

蒋力帅,马念杰,白浪等. 巷道复合顶板变形破坏特征与冒顶隐患分级[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1205-1211. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1219

Jiang Lishuai, Ma Nianjie, Bai Lang, et al. Deformation and failure characteristics and roof caving hidden danger classification of roadways compound roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1205-1211. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1219

巷道复合顶板变形破坏特征与冒顶隐患分级

蒋力帅 马念杰 白浪 李育吉 张磊

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要: 煤层顶板岩性复合及分层厚度变化大, 稳定性差异显著。针对巷道层状复合顶板条件, 采用现场探测、数值模拟、理论分析等方法, 研究了顶板岩层结构分类、顶板变形破坏特征与平衡结构及冒顶隐患评价。研究表明: 巷道复合顶板岩层结构可分为坚硬岩层、软弱岩层、下软上硬、下硬上软、软硬渐进、硬软相间及软硬相间等 7 个类型。对于较差的顶板岩层结构, 在层面和节理影响下, 巷道顶板下位分层形成离层、随动稳定状态的铰接岩块结构及亚稳定状态的裂隙弯曲结构, 其范围和承载能力与顶板岩层结构类型有关, 顶板变形和锚索延伸量呈现不协调性。采用锚索是否破断失效作为分级指标, 建立了冒顶隐患的分级方案, 划分了典型顶板岩层结构的隐患等级, 对 3 个级别的冒顶隐患进行了安全评估。

关键词: 煤巷; 顶板结构类型; 平衡结构; 锚索延伸量; 冒顶隐患分级

中图分类号: TD322 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2014)07-1205-07

Deformation and failure characteristics and roof caving hidden danger classification of roadways compound roof

JIANG Li-shuai, MA Nian-jie, BAI Lang, LI Yu-ji, ZHANG Lei

(School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: With compound lithological and great variation of stratification thickness, stability of coal mine roof differs significantly. Aiming at layered compound roof, using field detection, numerical simulation, theoretical analysis, strata structure classification, deformation and characteristics, balanced structure and caving hidden danger of roof were studied. The study results show that the strata structure of roadway compound roof can be classified into seven types: hard strata, soft strata, lower-soft upper-hard, lower-hard upper-soft, soft-hard progress, soft-hard alternation and hard-soft alternation. Under the effect of stratification and joint, the lower layers of poor strata roof form separation, stochastic stable hinged rock structure and metastable fracture bending structure, and its scope and bearing capacity is related to roof structure classification, roof deformation and cable extension presents incoordination. Taking cable status as classifying index, the classification scheme of roof caving hidden danger was established, classified hidden grade of typical roof strata structure, safety assessment was carried out.

Key words: coal mine roadway; roof structure type; balance structure; cable extension; hidden danger classification

我国煤矿每年掘进巷道总长度达数万千米, 由于煤矿巷道处于强度较低的沉积地层中, 围岩一般是由

多种岩体组成的复合结构, 从而导致巷道所处的地层条件复杂多样, 围岩性质千差万别, 巷道顶板条件具

有复杂性和多元性,甚至一条巷道的顶板岩层条件都会发生较大变化,且多数巷道在服务年限内还会受到采动影响。因此,巷道顶板岩层类型、稳定性、破坏特征及其冒顶隐患的差异很大。研究巷道顶板岩层结构类型及破坏特征,分析可能存在的冒顶隐患,是进行巷道冒顶隐患分级、顶板稳定分区及实施不同支护方案的基础。

国内外学者对复合层状顶板稳定性及冒顶隐患分析做了一些研究,Sofianos A. I.^[1-2]和林崇德等^[3-4]采用离散元方法研究了锚杆支护层状顶板的稳定性和变形破坏过程;贾蓬等^[5]运用 RFPA 分析了同一岩性层状顶板巷道围岩变形破坏与厚跨比及侧压的关系;岳中文等^[6]进行了煤巷复合顶板稳定性的模型试验;刘洪涛等^[7]采用稳定岩层高度进行巷道冒顶高风险区域识别。

针对巷道顶板岩层结构、变形破坏及支护状态的多样性与复杂性,以大量现场检测资料为依据,研究了巷道复合顶板结构的分类。采用离散元数值模拟方法,研究了典型顶板岩层结构的变形破坏特征和锚索支护状态;以锚索变形状态进行复合顶板冒顶隐患

