

涡北矿四含及风化带临界水力坡度计算

张丽雯

安徽理工大学, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年5月30日; 录用日期: 2022年7月1日; 发布日期: 2022年7月8日

摘要

研究以涡北矿为例, 采用钻孔岩体样品实验室测试等方法, 通过对涡北矿研究区三隔水文地质特征及隔水性、四含水文地质特征及富水性、基岩风化带水文地质特征进行分析, 进而判定四含及风化带渗透破坏类型, 采用计算公式法和力学分析法等五种方法计算临界水力坡度, 得出结论: 矿井四含富水性、渗透性差; 风化带岩石的隔水性和再生隔水能力良好; 四含溃砂相对危险临界水力坡度 $J_{cr} = 1.42$, 风化带溃砂相对危险临界水力坡度 $J_{cr} = 1.62$ 。

关键词

涡北矿, 四含, 风化带, 水力坡度

Calculation of Critical Hydraulic Slope of Four Containing and Weathered Zone in Guobei Mine

Liwen Zhang

Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 30th, 2022; accepted: Jul. 1st, 2022; published: Jul. 8th, 2022

Abstract

Taking the Guobei Mine as an example, the study uses methods such as laboratory testing of drilled rock samples. Through the analysis of the hydrogeological characteristics of the third aquifuge and the water-resisting property, the hydrogeological characteristics of the four containing and the water-rich property, and the hydrogeological characteristics of the bedrock weathering zone in the study area, the seepage failure types of the four aquifers and the weathering zone are de-

terminated, and the critical hydraulic gradient is calculated by using the calculation formula method and the mechanical analysis method. It is concluded that the four containing has poor water-richness and permeability; the rock in weathering zone has good water-resisting and regeneration water-resisting ability; the relative dangerous critical hydraulic gradient of sand burst in four containing is $J_{cr} = 1.42$, and the relative dangerous critical hydraulic gradient of sand burst in weathering zone is $J_{cr} = 1.62$.

Keywords

Guobei Mine, Four Containing, Weathering Zone, Hydraulic Gradient

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国煤炭开采过程中, 矿井水害事件时有发生, 松散含水层作为井下水害源头而发生的煤层顶板突水事故曾多次造成矿井的财产损失, 故松散层底面至煤层开采上限间留设的安全煤岩柱能起到隔绝开采煤层与煤系地层上覆松散层的作用, 留设安全防砂(塌)煤岩柱高度的研究直接关乎矿井安全原则, 在生产科研方面有重要的指导意义。根据 2018 年 9 月 1 日起施行的《煤矿防治水细则》第八十七条规定“留设防砂(塌)煤(岩)柱开采, 应当结合上覆土层、基岩风化带的临界水力坡度, 进行抗渗透破坏评价, 确保不发生溃水和溃砂事故” [1] [2] [3]。国内外学者对采煤渗透破坏方面做了很多研究, 例如隋旺华等学者通过室内试验方法对近松散层采煤覆岩垮落带和裂缝带进行研究, 分析水砂突涌的机制, 探讨松散层发生渗透变形与各种因素的关系, 得到的临界水力坡度及突水溃砂的影响因素对松散含水层下煤炭安全开采具有普遍借鉴意义[4] [5]。

然而, 关于涡北矿四含及风化带渗透破坏方面的研究暂时较少, 此次研究以涡北矿为例, 采用钻孔岩体样品实验室测试等方法, 通过对涡北矿研究区三隔水文地质特征及隔水性、四含水文地质特征及富水性、基岩风化带水文地质特征进行分析, 采用计算公式法和力学分析法等五种方法计算临界水力坡度, 以期对煤炭安全开采提供理论支持。

2. 研究区概况

淮北矿业股份有限公司涡北煤矿在淮北平原的西部, 位于安徽省亳州市涡阳县, 涡北煤矿中心南距县城 4 km 远。主、副井和回风井 3 个井筒, 其井口坐标(1980 坐标系统)为 $X = 714399.972$, $Y = 39425315.022$; 回风井的井口坐标是 $X = 3714507$, $Y = 39425235$ 。涡北煤矿在形状上近似矩形, 从南部的 F9 断层开始到北部的刘楼断层结束, 距离长约 6 km, 东部从太原组的第一层灰岩顶面的隐伏露头线开始到西部的 32 煤层-1000 m 水平等高线的地面投影线结束, 距离长约 3.2 km。矿井浅部的松散层按其岩性组合特征及区域水文地质剖面对比, 自上而下可划分为四个含水层(组)和三个隔水层(组)。除第四含水层(段)直接覆盖在煤系之上外, 新生界第一、二、三含水层(组)之间分别对应第一、二、三隔水层(组)分布。

