



矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控Ⅲ：防水闸墙围岩

隋旺华

引用本文：

隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控Ⅲ：防水闸墙围岩[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 36–43.

SUI Wanghua. Catastrophic mechanism and its prevention and control of seepage deformation and failure of mining rock mass Ⅲ: a review of water retention bulkhead[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 36–43.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2138>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

动力扰动下巷道围岩变形影响因素敏感性分析

Sensitivity analysis of roadway surrounding rock deformation factors under dynamic disturbance

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ac851296-267d-486a-9085-37765f20be0f>

基于脉冲衰减法的煤岩渗透率应力敏感性研究

Study on stress sensitivity of coal rock permeability based on pulse-decay method

煤炭科学技术. 2018(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6a2db9c4-a5c6-4a45-8a31-0c43dfabda25>

重复荷载下不同饱水压力中阶煤应力敏感性研究

Study on stress sensitivity of medium rank coal reservoir with different saturated water pressure under repeated load

煤炭科学技术. 2018(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c56b9257-a547-4a9b-b200-e586e7fb3e81>

滇东黔西地区煤岩裂缝渗透率应力敏感性试验研究

Experimental study on stress sensitivity of coal and rock fracture permeability in eastern Yunnan and western Guizhou

煤炭科学技术. 2019(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d96e59e3-544e-4d03-8247-7d8c8272e30a>

突水淹没矿井动水巷道截流阻水墙建造技术研究

Study on construction technology of water blocking wall in hydrodynamic pathway of submerged mine

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 294–303 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.027>

发耳矿区煤储层敏感性对煤层气排采影响及控制对策

Influence of coal reservoir sensitivity on CBM drainage and control strategy in Faer Mining Area

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d5fc0742-68a8-400f-b22e-5be4355c747b>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控Ⅲ: 防水闸墙围岩[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 36–43.

SUI Wanghua. Catastrophic mechanism and its prevention and control of seepage deformation and failure of mining rock mass Ⅲ: a review of water retention bulkhead[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 36–43.

矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控Ⅲ: 防水闸墙围岩

隋 旺 华^{1,2}

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 矿山水害防治技术基础研究实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 分析了我国矿山防水闸墙(门)发生的渗漏失稳典型案例, 划分了渗透失稳类型; 综述了防水闸墙围岩渗透失稳判据, 推荐了防水闸墙围岩抗渗临界水力坡度的表达式; 探讨了需进一步研究的关键科学技术问题。研究表明: 防水闸墙渗透失稳可以分为 3 类, 即水压致围岩裂隙和界面渗透失稳、水压致防水闸墙围岩变形破坏失稳、水浸泡致围岩劣化失稳。针对考虑防水闸墙围岩渗流失稳的防水闸墙围岩渗透安全系数进行了参数敏感性分析, 发现围岩的岩体完整性系数、导水通道贯穿系数是主要影响因素, 在设计和施工中通过增强围岩岩体完整性以及降低围岩导水通道贯穿性是保障其抗渗稳定性的关键。初步建立了防水闸墙和围岩抗渗临界水力坡度的表达式, 考虑了岩体完整性、围岩与墙体之间的黏结强度、断层破碎带、赋存的地应力和水压环境、围岩浸水劣化性能等主控因素。参数敏感性分析表明: 主控因素均为高敏感性因素, 关键参数是岩体遇水浸泡损伤因子和导水通道贯穿系数。因此在确定抗渗临界水力坡度时要着重查明围岩的水理性质、结构面强度和水压等重要的基础资料。防水闸墙围岩组合体多场耦合条件下渗流场演变机理、防水闸墙-围岩交界面及围岩结构面渗流失稳机理及判据是亟待解决的 2 个关键科学问题。下一步应主要研究防水闸墙-围岩组合体地质模型及其赋存的地质环境演化、高压防水闸墙-围岩组合体渗透机理及失稳判据、全寿命周期安全性及稳定控制方法等。

关键词: 矿井水害; 防水闸墙; 渗透失稳; 临界水力坡度; 围岩与防水闸墙界面; 敏感性分析

中图分类号: TD12; TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)07-0036-08

Catastrophic mechanism and its prevention and control of seepage deformation and failure of mining rock mass Ⅲ: a review of water retention bulkhead

SUI Wanghua^{1,2}

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Institute of Mine Water Hazards Prevention and Control Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The types of seepage instability of water retention bulkhead are divided according to the analysis of typical cases of leakage instability of water retention bulkhead in mines in China. The seepage instability criterion of water retention bulkhead is reviewed, and an expression of the critical hydraulic gradient against seepage failure of water retention bulkhead and surrounding rocks is recommended. The scientific and technological issues that need to be further researched, and the contents and ideas that need to be tackled urgently are discussed. The results show that the seepage instability of water retention bulkhead can be divided into three categories, namely, the seepage instability of the surrounding rock fracture and the interface between bulkhead and surrounding rock due to seepage, the deformation and instability of surrounding rock and water retention bulkhead caused by water pressure, and the deterioration and instability of surrounding rock caused by water immersion. The parameter sensitivity analysis was carried out for the safety factor of the seepage stability in bulkhead and surrounding rock, and the results showed that the rock mass integrity coefficient and the water-conducting pathway penet-