的分级,并对不同隐患进行了支护安全性评估,为根据顶板岩层结构类型识别高冒顶隐患区域、优化支护方式、防治冒顶提供了依据。

1 巷道复合顶板的结构类型

1.1 巷道顶板岩层结构探测

煤系地层多为沉积形成的层状岩体,由于受沉积环境控制,沉积岩性、岩相及其组合特征各异,在垂向上岩性、岩相旋回变化,在侧向上发生增厚、变薄甚至尖灭,从而决定了顶板岩层复合形式及力学性质在空间上表现出明显的差异性^[8]。

通过对河南赵固、山西保德、辽宁沈北等矿区的多条复合层状顶板巷道进行调研,采用钻孔窥视仪进行巷道顶板岩层结构探测,绘制沿巷道走向的顶板岩层剖面图。赵固一矿 2₁煤层 11031 工作面 2 条回采巷道为典型的复合层状顶板巷道,两帮煤体强度高,帮部破坏较少,但顶板条件复杂,如图 1 所示。可见巷道顶板岩性主要包括软弱泥岩、中等强度的砂质泥岩和少量较坚硬的砂岩,同一条巷道的顶板岩性及厚度变化大,顶板岩层的组合类型多。

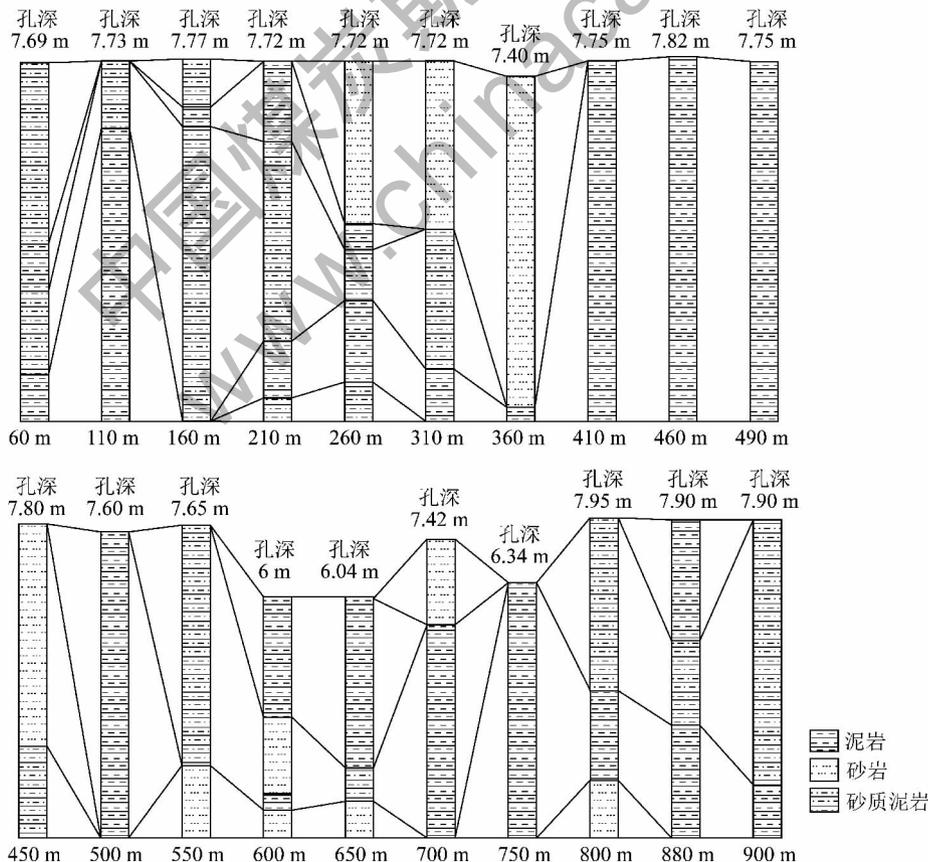


图 1 11031 回采巷道顶板观测区域岩层剖面

Fig. 1 Roof profile of gateways in mining area 11031

由此可见,由于成煤环境的变化和长时间的地质变迁等原因,不仅在长度达到上千米的回采巷道内,

煤层复合顶板岩性组合及其分层厚度等会发生变化,甚至在巷道走向几十米的范围内也会出现不同的复

合层状顶板结构,其顶板稳定性的差异较大。

1.2 巷道顶板岩层结构的分类

根据巷道岩层结构探测得到的有关钻孔柱状及其组合形式,对锚杆锚索支护范围内的顶板岩层,可将巷道复合层状顶板分为 7 个主要结构类型:①由砂岩组成的坚硬岩层型;②由泥岩、砂质泥岩或顶煤组成的软弱岩层型;③,④从顶板浅部到深部由砂岩、泥岩、砂质泥岩组成的下硬上软型及硬软相间型;⑤,⑥由泥岩或顶煤、砂岩组成的下软上硬型及软硬相间型;⑦由泥岩或顶煤、砂质泥岩、砂岩组成的软硬渐进型,如图 2 所示。

