

基于围岩动态监测与反馈的锚固巷道稳定控制

Stabilization control of rock bolted roadways based on dynamic monitoring and feedback of surrounding rocks

孔 恒¹, 马念杰², 王梦恕¹, 张德华¹

(1. 北方交通大学隧道与地下工程研究中心, 北京 100044; 2. 中国矿业大学(北京校区) 资源系, 北京 100083)

摘 要: 针对煤巷锚杆支护的稳定控制问题, 以锚固系统的变形协调条件出发, 提出了围岩动态监测与反馈的基本原理并对其指标的选取、确定以及运用准则给予了分析和说明。最后通过实例论证了围岩动态监测与反馈的应用效果。

关键词: 煤巷; 锚杆支护; 离层临界值; 监测与反馈

中图分类号: TD 325.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2002)04-0475-04

作者简介: 孔 恒(1965-), 男, 安徽涡阳县人, 北方交通大学博士研究生, 工程师, 主要从事隧道与地下工程研究。

KONG Heng¹, MA Nianjie², WANG Mengshu¹, ZHANG Dehua¹

(1. Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Pointing to the problem of stability control of coal roadways supported by rock bolts, based on the coordinate deformation condition of rock bolting system, the principle of dynamic monitoring and feedback of surrounding rocks was given, and its quota chosen and determined and its application codes were analyzed. The application effects of engineering monitoring and feedback are expounded through examples.

Key words: coal roadways; rock-bolt supporting; abscission layer critical value; monitoring and feedback

1 引 言*

锚杆加固的岩体由于其外在特征属隐蔽工程, 失稳破坏前一般无明显征兆, 因此一旦发生事故, 往往具突发性。已有的工程实践和研究表明: 岩体内部的变形是锚固工程失稳破坏的基本特征或直接原因。因此把顶板离层值作为一个能预测锚固巷道稳定性的指标, 近年已在国内外得到重视。尽管如此, 但因没有考虑巷道两帮变形等而难于适应煤巷锚杆支护稳定性的评价。基于此, 本文重点以煤巷锚杆支护为例, 来分析和说明基于围岩动态监测与反馈的锚固巷道稳定控制原理和实施过程。

2 围岩动态监测与反馈的基本原理

2.1 锚固巷道监测与反馈的概念

由围岩的变形协调条件^[1], 在任一时刻锚固巷道稳定的条件下, 锚固系统与围岩的变形协调条件即位移连续性方程是 $u_{is} = u_i - u_0$, $\delta_s = \delta_b + \delta_r$, $u_{is} = \delta_s$, 合并得

$$u_i - u_0 = u_{is} = \delta_s = \delta_b + \delta_r \quad (1)$$

式中 u_i 为某一时刻锚固巷道的周边位移; u_0 为锚固前巷道周边的原始位移; u_{is} 为某一时刻锚固巷道周边的实际位移; δ_s 为某一时刻锚固系统提供的位移; δ_b 为某一时刻锚杆的伸长量; δ_r 为某一时刻锚固围岩体产生的位移。

某一时刻, 当 $u_i \rightarrow [u]$ 时, 此时 $\delta_s \rightarrow [\delta_{smax}]$, $[\delta_{smax}]$ 即为锚固系统提供的允许位移值。由于此时锚固体处于极限平衡状态, 式(1)仍成立, 即有 $[u_s] = [u] - u_0$, $[\delta_{smax}] = [\delta_{bmax}] + [\delta_{rmax}]$, $[u_s] = [\delta_{smax}]$, 于是有 $[u] - u_0 = [u_s] = [\delta_{smax}] = [\delta_{bmax}] + [\delta_{rmax}]$ (2) 由式(2), 从右侧求解 $[u_s]$ 相对较为复杂。原因是虽然 $[\delta_{bmax}]$ 是已知量, 但 $[\delta_{rmax}]$ 的求解繁琐且假设条件过多 (对全锚 $[\delta_{rmax}]$ 可视为锚杆周边剪应力最大时的锚杆与围岩之间的相对位移)^[2], 故置信度较低。而从左侧求解 $[u_s]$ 则相对较为容易。原因是 u_0 已知, 而 $[u]$ 可由现场实际观测得到。显然由 $[u]$ 可方便求出 $[u_s]$ 和 $[\delta_{smax}]$, $[\delta_{rmax}]$ 也可方便求出。

