

“智能瓦斯抽采技术与装备”专题

【编者按】煤炭是我国的主体能源,瓦斯作为煤的伴生产物,是煤矿重大灾害源和大气污染源,同时也是宝贵的不可再生能源。瓦斯抽采是瓦斯治理的治本之策,也是提升我国煤矿安全高效洁净生产水平的关键技术,有利于优化我国能源结构、减少温室气体排放。随着国家对煤炭安全生产标准的升级,以及煤矿智能化技术的发展和智慧矿山建设的不断推进,要求煤矿企业进一步提高瓦斯抽采率和瓦斯利用率,减少煤矿灾害事故和瓦斯向大气的排放量。针对近年我国在煤矿瓦斯抽采技术方面取得的研究成果,同时为探讨瓦斯抽采技术与装备的发展方向,本刊组织策划了“智能瓦斯抽采技术与装备”专题,报道内容涉及瓦斯(煤层气)抽采增透技术、智能化钻探技术与装备、瓦斯抽采及钻进技术在煤矿的应用等方面。特别感谢中国矿业大学翟成教授对本专题组稿工作的支持!衷心感谢各位专家学者在百忙之中为本专题撰稿!

文章编号:1671-251X(2020)10-0001-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17669

液氮循环致裂技术强化煤层气抽采的研究与应用展望

翟成^{1,2}, 徐吉钊^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 江苏 徐州 221116)



扫码移动阅读

摘要:水力压裂技术在强化煤层致裂、提高煤层气抽采效率方面广泛应用,但存在耗水量大、压裂液易污染环境等问题,难以在富含煤层气的缺水地区应用。基于常规液氮压裂技术,通过改变液氮单次注入方式,提出了液氮循环致裂技术,并对该技术用于强化煤层气抽采进行了展望。该技术采用液氮循环注入方式,使得液氮持续充填不断扩展的裂隙空间,形成复杂的裂隙网络。其致裂煤岩机理为循环累积损伤、低温致裂及气体致裂三者耦合作用机制:①在液氮循环注入过程中,不同类型组配颗粒间出现不同程度的变形响应,不断累积的颗粒间损伤在一定程度上劣化煤体局部区域的抗压强度,导致新生裂隙的衍生及原生孔隙扩容。②液氮对煤岩的冷冲击导致煤岩内部结构发生断裂,产生大量微裂隙,并使其随着液氮循环注入不断扩展和导通,同时液氮的低温作用导致的水冰相变过程能进一步破坏煤岩内部结构。③液氮汽化产生的高压气体使得煤岩体积重复性地扩展-收缩,进一步促使裂隙发育和导通。液氮循环致裂技术以液氮为压裂介质,极大缓解了对水资源的依赖,对环境无污染,可用于煤层气抽采等领域。

关键词:煤层气抽采;液氮致裂;液氮循环致裂;循环累积损伤;低温致裂;冷冲击;气体致裂

中图分类号:TD712 文献标志码:A

Research on cyclic liquid nitrogen fracturing technology for enhancing coalbed methane drainage and its application prospect

ZHAI Cheng^{1,2}, XU Jizhao^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. National Engineering Research Center for Coal Gas Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Hydraulic fracturing technology is widely used in fracturing coal seam and improving efficiency of coalbed methane drainage, but due to large water consumption, environment pollution by

收稿日期:2020-10-09;修回日期:2020-10-12;责任编辑:李明。

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51925404);国家自然科学基金资助项目(51774278);江苏省杰出青年科学基金资助项目(BK20170001);江苏省特聘教授特别资助项目。

作者简介:翟成(1979—),男,山东滕州人,教授,博士,主要研究方向为矿井瓦斯抽采及灾害防治,E-mail:greatzc@cumt.edu.cn。

引用格式:翟成,徐吉钊.液氮循环致裂技术强化煤层气抽采的研究与应用展望[J].工矿自动化,2020,46(10):1-8.

ZHAI Cheng, XU Jizhao. Research on cyclic liquid nitrogen fracturing technology for enhancing coalbed methane drainage and its application prospect[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(10): 1-8.

fracturing fluid and other problems, it is difficult to be used in water-deficient areas where are rich in coalbed methane. Based on conventional liquid nitrogen fracturing technology, a cyclic liquid nitrogen fracturing technology is proposed through altering the single injection mode of liquid nitrogen, and application of the technology in enhancing coalbed methane drainage is prospected. The technology uses cyclic injection mode of liquid nitrogen, which can make liquid nitrogen to fulfill micro-crack space continuously, so as to form complex crack networks. The principle of fracturing coal-rock of the technology is coupling mechanism of cyclic cumulative damage, low temperature fracturing and gas fracturing: ① During cyclic injection process of liquid nitrogen, different deformation responses appear among grains with different collocation, and accumulated damages among grains could weaken coal body strength of pressure resistance in local area to some degree, so as to generate new cracks and extend the primary cracks. ② Cold shock of liquid nitrogen to coal-rock leads to break of inner structure of coal-rock, so a large number of micro-cracks are generated and continuously extended with cyclic injection of liquid nitrogen. Meanwhile, water-ice phase transition caused by low temperature property of liquid nitrogen could further damage inner structure of coal-rock. ③ The generated high-pressure gas by vaporization of liquid nitrogen could make coal-rock volume to repeatedly extend and shrink, which further enhances growth and connection. Cyclic liquid nitrogen fracturing technology, which takes liquid nitrogen as fracturing fluid, greatly relieves dependence on water resources, and has no pollution to environment. The technology can be applied in coalbed methane drainage.

