

断层影响下岩体采动灾变响应研究现状与展望

陈绍杰¹, 夏治国¹, 郭惟嘉¹, 沈宝堂^{1,2}

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 澳大利亚联邦科学研究院, 澳大利亚 布里斯班 4096)

摘要:针对采动可能引起断层活化进而导致工程灾害, 从断层形成机制、断层附近岩体采矿工程响应及致灾、大断层附近安全开采3个方面综述了断层影响下岩体采动灾害响应机制和规律研究现状。对煤矿开采尺度下断层形成的地质力学机制及区域原岩应力分布特征、断层对采动应力阻碍及传导作用机制、采动应力与断层相互作用下致灾机理、近断层煤炭安全开采与灾害防治等4方面的进一步研究提出了展望; 将断层形成和运动过程中应力场、能量场与采动相结合, 可以更好地研究断层影响下岩体采动灾变响应, 利用断层特性可以防治相关矿山灾害, 以期为认识断层影响下岩体采动灾变响应及灾害预防提供技术支持。

关键词:断层影响; 岩体采动; 矿山灾害; 灾变响应; 安全开采

中图分类号: TD325 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2018)01-0020-08

Research status and prospect of mining catastrophic response of rock mass under the influence of fault

CHEN Shaojie¹, XIA Zhiguo¹, GUO Weijia¹, SHEN Baotang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Brisbane 4096, Australia)

Abstract: According to the engineering disasters resulting from fault activation caused by mining, the research status of mining rock mass catastrophic response mechanism and law near faults is summarized. It includes fault formation mechanism, rock mass catastrophic response to mining engineering near faults and safety mining near large fault. Four aspects of further researches are prospected, including the geological mechanics mechanism of fault generation and original stress distribution characteristics of rock mass near faults in mining engineering, obstacles and conduction mechanism of fault on the mining induced stress, disaster-causing mechanism induced by the combined actions of mining stress and fault and coal safety mining and disaster prevention near fault. It is better to study the mining rock mass catastrophic response mechanism influenced with fault considered both the mining engineering and stress field, energy field during the process of fault formation and movement. The fault characteristics can be related to the mine disaster prevention. It is expected to provide technical support for rock mass disaster response and disaster prevention in mining under the influence of fault.

Key words: fault effect; rock mass mining; mine disasters; catastrophic response; safety mining

0 引言

作为煤炭开采中一种大量存在的主要地质构造, 断层切割地层破坏了其连续性及完整性, 使断层

周围岩体能量场、应力场、位移场出现较大差异。断层周围岩体存在构造应力和地质能量, 在断层附近进行采矿工程时, 采动与断层共同作用导致岩体应力场再次发生变化、岩体再次运动及破坏, 而断层附

收稿日期: 2017-12-01; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.01.003

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774194); 山东省自然科学杰出青年基金资助项目(JQ201612); 山东省重点研发计划资助项目(2017GSF17112)

作者简介: 陈绍杰(1978—), 男, 河北定州人, 副教授, 博士生导师, 博士。E-mail: chensj@sdust.edu.cn

引用格式: 陈绍杰, 夏治国, 郭惟嘉, 等. 断层影响下岩体采动灾变响应研究现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 20-27.

CHEN Shaojie, XIA Zhiguo, GUO Weijia, et al. Research status and prospect of mining catastrophic response of rock mass under the influence of fault [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 20-27.

近岩体响应特征远不同于完整岩体,可能诱发多种矿山灾害。煤矿经济效益好时采矿工程中常避开这些断层,因此较大断层附近滞留了大量的煤炭资源。随着我国经济、社会的发展,煤炭需求量进一步增加,同时华东、东北等地煤炭资源日益枯竭,区域煤炭企业迫切需要回采这些煤质优良的断层资源。近断层尤其是近大断层煤炭资源开采面临着多种重大灾害风险,如突水、顶板冒落、冲击地压、煤与瓦斯突出等。在较大断层附近进行采矿时发生的灾害事故不胜枚举,如辽宁阜新孙家湾煤矿由于断层冲击地压导致3316工作面回风巷瓦斯异常涌出并积聚,发生“2·14”瓦斯爆炸事故^[1];河南义马千秋煤矿发生的“11·3”特大逆冲断层冲击地压事故,近400 m巷道严重损毁。这些灾害发生的根本原因在于采矿活动破坏了断层附近岩层的平衡状态。认识断层与采动相互作用下区域岩体应力、变形、破坏演化规律是相关灾害防治的基础。

