安全技术及工程

我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向

袁 亮[1,2],林柏泉[2],杨 威[2]
(1.煤矿瓦斯治理国家工程研究中心,安徽 淮南 232038;2.中国矿业大学,江苏 徐州 221116)

摘 要: 针对我国深部高瓦斯煤炭开采所面临的关键难题,总结分析了目前我国煤矿水力化技术治理瓦斯的研究现状,并指出水力化技术是深部高瓦斯突出煤层卸压增透及区域瓦斯治理的关键技术。通过分析水力压裂、水力割缝、水力冲孔等水力化技术的卸压增透及消除瓦斯突出危险性的机理、技术工艺和工程实践等方面的主要进展,发现了目前水力化技术尚未解决的关键技术问题,并且提出了需待研究的主要内容,为水力化技术的发展指明了方向。

关键词: 煤与瓦斯突出; 水力压裂; 水力割缝; 水力冲孔; 煤层注水
中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)01-0045-05

Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine

YUAN Liang[1,2], LIN Bai-quan[2], YANG Wei[2]
(1. *National Engineering and Research Center of Mine Gas Control, Huainan* 232038, *China*;
2. *China University of Mining and Technology, Xuzhu* 221116, *China*)

Abstract: According to the key difficulties faced to the coal mining in deep gassy seam in China, the paper summarized and analyzed research status of the gas control with mine hydraulic technology in China coal mine and pointed out that the hydraulic technology would be the key technology to the pressure releasing of deep high gassy outburst seam and the regional gas control. With an analysis on the hydraulic fracturing, hydraulic slotting, hydraulic punching and other hydraulic technologies of the pressure releasing and permeability improvement and the mechanism, technical technique, engineering practices to eliminate the gas outburst danger and other main progresses, the paper found that the key scientific unsolved problems in present hydraulic technology and provided the main contents to be studied to provide an orientation for the development of hydraulic technology.

Key words: coal and gas outburst; hydraulic fracturing; hydraulic slotting; hydraulic punching; seam water injection

0 引 言

煤炭在我国能源消费构成中长期约占70%,2013年的总产量达36.8亿t,约占世界煤炭开采总量的50%,国家《能源中长期发展规划纲要(2004~2020年)》中确定“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略”;中国工程院《国家能源发展战略2030~2050》报告提出2050年煤炭年产量控制在30亿t,煤炭将长期作为我国主导能源。我国一半以上的煤炭开采受到瓦斯灾害的困扰,瓦斯已经成为我国煤炭安全开采的重大隐患,随着采深每年以20 m左右的速度持续增加,以煤与瓦斯突出为代表的煤炭开采灾害防治难度逐渐增大,如果不提前采取对策,将会对我国煤炭开采乃至能源安全构成严重挑战。我国煤矿瓦斯地质构造复杂,煤层具有微

收稿日期:2014-09-22;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2015.01.011
基金项目:国家重大科研仪器研制资助项目(51427804);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB201205);国家自然科学基金资助项目(51404261,51474211)
作者简介:袁 亮(1960—),男,安徽六安人,中国工程院院士。
引用格式:袁 亮,林柏泉,杨 威.我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J].煤炭科学技术,2015,43(1):45-49.
YUAN Liang, LIN Bai-quan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1):45-49.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

观孔隙发育、高吸附性的特征，煤层的渗透率比美国平均低约 3 个数量级，致使煤层瓦斯含量高，原始煤层瓦斯抽采难度大，煤层卸压抽采和煤储层裂隙改造是我国煤矿瓦斯抽采必须考虑的问题。保护层开采技术已经被广泛证明是煤层群条件下最有效的瓦斯治理技术[1-3]，但是随着采深的增加，首采层的瓦斯突出危险性也逐渐增大，此外我国还存在大量无保护层可采的单一突出煤层，这类煤层的瓦斯高效抽采是当前和今后面临的最主要问题，而包括水力压裂、水力割缝、水力冲孔等在内的高瓦斯煤层水力化技术逐渐成为了煤储层改造，强化瓦斯抽采的最主要的技术方法。