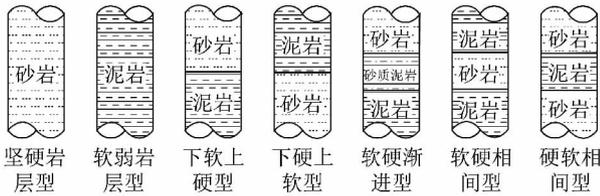


图 2 巷道顶板岩层结构类型

Fig. 2 Rock structure types of roadway roof

2 巷道复合顶板的变形破坏特征

2.1 数值模型及运算参数

煤矿巷道顶板为层状结构,经历构造运动后发育着一定的裂隙,由层面及裂隙切割成块体结构,在矿山压力作用下,巷道顶板浅部的层面与裂隙效应比较明显,具有不连续性特征^[9]。离散元法是一种处理节理岩体的数值方法,允许块体产生有限位移和旋转,块体间能够完全分离,可模拟工程岩体的非连续变形和大变形。因此,采用 UDEC 数值模拟软件,分析巷道层状顶板的变形破坏特征。

根据复合层状顶板岩层结构分类,坚硬岩层型、硬软相间型和坚硬分层厚度较大的下硬上软型顶板变形以弯曲离层为主,主要出现弯曲变形引起的竖向裂隙。即使砂岩分层发育,锚杆支护的组合梁效应将控制顶板变形。这 3 类顶板的稳定性较好,除受节理或断层弱面切割影响外,一般不存在冒顶隐患。软弱岩层型、下软上硬型、软硬相间型、软硬渐进型及薄硬厚软型(下分层厚度较小的下硬上软型)等 5 种结构类型,顶板稳定性较差,针对这些类型进行数值模拟,分析巷道不同顶板结构类型的变形破坏特征。

模型高 50 m,宽 60 m,煤层巷道理深 600 m,宽 4 m,高 3 m。采用先加载后开挖的模拟方式,模型上边界和左右边界分别施加垂直和水平应力 15 MPa,左右边界为水平位移约束,下边界为垂直位移约束。岩体采用 Mohr - Coulomb 准则,节理和层理面采用 Coulomb 滑移准则。5 种顶板岩层结构的岩性组成见

表 1,模型及网格划分如图 3 所示,岩层及其岩石力学参数见表 2。

表 1 复合顶板岩性组成

Table 1 Lithological combination of compound roof

顶板岩层类型	岩性组成
软弱岩层型	泥岩 6 m
下软上硬型	泥岩 3 m,砂岩 3 m
软硬相间型	泥岩 2 m,砂岩 2 m,泥岩 2 m
软硬渐进型	泥岩 2 m,砂质泥岩 3 m,砂岩 3 m
薄硬厚软型	砂岩 2 m,泥岩 6 m

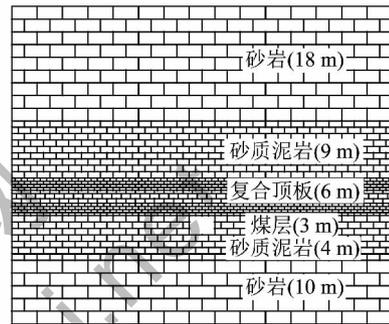


图 3 模型建立及网格划分

Fig. 3 Model and mesh generation

表 2 模型岩石力学参数

Table 2 Rock properties of model

岩性	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	K / GPa	G / GPa	C / MPa	$\varphi / (^\circ)$	σ / MPa
砂岩	2 800	18.3	11.5	6.20	37	4.3
泥岩	2 560	9.8	7.1	2.70	31	1.8
2 ₁ 煤	1 280	6.5	4.2	1.50	27	1.4
砂质泥岩	2 680	13.2	9.0	4.12	35	3.0

