

液氮压裂中液氮对岩石破坏的影响试验

蔡承政, 李根生, 黄中伟, 田守增, 沈忠厚, 王海柱

(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: 为了研究液氮对岩石破坏的影响, 在理论分析的基础上, 借助核磁共振测试技术, 通过测试所选取的砂岩岩样孔隙体积及孔隙结构的变化, 研究液氮对干燥状态和饱和水状态岩样的破坏形式。结果表明: 液氮的热力冲击作用可使干燥岩石在较短时间内产生收缩变形和孔隙体积减小, 试验后红色砂岩和白色砂岩岩样的孔隙体积分别降低了 8.63% 和 4.78%; 冻结作用对饱和岩样的矿物颗粒之间胶结较弱处具有损伤破坏作用, 当损伤达到一定程度后, 会贯通成缝, 使岩体出现断裂现象。

关键词: 低温液氮; 压裂; 热力冲击; 冻结; 岩石破坏; 孔隙结构; 核磁共振

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.

Experimental study on effect of liquid nitrogen on rock failure during cryogenic nitrogen fracturing

CAI Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, TIAN Shouceng, SHEN Zhonghou, WANG Haizhu

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

Abstract: For the purpose of investigating the effect of cryogenic nitrogen on rock breaking, two kinds of sandstone samples were selected to test in laboratory. Through analyzing the change in pore volume and pore structure by nuclear magnetic resonance technique, the failure types of anhydrous and water saturated rock samples were studied. The results show that shrinkage deformation occurs and pore volume decreases in anhydrous rock samples under liquid nitrogen thermal shock. And the pore volume of red sandstone and white sandstone decrease by 8.63% and 4.78 respectively. The water-saturated samples are broken by liquid nitrogen freezing, during which obvious cracks appear. While the freezing effect will damage the weak cement between rock minerals. When the damaged zone connects with each other, obvious cracks will be formed in the rock matrix.

Key words: cryogenic liquid nitrogen; fracturing; thermal shock; freezing; rock failure; pore structure; nuclear magnetic resonance (NMR)

随着新勘探开发储层质量的降低, 常规水力压裂技术在油气开发中逐渐面临一系列问题, 例如储层二次伤害^[1]、水资源使用和保护等^[2-3]。在这种情况下, N₂、CO₂ 以及 LPG 等无水压裂技术开始受到重视^[4-6]。液氮温度极低, 无色无味且无污染, 不仅广泛

应用于生活生产各个领域^[7-8], 而且还曾作为压裂流体用于油气增产, 效果显著^[9-10]。由于液氮温度极低, 在裂缝形成过程中会对裂缝壁面上的岩石产生热力破坏作用, 这不仅可以改善裂缝附近地层的渗透率, 还能防止压后主裂缝的闭合。笔者在理论分析的

收稿日期: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金重大国际(地区)合作项目(51210006); 国家自然科学基金项目(51374220)

作者简介: 蔡承政(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事储层压裂改造理论和应用研究。E-mail: cupcaicz@163.com。

通讯作者: 李根生(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事钻完井和压裂研究。E-mail: lig@s@cup.edu.cn。

基础上,借助核磁共振(NMR)测试技术,分析液氮对岩石微观孔隙体积和结构的影响,研究液氮对岩石破坏的影响以及岩石的具体破坏形式。

1 低温液氮对岩石的破坏机制

1.1 热力冲击机制

液氮温度极低,为 77.59 ~ 92.71 K。当液氮与岩石接触时,会使接触面附近岩石的温度骤降,产生高速收缩变形。在高速变形下,岩石的韧性会降低(变得更“脆”),更加容易发生脆性破坏。当岩石受到外界和内部彼此之间的约束变形不能自由进行时,岩石表面就会产生较大的拉应力。当拉应力超过岩石的抗拉强度时,岩石就会产生拉伸破坏^[9],破碎的深度和岩石与液氮接触时间以及岩石自身的热物理性质相关。