收稿日期: 2022-12-07

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2138

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(42130706)

作者简介: 隋旺华(1964—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: suiwanghua@cumt.edu.cn

ration coefficient of the surrounding rock were the main influencing factors. In the design and construction, enhancing the integrity of the surrounding rock mass and improving the impermeability of the surrounding rock water pathway is the key to ensuring its anti-seepage stability. For the calculation of the critical hydraulic gradient against seepage failure of water retention bulkhead, the integrity of the rock mass, the adhesion strength between the surrounding rock and the bulkhead, the fault fracture zone, the ground stress and hydraulic environment, and the deterioration performance of the surrounding rock immersion should comprehensively be considered. The parameter sensitivity analysis shows that these factors are all highly sensitive factors, and the key parameters are the water immersion damage factor and the water-conducting pathway penetration coefficient of the rock mass; therefore, when determining the critical hydraulic gradient, it is necessary to focus on finding out the important basic data such as the hydraulic properties, the strength of structural surface strength of the surrounding rock and the water pressure applied to the retention bulkhead. The evolution mechanism of seepage field under the multi-field coupling conditions of the water retention bulkhead and surrounding rock combination, the stabilization mechanism of seepage failure at the intersection of the bulkhead-surrounding rock and the discontinuities of the surrounding rock structure are two key scientific problems that need to be solved urgently. In the next step, the geological model of the bulkhead-surrounding rock combination and its geological environment evolution, the seepage mechanism and instability criterion with high water pressure, the life-cycle safety and stability control methods should be studied.

Key words: mine water disaster; water retention bulkhead; seepage failure; critical hydraulic gradient; discontinuities between surrounding rock and bulkhead; sensitivity analysis

0 引言

国内外防水闸墙的设计和建设已经历了一个多世纪的实践和研究^[1],涉及结构形式^[2-6]、强度设计^[7-10]、渗流稳定性^[8]、选址选型、安全系数选取、规范化施工、监测等关键科学技术问题^[11-14]。我国煤炭行业现行的防水闸墙设计规范,把水压作为施加在防水闸墙迎水面上的外力,根据水压以及防水闸墙、围岩的抗压强度、抗剪强度选择防水闸墙的结构形态,计算防水闸墙的墙体厚度和嵌入围岩的深度^[4]。但在实际生产中,有许多据此设计的防水闸墙发生了挡水失效。这些失效案例表明,在墙体结构强度大多完好的情况下,首先发生在墙体与围岩交界面或围岩的薄弱地带中的渗漏,会引发围岩的破坏甚至整体失稳。事实上,高压水体除对防水闸墙形成静水压力之外,更重要的是通过裂隙和破碎带渗流进入围岩,形成流场。在水体浸泡下,围岩的强度和结构也会发生弱化和损伤,最终导致防水闸墙挡水失效甚至失稳。因此要重视从力学强度和抗渗性能两方面进行防水闸墙的设计与施工^[15]。

南非在金属矿中试验的防水闸墙,给出了3种基本类型,即平板嵌入式、平行非嵌入式和楔形嵌入式,并根据高达46.9 MPa水压的试验结果给出了防水闸墙的简单曲线^[5]。之后,虽然研究者们强调应把防水闸墙的渗漏作为高水压条件下防水闸墙稳定性和适应性设计的主要因素来考虑^[9-11],但是并未给出防水闸墙与围岩的渗流评价更详细的计算方法。

笔者团队通过流网分析、物理模拟和工程案例研究,从渗流动力学角度,提出了防水闸墙的安全系

数概念,并给出了渗流失稳的临界水力坡度表达式,表达式考虑了围岩导水通道贯穿系数、岩石渗透率和岩体完整性系数。通过分析防水闸墙挡水失效的实例,给出了安全系数的经验统计值^[16-18]。该方法对江苏三河尖煤矿21102工作面防水闸墙在7.0、8.4 MPa下的水压力分布的模拟,表明墙内水压力分布与物理模拟试验获得的规律类似^[19]。

由此可见,同时考虑力学强度和抗渗性能两方面进行防水闸墙的设计和施工虽然有了一定进展,但总体上还很不完善。因此,笔者从我国某些防水闸墙渗透失稳的案例研究出发,分析归纳渗透失稳的主要类型和机理,初步建立基于抗渗稳定性的计算原理,并在分析目前存在的主要问题基础上,提出要进一步解决的关键科学技术问题 and 研究内容,作为后续研究的参考。

1 防水闸墙渗透破坏失稳类型

表1为我国矿山部分煤矿地下防水闸墙(门)发生渗透和失稳的典型实例。现选择3种代表性的类型进行分析。

1.1 水压致防水闸墙围岩裂隙和界面渗透

防水闸墙建成后,升压过程中或结束后,围岩中的裂隙、墙体和围岩界面发生渗透或渗漏,此为表1中的类型1。表1中的大部分防水闸墙渗透变形属于此类。例如,江苏三河尖煤矿为了封堵21102工作面突水,在运输巷和轨道巷修建了承压8.32 MPa的防水闸墙,围岩为半煤岩,有石灰岩、泥岩、细砂岩和煤,软弱至坚硬,底板泥岩遇水易泥化;洞室顶板为“十二灰”石灰岩,底板为细砂岩,两侧为泥岩和煤