2.2 复合层状顶板变形破坏特征分析

5 种顶板结构的巷道顶板变形破坏及塑性区分布如图 4 所示。由图 3 通过观察对比可见:

(1) 复合顶板的破坏特征。如图 4(a) ~ (c) 所示,软弱岩层型、下软上硬型和软硬相间型的顶板下部均为软弱泥岩,在高围岩应力作用下,受顶板层状特征和节理切割效应的影响,围岩应力超过了泥岩强度,顶板下部的数个泥岩分层发生了严重的塑性及拉伸破坏,巷道顶板变形非常剧烈,并导致失稳冒落。如图 4(d) 所示,软硬渐进型因为上部岩层具有较强的承载能力及自稳能力,下部软弱岩层所承受的荷载较小,并未发生失稳冒落。如图 4(e) 所示,薄硬厚软型顶板虽然直接顶为薄层坚硬砂岩且未发生冒落,但上部软弱泥岩层强度低,不能形成有效的承载结构,

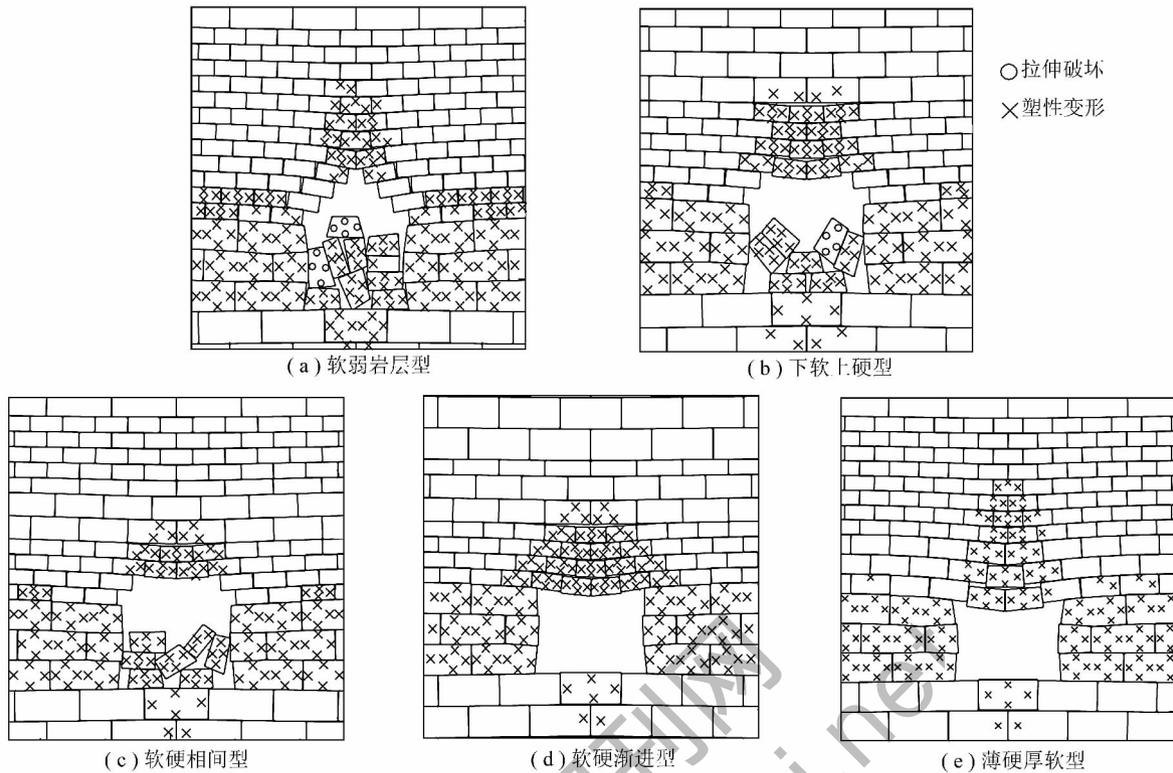


图4 复合顶板变形破坏特征

Fig. 4 Deformation and failure character of compound roof

致使作用在薄层砂岩直接顶上的载荷较大,尽管下部坚硬砂岩层形成了承载结构,但跨中处的岩块沿节理面发生了竖向滑移。

(2) 顶板平衡结构。随着顶板部分岩块的冒落和两帮煤体的受压变形,顶板各分层发生了弯曲下沉,两帮上方的顶板岩体向巷道空间内旋转。上部顶板岩块在围岩应力作用下发生了塑性变形,由一个或多个顶板分层形成了铰接岩块结构及裂隙弯曲结构。下部铰接岩块结构处于准平衡、随动稳定状态,其结构稳定性与水平应力、顶板厚跨比等因素有关,随着采动影响的加大,可能发生失稳冒落。上部裂隙弯曲结构处于亚稳定状态,具有一定自承载能力,随着采动影响的加大,可能转化为铰接岩块结构。裂隙弯曲结构对上覆岩层的垂直载荷起到弯曲承载、变形卸压、阻断传递的作用。尽管顶板岩性组合不同,5类顶板结构都形成了下部铰接岩块结构及上部裂隙弯曲结构,以裂隙弯曲结构作为顶板主要承载体进入亚平衡状态,不同顶板结构所形成的铰接结构及裂隙弯曲结构的位置和范围不同。

(3) 顶板离层变形。如图4(b)~(d)所示,3种顶板结构在软硬岩层分界处均发生了明显的不同程度的离层现象。离层形成的原因有几个方面:①煤系地层的层状特征在沉积和地质变动过程中就已形成,各个层理面胶结程度低、力学性能差,是天然力

