文章编号:0253-9993(2013)09-1604-07

空化水射流声震效应促进瓦斯解吸渗流测试装置的改进

卢义玉[1,2],王景环[1,2,3],黄　飞[1,2],杜　鹏[1,2],刘小川[1,2],章文峰[1,2],张欣玮[1,2]

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆　400030; 2. 重庆大学 复杂煤气层瓦斯开采国家地方联合工程实验室,重庆 400030; 3. 云南省建筑科学研究院,云南 昆明　650223)

摘　要: 为确保完善空化水射流声震促进含瓦斯煤层解吸试验效果,针对原研制的模拟试验台存在的不足,对实验空化腔及其配套的型煤试件成型装置进行改进和重新研制。利用环向和密封圈等全方位密封技术可使三轴压力室、空化腔在高围压下及 5 MPa 瓦斯压力下达到较长时间的良好密封效果;依靠空化腔内布置的文丘喷嘴及高压射流装置激发腔体产生空化效应促进含瓦斯煤层解吸;依托于空化腔水进出口压力传感器实时监测空化腔空化效应;凭借布置的温度和瓦斯压力传感器、引伸计及配套的试验控制软件连接,模拟空化声震效应含瓦斯煤样瓦斯解吸渗透特性及声震过程中的煤样全应力-应变过程演化规律,实时监测空化声震过程中空化腔内温度及其瓦斯渗渗流的变化规律。此外,在循环系统设计了气-液-固体分离器,解决三相排出问题,使三相分离成为可能,提高了试验可操作性。利用改进后的实验装置系统开展模拟实验表明,空化水射流声震效应促进煤层瓦斯解吸渗流,瓦斯解吸量及解吸速度都有不同程度的提高;声震下空化腔内温度变化及含瓦斯煤试样变形规律验证了空化声震效应的热效应、机械震动效应与致裂损伤效应这一物理现象。

关键词: 瓦斯压力;空化声震;空化射流;解吸渗流;引伸计

中图分类号: TD712.6　　**文献标志码:** A

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

Improvement of sonic vibration simulation device for gas desorption and seepage under cavitation water jets

LU Yi-yu[1,2], WANG Jing-huan[1,2,3], HUANG Fei[1,2], DU Peng[1,2], LIU Xiao-chuan[1,2], ZHANG Wen-feng[1,2], ZHANG Xin-wei[1,2]

(1. *Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamic Sand and Control, Chongqing University, Chongqing* 400030, *China*; 2. *National & Local Joint Engineering Laboratory of Gas Drainage in Complex Coal Seam, Chongqing University, Chongqing* 400030, *China*; 3. *Yunnan Institute of Building Research, Kunming* 650223, *China*)

Abstract: In order to improve the desorption of coal methane by the sonic vibration of cavitation water jets, aiming at overcoming the weakness of originally developed simulation test platform, an experimental cavitation chamber and its coal shaping device have been improved and redesigned. Using the technologies of omnidirectional sealing, such as ring direction and surface sealing, etc., a good sealing result of triaxial pressure chamber and cavitation chamber for a long time under confining pressure and 5 MPa gas pressure is obtained. Using Venturi nozzle and high-pressure jet device in the cavitation chamber, the cavitation bubble cloud formed in the cavitation chamber enhances the desorption of coal methane. With the installation of pressure sensor at water inlet and outlet, the cavitation effect is monitored in real time. Depending on the temperature and methane pressure sensor, extensometer and the supporting test control software, the permeability characteristics of methane desorption of coal sample under gas pressure and the evolution laws

收稿日期: 2012-10-19　　**责任编辑:** 许书阁
基金项目: 中央高校基本科研业务费科研专项自然科学类资助项目(CDJZR10248801)
作者简介: 卢义玉(1972—),男,湖北京山人,教授,博士生导师,博士。Tel:023-65106640,E-mail:luyiyu@cqu.edu.cn

of stress-strain process of coal sample during sonic vibration process can be simulated. The temperature in the cavitation chamber and the variation of gas seepage during sonic vibration process can be monitored in real time. In addition, three-phase separator is designed in the recycle system, and the test maneuverability is improved. The feasibility of separating gas-liquid-solid matters via this separator is realistically proved. The simulation experiments using the improved experimental device show that the sonic vibration of cavitation water jets improves the desorption of coal methane, gas desorption quantity and desorption speed. The variation of temperature in the cavitation chamber and the deformation laws of coal sample verify the thermal effects of sonic vibration, the effects of mechanical vibration and crack damage.

