

文章编号:0253-9993(2011)01-0012-06

富水煤层巷道顶板失稳机理与围岩控制技术

姚强岭,李兴华,瞿群迪

(中国矿业大学 矿业工程学院 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘 要:为了研究煤层巷道粉砂质泥岩直接顶受基本顶裂隙水侵蚀后,巷道掘进过程中易于发生冒顶事故的原因,通过现场调研、取样、实验室试验和理论分析相结合的综合研究手段揭示出富水煤层巷道顶板失稳的机理在于:巷道开挖后产生的顶板裂隙形成了直接顶与基本顶含水层之间连通的通道,使得微结构裂隙发育和含有较高的亲水性矿物粉砂质泥岩吸水,其吸水后产生了较高的膨胀应力,并在三向受力状态下发生崩解、破坏,锚杆承载基础弱化和较高的膨胀应力引起了煤层巷道顶板失稳。同时针对富水煤层巷道顶板失稳机理,提出了通过减少顶板水运动对围岩的破坏、优化巷道断面和高预应力来实现该类巷道顶板的稳定。工程实践表明,采用半圆拱巷道、合理布置疏水孔以及高预应力锚带网索组合支护体系可确保对该类巷道顶板的有效控制。

关键词:富水煤层巷道;失稳机理;围岩控制;粉砂质泥岩

中图分类号:TD327.2;TD353.6 **文献标志码:**A

Instability mechanism and technique of surrounding rock control of water-enriched roofs of coal drifts

YAO Qiang-ling, LI Xue-hua, QU Qun-di

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to study immediate roof of silty mudstone early to be taken place roof fall under effect of fissure water, presented en-riched coal roadways instability mechanism by the means of synthesizing practical, sampling laboratory tests and theory analysis. This mechanism is that some crack produce by excavation connect aquifer of main roof, microstructure of silty mudstone are contents of lots of hydrophilicity minerals and fracture, meanwhile, and then silty mudstone produce highly expansion stress and make disintegration after absorbing water. Basis of bolt destroyed and highly expansion made the water-enriched roofs instability. Meanwhile, for this mechanism, proposed a technology for controlling roofs stability, including water retention, optimizing sectional drawing of roadway and high pretensioned stress. Field test indicates that semicircular arch roadway, hydrophobic holes and combined support system with high pretensioned stress bolts can maintain the roof stability in this kind of coal drifts.

Key words: water-enriched coal roadway; instability mechanism; surrounding rock control; silty mudstone

复杂困难条件下巷道的围岩控制机理与技术一直是煤矿开采领域的重大研究方向,特别是当顶板受水影响时,由于受到开挖、采动及支护等扰动影响而导致的水岩相互作用问题,是目前岩土工程中的前沿和热点问题。岩体受到在一定的渗透压力或者水动力影响下产生的物理、化学及力学作用,将造成工程

岩体发生破坏、失稳,其中水岩化学作用引起的化学元素在岩石和水之间重新分配及岩石细微结构的改变,导致了岩石力学性质的变化^[1-3]。特别是对于一些特殊的岩体,在天然状态下较为完整,整体性较强,具有一定的承载能力,遇水后短时间内发生崩解、膨胀和软化,从而引起岩体强度的降低,引发工程事故,

收稿日期:2010-05-02 责任编辑:柴海涛

基金项目:江苏省“青蓝工程”资助项目;国家自然科学基金资助项目(50974118);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0727);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CX10B_149Z)

作者简介:姚强岭(1982—),男,河南兰考人,博士研究生。E-mail:yaoqiangling@126.com

给国家和人民的生命财产带来重大损失^[4-6]。在我国西部的宁东煤田广泛分布着4-2号煤层,该煤层直接顶大多为粉砂质泥岩,基本顶多为中粒砂岩,且富含水。现场调研发现,该类直接顶天然状态下完整性好,遇水后力学性质劣化极快,其刚度与强度均大幅度降低,由此引发了多次顶板冒顶事故,这些事故的发生绝大多数是由于设计部门没有深入研究粉砂质泥岩遇水后力学性质发生变化的机理。为此,以宁东煤田梅花井煤矿114202回风平巷为例,采取现场调研、取样、实验室试验和理论分析相结合的综合研究方法,来探明富水煤层巷道粉砂质泥岩顶板的失稳机理,并据此提出针对性的方案与支护技术措施。

