第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0139-10

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:徐树媛, 张永波, 时　红, 等. 采动覆岩导水裂隙带发育高度研究进展[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 139—148
Xu Shuyuan, Zhang Yongbo, Shi Hong, et al. Advances in the height of fractured water-conducting zone of mining overburden[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 139—148

天文学、地球科学

采动覆岩导水裂隙带发育高度研究进展

徐树媛[1]　张永波[1*]　时　红[2]　陈军锋[1]
(太原理工大学水利科学与工程学院[1],环境科学与工程学院[2],太原 030024)

摘　要　导水裂隙带发育高度的确定在矿井防治水工作、矿井优化设计、解放水体下资源、采空区瓦斯抽放、煤层气资源开发利用、建筑地基稳定性评价以及水资源破坏评价与保护研究等方面具有重要的研究意义。对近年来导水裂隙带高度范围、各影响因素及其主要预测方法的研究成果进行了总结。对比分析了计算法、模拟法与实际探测法的特点,力图较为全面地认识当前导水裂隙带高度的研究进展;并提出导水裂隙带发育高度研究的发展趋势。

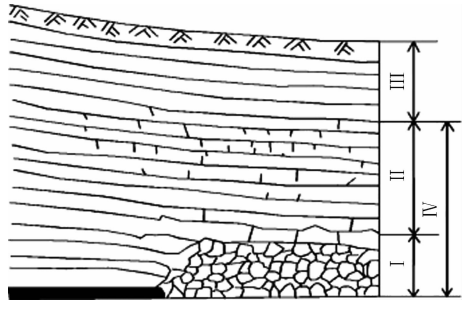
关键词　导水裂隙带　影响因素　研究方法　发展趋势
中图法分类号　P641.4⁺3;　　**文献标志码**　A

地下开采活动引起覆岩破坏与变形移动,并在岩层中形成采动裂隙;这些裂隙相互沟通后可成为地下流体的运移通道。因此,矿体(煤炭、金属矿石等)开采后顶板具有导水性的采动覆岩范围被称为导水裂隙带,其高度是矿井顶板防治水工作中的重要参数。20 世纪 60 年代开始,中国根据自身开采背景进行理论研究与技术开发,在复杂的水文地质条件下采出了大量煤炭,取得了不少水体下采煤的经验,使得我国的防治水开采技术处于世界领先水平[1]。但是随着中国对矿产资源开发强度的不断增大,以及资源可持续开发利用的提出,导水裂隙带发育高度的研究在矿井安全开采与优化设计[2]、提高资源回收率[3]、采空区瓦斯抽放[4]、煤层气资源开发利用[5]、建筑地基稳定性评价、矿井开采对水资源的影响破坏程度[6]评价,以及水资源与生态环境的保护研究[7]等方面具有新的研究意义。为此,众多学者长期致力于采动覆岩变形破坏特征及导水裂隙带发育高度的专题研究。在充分总结前人工作的基础上,对导水裂隙带范围、影响因素的研究成果进行总结;并分析了不同预测方法的特点,提出发展趋势,从而为资源的可持续开发与综合利用提供参考。

1　导水裂隙带高度范围

Singh 和 Kendorski 与中国的刘天泉院士根据长臂开采后采空区覆岩的破坏特征,提出了采动覆岩自下而上存在垮落带、裂隙带与连续弯沉带,即“上三带”理论[8,9]。钱鸣高院士等建立了采场裂隙岩体的“砌体梁”结构[10],将采动覆岩划分为“横三区竖三带”;中国确定导水裂隙带高度范围的观点主要是基于三带理论,该理论中将垮落带与裂隙带合称为导水裂隙带(图 1)。

近年来,有学者突破传统“三带”概念,提出采动覆岩的“四带”、“五带”概念模型,Peng、高延法、张五兵在“三带”理论基础上将弯沉带进行细致划分[11—13]。但 Palchik 将裂隙带自下而上细分为岩块



Ⅰ为冒落带;Ⅱ为裂隙带;Ⅲ为弯曲带;Ⅳ为导水裂隙带
图 1　覆岩破坏及导水裂隙带范围示意图
Fig. 1　Diagram of the overburden failure and fractured water-conducting zone

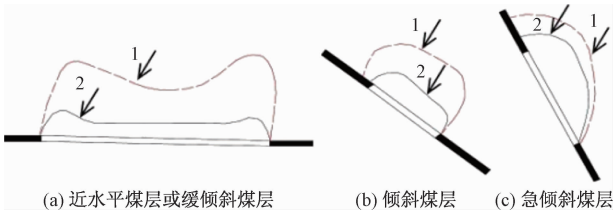
2018 年 7 月 31 日收到　　国家自然科学基金(41572221)和山西省基础研究项目(2014012002)资助
第一作者简介:徐树媛(1981—),女,汉族,安徽六安人,博士研究生,高级工程师。E-mail:xsyuan1981@126.com。
*通信作者简介:张永波(1962—),男,汉族,山西晋城人,博士,教授,博士研究生导师。E-mail: zfstzhang@sina.com。

段、贯通垂直裂隙段与离层水平裂隙段三部分,并认为冒落带与裂隙带的岩块段、贯通垂直裂隙段为裂隙贯通带[14];施龙青等则认为在大采深大跨度开采条件下,裂隙带与弯沉带之间存在不容忽视的离层带,导水裂隙带高度为冒落带、裂隙带和离层带之和[15]。因此,复杂的地质开采条件以及岩层破坏特征的不同研究角度,使得覆岩破坏的分带情况有所不同,导水裂隙带的范围也随之变化。

为了更为直接、合理地判定导水裂隙带高度,张建民等从系统论角度出发,将导水裂隙带的形成描述为采动系统中的"采动-爆裂"效应,并将其上界确定为岩体破碎形成的裂隙边界[16]。基于裂隙的贯通度与导水性是导水裂隙带最主要的特点,近年来有学者从破坏岩层的裂隙沟通程度、导水性能以及裂隙带内的水文地质特征角度判断导水裂隙带范围。黄炳香等提出以破断裂隙贯通度来描述裂隙带导水能力的强弱[17];Tammetta 利用钻孔多点位移计与时域反射器,获得世界范围内 21 个煤矿的覆岩变形测量数据与 110 个测点的水头测量数据,并从地下水文地质特征的角度建立了采动覆岩破坏的概念模型[18];王伟等通过建立采空区三维非均质渗透率模型对流态瓦斯流场进行了研究[4]。

2 导水裂隙带发育高度的影响因素

目前,导水裂隙带的范围与发育形态虽然没有统一的认识,但大多数研究表明其发育形态主要为马鞍形、拱形(裂隙拱)及圆顶形。根据大量煤矿井实测高度数据,覆岩的破坏特征与空间形态主要取决于煤层倾角(图 2)。



