

文章编号:1009-3087(2014)04-0033-06

基于顶板风化程度及塑性破坏深度的围岩综合分类法

吴鑫^{1,2}, 刘长武^{2,3*}, 隆泗¹

(1. 四川师范大学 工学院, 四川 成都 610101; 2. 四川大学 水利学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;
3. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘 要:地下工程围岩分类是支护设计和施工的基础,国内外学者已提出了多种分类方法并取得满意成果,但诸如巷道上覆严重风化层等复杂地层的围岩分类,其研究成果还极为有限。以极限平衡区深入围岩深度为指标的分类方法为基础,首先考虑矿山采动及煤岩体力学性质的影响,其次考虑煤层顶板风化程度,最后得到最终塑性破坏区半径并进行分类。方法核心在于分析塑性破坏区和顶板严重风化区是否贯通,并根据贯通情况对塑性区半径进行修正。针对葛泉矿 11912 工作面回采巷道情况复杂、部分顶板严重风化的情况,利用上述方法进行巷道围岩分类,根据分类结果提出相应的支护对策并取得了良好支护效果。

关键词:顶板;风化;塑性区;支护;分类

中图分类号:TD313

文献标志码:A

Comprehensive Classification Method of Surrounding Rock Based on the Degree of Weathering and the Plastic Failure Depth

WU Xin^{1,2}, LIU Changwu^{2,3*}, LONG Si¹

(1. Inst. of Technol., Sichuan Normal Univ., Chengdu 610101, China;
2. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;
3. College of Hydraulic and Hydroelectric Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: A new classification method, which considers the depth of limit equilibrium zone in the surrounding rock as its indicator, was put forward. This method takes the impact of mining and coal rock mechanical properties and the degree of weathering of seam roof into consideration to get the final plastic failure zone radius, which is revised in accordance with connecting situation between the plastic damage zone and the weathered zone of seam roof, as the core of this method. The application in 11912 working face of Gequan mine, which is complex and severely weathered in some roof, showed that this classification method has good supporting effect.

Key words: seam roof; weathering; plastic zone; support; classification

地下工程围岩分类目的是合理选择工程布局,确立各种地质、力学模型,采用相适应的技术处理方法,指导地下工程的设计与施工。国内外学者已对岩体的分类进行了大量研究,从不同角度提出了不少具有代表性的分类方案。欧洲人罗曼最早提出地下工程的围岩分类;1926年前苏联采矿工程师普洛托基雅可诺夫用岩石坚固性系数划分所有岩石的等级;之后美国的迪尔于1964年提出了RQD岩体质

量分类法;日本的池田和彦于1973年提出以弹性波传播速度为指标的分类方法;南非的比尼伍斯科在1979年提出了RMR分级法;日本的菊地宏吉提出了坝基岩体分类法;捷克斯洛伐克科学研究院提出了QTS分类法;挪威的巴顿提出岩体质量指标Q分类法;西班牙 Romana 提出了边坡岩体SMR分类^[1-3];德国的雅各毕^[2]提出了根据巷道围岩移近率选择支架的方法;波兰按巷道围岩稳定性系数将

收稿日期:2013-11-03

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2010CB226802);四川省教育厅重点资助项目(12ZA143);四川师范大学校级资助项目(14YB01)

作者简介:吴鑫(1983—),男,博士生.研究方向:矿山岩石力学与灾害防治.

