



移动扫码阅读

许延春, 马子民, 李小二, 等. 基岩风化带性质对顶板突水溃砂的影响研究——以赵固一矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 64–71.

XU Yanchun, MA Zimin, LI Xiaoe, *et al.* Research on the influence of the nature of the weathered bedrock zone on the roof water bursting and sand bursting: taking Zhaogu No. 1 Mine as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 64–71.

基岩风化带性质对顶板突水溃砂的影响研究

——以赵固一矿为例

许延春¹, 马子民¹, 李小二², 苗 蔚¹, 张二蒙¹, 姜文浩², 卓运亮², 田雨果¹

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 焦作煤业集团赵固(新乡) 能源有限责任公司, 河南 焦作 454002)

摘要: 基于赵固一矿上覆巨厚冲积层多含水层(组)薄基岩的特点, 冲积层下部砂砾含水层水压达到 4.0 MPa, 为高压含水层。为确定基岩性质对顶板突水溃砂的影响, 保证多含水层(组)薄基岩区的正常回采, 对水文勘察孔所取基岩岩样进行点荷载、干燥饱和吸水率和室内崩解试验, 通过分析岩样各项试验指标随深度的变化曲线, 确定基岩性质及其对留设防砂煤柱的影响。试验表明: 基岩风化深度超过 20 m; 距离冲积层底界面 0~6.5 m 垂深范围内的泥类岩干燥饱和吸水率大于 15%, 遇水崩解多呈泥状、碎岩片和碎块泥, 隔水性能良好, 可以有效弥合采动裂缝, 可以作为防水煤柱的保护层; 冲积层底界面下部 0~11.4 m 的风化泥岩强度低于 4.0 MPa 的冲积层下部细砾含水层水压力, 防砂煤柱的保护层不能全部由风化泥岩构成, 提出防砂煤柱保护层厚度需要大于 11.4 m; 砂岩耐崩解性强, 干燥饱和吸水率远小于泥类岩, 阻隔水性能较差, 防水煤柱保护层不可以全部由风化砂岩构成。风化砂岩强度大于 4.0 MPa 的冲积层下部砂砾含水层水压, 可以有效抵御上覆水头压力。

关键词: 基岩风化带; 饱和单轴抗压强度; 干燥饱和吸水率; 崩解试验; 顶板突水溃砂

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)07-0064-08

Research on the influence of the nature of the weathered bedrock zone on the roof water bursting and sand bursting: taking Zhaogu No. 1 Mine as an example

XU Yanchun¹, MA Zimin¹, LI Xiaoe², MIAO Wei¹, ZHANG Ermeng¹, JIANG Wenhao², ZHUO Yunliang², TIAN Yuguo¹

(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. Jiaozuo Coal Industrial Group Zhaogu (Xinxiang) Energy Co., Ltd., Jiaozuo 454002, China)

Abstract: Based on Zhaogu No. 1 Mine's characters that are the overlying thick alluvium, multi-aquifers (groups) and thin bedrock, the water pressure of the gravel aquifer under the alluvial layer reaches 4.0 MPa, defined a high-pressure aquifer. To determine the influence of bedrock properties on roof water inrush and sand bursting, and ensure the normal mining around the thin bedrock area under groups, there were tests, point loading, dry saturated water absorption rate and indoor disintegration, of bedrock samples taken from hydrological survey holes to determine those properties and influence on retaining sand-proof pillars by analyzing the variation curves of various indexes of them with depth. The experiments' results showed that the weathering depth of bedrock exceeds 20 m; the dry saturated water absorption rate of mudstone in the vertical depth ranging of 0–6.5 m from the bottom interface of the alluvial layer is greater than 15%. The mudstone exposed to water features muddy disintegration, broken rock fragments and mud blocks, which means it is good water-proof performance of effective bridging mining cracks and a protective layer for waterproof coal pillars; as the strength of weathered mudstone below the alluvial layer 0 to 11.4 m is lower than it of the fine gravel aquifer in the lower that of 4.0 MPa, the sand control coal pillar's pro-

收稿日期: 2022-05-02 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-1268

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51934008)

作者简介: 许延春(1963—), 男, 河北乐亭人, 研究员, 博士生导师。E-mail: yanchun-xu@163.com

通讯作者: 马子民(1997—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生。E-mail: 15732606365@163.com

protective layer that is greater more than 11.4 m is cannot be entirely composed of weathered mudstone; due to strong resistance to disintegration and lower dry saturated water absorption rate of sandstone, the protective layer cannot be entirely composed of weathered sandstone. The compressive strength of weathered sandstone, when it is higher than 4.0 MPa, can effectively resist the overlying water head pressure.