1　水力化技术瓦斯治理的理论基础

随着我国煤矿瓦斯动力灾害严重程度的日益增加，水力化瓦斯灾害治理技术逐渐成为研究热点，受到国内多个研究单位重视，开展了广泛的研究工作，如图 1 所示，特别是 2008 年以来，相关的期刊论文和学位论文数量迅速增加。同时，水力化技术在提高煤层透气性方面的基础研究也得到了国家自然科学基金委员会、科技部等单位的大力主持，先后开展了高压水射流作用下煤岩体的破断理论、高压水射流割缝提高煤层透气性的原理，水力割缝中裂隙的发展演化规律，裂隙的形态和初步描述方法，水力压裂形成裂隙演化特征等方面的研究工作，并建立了有关理论模型，对裂隙扩展特征进行了有益的探讨。

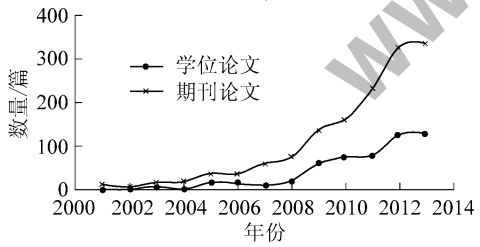


图 1　水力化技术瓦斯治理的相关论文统计

1) 从力学角度研究了水力化措施防治突出危险性的机理。瓦斯抽采钻孔形成之后，在钻孔周围由近及远依次形成卸压区、应力集中区和原岩应力区。应力集中区内的煤体被压紧，裂隙被进一步闭合，同时应力梯度导致的煤体流变可能会导致钻孔坍塌，致使远处瓦斯难以流入钻孔。由于我国高瓦斯突出煤层普遍煤质松软、透气性低，瓦斯抽采衰减速度快，需要采取附加技术措施，以改变突出煤层瓦斯区域预抽浓度低、流量小的现状。水力化技术作为增透措施，一般有 2 种方式来促进瓦斯抽采。一是向钻孔内注入高压水压裂钻孔，在钻孔周围形成若干宏观裂隙和分支裂隙，为瓦斯的解吸流动提供通道，提高钻孔的抽采范围; 另一种是通过高压水射流割缝或冲孔等方式将煤层内部分煤体破碎并经钻孔排出煤层，扩大钻孔的出煤量，使钻孔周围的煤体蠕变运移，降低煤体的地应力，促进煤层内裂隙通道的扩展、连通，提升煤层的渗透性，促进瓦斯解吸流动，提高钻孔瓦斯抽采效果。

2) 从水煤作用机制方面研究了水力化措施防治突出危险性的机理。目前普遍认为，水分对含瓦斯煤体的影响主要表现在 2 个方面。首先，煤层含水率的增加能降低煤的弹性模量和抗压强度，特别是硬煤分层的强度，导致整个煤层软化，显著提升煤样的塑性，有利于将应力集中峰值推向工作面前方更远处，扩大采掘工作面前方形成的塑性卸压区，使得具有突出危险的软分层内瓦斯能够在暴露前提前释放，当卸压区长度大于 5 m 时将能消除瓦斯突出危险性[4]。其次，煤层注水过程中可以驱替其中的瓦斯，煤层含水率的增大可以显著降低煤的瓦斯解吸速度、解吸量，降低煤层瓦斯供给能力，消除煤层突出危险性。煤的变质程度越高，水分对其影响越大，当含水率在 2% ~7% 时，水分对瓦斯放散初始速度影响最大，含水率大于 10% 时，影响逐渐降低。一般认为当煤层内含水率超过 4% 时，突出危险性即被消除[5-7]。

经过前期多单位的研究，目前形成的主要水力化技术包括水力压裂、水力割缝、水力冲孔、煤层注水等，其中水力压裂、水力割缝、水力冲孔等措施在实施过程中都不同程度上有煤层注水的作用。这些技术不但在理论上取得了不同程度的突破，也都在工程实践上取得了初步成功。

2　水力化关键技术进展

2.1　水力压裂技术

水力压裂是通过钻孔在煤层内注入高压水，当水压达到煤层的起裂压力时，钻孔周围将产生裂隙并延伸，裂隙一般沿着煤岩层理和垂直于最小主应力方向延伸。该技术最先在天然气和石油工业发展起来，用来增加油气井的生产能力。1947 年美国堪萨斯州气田井成功的进行了水力压裂试验，从此以后拉开了水力压裂技术研究的序幕。随着煤层气资源开采的逐渐深入和瓦斯灾害严重程度愈发严重，