表 1 我国部分煤矿地下防水闸墙渗透及失稳实例

Table 1 Cases of seepage and failure of underground water retention bulkhead in coal mines

序号	矿山	位置	结构形式	墙厚/嵌入深度/m	围岩性质	注浆位置	水压/MPa	渗漏量/ (m ³ ·h ⁻¹)	类 型	建造 时间	文献
1	河南朝川三里寨1号井	上山平巷	楔形	1.5/0.5	细砂岩、砂质泥岩、砂岩	壁后	1.40		2	1976	[20]
			楔形	1.5/0.5		壁后	1.40~1.45		2		
			楔形、双闸	1.5/0.5		围岩、壁后	1.71	无			
2	江苏董庄矿	-560 m轨道下山	3段、圆柱形	5.25/0.5~1.2	砂岩、砂质页岩	围岩、壁后	4.00	2.0	1	—	[21]
3	安徽祁东矿	3 ₂₂ 工作面运输巷	倒截锥形、2段	6.50/1.1	煤层	壁后、煤层	4.40	2.0	1	2002	[22-23]
		3 ₂₂ 工作面回风巷	倒截锥形、2段	5.55/1.2	煤层	壁后、煤层	4.40	2.6	1	2002	
4	江苏三河尖矿	211102工作面	倒截锥、3段	24/2.0	石灰岩、煤、泥岩、砂岩	围岩、壁后	7.35~7.60	1.6~3.5	1	2003	[16-17, 24-25]
5	陕西董家河矿	22502工作面	楔形	5/0.8~1.7	粉砂岩、煤、砂岩	围岩、壁后、补注	0.75	少量渗漏	1	2004	[26]
6	山东新汶临汶矿(石膏矿)	4301E工作面	—	—	泥岩、页片状泥灰岩	围岩	1.80	0.5~76	1	2004	[27-29]
7	江苏白集矿	-200 m运输大巷	倒截锥、2段	5.6/1.35	砂质页岩、泥岩、砂岩	围岩、壁后	2.50	2.0~5.0补注至0	1	2007—2010	[17,30]
8	江苏韩桥矿	-200 m石门	倒截锥、2段	5.6/1.3	砂质页岩、泥岩、砂岩	围岩、壁后	2.50	13 800	3	2008	
9	河南新安矿	14区输送带下山	ESW、板形	6/0.5	岩石、煤	墙体、壁后、围岩	1.5	渗水	1	2012	[31]
10	河北昱德汪矿	四采九煤运输石门	倒截锥、闸门	7.0/1.4	细砂岩、粉砂岩或砂质泥岩	壁后、围岩	3.30	5.0	1	—	[32]
11	山东宏阳矿	东翼运输巷①	板形	3.5/0.8	石灰岩、砂岩、泥岩	壁后、围岩	3.0	86	2	2014—2015	[17]
		东翼轨道巷	板形	4.0/1.0					2		
		东翼运输巷②	板形	4.8/1.4					2		

注：“—”为不详；防水闸门结构为硐室结构。

层。该防水闸墙的主体墙 24 m, 分为 3 个倒截锥段和 2 个平直段。施工条件艰苦, 施工环境恶劣。虽然在施工中进行了壁后注浆、煤体长短管结合注浆, 但是, 当升压至 5 MPa 时, 沿着墙体和围岩的界面、岩体和煤体中的裂隙发生了渗漏, 达到 20 m³/h。后经过泄压、补注化学浆液和水泥浆液封堵了墙体与围岩接触界面和围岩中的裂隙。竣工后, 当水压升至最大值 7.6 MPa 时, 渗透量一般保持在 5 m³/h 以下。

1.2 水压致防水闸墙围岩变形破坏后渗透失稳

防水闸墙挡水升压后, 由于静水压力过大, 会造成防水闸墙及其围岩发生变形破坏, 之后造成渗透失稳, 此为表 1 中的类型 2。例如, 表 1 中河南朝川三里寨 1 号井和山东宏阳煤矿防水闸墙失效的情况。山东宏阳煤矿东翼运输巷距离“十_下灰”石灰岩约 10 m, 承受 4 MPa 水压, 在施工掘进工作面发生涌水量大于 700 m³/h 底板突水后, 在运输巷和轨道巷构建了 3 道防水闸墙, 其围岩为石灰岩、煤层、砂岩、砂质泥岩等, 抗压强度较低, 有不规则裂隙发育。石灰岩为富水性中等的岩溶裂隙承压水含水层。地质构造中

等至复杂, 受断层及次一级小断层的影响。3 道防水闸墙在进行耐压试验和注浆加固的过程中, 多次引起顶底板和两帮的严重变形、底鼓和开裂, 底鼓长度高达 17~22 m, 顶板渗水和淋水, 渗漏水量较大, 不得不放水泄压。经多次加固堵漏、施工反底拱后, 仍存在漏水现象。这种类型的破坏机理为水压过大, 造成顶底板围岩变形破坏, 接着在渗透压力作用下造成防水闸墙围岩发生渗透变形和破坏。在巷道与“十_下灰”存在密切水力联系的情况下, 必须首先解决“十_下灰”含水层的威胁, 才能解决运输巷和轨道巷的防水闸墙围岩渗漏问题。