3. 涡北矿水文地质特征

根据全矿井钻孔资料分析得, 涡北矿松散层厚度为 352.34~445.4 m, 平均厚度约为 404.70 m, 分布较均匀, 变化不大。松散层厚度较大, 分布较稳定, 西部相对较厚, 东部相对较薄。本矿煤系地层均被

新生界松散层覆盖，松散层是自东向西厚度逐渐增加，厚度主要由古地形控制。

3.1. 三隔水文地质特征及隔水性

涡北矿全矿井三隔底板埋深 374.80~442.20 m，平均 400.40 m。根据全矿井钻孔统计分析，三隔厚度为 59.9~146.44 m，平均厚度约为 98.23 m。全矿井及矿井浅部地区均西部三隔厚度较厚，由西向东厚度逐渐变薄，但总体均匀，变化不大。三隔的粘土与砂质粘土，土粒比重均在 2.74~2.76 g/cm³ 左右，液限 50.1~54.2，塑限 24.2~26.3，塑性指数为 25.4~27.9，液性指数均小于 0，以上结果表示土体处于干板结状态，隔水层较稳定，隔水性较好，可有效阻隔三含及上部含水层水对煤矿安全开采的影响[6]。

三隔作为矿区里重要的隔水层，厚度大，分布稳定，具有良好的可塑性、隔水性和较强的膨胀性，使其上面的地表水等与下面四含及煤系砂岩裂隙水的水力联系被切断。

3.2. 四含水文地质特征及富水性

矿井存在四含区的厚度范围为 0.5~27.56 m，平均厚度 4.85 m。2018-13 孔附近最厚，达 27.56 m，全矿井四含沉积厚度较小，分布不稳定，矿井的中部相对较厚，煤层露头处较薄。浅部区四含主要分布在矿井北部，而南部无四含揭露，这对南部地区浅部煤层开采带来有利条件。根据四含土样采样的粒度情况，采用了筛分法和比重计法对颗粒分析砂土样进行了试验测试，本次处理的数据来自 8201 外风巷四含疏水孔和 2020 奥灰观 3 两个孔资料，两孔均位于矿井浅部，具有一定的代表意义，如表 1 所示[7]。

Table 1. Results of particle size analysis of four sand-bearing layers

表 1. 四含砂层粒度分析成果

岩性	孔号	砾粒含量 (%)	砂粒含量 (%)	细粒含量 (%)	d_{60}	d_{30}	d_{10}	C_u	C_c
四含粉砂	8201 外风巷四含疏水孔	0	77.6	22.4	0.18	0.1	0.03	6	1.85
四含细砂	8201 外风巷四含疏水孔	1	69.4	29.6	0.25	0.075	0.02	12.5	1.125
四含砾石	2020 奥灰观 3	60	13.5	26.5	2.1	0.3	0.015	140	2.86
四含平均值		20.33	53.5	26.17	0.84	0.16	0.02	52.83	1.95

四含细粒含量约占 26.17%，砂粒含量约占 53.5%，砾粒含量约占 20.33%。四含砂层满足土的级配不均匀系数 $C_u \geq 5$ ，且级配曲率系数大部分符合 $C_c = 1\sim 3$ 的条件，属于级配良好的土，砂性土含量有相当数量的粉粘粒成分，这些反映出研究区四含富水性、渗透性差的特点。

涡北矿自 2009 年以来共有 3 个钻孔对四含进行抽(注)水试验，据矿井内 06 观 1 孔和 07 观 1 四含抽水试验材料，按规程修订后的单位涌水量 $q = 0.00034\sim 0.0016$ L/s·m，为弱富水的含水层，给边采边疏提供了十分有利条件；且其渗透系数较小($K = 0.0013\sim 0.056$ m/d)，流动性较差。因此，其接受补给量是相当有限且缓慢的，储水系数位于 $2.80 \times 10^{-5}\sim 7.07 \times 10^{-5}$ 之间，平均值为 4.935×10^{-5} ，表明其贮水性能较差。以上数据为实现薄基岩浅埋煤层的绿色开采提供重要保障。