Key words: gas pressure; sonic vibrating; cavitating jet; desorption and seepage; extensometer

深埋煤层由于受高地应力的影响,其渗透率非常低,此时煤体可视为一种含气多孔致密的低渗透介质[1],其煤层瓦斯压力梯度相对于浅部煤层更大,故深部低渗透煤层的高地应力和高瓦斯压力梯度引发的一系列瓦斯灾害事故也在不断增加,因此,获取低渗透煤体渗透率的变化规律,了解低渗透煤体的瓦斯渗流规律,显得尤为重要。

为了解探索瓦斯与煤层解吸过程中作用机理及煤储层渗透特性,国内外学者针对含瓦斯煤层渗流与解吸做了相关研究。J. R. E Enever 和 A. Henning[2]研究了煤体有效应力对渗透率的影响律; W. J. Sommerton 等[3]研究了应力对煤体渗透性的影响; S. Harpalani 等[4-5]研究了应力对煤解吸渗流的影响规律; Kroossbm 等[6]研究了水分对瓦斯吸附的影响; 鲜学福、刘宝县、姜永东、何学秋[7-8]等研究了在外加物理场(地应力场,温度场,地电场,电磁场等)以及声场作用下对煤体瓦斯解吸及渗流特性的影响。

目前主要依靠实验室相似模拟实验手段进行煤层与瓦斯作用机制的研究与探索[9-10],并相继开发了性能各异的煤层吸附瓦斯解吸相互作用模拟实验装置[11-14]。隆清明等[15]自行研制"瓦斯渗透仪",进行了孔隙气压对煤体渗透性影响的试验研究; 彭永伟等[16]利用一种夹持装置,通过试验研究了不同尺度煤样在围压加、卸载条件下的渗透率变化。周东平[17]研制的空化声震效应促进煤层瓦斯解吸装置试验台因可进行不同水射流压力、不同瓦斯压力、不同围压等条件下的空化声震模拟实验而相对更具优势,但其测试台的密闭效果及油压单向回流污染油缸,质量流量计进口处气固分离器空缺造成流量计堵塞甚至毁坏; 模拟试验缺乏监测煤试样全过程应力-应变引伸计无法量化有效应力对煤层瓦斯渗流的影响; 空化腔出口处缺乏压力表实时监控而无法进行定量分析空化腔内空化数。为此,本文拟基于该模拟实验装置系统,对其三轴室、空化腔及其配套的煤试件成型装置予以进一步改进和研制,使其在高压空化声震实验过程中能实时监测煤样在吸附及解吸瓦斯过程中温度场、应力场、渗流场及腔体内空化效应,并通过不同瓦斯压力和射流压力、围压和轴向压力模拟试验初步探讨空化声震效应促进含瓦斯煤层吸附解吸过程中温度,渗流量、渗流速度及全应力应变变化规律。

1　空化声震测试台的改进

进一步试验研究表明,周东平[17]所介绍的空化水射流声震测试系统存在以下不足: ① 原空化腔单纯靠"O"型密封圈进行长时间密封时效果不甚理想; ② 原空化腔在试验过程中监测腔体内部温度变化时具有一定困难; ③ 原围压施加系统进油管和出油管为同一条油管,排空困难,压碎的煤屑容易返回油缸,污染液压油造成一定经济浪费; ④ 原测试系统缺乏全应力-应变传感器(引伸计),不能监测煤试样的变形全过程,进而无法定量分析全应力状态下含瓦斯煤试样空化声震效应对含瓦斯煤层解吸渗流促进效应。⑤ 原瓦斯压力管道直接与质量流量计连接,缺乏气-液-固分离器,实验过程气体拌合压碎的煤粉直接通过质量流量计,容易堵塞流量计,造成流量计失灵甚至毁坏。⑥ 空化腔出口处压力无法实时监控,因此无法定量分析空化腔空化数。基于此,作者拟进一步对该模拟试验测试系统的配套装置进行改进和研制。

