

# 液氮对页岩的致裂效应及在压裂中应用分析

蔡承政<sup>1,2</sup>, 李根生<sup>2</sup>, 黄中伟<sup>2</sup>, 高峰<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏徐州 221116;  
2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**为研究液氮对页岩的致裂效应,对同一页岩岩样在液氮冷却处理前后进行超声波和渗透率测试,并对比岩样表面的变化情况,分析液氮对岩石的致裂机制和影响因素,并讨论液氮压裂技术在页岩气开发上具有的优势及其应用前景。试验结果表明:经过液氮冷却后,页岩表面有明显的热力裂缝产生,液氮能够对页岩产生显著的致裂效果;液氮低温作用能够促进页岩内部微裂纹的扩展,提高孔隙结构的连通性,使页岩波速降低、渗透率增加;试验中页岩的波速最大降幅为10.43%,渗透率最大增幅为177.27%。

**关键词:**页岩;液氮;致裂;渗透性;应用前景

**中图分类号:**TU 45 **文献标志码:**A

**引用格式:**蔡承政,李根生,黄中伟,等.液氮对页岩的致裂效应及在压裂中应用分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):79-85.

CAI Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Thermal cracking effect of liquid nitrogen on shale and its application analysis in hydraulic fracturing[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1):79-85.

## Thermal cracking effect of liquid nitrogen on shale and its application analysis in hydraulic fracturing

CAI Chengzheng<sup>1,2</sup>, LI Gensheng<sup>2</sup>, HUANG Zhongwei<sup>2</sup>, GAO Feng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of liquid nitrogen on thermal cracking of shale rocks, ultrasonic and permeability tests were performed on the shale rock samples before and after being soaked in liquid nitrogen. The cracking mechanism of liquid nitrogen and its influencing factors were analyzed. The advantages and prospects for liquid nitrogen to be used as a fracturing fluid in shale gas development were discussed. The experimental results indicate that obvious thermal cracks can be observed on the surface of the shale samples after the soaking in liquid nitrogen. The rapid cooling effect of liquid nitrogen can promote the growth of micro cracks inside the shale samples, resulting in the reduction of sound velocity and increase in permeability. The reduction in sound velocity was up to 10.43% while the increase in permeability can be over 177.27%.

**Keywords:** shale gas; liquid nitrogen; cracking; permeability; application prospect

由于常规水力压裂技术在页岩气开发中容易引起储层伤害和水资源污染浪费等问题<sup>[1-5]</sup>,各国研究人员都在积极寻找水力压裂的替代技术<sup>[6-8]</sup>。20世纪90年代液氮已经成功作为压裂液用于储层改造

中<sup>[9-10]</sup>。由于液氮温度极低,在压裂过程中有助于促使岩石内部初始裂隙扩展或者产生新的破裂<sup>[11]</sup>,这对于增加裂缝密度,提高储层改造体积十分有利<sup>[12]</sup>。为研究液氮对页岩的低温致裂效果,对同一

岩样在液氮处理前后的表面裂纹、波速和渗透率变化进行对比,分析液氮对页岩的致裂效应、机制和影响因素,讨论液氮压裂优势和在页岩气开采中的应用前景。

## 1 液氮对页岩致裂效应试验

### 1.1 岩样制备

在准备岩样时,按照标准岩样的制作方法,将所有样品统一加工成直径为 25 mm、高度为 50 mm 的圆柱体。为了尽可能消除个体之间的差异,岩样均从同一大块岩体上钻取。加工完毕后,首先挑选结构规则、表面完整的岩样,然后再对初次挑选的岩样进行密度和波速测试,选择物性接近的样品。加工好的部分页岩岩样如图 1 所示。对试验所使用的岩样进行统一编号,其中垂直于层理方向的岩样依次编号为 SV1<sup>#</sup>、SV2<sup>#</sup>、SV3<sup>#</sup>和 SV4<sup>#</sup>,平行于层理方向的岩样编号为 SH1<sup>#</sup>、SH2<sup>#</sup>、SH3<sup>#</sup>和 SH4<sup>#</sup>。