*通信联系人

围岩分为 5 类^[4]。中国学者根据各自的经验提出了不同的分类方法。主要有王思敬的弹性波指标分类法、杨子文^[6]的 M 分类、王石春等^[7]提出的 RMQ 分类、邢念信^[9]的坑道围岩分类、东北工学院的林韵梅^[8]、李兆权等提出的围岩稳定性的动态分级法。此外,谷德振^[4]、关宝树等也提出了相应的岩体质量评价标准;煤炭工业部颁发了《缓倾斜、倾斜煤层回采巷道围岩稳定性分类方案》;煤炭科学研究总院北京建井所按照巷道围岩变形量划分围岩类别^[4];中国矿业大学董方庭教授^[10-11]等提出了围岩松动圈分类法。

尽管国内外学者在围岩分类方面取得了丰硕成果,但对于复杂地层(如巷道影响范围同时涉及不同岩层、不同风化程度地层)下的围岩分类,目前的研究成果及其适用范围还十分有限。葛泉矿 11912 工作面回采巷道部分顶板严重风化,合理的巷道围岩分类是实现巷道支护工程经济、有效的前提和基础,作者阐明考虑顶板风化等多因素的围岩综合分类法,并将其在 11912 工作面回采巷道实践。

1 考虑塑性深度与采动影响的围岩分类法

合理的围岩分类指标应物理意义明确,可定量表示,计算该指标时的相关参数较容易获得,便于现场工程技术人员掌握,并能同巷道支护设计联系在一起。一般来说,影响煤矿巷道围岩稳定性的因素可以概括为地质因素和生产因素 2 类,分类时主要考虑围岩强度、围岩应力、围岩风化程度、采动影响 4 类因素。复杂地层围岩分类也是从以上 4 类因素出发,但如何综合、合理地考虑则是问题的关键。

在众多分类方法中,董方庭^[11]、刘长武^[12]等以极限平衡区深入围岩的深度作为主要分类指标。极限平衡区深入围岩深度计算公式:

$$\Delta = R - r_0 \tag{1}$$

式中:Δ 为极限平衡区深入岩体的深度,m;R 为极限平衡区半径,m;r₀ 为巷道当量半径,m。

极限平衡区半径 R 计算公式如下:

$$R = r_0 \times \left[\frac{(\gamma H + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{P_i + C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \tag{2}$$

式中:γ 为围岩容重,kN/m³;H 为巷道埋深,m;C 为粘结力,MPa;φ 为内摩擦角;P_i 为支护阻力,kN;G 为剪切弹性模量,MPa;其余参数物理意义同式(1)。

由于岩块与岩体物理力学参数的差异,加之回采巷道受采动影响,故而考虑对式(2)进行一定的

修正,

$$R = r_0 \times \left[\frac{(k_1 \gamma H + k_2 C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{P_i + k_2 C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \tag{3}$$

式中,k₁ 为采动影响系数,k₂ 为煤岩体力学参数修正系数,其他符号同前。以极限平衡区深入岩体中的深度为围岩主要分类指标的具体参数见表 1。

表 1 极限平衡区深入岩体深度分类法指标

Tab.1 Limit equilibrium zone depth rock classification index

围岩类别	分类名称	极限平衡区深入岩体深度/cm
Ⅱ	一般围岩	100 ~ 150
Ⅲ	一般不稳定围岩	150 ~ 200
Ⅳ	不稳定围岩	200 ~ 300
Ⅴ	极不稳定围岩	> 300

葛泉矿 11912 工作面回采巷道折算半径为 2.39 m,取 C = 2 MPa,φ = 20°;煤岩体力学参数修正系数 k₂、采动影响系数 k₁ 取值参考文献[12 - 13]。

极限平衡区深入围岩深度计算参数如表 2 所示。

表 2 围岩力学特性

Tab.2 Rock mechanical properties

参数	取值或计算公式
巷道折算半径 r ₀	2.39
γH/MPa	4.56(平均容重 2.4 t/m ³)
采动影响系数	1.6
煤岩体力学参数修正系数	0.5
内摩擦角/(°)	20
粘聚力/MPa	2
支护阻力	支护阻力普遍较低,取 0