Key words: bedrock weathering zone; saturated uniaxial compressive strength; dry saturated water absorption rate; disintegration test; roof water inrush and sand bursting

0 引言

赵固矿区矿井水害具有多样化和复杂化的特点^[1],为回收更多优质煤炭资源,矿井开采上限逐渐提高,这同时导致煤层顶板含水层(组)对矿井安全生产的威胁越发明显^[2],其中巨厚冲积层、多含水层(组)和薄基岩的存在则是导致矿井顶板溃水溃砂的主要原因^[3-5]。在赵固矿区已经发生多起顶板突水溃砂事故发生,因此为解放含水层(组)下压煤,巨厚冲积层多含水层(组)薄基岩下的安全回采已经成为迫切需要解决的问题。对于多含水层(组)薄基岩情况下安全回采,我国有学者对此做了大量的研究,积累了丰富的经验。

朱伟等^[6]通过现场观测研究了潞安矿区不同回采工艺对裂缝带发育高度的影响规律;戴华阳等^[7]根据岩层理论计算出九龙矿的裂缝带及防水安全煤岩柱的高度,分析了陷落柱对顶板裂隙导水性的影响;浦海等^[8]运用数值模拟揭示了在断层影响下,煤层顶板突水通道的形成机制;张杰等^[9-10]通过理论分析研究了顶板隔水粘土层在渗流场和周期性动载共同作用下的失稳规律;曾一凡等^[11]通过分析顶板基岩风化带的富水性并结合导水裂隙带发育高度预测评价顶板突水危险性;吕广罗等^[12]通过开采实践提出巨厚砂砾含水层(组)下保水开采有效方法是控制裂隙带高度、适当调整工作面布局以及推进速度等;王海龙等^[13-14]通过室内突水溃砂灾害相似模拟试验得到顶板含水砂砾在导水裂缝中的移动和突涌的演化特征;许延春等^[15]通过建立巨厚冲积层薄基岩突水溃砂模型,结合黏土液塑限试验得出高水压下防水煤岩柱的失稳致灾机理。

以赵固一矿为背景,结合矿井的水文地质特征,对水文勘察孔的基岩风化带所取的岩样进行点荷载和干燥饱和吸水率试验,对试验结果进行对应转化,获得岩石饱和单轴抗压强度及干燥饱和吸水率随距离冲积层底界面深度变化曲线,并通过室内崩解试验对岩样进行定性描述,划分基岩风化带的范围并分析距离冲积层底界面不同位置岩石的性质对顶板突水溃砂的影响。依据风化带的性质对高水压冲积含水层提出风化带防水、防砂煤柱保护层的留设方法。

1 地质概况

赵固一矿位于焦作煤田东部,主采煤层平均厚度 5.29 m,埋深 410 ~ 860 m,自然垮落法管理顶板。上覆 304.8 ~ 539.2 m 的巨厚冲积层,平均厚度 459.8 m,冲积层内部含有多个含水层(组),可划分为“5 含 V 隔”结构(图 1),地表标高+77 m 左右,含水层标高大部分在-350 m 左右,水头高度大于 400 m,水压高于 4.0 MPa。

赵固一矿北翼基岩厚度范围在 2.82 ~ 248.09 m,厚度分布不均,具有明显的自西向东逐渐变薄的特点,因此矿井北翼东侧受顶板含水层的威胁更为严重。

2 基岩风化带岩石饱和单轴抗压分析

有大量试验结果表明岩石的标准点荷载强度 $I_{s(50)}$ 与单轴抗压强度 R_c 具有明显的对应关系^[16-17],对岩样数量较少且难以加工成标准试件的情况下通过点荷载试验获得岩石的强度是一个较好的选择,为获取岩石强度与上覆水头压力的直观对比关系,可采用实测的岩石标准点荷载强度指数 $I_{s(50)}$ 的换算值,并按照下式进行换算^[18]:

$$R_c = 22.82 I_{s(50)}^{0.75} \quad (1)$$

式中: R_c 为岩石饱和单轴抗压强度,MPa; $I_{s(50)}$ 为岩石标准点荷载强度,MPa

根据 GB/T 50218—2014《工程岩体分级标准》和《煤矿防治水细则》中的要求对矿井北翼 N1 和 N2 水文勘察孔的岩样进行点荷载和干燥饱和吸水率试验,通过现场取样和测井信息可知,赵固一矿的泥类岩有泥岩、铝质泥岩和砂质泥岩,砂岩多为粉砂岩,粗、中、细砂岩出现较少,砂岩胶结物多为硅质胶结,完整性好,属于硬岩。结合本团队以往在赵固一矿南翼的科研成果^[19],试验结果见表 1。