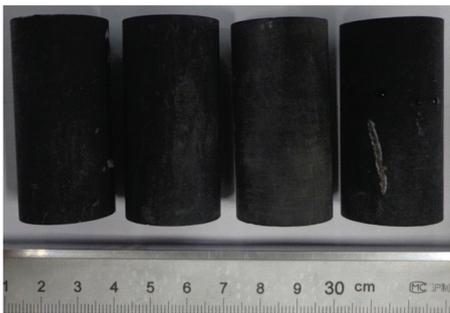


图 1 部分页岩岩样

Fig. 1 Partial shale samples

图 2 为试验选用的页岩岩样(直径为 25 mm,高度为 50 mm)在饱和状态下核磁共振(NMR)  $T_2$  ( $T_2$  为表面弛豫引起的弛豫时间, ms;) 分布曲线,饱和岩样的  $T_2$  分布曲线可以用于表征岩石的孔隙分布特征<sup>[13]</sup>。在低强度(磁场强度小于 0.5 T)的均匀磁场中,当回波间隔较小时,饱和岩样的  $T_2$  值主要受表面弛豫的影响<sup>[14]</sup>。表面弛豫时间是孔隙比表面和岩石弛豫率的函数,具体表达式为  $1/T_2 = \rho(S/V)$ <sup>[15]</sup>,其中,  $\rho$  为岩石的弛豫率,  $\mu\text{m}/\text{ms}$ ;  $S/V$  为岩石孔隙的比表面,与孔隙半径成反比,  $\mu\text{m}^{-1}$ 。由此可见,  $T_2$  值与孔隙尺寸成正比,孔隙尺寸越大,  $T_2$  值越大。  $T_2$  分布曲线的幅度与孔隙数量成正比,幅度越大表示  $T_2$  值对应的孔隙数量越多。  $T_2$  分布曲线的形态主要受岩石孔隙结构的影响,具有不同孔隙结构的岩石其  $T_2$  分布曲线形态不同。由于页岩非均质性较强,且内部含有大量天然裂缝,其  $T_2$  分布曲线有可能呈现多种形态。黄家国和孙军昌等<sup>[16-17]</sup>

通过试验研究发现,页岩的  $T_2$  分布曲线大体可分为单峰型、含孤立右峰的双峰型和左、右峰连续的双峰型 3 种类型。本文中试验所用页岩的  $T_2$  分布曲线为单峰型,峰值对应的  $T_2$  值约为 1.86 ms,  $T_2$  最大值约为 9.64 ms。

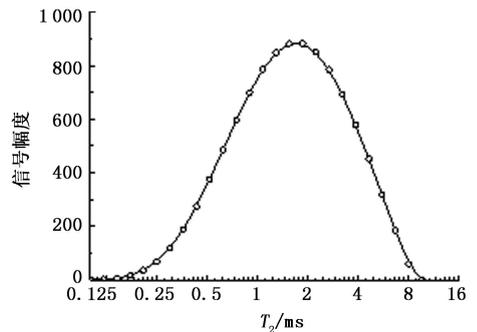


图 2 页岩  $T_2$  分布曲线

Fig. 2 NMR  $T_2$  distribution curve for shale

图 3 为初始条件下的页岩的 SEM 照片,页岩颗粒排列十分致密,而且颗粒尺寸很小,在放大 5 000 倍的情况下也较难观测到岩石内部的颗粒以及初始裂隙分布。

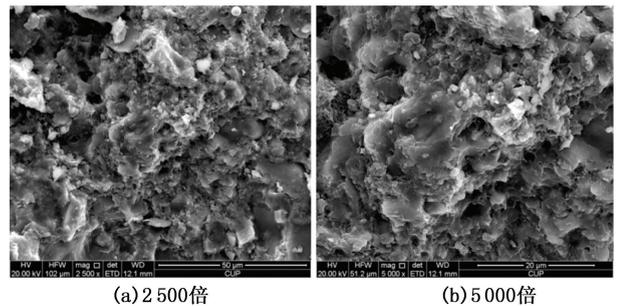


图 3 页岩样品初始条件下 SEM 照片

Fig. 3 Shale SEM images in its initial state

### 1.2 试验方法

试验的主要内容有 3 项,分别是将岩样在液氮中冷却处理、渗透率测试和声波测试。其中渗透率和声波测试主要用于对比同一岩样在液氮冷却处理前后的渗透率和波速变化。在测试之前,首先将岩样在 60 °C 的温度下进行烘干处理 8 h。试验的主要步骤如下:

(1) 待页岩岩样烘干后先进行波速和渗透率测试,记录所有岩样在液氮低温冷却处理前的波速和渗透率。

(2) 将完成渗透率和波速测试的岩样放入液氮中进行冷却处理,待岩样充分冷却后从液氮中取出,同时观测岩样表面是否有新的裂纹产生。

(3) 待岩样在自然条件下恢复至室温后,对经过液氮冷却处理的岩样再进行一次渗透率和声波测

试,分析液氮低温作用对岩样渗透率和波速的影响。

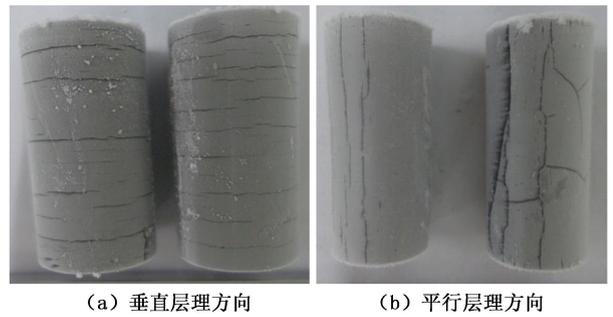
试验中使用的主要设备有电子天平秤、游标卡尺、电热鼓风干燥箱、液氮罐、Olympus 超声波测试仪和气测渗透率仪等。其中,气测渗透率仪使用的介质为氮气,该装置通过加压气体在岩样两端建立压差,然后测量出口气体流量,根据达西公式确定页岩的渗透率。在测试过程中,气体入口压力为 0.25 MPa,围压为 2.25 MPa,出口压力为大气压,待压力稳定 30 min 后再测量气体出口流量。

### 1.3 致裂效果分析

#### 1.3.1 岩样表面变化

要确定液氮是否能对页岩产生损伤致裂作用,最直接的方法就是观察岩样的表面是否有宏观裂缝产生。图4为经过液氮处理后的页岩照片。结果表明,在液氮的低温作用下,岩样表面不仅出现了大量的宏观热力裂缝而且岩样还能沿着层理面开裂。对于平行于层理方向的页岩岩样,宏观热力裂缝沿轴向方向和径向方向均呈明显的网状分布。这就说明,液氮超低温作用不仅可以促进岩样内部已有的层理面以及初始裂纹的开启,而且还能产生新的破裂。岩样在冷却以及回温的过程中,可听见裂纹扩展声音,这也进一步表明液氮的低温作用能够对页岩

产生致裂效果。



(a) 垂直层理方向

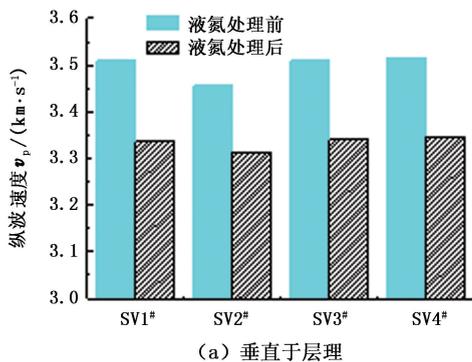
(b) 平行层理方向

图4 液氮处理后页岩岩样

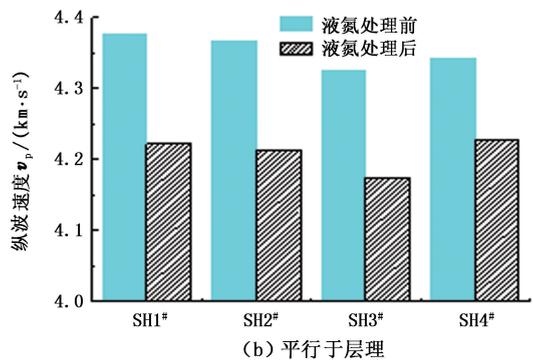
Fig. 4 Shale samples after liquid nitrogen cooling

#### 1.3.2 岩样波速变化

超声波测试是检测和评价岩石损伤状态的重要方法,对于同一种岩石,波速主要受岩石内部裂纹分布的影响。岩石内部的裂纹越多,损伤程度越严重,声波在岩石内的传播速度越慢<sup>[18]</sup>。如图5所示,在液氮处理前,垂直于层理方向的页岩的初始波速平均值为3497.8 m/s,平行于层理方向的页岩的初始波速平均值为4353.5 m/s,垂直于层理方向页岩的波速约为平行于层理方向的80.34%。这主要是因为页岩层理的存在会阻碍声波在岩石内的传播,使垂直于层理方向波速低于平行于层理方向的波速。