巷道在初始掘进的过程中,应紧随其后进行巷道的初始支护,由于在此过程中没有采动的影响,故先按不考虑采动影响的情况对巷道围岩进行分类。

将计算参数带入式(2),可得极限平衡区半径 R = 4.09 m,则极限平衡区深入巷道围岩深度

$$\Delta = R - r_0 = 4.09 - 2.39 = 1.7 \text{ m} \tag{4}$$

根据表 1 可知巷道在不受采动影响时,围岩类别为Ⅱ类,为一般围岩。考虑采动影响时,取采动影响系数 k₁ = 1.6,代入其余相关参数值到式(3),得巷道围岩极限平衡区半径为 5.56 m。则极限平衡区深入围岩中的深度

$$\Delta = R - r_0 = 5.56 - 2.39 = 3.17 \text{ m} \tag{5}$$

巷道围岩属于V类,极不稳定围岩。

葛泉矿11912工作面巷道顶板岩层探测结果发现(图1),2条回采巷道部分地段的大青灰岩未风化,十分坚硬,可以作为锚索的着力基础;而另一部分地段灰岩岩层严重风化。很明显,顶板严重风化地段的巷道支护困难得多,不利于围岩稳定,而且巷道压力拱有可能和严重风化顶板贯通,形成更大的压力拱,因此,顶板风化程度直接影响了围岩分类的正确性。而以上分类方法并未考虑顶板的风化情况,因此有待进一步完善。

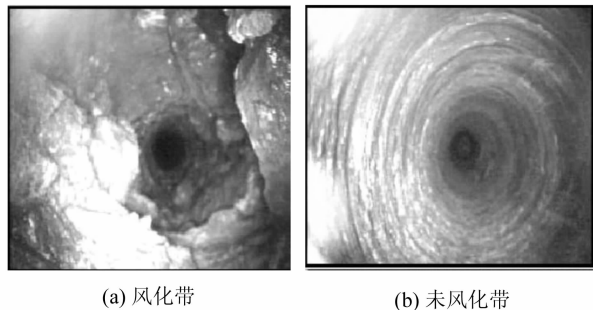


图1 顶板不同位置钻孔

Fig.1 Drilling situation in different locations of seam roof

2 风化顶板巷道综合分类方法

2.1 综合分类法思路

以极限平衡区深入围岩的深度作为主要分类指标方法可有效利用公式求出塑性区的半径,从而对围岩进行分类。但上述方法有一定的局限性,例如式(4)计算出极限平衡区深入巷道围岩深度1.7 m,考虑煤岩体力学强度修正和采动影响后,塑性区影响半径扩大到3.17 m,由公式分析可知,此处实际上是假设巷道、巷道塑性区全部处于各向同性的全煤介质之中。但现场煤岩巷道顶部只有约2~4 m的煤厚(包括夹矸),其上顶板为大青灰岩,一般力学性能很好,但部分地段严重风化,其力学性质非常差。

也就是说,仅由煤层的力学参数计算出来的塑性区半径与实际情况不符,将对塑性区半径的计算造成误差,尤其是强风化顶板地段,由于可能被塑性区贯通,使得塑性区半径可能比仅考虑煤层的情况更大。因此,必须考虑不同风化程度对岩体塑性区半径造成的影响,再根据修正后的塑性区半径进行分类。

考虑图2所示的回采巷道,巷道底板为4.5 m左右的铝土值粉砂岩,煤层厚6.5 m左右,其上为

4 m左右厚的大青灰岩(部分地段严重风化),根据煤层力学参数计算出来的塑性区半径是否贯穿了顶板的情况,本问题分为2类讨论:

1)未贯穿顶板,则塑性区计算公式不变;

2)贯穿顶板:①若顶板未风化,粉砂岩和大青灰岩的力学性质都要远远优于煤层,上述公式塑性区半径偏大,围岩分类偏向较差等级;②若顶板严重风化,力学性质比煤层更差^[14],上述公式塑性区半径偏小,围岩分类偏向较好等级。

