

· 专题一:石油矿业安全领域学科发展(矿业与安全工程) ·

低渗透煤层液氮冷冲击致裂研究新进展

翟成^{1,2*} 孙勇^{1,2} 武建国³

1. 中国矿业大学 安全工程学院,徐州 221116
2. 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心,徐州 221116
3. 开滦(集团)有限责任公司,唐山 063018

[摘要] 针对我国低渗透煤层瓦斯抽采困难的问题,提出了液氮冷冲击致裂增透方法。该方法将高压液氮注入煤层钻孔,结合低温液氮的冷冲击作用、水冰相变的冻胀作用和液氮气化的膨胀作用,在煤体内部构造发育的孔裂隙网络,从而提高瓦斯的抽采效率。本文分别从热应力、冻胀力和气化膨胀力角度阐释了液氮冷冲击多重效应致裂煤体的机理。关于液氮致裂煤体的基础机理与技术应用方面的研究,需考虑含瓦斯煤体及原位地层条件,同时脉动液氮压裂值得引起进一步关注。当前存在液氮高效致裂增透的技术环节有待优化完善和液氮多重致裂作用下裂隙扩展机制认识不清的问题。未来可将液氮压裂与水力射流等技术相结合,降低煤层起裂压力,实现裂隙的定向、大范围扩展。

[关键词] 低渗透煤层;致裂增透;液氮冷冲击;瓦斯抽采

我国煤炭资源储量丰富,而瓦斯是煤的伴生物,是煤矿主要灾害源,也是不可再生能源和强温室气体^[1]。高瓦斯矿井占我国矿井总数的50%以上^[2],瓦斯高效抽采不仅可以减少矿井灾害事故,而且对优化我国能源结构,助力“碳中和”有重要的影响。但我国煤层普遍具有微孔隙、高吸附、低渗透的特点^[1],抽采效果较差,煤层的低渗透率成为制约瓦斯抽采的主要瓶颈。如何通过储层改造提高煤层渗透率,实现瓦斯高效抽采是目前亟待解决的重大科学问题。

煤体通常被认为是一种由煤基质和天然裂隙网络组成的各向异性介质,同时也是一种内含基质孔隙和天然裂隙的双孔隙非均质体^[3]。瓦斯的抽采效果取决于煤层透气性的优劣,透气性好的煤层内部裂隙发育程度较高,贯通的裂隙网络能够有利于吸附瓦斯的解吸和游离瓦斯的运移。由于我国煤层透气性普遍较差,为了提高瓦斯抽采效率,必须对煤层进行人工强化造缝增透,通过构造煤层内部贯通裂隙网络达到提高透气性的目的^[4]。



翟成 中国矿业大学安全工程学院教授,博士生导师。主要从事低透气性煤层致裂增透、瓦斯高效抽采、矿井瓦斯灾害防治以及页岩储层压裂开发等方面的研究。

国内外对煤矿井下高瓦斯低渗透煤层的瓦斯抽采进行了相关研究。对于有保护层开采条件的煤层,开采保护层的卸压增透增透效果较好,技术成熟,应用广泛。但是对于大多数没有保护层开采条件的单一高瓦斯低渗透煤层,常规的钻孔瓦斯抽采方法效果并不理想:钻孔有效影响范围小(钻孔间距2 m左右)、区域瓦斯抽采需要的钻孔数量多(每个采煤工作面需要数百至上千个钻孔)、钻孔施工工程量大、抽采瓦斯浓度低($\leq 20\%$,甚至 $\leq 10\%$),部分矿井抽采一年还未能达标,严重影响矿井采掘接替,不能满足煤矿井下瓦斯区域治理和快速抽采的要求^[4]。因此,针对单一低渗透煤层的致裂增透技术开发十分必要。

收稿日期:2021-06-30;修回日期:2021-12-03

* 通信作者,Email: gretaze@cumt.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(51774278,51925404)的资助。

随着低渗透煤层致裂增透技术的不断发展,在水力化技术之外,许多无水化致裂增透技术同样取得了较好的应用效果,其特点都是以非水物质作为煤层的致裂增透介质。无水化技术无需消耗大量水,避免了地下水污染和煤储层伤害,且不会导致黏土矿物吸水膨胀而堵塞瓦斯运移通道。各国研究人员都在积极寻找水力致裂增透的替代技术^[5,6],尤其是在我国中西部一些水资源匮乏的矿区更为迫切。无水化致裂增透技术必将成为未来的发展趋势。