学弱点;②巷道开挖引起围岩应力的重新分布和向巷道空间内的位移,不同岩层之间产生层间弯曲挠度的差异,沿岩性分界面滑动、张开,且在围岩应力的作用下进一步扩大;③铰接结构的跨中铰接点高于两端铰接点,挤压铰接结构发生了结构转动,与上部裂隙弯曲结构之间产生了显著的离层现象。

(4) 两帮和底板变形。受高垂直应力和水平应力的影响,两帮煤体内应力集中,塑性变形严重,两帮最大移近量约为1 m,不同顶板岩层结构对两帮的变形并无明显影响;底板由岩性较好的砂质泥岩构成,塑性变形不显著,底板鼓起约50 mm。对比发现,在不同顶板结构下并没有引起巷道两帮和底板变形破坏的显著差异。

3 巷道复合顶板的冒顶隐患分级

3.1 巷道复合顶板及支护状态的不协调性

巷道层状复合顶板需采用锚杆-锚索联合支护,以锚杆及时支护巷道周围浅部围岩,提高围岩自承载能力,预应力锚索在锚杆支护的基础上进一步提高支护强度,并将超过锚固范围的顶板松动区岩石悬吊在稳定岩石中^[10-12]。经过大量现场调研发现,在高地应力、围岩软弱破碎、顶板岩性复合等围岩劣化条件下,锚索的破断失效非常突出,大大降低支护效果,形成冒顶隐患。

为分析巷道不同顶板结构的锚杆-锚索支护效果,在数值模型加载达到初始平衡后,开挖并立即支护,支护后进行迭代运算。参考赵固一矿、二矿₂₁煤层回采巷道支护形式,模型巷道断面支护形式及参数如图 5 及表 3 所示。

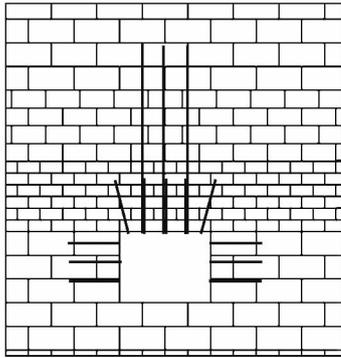


图 5 模型支护断面

Fig. 5 Sectional drawing of model support

表 3 锚杆-锚索支护参数

Table 3 Bolt-cable support parameters

支护类型	直径/mm	长度/mm	间距/mm	锚固段长度/mm	材料延伸率/%	破断载荷/kN
锚杆	20.0	2 400	800	1 200	15	170
锚索	21.6	8 000	1 000	2 400	3	500

在巷道跨中及一侧沿锚索轴向布置长 8 m 的位移观测线,记录锚索部位发生的竖向位移,分析不同部位顶板位移及锚索变形的不协调性。

模型达到稳定状态后,5 种顶板结构的锚索的竖向位移如图 6 所示。锚杆与锚索端部采用树脂锚固剂,尾部托盘固定,排除锚索端部锚固被拉出及托盘失效索体被拉入岩体所造成的锚索失效,锚索的轴向位移即为锚索各段发生的位移,尾部与自由段端部的位移之差即为锚索的延伸量,顶板位移及锚索延伸量的特征值见表 4。