综上所述,有必要在式(2)、(3)初步分类结果上,根据顶板贯通情况和风化情况进行修正,得到最终分类结果。

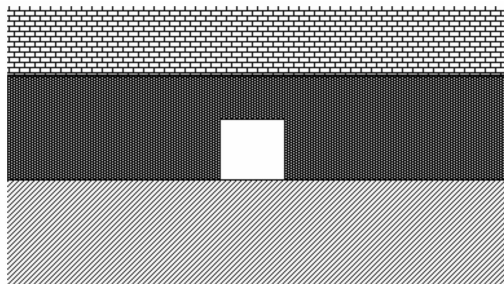


图2 回采巷道示意图

Fig.2 Schematic diagram of mining roadway

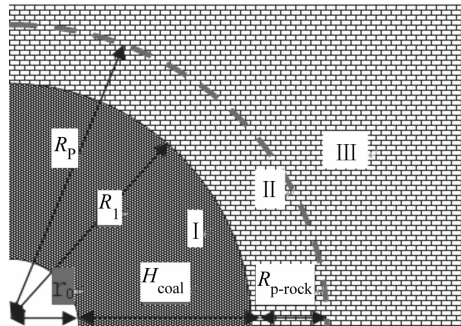


图3 煤层巷道模型图

Fig.3 Model diagram of coal seam roadway

2.2 模型及假设

由于巷道顶板严重风化,仅考虑塑性区半径最大的一侧(顶部),用此塑性区半径来代表巷道的塑性区半径。为简化问题,将巷道简化为圆形,巷道壁外依次为煤层、岩层。利用圆形巷道的弹塑性分析就可以得到该巷道的塑性区半径并进行围岩分类。此模型需进行一些假设:

- 1)围岩由2种岩层构成,每层围岩内为均质、各向同性;
- 2)原岩应力为各向等压(静水压力)状态;
- 3)深埋圆形平巷,平面应力状态;
- 4)煤层与风化层的力学参数差别很小,围岩变形量与纯煤巷道差别不大;

5) 围岩为理想弹塑性体。

2.3 分析步骤

1) 判断塑性贯通。根据煤的力学参数计算出塑性区半径 R_{p-coal} , 与 R_1 (上覆煤层的厚度 H_{coal} + 巷道半径 r_0) 进行比较。

$$R_{p-coal}^0 = r_0 \left[\frac{(\gamma H + c_{coal} \cot \varphi_{coal})(1 - \sin \varphi_{coal})}{c_{coal} \cot \varphi_{coal}} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi_{coal}}{2 \sin \varphi_{coal}}} \quad (6)$$

利用第 2.2 节得到塑性区修正后的公式:

$$R_{p-coal} = r_0 \left[\frac{(K_1 \gamma H + K_2 c_{coal} \cot \varphi_{coal})(1 - \sin \varphi_{coal})}{K_2 c_{coal} \cot \varphi_{coal}} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi_{coal}}{2 \sin \varphi_{coal}}} \quad (7)$$

可计算得到 R_{p-coal} , 其中力学参数全部为煤岩的。

① 若塑性区半径 $R_{p-coal} > R_1$, 则最终塑性区半径 R_p 与风化层性质有关, $R_p > R_{p-coal}$;

② 若塑性区半径 $R_{p-coal} \leq R_1$, 则最终塑性区半径 R_p 与风化层性质无关, $R_p = R_{p-coal}$ 。

2) 求出最终塑性区半径 R_p

I 区为巷道半径 + 煤层厚度, 半径 R_1 , II 区为风化层中的塑性区, 半径为 R_2 , III 区为风化层中的弹性区。最终塑性区的半径为 $R_p = R_1 + R_{p-rock}$ 。由于 R_1 的计算非常简单, 重点在于 R_{p-rock} 的计算。假设在 R_1 处围岩的径向应力为 P_i , 则 R_{p-rock} 可以看做是巷道半径为 R_1 , 风化大青灰岩介质的塑性区半径, 且巷道壁上的支护应力为 P_i 。