Key words: coalbed methane drainage; liquid nitrogen fracturing; cyclic liquid nitrogen fracturing; cyclic cumulative damage; low temperature fracturing; cold shock; gas fracturing

0 引言

进入 21 世纪以来,全球经济和科技高速发展,各国对油气资源的需求量日益增加。然而传统的油气资源储量有限,能源结构调整已成为目前各国亟需解决的战略问题^[1]。煤层气^[2]作为近几十年新兴的非常规气体能源,赢得了广大科技人员的青睐。我国煤层气储量丰富,占全球已探明总量的 13%^[3]。华北和西北地区是我国煤层气的主要分布地区,其储量分别占煤层气总储量的 56.3% 和 28.1%^[4]。煤层气抽采方式主要分为井下抽采和地面抽采,其中井下抽采占据主导地位^[5]。煤层气抽采量逐年增加,2011 年突破百亿立方米,标志着我国煤层气产业进入高速发展的初期阶段^[6]。

随着浅层煤炭资源枯竭,煤层气开采出现深部化趋势^[7]。我国深部煤层大多具有微孔隙、高吸附、低渗透的特点,透气性较差^[8]。煤层气抽采效率低,需要借助外力增加煤层透气性。基于水资源的低成本和常规利用率 2 种特性,水力压裂技术是目前煤层增透的主要方式^[9],可强化煤层致裂、提高煤层气抽采效率。尽管技术较为成熟,但仍存在以下不足^[10-11]:① 水可能会造成储层内部的黏土水化膨胀,进而堵塞气体运移通道。② 压裂结束后形成的裂隙表面或毛细管内会滞留大量压裂液,易形成明显的气液交界面,出现水锁效应。③ 高压水的大流量需求和各种化学试剂的添加造成水资源浪费和环境污染,在缺水地区难以应用。

针对我国富含煤层气的缺水地区,本文提出了液氮循环致裂技术。该技术改变了传统液氮致裂模式及注入方式,结合液氮的冷冲击、相变汽化膨胀及循环损伤弱化等特性,改变现有液氮单次注入方式下形成的单一裂隙形态,解决了氮气沿裂隙的泄漏补偿难题。本文从以下 3 个方面进行阐述:首先介绍液氮致裂技术,其次从破岩机制的 3 个方面对该技术进行研究,最后对该技术在煤层气开采领域的可应用性进行展望。

1 液氮致裂技术

1.1 液氮基本性质

液氮即液态氮,分子量为 28,在大气压条件下熔点为 -209.86°C 、沸点为 -195.8°C ,临界密度为 0.31 kg/m^3 ,临界温度为 -196°C ,临界压力为 3.39 MPa ,液态密度为 0.81 kg/m^3 。液氮为无色透明、无味无毒、低黏度的透明液体,不导热导电,不自燃助燃,化学性质稳定,不与任何物质发生化合作用。液氮的液气比为 1:650,即 1 单位体积的液氮汽化可产生约 650 倍体积的氮气^[12]。液氮在常温下很容易汽化,但压力对液氮沸点影响较大,如图 1 所示。沸点随压力增大明显升高,该特点能保证液氮压裂过程中温度升高一定范围内仍保持液态。另外,液氮密度正相关于注氮压力,在 45~75 MPa 注氮压力范围内,液氮密度为 $0.38\sim 0.46\text{ g/cm}^3$ 。

1.2 液氮致裂技术

1971 年 Teneco Oil Company^[13]提出了一种生

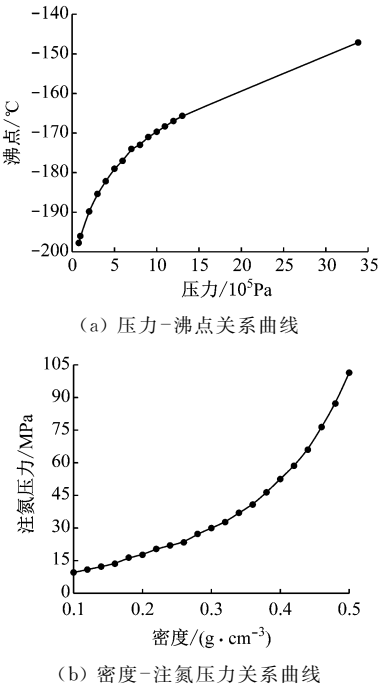


图1 液氮物理特性

Fig. 1 Physical properties of liquid nitrogen

产井压裂后先向裂隙中注入冷冻流体(液氮、低温盐水等),至地层温度降低到储层流体冰点以下发生冷冲击,再注入加热流体(高温蒸汽等)的增产工艺。B. W. McDaniel 等^[14]指出:液氮注入煤层气储层后形成的剧烈热冲击作用使得裂隙壁面产生物理变化,能够防止水力裂隙和热诱导裂隙完全闭合,且会产生与水力裂隙正交的热诱导微裂隙;利用液氮进行初次压裂,裂隙及近裂隙地带存在的流体与液氮接触后发生冷冲击,会对岩石产生额外的应力。S. R. Grundmann 等^[15]认为液氮的低温会使裂隙壁面产生超过岩石抗拉强度的热张应力,导致岩石壁面产生微裂隙。李子丰^[16]提出了一种针对低渗、超低渗储层的液氮在油气层内汽化压裂方法的新压裂工艺。徐红芳^[17]通过计算井筒温度场和建立裂隙温度场模型,提出将液氮汽化压裂过程用于页岩气开采过程。