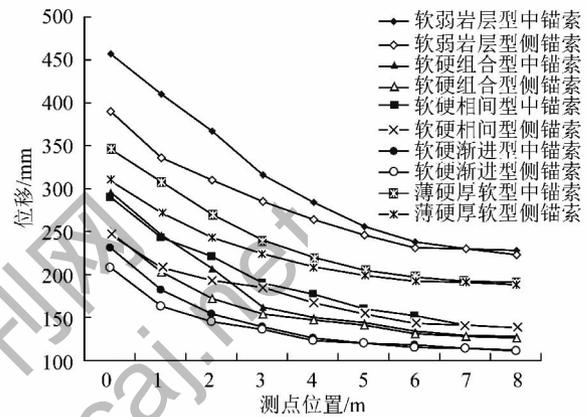


图 6 顶板锚索位移监测曲线

Fig. 6 Monitoring curves of roof cable displacement

表 4 不同顶板岩层结构位移量及锚索延伸量

Table 4 Displacement and cable extension of different kinds of roof strata

顶板结构	表面最大下沉量/mm		跨中锚索延伸量 ΔL_z /mm		侧边锚索延伸量 ΔL_c /mm		顶板位移不协调深度/m
	深部最大位移/mm						
软弱岩层	457	228	210	151	4		
软硬组合	296	128	157	113	2		
软硬相间	290	138	134	98	2		
软硬渐进	231	112	112	91	2		
薄硬厚软	346	191	145	114	3		

由此可见,不同顶板结构条件下,巷道顶板的位移及锚索自由段延伸量有着明显的差异,巷道顶板岩层的结构类型对支护效果、顶板稳定性及支护结构有很大的影响。对于顶板表面下沉量、深部位移量及锚索变形量,软弱岩层型最大,薄硬厚软型次之,其他 3 类相对较小。

巷道大变形顶板的变形和锚索延伸量呈现明显的不协调状态。巷道顶板浅部与深部、中部与边部的位移量有着很大的差异,顶板的浅部及中部发生了显著的竖向位移,顶板中部位移大于两侧,浅部位移大于深部,在中部和侧边的锚索部位,顶板位移的不协调深度分别达到 4、3 和 2 m。跨中锚索的自由段延

伸量达到 112~210 mm,侧边锚索的自由段延伸量只有 91~151 mm。根据顶板变形破坏平衡结构分析,顶板中所形成的铰接结构、裂隙弯曲结构及离层是导致顶板位移与锚索延伸量不协调的根本所在。

3.2 复合层状顶板冒顶隐患的分级

在复合层状顶板条件下,受锚杆长度的限制,锚杆支护组合拱的承载力不足以承载围岩施加的载荷,易发生支护失效并存在冒顶隐患,进而通过锚索的悬吊作用有效地阻止顶板冒顶。但由于锚索受材质所限,工程延伸量较小^[7,13],在顶板条件差、大变形等复杂难支护条件下,当围岩变形达到锚索的极限变形量时,锚杆-锚索支护体的承载能力仍小于控制围岩稳

定所需的支护作用力,围岩继续变形破坏从而导致锚索破断失效,出现冒顶隐患。

因此,通过锚索的延伸量与工程极限延伸量的关系,可以判断锚索是否破断失效。根据中部、侧边锚索的支护状态,建立冒顶隐患的分级方案,见表 5。I 级冒顶隐患顶板锚索不破断,II 级冒顶隐患顶板跨中锚索破断,III 级冒顶隐患顶板跨中及边侧边锚索破断。

表 5 复合顶板冒顶隐患分级

Table 5 Roof caving hidden danger classification of compound roof

冒顶隐患等级	工程极限延伸量	锚索状态	典型顶板结构类型
I 级低冒顶隐患	$\Delta L_c \leq \Delta L_z \leq \Delta L$	各处锚索完好	软硬渐进
II 级中等冒顶隐患	$\Delta L_c \leq \Delta L \leq \Delta L_z$	中部锚索破断,侧边锚索完好	软硬组合、软硬相间、薄硬厚软
III 级高冒顶隐患	$\Delta L \leq \Delta L_c \leq \Delta L_z$	中部、侧边锚索破断失效	软弱岩层