水力压裂技术逐步被引入到煤炭系统。

目前水力压裂主要有地面压裂和井下压裂 2 种: 地面水力压裂影响范围大,其装备和技术工艺目前已经逐步趋于成熟; 煤矿井下压裂灵活性强,但是受到井下作业空间的限制,地面压裂装备的尺寸大,很难满足井下压裂的需求。中国矿业大学、重庆煤科院、河南煤层气公司、安徽理工大学、河南理工大学等单位和各矿业公司都相继展开了水力压裂理论和工程实践研究,并且创造性地实现了地面压裂和井下压裂相结合,在部分矿区实现了瓦斯的高效抽采[8-9]。

针对我国突出煤层普遍松软、渗透性低的特征,相关单位初步研发了符合地面和井下压裂要求的压裂装备,能实时控制装备参数[10]。为了提高水力压裂效果,在压裂液中添加表面活性剂,一方面能降低煤体对瓦斯的吸附能力,另一方面通过选择性溶解煤中矿物质,提高煤体裂隙通道和渗透率。为了形成均匀的裂隙网络,先后提出了通过射孔、预置裂缝、导向孔等方式来控制裂缝的扩展方向,避免局部压裂过度而引起压裂效果不佳的难题[11-13]。

煤矿井下操作空间受到限制,对水力压裂装备小型化提出了新的要求。为了进一步降低水力压裂系统压力、减小压裂装备尺寸,同时防止压裂后裂隙重新闭合,又提出了煤层脉动水力压裂技术,并进行了不同压力、频率条件下脉动水力压裂试验,分析了脉动水作用下煤体的疲劳损伤破坏特点及高压脉动水楔致裂机理[9,14]。研究结果表明: 煤体原生裂隙在强烈的脉动水压力作用下,会在缝隙末端产生交变应力,使煤体裂隙孔隙产生“压缩—膨胀—压缩”的反复作用,煤体将产生疲劳损伤破坏,煤体内部裂隙弱面扩展、延伸,形成相互交织的贯通裂隙网络。工业性试验结果表明,脉动水力压裂比普通水力压裂卸压装备尺寸、所需的起裂压力更小,增透效果更加明显。

水力压裂技术在平煤、永煤、晋煤等多个煤业公司取得了初步成效,工业性试验表明水力压裂后中平能化十矿 24110 工作面煤层渗透率提高了 800 倍,单孔瓦斯抽采量提高了 120 倍; 鹤壁六矿 2115 运输巷掘进期间水力压裂后突出危险性效检指标超标率显著下降,瓦斯体积分数普遍降到临界值 0.8% 以下,大幅降低了突出危险性。

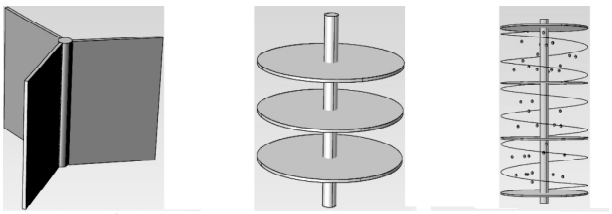
2.2　水力割缝技术

水力割缝技术通过在钻孔内运用高压射流对钻孔周围的煤体进行切割并沿钻孔排出,在钻孔周围形成缝槽,提高出煤量,提供煤体变形空间,增大单孔影响范围,改善了瓦斯流动条件。中国矿业大学、重庆大学、太原理工大学等单位都取得了初步试验成功和现场工程应用。