(a) 垂直于层理



(b) 平行于层理

图5 液氮处理前后页岩的波速

Fig. 5 Wave velocity of shale samples before and after liquid nitrogen cooling

在经过液氮冷却处理后,无论是平行于层理还是垂直于层理的页岩岩样,其波速均有不同程度降低。其中垂直于层理方向的页岩波速的平均值降至3333.7 m/s,降幅约为4.69%。平行于层理方向的页岩岩样波速平均值降至4209.3 m/s,降幅约为3.31%。对于所有垂直于层理方向的岩样,波速最大降幅为4.95%,最小降幅为4.14%;对于所有平行于层理方向的岩样,波速最大降幅为3.53%,最小降幅为2.69%。垂直于层理方向页岩岩样的波速变化幅度大于平行于层理方向的岩样,这是因为

页岩在液氮低温作用下会沿层理面开裂,从而阻碍波速沿垂直于层理方向的传播。由此可见,在液氮低温作用下岩样内部的微裂纹发生了扩展,导致裂纹体积增加,岩样的波速降低。

#### 1.3.3 岩样渗透率变化

渗透率变化是测试岩石损伤的重要方法之一,并在岩石热破裂测试中得到了广泛应用<sup>[19]</sup>。渗透率值取决于岩石孔喉或者裂隙的大小、形状、特别是孔隙结构的连通程度。一般来说,孔隙结构的连通性越好,其渗透率越大。

图6为同一页岩岩样在液氮处理前后的渗透率及其变化率。对于垂直于层理方向岩样,渗透率增长幅度为4.86%~15.14%,表明液氮低温作用增加了岩石内部微裂纹的连通程度。对于平行于层理方向的页岩岩样,当岩样经过液氮处理后其渗透率

出现了更大幅度的增加,增幅为11.55%~177.27%,平均增长幅度明显高于垂直于层理方向的岩样。这主要是因为液氮低温作用下,层理面之间的胶结发生了断裂破坏导致层理面的连通性增强。

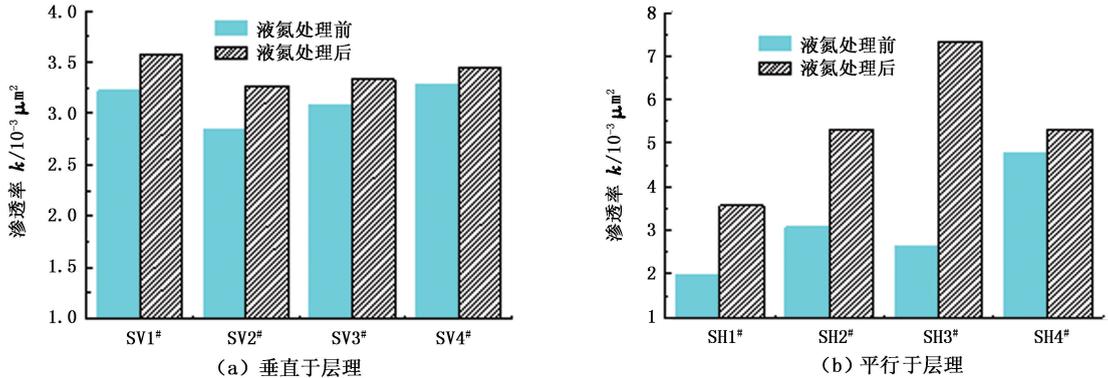


图6 液氮处理前后页岩的渗透率

Fig. 6 Permeability of shale samples before and after liquid nitrogen cooling

渗透率的增加表明岩石孔隙结构的连通性增强,意味着岩石损伤程度的增加。在液氮冷却作用下,当相邻颗粒性质相近时,颗粒间主要产生的是拉应力;当相邻颗粒间性质差别较大时,颗粒间还可能产生剪应力<sup>[20]</sup>。当热应力超过颗粒间的胶结强度时,胶结会断裂,形成新的微裂纹,这会导致岩石内部的微裂纹数量增加。对于岩石内部已经存在的初始裂纹,颗粒收缩同样也会使其产生张开变形的趋势<sup>[21]</sup>。以上情况都会增加岩石内部裂纹的数量并导致孔隙结构之间的连通性增强,进而导致岩石渗透率增加,这也是液氮低温作用能够有效提高岩石渗透率的原因。