基于现有对液氮低温作用的相关研究,采用液氮作为非常规压裂液的压裂技术具有以下优势:①可极大地缓解对水资源的依赖,且液氮本身不含腐蚀性、性质稳定,对煤层气储层和周围环境不会造成污染。②液氮作为压裂液能够迅速降低注入区域的温度,一方面促进基质内孔隙或裂隙中的自由水凝固成冰,该凝结过程中所产生的冻胀力促进煤层发生破坏,另一方面,低温使钻孔周围煤岩产生不均匀的温度分布,形成明显的温度梯度,产生的温度应力能够较大程度地弱化煤岩颗粒之间的粘结强度,不断增加煤岩基质内的损伤。③液氮作为无水

压裂液能够有效避免储层吸收水分所引起的煤岩基质水化膨胀,裂隙中的自由水低温结冰能够有效堵塞孔道,防止压裂液滤失。④液氮注入煤层内迅速汽化,生成的氮气在钻孔内形成较大的气体压力,当气体压力超过煤岩的抗拉强度时,造成煤岩体破坏。另外,与水力压裂相比,液氮对煤层基质的机械扰动较小,减少了粉尘产生;同时,液氮作为不含有添加剂的压裂液,能解决煤粉尘与添加剂混合造成裂隙堵塞的问题。

2 液氮循环致裂煤岩机理分析

罗平亚^[18]指出,针对当前开发的大多数煤层气储层,其增产改造过程要将煤层“打碎”成小的基质单元,促进煤层气的解吸与流动,才能大幅度提高煤层气单井产量。液氮具有的低温破岩特性能够将煤层“打碎”,符合罗平亚提出的煤层气增产理念。然而,现阶段的液氮致裂技术注入方式比较单一,按照钻孔体积预先估算出液氮需求量,然后采用一次性注入封孔等工序完成致裂目标。该方式存在一定不足,如钻孔内液氮量随着裂隙扩展逐渐减少、汽化后的氮气易滤失、裂隙走向比较单一等。液氮循环注入方式(图2)则使裂隙不断被液氮充填,促进裂隙不断发育,从而形成煤层内的裂隙网络。

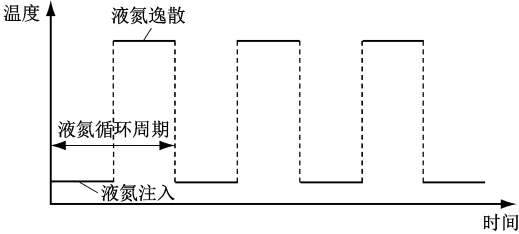


图2 液氮循环注入方式

Fig. 2 Cyclic injection mode of liquid nitrogen

从宏观上看,液氮循环致裂技术属于无水致裂领域的一种体积致裂技术,采用液氮作为压裂液取代常规水力压裂的水基压裂液,使天然裂隙不断扩展延伸、脆性岩石发生张拉破坏与剪切滑移,最终形成天然裂隙与人工裂隙相互交错的裂隙网络,从而增加改造体积,实现大范围的致裂区域。从微观上看,液氮循环致裂技术主要依靠循环式注入方式及液氮的气液两相属性,对煤岩体进行循环式加卸载及低温作用,而煤岩体的致裂结果正是循环累积损伤、低温致裂、气体致裂三者耦合的共同结果,如图3所示。

2.1 循环累积损伤

采用液氮循环注入方式时,钻孔壁面的应力循环模式为液氮注入应力升高→液氮汽化应力升高→氮气逸散应力降低。该模式类似于岩石单轴加卸载

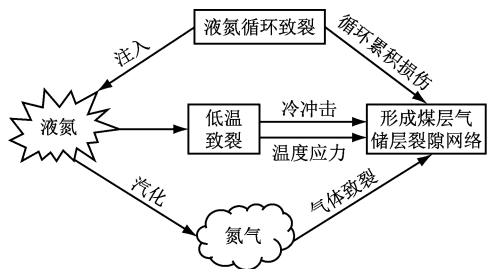


图 3 液氮循环致裂煤岩机理

Fig. 3 Mechanism of cyclic liquid nitrogen fracturing coal-rock

过程。选择 1 个周期为研究对象,在液氮注入至汽化过程中,壁面岩石受到的应力强度不断增加,类似于煤岩的加载过程;在氮气逸散过程中,煤岩受到的应力强度逐渐降低,相当于应力卸载过程。液氮循环注入过程中,煤岩颗粒之间发生滑移、剪切、张拉等现象,粘结强度受到各个应力影响而降低。钻孔附近煤岩内部产生大量的细观损伤,进而弱化其自身强度。