1 为导水裂隙带;2 为冒落带

图 2 导水裂隙带空间形态示意图

Fig. 2 The profile of the fractured water-conducting zone

矿体回采后,上覆岩层受到扰动,原岩裂隙与新生裂隙均经历了演化发展[19]。采动覆岩裂隙发育的影响因素众多,主要受矿体赋存条件、覆岩力学特征及地层结构等地质因素,以及开采方式、工作面几何参数等开采工艺的影响。此外,有研究成果表明,时间因素、一次采厚[20]、重复采动[21]、开采顺序[22]、含水层水压[1]、岩层层向拉伸变形[23,24]、裂缝带广义损伤因子[24,25]等因素也会对裂隙发育造成影响。

诸多因素的影响使得裂隙分布十分复杂,目前尚无准确计算导水裂隙带高度的模型方法。因此,导水裂隙带发育高度的影响因素综合研究是近年学者研究的方向。马志伟等通过离散元数值模拟法,针对含钒页岩矿床的开采条件,分析了影响导水裂隙带发育的采深、采厚、矿体倾角、分段高度等各因素的影响程度[26];谢晓锋等选取采深、煤层硬度、岩层结构与顶板岩石单轴抗压强度等 8 个影响因素,建立了基于 PCA-BP 神经网络的导水裂隙带高度预测模型[27];王志强等基于多影响因素分析,提出一次开采厚度、开采范围、覆岩残余碎胀系数与关键层力学特征等影响下的"三带"划分方法[28]。

3 导水裂隙带高度主要研究方法

地质因素及开采参数的影响使得导水裂隙带的分布十分复杂,目前尚无准确计算导水裂隙带高度的统一模型方法。20 世纪 50 年代至今,国内外学者从裂隙带分布特征与影响因素入手,对其发育高度进行了大量的研究,从最初的定性描述分析与单一方法初步预测,发展到如今利用理论分析、数值模拟、机器学习方法以及各种先进的勘测手段等更为客观、可靠的方法定量化裂隙带高度(表 1),并将各种方法相互结合,相互验证,取长补短,探索了覆岩破坏规律,使得导水裂隙带研究成果更加合理,实用性不断增强。

3.1 计算法

3.1.1 理论计算方法

地下开采引起上覆岩层移动变形,其本质是覆岩受到张拉破坏或受压屈服,因此采用岩体应力分析方法、构建覆岩结构力学模型是预计导水裂隙带的高度和形态是一种重要途径。许家林等提出岩层移动与控制的关键层理论,并根据覆岩关键层运动对覆岩破坏与裂隙场分布规律的影响,提出了预计导水裂隙带高度的新方法[29,30]。王志强等、梁运培等、张宏伟等基于力学理论分析法和关键层理论,综合分析了综放开采覆岩破坏发育情况[28,31,32];张通等基于普氏理论与应力壳特征,建立了特定地质条件下的覆岩裂隙带空间几何模型[33];高延法等、黄万朋等认为导水裂隙带的形成是以岩组为单位发育的,并建立了导水裂缝与层间拉伸变形量的关系[23,34]。采动覆岩新理论的不断改进促进了导水裂隙带理论计算法的发展。王连国等基于不同岩性岩体的破坏特征,采用应变强度与应力强度分别作为软、硬岩层是否破断导水的指标,建立了导水裂隙带高度的理论计算力学模型[35];张建民等根据"系统论"理论,将煤炭开采视为采矿系统,从能量守恒

表 1　导水裂隙带高度研究方法

Table 1　Research mothods of the height of fractured water-conducting zone

计算方法		基本原理	特点	适用条件
计算法	理论计算方法	构建力学模型	计算便捷,理想化	地质条件简单的矿区
	统计分析方法	基于实测资料,利用统计学方法得出关系式	区域性限制大,推广性差	实测数据较多;可应用于影响因素相似的矿区
	机器学习方法	根据影响因素与权重分析,构建分析模型	简单易用,成本低,反映多重多方面因素	实测数据较多;影响因素较为明确
	类比法	先类比相邻矿井的覆岩岩性、结构与采煤方法,后根据裂采比推算预测	先类比,后推算	矿体的地质背景开采方式相似
模拟法	物理相似模拟	按照相似原理进行的岩体物理力学模拟	揭示物理本质,试验效果清楚、直观	
	数值模拟	计算机进行数值计算,并显示图像	高效,便捷,可视化	
实际探测	钻孔冲洗液消耗量	导水裂隙带内渗透性能明显增大	反映实际导水情况,成果可靠,实施成本高	原岩裂隙不发育的地区;开采深度较小的矿区
	井下仰孔注水测漏法	导水裂隙带内渗透性能明显增大	工程量相对小,精度高,投资小,易于调整,可靠性高	大采深条件下,地表无条件布置钻孔
	电法探测	覆岩变形破坏与电阻率变化的响应特征	成本低,效率高,可操作性强,但易受地形与周边电磁干扰	浅部煤层开采
	层析成像	利用弹性波或电磁波的透射原理	一次性全孔探测	不受岩层破坏情况限制
	钻孔声速法	声波传播速度在岩体采动前后的变化	可单独使用	可适用于原岩裂隙发育的覆岩
	钻孔电视观测	利用电视技术将井下全景图像传送到地面监视器上	直观有效的显示岩体裂隙发育	清水孔、无水孔或没有套管的钻孔
	超声成像	裂隙吸收声阻抗后反射信号减弱	直观,进一步认识采动裂隙的发育特征与分布状态	可适用于原岩裂隙发育的覆岩
	地震探测	利用人工激发地震波在弹性不同的地层中的传播规律	精度高,探测深度大	可适用于地质条件复杂的矿区
	微地震监测	岩体受力变形和破坏时产生微弱的地震波	连续、实时、三维观测、动态观测	不受岩层破坏情况限制

角度解释了覆岩破坏过程与导水裂隙带的产生,并采用系统输入-输出法,获得导水裂隙带近似高度[16];车晓阳等通过构建覆岩破坏范围模型,利用岩块碎胀理论与采后地下空间达到应力平衡的基本原理,建立了导水裂隙带高度确定的新思路[36]。

断裂与损伤力学、弹塑性力学、系统论与渗流力学等理论的普遍应用,以及力学平衡与能量平衡方法使得理论分析更好地解释导水裂隙带的形成机理与特征研究。理论分析法计算便捷,但计算模型通常需要简化,且只考虑覆岩破坏的主要影响因素,过于理想化。

3.1.2　统计分析(预测)方法

20 世纪 80 年代初,刘天泉院士根据所获煤矿实测资料,主要考虑了覆岩类型、煤层倾角与采厚等因素,利用回归分析统计得出导水裂隙带最大高度经验公式,该公式记入《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中,应用最为普遍。一段时间以来,在矿区没有实测资料的情况下,中国矿山工程技术人员据其确定导水裂隙带高度;而对于有相关观测数据的矿区,技术人员根据实测资料,对该经验公式做出修正,建立适应于本矿区的经验公式以指导生产。但随着开采地质条件日趋复杂,采煤机械化程度不断提高,以及区别于煤层赋存条件的非煤矿山的开采,传统经验公式及其修正形式存在局限性,因此部分学者利用统计分析法建立较为全面反映导水裂隙带高度及其影响因素的关系式[37—39]。