1 地质条件

梅花井煤矿位于宁东煤田鸳鸯湖矿区,井田内主体构造为鸳鸯湖背斜东翼,为走向近南北的单斜构造。煤层层综合柱状如图1所示。

岩层名称	柱状	层厚/m	岩性描述
粗砂岩	[柱状图: 粗砂岩]	14.50	浅灰白色, 含煤屑
3煤		1.12	黑色, 暗煤, 弱沥青光泽
粉砂岩	[柱状图: 粉砂岩]	22.40	浅灰色, 巨厚层状
4-1煤		1.45	黑色, 块状, 弱沥青光泽
中粒砂岩	[柱状图: 中粒砂岩]	6.67	浅灰色, 含植物化石及碳屑
粉砂质泥岩	[柱状图: 粉砂质泥岩]	3.19	浅灰褐色, 含少量碳屑
4-2煤	[柱状图: 4-2煤]	2.91	黑色, 暗煤, 以丝碳为主
粉砂岩	[柱状图: 粉砂岩]	4.02	浅灰色, 含植物化石丰富
细砂岩	[柱状图: 细砂岩]	10.64	灰白色, 以石英为主

图1 岩层柱状图

Fig. 1 Rock columnar section

4-2号煤层为矿井的主要开采煤层, $f=1.54 \sim 5.0$,平均倾角 9° 。114202工作面回风平巷沿4-2号煤层顶底板掘进,长4700m。巷道埋深约210m,直接顶为平均厚度3.19m粉砂质泥岩。基本顶为平均厚度6.67m中粒砂岩,为富含水岩层。

114202工作面回风平巷掘进初期,巷道直接顶较为完整,顶板无淋水现象,巷道支护采用锚杆(索)网支护。巷道掘出1~2周后,巷道顶板出现淋、渗水情况,现场观测表明,此时巷道顶板下沉明显,岩层表层泥化、剥落。

2 失稳机理分析

在114202工作面回风平巷500m处掘出约2个月后顶板发生冒顶事故一次,冒落高度达3.0m左右,冒落长度约6.0m,冒顶前该处淋水已停止约半个月。冒顶处岩层与修复后情况如图2所示。



(a) 顶板发生冒顶



(b) 顶板冒顶后的修复状况

图2 巷道顶板遇水失稳

Fig. 2 The roadway roof instability under action of water

在神华宁煤集团宁东煤田广泛分布着以粉砂质泥岩为直接顶、中粒砂岩为基本顶且富含水的4-2号煤层巷道,掘进扰动产生的顶板裂隙及锚索孔连通基本顶含水层,水岩相互作用下使得巷道顶板直接顶粉砂质泥岩力学性质弱化,锚杆、锚索锚固失效,诱发冒顶事故的发生。根据锚杆支护煤巷冒顶事故原因分类,可知该类型冒顶为岩层组合劣化型^[7]。为杜绝该类事故的再次发生,笔者在宁东煤田进行广泛调查的基础上,深入研究了引起冒顶的机理,为该区域同类型条件下的煤层巷道围岩控制提供基础。

2.1 岩石矿物成分分析

X射线衍射实验仪器为日本理学公司生产的D/Max-3B型X射线衍射仪。定性分析利用粉末衍射联合会国际数据中心(JCPDS-ICDD)提供的各种物质标准粉末衍射资料(PDF),并按照标准分析方法进行对照分析鉴定,结果见表1和图3所示。

由以上测定结果可知,粉砂质泥岩中伊利石衍射峰宽化且较低矮,表明其结晶状态较差。样品主体成分为高岭石、石英,有部分伊利石和蒙皂石,有少量的伊蒙混层、绿泥石等。其中高岭石、蒙皂石、伊蒙混层总体含量达到49%,这些黏土矿物大量存在,在很大程度上影响了巷道围岩的物理力学性质,特别是遇水后及风化后强度会急剧降低。

表1 样品X射线衍射分析结果

Table 1 Results of mineral qualitative analysis

样 品	定性分析	定量分析/%
高岭石	多	28
伊利石	多	10
蒙皂石	多	12
伊蒙混层	少	9
绿泥石	少	8
石英	多	20
长石	多	11
方解石	少	1
其它	少	1