1.3 水浸泡致防水闸墙围岩劣化损伤后渗透失稳

防水闸墙修建后, 在矿井水长期浸泡下, 围岩性质发生劣化、产生崩解膨胀, 围岩性质严重损伤, 加上水压作用, 一旦形成集中潜蚀通道, 地下水会不断冲蚀围岩, 造成通道扩张, 最后防水闸墙失去围岩支撑, 整体失稳, 此为表 1 中的类型 3。例如, 江苏韩桥煤矿-200 m 运输石门防水闸墙为重构徐州东部矿区隔水边界而建, 围岩以砂岩为主, 结构较致密, 抗压

强度 20.3 MPa。当防水闸墙承受的水压上升到 2.2 MPa, 经过较长时间的浸泡, 砂岩强度降低、渗透性能显著增强, 另外, 附近还存在隐伏构造破碎带或次生断裂, 最终导致该防水闸墙围岩渗透失稳, 短时间内溃水达 10 万 m^3 , 造成水灾。后续抢险救灾中, 通过骨料和注浆封堵该条巷道后, 堵水成功, 也佐证了该防水闸墙围岩的失效原因。

2 防水闸墙围岩渗透失稳判据及敏感性分析

2.1 等效流场及抗渗安全系数

防水闸墙围岩和界面如果形成贯穿性渗流, 其剖面等效流网如图 1 所示。

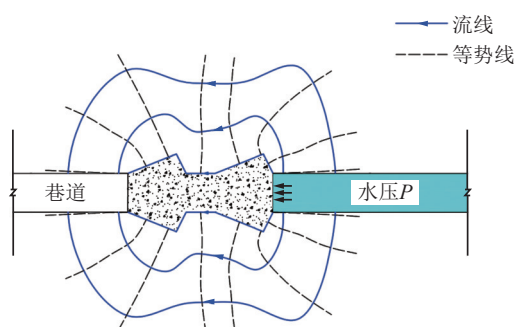


图 1 防水闸墙围岩剖面流网示意

Fig.1 Schematic profile flow net around a water retention bulkhead

当围岩中渗流稳定时, 其水力坡度可表示为

$$i_s = \frac{H}{L} \quad (1)$$

式中: L 为沿防水闸墙与围岩界面渗透路径长度, 可以取界面轮廓线的长度; H 为作用在迎水侧的水头高度, 亦即发生渗漏时迎水面和背水面的水头差。

防水闸墙发生渗透可用式(2)判断:

$$F_s = \frac{i_s}{i_{cr}} \geq F_{sc} \quad (2)$$

其中: F_s 为防水闸墙围岩抗渗安全系数; i_s 为防水闸墙围岩形成稳定渗流时的水力坡度; i_{cr} 为围岩抗渗临界水力坡度; F_{sc} 为防水闸墙围岩抗渗临界安全系数, 是采用临界水力坡度方法判别是否发生围岩渗透的指标。经过对发生和未发生渗透破坏的防水闸墙的统计^[17], 获得了 F_{sc} 约为 0.6。当 F_s 大于 0.6 时, 防水闸墙围岩将发生渗漏; 在工程设计上使用时, 还应留有一定的富余, 同时, 抗渗临界安全系数还应根据更多的防水闸墙运行资料进行不断修正。

2.2 参数敏感性分析

综合考虑影响防水闸墙围岩渗流失稳的主要因素, 围岩抗渗安全系数可以表达^[17] 为

$$F_s = \frac{m \sqrt{k}}{LK_v} \quad (3)$$

其中: m 为围岩导水通道贯穿系数; k 为围岩岩石渗透率, μm^2 ; K_v 为围岩岩体的完整性系数。针对目标函数 F_s 中所含参数, 进行敏感性分析。根据现场情况确定各研究计算参数的取值范围并设定基准值(表 2)。

表 2 围岩抗渗安全系数计算参数

Table 2 Calculation parameters of seepage-resistant safety factor of water retention bulkhead

参数	取值范围	基准值
围岩导水通道贯穿系数 m	1 ~ 7	4
围岩岩石渗透率 $k/\mu\text{m}^2$	0.05 ~ 0.15	0.1
围岩岩体完整性系数 K_v	0.3 ~ 0.85	0.56
渗透路径长度 L/m	2 ~ 30	16

由防水闸墙围岩抗渗安全系数的单因素敏感性分析(图 2), 可以发现围岩导水通道贯穿系数 m 、围岩岩石渗透率 k 越大, 围岩抗渗安全系数 F_s 变化越大, 越容易发生渗透变形; 而围岩岩体完整性系数 K_v 和渗透路径长度 L 越大, F_s 越小, 越难发生渗透变形。围岩岩石渗透率对比其他 3 个参数来说对 F_s 的影响相对较弱。