采动是引起断层灾害的诱导因素,断层周围构造应力的存在是灾害发生的根本因素之一。目前,对断层与采动相互影响下诱发冲击地压、突水等灾害以及断层附件安全开采的研究中,大多是预设断层,没有考虑断层形成和运动过程中断层附近应力场和能量场的影响。基于此,笔者对国内外学者的相关研究成果进行了系统的归纳和总结,着重对断层形成机制、断层附近岩体采矿工程响应及致灾、大断层附近安全开采的研究现状进行综述分析,将断层形成和运动过程中应力场、能量场与采动相结合研究断层影响下岩体采动灾变响应,对利用断层特性防治相关矿山灾害提出展望,以期为研究不同产状断层附近岩体采动致灾机理以及大断层附近安全开采提供技术支撑。

1 断层影响下岩体采动灾害类型

煤炭分布的区域、地质条件及构造特征虽各不相同,但断层作为矿井生产中的重要地质因素对煤矿的安全生产始终具有重要影响。断层在形成时发生错动,断层面间产生间隙,断层破碎带较周围完整岩体强度低、易变形,在采矿工程中更易发生灾害,如顶板冒顶、矿井突水、煤与瓦斯突出、冲击地压等。

1.1 顶板冒顶

断层破坏了煤层顶板的完整性,造成煤层顶板及其附近岩层破碎,失去了煤层顶板原有的整体性并积蓄了应力和能量。断层区域较岩层完整区域更

易发生冒顶事故。当工作面推进到断层附近时,断层对煤层顶板产生较大的影响,同时由于受采动及矿压作用,煤层顶板沿断层面两侧出现滑移,致使断层面附近岩体破碎程度升高、破碎区域增大,易发生冒顶事故^[2]。

1.2 矿井突水

断层在形成过程中错动并产生断层破碎带,形成较好的导水构造和导水裂隙,可作为储水空间和导水通道赋存于地下^[3]。由于断层破碎区岩体强度降低,其所能承受水压的能力下降,当断层穿过含水层时,导通含水层承压水进入矿井,造成矿井断层突水。即便断层不含水、不导水,在采动作用下也有可能活化,沟通含水层,导致矿井突水。矿井突水常发生在岩层的薄弱区域,而断层改变了隔水层的完整性,断层附近形成的岩层破碎区及隔水层最易破坏,断层区域更易发生突水事故。

1.3 煤与瓦斯突出

断层形成过程中伴随着构造应力的存在,在其作用下煤层受挤压发生破碎,形成大量的孔隙和自由空间,增大了煤体的吸附表面,同时为游离瓦斯提供了更大的储存空间^[2]。当邻近断层开采时,在地应力、瓦斯压力和采动应力共同作用下,煤层瓦斯涌出常携带大量煤岩喷出,形成煤与瓦斯突出。断层的存在为瓦斯赋存提供了良好的区域环境,作为较易赋存瓦斯的区域,其附近岩体强度较低。煤与瓦斯突出是一个释放能量、破坏煤体的动力过程,当受到地应力和瓦斯压力作用时,较其他条件下断层区域更易发生突出事故。

1.4 冲击地压

当工作面推进到断层附近时,采动应力与构造应力叠加,弹性能量大量聚集,断层和工作面间的煤岩体所受应力高度集中,能量的瞬时释放破坏煤岩体力学平衡,造成强烈的矿压现象^[4]。断层的存在使得采掘应力产生显著的不连续特征,加之断层附近产生应力的积聚及存在的残余构造应力,造成断层附近煤岩体局部应力高度集中。与一般冲击地压相比,断层冲击地压的破坏性更强、影响范围更大。

2 断层区域岩体采动灾变响应研究现状

近几十年来,针对采动引起断层活化、滑移进而导致的工程灾害,国内外学者对断层形成机制、断层附近岩体工程响应及致灾、大断层附近安全开采等方面进行了大量开拓性和卓有成效的研究,积累了

丰富的研究成果及经验。

2.1 断层形成机制

不同学者根据均匀介质中断层与主应力轴的关系,建立了不同的断层力学成因模式,分析了断层倾角与构造应力场中的主应力方位之间的关系。ANDERSON^[5]认为在地面以下一定深度内,3个主应力中必定有1个主应力轴与地面垂直,其余2个主应力轴呈平行状态,应用摩尔-库仑强度理论提出了ANDERSON断层成因模式。该成因模式对于解释地下一定深度内脆性断裂基本合理,而主应力方向在垂直与水平方向上时常变化,针对这一情况,HAFNER通过分析一系列地壳内可能存在的各类边界条件及相应的应力系统,提出了附加应力状态下的HAFNER断层力学成因模式^[6]。ANDERSON和HAFNER提出的断层成因模式适用于连续均匀介质的脆弹性变形域,而自然界中岩体大多是非均匀的。针对裂陷盆地复杂的断层分布,童亨茂等^[7]应用脆性断裂新理论——不协调性准则,分析了裂陷盆地基底先存构造控制断层形成和演化的力学机理,使断层形成机制理论得到了进一步的发展。