3.1.3　机器学习方法

人工神经网络法、支持向量机模型和模糊聚类分析、随机理论、分形几何学理论等机器学习方法得到不断发展,在导水裂隙带这种不确定性的复杂非线性系统的统计分析中取得了不错的结果。李振华等、陈凯等基于导高实测数据,分别利用 BP 神经网络与趋势面分析法建立了导水裂隙带高度预测模型[40,41];孙云普等利用遗传算法与支持向量机法的优越性,建立了 GA-SVR 模型以反映各影响因素与

导水裂隙带高度之间的关系[42]；张军等、杨国勇等采用层次分析法，在对影响冒裂的主要因素权重分析后，建立了模糊数学综合决策预测模型[43,44]；张永波等、张志祥等利用分形几何学理论研究采动覆岩裂隙分形几何特征[45,46]。

统计分析法与机器算法都是基于已采工作面导水裂隙带高度的实测值，在前人研究成果中已知影响因素的范围内选取若干影响较大的因素，建立各种数学与分析模型，对具有相似地质背景与开采参数的新工作面进行导水裂隙带高度值预测。因此，统计分析前对导水裂隙带各影响因素的选取（权重指标的确定）以及权重分析多靠决策者的经验判断，将其量化时容易因主观因素带来偏差。这两种方法简单易用，成本低；但计算实质都是建立模型，建模过程往往需要选择、概化甚至忽略部分参数，使得计算精度降低，无法反映各影响因素的综合影响；且收集实测数据通常有限，无法建立统一公式，只能在特定地质条件或开采方式下建立较为可靠的计算模型，推广性较差。

3.1.4 类比法

类比法是导水裂隙带高度预测的常用方法。由于覆岩沉积特征与采煤方法的相似性，通常在分析判断相似矿区地质条件与开采工艺的基础上，分析类比覆岩的破坏特征，然后根据裂采比计算[47]。

这种方法通常需要找到两个或两个以上相邻矿井，使其对导水裂隙带高度起决定作用的影响因素具有相似甚至相同的特点，达到相似相同本身就是一件困难的事，且有可能未知的决定性因素却不具备相似的属性，从而导致推测结果的可靠程度降低。

3.2 模拟法

3.2.1 相似模拟研究

相似模拟研究是按照相似理论，在实验室内构建物理模型，通过观测、分析模型覆岩破坏过程，从而推断地质原型中可能发生的相应情况。物理模拟研究能够直观、全场逐点地呈现采空区上覆岩层移动和破坏过程，并为数值分析方法提供计算依据与参数，因此广泛应用于地下开采引起的岩体变形破坏的定性、定量化评价中。许多科研院所通过平面或三维应力应变模型对开采过程中的覆岩破坏进行模拟实验，已取得大量成果[48—50]。

但是，目前模拟技术还不够完善，受试验条件的影响，需要简化模型边界，并对地质条件进行概化，这将使得模拟成果与实际情况存在偏差，常用于规律性研究。

3.2.2 数值模拟法

数值模拟是以计算机为载体，通过数值计算和图像显示，模拟煤层开采过程中上覆岩层失稳、垮落和破坏的过程；其对导水裂隙带范围的判断则根据塑性区范围或每一节点的应力状态来进行[51]。岩石力学分析计算中较为成熟的数值计算方法主要有有限元、边界元、差分方法和离散元法等。目前覆岩破坏特征研究常用的数值模拟软件主要有FLAC3D、RFPA、ANSYS、UDEC、3DEC 等。FLAC3D 是应用混合离散法对材料的塑性破坏和塑性流动进行模拟，适用于模拟大变形；RFPA 软件依据有限元理论和统计损伤理论，模拟再现非均匀性材料动态破坏过程；UDEC 是基于离散单元法理论的计算分析程序，根据物理介质的接触状态判断块体之间的荷载传递方式。张云等针对粗放开采后滞留煤炭资源的回收开发，利用 UDEC 数值模拟软件与多元非线性回归分析法得到块段式采煤的导水裂隙带高度计算公式[2]；杨艳国等利用 UDEC 软件对比研究了不同开采顺序的覆岩破坏范围[22]；刘波等、程龙等分别根据煤矿与某铜铅锌矿的地质条件与充填开采方式，应用 $FLAC^{3D}$ 中的流固耦合计算法研究了导水裂隙带高度[52,53]。

数值模拟过程较为简单，并且可以同时考虑多个影响因素，可视化程度高，能呈现覆岩的破坏现象。但建模时需要简化地质模型，在采矿地质条件与覆岩参数较为复杂的情况下，地层概化与难以选定力学参数使得模拟精度受到影响；且以塑性区范围来代替导水裂隙带只是一种近似的处理方法，需要在以后的研究中确定更为准确的方法。

物理相似模拟与数值模拟法通常为定性的趋势分析，需结合其他方法定量研究。

3.3 实际探测法

现场探测是获取导水裂隙带高度最直接的方法，目前采用的主要方法有直接测量法和地球物理探测法[54]。

3.3.1 直接测量法

（1）钻孔冲洗液观测法

通过观测钻孔钻进过程中冲洗液消耗量、水位、钻进速度的变化，以及钻孔吸风、瓦斯涌出等情况，结合岩心描述，测量岩石 RQD 值，综合分析裂隙发育程度，判断导水裂隙带高度。通常以冲洗液漏失量突然增大且不返水，孔内水位持续下降直至孔底[55,56]，岩石有纵向裂隙及轻微吸风现象为导水裂隙带最大高度的判断依据。

这种方法钻孔工程量较大，适用于开采深度较小的矿区。若矿体上覆水体时，地面钻孔难以施工；若遇孔内岩层原生裂隙发育，则会影响判断；堵漏不

成功时,更易造成观测失败。

(2)井下仰斜钻孔测量法

井下仰斜钻孔测量法适用于大型水体下矿井以及采深较大的矿区。这种方法是基于采动覆岩在竖直方向上裂隙发育程度的不同,其导水性能不同;利用钻孔双端封堵测漏装置逐段测出岩层的基本渗透参数,分析裂隙发育程度,从而获得导水裂隙带高度的一种探测方法。许多科研单位与高校在广泛应用仰孔观测设备的基础上,开发研制了具有针对性的分段注(放)水观测系统[57,58]。高延法等采用该法并将导高观测仪进行改进,对地表海水区的龙口煤矿进行了导高观测[59];黄万朋等在顶板富水区域下,通过施工穿含水层钻孔判断覆岩上方含水层的破坏情况,结合井下导高观测结果对比分析,确定裂隙发育高度[60]。

这种方法充水段小、精度高,还可以进行覆岩破坏的动态观测[61,62],但受钻孔成孔质量影响。

钻孔冲洗液观测法与井下仰孔测量法都是从水文地质参数角度出发,利用裂隙带内渗透率较之开采前以及其他受采动影响小的岩层范围,明显增大的特征,测试采空区上方不同高度岩层的渗透性,反映岩体破坏裂隙的发育情况及其连通程度,从而判断导水裂隙带高度,是岩层采动裂隙发育情况及其导水性能的直接反映。