液氮对于岩石的热力冲击作用主要体现在两个方面:一方面是岩石矿物颗粒及其胶结物会产生高速收缩变形,韧性降低,脆性增强,即热力冲击作用会改变岩石自身的性质;另一方面由于岩石是一种由多种矿物颗粒组成的非均质性较强的材料,当外界温度发生变化时,不同矿物颗粒产生的变形程度不同,从而产生热应力。当热应力超过矿物间的胶结强度时,会使岩石内部产生裂纹损伤。但是这种裂纹损伤有时须借助一定的检测方法才能测得,例如声发射和声波检测方法等。Kim 等^[12]通过室内声波测试试验发现热力冲击作用能使岩石产生裂纹。然而关于热力冲击方面的研究更多地关注岩石内部的损伤状态,岩石变形容容易被忽略。笔者通过测试岩石在液氮条件下的变形特性研究热力冲击对岩石破坏的影响。

1.2 冻结破坏机制

液氮除了会对岩石产生热力冲击之外,还会导致岩石的冻结破坏。这是因为岩石是一种多孔介质,内部孔隙常会赋存一定量水分,孔隙水遇冷结冰体积膨胀(膨胀量约为 9%^[13])会挤压孔隙壁面,从而使岩石发生冻胀破坏,也叫冻结破坏。岩石冻结破坏主要有 3 种方式^[14]:一是孔隙水结冰体积膨胀对孔隙壁造成较大挤压力;二是孔隙水形成冰透镜体,使岩石开裂;三是孔隙中部分尚未结冰的水在冰体的挤压下产生额外孔隙压力。由于液氮温度极低,孔隙内部水分在较短时间内即可冻结成冰,不存在未结冰的冷水,因此液氮对岩石的冻结破坏机制主要是前两种形式。试验研究^[13]表明,在 101.325 kPa,假设孔隙体积保持不变,孔隙水结冰会对其周

围岩体产生约 96 MPa 的冻胀力,足以使岩石内部原有的孔隙结构发生破坏。

2 室内试验

2.1 岩样制备及试验仪器

选取了红色和白色两种砂岩,采用水钻法钻取直径为 25 mm、高度约为 50 mm 的圆柱形岩心。将红色砂岩称为 1[#]岩样,白色砂岩称为 2[#]岩样。每种岩石钻取 4 块,每两个不同种类的岩样编为一组,岩样编号为 X-X,第一个数字代表组号,第二个数字代表岩样类型。试验中所用到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、核磁共振测试系统、岩样饱和装置等。

核磁共振系统为北京派克斯公司生产的 10 MHz SPEC-23 核磁共振试验测试系统(图 1),该试验系统主要由核磁共振体、电子控制系统和核磁共振测试软件组成。磁场磁感应强度为 0.24 T,磁体均匀度为 20.0×10^{-6} ,探头内径为 38、75 和 111 mm 3 种规格,射频脉冲频率为 1 ~ 60 MHz,最大单轴磁感应强度梯度为 0.1 T/m,适合的工作温度为 10 ~ 40 °C。岩样饱和装置为 BH-2 型真空加压饱和装置,由海安石油科技有限公司研制,其中真空罩为 20 cm,压力精度为 0.1 MPa。



图 1 SPEC-23 核磁共振测试装置

Fig. 1 SPEC-23 NMR instrument

2.2 试验方法

试验目的为测试液氮对岩石的热力冲击以及冻结破坏效果。一是使用液氮对所制备的岩样进行迅速冷却处理;二是通过核磁共振测试系统测试冷却处理前后岩样的横向弛豫时间 T_2 分布;最后根据岩样以及核磁共振特性变化分析液氮对岩石的破坏影响。

2.2.1 岩石 NMR 测试方法及原理

在岩石微观孔隙结构研究中,通过测试饱和岩样的核磁共振弛豫时间 T_2 分布曲线反演岩石内部的孔隙分布和孔隙体积等参数。根据岩石 NMR 测试原理^[15-16],饱和岩样孔隙内流体的氢核在经过外部磁场极化后产生一个横向磁化衰减信号,该信号