2.4 公式推导及结果

第一步求出煤层与风化区交界处的径向应力。由于煤层与风化层的岩石力学参数差别很小, 围岩变形量与纯煤巷道差别不大, 因此等于纯煤巷道在 R_1 处的应力状态。

$$\begin{cases} \sigma_r^{p-coal} = c_{coal} \cdot \cot \varphi_{coal} \left[\left(\frac{R_1}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{coal}}{1 - \sin \varphi_{coal}}} - 1 \right]; \\ \sigma_{\theta}^{p-coal} = c_{coal} \cdot \cot \varphi_{coal} \left[\frac{1 + \sin \varphi_{coal}}{1 - \sin \varphi_{coal}} \left(\frac{R_1}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{coal}}{1 - \sin \varphi_{coal}}} - 1 \right] \end{cases} \quad (8)$$

同样, 对于风化层来说, 可以看成是开挖半径为 R_1 的巷道后, 且巷道壁作用有一个支护力的情况。支护力 P_i 的大小在这里不能直接等于 σ_r^{p-coal} , 因为在距离巷道中心 R_1 处(塑性区内)可能会远大于实际值, 可以通过对 R_1 的修正的方式获得近似的径向应力。

$$P_i = c_{coal} \cdot \cot \varphi_{coal} \left[\left(\frac{k R_1}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{coal}}{1 - \sin \varphi_{coal}}} - 1 \right] = c_{coal} \cdot \cot \varphi_{coal} \left[\left(\frac{R_{p-coal}^0}{R_{p-coal}} \frac{R_1}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{coal}}{1 - \sin \varphi_{coal}}} - 1 \right] \quad (9)$$

如果不考虑支护力, 风化层中塑性区内应力为:

$$\begin{cases} \sigma_r^{p-rock} = c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock} \left[\left(\frac{R}{R_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{rock}}{1 - \sin \varphi_{rock}}} - 1 \right]; \\ \sigma_{\theta}^{p-rock} = c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock} \left[\frac{1 + \sin \varphi_{rock}}{1 - \sin \varphi_{rock}} \left(\frac{R}{R_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{rock}}{1 - \sin \varphi_{rock}}} - 1 \right] \end{cases} \quad (10)$$

塑性区半径为:

$$R_{p-rock} = R_1 \left[\frac{(c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock} + \gamma H)(1 - \sin \varphi_{rock})}{c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock}} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi_{rock}}{2 \sin \varphi_{rock}}} \quad (11)$$

考虑大小为 P_i 的支护力, 以及开采扰动 K_1' 和风化顶板的力学折减系数 K_2' 后, 风化层中塑性区内应力变为:

$$\begin{cases} \sigma_r^{p-rock} = (P_i + c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock}) \cdot \left(\frac{R}{R_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{rock}}{1 - \sin \varphi_{rock}}} - c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock}; \\ \sigma_{\theta}^{p-rock} = (P_i + c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock}) \cdot \frac{1 + \sin \varphi_{rock}}{1 - \sin \varphi_{rock}} \left(\frac{R}{R_1} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{rock}}{1 - \sin \varphi_{rock}}} - c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock} \end{cases} \quad (12)$$

塑性区半径则变为:

$$R_p = R_1 \cdot \left[\frac{(K_1' \cdot \gamma H + K_2' \cdot c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock})(1 - \sin \varphi_{rock})}{P_i + K_2' \cdot c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock}} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi_{rock}}{2 \sin \varphi_{rock}}} = R_1 \{ (K_1' \cdot \gamma H + K_2' \cdot c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock})(1 - \sin \varphi_{rock}) \} / \{ c_{coal} \cdot \cot \varphi_{coal} \left[\left(\frac{R_{p-coal}^0}{R_{p-coal}} \frac{R_1}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi_{coal}}{1 - \sin \varphi_{coal}}} - 1 \right] + K_2' \cdot c_{rock} \cdot \cot \varphi_{rock} \} \quad (13)$$