根据试验结果绘制岩石饱和单轴抗压强度与距离冲积层底界面的距离关系曲线,如图 2 和图 3 所示。

2.1 北翼风化岩石强度特征

由图 2 可以看出,N1 孔附近的泥类岩饱和单轴抗压强度随着距离冲积层底界面的距离增加而呈增

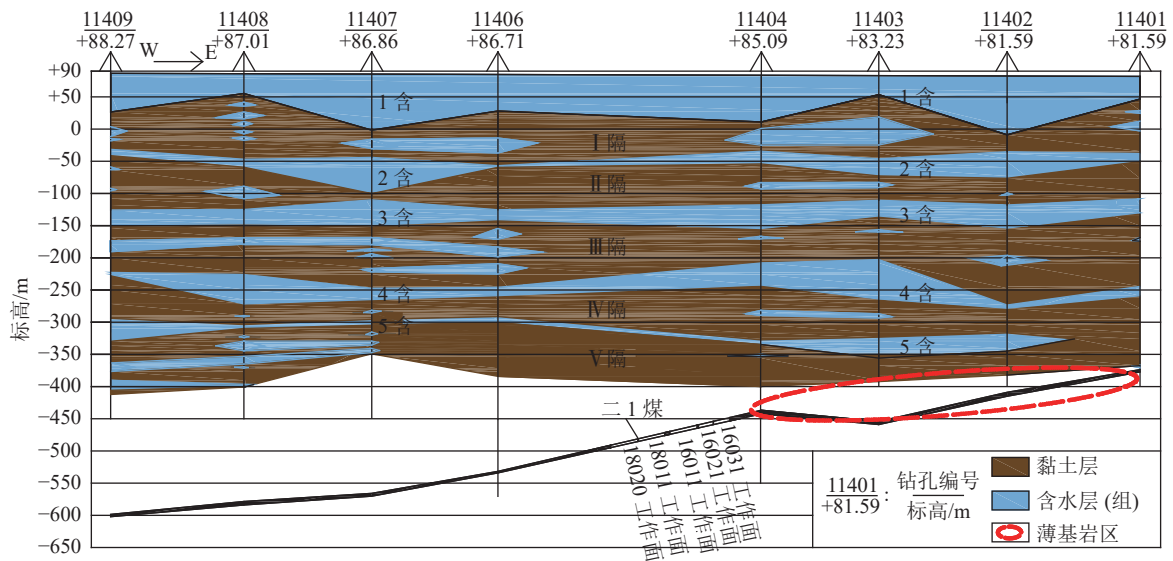


图1 北翼冲积层东西剖面图

Fig.1 East-west cross section of alluvial strata in the north wing

大趋势。在距离0~5 m范围内缓慢增加,5~20 m范围内呈线性增加,表明随深度增加风化作用的影响逐渐减弱。

在距离冲积层底界面0~2 m范围内,岩石饱和单轴抗压强度略大于4.0 MPa,属于极软岩,表明该阶段岩石风化较为彻底,颗粒间的粘结力破坏严重,不宜作为抵抗高水压的有效岩层;从距离冲积层底界面5 m处的砂质泥岩开始,其饱和单轴抗压强度为5.22 MPa,可以有效减小上覆高水压含水层的威胁。

N2孔附近的岩性为泥类岩和砂岩,在距离冲积层底界面1~2 m范围内,岩石饱和单轴抗压强度急剧减小,表明岩性对岩石抗压强度具有显著影响。

自冲积层底界面2 m开始($R_c=13.36$ MPa),岩石饱和单轴抗压强度逐渐增加,在距离冲积层底界面10~20 m时趋于稳定,和风化规律较为一致。结合试验结果可知,N2孔附近的岩石自冲积层底界面开始,可以有效减小上覆高水压含水层的威胁。

由于钻孔施工进入基岩20 m,结合现场所取岩芯皆呈风化后的黄色或黄褐色,可以认为矿井北翼N1孔和N2孔附近的岩层在距离冲积层底界面0~20 m都在风化影响范围内。

2.2 南翼风化岩石强度特征

由图3可以看出,随着距离冲积层底界面距离的增加砂岩和泥类岩的饱和单轴抗压强度整体上呈增大趋势,后续趋于稳定,这种变化与风化规律有较好的一致性。

砂岩的饱和单轴抗压强度全部远大于4.0 MPa,

可以有效减小上覆高水压含水层的影响;S2顶3孔附近的泥类岩在距离冲积层底界面0~11.4 m,饱和单轴抗压强度全部小于4.0 MPa,从11.4 m开始泥类岩的强度开始大于4.0 MPa,并且呈现快速增长的趋势,S3顶2孔附近的泥类岩在距离冲积层底界面0~5.1 m,饱和单轴抗压强度全部小于4.0 MPa,从5.1 m开始泥类岩强度开始大于4.0 MPa,并且呈现快速增长的趋势,表明距离冲积层底界面较近的泥类岩风化作用完全,岩石颗粒间黏结力破坏严重,岩石的饱和单轴抗压强度较低,不能有效抵抗上覆高水压含水层(组)的影响,防砂煤柱保护层不能全部由风化泥岩构成,保护层厚度应大于11.4 m。

在冲积层底界面0~21.5 m范围内,泥类岩和砂岩饱和单轴抗压强度快速增长,超过21.5 m后其增长速度放缓逐渐趋于水平,部分钻孔揭露的泥类岩甚至出现强度降低的情况,表明21.5 m深度以下的岩石受风化作用影响较弱,从岩石强度层面可以将21.5 m初步定义为风化带底部边界。

3 风化带岩石干燥饱和吸水能力分析

受风化作用影响,岩石矿物成分发生变化,内部裂隙数量增加且方向不规则,岩石内部颗粒间的联系被削弱,岩性减弱,土性增强,进而导致岩石的吸水率增加^[20]。当岩石干燥饱和吸水率大于15%时,岩石具有良好的隔水性能。因此岩石的干燥饱和吸水率一定程度上可以反映岩石的风化程度^[21]。

根据试验结果表1绘制并分析岩石的干燥饱和吸水率与冲积层底界面距离的关系曲线,如图4和

表 1 饱和单轴抗压强度和干燥饱和吸水率试验结果
Table 1 Saturated uniaxial compressive strength and dry saturated water absorption test results

