

未及时冒落的上位顶煤破断成大的岩块,形成岩体结构与顶板一起构成覆岩的宏观结构;中下位顶煤的破碎块度大,散体顶煤体流动至放煤口时形成结构或堵住放煤口使得放煤终止。

2) 因顶煤坚硬,顶煤破断线滞后,出现悬顶,当顶煤(板)突然破断或破断后的大块运移时会对支架形成冲击压力,致使支架损坏严重,且工作面常有压死支架现象出现。

3) 因顶煤的放出率较低,采空区的浮煤和遗煤多,采空区容易自燃发火。

4) 因上位顶煤的不垮落,并形成结构,使得放煤后原先的放煤空间形成空腔,成为瓦斯的积聚空间;当上位顶煤和顶板滑落失稳时,岩块间的摩擦容易产生火花引爆瓦斯,存在瓦斯爆炸隐患。

为了改善坚硬厚煤层特别是高瓦斯坚硬特厚煤层综放开采顶煤的冒放性和安全性,很迫切需要寻找一种安全高效的技术措施来处理顶煤的冒放性、煤体自燃和瓦斯积聚的问题。

2 水力致裂弱化技术原理

岩(煤)体水力致裂弱化技术的原理是利用钻孔水压力的作用,改变孔边岩体的应力状态,导致孔边起裂和裂缝扩展(图2),进而利用裂隙水压力(图3),控制水压裂缝的扩展,弱化岩体的整体力学特性(图4);同时改变了岩体的渗透性能,使岩体充分吸水湿润,进一步软化岩体。其关键在于控制钻孔水压裂缝的起裂和扩展,掌握在水压力作用下岩体宏、细观结构改变的空间分布形态及其与岩体渗透性变化的关系。坚硬顶煤(板)水力致裂弱化技术是采用顶煤(板)水力致裂预先弱化的方法破坏煤体的宏、细观结构,通过压裂和软化作用弱化煤体的强度,进而依靠矿山压力的破岩作用,达到提高顶煤(板)冒落性的要求。

水力致裂技术的原理和方法不同于传统的煤层注水方法。从软化效果和安全角度考虑,水力致裂具有明显优势。

对坚硬煤层综放工作面顶煤进行超前水力致裂和动压注水预先弱化后,顶煤的运动、变形过程的基本规律没有实质改变,矿山压力对顶煤的破碎仍然具有极为重要的作用。水力致裂和注水只是完整顶煤预先形成裂隙带和结构构造改变的一个外加的预处理过程和破碎的诱导因素,其主要作用是通过降低顶煤的整体强度,形成水压破裂带,改善顶煤

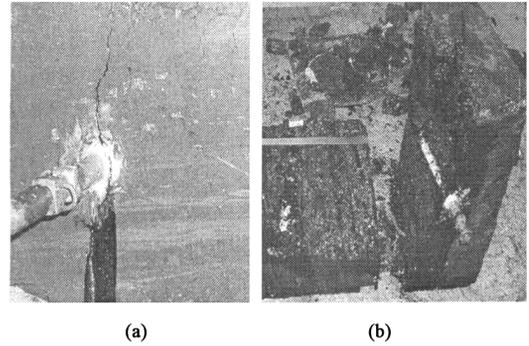


图2 煤质大试件水力致裂主裂缝扩展形态
Fig.2 Expanding configuration of hydraulic fracture main crack for big coal sample

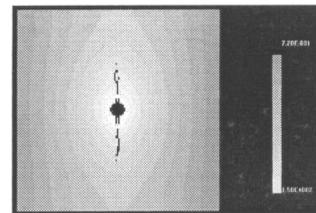


图3 水力致裂钻孔围岩水力等值线分布
Fig.3 Hydraulic isoline distribution of surrounding rock under hydraulic fracture



图4 裂隙水压力作用下岩体内裂隙的扩展
Fig.4 Crack expanding in rock mass under crack hydraulic pressure