根据上述塑性区半径计算方法即可得到最终结果, 以 11912 工作面回采巷道为例, 得出了其围岩最终分类。计算结果与过程见表 3 及图 4。

3 讨论

基于塑性深度的巷道围岩分类方法能够很好的对巷道进行分类, 但是该结论是基于均值岩土体而言的, 如果塑性区影响范围内存在不同性质的岩层, 则以上方法存在一定局限性。11912 工作面回采巷

道顶部距灰岩顶板仅2~4 m,部分地段塑性区深入巷道在初始掘进的过程中,应紧随其后进行巷道的初始支护,由于在此过程中没有采动的影响,故先按不考虑采动影响的情况对巷道围岩进行分类到顶板之内,形成贯通之势。也就是说,仅用塑性破坏区半

径分类存在一定的误差,对顶板未风化地段而言,塑性区半径计算值偏大;而对顶板为严重风化大青灰岩地段而言,塑性区半径计算值偏小,因为塑性区贯通了严重风化顶板,形成了更大的破坏区。

表3 运料巷巷道围岩最终分类
Tab.3 Rock mass final classification of haul lane

钻孔位置	折算半径 r_0/m	$\gamma H/\text{MPa}$	$K_{1-\text{coal}}$	$K_{2-\text{coal}}$	$R_{p-\text{coal}}/\text{m}$	R_1/m	折算 R_1/m	$R_p - R_0/\text{m}$	初步分类	顶板风化程度	塑性贯通顶板	P_i/MPa	$K_{1-\text{rock}}$	$K_{2-\text{rock}}$	R_p/m	$R_p - R_0/\text{m}$	最终分类
F204#前81 m	2.39	4.56	1.6	0.5	5.56	8.19	4.21	3.17	V类	未风化	否	3.40	1.6	0.6	5.56	3.17	V类
F210#前31 m	2.39	4.56	1.6	0.5	5.56	5.39	2.77	3.17	V类	未风化	是	1.87	1.6	0.6	5.21	2.82	IV类
F212#前38 m	2.39	4.56	1.6	0.5	5.56	4.59	2.36	3.17	V类	中等	是	1.39	1.6	0.3	5.29	2.90	IV类
F214#前30 m	2.39	4.56	1.6	0.5	5.56	4.99	2.56	3.17	V类	中等	是	1.63	1.6	0.3	5.56	3.17	V类
F216#前30 m	2.39	4.56	1.6	0.5	5.56	5.79	2.98	3.17	V类	中等	否	2.10	1.6	0.3	5.56	3.17	V类
F222#前72 m	2.39	4.56	1.6	0.5	5.56	7.09	3.64	3.17	V类	中等	否	2.82	1.6	0.3	5.56	3.17	V类
F226#前33 m	2.39	4.56	1.6	0.5	5.56	5.99	3.08	3.17	V类	中等	否	2.22	1.6	0.3	5.56	3.17	V类
F228#前11 m	2.39	4.56	1.6	0.5	5.56	5.79	2.98	3.17	V类	中等	否	2.10	1.6	0.3	5.56	3.17	V类

