

软岩及动压巷道失稳机理与支护方法

曾凡宇

(西山煤电集团公司, 山西 太原 030053)

摘要: 以弹性及黏弹性理论为基础分析软岩及动压巷道局部弱支护机理, 阐述了底臃与顶、帮失稳相互诱发的原因, 提出了软岩及动压巷道合理的支护方法, 并在工程实践中得到验证, 取得了良好的支护效果。

关键词: 软岩及动压巷道; 失稳; 支护方法

中图分类号: TD353

文献标识码: A

The loss of stability and supporting method for the soft and dynamic tunnels

ZENG Fan-yu

(Xishan Coal-Electricity Group Company, Taiyuan 030053, China)

Abstract: Analyzed partial short supporting effect based on the elastic and viscoelastic theory. The mechanism of heaving and instability of roof and side wall was analyzed. As result, a new rationale was proposed for the design of tunnel support and the reasonable supporting methods were produced. At the same time, it was verified in engineering practice and a good supporting effectiveness was obtained.

Key words: soft and dynamic tunnels; the loss of stability; supporting method

软岩及动压巷道由于地压大、地质条件复杂, 预选支护形式往往不尽符合围岩变形特点, 需要在工程实践中发现其薄弱环节, 以便加以适当改进^[1]。这里存在一个技术问题, 巷道失稳形态常表现为底臃与顶帮破坏并发, 不易区分失稳是因为全周边支护抗力不足所致, 还是局部弱支护所诱发。而局部弱支护又是巷道支护工程中的常见现象, 也是理论上缺乏深入研究的问题。研究巷道局部弱支护机理及其发展过程, 对于完善软岩巷道支护设计, 有针对性地改进支护结构具有重要意义。

1 局部弱支护圆形巷道的弹性解^[2,3]

为了易于进行弹性解析, 设原岩应力为各向等压, 记为 p , 岩体剪切模量与泊松比分别记为 G 和 ν 。设巷道周边圆心角 2β 的范围内支护很薄弱, 支护抗力为 t , 其余部分的支护抗力为 q ($q > t$)。取极坐标如图 1 所示, $l, M(r, \theta)$ 为极坐标, oz 为弹性场的对称轴。

弹性场是在 2β 角的周边上释放支护抗力 $q' = q - t$ 所引起的, 它代表局部弱支护产生的力学效果。若 $t = 0$, 代表局部不支护所

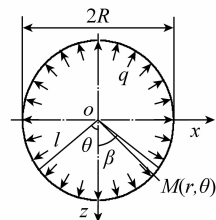


图1 极坐标系与支护抗力

Fig. 1 Polar coordinates and supporting value

产生的力学效果. 这部分弹性场较为复杂, 它对巷道稳定性的影响不容忽视, 尤其是在软弱围岩中, 可能成为巷道失稳的重要因素, 其解析式 (推导过程略) 为

$$\begin{cases} \sigma_r = -p\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - (q - f_1 q') \frac{R^2}{r^2}, \\ \sigma_\theta = -p\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + (q - f_2 q') \frac{R^2}{r^2}, \\ \tau_{r\theta} = -f_3 q' \frac{R}{r}, \\ \begin{cases} u_r = -(p - q + f_4 q') \frac{R^2}{2Gr}, \\ u_\theta = -f_5 q' \frac{R}{2G}. \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $f_1 \sim f_5$ 为 R, r, θ, β 和 ν 的函数, 即 $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 = f(R, r, \theta, \beta, c_1, c_2, c_3, c_4)$.

可以看出, 孔表面 2β 角范围内支护抗力欠缺 q' , 孔的全周边支护效果都受到削弱, 围岩稳定性恶化, 其特点如下:

(1) 在 $-\beta \leq \theta \leq \beta$ 区域内, 围岩移近量比全周边均匀支护时增大约 (60% ~ 70%) $\frac{q'R}{2G}$, 该区域内, 围岩应力接近于不支护的情况, 过量移近表现为局部臃出, 它是由原岩应力驱使的主动臃出. 主动臃出区内围岩松动最严重.

(2) 在 $(\pi - \beta) < \theta < -(\pi - \beta)$ 区域内, 围岩应力 σ_θ 与全周边支护的情况相近, σ_r 被削弱, 围岩松动有所加剧, 称该区域移近量中有一部分是由于相对 2β 角的孔表面的支护抗力不足所诱发的, 所以称之为被动臃进区.

(3) 在 ox 轴两侧 $(\pi - \beta)$ 的区域内, 切向应力 σ_θ 显著增大, 围岩由于切向挤压而使移进量有所减少. 在 ox 轴下方, 出现较大的剪应力 $\tau_{r\theta}$, 这是围岩剪切破坏的最危险区域.

在工程中, 巷道底板往往不支护或弱支护. 弹性分析表明, 巷道不仅发生底臃, 顶板也同时下沉, 两帮将遭受强烈的切向挤压并出现较大剪应力 $\tau_{r\theta}$, 且易遭到剪切破坏. 反之, 若顶部欠支护或支架不贴顶, 不仅顶部围岩会破坏, 底臃也将加剧. 若两帮弱支护或支架不贴帮, 则顶、底都易遭剪切破坏.