的整体结构和力学性质,为充分发挥矿山压力的作用将顶煤进一步破碎到能顺利放出所要求的程度创造必要的条件,而不是如同爆破要把顶煤直接破碎到接近放煤需要的程度。因此,对顶煤进行预先综合弱化必须根据综放工作面顶煤破碎过程的基本规律,系统分析水压破碎带、注水、矿压、支架反复支撑破煤作用的特点,以充分发挥矿山压力作用为中心,使水压破碎带、注水流量、矿压、支架反复支撑破煤作用相互配合和协调,从控制顶煤破碎程度和顶煤垮落角两个方面,使它们的破煤作用效果最佳,满足顶煤顺利放出的要求。

3 水力致裂弱化技术的多功能效应

裂隙岩体水力致裂弱化技术不同于以往的煤层注水减尘，除了弱化岩体强度、降低冲击矿压危害外，还有几个副产品，具有一举多得的功效，是一项煤矿“绿色开采”技术。

3.1 弱化顶煤体（岩体）

通过水力裂缝弱化岩体的整体强度是采用水力致裂技术弱化坚硬顶煤和处理坚硬顶板的主要目的。水力致裂对岩体的弱化体现在两方面：

1) 是通过水压裂缝的破裂扩展，改造岩体的宏观结构，弱化岩体的力学性能；

2) 是通过水对岩石的物理化学作用，降低岩石的力学性能。

二者共同作用弱化岩体的整体力学性能。弱化坚硬顶煤可以改善顶煤的冒放性，减小顶煤破坏及运移对支架的冲击荷载；弱化顶板可以降低其整体强度，使顶板能及时垮落，减小顶板的冲击矿压危害，达到强度弱化减冲的目的。

3.2 减尘

煤层注水减尘应用于煤矿开采已经是一项比较成熟的技术。在通过水力裂缝切割弱化煤体的同时提高了煤体的含水率，增强了煤体的湿润效果，且比传统意义上煤层注水减尘的湿润效果更好，会降低工作面生产过程中煤尘的发生量。如铜川矿务局玉华煤矿1407综放工作面在未注水前，测得工作面生产时前部溜子机尾煤尘高达 $550\sim 650\text{ mg/m}^3$ ，平均为 600 mg/m^3 ；注水后，测得工作面生产时前部溜子机尾煤尘为 $320\sim 400\text{ mg/m}^3$ ，平均为 360 mg/m^3 。除尘率为40%。

3.3 预先释放部分瓦斯

随着水力致裂裂缝的破裂与扩展，及其与原生裂隙和钻孔的连通，使得裂隙附近煤体内部分游离态的瓦斯通过钻孔预先排放；同时煤内体瓦斯原始赋存压力和浓度的变化，使得部分吸附瓦斯也转变为游离态瓦斯。这样预致裂的结果一定程度上起到了预先排放瓦斯的作用，减少工作面瓦斯涌出量，有利于工作面的正常安全生产。

如铜川矿务局玉华煤矿1407综放工作面在未注水前，统计工作面绝对瓦斯涌出量的平均值为 $3.655\text{ m}^3/\text{min}$ 。在通风系统基本未变化的情况下，在注水后，统计工作面绝对瓦斯涌出量的平均值为 $2.86\text{ m}^3/\text{min}$ ，瓦斯浓度降低了24.6%。

3.4 抑制煤自然发火

水具有吸热降温抑制煤炭氧化进程的作用，同时水对已经氧化自热升温的煤炭具有散热冷却的作用^[4]，对综放开采采空区遗煤自燃具有抑制作用。研究表明^[5]，在煤的自燃环境评判中煤的水份的重要度是煤自燃倾向性的0.5倍。可见，水份对煤自燃有很大的影响。