## 2 分析与讨论

### 2.1 液氮对岩石低温致裂机制及影响因素

当岩石周围温度降低时,其内部颗粒必然会产生收缩变形。由于岩石是由多种矿物组成的多晶体,不同种类矿物具有不同的热膨胀系数。试验测得的页岩的矿物成分为石英33.2%、钾长石3.8%、斜长石6.2%、方解石13.8%、白云石11.6%、黏土矿物31.4%。可以看出,页岩的矿物成分种类较多,大致有6种,含量较多的主要是石英、方解石、白云石和黏土矿物。不同的矿物在遇冷后其降温程度以及变形速率都会存在较大的差异。例如,白云石和方解石的热膨胀系数分别为 $3.2 \times 10^{-6}$ 和 $8.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,而石英的热膨胀系数为 $2.43 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,这说明在相同温差条件下石英的热变形量约是白云

石的7.6倍。在液氮冷却过程中由于岩石内部各矿物的变形量的差异,颗粒之间会有局部应力产生,并在颗粒胶接强度较弱处或微裂隙尖端产生应力集中效应。当应力值超过颗粒之间的胶结强度时会对岩石造成致裂效应。

另外,岩石还是一种多孔介质,内部常含有一定量水分。当水分冻结成冰后,其体积会膨胀,从而在孔隙壁上产生较大的挤压力,使颗粒之间的胶结物发生断裂破坏,进而产生冻结致裂效果。由于页岩与水接触后其结构容易发生破坏,再加上页岩的孔隙度和渗透率极低,很难在试验条件下将岩样饱和至不同的含水饱和度。但是已有的试验结果表明,对于一些渗透率较大且孔隙度较高的岩石(如砂岩和煤岩),当其内部含有一定量水分时,水分遇冷产生的冻结作用均对岩石造成明显的致裂效果<sup>[22]</sup>。而且随着含水饱和度的增加,岩石内部的微孔隙数量增长幅度增大。特别是对于砂岩岩样,当含水饱和度达到一定程度后,微孔隙之间会相互沟通,甚至在岩石表面产生明显的宏观裂纹<sup>[22]</sup>。这说明含水饱和度也会在一定程度上影响液氮对岩石的致裂效果。当水力压裂效果不理想时,可再适当使用液氮进行重复压裂,利用液氮对含水岩石的冻结致裂效应改善原有裂缝周围岩石的孔隙结构和渗流通道,增加孔隙结构的连通性。

### 2.2 液氮压裂优势

水力压裂方法通过向井眼注入高压流体,在低渗透地层中形成高导流能力通道,从而维持油气经

济开采。当高压流体在地层中流动时,其主要作用是促进已形成裂缝的扩展,使裂缝长度增加,但对于增加裂缝密度的作用却十分有限<sup>[17]</sup>。随着页岩气等非常规天然气资源逐渐受到重视,对于储层压裂技术提出了新的要求。除了要尽量减少储层伤害和环境影响外,更加重视压裂改造的体积,而不仅是裂缝的长度<sup>[23]</sup>。对于页岩气压裂的关键是如何诱导天然裂缝的开启以及如何使人工裂缝沟通更多的天然裂缝,从而在储层内形成复杂的网状裂缝。研究表明,在相同裂缝长度下网络裂缝的储层改造体积大于单一裂缝,而且储层改造体积越大压后产量越高<sup>[24]</sup>,在进行非常规储层压裂时要尽可能形成网络裂缝,以提高储层改造体积。

根据试验结果可知,当页岩与液氮接触时不仅岩石内部的微裂纹数量增加,而且岩石表面还会有大量宏观裂纹产生(图4)。这说明在液氮压裂过程中,当液氮在主裂缝内流动时,裂缝面上的岩石在液氮低温作用下其内部的微裂缝具有张开变形的趋势,并且主裂缝壁面上还可以产生与其垂直的热力裂缝。这可以改善主裂缝附近地层的渗透率,降低生产时气体流动阻力。热力裂缝在热应力的作用下还会不断扩展延伸,产生如图7所示的与主裂缝垂直的二次裂缝<sup>[12]</sup>,这对于增加裂缝作用范围和储层的泄流面积十分有利。