3.3.2　地球物理探测法

地球物理探测技术是利用地下岩石物理性质的不同,记录开采前后岩石物理性质的变化,进而了解地下开采后的破坏情况。应用于导水裂隙带发育研究的方法手段主要有电法勘探、地震勘探、层析成像与综合测井等,这些方法可以应用于复杂地层,并动态呈现开采过程中导水裂隙带的发育过程,便于工程技术人员根据特殊情况进行针对性的工作布置[63]。

(1)电法探测

电法探测的理论基础是岩体的“形变-电性差异”关系,即通过测量同一岩体在采动前后的电性差异,来判断岩体的受力变形及破坏情况[64]。近年来,应用较为广泛的主要有高密度电阻率法[65]、大地电磁测量法[66,67]、瞬变电磁法[56,68]及立体并行电法测试技术[69—71]。这种方法属于无损探测,可操作性强,初期投资少,但易受到地形及周边电磁的干扰,且体积效应较大,垂直分辨效果差,多用于浅部煤层开采。由于地层受采动影响与充水因素影响后,电阻率具有明显的变化特征,因此,可利用电阻率的变化情况定量解释破坏岩层中的含水量。

(2)层析成像法

层析成像法(CT)应用于导水裂隙带高度的测量,是依据不同介质中岩体的弹性波或电磁波吸收系数的差异,通过射线扫描与信息反演计算,重建裂隙带内介质波速或能量吸收图像的方法。目前应用于覆岩破坏特征研究主要是电磁波 CT、地震波 CT 与声波 CT。文学宽、张平松等、程学丰等利用层析成像探测技术对覆岩破坏规律进行探测[72—74]。

(3)综合测井方法

目前应用于导水裂隙带范围测定较多的综合测井方法主要是钻孔声速法、钻孔电视观测与超声成像法。

钻孔声速法是利用声波在岩体内的传播速度与岩体密度相关的特点,根据声波传播速度在岩层采动前后变化规律来判定导水裂缝带顶点的位置[75]。

钻孔电视观测法(井下窥视法、全孔智能全景成像测井)[56,76]是应用电视技术观察钻孔内壁地层岩性及其构造分布发育的一种综合测井技术。通过采集到的钻孔内部图像信息可以确定采动岩体裂隙的发育特征,连通情况以及岩体的破碎情况,由此判别导水裂隙带发育高度。是现场实测方法中较为直观有效的定性分析方法。但是这种方法只能在清水孔或无水孔且没有套管的钻孔中测试。

超声成像法应用于导水裂缝带的探测原理是依据吸收声阻抗后的裂隙反射信号发生减弱,并在图像上出现异常来判定覆岩破坏形态和裂隙发育情况。

(4)地震勘探

地震探测方法的原理是利用岩体的波阻抗差异,通过人工激发地震波在采动前后岩体内的传播规律来探测裂隙发育情况。申涛等通过 P 波各向异性检测数据与地震振幅数据对导水裂隙带的裂隙分布特征及发育高度进行分析,得到实践证明[77]。

微地震监测技术(MS)的发展是基于地震监测技术,它是利用岩体受力变形、破坏时产生的地震波来监测煤岩稳定性的技术方法,自本世纪初开始用于导水裂隙带高度的确定;并得到广泛应用[78,79]。

现场探测结果相对准确,但周期长、工作量大、成本高,且易受开采地质条件的制约。在各种实测方法中,钻孔冲洗液漏失量观测、井下仰孔测量、钻孔电视观测法、钻孔声速法等以钻孔为基础的实测方法易受探测位置与时间的限制,无法在空间上满足对整个工作面的全面、动态的探查。因此需要对钻孔位置、数量以及采后观测时间进行选择。此外,地球物理勘探法的解释工作需要全面的地质知识和广泛的经验积累,具有多解性,其精度受地质人员经

验所限。

4 发展趋势与总结

导水裂隙带发育特征研究及其高度确定实现了定性分析与定量计算的综合研究,为矿井安全开采、资源可持续开发利用与生态环境的保护提供了充分的理论依据与参考。但是采动覆岩破坏是地质环境、力学环境与工程活动综合作用的结果,且天然岩体是非均质、各向异性、不连续和随机性较强的集合体,因此导水裂隙带的发育影响因素众多,物理过程十分复杂,尚有许多未知或暂时认为影响不大的因素,随着认知水平的提高、计算工具的不断发展以及开采活动的持续,导水裂隙带发育特征的研究将是一个长期重要的课题。

(1)导水裂隙带是在矿体开采过程中所产生的,采空区覆岩活动规律及破坏理论对其高度的确定提供了理论指导,研究多从受力破坏特征的角度出发,但导水裂隙带的水文地质意义使得裂隙带的形成演化不仅仅是一项复杂的动力学问题。由于覆岩中存在渗流场,地下流体在人为裂隙中的水文地质参数会较天然裂隙中发生变化,因此,应结合渗流力学从水文参数角度进行综合研究。如今对岩体裂隙渗流特性的研究多集中于瓦斯渗流,而岩体内地下水渗流特性的专题相对较少[80,81],下一步应加强覆岩破坏带内水文地质参数的研究,掌握导水裂隙带内的水文地质特征,了解其导水性能及其水体条件与采矿活动时间、空间的内在联系。对于上覆基岩富水强的矿区,覆岩破坏受顶板水压的影响不容忽视。

(2)导水裂隙带发育高度的各项影响因素已有大量研究,但是由于各因素具有复杂、非线性的特点,因此如何影响,影响程度多大,目前难以给出定量化的研究结果,只是在对导水裂隙带高度的定性研究基础上,确定各影响因素的影响权重。此外,矿区内的构造程度会对导水裂隙带的发育产生重要影响,以往研究成果均未考虑构造因素或将构造因素简化,因此,基于不断发展的新理论、新方法、新手段,需要加强地质构造因素的影响研究,并更加真实地模拟矿体赋存条件和开采方式。

(3)覆岩的破坏移动不仅贯穿整个回采,还会持续到开采结束后很长一段时间。周期性的垮落过程使得裂隙场分布经历了一个产生、扩展、闭合、张开、稳定的变化过程,相应地其导水能力也随之受到影响,经历由小变大直到稳定的过程。可以说,裂隙带的发育是一个动态演化过程,裂隙的闭合、扩展受时间因素的影响明显。现有研究成果大多旨在取得导水裂隙带的最大发育高度,通常选择在开采过程中或是采后某一时间点进行观测,目前尚无裂隙发育情况随时间推移的演化研究。开采引起的上覆水资源影响破坏评价则需要从水文地质参数角度分析裂隙带的动态发育特征,不仅局限于采动阶段的演化过程研究,还要对破坏岩体经长期压实后的闭合效应进行研究,建立裂隙发育高度与采后时间的关系。形成一套有效集原理分析、数据采集、资料解释与实时动态监测的顶板破坏探测技术,将是今后的研究方向。

