震(Schultz et al., 2018)。最大的一次发生在 2016 年 1 月,地震强度在 4.2~4.8 级之间。通过使用一组复杂的统计工具分析来自约 300 口井的数据,研究人员得出水力压裂作业程序需要与必要的地质条件相吻合才会引发地震:

①注水井附近的岩层中存在断层;②断层必须具备一个可以滑动的方向;③必须有一条途径可以让水力压裂的液体对断层施加压力;④水力压裂注入的液体的体积足够大,可以向断层施加足够的压力。在不具备上述条件的北达科他州的威利斯顿盆地(Frohlich et al., 2011)、密歇根盆地德克萨斯、路易斯安那湾沿岸等地区(Weingarten et al., 2015),很少或没有诱发地震的发生。

1.3.3 孔隙压力增加或应力变化是断层活化的主要原因

2016 年,加拿大卡尔加里大学(University of Calgary)的研究团队在阿尔伯塔 Fox Creek 城西部 30 km 范围的地区,通过整合来自私人 and 公共地震台站的数据,并在地震发生后在研究区部署监测仪器,对水力压裂作业附近的部分断层进行监测,搜集研究区每个油气井的水力压裂数据,基于自行开发的技术,研究者创建了包含 905 个地震事件的数据库,开展了加拿大西部地区水力压裂的断层活化作用研究(Ellsworth et al., 2015),成功发现了断层的活化机制,表明孔隙压力增加或应力变化是断层活化的主要原因。

1.3.4 流体直接注入到近临界应力断层中会诱发更大的地震

如果流体直接注入到近临界应力断层中,较小体积的注入会诱发比目前理论预测更大的地震。2017 年,韩国浦项地热发电厂附近 Mw5.4 级地震,震源深度 4 km,地震活动对注入流体的即时响应、注入井底部前震和主震的位置,以及增强型地热系统(EGS)建立前该地区的地震活动不足等地质和地球物理资料均表明,浦项地震是由于 EGS 场地的流体直接注入到近临界应力的地下断裂带引起的,由震源和震源机制解的空间分布推断的断层面呈北东向和北西向倾斜,与韩国东南部第四纪逆冲断层相似,浦项地震“几乎肯定是诱发的”(McGarr et al., 2014)。如果用 McGarr 的方程(Caine et al., 1996)预测最大震级与注入液总量,需要注入约 $4.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的流体才能诱发 Mw5.4 级地震,是在浦项 EGS 现场注入的流体体积的 810 倍以上。但由于断层带的渗透率结构是高度非均质的,断层岩心内的片状或多层富粘土作为流体流动的屏障,因此在注入较小体积的流体后,孔隙压力可局部达到地震成核的临界。

1.4 国际水力压裂诱发地震监测记录与案例

水力压裂对 3 级以上地震活动的影响有限,自

然地震较少的地区人为地震活动记录也较少。美国油气生产和钻井数据的商业性 IHS 数据库显示,1947—2010 年间美国共钻探了 98.66 万口水力压裂井,实施了 176.38 万次水力压裂作业。在诱发地震最多的俄克拉荷马州,只有 1%~2% 的地震与水力压裂作业有关(Waksh et al., 2015);在加拿大西部 3 级以上地震($M_w > 3$)仅与约 0.3% 的水力压裂井有关(Bao et al., 2016)。大部分诱发地震属于 3~4 级有感地震,一般不造成破坏,2017 年韩国浦项发生的 Mw5.4 地震是迄今干热岩开采中水力压裂诱发的最大地震(Shimamoto et al., 2019)。加拿大研究人员通过对美国前 6 个产油气州(北达科他州、俄亥俄州、俄克拉荷马州、宾夕法尼亚州、得克萨斯州、西弗吉尼亚州)、加拿大前 3 个产油气省份(阿尔伯塔省、不列颠哥伦比亚省和萨斯喀彻温省)在 30~50a 期间发生的地震活动的分析发现(Gail et al., 2018),除俄克拉荷马州外,其余地区的地震活动同碳氢化合物的生产并无直接关系,而自然地震较少的地区人为地震活动记录也较少。这些地区油气生产量增加了 8~16 倍,但是并无证据显示生产量的提升引发了更多的地震。