根据 Lemaitre 等效应力原理^[19],应力 σ 作用于受损材料上引起的应变与等效应力 $\bar{\sigma}$ 用于无损材料上引起的应变等价。根据宏观唯象损伤力学概念,循环应力载荷作用下的受损煤岩在一维状态下的应力-应变关系为

$$\begin{cases} \epsilon = \frac{\bar{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{E(1-D)} \\ D = 1 - \left(\frac{E_n}{E} \right)^{\frac{\omega}{2\pi}} \end{cases} \quad (1)$$

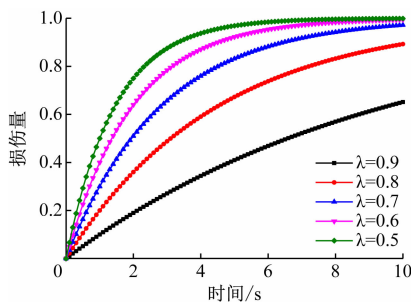
式中: ϵ 为应变; E, E_n 分别为煤岩初始弹性模量和 n 次加卸载作用后的弹性模量; D 为损伤变量; ω 为角速度; t 为时间。

由式(1)可推导出 n 次加卸载作用后的煤岩应力:

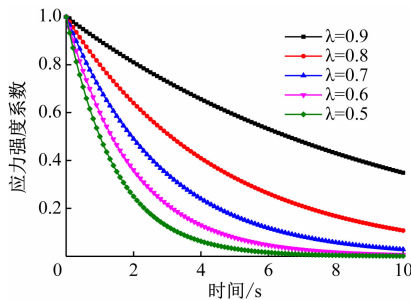
$$\sigma = E\epsilon \left(\frac{E_n}{E} \right)^{\frac{\omega}{2\pi}} \quad (2)$$

不同环境下的煤岩强度不同,温度越低,则脆性越大,强度越小。本文选取 $\lambda = E_n/E = 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5$, 简化 $\omega/2\pi = 1$, 则在液氮循环注入过程中,煤岩内部产生的损伤量和煤岩应力强度系数 $((E_n/E)^{\omega/2\pi})$ 变化如图 4 所示。可看出在液氮循环注入时间不断增加的过程中,煤岩的理论损伤量随 λ 增大而减小,这是因为在液氮循环注入过程中,煤岩体内部萌生大量的微裂隙,产生损伤;损伤量增量在液氮注入初期最大,随着循环注入次数增加,煤岩损伤量增量逐渐减小,这是因为煤岩体内部煤体损伤劣化增量逐渐减小,使得损伤量趋于稳定;随着注入时间延长,处于不同低温下的煤岩应力强度系数随着 λ 增大而增大,这是因为 λ 小的煤岩体内产

生较少量的微裂隙和损伤,自身结构较为完整。



(a) 损伤量随时间变化曲线



(b) 应力强度系数随时间变化曲线

图 4 液氮循环注入过程中煤岩损伤量和应力强度系数
Fig. 4 Damage variable and stress intensity coefficients of coalrock during cyclic injection process of liquid nitrogen

通过统计煤体孔隙变化率(图 5)发现^[20],液氮循环注入次数与煤体孔隙变化率呈正相关关系,液氮单次注入对煤体孔隙的影响较小,经过 5 次循环注入后,煤体总孔隙明显增加;20 次循环注入后,渗流孔开始迅速增加,表示煤层气流动通道得到明显改善,利于煤层气抽采。

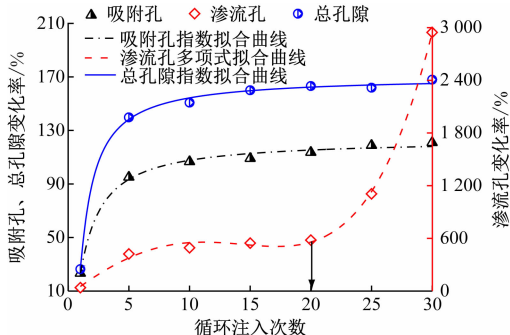


图 5 液氮循环注入次数与煤体孔隙变化率之间的关系
Fig. 5 Relationship between cyclic injection numbers of liquid nitrogen and change rate of coal body porosity

通过液氮单次注入和循环注入预制试样,统计分析试样的断裂破坏特征,如图 6 所示。液氮单次注入仅在注射管周围形成了局部的裂纹和损伤,并没有形成破裂;而在保证整体作用时间相同的条件下,9 次循环注入液氮后,裂隙贯穿试样整体,造成了试样破坏。通过对比发现,液氮循环注入过程能够对试样整体结构造成破坏,从微观来看,不同类型组配颗粒间不同程度的变形响应,导致颗粒间形成