(4)目前,矿山开采覆岩破坏的相似模拟主要局限于岩层的弹性段模拟,由于破坏岩组中存在塑、韧性岩层,因此,模型的相似性不仅需要考虑岩体的强度性质,还需要考虑塑性材料的变形相似及水理性(亲水性、渗透性、膨胀性)相似指标。塑性变形会影响裂隙的贯通程度,但是否会改变岩体初始渗透性能仍需进行研究。未来的研究方向将是水文地质学、流体力学、采矿学、岩石力学、构造地质学等多学科方法理论的综合研究。

参 考 文 献

1 白海波,缪协兴. 水资源保护性采煤的研究进展与面临的问题. 采矿与安全工程学报,2009;26(3):253—262
Bai Haibo, Miao Xiexing. Research progress and major problems of water preserved coal mining. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009;26(3):253—262

2 张 云,曹胜根,郭 帅,等. 含水层下短壁块段式采煤导水裂隙带高度发育规律研究. 采矿安全与工程学报,2018;35(1):106—111
Zhang Yun, Cao Shenggen, Guo Shuai, *et al*. Study on the height of fractured water-conducting zone under aquifer for short wall blocking mining. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018;35(1):106—111

3 徐帮树, 张明伟, 夏 鹏,等. 条带法沉降分析的路基压矿开采方法. 科学技术与工程, 2017;17(24):173—177
Xu Bangshu, Zhang Mingwei, Xia Peng, *et al*. Pressed orebody mining method based on strip mining subsidence analysis. Science Technology & Engineering, 2017;17(24):173—177

4 王 伟,程远平,刘洪永,等. 基于 sigmoid 函数的采空区渗透率模型及瓦斯流场模拟应用. 采矿与安全工程学报,2017;34(6):1232—1239
Wang Wei, Cheng Yuanping, Liu Hongyong, *et al*. Permeability model of gob based on sigmoid function and application in the airflow field simulation. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017;34(6):1232—1239

5 邵先杰, 朱 明, 武 宁,等. 煤层气聚集理论研究进展综述. 科学技术与工程, 2017;17(26):156—164
Shao Xianjie, Zhu Ming, Wu Ning, *et al*. Research progress and review on coal-bed methane accumulation theory. Science Technology & Engineering, 2017;17(26):156—164

6 Xu S Y, Zhang Y B, Shi H, *et al*. Physical simulation of strata fail-

ure and its impact on overlying unconsolidated aquifer at various mining depths. Water, 2018; 10(5):650

7 高召宁, 应治中, 王　辉. 薄基岩厚风积沙浅埋煤层覆岩变形破坏规律研究. 矿业研究与开发, 2015;(6):77—81
Gao Zhaoning, Ying Zhizhong, Wang Hui. Research on deformation and failure law of shallow seam covered with thin bedrock and thick windblown sands. Mining Research & Development, 2015;(6):77—81

8 Singh M M, Kendorski F S. Strata disturbance prediction for mining beneath surface water and waste impoundments. The Proceedings of 1st Conference on Ground Control in Mining. Morgantown: West Virginia University, 1981: 76—89

9 刘天泉. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用. 北京:煤炭工业出版社,1981
Liu Tianquan. Surface movements, overburden failure and its application. Beijing:Coal Industry Press, 1981

10 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场"砌体梁"结构的关键块分析. 煤炭学报, 1994;(6):557—563
Qian Minggao,Miao Xiexing, He Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining. Journal of China Coal Society, 1994;(6):557—563

11 Peng S S, Ma W M, Zhong W L. Surface subsidence engineering. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1992

12 高延法. 岩移"四带"模型与动态位移反分析. 煤炭学报, 1996;21(1):51—56
Gao Yanfa. "Four-zone" model of rock mass movement and back analysis of dynamic displacement. Journal of China Coal Society, 1996;21(1):51—56

13 张五兵. 推覆构造条件下防水煤柱留设的研究与实践. 煤炭科技,2001;(2):27—30
Zhang Wubing. Research and practice on waterproof coal pillar under nappe structure conditions. Coal Science & Technology Magazine,2001;(2):27—30

14 Palchik V. Formation of fractured zones in overburden due to longwall mining. Environmental Geology, 2003;44(1):28—38

15 施龙青,辛恒奇,翟培合,等. 大采深条件下导水裂隙带高度计算研究. 中国矿业大学学报,2012;41(1):37—41
Shi Longqing, Xin Hengqi, Zhai Peihe, *et al.* Calculating the height of water flowing fracture zone in deep mining. Journal of China University of Mining & Technology, 2012;41(1):37—41

16 张建民,张　凯,曹志国,等. 基于采动-爆裂模型的导水裂隙带高度计算方法. 煤炭学报,2017;42(6):1557—1564
Zhang Jianmin, Zhang Kai, Cao Zhiguo, *et al.* Mining-bursting simulation and height calculation method for conducting-water fractured zone. Journal of China Coal Society, 2017; 42(6): 1557—1564

17 黄炳香,刘长友,许家林. 采动覆岩破断裂隙的贯通度研究. 中国矿业大学学报,2010;39(1):45—49
Huang Bingxiang, Liu Changyou, Xu Jialin. Research on through degree of overlying strata fracture fissure induced by mining. Journal of China University of Mining & Technology, 2010;39(1):45—49

18 Tammetta P. Estimation of the height of complete groundwater drainage above mined longwall panels. Groundwater, 2012; 51(5): 723—734

19 孙　博, 薛世峰, 周　博. 水力裂缝与天然裂缝相互作用与影响. 科学技术与工程, 2016;16(36):13—19
Sun Bo, Xue Shifeng, Zhou Bo. The interaction between hydraulic fracture and natural fracture and influencing factors. Science Technology & Engineering, 2016;16(36):13—19

20 杨　科,谢广祥. 采动裂隙分布及其演化特征的采厚效应. 煤炭学报,2008;33(10):1092—1096
Yang Ke, Xie Guangxiang. Caving thickness effects on distribution and evolution characteristics of mining induced fracture. Journal of China Coal Society, 2008;33(10):1092—1096

21 张永波, 张利民. 多层采动条件下采空区覆岩残余裂隙发育规律的实验研究. 工程地质学报, 2010; 18(4): 554—558
Zhang Yongbo, Zhang Limin. Experimental study on distribution law of residual fissures in overlying stratum under multiple seam mining. Journal of Engineering Geology, 2010;18(4): 554—558

22 杨艳国,王　军,于永江. 河下多煤层安全开采顺序对导水裂隙带高度的影响. 煤炭学报,2015;40(增刊1):27—32
Yang Yanguo, Wang Jun, Yu Yongjiang. Effects of different coal safe mining sequence under river on height of water flowing fracture zone. Journal of China Coal Society, 2015;40(S1):27—32