1.5 水力压裂与地震关系研究面临的挑战

目前国际上水力压裂与地震关系研究尚未量化,无法准确预测地震的发生。量化水力压裂对地震的影响面临一定的挑战,需要对诱发地震的物理学机制及诱发大规模事件的概率进行研究。虽然很容易理解产生诱发地震事件的一般机制,但由于缺乏特定能源开发地复杂天然岩石系统的综合数据,科学家们目前无法准确预测此类事件的发生。特定能源开发地点诱发地震活动的预测将继续依赖于理论建模,以及现场测量的数据和观测结果。

目前,没有标准方法来实施诱发地震活动的风险评估。提供稳健风险评估所需的信息和数据类型包括净孔隙压力和应力、有关断层的信息、背景地震活动数据、诱发地震活动和流体注入或提取的总统计(NRC, 2013)。不同的能源技术通常使用不同的注入速率和压力、流体体积和注入持续时间因素,这些因素会影响诱发地震的可能性和程度。

政府机构对诱发地震事件有效响应机制尚未建立。美国环境保护局、土地管理局、美国农业部、林业局和美国地质调查局,以及几个不同的州机构都有监管,每个部门都监管不同的与能源开发相关

的地下注入活动,但目前还没有机制来有效协调政府机构对诱发地震事件的响应。

2 国际水力压裂诱发地震风险防控措施

水力压裂技术带来了美国油气工业的繁荣,特别是在美国页岩革命成功后,更是受到了全球范围的关注。根据美国内政部数据,美国陆上超过 90% 的油井都采用水力压裂技术。水力压裂法的原理是利用地面高压泵,将水大量化学物质掺杂水、石英砂沙子、陶粒石子等制成压裂液,再注入灌进岩石深处并压裂岩石,最终释放出油气等,目的是实现增产,但同时也带来了水污染、空气污染、地震活动增加等可能风险,为此各国实施了一系列风险防控措施。

2.1 工程措施方面

将压裂控制在距离断层 895 m 以上,人为诱发地震的风险将大大降低。欧洲水力压裂研究协会在 2018 年(ReFINE)开展了一项旨在降低钻井中流体注入造成地质断层活化风险的研究(Wilson et al., 2018),研究人员使用微震数据估算压裂作用在岩石中诱导产生的裂缝可以在水平方向上延伸多远(离钻孔注入点的距离),结果发现,在这些压裂作业中,造成裂缝可达到的水平范围为 59~720 m,当水平方向的距离超过 895 m 时,页岩发生破裂的可能性仅为 1%。

美国地质调查局(USGS)及其大学合作伙伴在阿肯色州、科罗拉多州、堪萨斯州、俄克拉荷马州、俄亥俄州和德克萨斯州已知或可能的注入地震地点部署了地震计。USGS 还与环境保护局、州和地方监管机构密切合作,进行州地质调查,开发评估与废水注入活动相关的地震危害的方法,以更好地了解这些地震并减轻地震的危害(USGS, 2018)。

2.2 制度方面

美国颁布实施水力压裂法细则,实施相关法规要求运营商制定地震应急预案。2015 年美国内政部土地管理局(BLM)公布实施了美国联邦水力压裂法细则,旨在建立水力压裂技术的国家标准,为各州及油气公司提供安全监督框架,以更负责任的态度开发联邦油气资源。细则要求开发商向 BLM 提供现有油井的地质、深度、位置等详细信息,提交总喷射量和平均喷射压力等月度报告,以便其更好地评估和管理。

俄克拉荷马地处美国中部,远离所有重要断层线,但 2014 年该州发生了 585 场 3.0 级或以上的地震,超过处于地震多发带的加利福尼亚 2014 年 180

次地震的 3 倍。而在 2008 年油气开发兴起之前,俄克拉荷马州地震发生率仅为每年一次。研究数据显示,俄克拉荷马州 85% 的地震活动与水力压裂法采油有关,同油气生产过程有关。出于对俄克拉荷马州未来水力压裂引发的地震活动的担忧,俄克拉荷马州公司委员会(OCC)于 2018 年 2 月开始实施 OCC 法规,法规适用于 SCOOP 和 STACK 远景区。在该区域内,如果在压裂井 5 km 范围内发生 $M \geq 2$ 级地震,需要操作员实施地震响应计划;如果发生 $M \geq 3$ 级地震,暂停压裂操作;如果发生 $M \geq 3.5$ 级地震,则中止(有可能永久性关闭)压裂作业(Skoumal et al., 2015)。