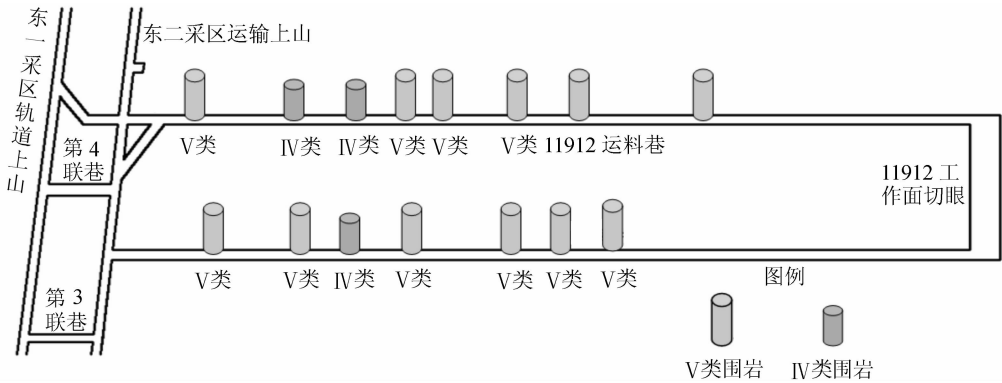


图4 最终围岩分类结果平面分布

Fig.4 Floor plan of the final rock classification results

为此,重点考虑了顶板风化程度以及风化顶板与巷道塑性区是否贯通,并制定出不同的修正方法,得到最终塑性破坏区半径进行分类。以上述围岩分类结果为基础,提出了相应的支护形式,当巷道顶板围岩类别为V类时,支护可采用锚网梁+全煤锚索+工字钢联合支护;当围岩类别为IV类,支护方式可采用锚网梁+锚索联合支护。

实践证明,巷道支护效果良好,达到了经济有效的目的。

4 结 论

1)根据地质勘查结果、钻孔录像等资料发现11912回采巷道顶板风化存在水平分带特征和垂直分带特征,且不同风化程度大青灰岩力学性能差异巨

大,因此在此围岩分类时必须要考虑顶板风化程度。

2)提出了“考虑顶板风化程度和塑性破坏深度的围岩分类方法”,其主要思路是在以塑性破坏深度为指标的分类方法基础上,考虑顶板风化情况以及塑性区的贯通情况,并根据以上情况对塑性区半径提出相应的修正方法得到最终塑性区半径,最后利用最终塑性区半径进行围岩分类。

3)葛泉矿11912工作面回采巷道条件复杂,尤其是其顶板风化程度差异巨大,围岩分类及支护都存在一定困难。利用所提方法全面地考虑了塑性区深度、采动影响、煤体力学性质影响以及顶板风化程度等因素,得到了回采巷道的最终塑性区半径及其分类结果。按分类结果提出支护方案,并在实际生产中取得了良好的支护效果。

参考文献:

- [1] 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础[M]. 中国科学院工程力学研究所译. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] 雅各毕 O. 实用岩层控制[M]. 下册. 北京: 煤炭工业出版社, 1980.
- [3] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [4] 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, 1994.
- [5] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [6] 中华人民共和国电力工业部/水电部. SLJ2—81 水利水电工程岩石试验规程[S]. 1981.
- [7] 王石春, 何发亮, 李苍松. 隧道工程岩体分级[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [8] 林韵梅. 围岩稳定性的动态分级法[J]. 金属矿山, 1985(8): 29—30.
- [9] Xing Nianxin. Tunnel engineering rock classification and support design[J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering, 1986(04): 26—34. [邢念信. 坑道工程围岩分类与支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 1986(04): 26—34.]
- [10] Dong Fangting, Song Hongwei. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 21—32. [董方庭, 宋宏伟. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21—32.]
- [11] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及其应用技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [12] 刘长武, 翟才旺. 地层空间应力场的开采扰动与模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [13] Chu xiusheng, Liu Changwu, Du Xinliang. Classification and support parameters study of repeat mining impact crusher Soft rock roadway[C]//Proceedings of 4th Deep Rock Mechanics and Disaster Control Engineering Symposium. Beijing: Chinese Sub-society for Soft Rock Engineering and Deep Disaster Control, 2009. [褚秀生, 刘长武, 杜新亮. 重复采动影响破碎软岩巷道围岩分类与支护参数研究[C]//第四届深部岩体力学与工程灾害控制学术研讨会论文集. 北京: 中国岩土力学与工程学会软岩工程与深部灾害控制分会, 2009.]
- [14] Han Xiaogang. Research on comprehensive support technology of roadway driven along the floor of thick coal seam with strongly-weathered limestone overburden bed[D]. Chengdu: Sichuan University, 2011. [韩小刚. 强风化灰岩覆盖厚煤层沿底巷道综合支护技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2011.]

(编辑 李轶楠)