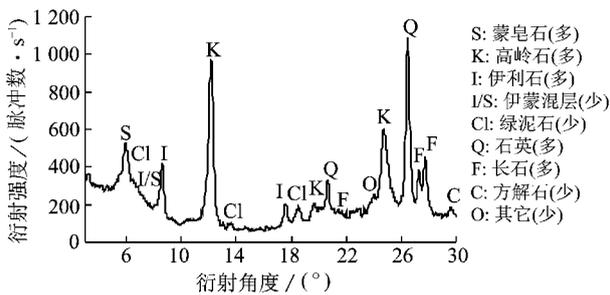


图3 粉砂质泥岩的X-射线定性衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction qualitative analysis of silty mudstone

2.2 微观结构特征分析

利用中国矿业大学分析测试中心扫描电子显微镜对所取得的岩样进行局部放大,显微照相分析结果表明:粉砂质泥岩顶板岩体结构疏松,粒间裂隙、空隙较为发育,胶结性差;片状矿物排列较为整齐,大孔较小,中孔及小孔多平行分布;粗大砂粒表面多有黏土层包裹,如图4所示。在地应力、巷道开挖扰动应力等作用下易于产生微细孔洞,微细孔洞逐步变大、贯通、发展成宏观裂隙,巷道围岩变得更加破碎,更加难以控制。

2.3 膨胀试验

为研究岩石膨胀的特性,将试样制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 圆柱体试件,利用YP-1型岩石膨胀压力机测定岩石的膨胀应变^[8]。岩石膨胀性试验装置原理如图5所示。

试验时将试样放入水盒的叠环中,叠环两端均置风干透水石头。接着安装好百分表,向水盒中加入蒸馏水至高出试块5 mm。其中,叠环的作用是限制试样的侧向变形,并通过其上设置的进水孔将水盒中的水导入试样,使试样充分吸水膨胀。试样由于受到叠环径向方向的限制,只能沿轴向变形。

膨胀试验结束后,在轴向继续给试块加载,保持试块处于三向受力状态,进一步观测试块在三向受力状态下浸水崩解状况,试验结果见表2和图6。

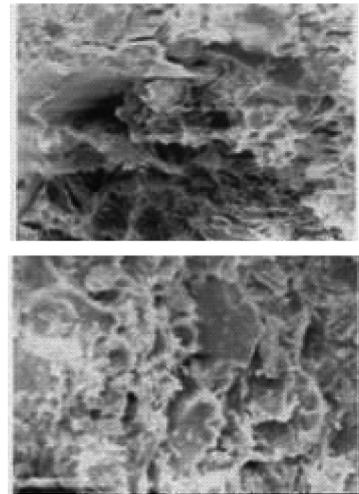


图4 粉砂质泥岩微结构

Fig. 4 Microstructure of silty mudstone

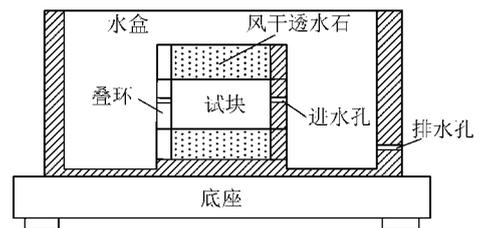


图5 岩石膨胀性试验装置原理

Fig. 5 Schematic diagram of expansion experiment

表2 膨胀性试验结果

Table 2 Results of expansion experiment

试件 编号	天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	天然含水 量/%	膨胀 率/%	最大膨胀 应力/MPa	膨胀含 水量/%
PZSN-1	2.20	4.78	3.50	0.76	8.21
PZSN-2	2.08	5.09	2.75	0.95	7.76
PZSN-3	2.15	5.49	3.10	0.89	9.92

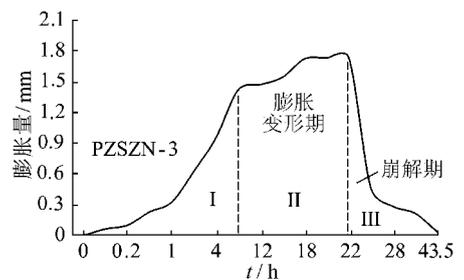


图6 膨胀变形、崩解与时间的关系

Fig. 6 Relationship between expansion deformation, disintegration and time

遇水膨胀的岩石,当其内部含水率较天然状态有所增加时,它的各个部分都将随着含水率的增加而膨胀。粉砂质泥岩具有较强的膨胀特性,平均最大膨胀应力达0.87 MPa,这远大于一般锚杆支护能够提供