英国制定严格的关于水力压裂的监管措施。任何希望在英国使用水力压裂技术勘探或开采天然气等资源的公司必须先完成一系列监管措施。运营商在取得石油和天然气管理局(OGA)颁发的石油勘探开发许可证(PEDL)、矿产规划局颁发的规划许可证、环境署(EA)颁发的环境许可证后,操作人员必须至少在钻井开始前 21 天将井设计和运行计划上报于健康与安全执行委员会(HSE)。由 HSE 负责监管运营的安全性,在进行任何水力压裂之前,健康与安全执行委员会检查员将与环境署的官员一起检查现场。进行水力压裂,运营商必须完成进一步的监管步骤:①开始水力压裂前制定水力压裂计划并将其提交给石油和天然气管理局,该计划必须包括对地震事件风险的评估,并且包括在作业之前、期间和之后监测地震活动的适当计划;②石油和天然气管理局将要求运营商充分了解水力压裂的风险,操作员需要检查历史和背景地震活动以及地面的任何压力或张力,以了解产生地震的风险;③作为应用的一部分,需要详细的水力压裂计划解决每口井的风险因素,环境署和健康与安全执行委员会也将审查该计划。

2.3 管理措施方面

诱导地震活动交通灯协议(IS-TLP)被定义为具有多个响应水平的实时风险管理系统,是最广泛使用的管理和缓解危害的工具。一般而言,根据观测参数(如地震震级、峰值地面速度和地震活动率)确定 3 个通知级别(即绿色、黄色和红色级别,类似于交通灯系统),以确保安全的水力压裂刺激。除从地震和工业数据(例如,源位置和机制、注入速率和体积等)获得的大规模地震物理过程外,还需要

地质信息(例如,区域应力场和断层)进行综合识别,以管理和减轻诱发地震活动的地质灾害。

在实践中,所有地震活动信息都有助于预测发生大地震的可能性。因此,应该结合所有观察到的不同大小的诱发地震活动计算潜在的地震活动率。这是“诱发地震活动交通灯协议”方法的另一个有利因素,因为包含了所有地震活动的信息。最终更好地了解深处的应力和压力条件;水文地质框架,包括断层的存在和几何特征;并且需要在几个地点进行自然地震活动的位置和机制,以便对诱发地震造成的危害有一个预测性的认识。工业界、监管机构和公众都意识到地震可以通过注入流体来诱发。行业需要明确运营要求,监管机构必须为这些要求建立坚实的科学基础,公众需要保证法规充分并且正在遵守。

2.4 非压裂开采技术研发

虽然当前主流非常规油气、地热等能源开采方法为水力压裂法(郭剑等,2014),但为了规避水力压裂活动可能引发地震活动的缺点,当前世界各国也开发了一些非压裂地下岩层开采技术。

(1)化学激发增大岩层裂隙渗透率技术。化学激发是通过钻井向干热岩中注入侵蚀性液体,通常为酸性液体,将干热岩体裂隙或注采井附近的矿物质进行溶解,以此改善岩层中的裂隙渗透率。该技术对地下岩层产生的结构性破坏较小,只是通过岩层已有的裂隙孔隙进行疏通扩张,破坏程度较小。主要瓶颈在于依赖于天然裂隙结构的发育程度,若天然发育程度较好,侵蚀作业的效率也会较高。因此该技术在不同地区产生的作用也不同。1988年,在瑞典的非那巴卡干热井岩层中首次进行了这项工作,通过注入 2 m^3 的 $\text{HCl}+\text{HF}$ 溶液,提高了该井的生产效率,证明化学激发方法的可行性,之后在法国苏尔茨 EGS 热储层野外实验中,也通过“注酸”方法提高了生产井生产效率(Genter et al.,2010)。

(2)利用天然地下岩层断裂结构。除水力压裂和化学激发外,为了获得较大的地下储热空间,还有学者提出利用地下岩层断裂结构的方法,即通过在岩层断裂结构两端进行钻井,利用断裂结构的较好连通性,将其作为地下储热结构。该方法相比水力压裂法,人工破坏更小,往往能形成较大的热储结构。但其主要问题在于,深层岩层的断裂裂隙结构难以探测,亟需要增强地下断层、裂隙的探测能力,形成准确描述地下岩层结构的技术方法。缺点

在于在裂隙断层发育情况较差的地区难以应用。

(3)钻孔深层预裂爆破技术。预裂爆破技术(蔡峰等,2007)是20世纪50年代发展起来的一种可控爆破技术,该技术被应用于矿山、煤矿开采中,通过炸药在钻孔内爆炸产生冲击波及高压气体,冲击岩层形成可控的裂隙孔隙。相比水力压裂的难以控制,精准的爆破也许是另一种方法,通过定点可控的爆破,在地下岩层中构建适合的储热空间和渗流通道,进行增强型储热系统的建设。构想该技术是否可用于干热岩及页岩气的开采中,当前研究较少。