近年来,国内外很多学者探索和发展了新的无水化煤层致裂增透技术,采用低温介质冷冲击致裂煤体成为研究的热点之一。该方法通过向煤体注入低温流体,利用低温流体介质对煤体的冷冲击作用、煤体孔—裂隙水结冰的冻胀作用、流体吸热气化的高压膨胀作用和多次冷冲击的疲劳损伤作用,使煤体产生更为复杂的连通孔裂隙网络,透气性显著提高。

在低温冷冲击致裂增透技术中,主要以液氮、液态 CO_2 作为低温流体介质。液氮的温度 ($-196\text{ }^\circ\text{C}$) 相较于液态 CO_2 ($-37\text{ }^\circ\text{C}$) 的温度更低,对高地温煤层有更好的冷冲击效果。低温流体吸热气化后产生的 N_2 和 CO_2 还会与 CH_4 产生竞争吸附。由于对煤的吸附能力有 $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 > \text{N}_2$ ^[7], CO_2 能起到较好的驱替效果,但煤层吸附 CO_2 膨胀会使渗透率降低,大量吸附 CO_2 还可能会导致后期开采时发生 CO_2 突出动力灾害^[8] 或者 CO_2 再次解吸逸散,适合高渗透储层; N_2 与 CH_4 的大小相似,可以 1:1 置换,降低 CH_4 的分压,尤其适合低渗透储层^[9]。因此,综合冷冲击效果、安全性和置换效率来说,液氮冷冲击致裂

增透方法有独特的优势和良好的应用前景。

1 液氮冷冲击致裂煤体的理论基础

液氮温度可达 $-196\text{ }^\circ\text{C}$, 气化潜热为 5.56 kJ/mol , 注入储层后与周围介质发生热交换, 造成极大的瞬时温度降并在储层内形成一定的温度梯度, 诱导产生强热应力, 使煤层形成较水力化措施更为复杂的裂隙网络, 为瓦斯运移提供通道。煤体孔裂隙水在液氮吸热汽化过程中迅速冻结, 水冰相变过程产生 9% 的体积膨胀和高达 207 MPa 的冻胀力^[10], 在裂隙尖端形成“冰楔效应”, 使裂隙起裂。 1 m^3 的液氮理论上可膨胀为 696 m^3 的 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 氮气, 液氮在钻孔内迅速汽化膨胀可产生巨大气压, 带来气体压裂效果, 增大煤体的孔隙率和渗透率^[11]。此外, 周期性的液氮注入, 还会对煤层产生“冻融”作用, 使煤体损伤劣化, 力学强度降低。液氮压裂是气化膨胀力、冻胀力、热应力综合作用的结果。同时, 液氮制备简单、原料来自空气, 可以极大地缓解常规水力压裂对水资源的依赖尤其是中西部缺水地区的压力, 不会对水资源造成污染, 是一种高效的低温增透介质。

通过绝热管路把低温液氮注入煤体, 利用液氮冷冲击产生的温度应力、液氮汽化产生的膨胀应力和孔裂隙结冰产生的冻胀应力三重力学作用, 当三者耦合应力超过煤体抗拉强度时, 钻孔内壁原生裂隙扩展, 新裂隙生成, 裂隙尖端及裂隙面继续扩展或产生更多数量的裂隙, 最终形成复杂的裂隙网络, 从而为瓦斯运移提供通道。如图 2 所示, 通过绝热管路向煤体钻孔注入液氮, 对煤体进行冷冲击致裂。