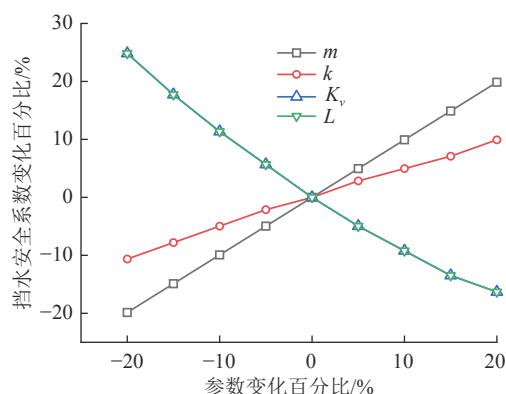


图 2 防水闸墙围岩抗渗安全系数的单因素敏感性分析

Fig.2 Univariate sensitivity analysis for safety factor against seepage through surrounding rock of water retention bulkhead

采用 Sobol 分析方法进行参数总体敏感性分析, 由各影响因素的总阶敏感性指数(表 3、图 3)可以发现, 影响围岩渗透安全系数指标从强到弱依次为围岩岩体完整性系数、围岩导水通道贯穿系数、渗透路径长度和围岩岩石渗透率。所以, 围岩岩体完整性以及围岩导水通道贯穿性是影响围岩渗透安全系数的关键。

表 3 Sobol 敏感性分析
Table 3 Results of Sobol sensitivity analysis

参数	总阶敏感性指数	置信区间
围岩导水通道贯穿系数 m	0.267	0.064
围岩岩石渗透率 $k/\mu\text{m}^2$	0.037	0.010
围岩岩体完整性系数 K_v	0.774	0.129
渗透路径长度 L/m	0.145	0.036

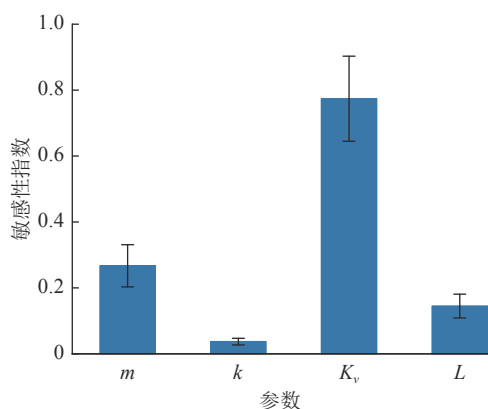


图 3 围岩渗透安全系数的 Sobol 敏感性分析

Fig.3 Sobol sensitivity analysis for anti-seepage safety factor

3 讨 论

3.1 关键科学技术问题及解决思路

防水闸墙作为矿山水害防控的关键技术之一被广泛应用,但对防水闸墙的赋存地质条件和地质环境等缺乏定量表达,选址和设计的基础还基本停留在定性层面。亟待解决的主要问题有:

1)定量表达与防水闸墙稳定性有关的各种地质结构性质,并建立防水闸墙-围岩组合体的工程地质模型,是科学设计防水闸墙亟待解决的问题之一。防水闸墙选址主要依据对地质条件、岩性组合、水文地质条件等资料的定性分析,防水闸墙的设计依据也以定性地质条件描述为主,适当考虑围岩的力学强度。针对煤系岩石复杂的岩体结构、软硬相间的岩性组合、发育在煤岩中的结构面、卸荷裂隙、断层影响、赋存的地应力、地温、地下水等环境条件,都缺乏定量的描述,导致在防水闸墙类型选择、结构设计、材料使用等方面缺乏地质依据,对防水闸墙稳定性控制措施,诸如壁后注浆改造或锚固围岩等也缺乏定量依据。

2)充分考虑高压渗透条件下墙体和围岩及其接触面的抗渗透性能、墙体和围岩强度遇水软化弱化的程度、发生渗漏的围岩的临界水力坡度等,建立考虑渗透变形的防水闸墙稳定性计算方法,提高防水

闸墙挡水的安全性能,是亟待解决的另一问题。防水闸墙设计原理仍停留在固体力学和结构力学基础上,虽然在渗透型变形方面取得了一定的进展,但是防水闸墙-围岩组合体的渗透失稳机理这一核心问题未得到重视。目前规范采用的防水闸墙计算公式,将水压看作是一个施加在防水闸墙迎水面上的外力,进一步求解出防水闸墙的墙体厚度和嵌入围岩深度。然而防水闸墙挡水失效的案例表明,墙体结构大多完好,上文分析了主要的渗透破坏类型,这几种破坏的机理在现有设计计算方法中都没有体现。

针对上述问题,在今后的科研和开发中应重点解决 2 个关键科学问题:①防水闸墙-围岩组合体多场耦合条件下渗流场演变机理;②围岩结构面、防水闸墙-围岩交界面渗流失稳机理及判据。第 1 个问题通过揭示防水闸墙-围岩组合体与高压水之间相互作用的渗透机理,明确高压水及绕流作用对防水闸墙-围岩组合体稳定性的控制作用,建立围岩渗透失稳的力学模型,对于预测和控制灾变的发生具有重要意义。第 2 个问题针对防水闸墙-围岩组合体渗透失稳的主要通道,包括围岩原生结构面、卸荷结构面、防水闸墙与围岩交界面等,揭示其渗透失稳的机理,建立失稳判据,为建立以渗透稳定性为基础的防水闸墙设计原理奠定基础。