通过11个易自燃厚煤层低位综放工作面顶煤水力致裂弱化的工业试验表明，工作面在开采过程中均未出现煤自燃发火现象。

4 研究现状和技术发展趋势分析

水力致裂技术最早应用在石油工程来提高贫油井的产量，目前被广泛应用于现代石油工业、地热资源开发、核废料储存等领域，显示出广泛的工业应用价值。借助于水力致裂基本概念，研究开发坚硬顶板水力致裂弱化技术作为解决煤矿开采坚硬顶板控制的关键技术之一。但岩体水压致裂问题的研究尚处于初始阶段^[6]，许多基本的理论、工艺与技术装备等问题尚待深入研究。

4.1 岩体水力致裂裂缝扩展行为规律研究

水压力参数是水力致裂的关键参数，直接影响弱化效果的好坏。对水压致裂使井壁破裂的最小压力较早就进行了研究^[7]。对水压致裂必然在失稳压力开始的假设进行了纠正，划分了不同的临界压力^[8]：破裂开始压力；失稳压力（或者称为崩溃压力），水压力达到失稳压力时裂纹将连续地扩展。破裂开始扩展后不一定立刻导致失稳，在破裂后压力增生是否稳定意味着破裂开始压力也许比失稳压力更小^[9]。水力致裂裂缝扩展的水压力参数呈现阶段性特征，导致水压裂缝的扩展也呈现阶段性特征^[10,11]，目前对水压裂缝扩展过程规律的研究较少。

在实验研究方面，主要是采用大尺寸真三轴模拟试验系统模拟地层条件，进行地应力场控制下水力压裂裂缝扩展机理模拟实验^[11~14]，讨论地应力、断裂韧性、节理和天然裂缝等因素对水压裂缝扩展老顶的影响，对岩体中封闭型裂隙扩展与地应力水平、水压作用的关系进行了宏观、微观实验分析。理论上建立了煤岩体水力压裂裂纹断裂扩展以及固液耦合作用的数学模型^[15,16]。应用岩石损伤破裂过程渗流—应力耦合分析系统F-RFPA2D软件，对水力压裂过程中裂纹的萌生、扩展、渗透率演化规律

及渗流-应力耦合机制的模拟分析,对比分析了不同围压、不同均质度等对岩石水压致裂过程的影响作用下,数值模拟结果和实验结果具有较好的一致性^[17]。工程岩体存在岩层面,岩层层间、岩层间地应力和弹性模量等材料力学性质差对裂缝扩展也有影响^[18,19]。

目前的水压致裂理论的基本假设是:岩石是脆性、线弹性、均质和各向同性及非渗透性的。岩石为非渗透性的基本含义为:裂隙中水压力在裂隙附近的岩体中极小的范围内就降到零,也就是裂隙附近岩体内的水力梯度趋近于无穷大^[6]。但实际工程中的岩体具有孔隙结构,裂缝水压力并不能完全考虑为使裂缝扩展的张拉力。因此,必须深入的研究岩体水力致裂裂缝扩展的压力参数。目前虽然有学者提出采用水力梯度的概念讨论裂隙扩展时水压力对周围岩石的作用^[1,6],但未进行深入研究。同时考虑裂纹尖端塑性区对水压裂缝扩展压力的影响需要进一步研究^[10]。

4.2 渗透压力对裂隙岩体宏观结构的改造作用及其宏观力学响应

近年来国内外有不少学者对裂隙岩体固液耦合进行了研究,大多集中对裂隙岩体渗流场与应力场耦合的应力状态分析方面进行了广泛的实验和理论研究^[20,21]。主要工作有:**a.**对单一裂隙渗流应力耦合进行机理性研究,这方面主要是从试验入手,总结单一裂隙在应力作用下的理论模型,提出各种经验公式和间接公式;**b.**对裂隙岩体提出各种不同的渗流应力耦合模型;**c.**对裂隙岩体渗流场与应力场的进行理论分析和数值模拟,同时用于工程实践。

目前对岩石在应力应变全过程中的渗透性进行了研究^[21]。考虑固液耦合作用下裂隙岩体细观结构破坏而引起的损伤,从裂隙岩体固液耦合的应力状态分析深入到对渗流场与损伤场耦合及岩体细观结构改造与宏观力学性能变化的关系的研究在国内外则刚刚起步^[22~24]。