3.3. 基岩风化带水文地质特征

涡北矿风化带厚度约 1.43~50 m，平均厚度为 22.13 m，矿井西北部基岩风化带较厚，南部风化带厚

度要薄，总体上本矿内基岩风化带厚度分布不均匀。矿井内风氧化带内基岩地层岩性主要有泥岩、粉砂岩、细砂岩，岩石中存在的粘土矿物大多是高岭石和蒙脱石，岩石中碎屑矿物成分石英为主要成分。煤层露头风化带内直接顶板多为泥岩及粉砂岩，顶板抗压强度为 5.682~18.818 MPa，为软岩。位于基岩风化带内部的岩石有着较大的抗压强度降幅，抗压强度经过降低后，粘结力变小，内摩擦角变小，塑性增强。风化岩石孔隙比在 0.09~0.12 之间，处于密实状态，同时塑性指数一般大于 10，表明风化后的岩石泥化程度得到一定程度的增强且具有一定的可塑性，风化带岩石的隔水性和再生隔水能力良好[8]。

强风化岩石浸水泥化或松散，为分析其粒度特征，采集自 2020-11 和 2020 奥灰观 3 两个孔的强风化岩石样品，两孔均位于浅部，具有一定的代表意义，共 4 个强风化带类样品，进行筛分实验，求得所有样品的风化带砂层的不均匀系数和曲率系数。计算结果见表 2，风化带细粒含量约占 37.33%，砂粒含量约占 59.01%，砾粒含量约占 3%。

Table 2. Analysis of particle size of strongly weathered rocks
表 2. 强风化岩石粒径分析表

岩性	孔号	砾粒含量 (%)	砂粒含量 (%)	细粒含量 (%)	d_{60}	d_{30}	d_{10}	C_u	C_c
风化粉砂岩	2020-11	4.6	58.6	36.8	0.13	0.06	0.02	6.5	1.5
风化泥岩 1	2020-11	1.1	60.1	38.8	0.12	0.06	0.02	6	1.5
风化泥岩 2	2020-11	1.6	60.9	37.5	0.13	0.06	0.02	6.5	1.5
风化细砂岩	2020 奥灰观 3	4.7	56.7	36.2	0.12	0.05	0.02	6	1.04
风化带平均值		3	59.01	37.33	0.125	0.0575	0.02	6.25	1.385

4. 临界水力坡度确定

渗透破坏系指岩土体在渗流作用下，主要表现为整块或颗粒发生移动或其颗粒成分发生改变的作用和现象，这样就会在水流出口处出现涌砂、溃砂。对于无粘性及凝聚力较小的砂土，渗透破坏可在天然条件下发生，而对于弱胶结疏松砂岩体来说，只有在一定的工程作用下，地下水的渗透速度或水力坡度达到一定大小时，岩土体才开始表现为整体或颗粒移动，从而导致岩土体变形或破坏。这个一定大小的渗透速度或水力坡度称之为临界渗透速度或临界水力坡度，二者象征着岩土体具有一定的“抗渗强度”[9]。

对于临界水力坡度的求法主要有两种，一是通过试验，积累资料，绘制临界水力坡度与某些因素的关系曲线；另一种方法是根据单个颗粒在含水层中的受力情况，从理论上分析，推导出临界水力坡度的计算公式。

4.1. 计算公式法

4.1.1. 太沙基公式[10]

根据单元体积的土体在水中的重量浮容重与作用在土体的动水压力相平衡，得到 Terzaghi 的渗流临界水力坡度方法，太沙基公式一般适用于不均匀系数 $C_u < 5$ 的土，不考虑土体颗粒的摩擦影响：

$$J_{cr} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) (1 - n) \quad (1)$$

式中： γ_s ——土粒容重； γ ——水的容重； n ——孔隙率，风化带取 0.15，四含取 0.29。

其中，风化带 $\gamma_s/\gamma = 2.788$ ，四含 $\gamma_s/\gamma = 2.775$ ，由式(1)估算的风化带临界水力坡度为 1.52，估算的四含临界水力坡度为 1.25。

4.1.2. 扎马林公式[11]