自ANDERSON等从力学成因方面研究断层形成机制以来,很多学者从岩性特征和统计规律等方面采用力学理论、监测资料和构造物理模拟方法来研究断层产生机制和断层产状,文献[8-9]基于岩性结构对断层形成的影响,研究了煤层顶、底板岩性结构与煤层断层的关系,利用砂箱模型模拟了两盘岩石强度差异对冲断层形成特征的影响作用。文献[10-11]应用统计规律,分析了大量的地质构造实测成果,研究了断层的分布特征和形成机制,表明区域地质影响断层冲起构造模式,而冲起构造机制控制了断层组合模式。文献[12-14]基于物探成果和三维地震资料研究断层形成特征和形成机制,发现玉北三维区撕裂断层的形成受基底断层和区域挤压应力的控制,先存基底断层控制后期撕裂断层的发育位置和展布方向。

2.2 断层附近岩体采矿工程响应及致灾

断层附近的采矿工程必然会导致周围岩体产生响应。矿产资源的开采破坏了地层的完整性,打破了周围岩体的应力平衡,采矿工程会诱发断层活化、滑移,致使周围围岩应力场、能量场、变形场发生变化。很多学者在采动后周围煤岩体能量积聚释放、应力场分布和位移场演化规律方面,针对各种灾害,

尤其是针对断层冲击地压、断层突水,将断层与灾害相结合,以灾害为重点和核心开展了大量研究。

2.2.1 断层附近岩体采矿工程响应

国内外学者^[15-18]采用相似材料模拟、数值模拟、现场监测等方法研究了采动影响下断层滑移和应力响应规律和特征;运用动态分析法,研究了断层摩擦角、开采深度、断层距工作面的位置对断层剪切位移增量的影响规律,分析了断层下盘煤层开采后上盘煤层中开挖巷道时其顶板的位移特征和巷道变形特征。

关于采动引起断层附近岩体应力变化,我国学者^[4,19-22]通过模拟大断层附近工作面回采过程,研究了采动前后断层带的变形与受力情况以及底板支承压力、断层及其上盘区域煤层应力分布、覆岩变形特征和邻近断层开采过程中断层周围围岩系统力学响应特征及岩体应力场演化规律。文献[23]应用现场密集地震观测与应力反演法相结合方式模拟出震源应力场,研究了摩擦再活化理论对活性断层的适用性。

断层附近开采也会引起开采沉陷的新特征,文献[24]通过监测、模拟、理论研究,发现断层使得采矿引起的岩层和地表的变形产生不连续特征,尤其在断层出露地表的地方会产生明显的台阶状地表变形,对地表建(构)筑物造成更为严重的损害。

2.2.2 断层区域岩体采矿工程致灾规律与机理

在邻近断层区域进行采矿工程极易诱发各种灾害。断层区域蕴藏着巨大的应变能,采掘工程穿过或靠近断层时,易造成断层失稳,使周围岩层应力失去平衡,断层构造内能量释放,引发矿山灾害。针对这一问题,目前主要采用相似模拟、数值模拟等方法对采动引起的断层失稳、岩体应力演化和能量释放等诱发冲击电压、断层突水等断层灾害开展了大量研究。

由于断层区域开采引起应力场、能量场变化,工作面过断层时煤壁片帮及冒顶更加严重、围岩更加难以控制^[25];王宏伟等^[26]从能量非稳态释放的角度,研究了多断层赋存条件下工作面采动应力场的分布特征对断层诱发动力灾害的影响规律。

冲击地压是煤矿开采中的重要灾害,尤其是随着开采深度的逐渐增大,冲击地压发生概率、危险程度逐渐升高。文献[27-32]围绕断层区域开采诱发冲击地压这一难题进行了大量研究,通过现场监测、室内实验、理论分析等方法,围绕断层滑移和失稳,

分析了断层冲击地压失稳瞬态特征,研究断层失稳对冲击地压的影响及诱冲机理。

断层突水的根本原因在于采动作用导致断层附近应力场变形,破坏了区域岩层的平衡状态。文献[33-35]围绕煤层中小型滑移断层对水力裂缝扩展方向的影响、采掘工程导致断层周围岩体应力变化和岩体变形进而导致断层活化突水的断层突水机制开展了大量研究工作,发现逼近角度、水平主应力差、煤岩体弹性模量是影响压裂裂缝走向的主要因素,在低主应力差、较小逼近角度、较高顶板弹性模量时,断层易产生张开型破坏。文献[36-37]针对断层突水滞后性特征,探讨了断层滞后突水的灾变机理,认为在地下水和采动扰动影响下,断层突水通道形式与断层产状、承压水以及隔水层性质关系较大,但受断层活化程度的影响最明显。