工程裂隙岩体在自然状态下处于力学平衡状态。当岩体受到开挖扰动等人类工程力和孔隙水压力等外在推动力作用下,改变岩体原始的应力状态,导致岩体内裂缝张开、起裂和扩展,破坏岩体的宏观结构,从而改善岩体的渗透性能,弱化岩体强度;同时也会引起部分原生裂隙闭合,强化岩体强度,降低岩体的渗透性能。这体现了岩体细观

结构变化与渗透性能、岩体的整体力学性能之间的相互作用关系。渗流场与应力场耦合作用下岩体的结构改变关系如图5。

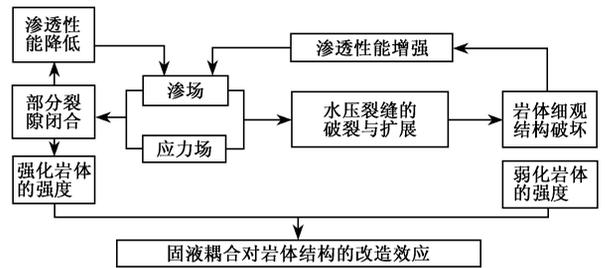


图5 固液耦合作用下裂隙岩体的结构改变关系
Fig.5 Structure alteration effect of cracked rock mass under solid-liquid coupling

4.3 岩体水力致裂控制技术研究

在坚硬厚煤层放顶煤开采顶煤的水力致裂弱化技术中,需要通过圆孔孔壁水力致裂裂缝的扩展将煤层沿钻孔轴线切断。但若圆孔孔壁水力致裂裂缝扩展至顶板,将煤层直接顶切断,弱化直接顶的强度和刚度,直接顶传递回转变形压力的能力减弱,使得工作面的矿山压力显现缓和,顶煤的支撑压力减小,导致矿山压力的破煤作用降低。因此,需要控制水压裂缝的扩展形态。

岩体水力致裂控制技术是指根据工程需要对水力致裂裂缝的扩展形态进行控制而采取的技术措施。水压裂缝扩展形态的控制包括裂缝扩展方向和长度的控制。岩体水压致裂裂缝的扩展方向受钻孔周围的应力场控制,但实际工程需要致裂裂缝按一定的方向扩展,基于此产生了定向水力压裂技术。目前该技术通常采用在深孔底部开个楔形环槽。要对水压裂缝扩展长度控制就必须知道裂缝的扩展速度特性,进而利用时间参数来控制裂缝扩展长度。岩体水压致裂裂缝扩展形态的控制目前研究很少,特别是裂缝扩展长度的控制未见报道。

4.4 岩体水压致裂封孔技术研究

岩体的水力致裂弱化不同于煤层注水减尘,其注水压力要高于煤层注水减尘。目前现场采用的钻孔封孔器大多是利用封孔器与钻孔壁的摩擦或粘结锚固来达到封孔的目的,且都是在孔口段进行封孔。但岩体的水力致裂弱化是通过高压水使钻孔孔壁致裂,产生水压裂缝,切割岩体,达到改变岩体的整体结构和弱化岩体的整体强度。同时,封孔器周围岩体本身存在节理裂隙,因此,裂隙水压力会

使孔口围岩的原生裂隙起裂与扩展,使得钻孔周围渗水泄压,影响水力致裂弱化效果,有时甚至导致水力致裂作业失败。因此,封孔效果良好的钻孔封孔器成为岩体水力致裂弱化技术的关键装备,研发配套的封孔设备成为当务之急。