23 高延法,黄万朋,刘国磊. 覆岩导水裂缝与岩层拉伸变形量的关系研究. 采矿与安全工程学报,2012; 29(3):301—306
Gao Yanfa, Huang Wanpeng, Liu Guolei. The relationship between permeable fractured zone and rock stratum tensile deformation. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012; 29(3):301—306

24 赵兵朝,刘樟荣,同　超,等. 覆岩导水裂缝带高度与开采参数的关系研究. 采矿与安全工程学报,2015;32(4):634—638
Zhao Bingchao, Liu Zhangrong, Tong Chao, *et al.* Relation between height of water flowing fractured zone and mining parameters. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015;32(4):634—638

25 赵兵朝,余学义. 导水裂缝带的广义损伤因子研究. 中国矿业大学学报,2010;39(5):705—708
Zhao Bingchao, Yu Xueyi. Research on broad sense damage gene of fracture zone. Journal of China University of Mining & Technology, 2010;39(5):705—708

26 马志伟,叶义成,王其虎,等. 含钒页岩矿床开采导水裂隙带发育高度研究. 金属矿山,2013;(2):142—146
Ma Zhiwei, Ye Yicheng, Wang Qihu, *et al.* Study on the height of water flowing fractured zone in containing vanadium shale deposit. Metal Mine, 2013;(2):142—146

27 谢晓锋,李夕兵,尚雪义,等. PCA-BP 神经网络模型预测导水裂隙带高度. 中国安全科学学报,2017;27(3):100—105
Xie Xiaofeng, Li Xibing, Shang Xueyi, *et al.* Prediction of height of water flowing fractured zone based on PCA-BP neural networks model. China Safety Science Journal,2017;27(3):100—105

28 王志强,李鹏飞,王　磊. 再论采场"三带"的划分方法及工程应用. 煤炭学报,2013;38(增刊2):287—293
Wang Zhiqiang, Li Pengfei, Wang Lei. Method of division and engineering use of "three band" in the stope again. Journal of China Coal Society, 2013;38(S2):287—293

29 许家林,朱卫兵,王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法. 煤炭学报,2012; 37(5):762—769
Xu Jialin, Zhu Weibing, Wang Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata. Journal of China Coal Society, 2012; 37(5):762—769

30 许家林,王晓振,刘文涛,等. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带

高度的影响. 岩石力学与工程学报,2009;28(2):380—385
Xu Jialin, Wang Xiaozhen, Liu Wentao, *et al.* Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2009;28(2):380—385

31 梁运培,文光才. 顶板岩层"三带"划分的综合分析法. 煤炭科学技术,2000;28(5):39—42
Liang Yunpei, Wen Guangcai. Comprehensive analysis method of "three zone classification" on mine roof strata. Coal Science & Technology, 2000;28(5):39—42

32 张宏伟,朱志洁,霍利杰,等. 特厚煤层综放开采覆岩破坏高度. 煤炭学报,2014;39(5):816—821
Zhang Hongwei, Zhu Zhijie, Huo Lijie, *et al.* Overburden failure height of superhigh seam by fully mechanized caving method. Journal of China Coal Society, 2014;39(5):816—821

33 张 通,袁 亮,赵毅鑫,等. 薄基岩厚松散层深部采场裂隙带几何特征及矿压分布的工作面效应. 煤炭学报,2015;40(10):2260—2268
Zhang Tong, Yuan Liang, Zhao Yixin, *et al.* Distribution law of working face pressure under the fracture zone distribution characteristic of deep mining. Journal of China Coal Society, 2015;40(10):2260—2268

34 黄万朋,高延法,王 波,等. 覆岩组合结构下导水裂隙带演化规律与发育高度分析. 采矿安全与工程学报,2017;34(2):330—335
Huang Wanpeng, Gao Yanfa, Wang Bo, *et al.* Evolution rule and development height of permeable fractured zone under combined-strata structure. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017;34(2):330—335

35 王连国,王占盛,黄继辉,等. 薄基岩厚风积沙浅埋煤层导水裂隙带高度预计. 采矿与安全工程学报,2012;29(5):607—612
Wang Lianguo, Wang Zhansheng, Huang Jihui, *et al.* Prediction on the height of water-flowing fractured zone for shallow seam covered with thin bedrock and thick windblown sands. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012;29(5):607—612

36 车晓阳,侯恩科,谢晓深,等. 煤层开采导水裂隙带发育高度分析. 中国科技论文,2016;11(3):270—273
Che Xiaoyang, Hou Enke, Xie Xiaoshen, *et al.* Analysis on development height of water flowing fractured zone in coal seam mining. China Science Paper, 2016;11(3):270—273

37 胡小娟,李文平,曹丁涛,等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计. 煤炭学报,2012;37(4):613—620
Hu Xiaojuan, Li Wenping, Cao Dingtao, *et al.* Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone. Journal of China Coal Society, 2012;37(4):613—620

38 尹尚先,徐 斌,徐 慧,等. 综采条件下煤层顶板导水裂缝带高度计算研究. 煤炭科学技术,2013;41(9):138—142
Yin Shangxian, Xu Bin, Xu Hui, *et al.* Study on height calculation of water conducted fractured zone caused by fully mechanized mining. Coal Science & Technology, 2013;41(9):138—142

39 丁鑫品,郭继圣,李绍臣,等. 综放开采条件下上覆岩层"两带"发育高度预计经验公式的确定. 煤炭工程, 2012;(11):75—78
Ding Xinpin, Guo Jisheng, Li Shaochen, *et al.* Determination on experiment formula of "two zone" development height in overburden strata under fully mechanized top coal caving mining. Coal Engineering, 2012;(11):75—78

40 李振华,许延春,李龙飞,等. 基于 BP 神经网络的导水裂隙带高度预测. 采矿与安全工程学报,2015;32(6):905—910
Li Zhenhua, Xu Yanchun, Li Longfei, *et al.* Forecast of the height of water flowing fractured zone based on BP neural networks. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015;32(6):905—910

41 陈 凯,严桂凤,文 江,等. 趋势面分析法在预测导水裂隙带高度中的应用. 中国煤炭,2013;39(2):52—54,59
Chen Kai, Yan Guifeng, Wen Jiang, *et al.* Application of trend surface analysis on predicting height of water-flowing fractured zone. China Coal, 2013;39(2):52—54,59

42 孙云普,王云飞,郑晓娟. 基于遗传-支持向量机法的煤层顶板导水断裂带高度的分析. 煤炭学报,2009;34(12):1610—1615
Sun Yunpu, Wang Yunfei, Zheng Xiaojuan. Analysis the height of water conducted zone of coal seam roof based on GA-SVR. Journal of China Coal Society, 2009;34(12):1610—1615

43 张 军,王建鹏,杨文光. 综采工作面冒落高度模糊综合预测模型研究. 中国矿业大学学报,2014;43(3):426—431
Zhang Jun, Wang Jianpeng, Yang Wenguang. Research on the fuzzy comprehensive predicting model for caved zone height of fully mechanized working face. Journal of China University of Mining & Technology, 2014;43(3):426—431