考虑到砂层具有一定的粘结程度，在地下水由下向上流动时，采用扎马林公式，扎马林多次实验证明太沙基公式计算出的临界水力梯度值受泊松比的影响较大，一般小于实验值，故扎马林在 Terzaghi 的基础上，对公式进行了相关修正，一般适用于不均匀系数 $C_u > 5$ 的土，采用下面修正式：

$$J_{cr} = \left(\frac{r_s}{r} - 1 \right) (1-n) + 0.5n \quad (2)$$

由式(2)估算的风化带临界水力坡度为 1.60，四含临界水力坡度为 1.40。

4.1.3. 南京水利科学研究院公式[12]

分析在摩擦阻力下的临界水力梯度，提出侧压系数和内摩擦角的影响因素，先后提出了两个计算临界水力坡度的公式。1960 年王伟在太沙基公式的基础上，增加了一个由于单位土体自重引起的侧压力所产生的摩擦阻力，得到公式：

$$J_{cr} = \left(\frac{r_s}{r} - 1 \right) (1-n) \times (1 + \xi \tan \varphi) \quad (3)$$

式中： ξ 为侧压系数， $\xi = \mu / (1 - \mu)$ ； μ 为泊松比，取 0.3； φ 为内摩擦角，四含取 25.7° ，风化带取 28° 。

由式 3 估算的风化带临界水力坡度为 1.86，四含临界水力坡度为 1.52。

4.2. 力学分析法

临界水力坡度与水流运动密切相关，一般情况下，对于水平渗流条件下的临界水力坡度可采用力学分析。根据张玉军推导的临界水力坡度分析对本采区临界水力坡度的力学分析法进行研究，得出结论[13]。

4.2.1. 力学分析法一

水在土中渗流时，受到土颗粒的阻力 T 的作用，这个力的作用方向是与水流方向相反的。根据作用力与反作用力相等的原理，水流也必然有一个相等的力作用在土颗粒上，通常把水流作用在单位体积土体中土颗粒上的力称为动水力 G_D (kN/m)，也称为渗流力。动水力的作用方向与水流方向一致。 G_D 和 T 的大小相等，方向相反，它们都是用体积力表示的。

水体在颗粒骨架中流动，对岩土体和颗粒骨架的稳定性将产生破坏作用。渗流力一般有两种，即垂直于颗粒周界表面的水压力和与颗粒表面相切的水流摩擦阻力。

在土中沿水流的渗透方向，切取一个土柱体 ab (图 1)，土柱体的长度为 l ，横截面积为 F 。已知 a 、 b 两点距基准面的高度分别为 z_1 和 z_2 ，两点的测压管水柱高分别为 h_1 和 h_2 ，则两点的水头分别为： $H_1 = h_1 + z_1$ 和 $H_2 = h_2 + z_2$ 。

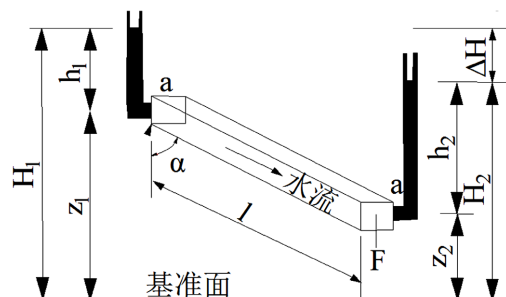


Figure 1. Schematic diagram of the derivation of unit permeability

图 1. 单位渗透率的推导示意图

将土柱体 ab 内的水作为脱离体, 考虑作用在水上的力系。因为水流的流速变化很小, 其惯性力可以略去不计。这样, 可以求得这些力在 ab 轴线方向的分别为: $\gamma_w h_1 F$ ——作用在土柱体的截面 a 处的水压力, 其方向与水流方向一致; $\gamma_w h_2 F$ ——作用在土柱体的截面 b 处的水压力, 其方向与水流方向相反; $\gamma_w n l F \cos \alpha$ ——土柱体内水的重力在 ab 方向的分力, 其方向与水流方向一致; $\gamma_w (1-n) l F \cos \alpha$ ——土柱体内土颗粒作用于水的力在 ab 方向的分力(土颗粒作用于水的力, 也就是水对于土颗粒作用的浮力的反作用力), 其方向与水流方向一致; $l F T$ ——水渗流时, 土柱中的土颗粒对水的阻力, 其方向与水流方向相反[14]。