2 局部弱支护巷道的流变变形^[4,5]

软岩巷道变形随时间而增大的过程可以用流变分析来加以研究. 现考虑如图 1 所示的弱支护圆形巷道, 设围岩为均质线性黏弹性材料, 支护抗力与巷道表面位移有关, 也随时间变化, 记为 $q(t)$ 和 $t(\tau)$, 弱支护部分的卸载强度为 $q' = q(\tau) - t(\tau)$. 为了便于解析, 设围岩的泊松比 ν 不随时间变化, 这样由式 (1) 便可得到对应的黏弹性应力为

$$\begin{cases} \sigma_r(\tau) = -p\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - q(\tau) \frac{R^2}{r^2} + f_1 q'(\tau) \frac{R^2}{r^2}, \\ \sigma_\theta(\tau) = -p\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + q(\tau) \frac{R^2}{r^2} - f_2 q'(\tau) \frac{R^2}{r^2}, \\ \tau_{r\theta}(\tau) = -f_3 q'(\tau) \frac{R}{r}. \end{cases}$$

围岩应力分布的特点与前述弹性解法相类似. 如果不安设支架, 则应力值与弹性解完全相同. 安设支架后, $q(\tau)$ 及 $q'(\tau)$ 引起的应力随荷载的变化而变化, 而且与围岩的流变特性有关, 采用凯尔文模型来表示围岩的流变特性.

经推导, $q(\tau)$ 及 $q'(\tau)$ 所引起的位移分别为

$$u_r^q(\tau') = \frac{q_l R^2}{2Gr} [1 - e^{-G\tau'/\eta} - A(\tau')],$$

$$u_r^{q'}(\tau') = \frac{q'_l R^2}{2Gr} [1 - e^{-G\tau'/\eta} - B(\tau')] f_4,$$

$$u_\theta^{q'}(\tau') = \frac{q'_l R}{2G} [1 - e^{-G\tau'/\eta} - B(\tau')] f_5,$$

式中, $A(\tau') = \frac{1}{1 - a\eta/G}(e^{-a\tau'} - e^{-G\tau'/\eta})$, $B(\tau') = \frac{1}{1 - b\eta/G}(e^{-b\tau'} - e^{-G\tau'/\eta})$. 时间 τ' 以支架安设时刻为起点.

将上述3种荷载引起的位移叠加, 即得弱支护围岩黏弹性位移, 统一取 $\tau=0$ 为时间起点, 支架安设时刻记为 τ'' , 则 $\tau' = \tau - \tau''$, 时刻 τ 的围岩位移为

$$u_r(\tau) = -\frac{R^2}{2Gr} \{ p(1 - e^{-G\tau/\eta}) - (q_l - f_4 q'_l) [1 - e^{-G(\tau-\tau'')/\eta}] + q_l A(\tau) - f_4 q'_l B(\tau - \tau'') \},$$

$$u_\theta(\tau) = -\frac{R}{2G} f_5 q'_l [1 - e^{-G(\tau-\tau'')/\eta} - B(\tau - \tau'')].$$

当 $\tau \rightarrow \infty$ 时, 长期稳定位移为

$$u_r(\infty) = -\frac{R^2}{2Gr}(p - q_l + f_4 q'_l), u_\theta(\infty) = -\frac{R}{2G} f_5 q'_l.$$

上式适用于围岩和支架未破坏的情况. 若围岩发生破坏, 则围岩应力重新分布, $u_r(\tau)$ 与 $u_\theta(\tau)$ 进一步增大. 若支架局部破坏, 则有2种情况: ①当破坏部位在原来支护薄弱部位时, 支护抗力 t 丧失, q'_l 增大, 局部弱支护效应进一步加剧; ②当破坏部位在原来支护薄弱部位的两侧或对面时, 便出现了新的弱支护部位, 这时可分别计算各个部位上的 q'_l , 根据叠加原理, 在以上各式中增加相应的弱支护影响项.

下面举一简例来说明围岩变形的不同情况. 设巷道半径 $R=2.0$ m, 原岩应力 $p=25$ MPa, 围岩长期剪切模量 $G=50$ MPa, 黏滞系数 $\eta=2.5$ GPa·d. 支护形式考虑以下情况: ①全断面锚杆支护, 支护抗力 (含加固作用产生的围岩自承力) $q_l=3$ MPa, 弱支护抗力 $q'_l=0$; ②顶板与两帮挂网锚喷, $q_l=9$ MPa, 底板 2β 角圆弧段仍为锚杆支护, $q'_l=6$ MPa. ③顶、帮支护抗力降为 $q_l=8$ MPa, 底板支护加强, 达到 $t_l=6$ MPa. 3种情况下, 设巷道开挖后立即支护, $\tau''=0$, 表1计算结果为底板中点、巷帮中点和顶板中点在巷道开挖50 d的径向位移及长期位移值.

