

张文忠. 阶梯状断层防水煤岩柱体塑性区宽度[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(3):28-33. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.005

ZHANG W Z. Study on the Width of Plastic Zone of Waterproof Coal-Rock Pillar of Stepped Faults [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(3):28-33. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.005

阶梯状断层防水煤岩柱体塑性区宽度

张文忠^{1,2*}

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司 水文地质研究所,陕西 西安 710054;2. 西安科技大学,陕西 西安 710054)

摘要:煤系地层中断层带常以阶梯、地堑状等形式出现,为研究阶梯状断层组防水煤岩柱体塑性区宽度,以邯邢矿区邢东煤矿阶梯状断层组为研究对象,基于工作面导水裂隙带发育规律,创新性地提出阶梯状断层梯形防水煤岩柱体稳定性结构力学模型,根据梯形煤岩柱体内局部岩体受力情况及其几何特征,推导出阶梯状断层防水煤岩柱塑性区破坏宽度计算公式,并针对邢东煤矿内 F23 断层与 SF27 断层组成的阶梯状断层组,通过理论分析和数值模拟,计算了阶梯状断层防水煤岩柱塑性区宽度,进一步验证了理论分析的正确性.

关键词:断层;防水煤岩柱;塑性区;阶梯状断层组;导水裂隙带

中图分类号: TU745 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2021)03-0028-06

Study on the Width of Plastic Zone of Waterproof Coal-Rock Pillar of Stepped Faults

ZHANG Wenzhong^{1,2}

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Hydrogeology Research Institute, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In coal stratum faults often appear in the form of mantle, stepped, etc. In order to study the width of plastic zone of water proof coal-rock pillar of stepped faults, taking the stepped faults in Xingdong coal mine in Hanxing mining area as the research object, based on the development regularity of the height of fractured water-conducting zone, innovatively proposed mechanical model of stability of trapezoidal waterproof coal-rock pillar of stepped faults. According to the stress and its geometric characteristics of local rock mass in trapezoidal coal-rock column, deduced the formula for calculating the failure width of plastic zone of waterproof coal-rock pillar of stepped faults. The F23 and SF27 stepped faults were studied which in Xingdong coal mine in Hanxing mining area, through theoretical analysis and numerical simulation, the width of the plastic zone of waterproof coal-rock pillar of stepped faults was calculated, further the correctness of the theoretical analysis was verified.

Keywords: fault; waterproof coal-rock pillar; plastic zone; stepped faults; water-conducting fractured zone

随着煤炭开采深度的不断加大,断层等构造密度加大,隐蔽性增强,很多突水事故是由断层引起^[1-3],而断层防水煤岩柱失稳是断层突水的一个重要原因^[4].针对该问题,许多研究人员展开了研究,主要有以

收稿日期:2019-09-03

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2017YFC0804106)