4.5 岩体水力致裂弱化的监测监控

岩体水力致裂的水压力和流量是影响岩体水力致裂弱化质量好坏的关键性指标。因此,对注水过程水压力和流量的监测和控制具有重要的意义。这方面目前主要是借鉴煤层注水降尘时的监测系统,根据监测结果,通过信息反馈,进而控制致裂过程的水压力和流量。另一方面,目前水力致裂工程实践过程中不能监测到水压裂缝的扩展信息,导致水力致裂的效果只能通过后期的工程效果来反映,不能实时的反映弱化效果,使得水力致裂弱化作业具有一定的盲目性。因此,寻求岩体水力致裂过程裂缝扩展信息的监测方法成为发展趋势,虽然在技术上有很大的难度,但一旦突破将具有重大的技术价值和广泛的应用前景。

5 结语

坚硬顶煤(板)水力致裂弱化技术具有安全、经济、环保和高效的特点,作为一项绿色开采技术在煤矿中已开始应用。岩体水力致裂弱化技术在煤矿开采中将更广泛应用于坚硬厚(高瓦斯)煤层综放开采顶煤的弱化、坚硬顶板的处理、冲击矿压的防治和煤层气的抽放。岩体水力致裂弱化理论的进一步研究是对岩石力学固液耦合理论的深化;同时对矿井的保水开采、承压水上采煤、石油的二次开采、岩体地热能的开发等大量岩体工程具有借鉴作用。

参考文献

- [1] 邓广哲. 煤体致裂软化理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003
- [2] 巴内吉 A, 雷 A K, 辛格 G. 高压注水控制坚硬顶板[J]. 中国煤炭, 2004, 30(12): 73~74
- [3] 孙守山, 宁宇, 葛钧. 波兰煤矿坚硬顶板定向水力压裂技术[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(2): 51~52
- [4] 刘英学. 清水灌注抑制易燃采空区遗煤氧化及自然的机理研究与应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 237~241
- [5] 田水承, 李新东, 徐精彩. 煤自燃环境及其影响因素[J]. 西安矿业学院学报, 1994, (2): 107~111
- [6] 谢兴华, 速宝玉. 裂隙岩体水力劈裂研究综述[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 330~336
- [7] Hubbert M K, Willis D G. Mechanics of hydraulic fracturing, Trans Am Inst Min Engre[J]. 1957, 210: 153~168
- [8] Detournay E, Carbonell R. Fracture mechanics analysis of break-down process in minifrac or leak of tests [A]. Proceedings of Eu-rock'94 [C]. Rotterdam: Balkema Publishers, 1994. 399~407
- [9] Zhao Z, Kim H, Haimson B. Hydraulic fracturing initiation in granite [A]. Rock Mechanics [M]. Aubertin, Hassani and Mitri (eds). Rotterdam: Balkema Publishers, 1996. 1279~1284
- [10] 邓广哲, 黄炳香, 王广地, 等. 圆孔孔壁裂缝水压扩张的压力参数理论分析[J]. 西安科技学院, 2003, 23(24): 361~364
- [11] 邓广哲, 王世斌, 黄炳香. 煤岩水压裂缝扩展行为特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3489~3493
- [12] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 868~872
- [13] 邓广哲. 封闭型煤层裂隙地应力场控制水压致裂特性[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 478~482
- [14] Hanson M E, Anderson G D, Shaffer R J. Theoretical and experimental research on hydraulic fracturing [J]. Journal of Energy Resources Technology, 1980, 102(2): 92~98
- [15] Fowler A C, Scott D R. Hydraulic crack propagation in a porous medium [J]. Geophysical Journal International, 1996, 127(3): 595~604
- [16] 申晋, 赵阳升, 段康康. 低渗透煤岩体水力压裂的数值模拟[J]. 煤炭学报, 1997, 22(6): 580~584
- [17] 冷雪峰, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石水压致裂过程的数值模拟分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(11): 1104~1107
- [18] Teufel L W, Clark J A. Hydraulic fracture propagation in layered rock: Experimental studies of fracture containment [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1984, 24(1): 19~32
- [19] 陈治喜, 陈勉, 黄荣樽, 等. 层状介质中水力裂缝的垂向扩展[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(4): 23~26
- [20] 赵阳升, 杨栋, 郑少河, 等. 三维应力作用下岩石裂缝水渗流物性规律的实验研究[J]. 中国科学(E辑), 1999, 29(1): 82~86
- [21] 杨天鸿, 唐春安, 朱万成, 等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 489~493