预应力锚索的工程极限延伸量为锚索自由段最大延伸量与张拉时产生的延伸量之差,受索体材料质量及施工质量等工程因素的影响,可以由下式计算:

$$\Delta L = \left(1 - \frac{F_p}{F_T}\right) \varepsilon L$$

式中 ΔL 为锚索工程极限延伸量; L 为锚索两锚固端之间自由段长度; F_p 为锚索预紧力; F_T 为锚索极限破断载荷; ε 为锚索材料延伸率。

根据表 3 中模拟计算所使用锚索的参数,可以得到该规格锚索的工程极限延伸量 $\Delta L = 120.96$ mm。

通过对比不同顶板岩层结构中锚索延伸量与工程极限延伸量的关系,划分典型顶板条件下冒顶隐患的等级,见表 5。

3.3 冒顶隐患的分级评估

I 级冒顶隐患: 无锚索破断失效,冒顶隐患级别最低。该级别顶板当前的锚杆-锚索支护能够保持围岩稳定,锚杆的使围岩形成统一自承结构和锚索的悬吊作用得到充分发挥,当巷道掘进过断层或受工作面采动影响等情况时,需加强顶板位移监测,根据需要适时进行补强支护。

II 级冒顶隐患: 顶板中部锚索破断失效,两侧锚索完好,冒顶隐患中等。对于该级顶板应先进行二次补强支护,防止中部松动载荷过大造成漏顶,之后可根据围岩条件适当调整支护工艺及参数,使锚杆与锚索的联合支护更协调、互补,还可采取加木垫板、滞后

掘进工作面安装锚索、合理布置锚索位置的方法提高锚索对围岩的适应性,并在巷道过断层、受回采影响期间进行适当补强支护。

III 级冒顶隐患: 顶板锚索全部破断失效,冒顶隐患级别高。锚索的悬吊作用因破断而彻底丧失,顶板有大面积垮落的危险,且垮落高度高于锚杆支护范围。由于当前的支护方式不能与围岩的大变形条件相适应,此时只通过加大支护强度、密度并不是最有效的解决途径。应对围岩力学性质、巷道矿压显现规律等进行研究,改用延伸量大、可以与围岩协调变形且能保持较高支护阻力的支护手段。

3.4 冒顶隐患分级工程应用

为验证该冒顶隐患分级方式的科学性,将赵固一矿 11031 采区运输巷道 450 ~ 550 m 段和回风巷道 300 ~ 400 m 段布置为试验段,进行现场工业性试验。

对试验段内巷道顶板进行岩层结构探测,以此为基础划分顶板结构类型和冒顶隐患等级。对于 I 级顶板采用原锚杆-锚索联合支护方案;对于 II 级顶板采用每排补打两根锚索的补强支护方式;对于 III 级顶板改用大直径、高延伸率(7%)锚索进行支护。在试验段内顶板各处进行围岩内部位移监测,以 11031 回风巷道 310 m(II 级)和 400 m(III 级)两处顶板表面相对 8 m 深部的相对位移监测为例,曲线如图 7 所示。

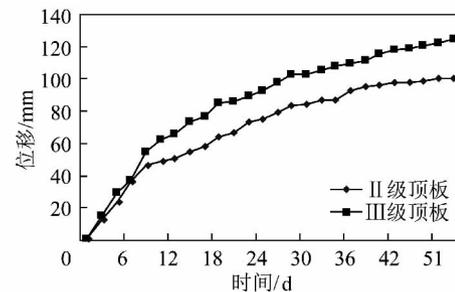


图 7 顶板相对位移监测曲线

Fig. 7 Monitoring curves of roof relative displacement

由图 7 可以看出补强后顶板跨中位置顶板表面相对顶板深部的位移量小于该处支护物的工程极限延伸量,监测期间顶板变形量均在允许范围内,锚杆、锚索完好,消除了因锚索破断失效产生的冒顶隐患。工程应用结果表明,复合顶板冒顶隐患分级可判别高冒顶隐患区域并有针对性的对进行及时补强,降低冒顶事故发生概率,保证巷道安全。