的衰减时间即为横向弛豫时间 T_2 。孔隙体积越小,氢核在运动过程中与孔隙壁面碰撞越频繁,氢核能量衰减越快, T_2 值越小,反之, T_2 值越大。饱和岩样经过 NMR 测试后,就可以将岩样的孔隙分布以 T_2 分布的形式展示出来。另外 T_2 值的信号幅度与其所对应的孔隙体积有关,体积越大,信号幅度越大。 T_2 分布曲线的总积分面积与总孔隙体积成正比,面积越大,岩样内部的孔隙体积越大^[17]。因此,通过 NMR 测试可以得到岩石的孔隙分布以及孔隙体积相关信息。岩石发生变形会导致 T_2 曲线面积发生变化,岩石内部孔隙结构遭到损伤破坏会导致 T_2 分布曲线形态发生变化。

2.2.2 热力冲击测试方法及原理

岩石受到热力冲击作用会产生高速变形^[18],导致岩石体积发生变化。岩石是一种由多种矿物颗粒构成的介质,矿物颗粒遇冷会产生收缩变形,进而对岩石的孔隙结构及孔隙体积产生影响。Dastidar^[19]建立了一个简单的矿物颗粒半径与孔隙半径的关系式,假设岩石的矿物颗粒为球形且直径相等,孔隙由4个矿物颗粒围成。利用该孔隙模型计算出的孔隙体当量半径与颗粒半径的关系式为

$$r_p = 0.414r. \quad (1)$$

式中, r_p 为孔隙体当量半径, μm ; r 为矿物颗粒半径, μm 。

由式(1)可见,岩石矿物颗粒产生收缩变形会导致孔隙体积发生变化。所以,可以通过测试岩石孔隙体积的变化来评估岩石在热力冲击下的高速变形效果。为了消除孔隙水对岩石冻结破坏作用,在进行该项试验前首先对岩石进行烘干处理,然后采用 NMR 测试试验前后岩石孔隙体积的变化。

2.2.3 冻结破坏测试分析方法

冻结破坏主要考虑的是孔隙水对岩石的冻胀效应,测试方法是将饱和水后的岩样放在液氮中进行冷却处理。通过观察液氮处理后岩石本体变化(主要是观察是否有裂纹产生),并结合试验前后岩石 T_2 谱线及谱面积的变化,对岩石孔隙结构变化以及冻结效果进行分析。

2.3 试验步骤

试验中将干燥和饱和水状态下的岩样浸入液氮当中,观察岩样本体变化。然后借助 NMR 测试系统对试验前后的岩样进行横向弛豫时间测试,根据横向弛豫时间 T_2 分布以及 T_2 谱面积的变化判断岩样内部孔隙结构和体积变化。主要试验步骤为:①对制备好的所有岩样进行真空饱和处理;②对饱和

处理后的岩样进行一次核磁共振测试,得到岩样初始状态下的横向弛豫时间 T_2 分布;③将饱和状态下第2~4组岩样浸入液氮10 min,然后取出在室温条件下融解;④将第1组岩样放入干燥箱中,在80℃的温度下进行烘干48 h,待24 h之内岩石质量变化不超过0.2%时取出,冷却至室温后浸入液氮中10 min;⑤将经过液氮处理后的所有岩样再次进行真空加压饱和处理,然后再进行一次核磁共振测试,测得液氮处理后岩样的 T_2 分布。

3 试验结果分析

3.1 低温液氮对岩石热力冲击效果

对于热力冲击方面的试验,主要是为了探测液氮热力冲击前后岩石孔隙体积的变化情况。对于同一岩样而言,孔隙体积与 T_2 谱线总面积成正比,孔隙体积的变化可以用 T_2 谱面积的变化表示。通过谱面积变化测出岩石孔隙体积变化情况即可推测出岩石矿物颗粒的收缩变形情况,该部分试验结果比较单一明确,因此选用一组岩样进行相关测试。岩石的冻结破坏的影响因素相对比较复杂,不同的孔隙结构、岩石矿物颗粒胶结的强弱等都可能对冻结破坏效果产生影响,因此更多的岩样被用于进行冻结破坏方面的试验。

