

# 深井巷道围岩松动圈影响因素 实测分析及控制技术研究\*

靖洪文 付国彬 郭志宏  
(中国矿业大学 徐州 221008)

**摘要** 对千米深井,按5个水平、不同岩性及是否受采动影响的围岩松动圈实测分析揭示了松动圈与开采深度、围岩强度、采动次数、临界开采深度、支护难度等的关系,进而探讨了深井、大松动圈巷道围岩合理控制技术,据此进行了工业性试验,取得良好的效果。

**关键词** 深井, 松动圈, 影响因素

**分类号** TD350.1

## 1 引言

在原岩中开挖巷道,破坏了围岩原有的应力状态,使应力重新分布:一是径向应力减少,周边处达到零;二是切向应力增加,产生了应力集中。另一方面,围岩受力状态由三向变成了近似二向,围岩强度下降。若集中应力值小于松动后的围岩强度,围岩能够自行稳定,不存在支护问题;如果相反,围岩将发生破裂。这种破裂从巷道周边开始逐渐向深部扩展,直到达到另一新的三向应力平衡状态为止,此时围岩中出现一个破裂区,这个破裂区称为围岩松动圈。它有一个发生、发展和稳定的过程,稳定后的松动圈厚度值反映了围岩应力、围岩强度等因素共同作用的结果。大量现场测试结果表明:在煤矿生产中巷道围岩破坏不可避免,即使处于低应力场中巷道围岩在地应力作用下也难以自稳,一般也要出现中小松动圈<sup>[1]</sup>。煤矿生产中大量地下岩石工程都在围岩破坏和发展中支护<sup>[2]</sup>,巷道围岩变形量以数十数百毫米计,这样大的变形量不可能在围岩破裂前发生,而主要是岩体破裂过程中发生的体积膨胀(剪胀或碎胀),巷道地压的显现也是岩体破裂的表现,围岩与支护的作用也正是发生在破裂区内。所以近年来越来越多的采矿专家认为<sup>[3-5]</sup>:必须重视和加强岩石破裂后力学性质的研究,以建立符合矿山实际工程

的力学模型。围岩松动圈巷道支护理论正是基于煤矿工程实际情况而提出的。经过大量实验室试验、理论分析及现场实测,认为松动圈围岩的“碎胀变形”是巷道收敛变形的主要原因,支护的主要对象是松动圈形成过程中的“碎胀变形”,松动圈越大,则围岩变形量越大,巷道越难支护。因此提出以“稳定松动圈厚度”作为围岩应力与围岩强度等影响因素的综合指标,进行围岩分类和支护设计。十几年来,围岩松动圈巷道支护理论在我国煤矿十余个中浅部矿区成功地支护了5万余米巷道,取得巨大的经济效益。但在千米深井和采动影响下系统研究松动圈影响因素及其合理控制技术尚属首次。

本文采用现场实测方法,通过对开滦矿务局赵各庄矿千米深井按5个水平、不同岩性及是否受采动影响的围岩松动圈实测结果及现场工程实际情况分析了其影响因素,揭示了松动圈厚度与开采深度及围岩强度之间呈非线性关系,以及松动圈厚度与采动、支护难度、临界开采深度等的关系,并进而探讨了围岩稳定性的合理控制技术,据此进行了工业性试验,取得了良好的效果。

## 2 测试的基本情况

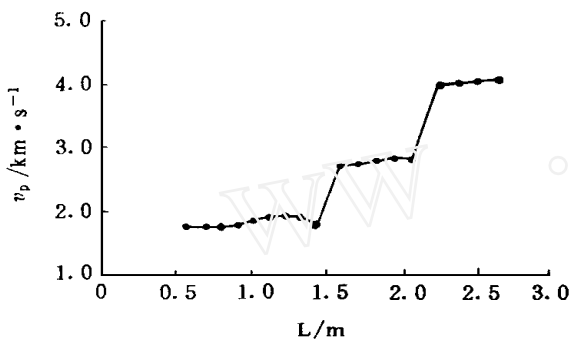
开滦矿务局各矿煤层群的底板岩层赋存条件较为稳定,其下部为奥陶纪灰岩,故它的每个水平运输