理论和试验等多方面验证了水射流割缝在煤层卸压增透、强化瓦斯抽采中的效果。大试件试验研究表明: 割缝后瓦斯排放符合艾黎经验公式,可以使用该公式对煤层中的瓦斯排放效果进行预测[15-16]。与普通钻孔排放相比,水力割缝排放瓦斯,会随埋深不同而发生不同程度的孔内瓦斯突出,从而提高瓦斯的排放速度和排放量,缩短排放时间。相同埋深的煤层,割缝后瓦斯初期排放速度急增,为普通钻孔的 2.0 ~ 2.5 倍; 随着煤层埋藏深度的增加,水力割缝对提高煤层的渗透性作用越明显。通过割缝方式释放煤层内的部分有效体积应力,使部分煤层在割缝后发生垮落,应力场重新分布。煤层内的裂缝和裂隙的数量、长度和张开度得到增加,增大了煤层内裂缝、裂隙和孔隙的连通面积,从而增大了低渗透煤层的渗透性。运用岩石破裂分析软件模拟分析了射流割缝后煤层内瓦斯流动规律,验证了割缝卸压增透是促进煤层内瓦斯流动的有效方式[17-20]。同时采用 FLAC^{3D} 和 ANSYS 软件研究了不同割缝方式下缝槽周围应力场、位移场的分布和演化规律,研究表明随着钻孔当量直径的增大,卸压范围迅速增大,但是卸压范围并不随当量直径呈线性增加; 基于研究结果,提出了最优出煤量概念。

针对煤矿井下的特殊条件,分别研发出了适用于煤矿井下割缝作业的装备,并逐步完善操作工艺。目前根据装备的割缝工艺主要可以分为 2 种“钻-割”分离作业和“钻-割”一体作业。“钻-割”分离作业是指打钻结束之后用专用射流割缝设备实现射流割缝,其优点是设备简单、对高压密封技术要求低,但是其操作工序复杂,浪费时间; “钻-割”一体作业是指在打钻过程中或退钻过程中完成孔内水射流割缝作业,其优点是割缝工序简单、节约时间,但是对设备的密封性能、设备设计等提出了严格要求。如中国矿业大学研发了自动补偿密封技术,成功破解了井下射流割缝装备动高压密封难题,可以实现系统压力 30 MPa 稳定割缝,将钻进技术与割缝技术进行有机结合,克服传统割缝技术措施工艺复杂等缺点,并提出了多种射流割缝操作工艺,如图 2 所示,实现了对煤体安全高效卸压增透,提高本煤层瓦

斯抽采率。



(a)轴向贯穿式割缝　(b)圆盘式割缝　(c)螺旋式切割

图 2　水力割缝方式

为了进一步提高射流切割能力，促进瓦斯解吸，自激振荡、脉动、磨料等多种射流形式被相继提出[21-24]。研究表明自激振荡射流声震效应可以促进煤层瓦斯解吸渗流，而脉动、磨料射流可以有效提升射流的切割能力。并且通过调质多相振荡射流的振荡特性、空泡溃灭特性及固体磨料在多相振荡流中的动态特征，揭示了多相振荡射流的破煤岩性能及动力特征；理论分析和数值模拟了多相振荡射流作用下煤体中的气固液耦合特性及应力场和裂隙场的变化规律，明确了多相振荡射流的动力效应与煤层瓦斯运移规律及透气性之间的关系；研发出集钻孔、固孔、切槽、冲屑、水动力致裂于一体的低透气性煤层瓦斯抽采技术与系统集成，并在松软煤层、硬煤层等典型高瓦斯低透气性矿井进行了成功应用。

煤矿井下水射流割缝技术已经在平煤、淮北、义煤等多个集团公司取得初步效益。水射流割缝技术可以有效控制射流切割速度，实现煤孔段的均匀切割，避免局部区域出煤过度或局部区域出煤不足而导致局部卸压不充分的缺点。平煤八矿底板穿层水力割缝实践表明：水射流割缝可以在 1 ~ 2 h 内实现 3 ~ 4 m 煤孔的均匀切割，并可以在每米煤孔内切割出 1 t 左右的煤炭，为煤体蠕变卸压提供了充分空间，在钻孔周围形成瓦斯高效流通的裂隙网，显著提高瓦斯抽采效果。

2.3　水力冲孔技术

水力冲孔是以保护岩柱或煤柱作为安全屏障，向有自喷能力的突出煤层施工钻孔，并在孔内利用高压水冲击、破坏钻孔周围煤体，诱导和控制喷孔，形成空洞，煤体在应力重新分布过程中运移并产生裂隙，有利于瓦斯卸压开采，达到防治突出的目的。水力冲孔技术通过如下作用消除煤层的突出危险性[25]：冲出大量煤体，形成空洞，周围煤体发生径向位移，改变钻孔周围应力场，达到局部卸压作用；冲出大量瓦斯，降低煤层瓦斯压力及含量，同时因钻孔周围煤体卸压可增加煤层透气性，提出瓦斯抽采效果，有效降低煤层瓦斯压力及含量；钻孔周围煤体湿润，降低煤体弹性，增加煤体塑性，增大工作面超前卸压带长度，进而降低煤层突出潜能。