3.1.1 横向弛豫时间 T_2 分布变化

图2为第一组岩样试验前后的横向弛豫时间 T_2 谱。试验后 T_2 分布一个十分明显的变化特征就是谱线整体呈下降趋势。这说明干燥状态下的岩样经过液氮处理后,岩石矿物颗粒在较短时间内即可产生收缩变形,导致孔隙体积降低。

3.1.2 横向弛豫时间 T_2 谱面积变化

根据岩样的 T_2 分布变化,仅能定性评估岩石孔隙结构的变化,无法定量表征孔隙体积的变化,因此还要对试验前后的 T_2 谱面积变化进行分析计算。表1为第一组岩样试验前后谱面积变化情况。试验后1-1#岩样 T_2 谱面积降低了8.63%,1-2#岩样降低了4.78%,这说明试验后的岩石矿物颗粒发生了较大程度的收缩变形,导致孔隙体积变小。由此可以推断,在较短时间内液氮就能使岩样产生高速收缩变形。在液氮压裂裂缝延伸过程中,由于裂缝壁面上岩石在高速变形状态下脆性会增强,断裂韧性会降低,有利于促进储层岩石发生脆性断裂破坏,不仅有助于主裂缝的起裂,也有助于在裂缝壁面上产生更多微裂缝。微裂缝的产生有利于增强主裂缝附近地层的渗透性,有效防止压后主裂缝的闭合,从而改

善压裂效果。

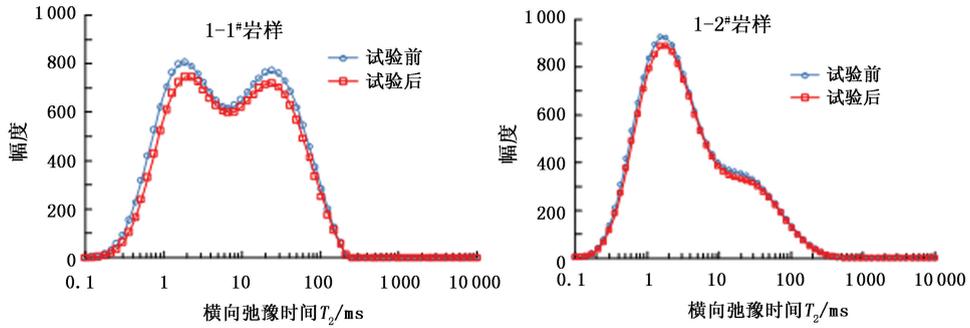


图 2 干燥状态下岩样试验前后横向弛豫时间 T_2 谱分布

Fig. 2 T_2 distributions of anhydrous rock samples before and after experiment

表 1 液氮对第一组岩样 T_2 谱面积变化的影响

Table 1 Effect of liquid nitrogen on change of T_2 spectrum area of first group samples

岩样	谱线总面积		变化率/%	第一个峰比例/%		第二个峰比例/%		第三个峰比例/%	
	试验前	试验后		试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
1-1#	20172	18431	-8.63	51.47	50.58	48.53	49.42	—	—
1-2#	16416	15616	-4.78	80.08	80.11	19.92	19.89	—	—