1997年5月7日收到初稿,1997年10月1日收到修改稿。

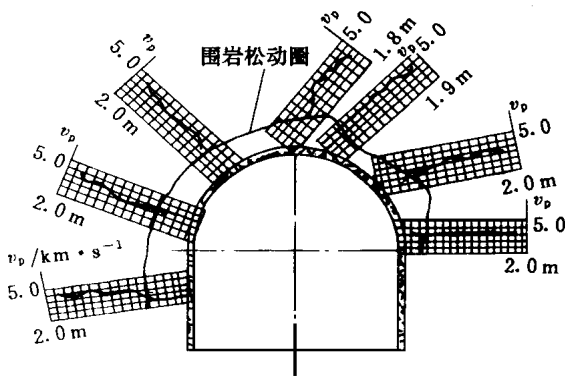
\* 本研究为获96国家教委科技进步二等奖项目的部分成果(序号656)。

作者 靖洪文 简介:男,35岁,硕士,1986年毕业于中国矿业大学建筑系矿井建设专业,现任副教授,主要从事巷道支护理论与技术等方面的研究工作。

大巷层位变化不大, 石门穿过的岩层也雷同。为了探讨松动圈与采深、采动、岩性等的关系, 采用围岩松动圈测试仪在开滦赵各庄矿 4, 10, 11, 12, 13 五个水平对不同岩性(粗、中、细、粉砂岩等)、不同采动状况等共布置 25 个测站, 每个测站设有 2 个观测面(相距 3 m 左右), 每个测面布置 5~7 个测孔, 孔深 2.5~3.5 m。观测: (1) 未受采动影响的巷道围岩松动圈, 共施钻 120 个钻孔; (2) 受采动影响的围岩松动圈, 共施钻 130 个钻孔。获得超声波量测数据万余个, 超声波实测松动圈见图 1, 图中声波最小区域即为围岩松动圈(厚度为  $L_p$ )。



(a) 实测声波速度典型分布



(b) 现场实测  $v_p = 5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  松动圈

图 1 超声波实测松动圈值

Fig. 1 Ultrasonic testing of the broken zone

### 3 影响围岩松动圈因素实测分析

#### 3.1 围岩松动圈与围岩应力和围岩强度关系

赵各庄矿不受采动影响的底板岩巷, 在断面形状尺寸一定的条件下, 实测围岩松动圈值见表 1 ( $L_p$  为掘巷产生的松动圈厚度)。

由表 1 可见, 在工程情况相近条件下, 围岩松动圈厚度主要决定于原岩应力  $P_0$ 。根据中科院地质所编写的“煤矿突水预测预报综合研究”, 赵各庄矿的

表 1 不受采动影响的松动圈厚度观测值

Table 1 Influence of unextraction on the thickness of broken zone

水平	开采深度/m	岩性	$L_p$ 观测结果/m	
			最大	最小
4 水平	343.0	中砂岩	0.68	0.54
		粉砂岩	0.86	0.68
10 水平	876.9	细砂岩	1.25	0.65
		粉砂岩	1.45	0.57
11 水平	961.1	细砂岩	1.48	1.00
		粉砂岩	1.54	1.02
12 水平	1 056.8	中砂岩	1.48	1.10
13 水平	1 159.0	细砂岩	1.64	1.00
		粉砂岩	1.71	1.30

原岩应力场以自重应力为主, 即有  $P_0 = H$  ( $H$  为采深)。单向抗压强度  $c$ : 对粗(中)砂岩、细砂岩、粉砂岩分别取为 24.21, 15.94, 12.76 MPa。此外鉴于观测数值的离散性较大(见表 1), 从安全的要求出发, 对观测值离散性大的测站取松动圈的最大值进行分析, 因此得表 2。

表 2  $L_p$  与  $P_0/c$  值

Table 2 Value of  $L_p$  and  $P_0/c$

$P_0/c$	0.53	0.67	1.37	1.51	1.72	1.81	1.88	2.26
$L_p/m$	0.54	0.68	1.25	1.48	1.45	1.64	1.54	1.71

表 2 不包括受断层影响的松动圈观测值, 表明: 在岩石强度不变时, 随原岩应力的增加, 松动圈厚度将随之增大。

对表 2 中数据进行拟合,  $L_p$  与  $P_0/c$  具有如下关系:

$$P_0/c = 0.379 + 0.598 L_p^2 \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.975; F = 277.2)$$