44 杨国勇, 陈 超, 高树林,等. 基于层次分析-模糊聚类分析法的导水裂隙带发育高度研究. 采矿与安全工程学报, 2015;32(2):206—212
Yang Guoyong, Chen Chao, Gao Shulin, *et al.* Study on the height of water flowing fractured zone based on analytic hierarchy process and fuzzy clustering analysis method. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015;32(2):206—212

45 张永波, 靳钟铭, 刘秀英. 采动岩体裂隙分形相关规律的实验研究. 岩石力学与工程学报, 2004;23(20): 3426—3429
Zhang Yongbo, Jin Zhongming, Liu Xiuying. Testing study on fractal correlation law of cracks in mined rock masses. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2004;23(20):3426—3429

46 张志祥, 张永波, 赵雪花,等. 双煤层采动岩体裂隙分形特征实验研究. 太原理工大学学报, 2014; 45(3):403—407
Zhang Zhixiang, Zhang Yongbo, Zhao Xuehua, *et al.* Experimental study on fractal characteristics of fractures in two-coal seam mining rock mass. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014; 45(3):403—407

47 王琳琳,魏久传,尹会永,等. 新安煤矿 16 煤导水裂隙带高度研究. 山东科技大学学报(自然科学版),2014;33(1):40—45
Wang Linlin, Wei Jiuchuan, Yin Huiyong, *et al.* The height of water flowing fractured zone of 16 coal seam in Xin'an coal mine. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2014;33(1):40—45

48 张 军,王建鹏. 采动覆岩"三带"高度相似模拟及实证研究. 采矿与安全工程学报,2014;31(2):249—254
Zhang Jun, Wang Jianpeng. Similar simulation and practical research on the mining overburden roof strata "three-zones" height. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014;31(2):249—254

49 Miao X X, Cui X M, Wang J N, *et al.* The height of fractured water-conducting zone in undermined rock strata. Engineering Geology, 2011; 120(1):32—39

50 胡耀青, 赵阳升, 杨 栋. 三维固流耦合相似模拟理论与方法.

辽宁工程技术大学学报, 2007;26(2):204—206
Hu Yaoqing, Zhao Yangsheng, Yang Dong. Simulation theory & method of 3D solid-liquid coupling. Journal of Liaoning Technical University, 2007;26(2):204—206

51 涂　敏,余中林. 巨厚松散强含水层下开采覆岩移动破坏分析. 矿山压力与顶板管理,2004;(2):1—3,6
Tu Min, Yu Zhonglin. Overburden movement and failure analysis of mining under extremely thick loose aquifer. Ground Pressure and Strata Control, 2004;(2):1—3,6

52 刘　波,贺　雷,罗立平. 流-固耦合作用下防隔水煤柱留设的数值模拟. 采矿与安全工程学报,2009;26(4):445—449,454
Liu Bo, He Lei, Luo Liping. Numerical modeling on fluid-solid coupling for the waterproof coal pillar design. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009;26(4):445—449,454

53 程　龙,王　涛,漆　鹏. 新庄铜铅锌矿含水层下防水矿柱留设计算分析. 武汉大学学报,2017;50(3):368—374
Cheng Long, Wang Tao, Qi Peng. Investigation of waterproof pillar design under aquifer in Cu-Pb-Zn mining of Xinzhuang. Journal of Wuhan University, 2017;50(3):368—374

54 郭兵兵, 孙文标, 刘长武. 煤层开采导水裂隙带发育高度研究综述. 科学技术与工程, 2015; 15(17):100—108
Guo Bingbing, Sun Wenbiao, Liu Changwu. Research overview on the height of water flowing fractured zone after coal mining. Science Technology & Engineering, 2015;15(17):100—108

55 李宏杰,黎　灵,李　健,等. 采动覆岩导水断裂带发育高度研究方法探讨. 金属矿山,2015;(4):1—5
Li Hongjie, Li Ling, Li Jian, *et al*. Discussion on the methods for determining the height of fractured water-conducting zone. Metal Mine, 2015;(4):1—5

56 孙庆先,牟　义,杨新亮. 红柳煤矿大采高综采覆岩“两带”高度的综合探测. 煤炭学报,2013;38(增刊2):283—286
Sun Qingxian, Mu Yi, Yang Xinliang. Study on “two-zone” height of overlying of fully-mechanized technology with high mining height at Hongliu Coal Mine. Journal of China Coal Society, 2013;38(S2):283—286

57 高保彬,刘云鹏,潘家宇. 水体下采煤中导水裂隙带高度的探测与分析. 岩石力学与工程学报,2014;33(增刊1):3384—3390
Gao Baobin, Liu Yunpeng, Pan Jiayu. Detection and analysis of height of water flowing fractured zone in underwater mining. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2014;33(S1):3384—3390

58 余学义,周　杨,杨子星,等. 特厚煤层分层综放开采导水裂隙带高度观测研究. 中国煤炭学会开采专业委员会 2010 年学术年会论文集. 徐州:中国矿业大学出版社,2010:109—116
Yu Xueyi, Zhou Yang, Yang Zixing, *et al*. Research on height of water flowing fractured zone of slice excavation in extremely thick coal seam. Proceedings of 2010 China Coal Society Mining Professional Committee. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010:109—116

59 高延法,曲祖俊,邢　飞,等. 龙口北皂矿海域下 H2106 综放面井下导高观测. 煤田地质与勘探,2009;37(6):35—38
Gao Yanfa, Qu Zujun, Xing Fei, *et al*. Observation of height of excavating face H2106 in Longkoubeizao mine under sea. Coal Geology & Exploration, 2009;37(6):35—38

60 黄万朋,高延法,王东旭,等. 井下导高观测时的含水层导高判据. 科技导报,2012;30(3):53—56
Huang Wanpeng, Gao Yanfa, Wang Dongxu, *et al*. A new kind of aquifer criterion to determine the permeable fractured zone's height in field measurement. Science & Technology Review, 2012;30(3):53—56

61 熊晓英. 导水裂隙带高度探测新方法综述. 安徽地质,2004;14(2):95—98
Xiong Xiaoying. Analysis of new method of detection of the height of transmissive fracturing belt. Geology of Anhui, 2004;14(2):95—98

62 王玉峰. 厚黄土层下综放面顶板导水裂隙带高度探测研究. 煤炭技术,2012;31(1):74—76
Wang Yufeng. Research on detecting height of water flowing fractured zone of roof at fully mechanized caving face under thick soil layer. Coal Technology, 2012;31(1):74—76

63 田玉新,孙如华,李　帅. 导水裂隙带高度确定方法研究. 中国煤炭,2013;39(9):36—39,55
Tian Yuxin, Sun Ruhua, Li Shuai. Research on determination of height of diversion fissure zone. China Coal, 2013;39(9):36—39,55