该技术在两淮矿区、西南地区得到了较好的应用，其中针对嘉禾县罗卜安煤矿、淮南矿区谢桥、潘三等矿开展的水力冲孔消突试验表明[26-27]，水力冲孔在松软低透突出煤层区域抽采消突措施中应用效果显著，单孔冲出煤体 7 t，抽采钻孔等效孔径提高 13.38 倍，冲出瓦斯 558.3 m^3，钻孔抽采半径提高 2 ~ 3 倍，瓦斯抽采体积分数提高了 50% 左右，流量增加 3 倍左右，有效降低了煤层突出潜能。

3　存在的主要问题及发展方向

国内多家研究机构对水力化技术的研究促进了该类技术的迅速发展，并在部分煤矿取得了初步效果，但是面对深部煤层瓦斯动力灾害的复杂性、特殊性和突变性，目前水力化技术仍然没有形成成熟的体系，技术协同性不够，尚存在多方面的问题，难以适应开采条件的复杂变化，需要深入探讨以下内容：水力化措施对不同强度煤岩体的致裂机理；受水力化措施作用，深部煤体内部的裂隙生成与扩展规律，含瓦斯煤体在水力化措施影响下的瓦斯解吸规律；气固液多相耦合作用下瓦斯的富集和运移规律；水力化措施关键施工参数与煤层物理力学特征的耦合规律等。

1) 水力化措施消突机理认识不深入。目前，水力措施有增压措施、卸压措施，不同措施执行过程中和执行之后煤层内部的应力状态、裂隙的动态演化，以及瓦斯解吸附和运移规律还没有准确的研究数据，无法深入研究水力化措施的消突机理。

2) 不同水力化技术的适用条件不清楚。水力化技术整体还处在探索阶段，工程实践有成功的案例，也有失败的教训，水力化技术适用条件无法定量，不同水力化技术适用的边界条件目前还未研究清楚，致使水力化技术的工程应用存在盲目性，没有形成完善的规范体系。

3) 水力化措施的效果考察缺乏方法。需要针对不同水力化技术卸压增透及消突机理、应用工艺，逐步建立起煤层增透效果考察、评价技术指标体系，为水力化技术效果判定并促进水力化技术实施工艺的改进提供保障。

水力化技术的发展需要结合我国深部高瓦斯

突出矿井的开采特征,即: 针对我国深部矿井煤炭开采的高应力、高瓦斯、强吸附性、低渗透特征,开展水力化瓦斯防治协同关键技术研究,系统开展高压水射流钻孔内动力学特性及破煤岩机理研究,揭示水力化技术煤体应力场-裂隙场-瓦斯场耦合的时空演化规律及分布规律,建立深部水力化技术措施条件下瓦斯富集和导向流动的形成机制,探索水力破裂煤岩体浸入水对瓦斯解吸动力学特性影响规律,研究水力破裂煤岩体裂隙的空间扩展特征、裂隙扩展控制机理,研发具有系统化、安全化、便捷化和智能化特点的水力化技术装备,形成深部水力化瓦斯防治技术关键工艺参数及效果评价方法,力图在高压水力化协同技术、设备、工艺等关键技术领域实现重大突破和应用,形成我国科学性、有效性、针对性的深部矿井瓦斯灾害水力化防治理论体系和技术方法,使深部矿井瓦斯灾害得到有效控制。

4　结　　论

1) 深部矿井高瓦斯突出煤层的瓦斯防治是整个矿井安全高效生产的关键,水力化技术措施的迅速发展将成为深部高瓦斯煤层瓦斯治理的关键技术。

2) 国内多家单位参与水力化技术研究和装备开发,在理论、工艺、工程实践等方面有显著进展,开发出了包括水力压裂、水力割缝、水力冲孔、煤层注水等具有代表性的技术和装备,在部分矿区取得了初步成功。

3) 水力化技术在高瓦斯煤层卸压增透及消除突出危险性理论、适用条件和效果考察等方面仍存在关键科学问题尚未解决,使得不同技术的工程实践效果存在巨大差异。

4) 进一步深入研究水力化技术卸压增透及消突机理,完善不同水力化技术及装备的适用条件,形成标准体系,提升水力化技术实施的成功率是水力化技术发展的关键。

参考文献:

[1] 袁　亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(7):1370-1379.