*通信作者, E-mail: zhangwenzhong@cctegxian.com

下研究成果:白矛、刘天泉^[5]采用弹性理论的复变函数法,推导出条带煤柱的垂直采动应力和塑性区宽度的表达式及煤柱宽度和开采宽度的理论计算公式;侯朝炯、马念杰^[6]利用松散介质应力平衡理论,结合应力微分平衡方程求出煤层界面应力以及煤体的应力极限平衡区宽度;胡炳南^[7]导出了任意方向弱面的剪力强度安全系数计算式,建立了顶底板通过摩擦作用施加给煤柱的等效拉应力引起的煤柱屈服区宽度变化的简化计算式;营志杰^[8]根据变形特征可以将煤柱依次区分为断层裂隙带、弹性核和屈服带三部分,利用煤层渗透性变化规律理论,确定井下各生产水平煤柱合理的留设位置;白峰青等^[9]将极限设计思想的可靠度方法引入到断层防水煤柱的可靠度设计中,提出了断层防水煤柱临界值的概念和确定原则;杜文堂^[10]使用了可靠度分析的“JC”方法,分析了水压力、煤层抗张强度及突水系数的不确定性,建立了防水煤柱可靠度分析的极限状态方程;施龙青等^[11]认为断层突水条件为煤层开采造成的底板破坏深度不小于底板高峰应力线与断层交点的深度,并在此基础上推导出采场断层防水煤柱留设计算公式;彭文庆等^[12]考虑煤柱一侧开采后形成的底板导水裂隙带位置与断层以及含水层的关系的情况下,得出了断层倾角较大和较小时的防水煤柱宽度的计算公式;宋振骥等^[13]指出留设断层煤柱应采用把开切眼布置在经相邻工作面推进,构造应力已经释放的“内应力场”中,以最短距离推过断层的方案;于秋鸽等^[14]将断层带岩体性质考虑在内,建立了断层带岩体裂隙损伤发育力学模型和断层带岩体滑移力学模型,分析了断层活化与断层带含水与否、水平应力与垂直应力比值间的关系;宋彦琦等^[15]通过制作断层模型试件,各角度预制裂纹试件初始微裂纹都发生在试件加载的1/3阶段,且裂纹起裂及扩展形式类似,扩展路径逐渐趋向于加载方向;翁剑桥等^[16]利用数值模拟方法研究了断层附近地应力变化规律,在断层附近普遍发育应力扰动带,在应力扰动带范围内,地应力方向和大小发生明显变化,中部应力普遍较低,断层端部应力值通常异常增大;李振雷、王珂等^[17-18]认为在煤层开采过程中,断层受到采动的影响,断层的稳定状态遭到破坏,断层面正应力和剪应力的变化是断层发生滑移失稳的主要影响因素;罗浩、王爱文等^[19-20]研究义马F16逆冲断层冲击矿压的影响规律表明,断层活化前,煤层开采引起覆岩运动形成高应力集中区,断层活化时,覆岩空间结构失稳、断层应力场变化与断层活化动载耦合作用导致灾变;张宁博等^[21]基于典型逆冲断层工程实例的冲击显现特征分析,建立了断层失稳的多滑块-弹簧力学模型,指出开采活动对断层的扰动呈现明显的分区性,扰动顺序是先上部、再中部、后下部;王宏伟等^[22]研究了双断层共同作用下顶板应力突变特征,提出2条断层的存在破坏了顶板的连续性,由于第1条断层的滑动,使得2条断层之间的岩层卸压,从而出现松散,裂隙横生,不规则断裂以及应力频繁突变的现象;姜耀东^[23-24]采用数值模拟和井下监测相结合法,研究了在开采扰动下断层滑移失稳过程中应力状态的演化特征;左建平^[25]通过相似模拟试验研究了深部环境下断层在工作面采动过程中的运移规律;王爱文、潘一山等^[20]通过分析开采过程中断层应力的变化特征,建立了开采诱发断层黏滑失稳的理论模型,解释了断层失稳的过程;朱斯陶等^[26]研究了深井特厚煤层断层活化规律;卢兴利等^[27]认为断层的存在使得工作面与断层带范围内的围岩应力更加集中,增大了底板破坏突水的危险性;赵毅鑫等^[28]在双轴等压加载条件下,获得了逆断层下盘煤层回采扰动下断层活化失稳特征;李博、武强等^[29]以弘财煤矿为典型案例,建立了流固耦合分析模型和Forchheimer非达西流、N-S紊流非线性渗流模型,利用数值模拟方法再现了开拓巷道富水型断层突水的动态过程,分析了突水灾变演化过程中应力场、位移场和渗流场的耦合演化规律。

可以看出,上述研究成果分析的侧重点不同,主要基于岩体极限平衡理论、极限设计思想的可靠度、矿山压力理论等研究煤柱留设宽度及稳定性,提出了防水煤柱的留设方法。

1 研究背景

邯邢矿区邢东煤矿2009年核定生产能力125万t/a,采用立井分水平开拓方式,共有-760和-980这2个水平,采用一次采全高、综合长壁采煤法采煤。含煤地层为中石炭统本溪组、上石炭统太原组和下二叠统山西组,其中2[#],2下,6[#],7[#],8[#]和9[#]煤层全区可采。邢东矿目前开采煤层为2[#]煤,煤层层位和厚度稳定,在井田内全区可采。井田发育有纵横交错的断层,不同级别的断裂构造将整个井田的含煤地层切割成一系列大小不等、形状各异的断块,各断块表现为地堑和阶梯状构造组合。其中,在井田中部F23,SF27组成了