(4)电脉冲可控冲击波技术。该技术提出采用“基于脉冲功率技术的重估可控强冲击波”激励岩层(Bai et al.,2010;邱爱慈等,2012)。其作业模式为,利用水中高压发电的脉冲电流或者金属丝爆炸,在局部范围内产生等离子体,导致放电通道剧烈膨胀扩张,进一步推动水介质形成冲击波,在岩层中形成多方向多条裂隙。该技术起初提出在煤层开采中使用,可通过多次可控的冲击波逐步增大岩层裂隙,该技术优点在于冲击波能量的可控性,研究表明,高强声波对渗流通道上的粉尘有剥离效果,可进一步疏通渗流通道。因此,该技术也可进一步研究,有可能在干热岩及页岩气开采中加以利用。

3 中国水力压裂诱发地震研究进展

与国际相比,中国页岩油气、干热岩等资源开发时间短,近几年中国地质调查局、中石油、中石化、中国地震局等单位才开始组织开展川渝地区页岩气开采、青海共和盆地干热岩开采等与地震相关性研究,掌握资料较少,认识有待深化。

从已知的地质数据看,四川盆地活动断裂主要沿龙门山断裂等分布,是新生代以来喜马拉雅构造运动造成的。2008年汶川地震后,四川地区整体进入地震活跃期(Parsos et al.,2009),地震主要发生在龙门山断裂带(韩渭宾等,2005)、康滇断裂带,与荣县及周边页岩气开发集中区无明显相关性。相关研究表明,长宁6.0级地震是天然地震。长宁背斜为大型基底断层褶皱背斜,吸收了大量断层滑移量,基底断层处于复活阶段,多发生2.0级以下的地震。长宁背斜区的地震主要发生于南翼,为沿基底盘部位的天然地震。川西南地区早期构造在晚第四纪复活可能是产生中等强度地震的主要原因(何登发等,2019),而非由长宁地区页岩气开采人

工干预所致。重庆涪陵页岩气勘探开发过程中,人工压裂形成的裂缝诱发的微地震事件(刘尧文等,2016)在平面上由水平井筒向单侧延伸范围不超过150 m,水平井筒垂直扩展不超过50 m,由于布井均刻意与断裂保持距离,压裂对深层及近距离断裂没有活化作用,难以诱发有感地震,近几年国家地震台网记录的重庆地区天然地震与涪陵页岩气开发作业活动无明显关联性。

目前国内致密油气勘探开发中,已实施的有效地震防控措施主要有:实施“一井一策”、“一平台一预案”压裂优化方案(天工,2019),全面调查工区范围内地震活跃区分布范围、发震断层带分布位置;开展平台周边2 km范围内地面构筑物抗震等级调查;井台选址距离人口聚集城区、发震断层各2 km;加强工作区地震台网监测,对水力压裂进行实时监测预警;严格执行当地政府规避地震风险指示;钻井、压裂生产普遍采用网电作为动力,减少对井场周围居民生产、生活的影响(陈雪莲,2015;王大锐,2019)。

4 对中国干热岩、页岩油气勘探开发工作的启示与建议

(1)加强断裂构造调查评价,将水力压裂控制在距离断层一定距离以内。开展断裂构造调查评价,识别已存在的断层。虽然还无法预测哪些相交的断层将移动,无法确定多大注入压力将触发地震事件,但应通过调查分析地质和地震数据尽可能多地识别预先存在的断层,并调整水力压裂程序。避免在构造脆弱带或活动断裂带进行水力压裂作业,根据最新研究进展,将水力压裂控制在距离断层至少895 m,页岩发生破裂的可能性仅为1%,将降低诱发破坏性地震风险。水力压裂距离断层的距离应因地制宜确定,其与压裂区的地层岩性、现今应力场、断层的分布与深度,以及地下水等因素有密切关系。

(2)加强微震监测,开展水力压裂地震危害评估。为管理和减轻与诱发地震活动有关的潜在风险,较小幅度的地震事件也被用来估计最大震级和地震活动率,是评估大地震发生可能性的必不可少的参数,需要加强微震监测:①需要数百甚至数千个传感器的表面监测阵列,用于检测距离地面3~4 km的微震事件;②考虑到复杂的震源机制和页岩强烈的各向异性(以及许多其他致密地层),需要更先进的处理技术探测和定位与页岩/各向异性区水