2.3 大断层附近安全开采

保证断层附近顺利开展采掘工作、安全高效的生产,是采矿工程科技工作者的重要研究内容之一。很多学者在断层附近安全开采方面开展了大量研究,探讨了开采方式与断层煤柱留设相结合防治各种断层灾害、断层破碎区域巷道支护体系,取得了丰富研究成果。

2.3.1 留设断层保护煤柱防治矿山灾害

长期以来,在断层两侧留设合适尺寸的安全煤柱是断层灾害防治的主要方法。断层保护煤柱的力学状态是保证安全的基础。国内外学者研究了保护煤柱的尺寸及应力变形及破坏、断层滑动破裂、区域岩层运动和变形等相互间的影响以及采动效应^[38-41]。

目前,断层附近煤与瓦斯突出、冲击地压防治,大多采用监测、预防,留设足够宽度煤柱的方法。针对煤与瓦斯突出,在断层影响带内对瓦斯进行强化抽采,对断层影响带内的松软煤体进行注浆加固。针对冲击地压防治,在构造应力影响区域内,通过深孔爆破卸压,或向高应力区注入浆液,使断层有控制地滑移来防治冲击地压的危害。

留设合理断层煤柱以防治断层突水,国内的研究较多,实践效果良好。相关研究^[42-43]主要是在已有的断层煤柱留设的基础上,针对具体的地质采矿条件,考虑断层破碎带宽度和屈服带宽度,结合断层本身的性质和矿山压力共同作用,建立了采场底板突水力学模型,以此改进了断层防水煤柱留设方法。

2.3.2 断层区域破碎围岩巷道支护技术

断层区域破碎围岩巷道变形大,难以支护成为

巷道支护的一大难题。在断层附近进行采掘活动时,造成断层构造影响范围内巷道变形、顶板围岩松动、巷道支护困难等问题。针对巷道断层区域破碎围岩稳定控制,文献[44-47]对断层破碎区域煤岩巷道变形、围岩应力等进行现场监测或模拟分析,提出了多种与具体地质采矿条件相适应的围岩稳定控制模型和理论,进而优化支护设计方法,研发了多种新的支护材料。根据现场监测效果来看,取得了很好的效果。断层区域破碎围岩巷道支护理论和技术的长足进展对于顶板冒顶起到了很好的防治作用。

3 断层区域岩体采动灾变响应研究存在的问题

3.1 采矿工程尺度断层形成机制及其围岩演化规律

断层在不同的学科中,其描述的尺度大相径庭,地质工程中对断层的形成机制研究较多,但在矿业工程领域中,在断层形成过程方面的研究相对较少,以往主要是通过预设断层对断层形成机制及断层周围应力变化规律进行研究。由于采矿工程中的断层是在漫长的地质年代中逐渐形成的,有些断层还在缓慢移动中,研究断层形成的地质力学机制、断层形成过程中周围岩体运动及应力场变化规律,考虑断层形成和运动过程中断层附近构造应力对采掘活动的作用和影响尤显重要。对如何再现断层形成过程,如何实现在断层形成过程中对断层产状的控制,断层形成过程中围岩应力场如何变化、周围岩体如何响应,断层形成后周围构造应力如何分布,有待进一步深入研究。

3.2 断层对岩体采动响应的影响机制与规律

煤炭开采中,断层附近一直伴随有构造应力场的存在,构造和构造应力场对采动后周围煤岩体应力场分布和位移场演化规律具有重要影响。而大多数研究者在断层对采动应力传导作用机制研究方面,主要针对采动后周围煤岩体应力场分布和位移场演化规律进行研究,在考虑断层区域原岩应力场的基础上系统研究断层自身具有的应力场与采矿工程共同作用下区域岩体应力、变形、破坏演化规律的不多。同时在不同产状断层及开采情况下,断层对采动应力传导有何影响,何种条件下断层对采动应力传导促进亦或阻碍;采动后断层区域岩体应力场、变形场、破坏形态如何演化,亟需针对相关内容开展深入研究和探讨。