4 结 论

(1) 根据巷道顶板岩层结构探测分析,受成煤环境变化和长时间地质变迁等影响,煤层顶板岩性复合

及其分层厚度等会发生明显变化,煤层巷道复合顶板可以分为坚硬岩层型、软弱岩层型、下软上硬型、下硬上软型、软硬渐进型、硬软相间型及软硬相间型等7个结构类型。

(2) 对于稳定性稍差的5种顶板岩层结构,受顶板层状特征和节理切割效应的影响,巷道顶板下位分层产生离层裂隙,并形成下部准平衡、随动稳定状态的铰接岩块结构,及上部亚稳定状态的裂隙弯曲结构,以裂隙弯曲结构作为顶板主承载体。顶板变形破坏特征取决于铰接结构及裂隙弯曲结构的自稳形成,其范围和承载能力与顶板岩层结构类型有关。

(3) 巷道顶板位移、锚索延伸量、支护效果及稳定性与顶板岩层结构类型密切相关,在顶板平衡结构的主导下,顶板变形和锚索延伸量呈现明显的不协调性。

(4) 以锚索是否破断进行冒顶隐患的分级,并划分典型顶板岩层结构的隐患等级。I级冒顶隐患顶板锚索不破断,如软硬渐进型;II级冒顶隐患顶板跨中锚索破断,如下软上硬型、软硬相间型及薄硬厚软型;III级冒顶隐患顶板跨中及边侧边锚索破断,如软弱岩层型。针对顶板岩层结构类型及冒顶隐患级别,采取相应的支护改进措施。

参考文献:

- [1] Sofianos A I, Kapenis A P. Numerical evaluation of the response in bending of an underground hard rock voussoir beam roof [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 1998, 8: 1071 - 1086.
- [2] Sofians A I. Analysis and design of an underground hard rock voussoir beam roof [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 1996, 2: 153 - 166.
- [3] 林崇德. 层状岩石顶板破坏机理数值模拟过程分析 [J]. 岩石工程力学与学报, 1999, 18(4): 392 - 396.
Lin Chongde. Procedure analysis of numerical simulation for the failure mechanism of laminate roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 392 - 396.
- [4] 林崇德, 陆士良, 史元伟. 煤巷软弱顶板锚杆支护作用的研究 [J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 482 - 485.
Lin Chongde, Lu Shiliang, Shi Yuanwei. Study on support effect of rock bolting in soft-weak roof [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 482 - 485.
- [5] 贾蓬, 唐春安, 王述红. 巷道层状岩层顶板破坏机理 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 11 - 15.
Jia Peng, Tang Chun'an, Wang Shuhong. Destroy mechanism of tunnel with stratified roof [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 11 - 15.
- [6] 岳中文, 杨仁树, 闫振东, 等. 复合顶板大断面煤巷围岩稳定性试验研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 47 - 52.
Yue Zhongwen, Yang Renshu, Yan Zhendong, et al. Experimental study on stability of surrounding rock of coal roadway with compound roof and large cross section [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 47 - 52.
- [7] 刘洪涛, 马念杰. 煤矿巷道冒顶高风险区域识别技术 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2043 - 2047.
Liu Hongtao, Ma Nianjie. Coal mine roadway roof caving high risk areas recognition technology [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2043 - 2047.
- [8] 侯朝炯. 巷道围岩控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013: 186 - 194.
Hou Chaojiong. Ground control of roadways [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2013: 186 - 194.
- [9] 杨建辉, 夏建中. 层状岩石锚固体全过程变形性质的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 414 - 417.
Yang Jianhui, Xia Jianzhong. Test study on the complete deformation property of bolted stratified sounding rock masses [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 414 - 417.
- [10] 马念杰, 赵庆彪, 刘少伟. 煤巷锚杆支护新技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 35 - 46.
Ma Nianjie, Zhao Qingbiao, Liu Shaowei. Bolt-anchor cable new technology [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2006: 35 - 46.
- [11] Liu Hongtao, Ma Nianjie, Zhao Feihu. New bolting structure of fractured roof based on the Bossinesq equations [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(2): 260 - 265.
- [12] 赵庆彪, 侯朝炯, 马念杰. 煤巷锚杆-锚索支护互补原理及其设计方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 490 - 493.
Zhao Qingbiao, Hou Chaojiong, Ma Nianjie. Supplementary principle and design method of bolt and cable anchor supporting technique [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4): 490 - 493.
- [13] 贾明魁. 锚杆支护煤巷冒顶事故研究及其隐患预测 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2004: 20 - 28.
Jia Mingkui. Coal roadway bolt support roof caving accidents and hidden danger prediction research [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2004: 20 - 28.