[2] 袁　亮. 留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术[J]. 煤炭学报,2008,33(8):898-902.

[3] 袁　亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报,2009,34(1):1-8.

[4] 蒋承林. 煤层注水的防突机理分析[J]. 湘潭工学院学报,1999,14(3):3-6.

[5] 陈向军,程远平,王　林. 外加水分对煤中瓦斯解吸抑制作用试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(2):296-301.

[6] 陈向军,程远平,何　涛,等. 注水对煤的瓦斯扩散特性影响[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(3):443-448.

[7] 牟俊惠,程远平,刘辉辉. 注水煤瓦斯放散特性的研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(5):746-749.

[8] 吕有厂. 水力压裂技术在高瓦斯低透气性矿井中的应用[J]. 重庆大学学报,2010,33(7):102-107.

[9] 林柏泉,孟　杰,宁　俊,等. 含瓦斯煤体水力压裂动态变化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(1):106-110.

[10] 郭启文,韩　炜,张文勇,等. 煤矿井下水力压裂增透抽采机理及应用研究[J]. 煤炭科学技术,2011,39(12):60-64.

[11] 李全贵,翟　成,林柏泉,等. 定向水力压裂技术研究与应用[J]. 西安科技大学学报,2011,31(6):735-739.

[12] 徐幼平,林柏泉,翟　成,等. 定向水力压裂裂隙扩展动态特征分析及其应用[J]. 中国安全科学学报,2011,21(7):104-110.

[13] 王耀锋,李艳增. 预置导向槽定向水力压穿增透技术及应用[J]. 煤炭学报,2012,37(8):1326-1331.

[14] 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[J]. 煤炭学报,2011,36(12):1996-2001.

[15] 段康廉,冯增朝,赵阳升,等. 低渗透煤层钻孔与水力割缝瓦斯排放的实验研究[J]. 煤炭学报,2002,37(1):50-53.

[16] 赵　岚,冯增朝,杨　栋,等. 水力割缝提高低渗透煤层渗透性实验研究[J]. 太原理工大学学报,2001,32(2):109-111.

[17] 王　婕,林柏泉,茹阿鹏. 割缝排放低透气性煤层瓦斯过程的数值试验[J]. 煤矿安全,2005,36(8):4-7.

[18] 林柏泉,孟凡伟,张海宾. 基于区域瓦斯治理的钻割抽一体化技术及应用[J]. 煤炭学报,2011,36(1):75-79.

[19] 林柏泉,杨　威,吴海进,等. 影响割缝钻孔卸压效果因素的数值分析[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(2):153-157.

[20] 林柏泉,张其智,沈春明,等. 钻孔割缝网络化增透机制及其在底板穿层钻孔瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭学报,2012,37(9):1425-1430.

[21] 李晓红,卢义玉,赵　瑜,等. 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J]. 煤炭学报,2008,33(12):1386-1390.

[22] 卢义玉,葛兆龙,李晓红,等. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(1):55-58.

[23] 李晓红,赵　瑜,卢义玉,等. 自激振荡射流改善松软煤层渗透率的机理[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版,2009,28(S1):202-205.

[24] 林柏泉,吕有厂,李宝玉,等. 高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用[J]. 煤炭学报,2007,32(9):959-963.

[25] 刘　震,李增华,杨永良,等. 缓斜特厚煤层石门揭煤区域综合防突技术[J]. 煤矿安全,2010,41(8):23-26.

[26] 刘明举,赵文武,刘彦伟,等. 水力冲孔快速消突技术的研究与应用[J]. 煤炭科学技术,2010,38(3):58-61.

[27] 王兆丰,范迎春,李世生. 水力冲孔技术在松软低透突出煤层中的应用[J]. 煤炭科学技术,2012,40(2):52-55.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net