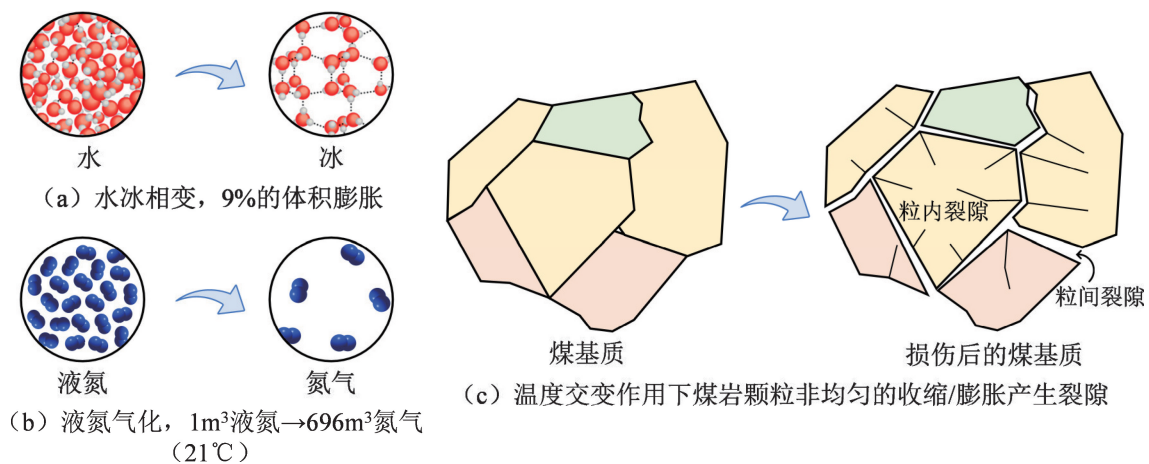


图 1 液氮冷冲击致裂机理

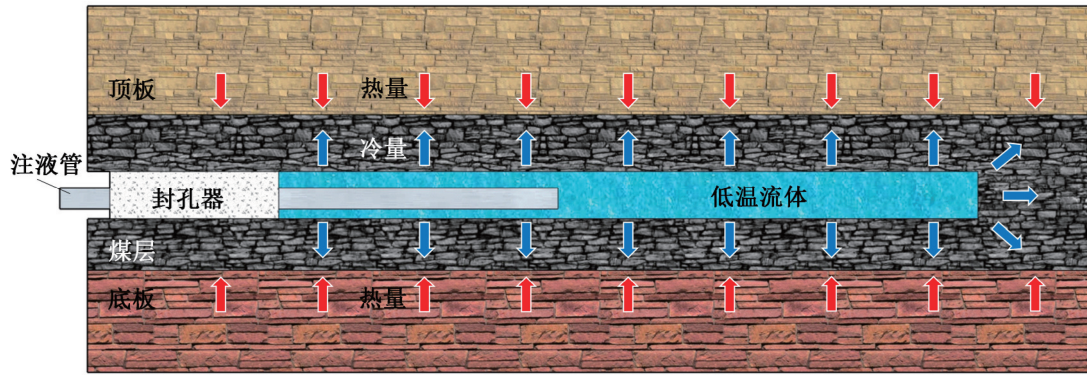
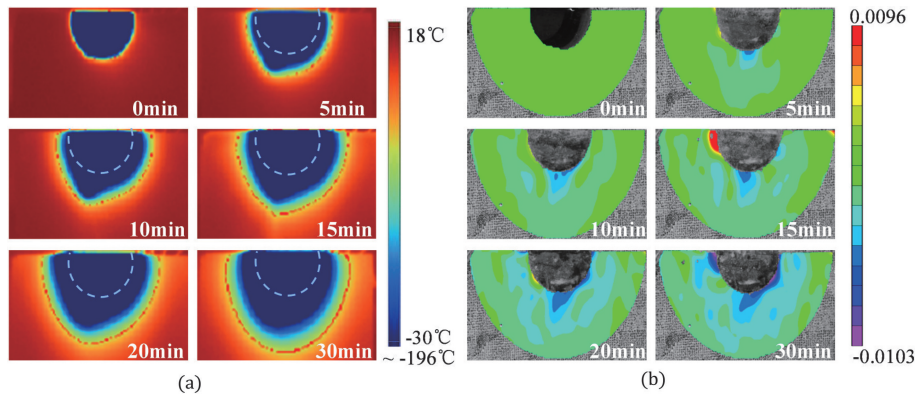
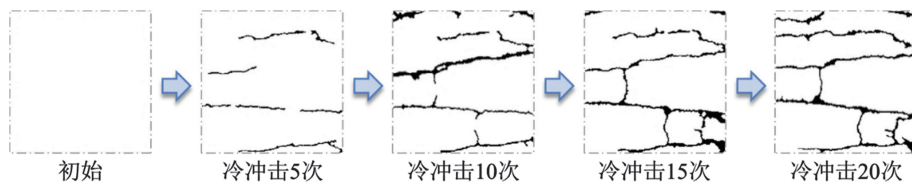


图2 液氮注入煤层示意图

图3 液氮注入过程钻孔径向温度场(a)与应变场(b)^[13]图4 经二值化处理的液氮循环冷冲击过程煤体裂隙演化(3 cm×3 cm)^[17]