岩心编号	岩性	与冲积层底界面距离/m	饱和单轴抗压强度 R_c /MPa	干燥饱和吸水率/%
N1孔J-1	泥岩	1	4.36	15.14
N1孔J-2	铝质泥岩	2	4.06	29.05
N1孔J-5	砂质泥岩	5	5.22	14.52
N1孔J-10	泥岩	10	12.95	16.25
N1孔J-20	砂质泥岩	20	28.74	6.97
N2孔J-1	细砂岩	1	49.00	1.26
N2孔J-2	砂质泥岩	2	13.36	10.15
N2孔J-5	砂质泥岩	5	15.94	3.58
N2孔J-10	粗砂岩	10	26.16	1.44
N2孔J-20	砂质泥岩	20	24.68	18.99
S1顶2-1	细砂岩	4.9	44.55	2.34
S1顶2-2	粉砂岩	16.2	68.50	1.02
S1顶2-3	粉砂岩	18.5	76.76	1.11
S1顶2-4	粉砂岩	23.8	81.06	0.75
S1顶2-5	粉砂岩	31.8	87.92	0.56
S1顶2-6	砂质泥岩	41.8	20.56	7.28
S3顶2-1	铝质泥岩	0.9	2.04	46.04
S3顶2-2	铝质泥岩	4.3	0	46.44
S3顶2-3	铝质泥岩	7.8	13.44	9.26
S3顶2-4	粉砂岩	10.4	50.71	2.34
S3顶2-5	中砂岩	17.3	38.52	1.26
S3顶2-6	砂质泥岩	21.6	25.84	6.29
S2顶3-1	铝质泥岩	0.8	0	35.76
S2顶3-2	铝质泥岩	2.5	0	39.78
S2顶3-3	铝质泥岩	10.3	0	9.31
S2顶3-4	泥岩	14.8	32.46	3.91
S2顶3-5	砂质泥岩	17.4	33.67	6.90
S2顶3-6	粉砂岩	21.5	65.51	0.78
S2顶3-7	粉砂岩	26.0	69.92	0.72
S2顶3-8	砂质泥岩	29.7	35.31	0.97

图 5 所示。

3.1 北翼岩石干燥饱和吸水率特征

由图 4 可知，在距离冲积层底界面 0~4.8 m 和 7.3~12 m 范围内，N1 孔附近的岩层干燥饱和吸水率大于 15%，表明该岩段具有良好的阻隔水能力；N2 孔在距离冲积层底界面 17.8~20 m 的岩层干燥饱和吸水率大于 15%，表明该岩段有较好的阻隔水能力。

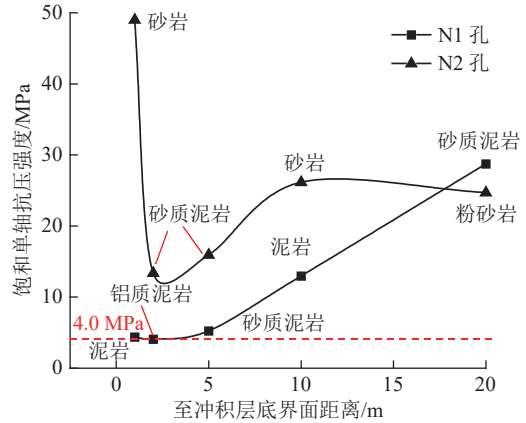


图 2 N1 孔和 N2 孔饱和单轴抗压强度与冲积层底界面距离关系曲线

Fig.2 Relationship curve between saturated uniaxial compressive strength and depth of holes N1 and N2

在距离冲积层底界面 0~10 m 范围内，N1 孔和 N2 孔附近的岩层干燥饱和吸水率变化规律一致，呈现随冲积层底界面距离增加而减小的趋势，与风化规律较为一致。从 10 m 开始，N1 孔和 N2 孔附近岩石的干燥饱和吸水率呈现相反的发展趋势，N1 孔继续减小，N2 孔则出现增大的现象，结合现场取样可知，在距离冲积层底界面 20 m 处 N1 孔和 N2 孔附近全部都是砂质泥岩，同一深度同一岩性的岩石因其本身组成结构细微的差别导致其对风化作用的反应程度也不同。

在施工范围内，矿井北翼 N1 孔和 N2 孔附近岩层干燥饱和吸水率没有趋于稳定的现象出现，可以印证矿井北翼的风化带深度超过 20 m。

3.2 南翼岩石干燥饱和吸水率特征

由图 5 可知，泥类岩和砂岩干燥饱和吸水率随着深度的增加逐渐减小，整体变化规律较为一致，可以反应风化作用随深度增加逐渐减弱的特点。砂岩干燥饱和吸水率远小于 15%，表明砂岩阻隔水性能较差；在距离冲积层底界面 0~6.5 m 和 0~8.7 m 范围内 S2 顶 3 和 S3 顶 2 附近的泥类岩干燥饱和吸水率大于 15%，其中在 0~5 m 范围内的铝质泥岩干燥饱和吸水率高达 40%，表明该范围内泥类岩阻隔水性能良好。

在冲积层底界面 0~21.5 m 范围内，泥类岩和砂岩的干燥饱和吸水率急剧减小，从距离冲积层底界面 21.5 m 开始，岩石的干燥饱和吸水率变化趋于平缓，表明从 21.5 m 开始，由强风化区向微风化区过度，结合从岩石强度层面的判定结果，通过岩石的干燥饱和吸水率可进一步验证 21.5 m 是南翼岩石的风化带底部边界。