3.3 断层影响下采动致灾机理

目前针对断层影响下采动致灾机理的研究,较少考虑断层本身所具有的构造应力,研究断层区域岩体对采矿工程响应、区域岩体应力变形等演化及能量聚集释放的基础研究较少。以往研究主要基于断层特征,矿压、水压、应力、瓦斯赋存及压力等,从理论上对断层的规模、两盘的岩性组合、断层带及其胶结物特征进行分析,依据钻探、物探、化探的方法对断层突水进行研究;围绕工作面附近采动影响诱发断层失稳破坏周围应力平衡对顶板冒顶进行研究。通过实例分析、试验模拟研究及现场统计资料提出众多假说,对煤与瓦斯某些突出现象进行解释,并对突出机理进行研究。基于能量平衡,断裂力学观点,围绕开采扰动诱发冲击地压进行研究。此外,在开采过程中采动应力和断层应力相互作用下断层周围煤岩体能量如何变化;致灾后,周围煤岩体能量是否充分释放;能否从应力及能量角度解释断层致灾机理,能否建立可靠的开采灾害发生评估体系,这些内容也需要开展系列研究工作。

3.4 断层附近矿山灾害防治

在断层附近矿山灾害防治方面,大多针对各种灾害将断层与灾害相结合、以灾害为重点和核心开展研究,而利用断层特性来防治相关采矿工程灾害的研究较少。针对顶板冒顶,在巷道进行强力支护,或在工作面采用不同类型的支架支撑来防治冒顶事故发生。针对煤与瓦斯突出,通常是在断层影响带内对瓦斯进行强化抽采,降低施工过程中的瓦斯涌出量,对断层影响带内的松软煤体进行注浆加固,提高破碎带的强度,减小断层影响带煤与瓦斯突出危险性。针对冲击地压防治,以往通过深孔爆破卸压,使构造应力和集中应力缓慢释放,起到减震目的,或向高应力区注入浆液,诱发断层面的控制滑移,使滑移有控制地产生来防治冲击地压的危害。针对断层突水,主要根据经验留设足够尺寸的煤柱来预防和防治矿井水灾。而断层形成过程中煤岩原始破坏范围、采动后断层附近煤岩二次破坏程度如何;不同灾害安全煤岩柱范围是否相同、如何确定,能否利用断层特性采用不同的开采方式来预防灾害发生,有待进一步深入研究。

4 断层区域岩体采动灾变响应研究展望

4.1 断层形成地质力学机制及围岩应力分布特征

根据断层产生的地质力学成因,研制自动化、精

细化的断层与采动耦合作用下岩体响应一体化试验系统,研究不同产状的正、逆断层形成可控试验技术,断层起裂点精确控制关键技术;模拟再现断层形成过程,构建典型断层产生的地质力学模型。基于断层附近完整地层的岩层组合及特性,采用相似材料模拟和数值模拟来研究断层产生的地质力学机制;建立断层区域构造应力预测模型,研究断层周围构造应力分布特征,以断层附近原岩应力实测结果修正预测模型。

4.2 断层对采动应力阻碍及传导作用机制

对断层形成及运动过程全场应力、变形进行精细监测,根据断层区域原岩应力场分布特征、断层特征以及断层充填物组分,研究典型类型断层对采动应力传导和区域岩层裂隙扩展的作用机制,分析断层促进或抑制作用的条件和原因;综合考虑断层煤柱留设宽度、断层上下盘工作面开采顺序、煤层采厚和顶板管理方法等因素,研究采中和采后断层区域应力再分布特征。

4.3 采动应力与断层相互作用下致灾机理

研究断层产生、运动过程不同阶段应力保持、能量保存的关键实验技术;以断层对采动应力传导作用机制和采动后断层区域应力再分布特征为基础,研究采动应力与断层相互作用下断层附近岩层变形和破坏特征、岩层能量聚集释放规律;利用能量突变理论,预测断层失稳高危险区;建立断层滑移失稳灾变力学模型,探讨断层附近采动影响下典型灾害发生的工程地质力学机制,构建断层附近煤炭开采灾害发生危险评估体系。

4.4 近断层煤炭安全开采与灾害防治

综合考虑断层形成时近断层煤体原始破坏区域,以及煤层开采后采动应力与断层叠加作用下其二次破坏区域,研究典型条件下预防不同灾害的安全煤岩柱合理尺寸及上下盘煤层开采的合理时空关系;针对断层诱发不同灾害的致灾机理,研究区域煤炭开采时利用断层特性防治灾害发生的机制和方法。

5 结语

近年来,煤炭资源的开发利用取得了突飞猛进的发展,但是在煤炭开采中不可避免地发生各种灾害事故,尤其是断层引起的矿井灾害。笔者在以往断层形成机制、断层附近岩体采矿工程响应及致灾、大断层附近安全开采研究的基础上,提出了基于断

层形成和运动过程中应力场、能量场与采动相结合的方法以研究断层影响下岩体采动灾变响应,以及利用断层特性防治灾害的设想,为获得预防不同断层灾害的安全煤岩柱合理尺寸,断层附近开采致灾机理及安全防护提供新的理论基础和技术支持。研究在断层影响下岩体采动灾变响应对煤炭资源的合理、高效利用,断层灾害防治、断层保护煤柱回收等方面具有重要作用。