3.2 低温液氮对岩石冻结破坏效果

为了确定孔隙水结冰冻胀对岩石孔隙结构破坏的影响,将第 2~4 组岩样在饱和水的状态下浸入到液氮中,同样也对试验前后的岩样进行了核磁共振

测试。

3.2.1 横向弛豫时间 T_2 分布变化

图 3 为第 2~4 组岩样试验前后的横向弛豫时间 T_2 谱。

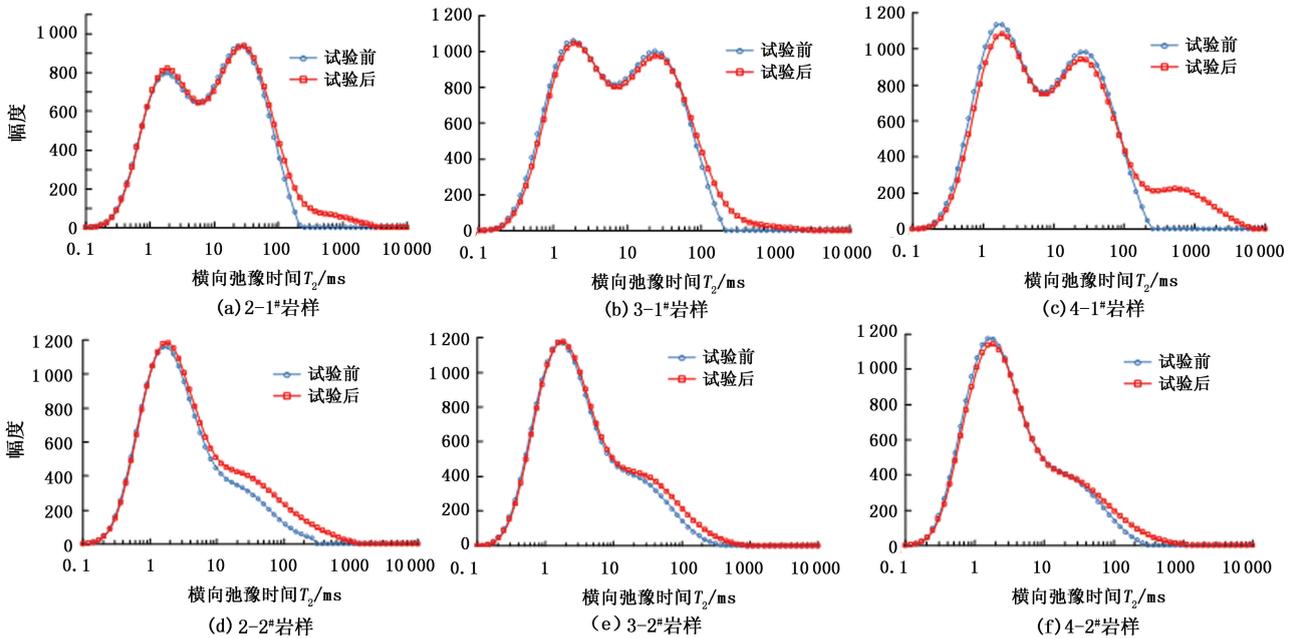


图 3 饱和水状态下岩样试验前后横向弛豫时间 T_2 谱

Fig. 3 T_2 distributions of water-saturated rock samples before and after experiment

从图 3 中可以看出,在孔隙水冻胀作用下,岩样的 T_2 形态主要变化是谱线向右移动且最大弛豫时间增加。2-1# 和 3-1# 岩样的最大横向弛豫时间由 215 ms 增加到 3341 ms;4-1# 岩样的最大横向弛豫时

间从 215 ms 增加到了 5780 ms,并且产生了新的波峰;2-2#、3-2# 和 4-2# 岩样的最大横向弛豫时间从 259 ms 上升至 1340 ms。最大弛豫时间的增加表明孔隙水的冻结作用使岩石内部产生新的大尺寸孔隙。

另外还需要说明的是,1-2#岩样的 T_2 谱线纵坐标幅度与 2-2#、3-2#、4-2#岩样相差较大主要由岩样的尺寸差异造成。饱和岩样每个 T_2 值幅度与其所对应尺寸孔隙的体积成正比,孔隙体积越大, T_2 值的幅度越大。影响 T_2 值的幅度主要有两个因素,一个是岩样自身的体积,岩样体积越大,自然内部孔隙越大,饱和后测得的 T_2 值的幅度越大;另一个是与岩样的孔隙度有关,当岩样体积相同时,孔隙度越大,饱和后测得 T_2 值的幅度就越大。在制作岩样的过程中,尺寸上的误差很难避免。其中 1-2#号岩样的长度约为 4.8 cm,2-2#~4-2#岩样的长度为 5.0~5.1 cm,另外 1-2#岩样的孔隙度比其他岩样略低一些,所以最终导致 1-2#岩样的纵坐标幅度要低于其他岩样。由于试验主