的0.1~0.15 MPa 支护阻力^[9]。试验证明,粉砂质泥岩浸入水后,产生了较大的膨胀变形(图6中I区),并且在较短的时间内较为剧烈,但随着时间的增长其膨胀变形变缓(图6中II区),趋于稳定。

粉砂质泥岩在三向受力状态下,吸水至饱和后仍保持一定的完整性,但随着在水中浸泡时间的增加将发生崩解,进而失稳、破坏(图6中III区)。

2.4 失稳机理的确定

根据114202回风平巷工程地质特征和实验室试验结果可知,宁东煤田富水煤层巷道顶板内在失稳机理在于:

(1)巷道开挖后破坏了岩体中原岩应力平衡状态,引起了巷道周围岩体的应力重新分布,使原来处于挤压状态的岩体向巷道内部空间产生松胀变形,当这种变形大小超过了岩体本身的承载能力时便发生破坏,在巷道顶板形成纵向与横向裂隙,这些裂隙和锚索钻孔连通了基本顶含水层。

(2)黏土相对定量分析表明,粉砂质泥岩直接顶含有大量强膨胀吸水性黏土矿物,这些黏土矿物在与水发生相互作用的过程中,改变了粉砂质泥岩的物理力学性质,导致其强度与刚度的大幅降低。

(3)粉砂质泥岩结构疏松,裂隙、空隙较为发育,且在与水的化学作用过程中,产生了较大膨胀应力和大变形。

(4)粉砂质泥岩在三向受力状态下,随着在水中浸泡的时间增加而发生崩解、破坏,导致了巷道顶板围岩破坏区进一步发育,松动圈范围不断扩大,锚固体承载能力大幅度下降。

3 围岩控制技术研究

3.1 巷道原支护设计参数

巷道原断面形状为斜矩形段巷道,设计掘进宽为4 400 mm,下帮掘进高为2 611 mm,掘进中高为3 500 mm,上帮掘进高度不小于3 500 mm,掘进断面面积为15.14 m²,支护参数如图7所示。

(1)顶板锚杆(索)支护参数。巷道顶板锚杆采用2节Z2370树脂药卷加长锚固,托板为120 mm×120 mm×10 mm的平板铁,锚杆间通过 $\phi 16$ mm圆钢焊接的钢筋梯连接,规格为5 440 mm×80 mm,7档分布,档距726~800 mm。锚索采用3节Z2370树脂药卷锚固,托梁为400 mm长的14号槽钢。铺设由 $\phi 6.5$ mm钢筋加工而成的金属网,规格为5 700 mm×800 mm,网孔规格为100 mm×150 mm。

(2)锚杆(索)预紧扭矩(力)设计。顶板锚杆预紧扭矩为100 N·m,锚索预紧力80 kN。

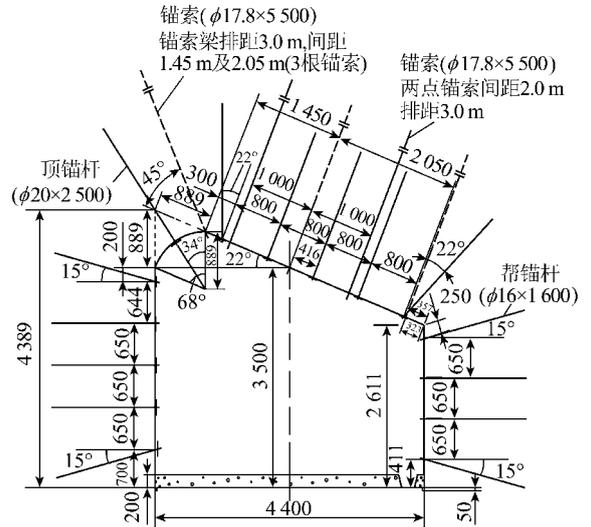


图7 巷道原支护参数断面

Fig. 7 Sectional drawing of original support parameters

3.2 围岩控制对策分析

针对梅花井煤矿4-2号煤层粉砂质泥岩强亲水性矿物含量高,岩层遇水后具有强膨胀、易崩解等特点,提出了如下支护对策:

(1)优化巷道断面形状。研究发现^[10],曲线形断面较折线形断面围岩中的拉应力小,更加有利于巷道围岩的稳定。富水煤层巷道粉砂质泥岩直接顶复杂困难条件下,选用曲线形巷道断面,有利于减少巷道断面中的拉应力和维护顶板围岩的稳定。鉴于此,针对梅花井煤矿114202工作面回风平巷直接顶遇水后松软破碎的特点,提出采用拱形巷道断面代替斜矩形巷道断面,以改善顶板受力状况,提高顶板稳定性,减少巷道开挖对顶板围岩的扰动作用。

(2)通过合理布置疏水孔,减少水对直接顶的侵蚀弱化作用。膨胀性试验表明,钻孔水不仅使得粉砂质泥岩产生高膨胀应力和使其在三向受力状态下发生崩解、破坏,而且钻孔中水的存在对树脂的固化是极其不利的,水会降低聚酯固化反应中自由基的活性,使固化反应不完全,水也可能在树脂固化过程中分散到树脂胶泥中,而影响树脂固化后的强度。研究发现^[11],当钻孔淋水量小于128 mL/min时,树脂锚杆的锚固力保持不变。因此,为了降低或者消除钻孔附近的涌水量,沿巷道走向合理布置疏水孔,采用集中排水的办法,减少水对粉砂质泥岩强度和树脂锚杆锚固力的影响。

(3)高预应力锚带网索支护技术。膨胀性试验表明,粉砂质泥岩吸水后产生高膨胀应力和大变形,这要求锚带网索支护在支护初期即需要有高支护系统刚度和支护过程中支护系统的大延伸率,以适应粉砂质泥岩顶板的膨胀、崩解阶段的大变形。研究发

现^[12-13],通过及时施加高预应力提高锚杆支护系统的支护刚度,可以消除岩体松散变形和顶板中部的拉伸破坏,提高锚杆的支护效能,大幅度减少巷道围岩变形与破坏,巷道支护状况能够发生本质改变。预应力锚杆支护中组合构件起关键作用,能够扩散锚杆预应力、扩大锚杆作用范围,其几何参数、力学参数应与锚杆参数相匹配,而组合构件形式与参数选择不合理,则显著降低支护系统的支护能力^[14]。同时,重视锚索的补充加强支护作用,将锚杆支护形成的次生承载体与含水层上部稳定岩层连接在一起,形成较为稳定的承载结构。

3.3 支护参数设计

根据围岩控制对策,提出如下技术关键:

(1) 巷道断面设计。将 114202 工作面回风平巷原斜矩形断面更改为拱形断面,尺寸为:掘进宽度 4 640 mm,高度 3 920 mm,半圆拱半径 2 320 mm,断面面积 15.9 m²,支护方案与参数如图 8 所示。

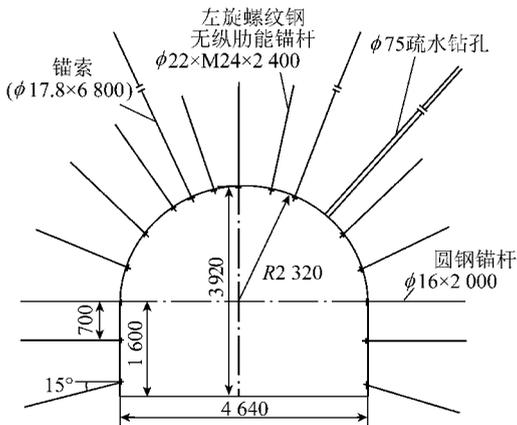


图 8 锚杆(索)支护参数断面

Fig. 8 Sectional drawing of roadway support parameters

(2) 合理布置疏水孔。沿巷道走向合理布置疏水孔,疏水孔直径为 φ75 mm,如图 9 所示,钻孔长度 L 为

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (1)$$

式中, L 为疏水孔长度, m; L_1 为直接顶厚度,取为 3.19 m; L_2 为基本顶厚度,取 6.67 m; L_3 为疏水孔穿透基本顶含水层厚度,根据经验,一般选取 1.5 ~ 2.0 m。