参考文献(References):

- [1] 文一.孙家湾煤矿“2·14”特大瓦斯爆炸:事故调查专题报道[J].安全与健康,2005(11):4~8.
WEN Yi.“2·14” gas explosion at Sunjiawan Coal Mine :accident investigation report [J].Journal of Safety and Health,2005(11):4~8.
- [2] 刘洪林,柏建彪,马述起,等.断层破碎顶板冒顶巷道修复技术研究[J].煤炭工程,2011(4):76~78,81.
LIU Honglin, BAI Jianbiao, MA Shuqi, et al. Research on repair technology of mine roadway with broken roof and roof falling in fault [J].Coal Engineering,2011(4):76~78,81.
- [3] 邢鹏飞,王恩营.煤矿断层突水问题的研究现状与展望[J].煤,2015,24(10):59~61.
XING Pengfei, WANG Enying. Research status and prospect of water inrush from faults in coal mines [J].Coal,2015,24 (10): 59~61.
- [4] 张科学,何满潮,姜耀东.断层滑移活化诱发巷道冲击地压机理研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2):12~20,64.
ZHANG Kexue, HE Manchao, JIANG Yaodong. Mechanism research of roadway pressure bump induced by fault slip and activation [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (2): 12 ~ 20,64.
- [5] ANDERSON E M.The dynamics of faulting [M].2nd Edition.Edinburgh: Oliver and Boyd,1951.
- [6] 谢仁海,渠天祥,钱光漠.构造地质学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1991.
- [7] 童亨茂,聂金英,孟令箭,等.基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律[J].地学前缘,2009,16(4):97~104.
TONG Hengmao, NIE Jinying, MENG Lingjian, et al. The law of basement preexisting fabric controlling fault formation and evolution in rift basin[J].Earth Science Frontiers,2009,16(4):97~104.
- [8] 王恩营.煤层断层形成的岩性结构分析[J].煤炭学报,2005,30(3):319~321.
WANG Enying.Lithological structure analysis in coal seam fault formation [J].Journal of China Coal Society,2005,30(3):319~321.
- [9] 魏春光,周建勋,何雨丹.岩石强度对冲断层形成特征影响的砂箱实验研究[J].地学前缘,2004,11(4):559~565.
WEI Chunguang, ZHOU Jianxun, HE Yudan. Experimental study with sandbox of the influence of rock's intensity on formation of thrusts [J].Earth Science Frontiers,2004,11(4):559~565.
- [10] 李胜强,张玲,杨晓平,等.库车坳陷东部秋里塔格背斜带的活动断层及其形成机制[J].地震地质,2016,38(2):223~239.
LI Shengqiang, ZHANG Ling, YANG Xiaoping, et al. Active faults and their formation mechanism in the east segment of qilutage anticline belt kuqa depression [J].Seismology and Geology,2016,38(2):223~239.
- [11] 李远光,梁杰锋,廖晶,等.宝北背斜逆断层形成数值模拟研究[J].断块油气田,2011,18(5):598~601.
LI Yuanguang, LIANG Jiefeng, LIAO Jing, et al. Numerical simulation research on thrust fault forming of Baobei anticline in Baolang Oilfield [J].Fault Block Oil and Gas Field,2011,18(5):598~601.
- [12] 周天伟,周建勋.南堡凹陷晚新生代X型断层形成机制及其对油气运聚的控制[J].大地构造与成矿学,2008,32(1):20~27.
ZHOU Tianwei, ZHOU Jianxun. Formation mechanism of X-pattern normal faults during late cenozoic and their impact on hydrocarbon accumulation in the nanpu sag of bohai basin [J].Geotectonica et Metallogenica,2008,32(1): 20~27.
- [13] 杨勇,汤良杰,余腾孝,等.塔里木盆地玉北三维区撕裂断层特征及形成机制[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):442~447.
YANG Yong, TANG Liangjie, YU Tengxiao, et al. Deformation characteristics and formation mechanism of tear faults in Yubei 3D Area, Tarim Basin[J].Journal of China University of Mining and Technology,2014,43(3): 442~447.
- [14] 雷光伟,杨春和,王贵宾,等.断层影响带的发育规律及其力学成因[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):231~241.
LEI Guangwei, YANG Chunhe, WANG Guibin, et al. The development law and mechanical causes of fault influenced zone [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (2): 231~241.
- [15] 王涛,王肇华,姜耀东,等.开采扰动下断层滑移过程围岩应力分布及演化规律的实验研究[J].中国矿业大学学报,2014,43(4):588~592,683.
WANG Tao, WANG Zhaohua, JIANG Yaodong, et al. Experimental study of stress distribution and evolution of surrounding rock under the influence of fault slip induced by mining [J].Journal of China University of Mining and Technology,2014,43(4):588~592,683.
- [16] 赵善坤.采动影响下逆冲断层“活化”特征试验研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(2):354~360.
ZHAO Shankun.Experiments on the characteristics of thrust fault activation influenced by mining operation [J].Journal of Mining and Safety Engineering,2016,33(2):354~360.
- [17] ATSUSHI Sainoki, HANI S Mitri. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip [J].International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2014,66(1):19~29.
- [18] 勾攀峰,胡有光.断层附近回采巷道顶板岩层运动特征研究[J].采矿安全工程学报,2006,23(3):285~288.
GOU Panfeng, HU Youguang. Effect of faults on movement of roof rock strata in gateway[J].Journal of Mining and Safety Engineer-