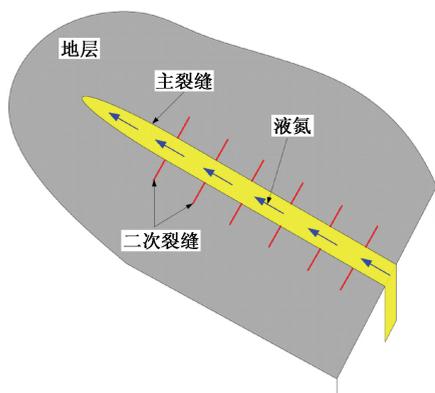


图7 低温作用产生的二次裂缝

Fig.7 Secondary fractures induced by cryogenic cooling

### 3 液氮压裂在页岩气开发应用前景

页岩气作为一种清洁、优质的能源,在世界范围内已经成为天然气主要增长点之一。中国页岩气储量十分丰富,地质资源量约为  $134 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,可采资源量约为  $25 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,基本与常规天然气相当<sup>[25]</sup>。实现页岩气的工业化开采对于缓解能源供应形势、保障国家能源安全具有十分重要意义。中国页岩气

勘探开发虽然在先导性试验井上取得一定突破,但总体仍处于起步阶段,特别是在关键开发技术上亟待突破<sup>[26-27]</sup>。对于压裂技术,不仅要求压裂液无伤害无污染,还要求形成具有一定改造规模的网络裂缝;在缺水地区,还要求尽量少地消耗水资源,甚至完全采用无水作业方式,而且今后该要求会愈发严格。从邹才能等<sup>[28]</sup>统计的页岩气主要分布看,被认为最具勘探开发前景的海相页岩气恰恰主要分布在四川、贵州等地,这些地区地貌多山地、丘陵,井场面积狭窄且交通闭塞,极大地影响了大规模水力压裂技术的应用。地势相对平缓的北部、西部大多又面临水资源匮乏和水资源污染严重的问题。须另辟蹊径,开发新型压裂技术。液氮压裂技术在避免储层伤害、保护环境以及增加储层改造体积方面具有诸多优势,有望成为页岩气高效开发的重要手段之一,并可作为今后非常规油气开发的重要储备技术。

## 4 结论

(1)液氮能够使岩石温度迅速降低,使岩石内部产生较大热应力,从而对页岩产生显著的致裂效果,并在岩石表面产生明显的宏观热力裂缝。

(2)液氮低温作用能够增加页岩的损伤程度,促进其内部微裂纹扩展和孔隙结构连通性增强,使页岩波速降低、渗透率升高。试验中波速最大降幅为10.43%,渗透率最大增幅为177.27%。

(3)液氮低温作用有助于促进页岩内部天然裂缝的开启,甚至是对页岩造成损伤破裂效果,这对于压裂过程中网络裂缝形成以及增产效果的提高十分有利。

(4)液氮压裂在避免储层伤害和环境污染、提高增产效果等方面具有诸多优势,有望为页岩气高效开发提供一条新途径。

### 参考文献:

- [1] AGUILERA R F, RIPPLE R D, AGUILERA R. Link between endowments, economics and environment in conventional and unconventional gas reservoirs [J]. Fuel, 2014, 126:224-238.
- [2] BAHRAMI H, REZAEI R, CLENNELL B. Water blocking damage in hydraulically fractured tight sand gas reservoirs: an example from Perth Basin, Western Australia [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 88/89(s1):100-106.
- [3] ANDERSON R L, RATCLIFFE I, GREENWELL H C, et al. Clay swelling: a challenge in the oilfield [J].