(3) 顶板锚杆(索)网带支护参数设计。巷道顶板锚杆间、排距及材质与原方案一致,在扭矩螺母与托板之间增加减摩垫圈,树脂药卷采用 1 节 CK2370 和 1 节 Z2370 配合使用,这样可以提高加长锚固锚杆预应力扩散效果^[15]。组合构件中,托板改为 120 mm×120 mm×12 mm 厚碟形托板,以增大锚杆延伸率^[16]。锚杆间连接由 W 形钢带替代原支护采用

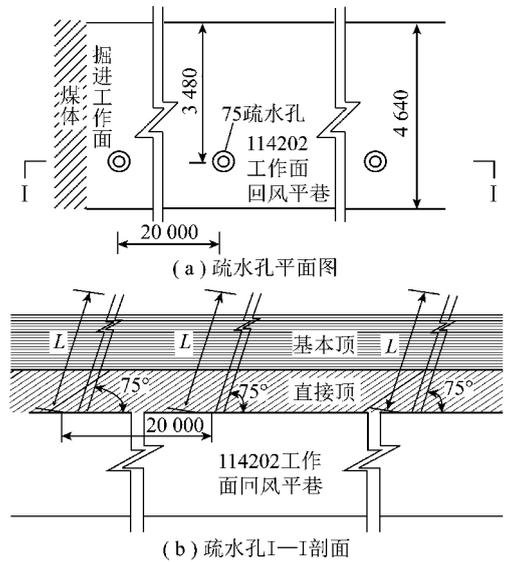


图 9 疏水孔参数布置

Fig. 9 Layout of hydrophobic holes parameters

的钢筋梯,W 形钢带护表面积大,强度与刚度高,与巷道表面为面接触,有利于锚杆预应力扩散和扩大锚杆作用范围。

由图 1 可知,114202 工作面回风平巷直接顶为平均厚度 3.19 m 的粉砂质泥岩,基本顶为平均厚度 6.67 m 中粒砂岩,根据悬吊理论,锚索应将锚杆支护形成的预应力承载结构与较为稳定的围岩相连,从而提高围岩的承载能力。为此,适当加长锚索长度,将原锚索更改为 φ17.8 mm×6 800 mm 的钢绞线,间排距不变,树脂药卷由 1 节 CK2370 和 2 节 Z2370 树脂药卷配合使用,400 mm×400 mm×16 mm 鼓形托盘。巷道顶板铺设双层网,里层为塑钢网,外层为菱形金属网,规格为 3 900 mm×800 mm,网孔规格为 100 mm×150 mm。

(4) 帮部锚杆支护参数设计。帮锚杆间、排距 700 mm×800 mm,φ16 mm×2 000 mm 圆钢锚杆,采用 1 节 Z2860 树脂药卷加长锚固。

(5) 锚杆(索)预紧扭矩(力)设计。根据已有研究成果,锚杆预应力一般可选择为锚杆杆体屈服强度的 30%~50%^[17],锚索预紧力一般应为其拉断载荷的 40%~70%^[18]。基于以上原则和锚杆(索)材质,采用扭矩倍增器实现顶板锚杆预紧扭矩 400 N·m,但使用过程中需要采取有效措施解决反扭矩问题;锚索预紧力 150 kN,通过气动式 MSY-230 张拉设备实现。

3.4 支护效果分析

该技术方案在现场已应用 1 a 多,巷道围岩稳定,维护情况良好,能够满足使用的要求,顶板没有再次发生冒顶事故。巷道掘出至围岩变形稳定期间,从

布置的3个观测站获得的数据来看,巷道顶底板移近量大于两帮移近量,其中两帮移近量在50~60 mm之间,顶底板移近量一般在150~200 mm之间。

4 结 论

(1)通过现场调研、实验室试验及理论分析,揭示了富含水煤层巷道顶板失稳的机理。研究发现,含强亲水性矿物的粉砂质泥岩直接顶煤层巷道在基本顶裂隙水侵蚀作用下,吸水后产生高膨胀应力和大变形。膨胀性试验表明,随着试样在水中浸泡时间的增加,粉砂质泥岩在三向受力状态下发生崩解、破坏,导致锚杆、锚索承载能力大幅下降,引起顶板垮冒失稳发生冒顶。