由变形协调条件知, 对锚杆支护巷道可以通过围岩监测手段, 以达到反馈指导实践, 从而确保锚固巷道稳定的目的。

2.2 监测与反馈指标的选取和确定

对锚固巷道, 由于顶板离层是地应力、围岩力学性质、围岩体结构、锚杆加固参数、巷道断面等诸因素综合作用的外在表现^[3], 因此顶板离层是首选指标。但对煤巷锚杆支护, 其两帮的变形必须考虑。本着科学性、实用性以及指标易于测取且是影响支护参数的关键数据等原则, 选用顶板离层值、两帮相对移近量以及锚杆受力三个方面的5项指标作为反映煤巷锚杆支护

稳定性的监测与反馈信息指标。

顶板离层值因用途和含义不同而有不同的数值。这里提出三个概念: 临界值、失稳临界值及工程估计值。

离层临界值是指锚固巷道中, 顶板尚处稳定状态下的岩层离层、松动扩容的位移最大值。顶板离层临界值是顶板由稳定向不稳定转化的一个判定指标, 但它不等于巷道失稳冒落值。由式(1)知, 锚固范围内实测的顶板离层值 ΔS_i 即为某一时刻锚固围岩体产生的位移 δ_r 。当 ΔS_i 为设计规定的离层值 $[\Delta S_i]$ 时, 即 δ_r 为 $[\delta_r]$ 时, $[\delta_r]$ 即为顶板离层临界值; 若 $\Delta S_i > [\Delta S_i]$, 且 $\delta_r = [\delta_{\max}]$ 时, 由式(2)知, $[\delta_{\max}] = [\delta_{\max}] - [\delta_{\max}]$, 则表明锚固体处于极限平衡状态, 此时的 $[\delta_{\max}]$ 即为失稳临界值。但为确保巷道稳定, 从工程实用出发, 应采用锚固系统提供的允许围岩位移的工程估计值, 此时相对应的 $[\delta_e]$ 即为顶板离层的工程估计值。一般地, $[\delta_e]$ 为大于锚固范围内离层临界值的实际观测数值。

离层临界值对应于掘进影响期。工程估计值一般指巷道在整个服务期间顶板离层的安全允许值。失稳临界值一般在采动影响期发生, 此时顶板及两帮不稳定, 易发生冒顶和片帮。因此离层临界值的修改设计应根据该时期所取得的反馈信息进行, 而不能等到受采动影响以后。

综上所述, 确定的 5 个用于监测与反馈判断的指标用 $[\delta_A]$ 、 $[\delta_B]$ 、 $[\delta_C]$ 、 $[N_{rd}]$ 和 $[N_{re}]$ 表示。其中 $[\delta_A]$ 、 $[\delta_B]$ 分别为锚固区内(指锚杆长度范围内)、外顶板离层临界值; $[\delta_C]$ 为两帮相对移近量临界值; $[N_{rd}]$ 为全长锚固测力锚杆杆体测点屈服数与杆体测点总数的比值, 暂定为 1/3; $[N_{re}]$ 为端锚锚杆的设计锚固力, kN。

基于《缓倾斜、倾斜煤层回采巷道围岩稳定性方案》和《采准巷道支护技术规范》(初稿), 利用有限差分数值模拟方法(40 条巷道), 同时考虑到巷道受采动影响及一定的安全系数, 最后确定出的顶板全长锚固支护(A)、顶板端部锚固支护(B)、两帮锚杆支护(C)的离层临界值(参考值)见表 1。

表 1 离层临界参考值表

Table 1 Critical reference values of abscission layer mm					
围岩稳定性类别	锚固区域内		锚固区域外		巷帮
	$[\delta_{eA}]$	$[\delta_{eB}]$	$[\delta_{eA}]$	$[\delta_{eB}]$	$[\delta_{eC}]$
I	8	10	10	12	35
II	10	15	12	17	70
III	15	22	18	27	150
IV	18	25	22	30	220
V	20	30	25	35	300

2.3 监测与反馈指标的运用准则

若把巷道掘巷影响期间的实测值与监测和反馈指标相对应地记作为 ΔS_A 、 ΔS_B 、 ΔS_C 、 S_D 和 S_E , 则其监测与反馈指标的运用准则见表 2。