即

$$L_p = 1.293 (P_0/c - 0.379)^{1/2} \quad (2)$$

#### 3.2 围岩松动圈与采深的关系

根据赵各庄矿原岩应力以自重应力为主的结论, 由式(2)得

$$L_p = a(H - H_0)^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $a$  为与岩性有关的常数,  $a = 0.2044 / \sqrt{c}$ 。

$H_0$  为产生松动圈初始深度,  $H_0 = \frac{0.379}{0.025} \div 15 c$ 。

式(3)是在赵各庄矿具体工程条件下获得的、不

受采动和地质构造影响的底板岩巷围岩松动圈与采深的关系式,其变化规律见图 2, 3。

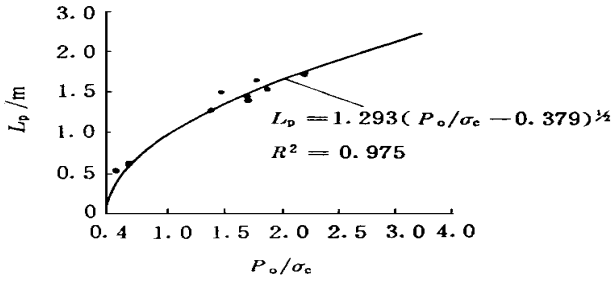


图 2  $L_p \sim P_0/c$  关系曲线

Fig.2 Curves of  $L_p \sim P_0/c$

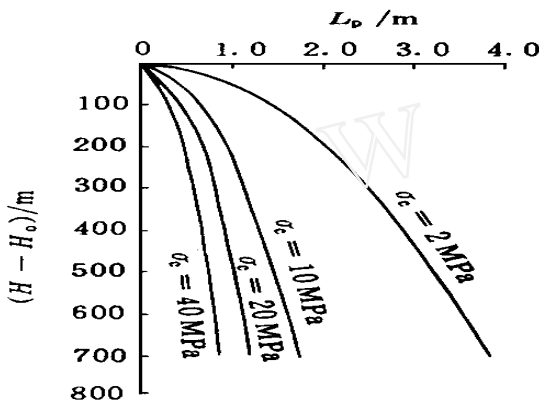


图 3  $L_p \sim H$  关系曲线

Fig.3 Curves of  $L_p \sim H$

### 3.3 围岩松动圈与临界开采深度的关系

根据式(3),除可以预测类似条件的巷道围岩松动圈外,还可以确定深井开采的临界深度。

随着开采深度加大,矿井开采自然条件恶化。如在深井中出现热害、岩爆等,岩石的力学性质也与浅部不同。尤其是深部巷道围岩松动圈增大,变形破坏严重,维护困难是深部开采最主要的技术特征之一。当赵各庄矿巷道埋深  $H = 790\text{ m}$  (9 水平) 时,传统的刚性支护尚可维护,实测松动圈厚度  $L_p < 1.5\text{ m}$ ,按照围岩松动圈分类法<sup>[6]</sup>为中小松动圈;当  $H > 790\text{ m}$  后,巷道破坏严重,不得不投入大量金属可缩支架,造成巷道支护成本急剧增加,实测  $L_p > 1.5\text{ m}$ ,为大松动圈。由此可见,随  $H$  增加其  $L_p$  增大,巷道易失稳。因此,用松动圈厚度即公式(3)预测围岩失稳的临界深度是可行的。

### 3.4 围岩松动圈与采动的关系

为了探讨采动对巷道围岩松动圈的影响规律,

在该矿 11 和 12 水平对不同岩性、不同采动次数的围岩松动圈进行了现场测试,经整理,结果见表 3。

表 3 采动对松动圈(最大值与(最小值))的影响

Table 3 Influence of extraction on the thickness of broken zone (max & min) m

巷道	采动/次			
	0	1	3	4
11LW 电车道	细砂岩	细砂岩	粉砂岩	粗砂岩
	1.05(0.52)	1.44(0.60)	1.95(0.90)	1.30(0.55)
11LW 风道	粉砂岩	粗砂岩	粗砂岩	粗砂岩
	1.54(0.85)	0.70(0.40)	1.35(0.70)	1.50(0.50)
12LE 风道	中砂岩	中砂岩		
	1.48(1.10)	1.68(1.20)		