- ing, 2006, 23(3): 285–288.
- [19] 陈绍杰, 刘小岩, 崔海峰, 等. 大断层下盘采动对上盘煤层影响数值模拟研究 [J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(5): 7–9.
CHEN Shaojie, LIU Xiaoyan, CUI Haifeng, et al. Numerical simulation of the footwall mining effect on hanging wall coal seam in large fault [J]. Mining Research and Development, 2014, 34(5): 7–9.
- [20] 朱广安, 窦林名, 刘阳, 等. 采动影响下断层滑移失稳的动力学分析及数值模拟 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 27–33.
ZHU Guangan, DOU Linming, LIU Yang, et al. Dynamic analysis and numerical simulation of fault slip instability induced by coal extraction [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(1): 27–33.
- [21] 卢兴利, 刘泉声, 吴昌勇, 等. 断层破裂带附近采场采动效应的流固耦合分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30(S1): 165–168.
LU Xingli, LIU Quansheng, WU Changyong, et al. Hydro-mechanical coupling analysis of mining effect around fault fractured zone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S1): 165–168.
- [22] 罗浩, 李忠华, 王爱文, 等. 深部开采临近断层应力场演化规律研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 322–327.
LUO Hao, LI Zhonghua, WANG Aiwen, et al. Study on the evolution law of stress field when approaching fault in deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 322–327.
- [23] YOHEI Yukutakea, TETSUYA Takeda, AKIO Yoshida. The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 411: 188–198.
- [24] DONNELLY L J, CULSHAW M G, BELL F G. Long wall mining induced fault reactivation and delayed subsidence ground movement in British coalfields [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2008, 41(3): 301–314.
- [25] 李波, 张村, 伏映鹏, 等. 特厚煤层仰采综放工作面过断层应力分布与围岩控制 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 27–33.
LI Bo, ZHANG Cun, FU Yingpeng, et al. Stress distribution in fault zone and surrounding rock control in upward fully mechanized top coal caving face of extra thick coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 27–33.
- [26] 王宏伟, 姜耀东, 杨田, 等. 断层构造赋存条件下采动应力场分布特征研究 [J]. 煤炭工程, 2016, 48(1): 92–98.
WANG Hongwei, JIANG Yaodong, YANG Tian, et al. Study on mining induced stress distribution under faults structure [J]. Coal Engineering, 2016, 48(1): 92–98.
- [27] 潘岳, 刘英, 顾善发. 矿井断层冲击地压的折迭突变模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 43–48.
PAN Yue, LIU Ying, GU Shanfa. Fold catastrophe model of mining fault rock burst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 43–48.
- [28] 王学滨, 潘一山, 海龙. 基于剪切应变梯度塑性理论的断层岩爆失稳判据 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 588–591.
WANG Xuebin, PAN Yishan, HAI Long. Instability criterion of fault rock burst based on gradient dependent plasticity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 588–591.
- [29] 李志华, 窦林名, 陈国祥, 等. 采动影响下断层冲击矿压危险性研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 490–495, 545.
LI Zhihua, DOU Linming, CHEN Guoxiang, et al. Mechanism of fault slip induced rock burst during mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(4): 490–495, 545.
- [30] 姜福兴, 魏全德, 王存文, 等. 巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机理分析 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1191–1196.
JIANG Fuxing, WEI Quande, WANG Cunwen, et al. Analysis of rock burst mechanism in extra thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1191–1196.
- [31] 朱斯陶, 姜福兴, KOUAME K J A, 等. 深井特厚煤层综放工作面断层活化规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 50–58.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, KOUAME K J A, et al. Fault activation of fully mechanized caving face in extra thick coal seam of deep shaft [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(1): 50–58.
- [32] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 断层冲击地压失稳瞬态过程的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 812–817.
SONG Yimin, MA Shaopeng, YANG Xiaobin, et al. Experimental investigation on instability transient process of fault rock burst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 812–817.
- [33] 夏彬伟, 杨冲, 卢义玉, 等. 断层对煤层水力压裂裂缝扩展的影响 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2016, 40(1): 92–99.
XIA Binwei, YANG Chong, LU Yiyu, et al. Effect of fault on hydraulic fracture propagation in coal seam [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science, 2016, 40(1): 92–99.
- [34] 师本强, 侯忠杰. 覆岩中断层活化突水的力学分析及其应用 [J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3053–3057.
SHI Benqiang, HOU Zhongjie. Mechanical analysis of fault activation water inrush in over burden rock and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3053–3057.
- [35] RAFIQUL I M, RYUICHI S. Mining-induced fault safety of the Barapukuria Coal Mine in Bangladesh: constraints from BEM simulations [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 79: 115–130.
- [36] 张延伟. 沿断层破碎煤岩巷道支护体系优化研究 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 72–76, 166.
ZHANG Yanwei. Study on support system optimization of broken seam and rock gateway along fault [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 72–76, 166.