改进后的模拟实验测试系统可测试含瓦斯煤层轴向应力、水平应力、温度、轴向径向变形和瓦斯压力变化参数。

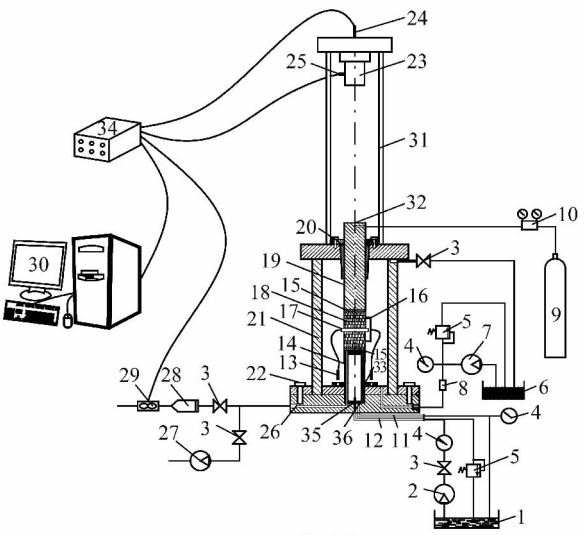
改进后的空化声震测试台工作原理、配套设备其结构示意及实物如图 1 所示。

1.1　三轴压力室与空化腔密封

三轴压力室是该渗流装置的核心部件,是放置煤(岩)试件及产生试验所需围压环境的重要机构,其主体结构(图 1(b))。

三轴压力室由上座和下座两部分组成,整体采用 C45 不锈钢材料加工制作,其筒体高度为 420.0 mm,外径为 ϕ273.0 mm,内径为 ϕ200.0 mm,加压活塞杆

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



(a) 工作原理

(b) 实物

图 1 空化声震测试系统装置

Fig. 1 The experimental equipment of desorption and seepage under cavitation vibrating

1—水箱; 2—电动液压泵; 3—高压阀; 4—压力表; 5—溢流阀; 6—油箱; 7 油压泵; 8—固液分离器; 9—瓦斯瓶; 10—减压阀; 11—出水口; 12—进水口; 13—传感器接线柱; 14—空化腔; 15—蜂窝板; 16—轴向引伸计; 17—径向引伸计; 18—煤试样; 19—热缩管; 20—导向套; 21—三轴压力室; 22—螺栓; 23—轴向压头; 24—轴向导向位移传感器; 25—轴向应力传感器; 26—出气口; 27—真空泵; 28—气固分离器; 29—质量流量计; 30—计算机采集系统; 31—拉力杆; 32—加压活塞杆; 33—温度传感器; 34—数据控制系统; 35—空化腔水进口压力传感器; 36—空化腔水出口压力传感器

和支承轴的直径均为 100.0 mm，连接处设有“O”型密封圈，密封依靠 704 硅橡胶、硅胶板和 32 颗密封螺钉共同完成，能有效地防止漏油。

空化腔体与三轴下座连接处利用“O”型与“Yx”型唇形密封圈，配合 704 硅橡胶及 12 颗密封螺钉等共同参与的全方位密封。

通过全方位密封后，经检测三轴压力室在 10.0 MPa 围压、瓦斯压力 5 MPa 下保持 24 h 的良好密封效果。

1.2 引伸计布设

为了实时监测含瓦斯煤岩在空化声震作用下煤试件轴向和径向应力-应变演变规律，在原三轴压力室下座监测孔增设一套轴向、径向引伸计(图 2)，压力传感器通过 MaxTest-Load 试验控制软件实时显示在计算机上并记录下来。