2 液氮冷冲击致裂煤体的研究进展

2.1 液氮冷冲击致裂机理研究进展

煤层液氮冷冲击致裂作为一种创新性的方法,吸引了许多学者的研究。秦雷建立了液氮注入I型张开裂隙的应力强度因子计算模型及起裂准则^[12],该模型考虑了地应力、水冰相变冻胀力、气化膨胀压力和孔隙压力的影响;但要计算具体的应力强度因子还缺少必要的参数。Cong等利用红外热像和全场应变测量技术分别捕捉了液氮注入钻孔径向的温度场及应变场变化,并基于温度场建立了钻孔径向的热应力计算模型^[13],发现沿钻孔径向存在明显的温度梯度,计算得到的径向最大热应力值超过1.3 MPa,出现在钻孔壁附近;但是该实验液氮在钻孔中处于开放环境,未考虑压力的影响。魏建平等计算了液氮冷冲击过程煤芯热应力,指出热应力受

煤芯热膨胀系数、弹性模量以及温度梯度影响,求得液氮冷冲击下的热应力值为9.06 MPa,超过了煤芯的最大抗拉强度(1.48 MPa)^[14]。Cha等研究证明液氮作用所产生的温度梯度能够使岩石内部生成裂隙并且趋于破碎,钻孔邻近的岩石介质接触液氮时受到瞬间的冷冲击,会产生剧烈的收缩而断裂,并生成大量的微裂隙^[15]。翟成等通过低场核磁共振测试发现冷冲击能使煤体中、大孔和微裂隙数量增加,孔隙尺寸增大^[16]。Sun等利用光学显微镜观测了液氮循环冷冲击过程的煤体裂隙演化,发现液氮循环冷冲击能够促进平行于层理方向的主裂隙与垂直于层理方向的分支裂隙产生,最终使煤体生成交织贯通的裂隙网络^[17]。液氮冷冲击过程煤体微观孔裂隙数量的增加还会造成宏观力学特性的劣化。李和万等、黄中伟等和蔡承政等分别测试了液氮冷冲击作用下煤岩的力学强度,发现液氮冷冲击能够

显著降低煤岩的力学强度,并且液氮对煤的冷冲击损伤显著大于对岩石的损伤^[18-20]。当前的研究主要侧重于液氮融浸条件下的煤芯孔隙结构及力学特征演化分析,对于原位温度及压力条件下液氮注入过程的煤体损伤研究很少。对于煤芯的损伤侧重于整体的孔隙度、渗透率或表面形貌分析,对煤体内部孔隙结构的三维精细表征以及孔隙结构与力学性质的响应还需要进一步研究。

关于冻胀和冻融损伤方面的研究:Winkler 等测试得到的岩石内部孔隙冰在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的膨胀压力分别为 61 MPa、113 MPa 和 211.5 MPa,远远大于岩石的抗拉强度,从而使新裂隙产生或原生裂隙扩展^[21]。刘泉声等建立了低温岩体椭圆 I 型裂隙的冻胀开裂模型^[22],给出了裂隙尖端起裂的应力判别式,发现冻胀力表现为裂隙尖端的拉应力,当其大于抗拉强度时,就会使裂隙扩展;冻胀力的大小主要受冻结温度和冻结速率影响,当冻结温度越低,冻结速率越快,冻胀力越大;而液氮冷冲击恰好具有低冻结温度和高冻结速率的特点。贾海梁等建立了冻融循环作用下砂岩的高周疲劳损伤模型^[23],推导了岩石冻融损伤因子的计算公式,得到了岩石损伤随冻融循环次数的变化规律,发现岩石疲劳破坏经历了初始损伤、损伤稳定扩展和损伤加速扩展阶段,高周荷载作用下岩石的损伤更快。Hale 等研究发现多次冻融循环可有效减小岩石抗压强度并增大孔隙度^[24]。Yavuz 等对 12 种不同的碳酸盐岩石进行 20 次冻融风化,发现冻融后岩石孔隙度和纵波波速等物理特性发生了明显的变化^[25]。杨更社等、周科平等学者指出冻融循环次数对岩体裂隙发育和力学强度均有重要影响,发现岩体孔隙率随着冻融循环次数增加而增大,经历多次冻融循环后会引入结构损伤破坏^[26, 27]。现有的