(2)针对富含水煤层巷道顶板失稳机理,提出了富含水煤层巷道围岩控制的技术措施。通过采用合理布置疏水孔、高预应力锚带网索支护技术及拱形巷道断面等技术措施,有效控制了巷道的围岩变形破坏,确保了巷道围岩稳定,为解决该类巷道围岩稳定问题提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] 汤连生,周萃英.渗透与水化学作用之受力岩体的破坏机理[J].中山大学学报(自然科学版),1996,35(6):95-100.
Tang Liansheng, Zhou Cuiying. Analysis on mechanism of permeation and hydrochemical action resulting in failure of loaded rock mass [J]. Journal of Sun Yatsen University (Natural Science), 1996, 35 (6): 95-100.
- [2] 黄伟,周文斌,陈鹏.水-岩化学作用对岩石的力学效应的研究[J].西部探矿工程,2006,17(1):122-125.
Huang Wei, Zhou Wenbin, Chen Peng. The study on mechanical effect of the chemical action of water-rock on rocks [J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 17(1): 122-125.
- [3] 何满潮,景海明,孙晓明.软岩工程力学[M].北京:科学出版社,2002.
- [4] Li Xuehua, Yao Qiangling, Ding Xiaolei, et al. Applied research on stability control of water-enriched roof stability control of coal drift [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(4): 467-472.
- [5] 武雄,田红,孙燕冬,等.延吉盆地强膨胀软岩边坡变形机理及防治措施[J].煤炭学报,2009,34(1):69-73.
Wu Xiong, Tian Hong, Sun Yandong, et al. Deformation mechanism and prevention measures for strongly expansive soft-rock slope in Yanji Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 69-73.
- [6] 刘长武,陆士良.泥岩遇水崩解软化机理的研究[J].岩土力学,2000,21(1):28-31.
Liu Changwu, Lu Shiliang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 28-31.
- [7] 贾明魁.锚杆支护煤巷冒顶成因分类新方法[J].煤炭学报,2005,30(5):568-570.
Jia Mingkui. A new way of genetic classification on roof falling of bolt supporting roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30 (5): 568-570.
- [8] Yao Qiangling, Zhang Futao, Ding Xiaolei, et al. Experimental research on instability mechanism of silty mudstone roofs under action of water and its application [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 402-408.
- [9] 康红普.煤巷锚杆支护设计方法及应用[J].矿山压力与顶板管理,1996(S):25-32.
- [10] 陈炎光,陆士良.中国煤矿巷道围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,1995.
- [11] 勾攀峰,陈启永,张盛.钻孔淋水对树脂锚杆锚固力的影响分析[J].煤炭学报,2004,29(6):680-684.
Gou Panfeng, Chen Qiyong, Zhang Sheng. Influence analysis of the anchor-hold of the resin bolt by the draining water in the drill hole [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(6): 680-684.
- [12] 康红普,姜铁明,高富强.预应力在锚杆支护中的作用[J].煤炭学报,2007,32(7):680-685.
Kang Hongpu, Jiang Tieming, Gao Fuqiang. Effect of pretensioned stress to rock bolting [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32 (7): 680-685.
- [13] 张农,高明仕.煤巷高强预应力锚杆支护技术与应用[J].中国矿业大学学报,2004,33(5):524-527.
Zhang Nong, Gao Mingshi. High-strength and pretension bolting support of coal roadway and its application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(5): 524-527.
- [14] 侯朝炯,郭励生,勾攀峰,等.煤巷锚杆支护[M].徐州:中国矿业大学出版社,1999.
- [15] 康红普,姜铁明,高富强.预应力锚杆支护参数的设计[J].煤炭学报,2008,33(7):721-726.
Kang Hongpu, Jiang Tieming, Gao Fuqiang. Design for pretensioned rock bolting parameters [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (7): 721-726.
- [16] 陆士良,汤雷,杨新安.锚杆锚固力与锚固技术[M].北京:煤炭工业出版社,1998.
- [17] 范明建.锚杆预应力与巷道支护效果的关系[D].北京:煤炭科学研究总院,2007.
Fan Mingjian. Study on the relationship between bolt pre-stresses and support effect of roadway [D]. Beijing China Coal Research Institute, 2007.
- [18] 康红普,王金华.煤巷锚杆支护理论与成套技术[M].北京:煤炭工业出版社,2007.