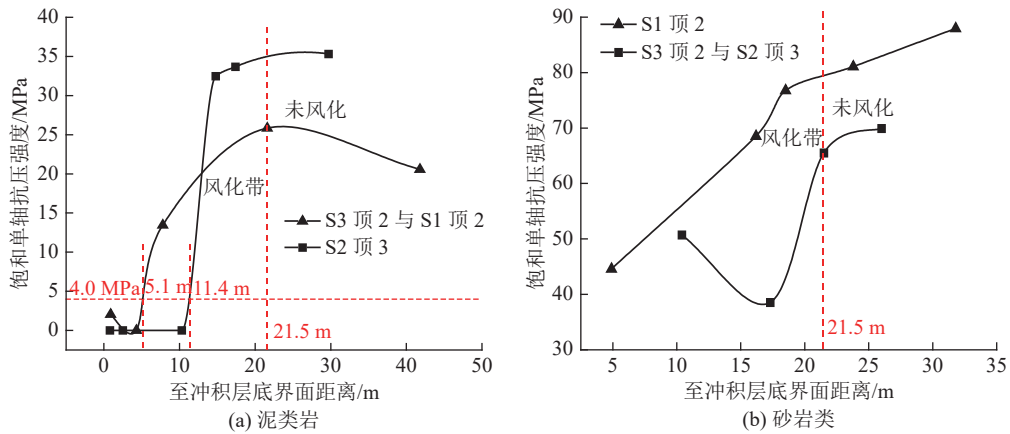


图3 岩石饱和单轴抗压强度与冲积层底界面距离关系曲线

Fig.3 Relationship curve between saturated uniaxial compressive strength and depth of rock

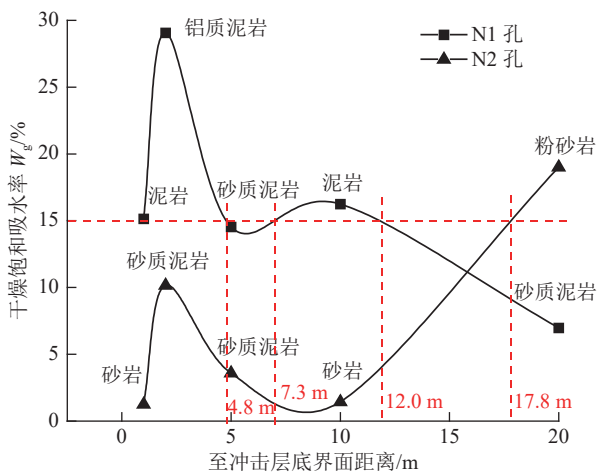


图4 N1和N2孔岩石干燥饱和吸水率与冲积层底界面距离关系曲线

Fig.4 Relationship curve between dry saturated water absorption rate and depth of holes N1 and N2

综合上述分析, 矿井南翼距离冲积层底界面 21.5 m 处可以作为风化带底部边界, 防水煤柱保护

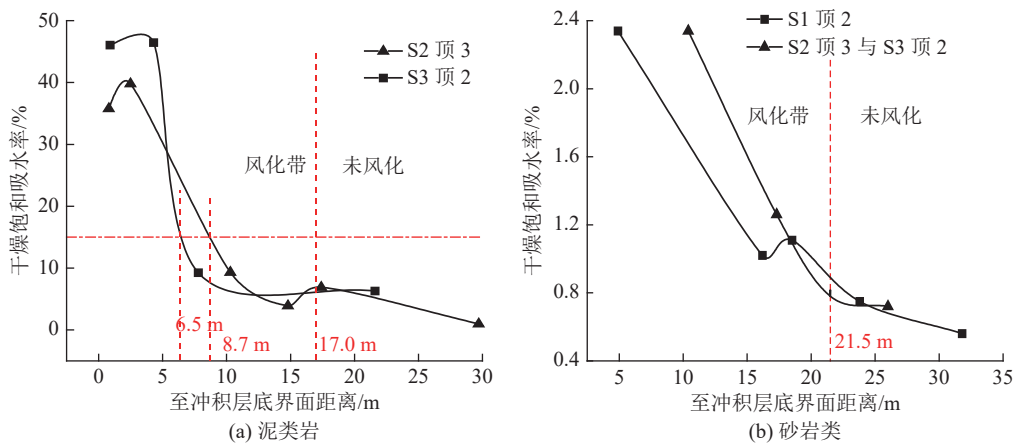


图5 岩石干燥饱和吸水率与冲积层底界面距离关系曲线

Fig.5 Relationship curve between dry saturated water absorption rate and depth of rock

层不能全部由风化砂岩构成, 防砂煤柱保护层含部分风化砂岩可以增强抗水压能力。

4 基岩遇水崩解状况分析

煤层赋存环境多为沉积岩, 遇水崩解是沉积岩的显著特征之一, 沉积岩崩解后导致岩石的土性增强, 强度降低, 破碎膨胀, 易引起煤层顶板突水溃砂事故^[22]。同样岩石崩解破碎后对采动裂缝也有一定的弥合效果, 有助于增加岩层的阻隔水性能。因此在煤层顶板上覆高水压含水层(组)时, 掌握覆岩的耐崩解性便显得极为重要。岩石的耐崩解性与其内部裂隙数量呈正相关^[23], 由于风化作用导致岩石内部裂隙增加, 岩石的耐崩解性也随之变差, 因此通过岩石的耐崩解性可以一定程度反映风化程度。