要对比同一个岩样的液氮处理前后的变化情况,因此可以忽略尺度差异对试验结果的影响。

3.2.2 横向弛豫时间 T_2 谱面积变化

表 2 为饱和状态下岩样的 T_2 谱面积变化。冻结后岩样谱面积有不同程度增加,其中 2-1#、3-1#和 4-1#岩样增加幅度为 1.74%~7.12%,2-2#、3-2#和 4-2#岩样增加幅度为 1.19%~12.94%。增加幅度有较大差别主要是因为岩石个体之间差异性较大,还有就是岩样上产生的裂纹(图 4)会使岩石保持水能力变差,且裂纹尺度(主要是宽度)越大,水越容易从岩石中渗出。以上两个原因虽然导致最终测得的谱面积在变化幅度上存在较大差异,但试验后岩样的 T_2 谱总面积总体依然呈上升趋势。

表 2 低温液氮对饱和状态下岩样 T_2 谱面积变化的影响

Table 2 Effect of low-temperature liquid nitrogen on change of T_2 spectrum areas of water-saturated rock samples

岩样	谱线总面积		变化率/%	第一个峰比例/%		第二个峰比例/%		第三个峰比例/%	
	试验前	试验后		试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
2-1#	22179	23758	7.12	43.89	41.50	56.11	58.50	—	—
2-2#	20595	21568	12.94	82.30	78.88	17.70	21.12	—	—
3-1#	26219	26676	1.74	51.78	49.00	48.22	51.00	—	—
3-2#	20122	21170	5.21	81.84	78.14	18.16	21.86	—	—
4-1#	27099	28818	6.34	52.81	48.98	47.19	43.27	0	7.75
4-2#	20131	20371	1.19	82.22	78.74	17.78	21.26	—	—

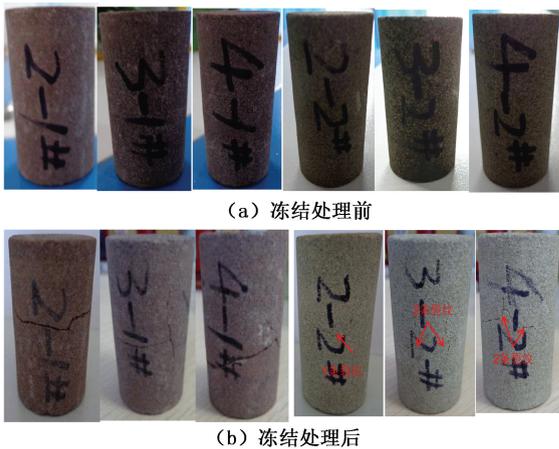


图 4 饱和状态下岩样液氮冻结效果

Fig. 4 Effect of liquid nitrogen freezing of samples under water-saturated condition

为了确定冻结作用对岩石破坏的具体过程和形式,对试验前后不同峰面积的变化进行分析(表 2)。从表 2 可以看出,试验后第一个峰面积所占比例明显降低,表明岩石内部微孔隙所占比例减少。这主要是由两个方面原因造成,一是微孔隙自身的扩展,尺寸增加,变成较大尺寸孔隙;二是微孔隙之间或者微孔隙与较大尺寸孔隙之间相互连通,从而变成较大尺寸孔隙。这都会导致第一个峰面积比例下降,

第二个峰面积比例上升甚至产生第三个峰。由此可见液氮冻结对岩石破坏的主要过程首先是微孔隙的发育扩展,然后微孔隙与较大尺寸孔隙之间相互沟通形成大尺寸孔隙,形成明显的裂纹,最终使岩石发生破坏。另外,岩样在液氮一次冻结下即出现了明显的裂纹,而在常规冻融循环试验^[20]中,反复冻融(-40~20℃)循环几十次,且一次冻融时间长达几个小时才能出现明显裂纹,因此液氮冻结对岩石的破坏作用具有快速、明显的特征。