较大的张拉应力,循环多次的张拉过程能够在一定程度上劣化试样局部区域的抗压强度,最终导致新生裂隙的衍生及原生孔隙的扩容及贯通。

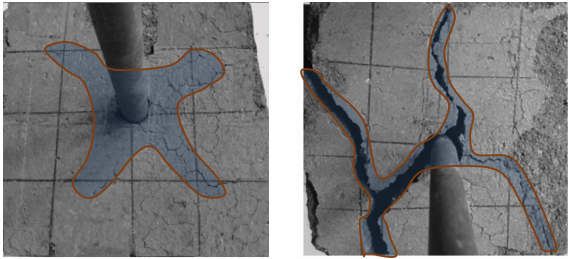


图 6 液氮单次注入和循环注入时试样断裂破坏特征对比
Fig. 6 Comparison of fracturing damage characteristics of samples between single injection and cyclic injection of liquid nitrogen

2.2 低温致裂

当作为冷源的液氮注入至煤岩体内,与周围煤岩介质发生温度交换,逐渐在煤岩介质内形成一定的温度梯度,由 Cha Minshu 等^[21]开展的半浸没及全浸没实验可看出,试样易在液氮与空气交界处发

生断裂,极好地验证了液氮作用所产生的温度梯度能够使岩石内部生成裂隙并改变岩石结构。液氮在循环注入过程中煤岩介质内部的裂隙演化模型如图 7 所示。当钻孔临近介质接触液氮时,会受到瞬间的冷冲击,液氮的低温特征使得煤岩骨架发生剧烈收缩^[21]。基于介质颗粒内不同的导热系数及热膨胀系数,颗粒收缩率不均匀,因而弱化煤岩颗粒之间的粘结强度,并在煤岩内部产生较高的收缩应力。当收缩应力超过煤岩的抗拉强度时,煤岩内部结构将发生断裂,产生大量的热应力微裂隙。随着冷冲击线向四周推移,液氮在循环注入方式下以波浪式填充已产生的微裂隙,低温造成裂隙面发生崩落现象,掉落的煤岩碎块能够较好地充当支撑剂^[21]。另外,每次循环使得裂纹尖端充填液氮,促使裂隙不断扩展和导通。因此,液氮循环作用下裂隙网络形成过程中,初生裂隙的孔径不断变大,次生裂隙不断沿着初生裂隙扩展路径延伸出去,并逐渐缩小不同位置主裂隙之间的间距,使得裂隙之间延伸贯通,形成复杂的裂隙网络。

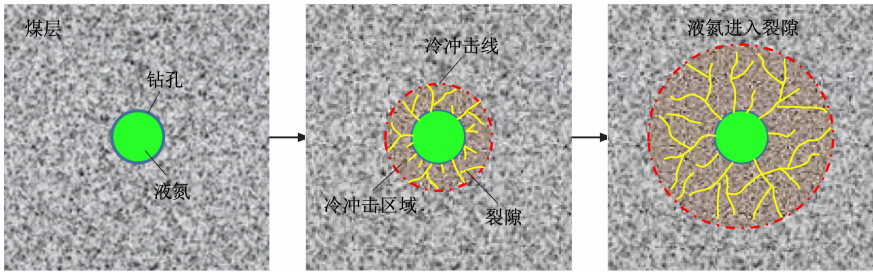


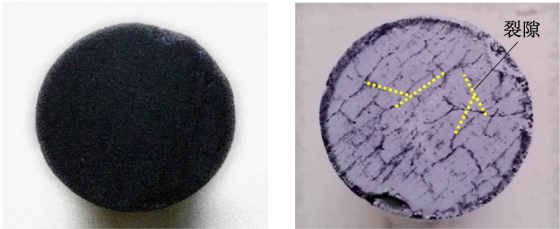
图 7 液氮循环注入过程中煤岩介质的裂隙演化模型

Fig. 7 Crack evolution model of coal-rock medium during cyclic injection process of liquid nitrogen

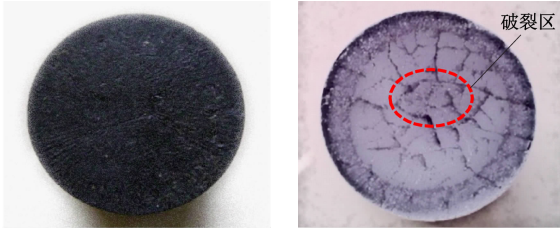
影响液氮冷冲击效果的因素有很多,比如岩石特性、含水率、孔隙特征等。黄中伟等^[22]采用裂纹应变模型计算了液氮处理前后的大理石特征强度变化,得出经过液氮处理后,岩样的裂纹起裂强度、裂纹损伤强度及破坏强度均下降,且岩样的裂纹起裂强度下降明显。张春会等^[23]研究了液氮注入后煤岩变形、破坏及渗透率演化的过程。Qin Lei 等^[24]结合核磁共振 T_2 谱、扫描电子显微镜成像等分析了不同循环次数的液氮作用下煤岩孔隙结构的变化特征,证实了循环次数越多,孔隙结构变化越明显。干燥煤样和含水煤样在液氮作用前后的端面图像如图 8 所示。可看出液氮作用后,干燥煤样端面出现一些不连续裂隙,且裂隙走向几乎沿着原煤样内的层理延伸;含水煤样内部出现明显的冷冲击线,位于内部的冷冲击区域衍生出大量裂隙,并在中间位置出现破裂区域,该区域内部出现碎块崩落,裂隙之间相互交叉贯通,裂隙形态相对复杂。