- [22] Oda M, Takemura T, Aoki T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite[J]. *Mechanics of Materials*, 2002, 34(6): 313~331
- [23] 朱珍德,徐卫亚. 裂隙岩体渗流场与损伤场耦合模型研究. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(2): 156~160
- [24] 郑少河,姚海林,葛修润. 渗透压力对裂隙岩体损伤破坏的研究[J]. *岩土力学* 2002, 23(6): 687~690

Technology of Coal-Rock Mass Hydraulic Fracture Weakening and Its Development

Huang Bingxiang¹, Deng Guangzhe², Liu Changyou¹

(1. *State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China*; 2. *School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China*)

[Abstract] Technologic problems of top coal recovery ratio, rock burst, coal spontaneous combustion and gas accumulation induced by hard top-coal or roof's fall in coal mining were introduced. Current research and development trend of hydraulic fracture weakening for hard top-coal or roof was analyzed, including the law of crack expanding induced by hydraulic fracture in rock mass, mesoscopic structure alteration of cracked rock mass by seepage pressure and its macroscopic mechanics response, controlling technology of hydraulic crack's expanding, the technology of enveloping drillbore and weakening effect monitoring.

[Key words] hard top-coal (roof); hydraulic fracture; crack expanding; mesoscopic structure

科学新闻

中国科学院范良藻教授在重庆亲临现场观看刘武清有关永磁体相吸时,磁体重量增加约千分之二,相斥时减轻约万分之四的实验全过程;同时还观看了冯劲松用红外测温仪测量永磁体相吸时的表面温度变化,与样品原有的温度环境对比,样品有一个升温 and 降温的过程。在室温是 13.6 °C 时样品表面温度最高升温有 7~8 °C 之多,随着样品材料的不同,低的也有 2~3 °C 左右。全过程从升温到降温到复零,再降温,最后再复零,全过程达到二十分钟之多。经过专家咨询和查新,尚未发现有类似的记载,因此,它有可能是两个崭新的、从未被人发现过的物理现象。我们将通过国家计量单位验证和科学技术信息中心进一步查新。

范良藻认为此现象是由于材料的内能发生变化所致,因此建议,可以通过改变材料温度的方法改变样品的内能,看看材料的重量是否也随之改变? 根据这一建议,近日冯劲松又对铝、铁、不锈钢、陶瓷、黄铜进行了升温 and 降温的实验,升温时内能增加,重量减轻;降温时内能降低,重量增加。无论是对何种材料,这都是一个普遍的现象,这是一个传统热力学理论从未涉及也无法解释的现象。

当铝样品从室温升温至 320°C 时,铝样品的称重减轻了,随着自然冷却,称重又逐步恢复原位;当铝样品降温到 -18°C 时,样品的称重增加了千分之四,这是否说明物体的重量随着温度的变化也有可察觉的变化,虽然变化量很不明显。当样品的温度远高于室温时,电子天平室内会有明显的环绕气流产生,这是否会影响到样品的称重。将称重实验放在真空室内进行的实验表明,上升热气流对上述称重试验的影响不到百分之三,因此,不影响所给出的结论。

范良藻和冯劲松将撰文详细公布与材料升温降温时重量发生变化的研究报告及其理论解释。在重庆逗留期间,还观看到刘武清演示的电容器充电后重量变轻的实验结果。

范良藻认为,在科学技术空前发达的 21 世纪,用如此简单的测试设备发现以前从未发现过的现象,实在令人难以置信,但眼见为实,多次重复都得到同样的结果。由此似可说明,科技创新的前沿是永无止境的! 科学家个人的力量实在是太小了。

(范良藻 供稿)