阶梯状组合(详见图1).F23正断层:走向 $54^{\circ}\sim 72^{\circ}$,倾向SE,倾角 $40^{\circ}\sim 55^{\circ}$,落差28~102 m,区内延展长度约2 400 m.SF27正断层:走向 $26^{\circ}\sim 45^{\circ}$,倾向SE,倾角 52° ,落差0~13 m,区内延展长度约750 m.

该阶梯状组合内设计可采煤层为2[#]煤层,山西组2[#]煤层层位稳定,煤层结构单一,厚度2.65~5.48 m.2[#]煤层下距野青灰岩34.59~56.93 m,平均45.37 m.根据开采设计,阶梯状组合内布设为2228工作面,工作面宽度为165 m,煤层平均厚度3.9 m.

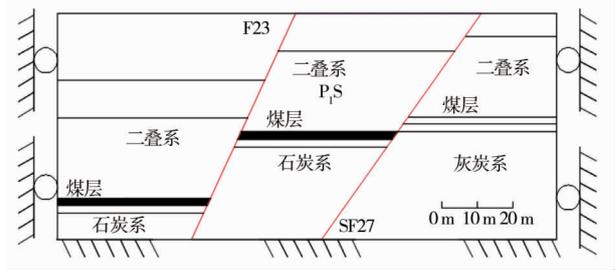


图1 F23和SF27断层组合成阶梯状

表1 F23,SF27阶梯状组合岩层岩性情况

序号	地层	岩性	实际厚度/m
1	下石盒子组(P ₁ X)	砂岩	19.83
2		粉砂岩	34.56
3	山西组(P ₁ S)	砂岩	8.05
4		2煤	3.90
5		细粒砂岩	4.00
6		砂泥岩	49.16
7	太原组(C ₃ t)	野青	2.23
8		粉砂岩	5.77

2 阶梯状断层防水煤岩柱稳定性结构力学模型

根据工作面回采顶板导水裂隙带发育规律物理模拟实验可知,工作面回采在覆岩内形成近似梯形的岩层垮落形态,在未达到充分采动前,覆岩垮落形态为一个长度和高度不断增加的梯形,达到充分采动后,覆岩垮落形态为一个长度不断增加的梯形,详见图2.

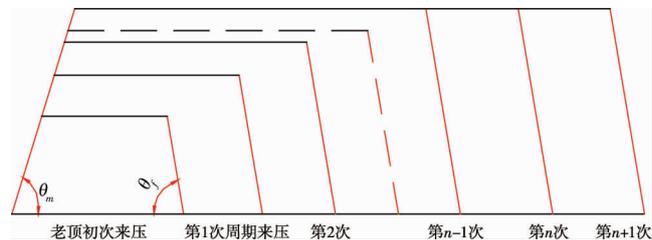


图2 导水裂隙带发育高度

覆岩内断层存在破坏了岩层介质在水平方向上的连续性,呈现出地质意义上的断块.以邢东煤矿F23,SF27断层为主要研究对象,F23断层与SF27断层在井田中部形成阶梯状组合,在阶梯状断层内由于工作面回采形成一定范围的岩层破坏,加上断层的切割作用,形成了A和B这2个梯形煤岩柱体,详见图3,A和B这2个断块相互独立,在传递应力方面,可完整传递相对于断层面的压应力、平行于断层面的剪切力和垂直于断层面的拉应力,由于断层面在断层形成时,应力得到释放,介质连续性遭到破坏,其抗剪和抗拉能力较弱,因此只能传递不超过其抗剪强度的剪应力和抗拉强度的拉应力.