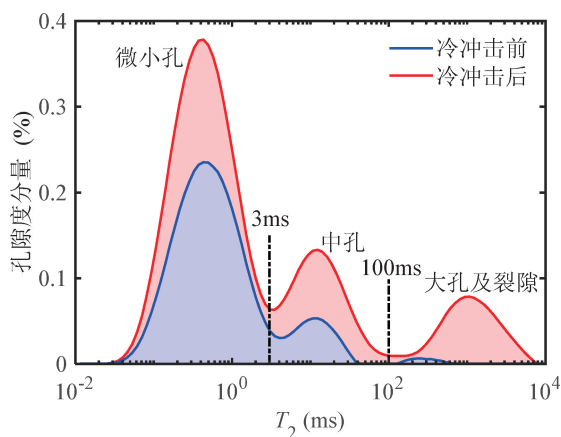


图 5 液氮冷冲击前、后的煤样孔径分布^[16]

冻胀和冻胀损伤研究主要针对高寒地区的岩、土体的孔隙结构及力学特性,对于液氮注入煤体后产生的冻胀、冻融效应及对应的致裂增透机理方面研究较少。由于液氮的超低温,对高温煤体的冻融和冻胀损伤较环境系统更为剧烈;同时由于煤体的非均一性强,煤体本身的结构、物理力学性质与岩石差异大,导致冻胀、冻融效应对煤体损伤的作用程度不同,这方面的深入研究尚未开展。

液氮注入煤体过程中还会产生气体压裂效应:侯鹏等学者开展了高压注气煤体孔隙结构演化及渗透率变化的研究^[28],高压注气促进小孔隙向大孔隙演化,增大了煤体的孔隙率和渗透率。张文勇等证实液氮气化形成的高压气团在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”,大幅提高气体压力^[29]。煤体在气体压裂过程中重复性地扩张—收缩,导致煤体内部衍生出大量的裂隙。

2.2 液氮冷冲击致裂技术研究进展

自 20 世纪 90 年代,McDaniel 等在美国新墨西哥州圣胡安盆地对 4 口煤层气井和 1 口致密砂岩井进行了液氮压裂的尝试性工作,发现液氮的冷冲击作用能使储层产生与裂隙面正交的微裂隙,防止水力压裂裂隙闭合^[30]。Grundmann 等对美国肯塔基州的泥盆纪页岩进行了液氮压裂的现场试验,发现液氮的超低温诱导裂隙面产生了热拉伸应力,并且应力值超过了页岩的拉伸强度,使裂隙面破碎^[31]。蔡承政等通过自主研发的试验装置对页岩岩心进行了液氮压裂的室内模拟试验,发现随着岩心初始温度的增加,液氮在岩心孔眼表面产生的热应力增大,从而使破裂压力降低(降幅为 22.58%~32.26%)^[32];同时破裂模式表现为沿孔眼的张拉破坏,局部微裂隙发育。Altawati 等对原位温度和压力条件下的鹰滩页岩岩心进行了循环液氮注入实验,对比了实验前后的页岩孔渗特征变化,发现液氮低温处理扩展了原始裂隙,诱导了新裂隙生成,使渗透率增加了两个数量级而孔隙度增加至 26%^[33]。秦雷对三轴围压下的型煤试块($200 \times 200 \times 200\text{ mm}^3$)进行了单次/循环液氮注入实验,通过对比发现重复多次注入液氮后试块更容易破碎或形成复杂连通裂隙网络^[12]。已有研究大多是通过简单液氮溶浸或单一注氮方式对煤进行致裂,对于循环液氮致裂、孔隙度与渗透率相对演化等还缺少深入研究,液氮致裂还停留在技术尝试和初步理论分析层面;缺乏含瓦斯和地应力条件下的液氮致裂

煤体规律研究,亟待搭建基于地应力条件下的含瓦斯煤体液氮循环致裂实验平台,获取可指导工程应用的关键理论数据。

针对我国低渗透煤层的赋存特征,在液氮循环致裂和脉动水力压裂的研究基础上^[4, 10],笔者团队提出了低渗透煤层脉动液氮致裂增透方法(如图6)。其核心思想是:通过脉动泵将非恒定压力的液氮注入到钻孔内,周期性液氮注入由峰值压力与谷底压力构成强脉动压力波,在裂隙尖端产生“压缩—膨胀—压缩”的交变应力,同时耦合液氮自身低温属性所产生的冷冲击效应以及液氮气化所产生的高压气团效应,对煤体形成叠加力学作用,可以大幅降低起裂压力,提高裂隙网络复杂度。