为了解决以上问题,可以从以下 3 个方面开展研究:①防水闸墙-围岩组合体地质模型及其赋存的地质环境演化。具体包括防水闸墙-围岩组合体工程地质模型概化;防水闸墙-围岩组合体物质-结构地质力学性质演化;防水闸墙-围岩组合体赋存地质环境的演化等。②防水闸墙-围岩组合体渗透机理及失稳判据。具体包括防水闸墙-围岩组合体多场耦合演化;防水闸墙-围岩组合体导水通道形成及贯穿机理;防水闸墙-围岩接触面、围岩结构面的抗渗透稳定性;防水闸墙-围岩组合体渗透失稳模式及主控因素等。③防水闸墙-围岩组合体全寿命周期安全性及稳定控制方法。具体包括防水闸墙-围岩组合体全寿命周期安全性及耐久性指标体系;防水闸墙运营和失效对矿区地下水环境影响过程与机理;防水闸墙-围岩组合体稳定性控制原理和方法;防水闸门的快速构建技术;防水闸墙-围岩组合体耦合建造技术;防水闸门的智能化控制技术等。

3.2 抗渗临界水力坡度

防水闸墙(门)挡水过程中可能产生渗漏的途径有围岩体内部结构面、围岩与防水闸墙的接触界面、排水管与水闸墙体的接触界面、水闸门和洞室混凝

土及接触界面等^[5,9]。防水闸墙抗渗临界水力坡度可以通过以下3个途径确定：从已有防水闸墙渗透失稳的统计值得推得；通过防水闸墙升压试验获得；根据防水闸墙和围岩岩体结构特征等进行估算得到。

防水闸墙围岩抗渗临界水力坡度的影响因素包括围岩岩体的完整性，围岩与墙体之间的黏结强度，围岩松动圈的大小，断层破碎带的影响，地应力、水压、围岩的浸水劣化性能等。

考虑量纲统一，初步提出式(4)供进一步研究参考：

$$i_{cr} = \alpha \frac{GSI K_v \tau}{mD P} \quad (4)$$

其中：GSI为地质强度指标； K_v 为围岩岩体完整性系数； τ 为围岩与墙体之间的抗剪强度； m 为围岩导水通道贯穿系数； D 为岩体的遇水浸泡损伤因子； P 为作用在防水闸墙上的水压力； α 为待定系数。其中，地质强度指标反映了岩体强度特点；岩体完整性系数反映了岩体结构特征及完整程度；岩体导水通道贯穿系数是反映断裂带发育、松动圈范围的修正系数，可以根据统计综合分析确定；岩体的遇水浸泡损伤因子可以通过循环崩解试验获得；围岩与墙体之间的抗剪强度可以通过试验获得。参数敏感性分析(图4)表明，各参数的敏感性指数均大于0.01，其中2个最主要因素为岩体的遇水浸泡损伤因子 D (代表围岩的水稳性)和导水通道贯穿系数 m (代表围岩裂隙、围岩和防水闸墙界面导水性能)，因此，选择水稳性好的岩体作为防水闸墙修建地段，通过注浆等措施封堵围岩裂隙、围岩和墙体之间裂隙等，是提高防水闸墙围岩抗渗能力的关键。在设计之前，需要查清围岩岩体结构、完整性、水理性质、结构面强度和水压等重要基础资料。

需要指出的是，文章综述和研究主要针对目前

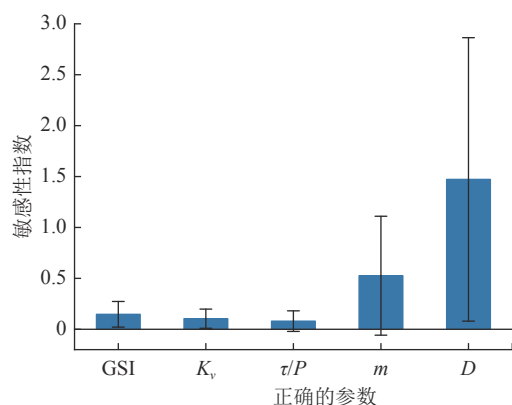


图4 临界水力坡度的Sobol敏感性分析

Fig.4 Sobol sensitivity analysis for critical hydraulic gradient

在防水闸墙设计中在渗透变形失稳方面考虑不足提出的，建议在以往以固体力学为主的设计规范和方法基础上，增加考虑渗透稳定性方面的考虑，完善矿山防水闸墙设计和施工方法。

4 结 论

1)对我国矿山防水闸墙(门)发生的渗漏失稳典型案例的分析表明，其渗透失稳机理和模式可以分为3类，即水压致围岩裂隙和界面渗透失稳、水压致围岩和防水闸墙变形破坏失稳和水浸泡致围岩劣化失稳。

2)在综述了防水闸墙渗透失稳判据研究进展的基础上，针对考虑防水闸墙围岩渗流失稳的防水闸墙围岩渗透安全系数进行了参数敏感性分析，结果表明，围岩岩体完整性和导水通道贯穿性是主要因素，在设计和施工中通过注浆加固等手段增强围岩完整性、封堵导水通道保障其抗渗稳定性。