覆岩内断层存在破坏了岩层介质在水平方向上的连续性,呈现出地质意义上的断块.以邢东煤矿F23,SF27断层为主要研究对象,F23断层与SF27断层在井田中部形成阶梯状组合,在阶梯状断层内由于工作面回采形成一定范围的岩层破坏,加上断层的切割作用,形成了A和B这2个梯形煤岩柱体,详见图3,A和B这2个断块相互独立,在传递应力方面,可完整传递相对于断层面的压应力、平行于断层面的剪切力和垂直于断层面的拉应力,由于断层面在断层形成时,应力得到释放,介质连续性遭到破坏,其抗剪和抗拉能力较弱,因此只能传递不超过其抗剪强度的剪应力和抗拉强度的拉应力.

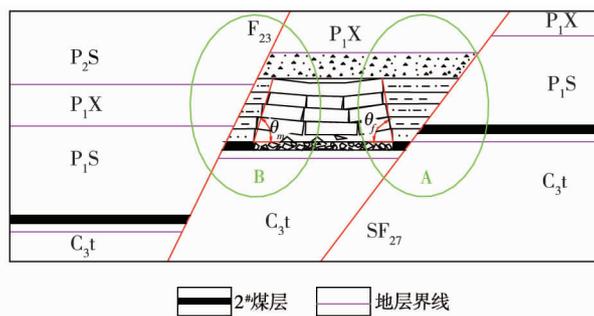


图3 采场-阶梯状断层空间结构模型

针对A和B这2个梯形煤岩柱体进行力学分析.将图3中A梯形煤岩柱体放大,A梯形煤岩柱体几何

尺寸和受力特征如图4和图5.

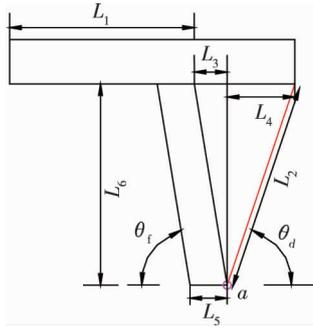


图4 阶梯状断层A梯形煤岩柱体几何尺寸

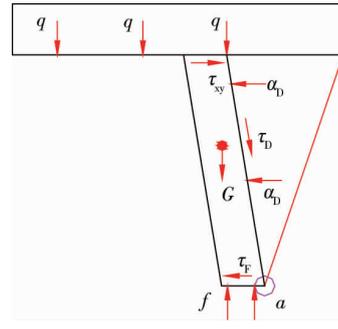


图5 阶梯状断层A梯形煤岩柱体力学模型

根据梯形煤岩柱体的受力情况,平行四边形状煤岩体处于稳定状态时,建立梯形煤岩柱体内左侧平行四边形状岩体的受力平衡方程,可知:

$$(q + \gamma_1 h_1)L_1 + G = f; \tag{1}$$

$$(q + \gamma_1 h_1)L_1(L_3 + \frac{L_5}{2}) + G(\frac{L_6}{2 \tan \theta_f} + \frac{L_5}{2}) - f \frac{L_5}{2} - \tau_{xy} L_5 L_6 - \sigma_D \frac{L_6^2}{2 \sin \theta_f} = 0. \tag{2}$$

对式(1)和式(2)进行计算可知:

$$L_5 = \frac{(q + \gamma_1 h_1)L_1 L_3 + G \frac{L_6}{2 \tan \theta_f} - \sigma_D \frac{L_6^2}{2 \sin \theta_f}}{\tau_{xy} L_6}. \tag{3}$$

将图3中B梯形煤岩柱体放大,B梯形煤岩柱体几何尺寸和受力特征如图6和图7.