由表 3 可见,采动对围岩松动圈影响的基本规律是:在赵各庄矿大巷距煤层底板 50~80 m 条件下,受采动影响的底板围岩松动圈厚度  $L_{pd}$  可按下列式估算:

$$L_{pd} = nL_p$$

式中:  $n$ ——采动影响系数,即采动后围岩松动圈厚度与采动前围岩松动圈厚度之比。

对于此类受采动影响的巷道其支护参数应按最后一次采动影响后的松动圈厚度(即最大松动圈厚度)来确定,否则支护可能在经受 2 次或 3 次采动后破坏。实际巷道情况也证实了这一点。系数  $n$  受多种因素的影响,这些因素包括岩性、巷道距煤层的距离、与采煤工作面相对位置、采煤方法、开采参数、采深及采动次数等。但总的表现仍然是松动圈与围岩应力和围岩强度的关系。在赵各庄矿具体条件下  $n$  为 1.15~1.45,离底板近且岩体强度低时取较大值,反之取较小值。

### 3.5 围岩松动圈与支护难度的关系

由表 1 可知,赵各庄矿在 9 水平以上开采时,  $L_p < 1.5\text{ m}$ ,为中小松动圈<sup>[1,6]</sup>,其支护难度较小,用一般支护(锚喷或砌碇等)均可满足支护要求。而在 10 水平以下开采时,由于采深增加或动压的影响,松动圈增大,一般超过 1.5 m,为大松动圈<sup>[6]</sup>。巷道表现出软岩工程特征,一般刚性或普通锚喷支护难以适应,须用锚喷网或 U 型钢可缩支架才能满足要求。上述分析结果与赵各庄矿统计资料显示的实际情况是相符的。

该矿在 9 水平(埋深 790 m)以上开采时,岩石大巷采用砌碇支护,在没有采动影响段,巷道整个服务期间维护完好。但在一些受到采动影响地段或软

岩段, 巷道则受到不同程度破坏, 巷道返修率为 13%, 修复时采用补碴加喷浆, 巷道即可保持完好。

该矿在 9 水平以下开采时, 大巷支护方式用锚喷支护, 设计锚杆长 1.6 m, 间排距 1.0 m, 受深部地压及动压影响, 巷道大量受到损坏。据统计在 10 水平(埋深 876.9 m)巷道返修率上升为 49.9%, 在 11 水平(埋深 961.1 m)巷道返修率为 70% 左右, 进入 12 水平(埋深 1 056.8 m)除井口附近巷道外, 绝大多数需返修, 对破坏严重段则必须套修 U 型钢可缩支架才能维护。根据赵各庄矿支护状况与松动圈实测值对比表明, 其松动圈值越大, 则其支护难度越大, 且当  $L_p > 1.5$  m 后, 一般常规支护无法满足要求。

### 3.6 围岩松动圈与支护方式、时间的关系

由于赵各庄矿上部水平松动圈测站均设在普通锚喷支护段, 其下部(10 水平以下)水平测站亦是设在锚喷支护破坏后再架设 U 型钢可缩支护段, 亦即是基本限于同种支护时间、方式下测得的, 因此其实测值中并未反映出不同支护方式、不同支护时间对其影响的程度。

从理论上分析不同支护方式、时间对松动圈厚度影响较大, 支护时间越早、支护强度、刚度越大则对其影响越大。在此有必要探讨的是目前煤矿现用支护手段是否足以影响松动圈厚度值以至于有明显的差别呢? 通过大量现场实测及实验室物理模拟试验结果表明: 现用支护方式、时间对其值影响不大, 无明显量的差别。其理由是: (1) 地压大, 支护力小。煤矿巷道不同于地面浅部工程, 它一般埋深大, 地压大, 服务年限短, 支护成本相对于浅部地下工程低得多, 其支护强度一般只有 0.1 ~ 0.2 MPa, 为围岩应力的几十甚至几分之一, 根本不能阻止松动圈的产生和发展; (2) 支护时间的滞后性。任何巷道支护方式在支护时间上都滞后于巷道开挖一定时间; (3) 不密贴, 有间隙。由于施工原因, 任何支护方式与围岩存在着一个架设间隙(包括锚杆支护), 这个间隙足以使松动圈产生和发展。但这决不是说支护方式或支护时间对松动圈厚度毫无影响, 恰恰相反, 支护对维持松动圈的稳定起着关键作用, 只有及时支护和足够的支护强度才可以使松动圈内岩石相互啮合, 并呆在原位不垮落, 以免其垮落而导致松动圈的再次扩大, 巷道失稳破坏。