3)初步建立了防水闸墙围岩抗渗临界水力坡度的表达式，考虑了围岩岩体的完整性、围岩与墙体之间的黏结强度、围岩松动圈和断层破碎带、地应力、水压、围岩的浸水劣化性能等的影响。参数敏感性分析表明，在确定抗渗临界水力坡度时要着重查明围岩的岩体结构、完整性、水理性质、结构面强度和水压等重要基础资料。

4)分析了目前防水闸墙研究设计存在的主要问题，指出了关于防水闸墙需要研究的关键科学和技术问题及主要内容，包括：防水闸墙-围岩组合体地质模型及其赋存的地质环境演化、防水闸墙-围岩组合体渗透机理及失稳判据、防水闸墙-围岩组合体全寿命周期安全性及稳定控制方法。

致谢：2016年笔者曾在《煤炭科学技术》发表了关于煤矿防水闸墙的综述文章^[15]。本文从渗透变形的角度进一步综述了防水闸墙渗漏失稳的类型、机理，作为近期系列论述矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控的系列论文之一^[33-34]。祝愿《煤炭科学技术》越办越好，在引领煤炭科技进步和宣传我国科技工作者成果方面取得更大成就！感谢中国矿业大学杭远博士所作的工作，感谢梁晋熙博士研究生在敏感性分析方面提供的帮助，感谢姚鑫海、梁龙飞硕士研究生在论文编辑过程中给予的帮助。感谢审稿专家提出的宝贵修改意见！

参考文献(References):

[1] DOUGLAS A. History of the development and deployment of the

- parallel sided mortar intrusion concrete watertight bulkhead in underground mines[J]. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2006, 106(5): 311–316.
- [2] 杨思光,王继承,杨家华,等. 煤层巷道高压水闸墙的设计与施工[J]. *煤炭科学技术*, 2004, 32(5): 1–4.
- YANG Siguang, WANG Jicheng, YANG Jiahua, *et al.* Design and construction of high pressure water gate wall in seam gateway[J]. *Coal Science and Technology*, 2004, 32(5): 1–4.
- [3] 关永强. 水闸墙在高承压松软煤巷特大突水治理中的应用[J]. *煤矿安全*, 2014, 45(2): 115–118.
- GUAN Yongqiang. The application of floodgate wall in special large water inrush control of high pressure and soft coal roadway[J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(2): 115–118.
- [4] GB 50416—2017, 煤矿井下车场及硐室设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [5] GARRETT W, CAMPBELL L. Tests on an experimental underground bulkhead for high pressures[J]. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1958, 59(3): 123–143.
- [6] AULD F. Design of underground plugs[J]. *International Journal of Mining Engineering*, 1983(1): 189–228.
- [7] AKGUN H, DAEMEN J. Design implications of analytical and laboratory studies of permanent abandonment plugs[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(1): 21–38.
- [8] UDDIN N. Stabilization and closure design of a salt mine[C]. *Grouts & Grouting*, 2004.
- [9] GARRETT W, CAMPBELL L. Design and construction of underground bulkheads and water barriers[C]//*Transactions of the Seventh Commonwealth Mining and Metallurgical Congress*, South African Institute of Mining and Metallurgy, 1961.
- [10] SAMUEL P, HARTEIS P, DOLINAR D, *et al.* Guidelines for permitting, construction, and monitoring of retention bulkheads in underground coal mines[S]. Pittsburgh, PA. U. S. : Department of Health and Human Services, 2008.
- [11] HARTEIS S, DOLINAR D. Water and slurry bulkheads in underground coal mines: design, monitoring and safety concerns[J]. *Mining Engineering*, 2006, 58(12): 41–47.
- [12] MUTTON V S, REMENNIKOV A M. Design of water holding bulkheads for coal mines [C]. 2011 Underground Coal Operators' Conference, 2011: 257–268.
- [13] BIRCH K J, LO K Y. Increasing the interface strength of concrete dams on rock foundations by strength grouting[C]. *Canadian Dam Safety Conference*, Niagara Falls, Ontario, 1996.
- [14] 王 昕,高保彬,吴洋洋. 主焦煤矿防水闸墙设计方案研究[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(11): 16–20.
- WANG Xin, GAO Baobin, WU Yangyang. Design scheme of water-proof gate wall in main coking coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(11): 16–20.
- [15] 隋旺华,杭 远. 煤矿水闸墙设计施工技术综述与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(8): 7–13.
- SUI Wanghua, HANG Yuan. Review and prospect on design and construction technology of mine water bulkhead[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(8): 7–13.
- [16] SUI W H, LIU J Y, YANG S G, *et al.* Hydrogeological analysis and salvage of a deep coalmine after an underground water inrush[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(4): 735–749.
- [17] 杭 远. 煤矿水闸墙围岩渗流机理及失稳判据[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- HANG Yuan. Mechanism and failure criterion of seepage in surrounding rocks of water retention bulkheads in coal mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [18] HANG Yuan, SUI Wanghua, YUAN Shichong. Experimental investigation of the seepage failure between bulkheads and surrounding rocks in deep underground mines[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(9): 362.
- [19] 王 海. 基于ADINA的高压水闸墙渗流稳定性分析[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(10): 228–230.
- WANG Hai. Research on seepage stability of high pressure water wall based on ADINA[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(10): 228–230.
- [20] 黄传立,尹显志. 构筑水闸墙堵水[J]. *煤炭科学技术*, 1979, 7(7): 20–22.
- HUANG Chuanli, YIN Xianzhi. Building a water retention bulkhead[J]. *Coal Science and Technology*, 1979, 7(7): 20–22.
- [21] 汤志高,于 强,王春林,等. 抗高压水闸墙的设计与施工[J]. *江苏煤炭*, 1999(1): 44–45.
- TANG Zhigao, YU Qiang, WANG Chunlin, *et al.* Design and construction of anti-high pressure water retention bulkhead[J]. *Jiangsu Coal*, 1999(1): 44–45.
- [22] 陈廷学. 祁东煤矿3₂₂突水工作面高压煤巷防水闸墙施工技术[J]. *煤矿开采*, 2003, 8(4): 68–69, 80.
- CHEN Tingxue. Construction technique of water proof dam in water-burst Face No 3₂₂ of the east mine in Qidong[J]. *Coal Mining Technology*, 2003, 8(4): 68–69, 80.
- [23] 周洪停. 煤巷高压防水闸门(墙)硐室设计与施工[J]. *山西煤炭*, 2004, 24(1): 44–45, 48.
- ZHOU Hongting. Design and construction of water proof sluice-gate(wall) chamber in high pressure coal lane[J]. *Shanxi Coal*, 2004, 24(1): 44–45, 48.
- [24] 陈忠胜,杨思光,张成银. 三河尖煤矿21102面底板奥灰特大突水原因及治理[J]. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(2): 44–46.
- CHEN Zhongsheng, YANG Siguang, ZHANG Chengyin. The reason of Ordovician Karst water burst into 21102 working face and its control method in Sanhejian Coal Mine[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2005, 33(2): 44–46.
- [25] 裴道奇,陈忠胜. 旗山煤矿“2·6”突水灾害综合治理及长效防范[J]. *煤炭科技*, 2013, 136(4): 128–130.
- PEI Daoqi, CHEN Zhongsheng. Qishan Coal Mine “Feb. 6” flood disaster comprehensive management and long-term prevention[J]. *Coal Science and Technology Magazine*, 2013, 136(4): 128–130.
- [26] 齐蓬勃. 煤层中防水闸墙渗漏治理技术[J]. *陕西煤炭*, 2010, 29(6): 96–97.
- QI Pengbo. Water retention bulkhead leakage control technology in coal seam[J]. *Shaanxi Coal*, 2010, 29(6): 96–97.
- [27] 柴贵生,王贯东,耿 林. 浅谈4301E工作面防水闸墙漏水封堵技术[J]. *科技情报开发与经济*, 2007(36): 278–279.