E. M. Winkler^[25]在进行岩石内部水分相变膨

胀规律实验时,测得的孔隙冰在 $-5, -10, -22\text{ }^{\circ}\text{C}$



(a) 干燥煤样



(b) 含水煤样

图 8 干燥煤样和含水煤样在液氮冷冲击前后端面图像
Fig. 8 End-face images of dried coal specimen and watered coal specimen before and after cold shock by liquid nitrogen

的膨胀压力分别为 61,113,211.5 MPa,远远大于煤样强度,从而产生新裂隙或者使原生裂隙进一步扩展且裂隙宽度增加。煤层气开采初期,煤层中较大的割理、孔隙空间大多被水占据,当接触至低温液氮时,地层与其发生热交换,其内部孔隙或裂隙附近一定区域内的水分凝结成冰,水冰相变过程中体积增加了 9%,而煤岩体接触液氮时会发生体积收缩。通过简单数学计算来比较接触液氮之后含水煤岩体收缩和冰体膨胀之间的占比。以烟煤为例,单位体积煤的热膨胀系数为 $6.435 \times 10^{-6} / \text{K}$ ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$),孔隙率为 15%,在整个低温(以 $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,即 200 K)接触过程中,可能形成的烟煤体积收缩率为 $200\text{ K} \times 6.435 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \times 100\% = 0.13\%$,而结冰后的煤岩整体体积变化率为 $9\% \times 15\% - (1 - 15\%) \times 0.13\% \approx 1.24\%$,这说明含水煤岩体在液氮低温作用后体积膨胀了 1.24%。该过程产生的体积膨胀会在孔隙壁面产生巨大的冻胀力,其值一旦超过煤岩的极限抗拉强度,煤岩就会产生破坏。而含水煤岩接触液氮后所产生的冻胀力对其可产生 3 个方面的影响:① 天然裂隙中的自由水结冰膨胀能够扩宽煤岩的天然裂隙,受到严重破坏的裂隙壁面在冰体相变后无法恢复到原始状态,大幅增加煤岩的渗透率。② 冷冲击形成的冰沿着割理楔入煤岩,而未受冷冲击的自由水随着裂隙的延伸被挤压发生迁移,当冷冲击线继续向内部扩展时,剩余的自由水会再次发生冷冲击,继续使裂隙扩展。③ 自由水结冰所产生的膨胀力不断挤压煤岩基质,在一定温差下,膨胀力将会超过煤岩的抗压强度,使煤岩基质产生挤压破坏,从而造成煤岩内部结构的进一步破坏。

另外,液氮注入钻孔后,钻孔周围煤岩体温度随距钻孔距离增加逐渐降低,干燥和含饱和水的煤样在 $-10,-25,-40,-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 个温度点下的渗透率变化特征如图 9 所示。可看出渗透率增幅与温度呈负相关关系,不同低温环境下的渗透率增幅接近

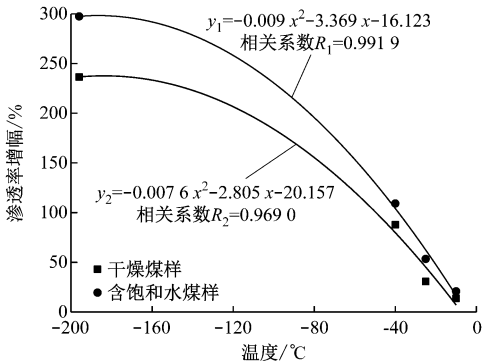


图 9 不同低温下煤样渗透率增幅

Fig. 9 Permeability increment of coal specimen under different low temperatures

二次项拟合曲线,说明低温环境能够很好地提高煤岩透气性,温度越低,渗透率增幅越大;在同一温度下,含饱和水煤样的渗透率增幅比干燥煤样大,这主要与冰膨胀所产生的冻胀力有关,且较好地验证了图 8 中的煤样端面裂隙演化规律。

2.3 气体致裂

液氮致裂过程中,注入煤层气储层的液氮与煤岩发生热交换,液氮吸热、升温,最终发生汽化,液氮相变体积发生较大膨胀。特别说明的是,液氮具有较高的液气相变膨胀率 $1:694$ ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$),该性质能够迅速产生较高的气压。侯鹏等^[26]开展了循环注气作用下低透气性煤体孔隙结构演化及渗透率变化的研究,得出循环注气技术能够促进小孔隙向大孔隙演化,且提高了孔隙(包括过渡孔、中孔和大孔)尺寸分布,最终达到增加煤体内部孔隙率和渗透率的目的;研究了不同层理方向(轴向平行层理方向或垂直层理方向)页岩在高压气体作用下的破坏机制,对于轴向平行层理的试样,在低气压作用下沿垂直最大主应力方向发生拉伸脆性劈裂破坏,而对于轴向垂直层理的试样,除了拉伸破坏之外,还产生了剪切破坏,断裂面更加复杂。

液氮汽化形成的高压气团在循环注入过程中,容易与液氮形成气液两相流,在裂隙尖端形成大小不一的“涡流”,能够大幅提高气压。煤样体积在循环致裂过程中重复性地扩张-收缩,导致煤样内部衍生出大量的微裂隙^[10]。在持续性的加卸载过程中,裂隙内流体压力逐渐增加,当裂隙内流体压力高于裂隙延伸压力时,裂隙继续延伸,从而实现更大的改造体积。