图 2 三轴压力室

Fig. 2 Triaxial compression chamber

轴向引伸计，其技术参数为 A 最大变形量: 20 mm; B 测量精度: ±1%; C 试样直径: 100 mm; D 测量范围: 0.4 ~ 20 mm; E 引伸计标距: 100 mm。

径向引伸计，其技术参数为 A 最大变形量: 25 mm; B 测量精度: ±1%; C 试样最大直径: 100 mm; D 测量范围: 0.5 ~ 25 mm; E 引伸计最大外形尺寸: 120 mm。

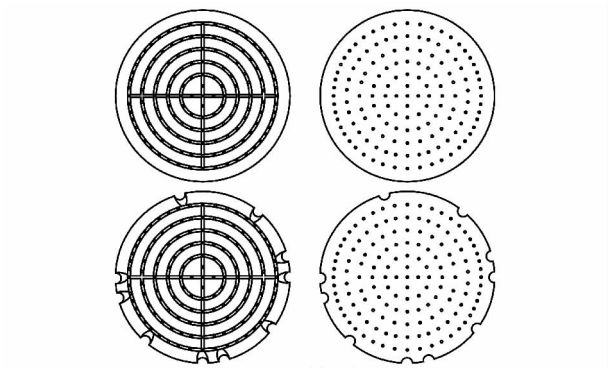
1.3 蜂窝板

为使气体均匀地从试件断面中流过，将加压活塞杆下端和支撑轴上端分别设计成环状面孔，如图 3 所示，实现了“面充气”，而不再是以往的“点充气”，更加逼真地实现了实际煤层瓦斯流动情况。

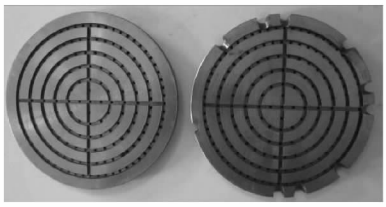
1.4 热效应测试系统

为监测空化水射流空化腔内热效应，以期开展利用空化射流热效应来促进含瓦斯煤层解吸及渗流课题研究，在空化腔内侧壁设有温度监测孔用于安装温度传感器。温度传感器用于空化水射流的温度特性测量: 水射流在空化腔内形成空化，利用温度传感器监测空化腔内热效应，将温度变化信息传送数据控制系统，转换为标准输出直流电信号输入计算机采集系统采集。该空化射流热效应测试方法及装置能够为空化水射流腔体监测温度变化提供良好的监测平台，数据采集准确、方便。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



(a) 上、下蜂窝板示意



(b) 上、下蜂窝板实物

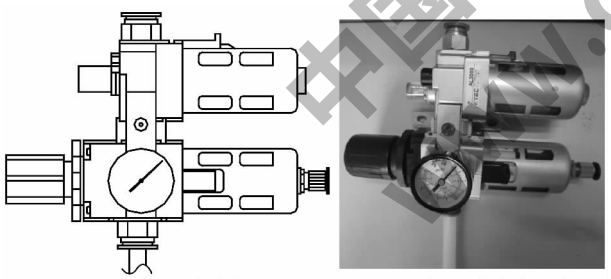
图 3　蜂窝板

Fig. 3　Honeycomb panel

1.5　气-液-固分离器设计

1.5.1　气-液-固分离器分离原理

气-液-固分离器如图 4 所示。煤层在高压水射流空化声震热效应与机械效应以及瓦斯压力下试验，煤屑、煤层所饱和的水分和空气中的水分会被瓦斯带入循环系统，将堵塞管路，损坏质量流量计，导致循环系统中断，故需气-液-固进行分离。



(a) 气-液-固分离器　　(b) 气-液-固分离器实物

图 4　气-液-固体分离器

Fig. 4　Structural diagram of gas-liquid-solid separator

分离器运行时，气-液-固三相混合物以较高的速度进入分离器中，受分离器结构影响形成涡流，并成螺旋形向下运动。由于液体产生涡流运动时，沿径向方向的压力分布不等，边界处较高，核心区域较低，促使不互溶混合相中密度最大的固相向边壁移动，最终由出砂口排出; 密度最小的气相移向分离器的轴心位置，并在锥体形成的反向举升作用下向上运动，最终由分离器顶部的溢流口排出; 而液相密度居中，经排液孔进入内锥腔中，在后续液流的推动下沿底部底流口排出，从而完成分离的全过程。