李贤忠监测了脉动水压力波在管路中的变化规律,发现脉动压力波的反射与叠加效应使出口压力峰值增大,在50 Hz条件下压力峰值增加了50%,从而能以较小的脉动压力取得常规水力压裂的效果^[34]。翟成等、李全贵等测试了不同频率和流量对脉动水力压裂煤体效果的影响,发现低频频和低流量能够降低起裂压力,提高裂隙复杂度,而高频率和高流量能够使裂隙快速起裂^[35, 36]。余旭研究了脉动水力压裂的解堵机制,发现高频的脉动压力对堵塞物的冲击力更大,能促进解除裂隙中的煤粉堵塞^[37]。以上研究均表明脉动压裂较静压压裂能够对煤层产生更好的致裂增透效果,但当前的脉动压裂研究均是以水作为压裂介质,尚未有以液氮为压裂介质的相关研究。

基于现有对液氮致裂增透技术的研究,液氮致裂可以极大地缓解常规水力压裂对水资源的依赖及缺水地区的压力,不会对煤层和周围环境造成污染,在煤矿井下瓦斯抽采中具有非常好的应用前景。但是井下煤层与页岩气、致密气等储层相比,煤体原生和次生裂隙系统十分发育和复杂,煤层内部切割裂隙与原生微裂隙、孔隙在规模和尺度上有很大差异,

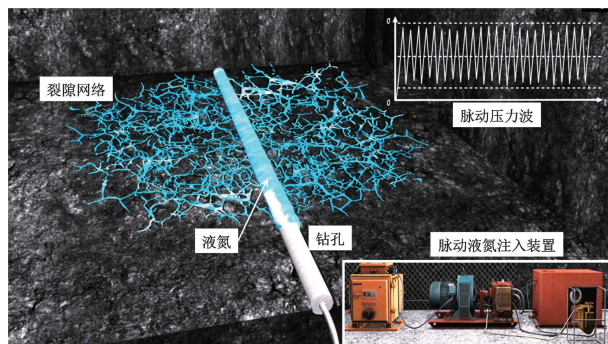


图6 脉动液氮压裂技术与装备示意图

物理力学性质呈现明显的各向异性,煤体裂隙扩展模式比岩石要复杂的多,因此关于此方面的研究还需要进一步深入。

3 存在的主要问题

目前常规井下煤层液氮致裂增透技术主要有两个问题尚未很好地解决:

一是液氮高效致裂增透的技术环节有待优化完善。受深部煤层最大主应力方向影响较大,单次液氮注入过程容易形成单一裂隙,需要考虑循环或脉动注入方式,并且寻找安全、高效、经济的最优循环/脉动液氮注入参数组合;同时由于井下煤层地质构造较复杂,存在大量的断层、层理等地质构造,压裂介质可能会沿着较大裂隙滤失,从而影响致裂效果,需要补充结冰堵漏等必要的技术环节。

二是液氮多重致裂作用下裂隙扩展机制认识不清。煤层非均质性强、孔裂隙发育特征复杂,液氮产生的气化膨胀、水冰冻胀、低温冲击三重致裂作用下煤体孔裂隙的动态扩展机制研究不足,难以直观、有效地获取液氮致裂煤层过程的孔隙结构特征,对孔裂隙网络的动态演化监测不足,严重制约了液氮致裂技术的工业性应用。

综上,煤体液氮循环致裂增透是一个多相变、多场耦合的复杂动力学过程,如何预测、监测和控制这个动态过程是实现工程应用的核心。同时由于我国深部煤层赋存条件的复杂性,地下采掘诱发的采动应力场、煤岩体裂隙场及瓦斯流动场的互动性,尚缺乏适合我国高瓦斯低渗透煤层赋存特征的液氮循环致裂增透理论,不能对工程实践形成有效的基础支撑。

4 未来发展方向

煤层内部存在着大量不同尺度的裂隙及孔洞,呈现明显的各向异性,导致液氮侵入的顺序和运动状态不同,煤体裂隙延伸扩展方向可控性差,煤体致裂不均匀、不充分。水力压裂作为一种大范围的储层改造技术,耗水量巨大(单井用水量可达 $3\sim 5$ 万 m^3)^[38],设备庞大、操作复杂;而水力射流割缝作为一种局部小范围的卸压增透技术,在其控制范围内卸压充分、增透效果明显,相较于常规水力压裂具有用水量小、设备简单、操作简便的优点,但其影响范围较小,仅有几米。如果能够把液氮循环压裂和水力射流割缝的优势结合起来,先用水射流在煤体内部形成导向缝槽,然后采用液氮循环压裂,降低煤层