按照岩石崩解形态分类表^[24](表2)对岩样崩解状态进行分类, 分类结果见表3。

由表3可见, 砂岩受风化作用影响较弱, 耐崩解性强, 崩解状态多为IV型整体岩块; 而泥类岩则受风

表 2 岩石崩解形态分类
Table 2 Rock disintegration morphology

崩解分类	崩解物形态	崩解特征
I	泥状	浸入水中立刻崩解呈碎泥状
II	碎屑泥、碎片泥碎块泥	浸入水中完全崩解仅需几分钟，长则20~30 min；呈絮状、粉状崩解，崩解物为颗粒、片状碎屑或碎块，块状崩解物手搓为泥
III	碎岩片、碎岩块	浸入水中完全崩解需要1小时至数小时；呈片状开裂块或状崩裂、塌落，崩解物为碎岩块或碎岩片
IV	整体岩块	浸入水中需要数天甚至更长时间不发生破坏，或仅局部沿隐微节理、裂缝开裂

表 3 岩样崩解状态
Table 3 Rock sample disintegration state

岩心编号	岩性	崩解状态	岩心编号	岩性	崩解状态
N1孔J-1	泥岩	III型碎岩块	N2孔J-1	细砂岩	IV型整体岩块
N1孔J-2	铝质泥岩	II型碎块泥、碎岩片	N2孔J-2	砂质泥岩	IV型整体岩块
N1孔J-5	砂质泥岩	III型碎岩块、碎岩片	N2孔J-5	砂质泥岩	IV型整体岩块
N1孔J-10	泥岩	II型碎块泥、碎岩片	N2孔J-10	粗砂岩	IV型整体岩块
N1孔J-20	砂质泥岩	III型碎岩块、碎岩片	N2孔J-20	砂质泥岩	III型碎岩块、碎岩片
S1顶2-1	细砂岩	IV整体岩块	S2顶3-5	砂质泥岩	IV型整体岩块
S1顶2-2	粉砂岩	IV整体岩块	S2顶3-6	粉砂岩	IV型整体岩块
S1顶2-3	粉砂岩	IV整体岩块	S2顶3-7	粉砂岩	IV型整体岩块
S1顶2-4	粉砂岩	IV整体岩块	S2顶3-8	砂质泥岩	IV型整体岩块
S1顶2-5	粉砂岩	IV整体岩块	S3顶2-1	铝质泥岩	II碎块泥
S1顶2-6	砂质泥岩	II碎岩片	S3顶2-2	铝质泥岩	II碎块泥
S2顶3-1	铝质泥岩	I泥状	S3顶2-3	砂质泥岩	IV整体岩块
S2顶3-2	铝质泥岩	I泥状	S3顶2-4	粉砂岩	IV整体岩块
S2顶3-3	砂质泥岩	III型碎岩片、碎岩块	S3顶2-5	中砂岩	IV整体岩块
S2顶3-4	泥岩	IV型整体岩块	S3顶2-6	砂质泥岩	IV整体岩块

化作用影响较为明显，随着距离冲积层底界面距离的增加，崩解状态由 I 泥状向 IV 型整体岩块转变。砂质泥岩和铝质泥岩在入水后 24 h 和 30 min 崩解差异如图 6 所示，铝质泥岩呈现碎块泥，砂质泥岩崩解为碎岩块。

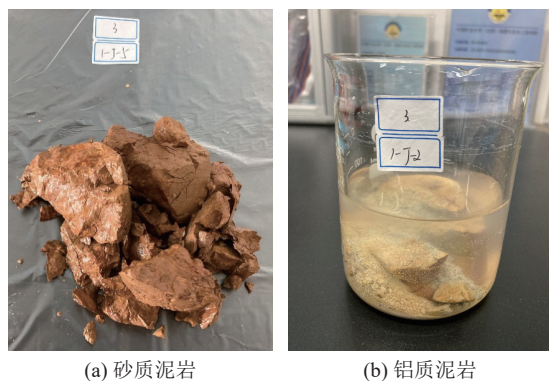


图 6 砂质泥岩 24 h、铝质泥岩 30 min 后崩解状态

Fig.6 Sandy mudstone and aluminum mudstone disintegration state within 24 h and 30 min respectively

5 风化基岩对顶板突水溃砂的影响分析

相邻工作面提前开采和本工作面开采前通过顶板仰上孔可对基岩风化带含水层内水体进行疏放，因此风化带含水层对开采不利影响较低。

风化砂岩层以及部分砂质泥岩遇水后仍然为整体岩块耐崩解性强，不具备再生隔水性；风化后强度较高，冲积层底界面下部的风化砂岩饱和单轴抗压强度全部大于 4.0 MPa，可以有效抵御上覆水头压力；干燥饱和吸水率远小于风化泥类岩，几乎不具有弥合采动裂隙的效果。在矿井的薄基岩区，导水裂隙带高度极容易透过风化基岩波及煤层顶板含水层（组），含水砂体通过导水裂隙渗入工作面，随着水砂流量增加，出水裂隙进而发展为突水管道，导致工作面发生突水溃砂的安全事故，因此防水煤岩柱不应全由风化砂岩构成，应包含风化砂岩上部的部分风化泥类岩，一定厚度的风化砂岩层可以作用安全煤柱保护层的结构稳定层，结合风化泥类岩对采动裂