1.5.2　气-液-固体分离器的功能设计

根据气体介质和所分离杂质的特点，选用内锥式旋流分离器; 为了保证分离精度，在出气口处安装滤网，以有效分离固态杂质; 为了准确计量杂质量，在分离器下端安装了煤屑收集器。

选用的瓦斯压力要求固态颗粒直径不得超过 20 μm，设计固体分离器时分离精度应大于此值，最终确定固体分离器的分离精度为 16.5 μm，固体分离器设计的存储能力为 200 g。

依据成套设备设计理论，首先选择固体分离器的材料为 35CrMo，并对其基本结构进行探索性设计，绘出设备方案，主要包括气液分离器、过滤器、筒体和煤屑收集器等。

考虑型煤颗粒级配选用 60 ~ 80 目，为了保证分离精度，在出液口处安装滤网(40 目)，以有效分离固态杂质; 为了准确计量杂质量，分离器安装了煤屑收集器。

根据 Rosin 临界直径理论，所需分离杂质的最小粒径为

$$d_e = \sqrt{\frac{9\mu D}{\pi N_e v \rho_s}}$$

式中，d_e 为杂质最小粒径，即旋风式分离器精度，μm; μ 为瓦斯黏度，mPas; D 为入口直径，mm; N_e 为瓦斯有效旋转圈数; v 为瓦斯流入速度，m/s; ρ_s 为固体粒子密度，kg/m^3。

实验证明在三轴压力实验下含瓦斯煤岩破碎后，通过增设气-液-固体分离器，煤屑、煤层所饱和的水分和空气中的水分能得到有效分离，保证循环系统的正常运行。

2　改进后空化声震解吸测试系统实验

为验证含瓦斯煤层空化声震测试台装置能否满足试验所需的具体要求及其试验结果的可靠性，先后进行了不同围压、不同射流压力、不同瓦斯压力等条件下的含瓦斯煤解吸渗透试验。

2.1　煤样采集与加工

试验用煤样取自重庆松藻煤矿一矿 K1 煤层。将所取原煤样粉碎并筛选粒径为 60 ~ 80 目的煤粉颗粒，然后在 2 000 kN 材料试验机上以 60 kN 的成型应力稳定 30 min 后压制成 ϕ100 mm×200 mm 的型煤试件，最后将制备好的试件烘干后放置于干燥箱内备用。

2.2　实验方案设计

(1) 常温下不同围压条件下的渗流解吸试验，进口瓦斯压力恒定为 1.0 MPa，出口瓦斯压力恒定为

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

0.1 MPa(即大气压)。

(2)进行轴压和围压恒定时不同射流压力条件下的空化声震试验,进口瓦斯压力恒定分别为 1.0,0.5 MPa,出口瓦斯压力恒定为 0.1 MPa。

(3)分别进行泵压 25 MPa、空化腔围压 0.1 MPa、泵压 5 MPa、空化腔围压 0.5 MPa、泵压 15 MPa、空化腔围压 0.3 MPa 等工况下空化声震促进煤样瓦斯解吸实验。

3 实验结果分析

3.1 含瓦斯煤层在不同围压下变形规律

根据试验结果分析,不同围压下含瓦斯煤层全应力-体应变曲线如图 5 所示,图中 ε_1 表示轴向应变;ε_2 表示横向应变($\varepsilon_2=\varepsilon_3$);$\varepsilon_V$ 表示体积应变。

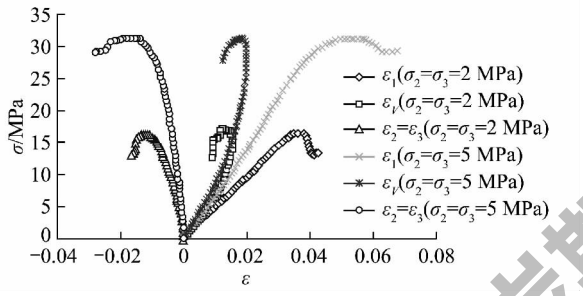


图 5 不同围压下含瓦斯煤全应力-体应变曲线

Fig. 5 Complete stress-strain curves of gas-containing coal under different confining pressures