- Earth-Science Reviews, 2010, 98(3/4):201-216.
- [4] BRYANT J E, HAGSTROM J. An environmental solution to help reduce freshwater demands and minimize chemical use [R]. SPE 153867, 2012.
- [5] JACKSON R E, GORODY A W, MAYER B, et al. Groundwater protection and unconventional gas extraction: the critical need for field-based hydro geological research [J]. Groundwater, 2013, 51(4):488-510.
- [6] LESTZ R S, TAYLOR R S, WATKINS H, et al. Liquid petroleum gas fracturing fluids for unconventional gas reservoirs [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2007, 46(12):68-72.
- [7] 李根生, 王海柱, 沈忠厚, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 射流在石油工程中应用研究与前景展望 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5):76-80.
- LI Gensheng, WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, et al. Application investigations and prospects of supercritical carbon dioxide jet in petroleum engineering [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5):76-80.
- [8] 葛洪魁, 王小琼, 张义. 大幅度降低页岩气开发成本的技术途径 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6):1-5.
- GE Hongkui, WANG Xiaoqiong, ZHANG Yi. A technical approach to reduce shale gas development cost [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6):1-5.
- [9] MCDANIEL B W, GRUNDMANN S R, KENDRICK W D, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid [R]. SPE 38623, 1997.
- [10] GRUNDMANN S R, RODVELT G D, DIALS G A, et al. Cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid in the Devonian shale [R]. SPE 51067, 1998.
- [11] 蔡承政, 李根生, 黄中伟 等. 液氮压裂中液氮对岩石破坏的影响试验 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4):98-103.
- CAI Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Experimental study on effect of liquid nitrogen on rock failure during cryogenic nitrogen fracturing [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4):98-103.
- [12] TRAN D, SETTARI A, NGHIEM L. Initiation and propagation of secondary cracks in thermo-poroelastic media [R]. ARMA 12-252, 2012.
- [13] LI S, TANG D Z, PAN Z J, et al. Characterization of the stress sensitivity of pores for different rank coals by nuclear magnetic resonance [J]. Fuel, 2013, 111:746-754.
- [14] DASTIDAR R. Nuclear magnetic resonance (NMR) study of freezing and thawing of saturated porous media and application to shale and pore volume compressibility estimation [D]. Oklahoma: University of Oklahoma, 2007.
- [15] MATTESON A, TOMANIC J P, HERRON M M, et al. NMR relaxation of clay/brine mixtures [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000, 3(5):408-413.
- [16] 黄家国, 许开明, 郭少斌, 等. 基于 SEM、NMR 和 X-CT 的页岩储层孔隙结构综合研究 [J]. 现代地质, 2015, 29(1):198-205.
- HUANG Jianguo, XU Kaiming, GUO Shaobin, et al. Comprehensive study on pore structures of shale reservoirs based on SEM, NMR and X-CT [J]. Geoscience, 2015, 39(1):198-205.
- [17] 孙军昌, 陈静平, 杨正明, 等. 页岩储层岩芯核磁共振响应特征实验研究 [J]. 科技导报, 2012, 30(14):25-30.
- SUN Junchang, CHEN Jingping, YANG Zhengming, et al. Experimental study of the NMR characteristics of shale reservoir rock [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(14):25-30.
- [18] 赵明阶, 徐蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6):720-722.
- ZHAO Mingjie, XU Rong. The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6):720-722.
- [19] 陈颀, 吴晓东, 张福勤. 岩石热开裂的实验研究 [J]. 科学通报, 1999, 44(8):880-883.
- CHEN Yong, WU Xiaodong, ZHANG Fuqin. Experimental study of rock thermal cracking [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(8):880-883.
- [20] ENAYATPOUR S, van OORT E, PATZEK T. Freezefrac improves the productivity of gas shales [R]. SPE 166482, 2013.
- [21] 徐彬, 闫娜, 李宁, 等. 温降对液化石油气储库围岩裂隙开裂影响的数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4):718-726.
- XU Bin, YAN Na, LI Ning, et al. Numerical analysis of effect of temperature decreasing on crack of chilled LPG unlined storage cavern [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4):718-726.
- [22] CAI C, LI G, HUANG Z, et al. Rock pore structure damage due to freeze during liquid nitrogen fracturing [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(12):9249-9257.
- [23] TUDOR E H, NEVISON G W, ALLEN S, et al. 100% gelled LPG fracturing process: an alternative to conven-

- tional water-based fracturing techniques [R]. SPE 124495, 2009.
- [24] CIPOLLA C L, LOLON E, DZUBIN B A. Evaluating stimulation effectiveness in unconventional gas reservoirs [R]. SPE 124843, 2009.
- [25] 赵文智,董大忠,李建忠,等. 中国页岩气资源潜力及其在天然气未来发展中的地位[J]. 中国工程科学, 2012,14(7):46-52.
- ZHAO Wenzhi, DONG Dazhong, LI Jianzhong, et al. The resource potential and future status in natural gas develop of shale gas in China [J]. Engineering Sciences, 2012,14(7):46-52.
- [26] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
- JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploitation and Development, 2012,39(2):129-136.
- [27] 董大忠,邹才能,杨桦,等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报,2012,33(增1):107-114.
- DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(sup1):107-114.
- [28] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理-地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. Petroleum Exploitation and Development, 2010,37(6):641-653.

(编辑 李志芬)