力压裂相关的大量微震事件;③除了震源机制反演外,利用微震地质力学分析研究裂缝的扩展,这在很大程度上决定了地层的渗透性和产量。开展水力压裂地震危害评估。根据事件频率、震级、地面运动、深度和接近人口稠密地区的程度对事件进行评估。一旦监测到 $ML2.0$ 诱发事件,立即采取缓解措施。一旦检测到 $ML4.0$ 或更大的事故,操作人员将立即暂停水力压裂作业。

(3)加强对关键科学问题的研究。水力压裂何时及如何引发大地震和有感地震?如何管理和减轻这些地震?这些地震对区域和全球构造的长期影响是什么?这些基本问题阻碍了水力压裂技术在致密油气藏中的适用性的改进,也是未来工作的重点研究方向,包括:诱导地震数据采集、处理 and 解释;断裂力学和地质力学模型;岩石力学、流体力学与应力场;源机制模型和地震风险管理;影响诱发地震活动的地质因素,这是未来潜在的研究方向。加强工作区的地震监测工作与相关数据收集,采集开发过程参数,尤其在构造活动强烈地区或大型断裂附近要加强微地震监测工作,开展诱发地震机理与地质条件研究,模拟压裂诱发地震过程,分析诱发地震利弊,建立水力压裂工程安全评价体系,实现既要进行资源开采,又能避免诱发地震造成破坏。

(4)明确政策制度,强化安全生产意识和公众科普宣传。自然资源部主管部门在审批勘查开采过程中需要实施水力压裂技术的矿种的勘查矿权和开采矿权时,将压裂工程可能诱发地震安全性评估和采取措施作为勘查或开采方案的重要内容和指标,明确实施压裂工程微地震监测和地震台网监测要求,并加强监督检查,确保施工安全。同时加大公众科普宣传力度。地震由于其传播方式导致难以预测的特征,以及破坏性巨大,使社会舆论对“地震”这一词汇较敏感。同时,地震知识普及的局限性,导致社会公众对地震的科学认知程度较低。因此,如何正确地认识水力压裂技术与地震的相关性,对于新兴能源行业的发展至关重要,需要向公众普及水力压裂诱发地震活动的常识,进行科学分析与引导,修正误解,避免恐慌、造成邻避效应。

致谢:审稿专家对本文提出了许多建设性的修改意见,使文章得到了极大的提升;中国地质调查局发展研究中心战略与情报研究室的全体同事对该工作的开展给予了大力支持,在此一并感谢。