- [37] 李利平,李术才,石少帅,等.基于应力-渗流-损伤耦合效应的断层活化突水机制研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3295-3304.
- LI Liping, LI Shucai, SHI Shaoshuai, et al. Water inrush mechanism study of fault activation induced by coupling effect of stress-seepage-damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (S1): 3295-3304.
- [38] SJÄBERG J, PERMAN F, QUINTEIRO C, et al. Numerical analysis of alternative mining sequences to minimise potential for fault slip rockbursting[J]. Mining Technology, 2015, 121 (4): 226-235.
- [39] 卢兴利,尤春安,孙 锋,等.断层保护煤柱合理留设的数值模拟分析[J].岩土力学,2006,27(S1):239-242.
- LU Xingli, YOU Chun'an, SUN Feng, et al. Numerical simulation of rational protective pillar of fault[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (S1): 239-242.
- [40] 唐东旗,吴基文,李运成,等.断裂带岩体工程地质力学特征及其对断层防水煤柱留设的影响[J].煤炭学报,2006,31(4):455-460.
- TANG Dongqi, WU Jiwen, LI Yuncheng, et al. The features of fault zone rock mass engineering geological mechanics and its effect on leaving fault water proof pillar [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31 (4): 455-460.
- [41] 吴基文,童宏树,童世杰,等.断层带岩体采动效应的相似材料模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2007, 26 (S2): 4170-4175.
- WU Jiwen, TONG Hongshu, TONG Shijie, et al. Study on similar material for simulation of mining effect of rock mass at fault zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (S2): 4170-4175.
- [42] 易伟欣,崔钰婕.弱导水性断层防水煤柱的留设[J].河南理工大学学报:自然科学版,2015,34(1):46-52.
- YI Weixin, CUI Yujie. Setting of waterproof coal pillar on weak water conductivity fault[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2015, 34 (1): 46-52.
- [43] 施龙青,韩 进,刘同彬,等.采场底板断层防水煤柱留设研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24 (S2):5585-5590.
- SHI Longqing, HAN Jin, LIU Tongbin, et al. Study on design of safety pillar against water in rush through stope sill faults[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (S2): 5585-5590.
- [44] 翟明华,刘人太,沙 飞,等.深井工作面断层滞后突水机制与防治关键技术[J].煤炭科学技术,2017,45(8):25-31.
- ZHAI Minghua, LIU Rentai, SHA Fei, et al. Mechanism and prevention and control key technology of hysteretic water inrush from fault of coal mining face in deep underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (8): 25-31.
- [45] 孙希奎,施现院,常庆粮,等.断层影响下巷道顶板交替锚索支护体系研究[J].煤炭科学技术,2016,44(S1):1-4.
- SUN Xikui, SHI Xianyuan, CHANG Qingliang, et al. Study on alternant anchored rope support system of roadway roof under impact of faults[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (S1): 1-4.
- [46] 来兴平,郑建伟,蒋新军,等.断层破碎区域煤岩体动压影响范围确定[J].采矿与安全工程学报,2016,32(2):361-366.
- LAI Xingping, ZHENG Jianwei, JIANG Xinjun, et al. Influential range assessment of dynamic pressure in fault zone with broken rock masses[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 32 (2): 361-366.
- [47] 刘泉声,张 伟,卢兴利,等.断层破碎带大断面巷道的安全监控与稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29 (10): 1954-1962.
- LIU Quansheng, ZHANG Wei, LU Xingli, et al. Safety monitoring and stability analysis of large scale roadway in fault fracture zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (10): 1954-1962.