根据作用在土柱体 ab 内水上的各力的平衡条件可得:

$$\gamma_w h_1 F - \gamma_w h_2 F + \gamma_w n l F \cos \alpha + \gamma_w (1-n) l F \cos \alpha - l F T = 0 \quad (4)$$

$$\cos \alpha = \frac{z_1 - z_2}{l} \quad (5)$$

得:

$$G_D = T = \gamma_w \frac{H_1 - H_2}{l} = \gamma_w J \quad (6)$$

由于动水力的方向与水流方向一致, 因此当水的渗流自上向下时, 动水力方向与土体重力方向一致, 这样将增加土颗粒间的压力; 若水的渗流方向自下而上时, 动水力的方向与土体重力方向相反, 这样将减小土颗粒间的压力。

若水的渗流方向自下而上, 在土体表面取一单位体积的土体进行分析。已知土有效重度为 γ' , 当向上的动水力 G_D 与土的有效重度相等时, 即:

$$G_D = \gamma_w J = \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (7)$$

这时土颗粒间的压力等于零, 土颗粒将处于悬浮状态而失去稳定, 这时的水力坡度称为临界水力坡度。得:

$$J_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} - 1 \quad (8)$$

由力学分析法一估算的风化带临界水力坡度为 1.50, 四含临界水力坡度为 1.25。

4.2.2. 力学分析法二

力学分析法二是参照一土坝或岸堤的自由出渗坡面, 它与水平所成的倾角为 β , 而坡面出渗的流线倾角设为 α 。因为上面已经证明渗透力垂直坡面的分量促使土体松动破坏的可能性远没有沿坡面下滑破坏的危险性大, 所以这里只需分析沿坡面方向的各力[15]。

如图 2 示坡面附近渗透力沿坡面的分量为 $\gamma J_c \cos(\beta - \alpha)$, 土体沿坡面的自重分力为 $\gamma' \sin \beta$, 如果考虑土粒间的摩擦阻力与粘聚力时, 可写力的平衡式为:

$$\gamma J_c \cos(\beta - \alpha) + \gamma' \sin \beta = [\gamma' \cos \beta - \gamma J_c \sin(\beta - \alpha)] \text{tg} \varphi + c \quad (9)$$

则得临界渗透坡降:

$$J_c = \frac{\gamma' (\text{tg} \varphi - \text{tg} \beta) \cos \beta + c}{\gamma [\cos(\beta - \alpha) + \sin(\beta - \alpha) \text{tg} \varphi]} \quad (10)$$

当流线沿坡面方向时, 即 $\alpha = \beta$, 此时为下滑破坏的危险情况, 相当于浸润线渗出点处, 则上式变为:

$$J_c = \frac{\gamma'}{\gamma} (\text{tg} \varphi - \text{tg} \beta) \cos \beta + \frac{c}{\gamma'} \quad (11)$$

由于四含砂粒含量大于 50%，故可定义为砂土，对于砂土， $c = 0.55$ ；依据涡北矿资料，风化带 $c = 2.78$ MPa。

参照此方法估算的四含临界水力坡度值为 1.42，风化带临界水力坡度值为 1.59。

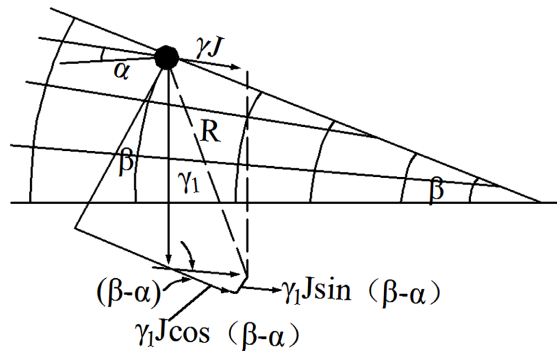


Figure 2. Free seepage surface of earth dam face
图 2. 土坝坝面的自由出渗面

4.3. 临界水力坡度综合确定

综合上述几种算法得出四含和风化带临界水力坡度计算值(表 3、表 4)。

- 1) 对于四含临界水力坡度计算方法的选择，太沙基公式、扎马林公式、南京水科院公式、力学分析一等方法渗流方向为自下而上，力学分析二符合四含水的渗流方向，与实际情况相符，故选取力学分析二方法；
- 2) 对于风化带临界水力坡度计算方法的选择，风化带中渗流垂直向下，可取太沙基公式、扎马林公式、南京水科院公式、力学分析一等方法的平均值；
- 3) 最终四含临界水力坡度采用力学分析二方法的值， $J_{cr} = 1.42$ ，而风化带溃砂相对危险临界水力坡度取前四项的平均值， $J_{cr} = 1.62$ 。