参考文献

- Bao X, Eaton D W. Fault activation by hydraulic fracturing in western Canada[J]. Science, 2016, 354(6318): 1406–1409.
- Caine J S, Evans J P, Forster C B. Fault Zone Architecture and Permeability Structure[J]. Geological Society of America, 1996, 24(11): 1025–1028.
- Cipolla C L, Wright C A. Diagnostic techniques to understand hydraulic fracturing: what? why? and how? [J]. SPE Production & Facilities, 2002, 17(1): 23–35.
- Dittrick P. General interest: EIA–ARI issues update of world assessment of shale oil, shale gas[J]. Oil and Gas Journal, 2013, 111(7): 46–48.
- Ellsworth W L. Injection – induced earthquakes [J]. Science, 2013, 341(6142): 142–149.
- Ellsworth W L, Llenos A L, McGarr A F, et al. Increasing seismicity in the u.s. midcontinent: implications for earthquake hazard [J]. The Leading Edge, 2015, 34(6): 618–626.
- Frohlich C, Hayward C, Stump B, et al. The Dallas – Fort Worth Earthquake Sequence: October 2008 through May 2009[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(1): 327–340.
- Gail M A, David W E, Hadi G, et al. 西加拿大沉积盆地中的水力压裂和地震活动[J]. 国际地震动态, 2018, (10): 2–19.
- Genter A, Evans K, Cuenot N, F et al. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (egs) [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2010, 342(7/8): 502–516.
- Hubbert M, Willis D. Mechanics of hydraulic fracturing [M]. AIME Pet. Trans. 1957, 210: 153–168.
- Bai J M, Cheng H, Zhu S Q, et al. Discussion on feasibility of enhancing production of low – production cbm wells by using powerful pulse techniques[J]. China Coalbed Methane, 2010, 92(3): 278–279.
- Li L, Tan J, Wood D A, et al. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs[J]. Fuel, 2019, 242: 195–210.
- Wilson M P, Worrall F, Davies R J, et al. Fracking: How far from faults? [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo – Energy and Geo – Resources, 2018, 4(2): 193–199.
- McGarr A. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119(2): 1008–1019.
- National Research Council. Division on Earth and Life Studies, Board on Earth Sciences and Resources, Committee on Seismology and Geodynamics, Committee on Geological and Geotechnical Engineering, Committee on Earth Resources, Committee on Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. Induced Seismicity Potential in Energy Technologies [M]. National Academies Press, 2013.
- Rubinstein J L, Mahani A B. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity [J]. Seismological Research Letters, 2015, 86(4): 1060–1067.
- Schimamoto T, Togo T, Lim H, et al. Search for the fault that caused the 2017 Mw5.4 Korea Pohang earthquake in the geothermal borehole cuttings [C]//日本地質学会学術大会講演要旨 第 126 年学術大会 (2019 山口). 一般社団法人日本地質学会, 2019: 210.
- Schultz R, Atkinson G, Eaton D W, et al. Hydraulic fracturing volume is associated with induced earthquake productivity in the Duvernay play[J]. Science, 2018, 359(6373): 304–308.
- Skoumal R J, Brudzinski M R, et al. Earthquakes induced by hydraulic fracturing in poland township, ohio. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(1): 189–197.
- Parsons T, Kirby E, 张效亮. 2008 年汶川地震造成的应力变化和四川盆地地震危险性增加[J]. 世界地震译丛, 2009, (1): 17–20.
- Tester, Jefferson W, et al. The future of geothermal energy [R]. Massachusetts Institute of Technology, 2006. 358.
- USGS. What work is the USGS doing to better understand the occurrence of injection – induced earthquakes? https://www.usgs.gov/faqs/what-work-usgs-doing-better-understand-occurrence-injection-induced-earthquakes?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products
- Walsh F R, Zoback M D. Oklahoma’s recent earthquakes and saltwater disposal[J]. Science Advances, 2015, 1(5): e1500195.
- Warpinski N R, Du J, Zimmer U. Measurements of hydraulic – fracture – induced seismicity in gas shales[J]. Spe Production & Operations, 2012, 27(3): 240–252.
- Weingarten M, Ge S, Godt J W, et al. High – rate injection is associated with the increase in u.s. mid – continent seismicity[J]. Science, 2015, 348(6241): 1336–1340.
- Lei X L, Wang Z W, Su J R. 页岩气开采水力压裂诱发四川盆地南部 2018 年 12 月 M_L 5.7 地震和 2019 年 1 月 M_L 5.3 地震[J]. 世界地震译丛, 2020, 51(2): 144–160.
- 蔡峰, 刘泽功, 张朝举, 等. 高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 499–503.
- 陈雪莲. 能源与节能钻井作业中网电钻井技术的优势及运用[J]. 能源与节能, 2015, 115(4): 108–109.
- 陈英方, 陈长林, 崔秋文. 美国自然灾害的社会学研究[J]. 防灾博览, 2006, (4): 16–17.
- 郭剑, 陈继良, 曹文灵, 等. 增强型地热系统研究综述[J]. 电力建设, 2014, 35(4): 10–24.
- 韩渭宾, 蒋国芳. 川滇地区较长时间尺度的地震活动盛衰交替性[J]. 地震, 2005, 25(1): 51–57.
- 何登发, 鲁人齐, 黄涵宇, 等. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景[J]. 石油勘探与开发, 2019, (5): 993–1006.
- 刘尧文, 廖如刚, 张远, 等. 涪陵页岩气田井地联合微地震监测气藏实例及认识[J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 56–62.
- 马子涵, 邢会林, 靳国栋, 等. 基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 190–199.
- 邱爱慈, 张永民, 蒯斌, 等. 高功率脉冲技术在非常规天然气开发中应用的设想 [C]//中国工程院/国家能源局能源论坛. 2012: 22–24.
- 天工. 中国最大页岩气田 2018 年产气量突破 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$ [J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 80.
- 王大锐. 页岩压裂会引发地震吗? ——访中国地质大学(北京)何登发教授[J]. 石油知识, 2019, (5): 6–7.
- 张东晓, 杨婷云. 美国页岩气水力压裂开发对环境的影响[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 801–807.
- 张晓林, 张峰, 李向阳, 等. 水力压裂对速度场及微地震定位的影响[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3552–3560.