64 刘树才,刘鑫明,姜志海,等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究. 岩石力学与工程学报, 2009;28(2):348—356
Liu Shucai, Liu Xinming, Jiang Zhihai, *et al*. Research on electrical prediction for evaluating water conducting fracture zones in coal seam floor. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2009;28(2):348—356

65 刘盛东,吴荣新,张平松. 高密度电阻率法观测煤层上覆岩层破坏. 煤炭科学技术, 2001;29(4):18—22
Liu Shengdong, Wu Rongxin, Zhang Pingsong. High density electric resistance method applied to monitor and measure overburden failure above seam. Coal Science & Technology, 2001;29(4):18—22

66 杨　逾, 梁鹏飞. 基于 EH-4 电磁成像系统的采空区覆岩破坏高度探测技术. 中国地质灾害与防治学报,2013;24(3):68—71
Yang Yu, Liang Pengfei. The detection technology of goaf overburden rock damage of based on EH4 electromagnetic imaging system. Chinese Journal of Geological Hazard & Control, 2013;24(3):68—71

67 冯国财,徐白山,王　东. 三台子水库下压煤综放开采覆岩破坏充水特征. 采矿与安全工程学报,2014;31(1):108—114
Feng Guocai, Xu Baishan, Wang Dong. Features of overburden failure and water filling in coal mining with sub-level caving under Santaizi reservoir. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014;31(1):108—114

68 张　彬,牟　义,张俊英,等. 瞬变电磁法在导水裂隙带高度探测中的研究应用. 煤炭工程,2011;(3):44—46
Zhang Bin, Mou Yi, Zhang Junying, *et al*. Research and application of transient electromagnetic method for height detection of water flowing fractured zone. Coal Engineering, 2011;(3):44—46

69 吴荣新,张　卫,张平松. 并行电法监测工作面“垮落带”岩层动态变化. 煤炭学报,2012;37(4):571—577
Wu Rongxin, Zhang Wei, Zhang Pingsong. Exploration of parallel electrical technology for the dynamic variation of caving zone strata in coal face. Journal of China Coal Society, 2012;37(4):571—577

70 张平松,刘盛东,吴荣新,等. 采煤面覆岩变形与破坏立体电法动

态测试. 岩石力学与工程学报,2009;28(9):1870—1875
Zhang Pingsong, Liu Shengdong, Wu Rongxin, *et al.* Dynamic detection of overburden deformation and failure in mining workface by 3d resistivity method. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2009;28(9):1870—1875

71 付宝杰, 高明中, 涂 敏,等. 组合硬岩层顶板破断规律及导水裂隙带电法探测. 水文地质工程地质, 2015;42(2):140—144
Fu Baojie, Gao Mingzhong, Tu Min, *et al.* Composite hard strata break rules and the electric tests fractured of water-conducting zone. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015;42(2):140—144

72 文学宽. CT 探测覆岩破坏高度的试验研究. 煤炭学报, 1998;(3):300—304
Wen Xuekuan. Determination of the height of the failed overlying strata by computer tomographic technique. Journal of China Coal Society, 1998;(3):300—304

73 张平松, 刘盛东, 吴荣新. 地震波 CT 技术探测煤层上覆岩层破坏规律. 岩石力学与工程学报, 2004;23(15):2510—2513
Zhang Pingsong, Liu Shengdong, Wu Rongxin. Observation of overburden failure of coal seam by CT of seismic wave. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2004;23(15):2510—2513

74 程学丰,刘盛东,刘登宪. 煤层采后围岩破坏规律的声波 CT 探测. 煤炭学报, 2001;26(2):153—155
Cheng Xuefeng, Liu Shengdong, Liu Dengxian. Sound-wave CT detection for failure patterns of surrounding rock after mining. Journal of China Coal Society, 2001;26(2):153—155

75 康永华, 王济忠, 孔凡铭,等. 覆岩破坏的钻孔观测方法. 煤炭科学技术, 2002;30(12):26—28
Kang Yonghua, Wang Jizhong, Kong Fanming, *et al.* Bore hole survey method for overburden failure. Coal Science & Technology, 2002;30(12):26—28

76 吕广罗,杨 磊,田刚军,等. 深埋特厚煤层综放开采顶板导水裂隙带发育高度探查分析. 中国煤炭,2016;42(11):53—57
Lv Guangluo, Yang Lei, Tian Gangjun, *et al.* Detection and analysis of height of water flowing fractured zone in roof of fully mechanized caving face in deep and extra thick seam. China Coal, 2016;42(11):53—57

77 申 涛, 袁 峰, 宋世杰,等. P 波各向异性检测在采空区导水裂隙带探测中的应用. 煤炭学报, 2017;42(1):197—202
Shen Tao, Yuan Feng, Song Shijie, *et al.* Application of P-wave anisotropy detection in detecting the conducting fracture zone. Journal of China Coal Society, 2017;42(1):197—202

78 汪华君, 姜福兴, 成云海,等. 覆岩导水裂隙带高度的微地震(MS)监测研究. 煤炭工程, 2006;(3):74—76
Wang Huajun, Jiang Fuxing, Cheng Yunhai, *et al.* Research on microseismic (MS) monitoring of overburden height of water flowing fracture zone. Coal Engineering, 2006;(3):74—76

79 丛 森, 程建远, 王云宏,等. 导水裂隙带发育高度的微震监测研究. 中国矿业, 2017;26(3):126—131
Cong Sen, Cheng Jianyuan, Wang Yunhong, *et al.* Study on microseismic monitoring of height of water flowing fracture zone. China Mining Magazine, 2017;26(3): 126—131

80 鞠金峰,许家林,李全生,等. 我国水体下保水采煤技术研究进展. 煤炭科学技术,2018;46(1):12—19
Ju Jinfeng, Xu Jialin, Li Quansheng, *et al.* Progress of water-preserved coal mining under water in China. Coal Science & Technology, 2018;46(1):12—19

81 杨顺辉, 豆宁辉, 牛成成,等. 基于真实裂缝的井筒-地层耦合流动试验装置研制. 科学技术与工程, 2018;18(10):35—41
Yang Shunhui, Dou Ninghui, Niu Chengcheng, *et al.* The test device development of wellbore-formation coupling flow based on real fracture. Science Technology & Engineering, 2018; 18 (10): 35—41

Advances in the Height of Fractured Water-conducting Zone of Mining Overburden

XU Shu-yuan[1], ZHANG Yong-bo[1*], SHI Hong[2], CHEN Jun-feng[1]
(College of Water Resources Science and Engineering[1], College of Environmental Science and Engineering[2], Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

[**Abstract**] The research on the height of fractured water-conducting zone has significances in water control, mine optimum design, extracting under water body, gas drainage, and utilization of CBM, stability evaluation of foundation, water evaluation and protection and so on. The research achievements of the range, influencing factors and the main prediction methods of fractured water-conducting zone in recent years are summarized, and the characteristics of the calculation method, simulation method and detection method are compared and analyzed. The advances of the fractured water-conducting zone are fully understood relatively, and the development trends are put forward.

[**Key words**] fractured water-conducting zone influencing factors research methods development trends