Table 3. Four containing critical hydraulic gradient calculation table
表 3. 四含临界水力坡度计算表

方法名称	临界水力坡度值	综合确定(取力学分析二)
太沙基公式	1.25	
扎马林公式	1.40	
南京水利科学研究院公式	1.25	1.42
力学分析法一	1.52	
力学分析法二	1.42	

Table 4. Calculation table of critical hydraulic gradient of weathering zone
表 4. 风化带临界水力坡度计算表

方法名称	临界水力坡度值	综合确定(前四项平均)
太沙基公式	1.52	
扎马林公式	1.60	
南京水利科学研究院公式	1.86	1.62
力学分析法一	1.50	
力学分析法二	1.59	

5. 结论

通过上述分析及试验,对涡北矿四含及风化带临界水力坡度研究得出以下结论:

1) 四含细粒含量约占 26.17%,砂粒含量约占 53.5%,砾粒含量约占 20.33%。四含砂层满足土的级配不均匀系数 $C_u \geq 5$,且级配曲率系数大部分符合 $C_c = 1 \sim 3$ 的条件,四含富水性、渗透性差。

2) 风化后的岩石泥化程度得到一定程度的增强且具有一定的可塑性,风化带岩石的隔水性和再生隔水能力良好。

3) 根据计算公式法和力学分析法等五种方法计算得出临界水力坡度,最终得出四含溃砂相对危险临界水力坡度 $J_{cr} = 1.42$,风化带溃砂相对危险临界水力坡度 $J_{cr} = 1.62$ 。

综上所述,对涡北矿四含及风化带水力坡度进行计算研究,为煤矿安全高效开采提供水文地质基础保障。

参考文献

- [1] 胡德文,曹贤胜.厚松散层及超薄覆岩覆盖区无防水煤柱综放开采可行性分析[J].安徽科技,2009(8):39-40.
- [2] 丁甲,董东林,胡志强,张陇强,张百伟.巨厚松散层下煤层开采的抗渗透性破坏和煤柱安全性研究——以口孜东矿为例[J].工程地质学报,2021,29(4):1071-1083.
- [3] 王晓振,许家林,朱卫兵,郝宪杰.松散承压含水层水位变化与顶板来压的联动效应及其应用研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(9):1872-1881.
- [4] 隋旺华,梁艳坤,张改玲,董青红,杨滨滨.采掘中突水溃砂机理研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2011,39(11):5-9.
- [5] 隋旺华,蔡光桃,董青红.近松散层采煤覆岩采动裂缝水砂突涌临界水力坡度试验[J].岩石力学与工程学报,2007,26(10):2084-2091.
- [6] 孙林,姚多喜,陈善成.五沟煤矿第四系松散层底部土体的沉积特征及含隔水性分析[J].煤炭技术,2008,27(5):114-116.
- [7] 邵亚红,姚多喜,鲁海峰,王康.松散层底部含水层富水性评价[J].煤矿安全,2014,45(7):127-130.
- [8] 丁波.顾北煤矿薄基岩工程地质特征与阻隔水性能分析[J].兰州工业学院学报,2019,26(2):1-6.
- [9] 张玉军,康永华,刘秀娥.松软砂岩含水层下煤矿开采溃砂预测[J].煤炭学报,2006,31(4):429-432.
- [10] 苑莲菊,李振栓,武胜忠,杨展,赵志怀(编著).工程渗流力学及应用[M].北京:中国建材工业出版社,2001.
- [11] 刘杰.土的渗透稳定与渗流控制[M].北京:水利电力出版社,1992.
- [12] 罗其明,宣以琼.张集煤矿1411工作面的溃砂风险评估[J].湖北理工学院学报,2022,38(2):32-37.
- [13] 张玉军.铁北煤矿松软砂岩含水层下综放开采覆岩破坏及溃砂预测研究[D]:[硕士学位论文].北京:煤炭科学研究总院,2005.
- [14] 刘洋.浅埋开采工作面水沙溃涌灾害预测及防治对策[J].西安科技大学学报,2016,36(6):775-781.
- [15] 李建文.煤矿过沟开采突水溃砂临界水力坡度计算及应用[J].中国煤炭地质,2016,28(6):55-57+77.