3 应用实例

3.1 基于顶板离层指示仪的动态监测与反馈实例

利用顶板离层指示仪(可同时监测锚固区内外岩层的移动情况。以顶板表面为基准点, 锚固区内固定基点距顶板表面距离为 1.8~2.0 m; 锚固区外, 一般距离顶板约 5.0~10.0 m), 先后对三个矿务局五个煤矿进行了现场观测初始设计, 其监测结果汇总见表 3。由表 2 运用准则, 除新汶潘西矿巷道锚固参数未作修改外, 其余均作了修改及部分修改设计。如对邢台章村矿巷道追加了顶板打锚索和增加锚杆, 两帮注浆等措施; 而对新汶孙村矿巷道则作了顶板补打锚索的局部补强措施。

3.2 基于深基点位移计的动态监测与反馈实例

为全面考察煤巷锚杆支护巷道围岩深部位移移动变形情况, 利用 KDW-1 机械式多点位移计对邢台章村矿 4225 皮带下山进行了观测。深基点布置见图 1。顶板及两帮深基点的位移曲线见图 2~4。

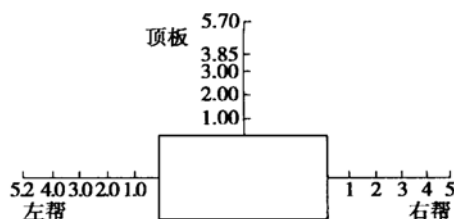


图 1 深基点测点布置

Fig. 1 Location of multipoint displacement instruments

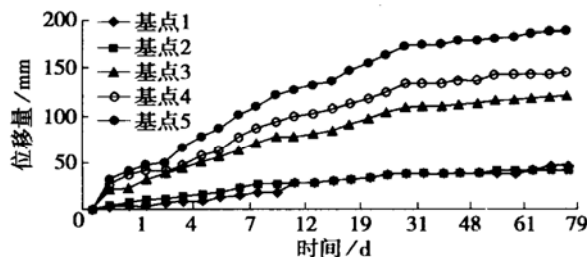


图 2 顶板深基点位移-时间曲线

Fig. 2 Monitored curves of displacement-time of roof

图 2 反映了锚网支护下顶板不同深度岩层的变形移动情况, 由观测数据知:

(1) 锚固区范围内的顶板岩层没有出现明显的离层现象, 顶板表面至 1 m 测点下沉 27 mm(观测 74 d), 1 m 至 2 m 测点下沉 14 mm(观测 67 d)。顶板锚固状况较好, 保持了顶板岩层的整体性能。

表 2 监测与反馈指标的运用准则

Table 2 Application codes of monitoring and feedback

围岩区域	修改条件	技术措施
锚固区内	$\Delta S_A > [\delta_{cA}]$	加密顶板锚杆间排距, 原则上每排先增加 1 根锚杆。
锚固区内	$\Delta S_A < [\delta_{cA}], S_D > [N_{rD}]$ 或 $S_E > 0.7[N_{rE}]$	加大顶板锚杆强度, 原则上每根锚杆直径增加 2 mm; 若锚杆直径超过 22 mm, 则改用更优的材质。
锚固区内	$\Delta S_A > [\delta_{cA}], S_D > [N_{rD}]$ 或 $S_E > 0.7[N_{rE}]$	加密锚杆间排距; 加大锚杆强度。其修改原则与上相同。
锚固区内	$\Delta S_A < [\delta_{cA}], S_E < 0.45[N_{rE}]$	增加锚杆粘结段长度; 加密锚杆间排距。与其对应原则相同。
锚固区外	$\Delta S_B > [\delta_{cB}]$	加大锚杆长度, 原则上先增加 200 mm; 加强两帮锚杆或在两帮和底角注浆; 据情况顶板可追加锚索。
巷道两帮	$\Delta S_C > [\delta_{cC}]$	加大两帮锚杆长度; 加密两帮锚杆间排距。与其对应原则相同。
巷道两帮	$S_D > [N_{rD}]$ 或 $S_E > 0.7[N_{rE}]$	加大两帮锚杆强度, 与其对应原则相同。
巷道两帮	$\Delta S_C > [\delta_{cC}], S_D > [N_{rD}]$ 或 $S_E > 0.7[N_{rE}]$	加大两帮锚杆的强度和长度; 加密两帮锚杆间排距。与其对应原则相同。
巷道两帮	$\Delta S_C > [\delta_{cC}], S_E < 0.45[N_{rE}]$	增加两帮锚杆以及粘结段长度; 加密两帮锚杆间排距。与其对应原则相同。