起裂压力,促使煤层内裂隙定向、大范围扩展,控制裂隙的延伸方向和改变裂隙的无序扩展状况,将会是少水压裂技术的一个巨大的进步。

煤层射流导向液氮循环致裂增透方法需要深入研究媒体射流导向液氮循环致裂增透力学机制,射流割缝与液氮致裂联合条件下裂隙的起裂、扩展与贯通机理,射流割缝+液氮循环致裂的交互作用规律和射流割缝+液氮循环致裂导向控制效果评价等内容。通过研究,揭示不同割缝形态、液氮注入参量和荷载形式下含瓦斯煤体的损伤力学行为特征,监测射流割缝与液氮压裂复合作用下含瓦斯煤体的孔隙率、孔隙体积和孔径分布的变化规律,可用于指导现场工业性试验,为实现煤与瓦斯共采、保障安全生产提供技术支持。

5 结 论

本文围绕低渗透煤层高效致裂增透这一核心问题,提出了液氮冷冲击致裂增透方法。系统地介绍了该方法的致裂增透机理,回顾了液氮冷冲击致裂在基础理论与技术应用方面的研究进展,总结了当前研究尚存在的主要问题,展望了该技术未来的发展方向。主要结论如下:

(1) 液氮冷冲击致裂媒体过程主要存在三重应力作用,即低温液氮与高温媒体间产生的温度应力、孔裂隙水结冰相变产生的冻胀应力以及液氮气化产生的膨胀应力。

(2) 液氮冷冲击致裂的研究需要进一步考虑含瓦斯媒体和原位地层条件,侧重于媒体内部孔裂隙结构的三维精细表征。同时,脉动液氮压裂是值得深入研究的方向。

(3) 当前存在液氮高效致裂增透的技术环节有待优化完善和多重致裂作用下裂隙扩展机制认识不清的问题,相关研究需进一步深入。

(4) 将液氮压裂技术与水力射流技术相结合,可实现裂隙定向、大范围扩展,研究两种技术联合下的裂隙起裂、扩展和贯通机制及效果评价方法可为现场工业性实验提供指导。

参 考 文 献

- [1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 我国煤与瓦斯共采:理论与技术与工程. 煤炭学报,2014, 39(8): 1391—1397.
- [2] 程远平,俞启香. 中国煤矿区域性瓦斯治理技术的发展. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 383—390.
- [3] 冯增朝,赵阳升,文再明. 煤岩体孔隙裂隙双重介质逾渗机理研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 236—240.
- [4] 翟成,李贤忠,李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用. 煤炭学报,2011, 36(12): 1996—2001.
- [5] 蔡承政,任科达,杨玉贵,等. 液氮压裂作用下页岩破裂特征试验研究. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2183—2203.
- [6] 文虎,李珍宝,王振平,等. 煤层注液态 CO₂ 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验. 煤炭学报,2016, 41(11): 2793—2799.
- [7] 马砺,李珍宝,邓军,等. 常压下煤对 N₂/CO₂/CH₄ 单组分气体吸附特性研究. 安全与环境学报,2015, 15(2): 64—67.
- [8] 李树刚,常心坦,徐精彩. 煤岩与 CO₂ 突出特征及其预防技术研究. 西安科技学院学报,2000(1): 1—4.
- [9] Kang JQ, Fu XH, Li X, et al. Nitrogen injection to enhance methane and water production: an experimental study using the LF-NMR relaxation method. International Journal of Coal Geology, 2019, 211: 103228.
- [10] 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. 工矿自动化, 2020, 46(10): 1—8.
- [11] 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. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 401—408.
- [12] 秦雷. 液氮循环致裂媒体孔隙结构演化特征及增透机制研究. 徐州:中国矿业大学, 2018.
- [13] Cong Y, Zhai C, Sun Y, et al. Visualized study on the mechanism of temperature effect on coal during liquid nitrogen cold shock. Applied Thermal Engineering, 2021, 194: 116988.
- [14] 魏建平,孙刘涛,王登科,等. 温度冲击作用下煤的渗透率变化规律与增透机制. 煤炭学报, 2017, 42(8): 1919—1925.
- [15] Cha M, Yin X, Kneafsey T, et al. Cryogenic fracturing for reservoir stimulation-Laboratory studies. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124: 436—450.
- [16] 翟成,孙勇. 低温循环致裂媒体孔隙结构演化规律试验研究. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 24—29.
- [17] Sun Y, Zhai C, Xu J, et al. Experimental study on pore structure evolution of coal in macroscopic, mesoscopic, and microscopic scales during liquid nitrogen cyclic cold-shock fracturing. Fuel. 2021, 291: 120150.
- [18] 李和万,左建平,王来贵,等. 液氮冷加载对围压煤体结构损伤的影响规律研究. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 804—811.
- [19] 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. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 68—76.
- [20] 蔡承政,李根生,黄中伟,等. 液氮冻结条件下岩石孔隙结构损伤试验研究. 岩土力学, 2014, 35(4): 965—971.
- [21] Winkler EM. Frost damage to stone and concrete: geological considerations. Engineering Geology, 1968, 5(2): 315—323.
- [22] 刘泉声,黄诗冰,康永水,等. 低温冻结岩体单裂隙冻胀力与数值计算研究. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1572—1580.
- [23] 贾海梁,项伟,申艳军,等. 冻融循环作用下岩石疲劳损伤计算中关键问题的讨论. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 335—346.
- [24] Hale PA, Shakoor A. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. Environmental & Engineering Geoscience, 2003, 9(2): 117—130.