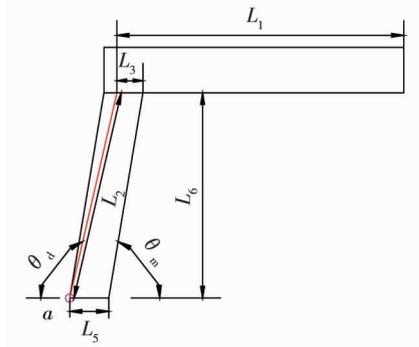


图6 阶梯状断层B梯形煤岩柱体几何尺寸

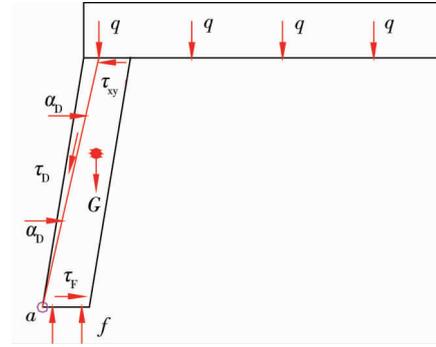


图7 阶梯状断层B梯形煤岩柱体力学模型

根据梯形煤岩柱体的受力情况,平行四边形状煤岩体处于稳定状态时,建立梯形煤岩柱体内左侧平行四边形状岩体的受力平衡方程,可知:

$$(q + \gamma_1 h_1)L_1 + G = f; \tag{5}$$

$$(q + \gamma_1 h_1)L_1(L_1 - \frac{L_6}{\tan \theta_f}) + G(\frac{L_6}{2 \tan \theta_f} + \frac{L_5}{2} + \frac{L_5 - L_3}{4}) - f \frac{L_5}{2} - \tau_{xy} L_3 L_6 - \sigma_D \frac{L_2 L_6}{2 \sin \theta_f} = 0. \tag{6}$$

对式(5)和式(6)进行计算可知:

$$L_5 = \frac{4(q + \gamma_1 h_1)L_1(L_1 - \frac{L_6}{\tan \theta_f}) + G(\frac{2L_6}{\tan \theta_f} - L_3) - 4\tau_{xy} L_3 L_6 - \sigma_D \frac{2L_2 L_6}{\sin \theta_f}}{2(q + \gamma_1 h_1)L_1 - G}. \tag{7}$$

式中:q为上覆岩层对梯形煤岩柱体的压力,MPa.

根据关键层理论,可以计算出该值的大小^[30],即

$$q = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3}.$$

式中: G 为梯形煤岩柱体内左侧平行四边形状岩体的重力, N ; τ_{xy} 为煤岩柱体顶部水平方向剪应力,MPa; τ_F 为煤岩柱体底部水平方向剪应力,MPa; τ_D 为平行四边形状岩体侧边承受的剪应力,MPa; σ_D 为断层对煤岩柱体的作用力,MPa; L_6 为导水裂隙带发育高度,m; L_5 为断层防水煤柱宽度,m; θ_f 为岩层跨落角, $^\circ$; $\gamma_n(2,3,4,\dots,n)$ 为各岩层密度, kg/m^3 ; $\gamma_n(2,3,4,\dots,n)$ 为各岩层密度, kg/m^3 ; γ_1 为主关键层密度, kg/m^3 ; $E_n(2,3,4,\dots,n)$ 为各岩层弹性模量,MPa; E_1 为主关键层弹性模量,MPa; $h_n(2,3,4,\dots,n)$ 为各岩层厚度,m; h_1 为主关键层厚度,m.

3 阶梯状断层防水煤岩柱塑性区宽度

3.1 数值模拟模型

以邢东煤矿内 F23 与 SF27 阶梯状断层和阶梯内的 2 煤 2228 工作面为研究对象,采用 FLAC^{3D} 建立三维数值计算模型如图 8 所示,分析阶梯断层内工作面回采扰动下,F23 与 SF27 阶梯状断层防水煤岩柱留设尺寸.三维数值计算模型参数设定详见表 3.根据模拟对象的尺寸,并考虑计算需要,使主要研究区域处于边界效应影响的范围外,以消除边界效应的影响,数值计算模型尺寸:宽 \times 厚 \times 高=280 m \times 300 m \times 120 m,工作面推进方向为 X 轴正方向,应变模式采用大应变变形模式,模型底部限制垂直位移,模型前后和侧面限制水平位移.整个模型由 120 300 个单元组成,包括 156 180 个节点.采用 Mohr-Coulomb 准则.