3 液氮循环致裂技术的应用展望

基于液氮循环致裂技术的破岩机理,未来其可应用于非常规天然气开采等工作中。液氮循环致裂技术在难开采的致密储层煤层气开采中的应用如图 10 所示。利用三级气体过滤器(包括空气压缩机和冷却机组)制备液氮,采用防冻循环泵将制备好的液氮注入钻井内,钻井井筒采用绝热防冻裂钢管延伸至储层位置,液氮流动至水平钻井内,通过套筒上的小孔扩散至储层内,经过连续的循环式注入过程,液氮气液两相流流动至裂隙内,依靠循环累积损伤、低温致裂和气体致裂三者耦合机制,最终在储层内形成复杂的裂隙网络。待致裂完毕,回收氮气以循环利用,最终将沿裂隙网络流动的煤层气高效抽采出来。

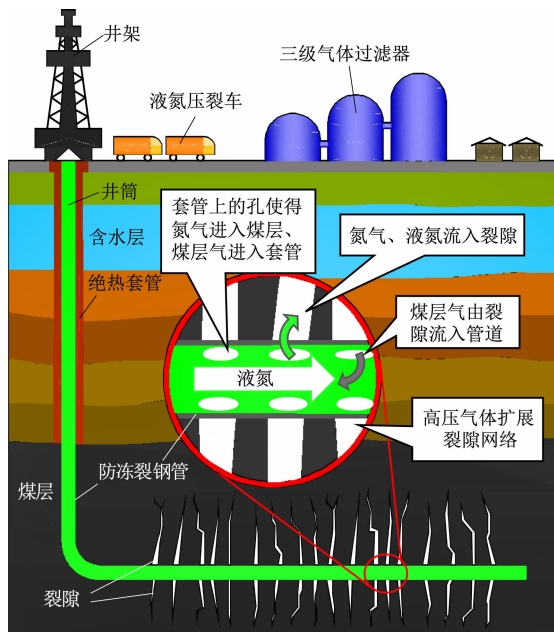


图 10 液氮循环致裂技术在致密储层煤层气开采中的应用

Fig. 10 Application of cyclic liquid nitrogen fracturing technology in coalbed methane drainage from dense reservoirs

4 结论

液氮循环致裂技术基于传统液氮致裂技术,采用循环方式将液氮泵入非常规天然气储层中。该技术的破岩机理主要是循环累积损伤、低温致裂及气体致裂的三者耦合作用机制。

(1) 压力波通过液氮传递至煤岩体内部,造成煤岩颗粒之间发生不同程度的变形响应,在一定程度上劣化煤岩体局部区域的抗压强度,容易造成张拉性微裂隙生成;天然裂隙在循环加卸载作用下,裂隙尖端的极限强度受到较大程度弱化,有利于裂隙的扩展。

(2) 液氮的低温特性能够瞬间对煤岩体造成冷冲击。对于干燥煤岩来说,低温使得煤岩骨架收缩,存在的温度梯度所产生的温度应力造成煤岩内部生成裂隙;对于含水煤岩,低温使自由水相变成冰,所产生的冻胀力造成煤岩发生劈裂现象,产生更加复杂的裂隙。

(3) 液氮在裂隙中与煤岩发生热交换并汽化生成高压气体,高压气团在循环注入过程中形成大小不一的“涡流”,增加了气压。当裂隙内流体压力超过弱化后的裂隙延伸压力时,可促进裂隙进一步扩展。

参考文献 (References):

[1] 申宝宏,雷毅,郭玉辉. 中国煤炭科学技术新进展[J]. 煤炭学报,2011,36(11):1779-1783.

SHEN Baohong, LEI Yi, GUO Yuhui. Progress of coal science and technology in China[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(11):1779-1783.

[2] 赵阳升,杨栋,胡耀青,等. 低渗透煤层煤床气开采有效技术途径的研究[J]. 煤炭学报,2001,26(5):455-458.

ZHAO Yangsheng, YANG Dong, HU Yaoqing, et al. Study on the effective technology way for mining methane in low permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society,2001,26(5):455-458.

[3] 黄盛初,刘文革,赵国泉. 中国煤层气开发利用现状及发展趋势[J]. 中国煤炭,2009,35(1):5-10.

HUANG Shengchu, LIU Wenge, ZHAO Guoquan. Coalbed methane development and utilization in China: status and future development[J]. China Coal, 2009,35(1):5-10.

[4] 煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十一五”规划[EB/OL]. [2020-09-20]. <https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/200806/P020191104623833726533.pdf>. The eleventh five-year plan of coalbed methane (coal mine gas) exploitation [EB/OL]. [2020-09-20]. <https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/200806/P020191104623833726533.pdf>.

[5] 许家林,钱鸣高. 地面钻井抽放上覆远距离卸压煤层气试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(1):78-81.

XU Jialin, QIAN Minggao. Study on drainage of relieved methane from overlying coal seam far away from the protective seam by surface well[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2000,29(1):78-81.

[6] 秦勇,袁亮,胡千庭,等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. 煤炭科学技术,2012,40(10):1-6.