从图 5 可以看出,含瓦斯煤在空化水射流泵压 15 MPa 和进口瓦斯压力为 0.5 MPa 时,围压分别为 2,5 MPa 条件下的变形过程大致可以分为压密阶段、弹性阶段、屈服阶段(也称应变强化阶段)、失稳阶段(也称应变软化阶段)和残余应力阶段[18],与一般岩石三轴全应力-应变曲线的规律一致。随着围压的增大,含瓦斯煤的抗压强度增大,但煤样的初始压密阶段越来越不明显,这是因为煤样在较高的围压作用下发生了二次压密。从体积应变始终为正值分析,含瓦斯煤体应变的变化与其内部孔裂隙损伤演化过程密切相关,且变形过程中一直处于压缩状态。

3.2 空化水射流声震波热效应

空化噪声声波辐射是一种能量的辐射,当声波穿过含甲烷煤体时,由于煤体的黏滞性造成质点之间的内摩擦(内耗)而吸收一定量的声能,声能将转变为热能,使煤体的局部温度升高,从而煤体的平均温度升高,有利于降低煤对甲烷气体的吸附量和提高煤储层的渗透率。解吸是一个吸热过程,声波辐射可以为甲烷的解吸不断提供能量,使解吸过程得以持续。热效应使煤体温度升高,加大自由气体分子的碰撞为气体脱附提供能量。在高频声波作用下,相对运动会使界面产生一定的摩擦热,引起局部温度升高。在水射流空化声震作用下容器增加的温度 ΔT 与空化声震波作用时间 t 的关系曲线如图 6 所示。

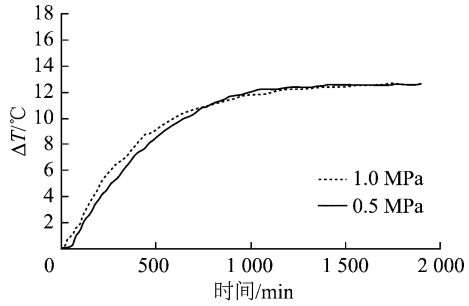


图 6 声波热效应实验结果

Fig. 6 Acoustic thermal effect results

从图 6 可以看出:在空化声震机械震动波作用前阶段,容器里面的增加温度 ΔT 呈线性增加,随时间的继续增加,容器里面的温度增加缓慢,最终趋于稳定,温度增加了 12 ℃左右。

3.3 空化水射流机械振动与致裂损伤效应

空化声震的施加,机械振动效应降低了煤层骨架应力,致裂损伤效应提高煤层的孔隙度,煤层系统温度的升高提供了煤层瓦斯解吸的活化能,共同作用强化了煤层瓦斯的解吸渗流。

选择了最小空化系数 0.003 8(泵压 25 MPa,空化腔围压 0.1 MPa)、最大空化系数 0.109 8(泵压 5 MPa,空化腔围压 0.5 MPa),以及空化系数为 0.020 0(泵压 15 MPa,空化腔围压 0.3 MPa)下的空化声震促进煤样瓦斯解吸实验,得到不同空化数下解吸量与解吸时间的关系曲线,如图 7 所示。