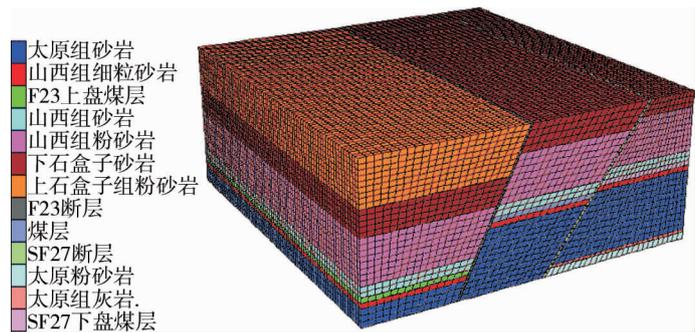


图 8 阶梯形断层组数值计算模型

表 3 断层上下盘岩体物理力学参数

岩石名称	密度/(kg/m^3)	体积模量/GPa	剪切模量/MPa	抗拉强度/MPa	黏结力/MPa	内摩擦角/($^\circ$)
砂岩	2 545	25.0	22.0	2.60	9.20	42.7
粉砂岩	2 690	26.0	13.0	1.50	6.20	41.0
细粒砂岩	2 400	28.0	30.0	3.00	11.20	42.7
灰岩	2 590	25.0	31.0	4.10	12.10	43.8
煤层	2 670	10.0	12.0	0.40	3.00	26.4
断层岩	2 560	3.2	1.2	0.27	0.85	25.0

3.2 防水煤柱留设宽度研究

根据现场 F23, SF27 断层探查工程结果,可知 F23 断层和 SF27 断层为不导(含)水断层.基于 2228 工作面钻孔综合柱状图和岩体物理力学参数,利用上行裂隙发育高度计算公式^[31],可知导水裂隙带发育高度约为 78 m,裂采比为 19.5,主关键层为埋深 969 m 的粉砂岩,厚度为 43 m.阶梯状断层内工作面宽度 165 m,2 煤层顶板岩性为中硬覆岩,岩层跨落角 θ_f 为 62° , $C_0 = 6.2$ MPa, $\phi_0 = 41^\circ$.

将上述参数代入式(3)和式(7),经过计算可知,F23 断层防水煤岩柱宽度为 26.7 m, SF27 断层防水煤岩柱宽度为 23.8 m.

当工作面达到充分采动时,阶梯内 F23 断层防水煤柱塑性破坏区宽度为 26 m; SF27 断层防水煤柱塑性破坏区宽度为 23 m.详见图 9.

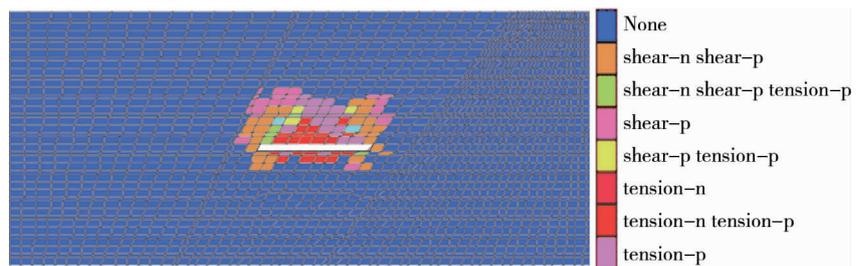


图 9 阶梯状断层组塑性区分布

根据理论计算,即式(3)和式(7)的计算结果和数值模拟分析结果,可知两者基本一致.