表 3 现场监测结果汇总

Table 3 Monitored results in situ

项 目		邢台章村 矿 4525 皮 带下山	邢台显德 汪矿 1725 开切眼	新汶潘西 矿 4913 东运输巷	新汶孙村 矿 4217 上运巷	开滦荆各庄 矿 1228 底回风巷
锚固区内顶板 离层/ mm	设计临界值	20	18	18	20	18
	实测值	32	18	16	45	30
锚固区外顶板 离层/ mm	设计临界值	25	22	22	25	22
	实测值	146	27	9	8	29
两帮相对移近 量/ mm	设计临界值	300	220	220	300	220
	实测值	313	190	34	38	94
测力锚杆测点 屈服数/ 对	设计临界值	3	3	2	3	3
	实测值	7	3	0.3	3	3
端锚锚杆锚固 力/ kN	设计临界值	60	50	80	50	60
	实测值	51	27	50	34	36
是否修改		修改	部分修改	否	否	部分修改

(2) 锚固区外, 测点 2 m 至 5.73 m 范围, 顶板岩层呈现离层变形情况, 尤其是 2 m 至 3 m 范围岩层出现 72 mm(观测 74 d) 的离层变形量, 原因是巷道围岩破碎, 顶板软弱岩层增厚, 锚固层不能有效支承上部岩层。此时需采取加强支护措施。如安装锚索、架棚等以确保安全。

(3) 顶板岩层内各测点下沉量随时间变化, 特点为: 锚固内岩层能较快地趋于稳定, 初期变形量也不大, 最大为安装后第一天, 达 5 mm/d, 10 d 后稳定在 1 mm/d, 一般均在 0.5 mm/d 以下; 锚固区外各测点之间的下沉变形较长时间不能稳定, 初期变形量也大。最大为安装后第一天, 2 m 至 3 m 之间岩层下沉 16 mm/d, 掘进 25 d, 顶板上部岩层才趋于稳定。变形特点表明安装锚索应紧跟迎头, 避免锚固区外的岩层离层以保持顶板的整体性能。

图 3~ 4 反映了锚网支护下两帮煤层不同深度的

变形移动情况, 由观测数据知:

(1) 两帮煤体向巷道方向移动的范围在 4 m 左右。

(2) 锚固区煤体向巷道方向移动量较大, 右帮(西帮) 巷道表面至煤体内 1 m, 1~ 2 m 的煤体向外移动量分别为 57 mm、35 mm。说明锚固力不够。

(3) 距巷道表面 2~ 4 m 的煤体向外移动量逐渐减少, 中间没有出现较大的变化, 说明该范围煤体破坏程度依次减小。

(4) 两帮煤层 4 m 范围内各测点向巷道内移动速度在掘后 25 d 才趋于稳定, 说明帮锚杆对锚固区内的煤体在掘进影响期间约束力不够, 应提高帮锚杆的支护强度。

通过对顶板及两帮的深基点位移观测及分析, 虽然顶板锚固区离层不甚明显, 但顶板锚固区外及两帮锚固范围内均已大于相应的离层临界值, 据表 2 运用准则, 必须对其采取补强措施。为此, 顶板适时采用了