表1 不同时间不同地点的径向位移

Table 1 Radial displacement at different time and point

mm

位 置	开挖后第50天位移值			长期位移值		
	支护方式①	支护方式②	支护方式③	支护方式①	支护方式②	支护方式③
底板中点	0.292	0.279	0.264	0.440	0.408	0.369
巷帮中点	0.292	0.234	0.249	0.440	0.296	0.332
顶板中点	0.292	0.269	0.260	0.440	0.384	0.361

由表1可以看出, 支护方式①属于全周边支护抗力不足, 开挖50 d后, 周边均匀收敛量达14.6%, 继续变形一定时间后, 锚杆支护将遭破坏, 不能达到长期稳定状态; 如果巷道按方式②进行支护, 巷道将出现严重的底臃和顶臃, 帮收敛量虽然较小, 但因两帮切向应力过大而发生剪切破坏, 随即严重帮臃, 亦不稳定. 在这种情况下, 如果当作全周边支护抗力不足进行治理, 就会适得其反, 巷道变形仍得不到有效控制. 正确的治理方法是增大底板的支护抗力, 顶、底臃都可得到抑制, 两帮应力也降低. 适当减少顶帮支护抗力, 也有利于削弱顶、底臃, 支护方式③就是按照这个原则拟出的.

3 支护方法^[6]

(1) 全封闭锚网喷支护在软岩巷道中仍然适用, 在严重破碎围岩中, 需适当加长锚杆, 提高锚杆锚固力, 提高金属网与混凝土喷层的支撑抗力, 而不宜过多让压, 防止围岩松动失控, 必要时可采用注浆加固巷道围岩。

(2) 金属可缩支架应避免以缩小棚距去对抵抗强大变形压力, 应从地压显现特征中分析弱支护效应, 有针对性地对支架结构进行加强, 同时应密实壁后充填, 提高棚间联结构件的强度。

(3) 动压大、软岩高应力巷道两向压力较均匀时, 可采用被动支护为主的加强 U 型钢支架、高强弧板、网壳锚喷及钢管混凝土支架等。

4 工程应用

淮南矿区目前有 8 对大型矿井的开采深度达 600 ~ 800 m, 这些矿井的运输大巷及石门中均出现强大的流变地压, 其支护形式以锚网喷、锚注支护及 U 型钢可缩支架等为主。对底臃严重的巷道, 采用了封闭式现浇混凝土或拱形金属支架。这些支护形式有一定可缩让压特性, 支护效果较好, 但是仍有不少巷道多次遭到破坏, 尤其在断层影响区、石门穿过煤层及采动影响区, 巷道维修周期不到 1 a, 断面收缩率就高达 30% 以上, 严重制约了煤矿的正常生产。

为了改变矿区软岩支护面貌, 近年来, 淮南矿业集团与大专院校合作, 在矿区选择破坏最严重的巷道, 考察地压显现特征, 分析原来支护形式的欠支护效应, 有针对性地进行改进支护结构, 在不同围岩条件下分别使用全封闭锚网喷、马蹄形可缩金属支架、加强 U 型钢可缩支架、钢管混凝土支架等, 取得了良好的效果。

5 结 论

软岩及动压巷道发生底臃及顶板失稳等现象应区分 2 种情况, 即巷道全周边弱支护与局部弱支护。

(1) 巷道变形基本均匀, 各向来压强烈, 支架逐渐被破坏, 底臃与顶帮破坏并发。

(2) 围岩从弱支护部位臃出, 到一定程度则诱发牢固支撑部位支架破坏, 底臃及顶板下沉不均匀, 发展过程呈缓慢 - 急剧形式。

实际工程中, 支架的局部弱支护机理与围岩非均质、地应力非均匀等因素混在一起, 需要综合考虑地质因素与支架结构特征两方面, 才能正确分析支架局部弱支护机理, 局部弱支护是软岩及动压巷道失稳的危险根源, 破坏后果严重, 工程施工过程中应及时发现其征兆, 尽早治理。治理的原则是清除原来支护结构的薄弱部分, 着重加强弱支护部位, 提高支护抗力, 其它部位可根据原来设计支撑抗力做适当加强, 但不应当做全周边弱支护来处理。研究软岩及动压巷道局部弱支护机理对改进巷道支护结构, 完善巷道支护理论, 促进巷道支护技术的发展有重要意义。

参考文献:

- [1] 何满潮, 邹正盛, 邹有峰. 软岩巷道工程概论 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1993.
- [2] 董方庭. 软岩巷道支护基础理论的研究 [J]. 建井技术, 1991, 10 (2): 1 ~ 3.
- [3] 于学馥, 郑颖人. 地下工程围岩稳定性分析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.
- [4] 孙 钧, 侯学渊. 地下结构 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [5] Yulekinc N A. Calculated the parameters of bolt and bracket by using energy theory [A]. Translated Texts of the Technology of Dig of Coal Mine [C]. Beijing: Coal Industry Press, 1998.
- [6] 姜美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.