液氮冻结对岩石的破坏并产生裂缝的原因可以归纳为:当岩石孔隙水冻结成冰时对孔隙壁面产生较大的冻胀力,该冻胀力使岩石矿物颗粒胶结较弱处产生局部损伤。当局部损伤达到一定程度后,彼此之间就会相互贯通,进而在岩体上产生明显的裂缝。裂缝的形态与岩石的微观结构以及孔隙本部状态有很大关系,具有较大的不确定性。

4 结论

(1) 干燥状态下的岩样在液氮热力冲击作用下孔隙结构发生收缩变形,导致岩样孔隙体积缩小。

(2) 饱和水状态岩样经过液氮冻结后,岩石的孔隙尺度和总的孔隙体积增加,同时微孔隙体积所

占比例减小。

(3)对于饱和状态岩样,液氮冻结作用会对颗粒间胶结产生损伤破坏。当损伤达到一定程度后会贯通成缝,形成宏观裂纹。

参考文献:

- [1] BENNION D B, THOMAS F B, BIETZ R F. Low permeability gas reservoirs: problems, opportunities and solutions for drilling, completion, stimulation and production [R]. SPE 35577, 1996.
- [2] BRYANT J E, HAGGSTROM J. An environmental solution to help reduce freshwater demands and minimize chemical use[R]. SPE 153867, 2012.
- [3] HOLTSCLOW J, LOVELESS D, SAINI R, et al. Environmentally focused crosslinked-gel system results in high retained proppant-pack conductivity [R]. SPE 146832, 2011.
- [4] FREEMAN E R, ABEL J C, KIM C M, et al. A stimulation technique using only nitrogen[J]. Journal of Petroleum Technology, 1983,35(12):2165-2174.
- [5] GUPTA D V S, BOBIER D M. The history and success of liquid CO₂ and CO₂/N₂ fracturing system [R]. SPE 40016, 1998.
- [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] 陈国邦. 新型低温技术[M]. 1版. 上海:上海交通大学出版社, 2003.
- [8] SHOULDICE S P. Liquid nitrogen developments and applications in drilling and completion operations[J]. Journal of Canadian Petroleum,1964(65):158-164.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] RASSEFOSS S. In the research of the waterless fracturing: the power of cold [J]. Journal of Petroleum Technology, 2013,65(6):54.
- [12] KIM K. M, KEMENY J. Effect of thermal shock and rapid unloading on mechanical rock properties[R]. American Rock Mechanics Association (ARMA) 09-84, 2009.
- [13] 许玉娟,周科平,李杰林,等. 冻融岩石核磁共振检测及冻融损伤机制分析[J]. 岩土力学,2012,33(10):3001-3005,3102.
XU Yujuan, ZHOU Keping, LI Jielin, et al. Study of NMR experiment and damage mechanism analysis under freeze-thaw condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(10):3001-3005,3102.
- [14] 徐光苗,刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(17):3076-3082.
XU Guangmiao, LIU Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17):3076-3082.
- [15] 刘堂宴,王绍民,傅容珊,等. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析[J]. 石油地球物理勘探, 2003,38(3):328-333.
LIU Tangyan, WANG Shaomin, FU Rongshan, et al. Analysis of rock pore throat structure with NMR spectra [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003,38(3):328-333.
- [16] WANG Kewen, LI Ning. Numerical simulation of rock pore-throat structure effects on NMR T₂ distribution[J]. Applied Geophysics, 2008,5(2):86-91.
- [17] 陆大卫,江国法. 核磁共振测井理论与应用[M]. 1版. 北京:石油工业出版社,1998.
- [18] 严宗达,王洪礼. 热应力[M]. 北京:高等教育出版社,1993:416-419.
- [19] 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.
- [20] 李杰林,周科平,张亚民,等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1208-1214.
LI Jielin, ZHOU Keping, ZHANG Yamin, et al. Experimental study of rock porous structure damage characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6):1208-1214.

(编辑 李志芬)