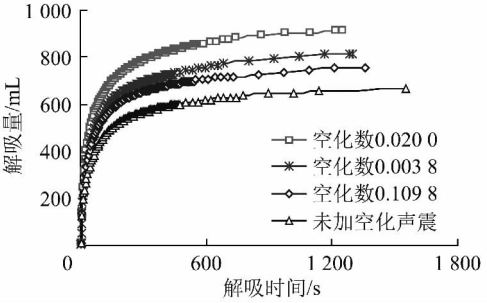


图 7 不同空化系数下解吸量与时间的关系曲线

Fig. 7 Discharging quantity versus time under different cavitation number

从图 7 的实验结果可以看到,空化声震的施加对解吸量得到不同程度提高,解吸时间均有缩短。

4 结 论

(1)利用“O”型与“Yx”型唇形密封圈,配合 704

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

硅橡胶及 12 颗密封螺钉等共同参与的全方位密封，可使三轴压力室在 10.0 MPa 围压、瓦斯压力 5 MPa 下保持 24 h 的良好密封效果。

(2) 借助于增设全应力-应变传感器，能够实时监测含瓦斯煤试样在模拟实验过程中的轴向、径向变形规律，研究含瓦斯煤渗透性、变形特性等多种功能，为研究应力场对含瓦斯煤层吸附-解吸影响规律提供依据。

(3) 利用在空化腔内上布设的温度监测孔配合相应的传感器，联合空化腔进出口压力表可实现空化声震促进瓦斯吸附-解吸模拟试验过程中实时、便捷地监测空化腔内温度变化过程。

(4) 将加压活塞杆下端和空化腔支撑轴上端分别设计成环状面孔，实现了“面充气”，而不再是以往的“点充气”，更加逼真地实现了实际煤层瓦斯源的情况。

(5) 实验表明，气—液—固分离器具有体积小、处理能力大和分离效率高的优点，能很好地解决了三相分离及排除问题。

(6) 空化水射流声震效应促进含瓦斯煤层解吸量得到不同程度的提高，解吸时间均有缩短。

(7) 本文利用优化装置进行试验所得的初步结果与前人所做的研究结论基本吻合，进而证明该装置可用于空化水射流声震效用促进含瓦斯煤解吸领域的研究，对煤层瓦斯渗流影响规律有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 肖晓春，潘一山. 考虑滑脱效应的煤层气渗流数学模型及数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(16)：2966-2970.
Xiao Xiaochun，Pan Yishan. Mathematical model and numerical simulation of coal bed methane percolation flow equation considering slippage effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(16)：2966-2970.

[2] Enever J R E，Henning A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir model [A]. Proceedings of the 1997 International Coal Bed Methane Symposium [C]. Tuscaloosa，AL，USA: University of Alabama，1997: 13-22.

[3] Sommerton W J，Soylemezoglu I M，Dudley R C. Effect of stress on permeability of coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts，1975，12(2)：129-145.

[4] Harpalani S，Schraufnagel R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal [J]. Fuel，1991，69(5)：551-556.

[5] Harpalani S，Chen G. Gas slippage and matrix shrinkage effects on coal permeability [A]. Proceedings of the 1993 International Coal Bed Methane Symposium [C]. Tuscaloosa，AL，USA: University of Alabama，1993: 285-294.

[6] Kroossbm，Bergenf，Gensterblumy，et al. High pressure methane and dioxide adsorption on dry and moisture equilibrated Pennsylvanian coals [J]. International Journal of Coal Geology，2002，51: 69-92.

[7] 易　俊，姜永东，鲜学福. 应力场、温度场瓦斯渗流特性实验 [J]. 中国矿业，2007，16(15)：113-116.
Yi Jun，Jiang Yongdong，Xian Xuefu. An experimental research on the characters of methane seepage in stress field and temperature field [J]. China Mining Magazine，2007，16(15)：113-116.

[8] 刘保县，鲜学福，王宏图，等. 交变电场对煤瓦斯渗流特性的影响实验 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版，2000，23(S1)：41-43.
Liu Baoxian，Xian Xuefu，Wang Hongtu，et al. Experimental investigation gas seepage characteristics in coal under alternating electric field [J]. Journal of Chongqing University(Natural Sciences)，2000，23(S1)：41-43.

[9] 葛兆龙，卢义玉，周东平. 空化水射流声震效应促进瓦斯解吸实验的规律及机理研究 [J]. 煤炭学报，2011，36(7)：1150-1155.
Ge Zhaolong，Lu Yiyu，Zhou Dongping. Study on regular and mechanism of coal bed methane desorption experiment under sonic vibrating of cavitations water jets [J]. Journal of China Coal Society，2011，36(7)：1150-1155.