QIN Yong, YUAN Liang, HU Qianting, et al. Status and development orientation of coal bed methane exploration and development technology in China[J]. Coal Science and Technology,2012,40(10):1-6.

[7] 申鹏磊,白建平,李贵山,等. 深部煤层气水平井测-定-录一体化地质导向技术[J]. 煤炭学报,2020,45(7):2491-2499.

SHEN Penglei, BAI Jianping, LI Guishan, et al. Integrated geo-steering technology of logging and orientation in deep coalbed methane horizontal well [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (7): 2491-2499.

[8] 程远平,俞启香. 煤层群煤与瓦斯安全高效共采体系及应用[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(5):5-9.

CHENG Yuanping, YU Qixiang. Application of safe and high-efficient exploitation system of coal and gas in coal seams [J]. Journal of China University of

- Mining & Technology, 2003, 32(5): 5-9.
- [9] 刘貽军, 娄建青. 中国煤层气储层特征及开发技术探讨[J]. 天然气工业, 2004(1): 68-71.
LIU Yijun, LOU Jianqing. Study on reservoir characteristics and development technology of coal-bed gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2004(1): 68-71.
- [10] 张文勇, 司磊, 郭启文, 等. 煤层气井液氮伴注压裂增透机制及应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 97-102.
ZHANG Wenyong, SI Lei, GUO Qiwen, et al. Study on mechanism and application of liquid nitrogen injection combined with fracturing to enhance permeability in CBM wells [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 97-102.
- [11] 袁华玉, 程远方. 新型液氮压裂技术实验研究及可行性分析[C]//2019 国际石油石化技术会议论文集, 北京, 2019: 243-252.
YUAN Huayu, CHENG Yuanfang. Experimental study and feasibility analysis of new fracturing technology of liquid nitrogen [C]//Proceedings of 2019 International Conference on Petroleum and Petrification Technology, Beijing, 2019: 243-252.
- [12] 张磊, 陈帅, 薛俊华, 等. 液氮致裂烟煤渗透率及其应力敏感性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 401-408.
ZHANG Lei, CHEN Shuai, XUE Junhua, et al. Permeability of bituminous coal and its stress sensitivity under liquid nitrogen fracturing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(2): 401-408.
- [13] HALBERT. Method of increasing the permeability of a subterranean hydrocarbon bearing formation; US3602310A[P]. 1971-08-31.
- [14] MCDANIEL B W, GRUNDMANN S R, KENDRICK W D, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic-fracturing fluid [J]. Journal of Petroleum Technology, 1998, 50: 38-39.
- [15] GRUNDMANN S R, RODVELT G D, DIALS G A, et al. Cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid in the devonian shale [C]//Eastern Regional Meeting, Pittsburgh, 1998: 1-2.
- [16] 李子丰. 液化氮气在油气层内气化压裂方法: CN102493795A[P]. 2012-06-13.
LI Zifeng. Liquefied nitrogen gas fracturing method in oil and gas reservoir: CN102493795A [P]. 2012-06-13.
- [17] 徐红芳. 适用于页岩气开发的液化氮气汽化压裂技术[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
XU Hongfang. Liquid nitrogen gasification fracturing technology applicable to shale gas development[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.
- [18] 罗平亚. 关于大幅度提高我国煤层气井单井产量的探讨[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 1-6.
LUO Pingya. A discussion on how to significantly improve the single-well productivity of CBM gas wells in China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6): 1-6.
- [19] LEMAITRE J, CHABOCHE J L. Mechanics of solid materials [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [20] 秦雷. 液氮循环致裂煤体孔隙结构演化特征及增透机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
QIN Lei. Pore evolution after fracturing with cyclic liquid nitrogen and the mechanism of permeability enhancing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [21] CHA Minshu, YIN Xiaolong, KNEAFSEY T, et al. Cryogenic fracturing for reservoir stimulation-laboratory studies [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124: 436-450.
- [22] 黄中伟, 温海涛, 武晓光, 等. 液氮冷却作用下高温花岗岩损伤实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 68-76.
HUANG Zhongwei, WEN Haitao, WU Xiaoguang, et al. Experimental study on cracking of high temperature granite using liquid nitrogen[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(2): 68-76.
- [23] 张春会, 王来贵, 赵全胜, 等. 液氮冷却煤变形-破坏-渗透率演化模型及数值分析[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(1): 90-99.
ZHANG Chunhui, WANG Laigui, ZHAO Quansheng, et al. Permeability evolution model and numerical analysis of coupled coal deformation, failure and liquid nitrogen cooling [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(1): 90-99.
- [24] QIN Lei, ZHAI Cheng, LIU Shimin, et al. Changes in the petrophysical properties of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw: a nuclear magnetic resonance investigation[J]. Fuel, 2017, 194: 102-114.
- [25] WINKLER E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations [J]. Engineering Geology, 1968, 2: 315-323.
- [26] 侯鹏, 高峰, 张志镇, 等. 黑色页岩力学特性及气体压裂层理效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 670-681.
HOU Peng, GAO Feng, ZHANG Zhizhen, et al. Mechanical property and bedding inclination effect on gas fracturing of black shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 670-681.