隙的弥合效果,才能够实现防止在水压作用下导水通道从裂隙、裂缝扩展为管道,从而发生溃砂事故。

风化泥岩以及部分风化砂质泥岩遇水后破碎或者泥化耐崩解性差,具备隔水性,风化后强度较低,靠近冲积层底界面附近的泥类岩饱和单轴抗压强度不一定大于4.0 MPa。在矿井薄基岩区域,风化泥岩受到上覆高水压含水层(组)的影响,当临界水头压力超过风化泥岩裂隙扩展极限时,此时风化泥岩中的采动裂隙即可发展为突水管道,且裂隙扩展速率与含水层(组)水压和水量呈正相关,导致防砂煤岩柱失稳损伤失去阻砂性能,因此在留设防砂煤岩柱时应考虑风化泥岩的损伤厚度,即从冲积层底界面开始到强度大于上覆水头压力的风化泥岩或者风化砂岩之间的风化岩层全部可以定义为防砂煤岩柱的损伤厚度。就试验矿区而言,损伤厚度应选最大值,即赵固一矿应选择11.4 m作为损伤厚度;但为了提高资源回收率,损伤厚度可以根据不同钻场的试验结果进行取值,如N1孔附近可将冲积层下部5 m范围作为防砂煤岩柱损伤厚度。可知在考虑防砂煤岩柱损伤厚度之后,一定厚度的风化泥岩可以作为安全煤柱保护层的隔水层,但是在水压作用下可能会出现导水通道从裂隙、裂缝扩展为管道的情况。因此防砂煤柱保护层不能全部由风化泥岩和风化砂质泥岩构成,应该包含部分风化砂岩作为防砂煤岩柱的稳定支撑结构,保证防砂煤岩柱的强度。

6 结 论

1)基岩风化深度超过20 m,风化砂岩和距离冲积层底界面较远的泥类岩干燥饱和吸水率较低,饱和单轴抗压强度较高,隔水性和再生隔水性较差,可以有效抵抗上覆含水层(组)的威胁;距离冲击层底界面较近的泥类岩干燥饱和吸水率大于15%,其中铝质泥岩干燥饱和吸水率高达40%,隔水性和再生隔水性良好,有利于采动裂缝弥合,可以有效抑制裂缝带发育高度。

2)遇水崩解后风化砂岩多为IV型整体岩块,耐崩解性强;风化泥类岩耐崩解性差,整体呈现随着距离冲积层底界面距离增加,耐崩解性逐渐增强的特点。砂岩无法有效弥合采动裂缝,因此不建议巷道和回采工作面布置在风化带内,以防止高水压对围岩稳定性的不利影响。

3)防砂煤柱保护层不能全部由风化泥岩构成,应在原始计算的防砂煤岩柱厚度基础上增加高水压下的风化泥岩损伤厚度,同时需要部分砂岩作为防

砂煤岩柱的稳定支撑结构,保证防砂煤岩柱抗水压能力;防水煤柱保护层不能全部由风化砂岩构成,应包含部分风化泥岩增加其裂隙弥合效果与阻止水砂下泄的性能。

参考文献(References):

- [1] 盖秋凯,黄磊,赵霖.基于因子分析法的焦作矿区底板突水模型研究[J].煤炭工程,2021,53(1):123-127.
GAI Qiukai, HUANG Lei, ZHAO Lin. Floor water inrush model of Jiaozuo mining area based on factor analysis[J]. Coal Engineering, 2021, 53(1): 123-127.
- [2] 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[J].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[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 138-142.
- [3] 杨俊哲,吴作启,李宏杰,等.浅埋薄基岩工作面溃水溃砂模拟试验及影响因素分析[J].煤炭科学技术,2021,49(10):1-8.
YANG Junzhe, WU Zuoqi, LI Hongjie, et al. Simulation experiment and influence factors analysis of collapsing of water and sand in shallow thin bedrock face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 1-8.
- [4] 王家臣,王兆会,唐岳松,等.深埋弱胶结薄基岩厚煤层开采顶板动载冲击效应产生机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(12):2377-2391.
WANG Jiachen, WANG Zhaohui, TANG Yuesong, et al. Experimental study on mining-induced dynamic load of main roof in deeply buried thick coal seam with weakly consolidated thin bedrock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2377-2391.
- [5] 杨俊哲,张彬,付兴玉,等.浅埋薄基岩工作面水砂溃涌通道形成机理[J].煤炭学报,2020,45(12):4144-4153.
YANG Junzhe, ZHANG Bin, FU Xingyu, et al. Formation mechanism of water and sand inrush channel in shallow buried bedrock face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4144-4153.
- [6] 朱伟,滕永海,唐志新.潞安矿区综采裂隙带发育高度规律实测研究[J].煤炭科学技术,2017,45(7):167-171.
ZHU Wei, TENG Yonghai, TANG Zhixin. In-site study on development rule of fractured zone height by fully-mechanized mining in Lu'an Minefield[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 167-171.
- [7] 戴华阳,廖孟光,孟宪营,等.峰峰矿区九龙矿水库下采煤安全性分析[J].煤炭学报,2014,39(S2):295-300.
DAI Huayang, LIAO Mengguang, MENG Xianying, et al. Analysis of the security of mining under the reservoir in Jiulong Coal Mine of Fengfeng Mining Area[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 295-300.
- [8] 浦海,张东.断层影响下顶板突水特性的数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(3):421-424.
PU Hai, ZHANG Jian. Numerical simulation of water inrush from