工作面开采留设防水煤柱时,其宽度应不小于断层防水煤柱塑性区宽度,应根据具体的地质条件来设计保护带厚度。

4 结论

1) 工作面导水裂隙带发育规律显示覆岩垮落断面形态为一个长度不断增加的梯形结构,基于该认识,创新性地提出阶梯状断层梯形防水煤岩柱体稳定性结构力学模型。

2) 利用关键层理论,分析了梯形煤岩柱体内局部岩体受力情况,并推导出阶梯状断层防水煤岩柱塑性区破坏宽度计算公式。

3) 针对邢东煤矿内 F23 与 SF27 组成的阶梯状断层组,通过理论分析和数值模拟,计算了阶梯状断层防水煤岩柱塑性区宽度,两者的计算结果基本一致,验证了理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] Daiyong C. Research on zoning of tectonic units of coal field in China[C]// 2011 AASRI Conference on Artificial Intelligence and Industry Application, 2011: 615-618.
- [2] 王则才. 肥城煤田断层突水及防治方法[J]. 煤田地质与勘探, 2005(s33): 86-88.
- [3] 冯恩杰, 付民强. 东滩矿断层活化对 3 煤顶板突水的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 4(4): 33-36.
- [4] 虎维岳. 矿山水害防治理论与方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 8-10.
- [5] 白矛, 刘天泉. 条带开采中条带中条带尺寸的研究[J]. 煤炭学报, 1983, 4(12): 19-26.
- [6] 侯朝炯, 马念杰. 煤层巷道两帮煤体应力和极限平衡区的探讨[J]. 煤炭学报, 1989, 12(4): 21-29.
- [7] 胡炳南. 条带开采中煤柱稳定性分析[J]. 煤炭学报, 1995, 20(2): 205-210.
- [8] 营志杰. 煤层渗透性变化规律在防水煤柱上的应用[J]. 江苏煤炭, 1998, 4(1): 31-32.
- [9] 白峰青, 姜兴阁, 蒋勤明. 断层防水煤柱设计的可靠度方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2000, 19(4): 356-359.
- [10] 杜文堂. 断层防水煤柱可靠度分析[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(1): 34-36.
- [11] 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.
- [12] 彭文庆, 王卫军, 李青锋. 不同断层倾角条件下防水煤柱合理宽度的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 179-186.
- [13] 宋振骥, 郝建, 汤建泉, 等. 断层突水预测控制理论研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1511-1515.
- [14] 于秋鸽, 张华兴, 张玉军, 等. 采动影响下断层活化机理及影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 18-30.
- [15] 宋彦琦, 王石磊, 孙川, 等. 断层端部裂纹扩展相似模拟试验及力学机理[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 150-156.
- [16] 翁剑桥, 曾联波, 吕文雅, 等. 断层附近地应力扰动带宽度及其影响因素[J]. 地质力学学报, 2020, 26(1): 39-47.
- [17] 李振雷, 窦林名, 蔡武, 等. 深部厚煤层断层煤柱型冲击矿压机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 333-342.
- [18] 王珂, 戴俊生. 地应力与断层封闭性之间的定量关系[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 74-81.
- [19] 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.
- [20] 王爱文, 潘一山, 李忠华, 等. 断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2486-2492.
- [21] 张宁博, 赵善坤, 邓志刚, 等. 动静载作用下逆冲断层力学失稳机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1186-1192.
- [22] 王宏伟, 姜耀东, 江灿, 等. 动压影响下双断层区域覆岩运移特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(3): 513-518.
- [23] 姜耀东, 王涛, 赵毅鑫, 等. 采动影响下断层活化规律的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 1-5.
- [24] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 等. 综采工作面过断层巷道稳定性多参量监测[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1601-1606.
- [25] 左建平, 陈忠辉, 王怀文, 等. 深部煤矿采动诱发断层活动规律[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 305-309.
- [26] 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.
- [27] 卢兴利, 刘泉声, 吴昌勇, 等. 断层破裂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.
- [28] 赵毅鑫, 王浩, 焦振华, 等. 逆断层下盘工作面回采扰动引发断层活化特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 914-922.
- [29] 李博, 武强, 班文韬. 掘进巷道富水型断层突水多场灾变演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 161-167.
- [30] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 60-63.
- [31] 张文忠, 黄庆享. 浅埋煤层局部充填开采上行裂隙发育高度研究[J]. 煤矿安全, 2014(4): 40-42.