- [25] Yavuz H. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2011, 70(2): 187—192.
- [26] 杨更社, 申艳军, 贾海梁, 等. 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 545—563.
- [27] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 731—737.
- [28] 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. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(4): 670—681.
- [29] 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. *煤炭科学技术*, 2019, 47(11): 97—102.
- [30] McDaniel BW, Grundmann SR, Kendrick WD, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid. *Journal of Petroleum Technology*, 1998(50): 38—39.
- [31] Grundmann SR. Cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid in the devonian shale. Eastern Regional Meeting, Pittsburgh, 1998: 1—2.
- [32] 蔡承政, 任科达, 杨玉贵, 等. 液氮压裂作用下页岩破裂特征试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(11): 2183—2203.
- [33] Altawati F, Emadi H. Effects of cyclic cryogenic treatment on rock physical and mechanical properties of Eagle Ford shale samples—An experimental study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 88: 103772.
- [34] 李贤忠. 高压脉动水力压裂增透机理与技术. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [35] 翟成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用. *煤炭学报*, 2011, 36(12): 1996—2001.
- [36] 李全贵, 武晓斌, 翟成, 等. 脉动水力压裂频率与流量对裂隙演化的作用. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(6): 1067—1076.
- [37] 余旭. 煤层脉动水力压裂压力波沿裂隙传播规律和解堵机理研究. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [38] 蒋廷学, 左罗, 黄静. 少水压裂技术及展望. *石油钻探技术*, 2020, 48(5): 1—8.

New Progress of Liquid Nitrogen Fracture Technique in Low-permeability Coal Seams

Zhai Cheng^{1,2*} Sun Yong^{1,2} Wu Jianguo³

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

2. National Engineering Research Center for Coal Gas Control, Xuzhou 221116

3. Kailuan(Group) Co., Ltd., Tangshan 063018

Abstract The liquid nitrogen fracture technique has been proposed to solve the issue in gas extraction from a single low-permeability coal seam in China. Liquid nitrogen is injected into coal seams through the drilled boreholes. Combining the cold-shock effect of liquid nitrogen, the water-ice phase change, and liquid nitrogen gasification, a complex pore-fracture network can be constructed inside coal. Therefore, the coal permeability is largely improved which promotes the gas extraction efficiency. In this paper, the mechanism of liquid nitrogen cold-shock fracturing is presented from the perspectives of thermal stress, frost-heaving stress, and gasification expansion stress, respectively. However, the current research on the basic mechanism and application of liquid nitrogen fracturing has not considered the gas-bearing coal and in-situ stress conditions. Additionally, pulsating liquid nitrogen fracturing technology deserves further investigation. Up to now, two key problems exist in this field that includes the optimization of the technical workflow and pore-fracture propagation mechanism. In the future, liquid nitrogen fracturing can be combined with hydraulic jet to reduce the coal seam initiation pressure and create the directional and large-scale extension of fractures.

Keywords low-permeability coal seam; fracturing and permeability enhancement; liquid nitrogen cold shock; gas extraction

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: gretazc@cumt.edu.cn