追加锚索或架棚,两帮采用高水速凝材料进行注浆加固,底板采用追加锚杆和注浆等措施,从而确保了煤层底脚巷道锚杆支护的成功。

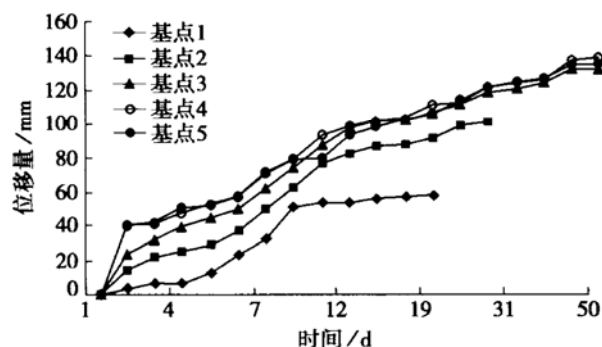


图3 右帮深基点位移—时间曲线

Fig. 3 Monitored curves of displacement-time of right wall

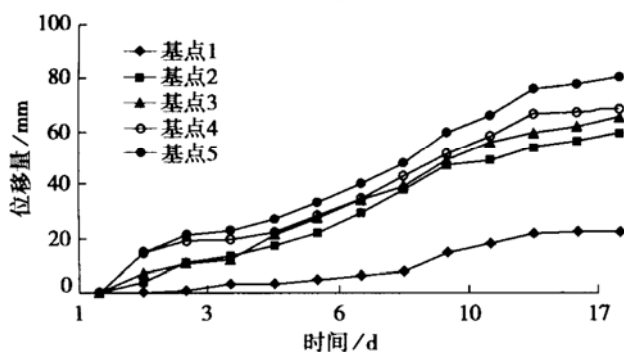


图4 左帮深基点位移—时间曲线

Fig. 4 Monitored curves of displacement-time of left wall

4 结 论

(1) 对煤巷锚杆支护的稳定控制问题,可以通过围岩动态监测与反馈原理,以达到确保锚固巷道稳定的目的。实践表明,它是一种简单易行的技术手段,且具

有明显的技术及经济效益。

(2) 对煤巷锚杆支护,可选用顶板离层值、两帮相对移近量以及锚杆受力三个方面的5项指标作为反映煤巷锚杆支护稳定性的监测与反馈信息指标。

(3) 离层临界值对应于掘进影响期,不同的矿区可在大量监测的基础上,总结出适宜的监测与反馈判断数值。

(4) 在确定顶板离层临界值时,今后应引起重视的观点是:锚固区外离层临界值应以小于或与锚固范围内相当为宜^[1]。这一结论与国外文献观点趋同。如澳大利亚提出锚固范围内的顶板应变值(离层值)大于10 mm/m(1%)时,顶板岩层即进入软化阶段(顶板岩层传递应力的能力开始下降,而水平应力开始向上部岩层转移),并认为若锚固长度范围之外岩层发生变形则应安装长锚杆或锚索等^[4];波兰规定的顶板离层值为:锚固范围内为锚杆长度的2%,锚固范围外为1.5%且必须是4.5 m深处^[5]。

参考文献:

- [1] 孔 恒. 岩体锚固系统的机理及新技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2000.
- [2] 王明恕. 全长锚固锚杆机理的探讨[J]. 煤炭学报, 1983, (1): 40-45.
- [3] 鞠文君. 锚杆支护巷道顶板离层机理与监测[J]. 煤炭学报, 2000, 25(增刊): 58-61.
- [4] 哈依斯 A, 等. 岩层控制技术的发展现状[A]. 国外锚杆支护技术译文集[M]. 北京: 煤炭科学研究总院北京开采所, 1997. 123-129.
- [5] 塔格 A T, 等. 锚杆在波兰煤矿的应用[A]. 国外锚杆支护技术译文集[M]. 北京: 煤炭科学研究总院北京开采所, 1997. 50-67.

欢迎订阅 2003 年《工程勘察》

《工程勘察》(Geotechnical Investigation and Surveying) 为中文核心期刊, 大 16 开, 双月刊, 80 页码。

涵盖: 岩土工程, 工程地质, 环境地质, 地下水资源勘察与评价, 水文地质, 测量工程, 遥感应用, 地理信息系统, 工程物探, 工程钻探, 地球物理, 计算机在勘察行业中的应用等领域。

设置: 学术研究, 工程技术, 技术动态, 勘测信息, 仪器设备评介, 企业采风, 专家论坛, 技术讲座等栏目。

刊号: CN11-2025/TU, ISSN1000-1433, 邮发代号: 2-832, 每期定价: 8.00 元, 全年定价: 48.00 元, 逢单月 22 日出版。全国各地邮局(所)均可订阅, 如有漏订, 可随时向编辑部邮购, 无需另加邮费。欢迎新老朋友订阅、投稿, 提出宝贵意见和建议。欢迎刊登广告。地址: 北京市东直门内大街 177 号, 邮编: 100007, 电话: (010) 64013366 转 108, 64043313。