## 4 合理控制技术的探讨

由上述分析可见, 围岩松动圈受多种因素影响,

但归根到底仍然是围岩应力(采深、采动等)与围岩强度(岩性、支护时间、方式等)相互作用的结果, 且松动圈厚度越大, 巷道越易失稳, 其支护难度越大。因此, 为保持巷道围岩稳定性, 降低支护难度, 必须尽量减小松动圈厚度值。从本质上讲应从降低围岩应力和提高或保护围岩强度两方面着手。因此, 在深井开采深度或采动一定的条件下, 用人工方法主动及时地对围岩松动圈内岩石进行加固以恢复和提高围岩松动圈内岩石残余强度, 就应作为深井巷道大松动圈支护设计的一个基本出发点。从这种意义上讲, 尽管目前广泛用于深井或软岩支护的 U 型钢可缩支架有较大可缩量以适应围岩变形大的特点, 但不能主动伸入到围岩内部加固围岩, 因而并不是深井巷道理想的支护方式。而锚喷网支护系列则是经济、有效、实用的支护方式, 锚杆主动伸入到松动圈内部, 通过它的加固、组合等综合作用, 可把松动圈内破裂岩石组成一个整体, 形成组合拱; 喷射混凝土及时封闭围岩和隔离水、风对围岩的破坏, 间接保护和提高了围岩的残余强度; 金属网不仅支撑锚杆间破裂围岩, 同时将单根锚杆连结成整体, 锚杆群和混凝土一起形成钢筋混凝土支护圈, 锚喷网总体和围岩共同形成一个组合拱——支撑圈, 最大限度地发挥围岩的自承力, 维持松动圈的稳定以防巷道失稳破坏。所以, 对大松动圈深井支护巷道或软岩巷道, 最为及时有效、经济合理的支护方式是锚喷网支护, 其支护参数设计可按松动圈厚度值来确定。诚然任何一项技术都不是万能的, 对于高应力、强膨胀地区或节理化极破碎的大松动圈 ( $L_p > 3.0$  m)<sup>[1]</sup>岩体, 单一锚喷网尚不能解决全部问题, 但锚喷网与 U 型钢可缩支架联合支护则可获得成功<sup>[7]</sup>。

## 5 结束语

基于赵各庄矿围岩松动圈实测结果分析及合理支护方式的探讨, 我们采用锚喷网取代原设计的 29U 型钢可缩支架在赵各庄深度 1 159 m 的 13 水平东翼电车道和 11, 12 水平受采动影响的巷道进行了工业性试验<sup>[8]</sup>, 试验获得成功, 返修率大为降低, 施工速度明显加快, 年经济效益达 500 万元以上。

## 参 考 文 献

- 1 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21 ~ 32

- 2 朱德仁. 岩石工程破坏准则. 煤炭学报, 1994, 19(1): 15~21
- 3 徐小荷. 采矿工程中力学问题的特点. 中国矿业, 1995, 15(1): 24~27
- 4 章梦涛. 积极开展矿山岩体变形稳定性研究. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 290~291
- 5 陈子荫. 地下工程中岩石力学问题的基本特点. 煤炭学报, 1986, 11(4): 1~6
- 6 董方庭. 巷道围岩(软岩)的岩石分类问题. 建井技术, 1985, 10(3): 34~36
- 7 何满潮主编. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996, 1~8
- 8 靖洪文, 付国彬. 受采动影响的深井巷道研究与支护实践. 阜新矿业学院学报, 1996, 17(1): 15~19

## MEASUREMENT AND ANALYSIS OF INFLUENTIAL FACTORS OF BROKEN ZONE OF DEEP ROADWAYS AND STUDY ON ITS CONTROL TECHNIQUE

Jing Hongwen Fu Guobin Guo Zhihong

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

**Abstract** The change in the thickness of broken zone in surrounding rock of roadways with mining depth, surrounding rock strength and extraction is discussed on the basis of observation data for deep roadways located at different levels and in different rocks. Finally, the control technique of surrounding rocks is discussed and the satisfying results are acquired in an industrial trial.

**Key words** deep mining, broken zone, influential factors