[10] 李晓红，冯明涛，周东平. 空化水射流声震效应强化煤层瓦斯解吸渗流的实验 [J]. 重庆大学学报(自然科学版)，2011，34(4)：1-5.
Li Xiaohong，Feng Mingtao，Zhou Dongping. Experimental analysis of coal bed methane desorption and seepage under sonic vibrating of cavitation water jet [J]. Journal of Chongqing University(Natural Sciences)，2011，34(4)：1-5.

[11] 何学球，张　力. 外加电磁场对瓦斯吸附解吸的影响规律及作用机理的研究 [J]. 煤炭学报，2000，25(6)：614-618.
He Xueqiu，Zhang Li，Study on influence and mechanism of gas adsorption and desorption in electromagnetic fields exerted [J]. Journal of China Coal Society，2000，25(6)：614-618.

[12] 艾鲁尼 A T. 煤矿瓦斯动力现象的预测和预防 [M]. 北京: 煤炭工业出版社，1992: 62-69.
Айруни Арсен Тигранович. Prediction and prevention of dynamic phenomenon of gas in coal mine [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House，1992: 62-69.

[13] 杜云贵. 地球物理场中煤层瓦斯吸附、渗流特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学，1993.
Du Yungui. A research on gas adsorbing and infiltrating characters of coal bed in the earthy physical field [D]. Chongqing: Chongqing University，1993.

[14] 易　俊. 声震法提高煤层气抽采率的机理及技术原理研究 [D]. 重庆: 重庆大学，2007.
Yi Jun. Research on mechanism and technological principle of enhancing coal bed gas extraction rate by ultrasonic vibrating [D]. Chongqing: Chongqing University，2007.

[15] 隆清明，赵旭生，孙东玲，等. 吸附作用对煤的渗透率影响规律试验研究 [J]. 煤炭学报，2008，33(9)：1030-1034.
Long Qingming，Zhao Xusheng，Sun Dongling，et al. Experimental study of coal permeability by adsorption [J]. Journal of China Coal

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

Society,2008,33(9):1030-1034.

[16] 彭永伟,齐庆新,邓志刚,等. 考虑尺度效应的煤样渗透率对围压敏感性试验研究[J]. 煤炭学报,2008,33(5):509-513.
Peng Yongwei,Qi Qingxin,Deng Zhigang,et al. Experimental research on sensibility of permeability of coal samples under confining pressure status based on scale effect[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(5):509-513.

[17] 周东平. 空化水射流声震效应促进煤层瓦斯解吸渗流机理研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
Zhou Dongping. Study on mechanism of coal bed methane desorption and seepage under sonic vibrating of cavitations water jets[D]. Chongqing:Chongqing University,2010.

[18] 尹光志,王登科,张东明,等. 两种含瓦斯煤样变形特性与抗压强度的试验分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):410-417.
Yin Guangzhi,Wang Dengke,Zhang Dongming,et al. Test analysis of deformation characteristics and compressive strengths of two types of coal specimens containing gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):410-417.

欢迎订阅 2014 年《煤炭学报》杂志

《煤炭学报》是由中国煤炭学会主办、面向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护、煤炭经济研究等方面的科研成果和学术论文。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被 Ei、IEA Coal Abstract CD-Room、中国科学引文数据库、PЖ、科学技术文摘速报、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获由中华人民共和国新闻出版总署颁发的“首届国家期刊奖”。2001 年入选“中国期刊方阵”,并被评为“双奖期刊”。2008 年获“中国精品科技期刊”称号。2009 年获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。2004,2007,2010,2011,2012,2013 年 6 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。2006 年至 2013 年获中国科协精品科技期刊工程项目资助。

《煤炭学报》受到广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位,很多单位都将在《煤炭学报》发表的文章作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,176 页,每册订价 58 元,全年总订价 696 元。欲订阅者可直接向本编辑部索取订单,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址: 北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 **邮政编码:** 100013

联系电话: (010) 84262930-808 **联系人:** 郑红瑞

E-mail: zhenghongrui@chinacs.org.cn,mtxb@vip.163.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net