- coal roof affected by fault[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(3): 421-424.
- [9] 张杰, 杨涛, 索永录, 等. 基于隔水土层失稳模型的顶板突水致灾预测研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2718-2724.
ZHANG Jie, YANG Tao, SUO Yonglu, *et al.* Roof water-inrush disaster forecast based on the model of aquiclude instability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2718-2724.
- [10] 杨涛, 张杰, 林海飞, 等. 隔水土层孔隙水压畸变与顶板突水灾变的时空响应特征模拟研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(2): 317-325.
YANG Tao, ZHANG Jie, LIN Haifei, *et al.* Spatial-temporal characteristics simulation of pore water pressure in aquiclude and roof water inrush[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(2): 317-325.
- [11] 曾一凡, 李哲, 宫厚建, 等. 顶板风化基岩含水层富水特征与涌(突)水危险性预测[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(2): 100-104.
ZENG Yifan, LI Zhe, GONG Houjian, *et al.* Water abundance characteristics in aquifer of weathered roof bedrock and prediction on water inrush risk[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(2): 100-104.
- [12] 吕广罗, 田刚军, 张勇, 等. 巨厚砂砾岩含水层下特厚煤层保水开采分区及实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 189-196.
LYU Guangluo, TIAN Gangjun, ZHANG Yong, *et al.* Division and practice of water-preserved mining in ultra-thick coal seam under ultra-thick sandy conglomerate aquifer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 189-196.
- [13] 王海龙, 陈绍杰, 郭惟嘉. 水砂突涌试验系统研制与应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(1): 72-79.
WANG Hailong, CHEN Shaojie, GUO Weijia. Development and application of test system for water-sand inrush[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(1): 72-79.
- [14] 郭惟嘉, 王海龙, 陈绍杰, 等. 采动覆岩涌水溃砂灾害模拟试验系统研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1415-1422.
GUO Weijia, WANG Hailong, CHEN Shaojie, *et al.* Development and application of simulation test system for water and sand inrush across overburden fissures due to coal mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1415-1422.
- [15] 许延春, 杜明泽, 李江华, 等. 水压作用下防砂安全煤岩柱失稳机理及留设方法[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 328-334.
XU Yanchun, DU Mingze, LI Jianghua, *et al.* Instability mechanism and design method of coal and rock pillar under water pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 328-334.
- [16] 张建国, 唐志成, 刘泉声. 点荷载强度指数估算与岩浆岩的单轴压缩强度的关系[J]. *岩土力学*, 2015, 36(S2): 595-602.
ZHANG Jianming, TANG Zhicheng, LIU Quansheng. Relation between point load index and uniaxial compressive strength for igneous rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S2): 595-602.
- [17] 和卢斌, 付志亮, 王强, 等. 岩石点荷载强度与单轴抗压强度线性关系试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2014, 42(3): 68-73.
HE Lubin, FU Zhiliang, WANG Qiang, *et al.* Linear relationship between point load strength and uniaxial compressive strength of rock[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(3): 68-73.
- [18] GB/T 50218—2014, 工程岩体分级标准[S].
- [19] 许延春, 曹旭初, 李江华, 等. 赵固一矿基岩风化带阻隔水特征试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(1): 178-182, 195.
XU Yanchun, CAO Xuchu, LI Jianghua, *et al.* Experiment study on water resistance and isolation features of base rock weathering zone in Zhaoqu No. 1 Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1): 178-182, 195.
- [20] 李日运, 吴林峰. 岩石风化程度特征指标的分析研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(22): 3830-3833.
LI Riyun, WU Linfeng. Research on characteristic indexes of weathering intensity of rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(22): 3830-3833.
- [21] 武强. 煤矿防治水手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.
- [22] 梁冰, 李若尘, 姜利国, 等. 沉积岩矿物组成对其耐崩解性影响的试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(5): 27-32.
LIANG Bing, LI Ruochen, JIANG Liguang, *et al.* Experimental study on mineral composition of sedimentary rock and influence of durable disintegration[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(5): 27-32.
- [23] 柴肇云, 张亚涛, 张学尧. 泥岩耐崩解性与矿物组成相关性的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(5): 1188-1193.
CHAI Zhaoyun, ZHANG Yatao, ZHANG Xueyao. Experimental investigations on correlation with slake durability and mineral composition of mudstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5): 1188-1193.
- [24] 苏永华, 赵明华, 刘晓明. 软岩膨胀崩解试验及分形机理[J]. *岩土力学*, 2005, 26(5): 728-732.
SU Yonghua, ZHAO Minghua, LIU Xiaoming. Research of fractal mechanism for swelling & collapse of soft rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(5): 728-732.