- CHAI Guisheng, WANG Guanlin, GENG Lin. Talking about the plugging technologies for the leakage prevention of water proof sluice- wall in 4301E working face[J]. Sci-tech Information Development & Economy, 2007(36): 278-279.
- [28] 苏兴奎. 临汶石膏矿新招防治水[N]. 中国建材报, 2006-03-06(2).
- SU Xingkui. Linwen gypsum mine new tricks to prevent and control water[N]. China National Building Materials News, 2006-03-06(2).
- [29] 孙德忠. 压条注浆在动水注浆堵水中的应用[J]. 现代矿业, 2012, 27(9): 124-126.
- SUN Dezhong. Application of strip grouting in moving water grouting and water plugging[J]. Modern Mining, 2012, 27(9): 124-126.
- [30] 王世金. 短深孔注浆堵水加固技术[J]. 能源技术与管理, 2010(6): 69-70, 158.
- WANG Shijin. Reinforcement technology of short and deep hole grouting and water plugging[J]. Energy Technology and Management, 2010(6): 69-70, 158.
- [31] 贺志强. 矿井应急控水系统技术研究[R]. 洛阳: 河南大有能源股份有限公司新安煤矿, 2013.
- HE Zhiqiang. Research on mine emergency water control system technology[R]. Luoyang: Xin'an Coal Mine of Henan Dayou Energy Co, Ltd, 2013.
- [32] 石计群. 显德汪矿四采区防水闸门设计与施工[J]. 今日科苑, 2014, 295(5): 115.
- SHI Jiqun. Design and construction of water retention bulkhead in the four mining areas of the Xiandewang Mine[J]. Modern Science, 2014, 295(5): 115.
- [33] 隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控I: 顶板溃水溃砂[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 903-921.
- SUI Wanghua. Catastrophic mechanism and its prevention and control of seepage deformation and failure of mining rock mass I: a review of water-sand mixture inrush from seam roof[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 903-921.
- [34] 隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控II: 底板突水[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1849-1866.
- SUI Wanghua. Catastrophic mechanism and its prevention and control of seepage deformation and failure of mining rock mass: II: a review of water inrush from seam floor[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(6): 1849-1866.