

# 软弱岩体中椭圆形巷道喷射纤维混凝土支护机理探讨

孙学毅

## 前言

从流变学观点研究圆形巷道喷射混凝土支护作用机理,刘宝琛院士、陶振宇教授等人已作出了独创性的分析并得出精辟解答[1]、[2]。

理论分析和工程实践都表明岩体侧压系数  $\lambda \neq 1$  时,巷道的稳定性与轴比有关。根据喷射纤维混凝土初裂后仍然具有较大残余强度特性,本文提出把纤维混凝土作为理想弹塑性材料。根据岩体流变性质及喷射混凝土与岩体互相作用的观点,应用极限荷载方法设计椭圆形巷道喷射纤维混凝土支护厚度并给出了近似性的计算公式。最后引证工程实例获得令人满意的结果。

## 符号

$P = \gamma H$

$d = \frac{\delta}{R - \delta}$

$\gamma$  — 岩石容重

$\sigma_{\theta}$  — 巷道周边切向应力

$H$  — 巷道埋藏深度

$\sigma_r$  — 巷道周边径向应力

$a$  — 巷道断面长半轴

$\tau_{r\theta}$  — 巷道周边剪切应力

$b$  — 巷道断面短半轴

$\epsilon_z$  — 巷道轴向应变

$\theta$  — 巷道周边点的极角

$G$  — 岩体瞬时弹性剪切模量

$\mu$  — 岩体泊松系数

$G_{\infty}$  — 岩体长期剪切模量

$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu}$  — 岩体侧压系数

$\eta$  — 岩体粘性系数

$U_r$  — 无支护时巷道周边径向弹性位移

$\delta$  — 喷层支护厚度

$U_{\theta}$  — 无支护时巷道周边切向弹性位移

$E_c$  — 喷层弹性模量

$\mu_c$  — 喷层泊松系数

$\epsilon_{\theta \cdot c}$  — 喷层切向应变

$\sigma_{\theta \cdot c}$  — 喷层切向应力

$u_{r \cdot c}$  — 喷层径向位移

$\epsilon_c^e$  — 纤维混凝土极限应变

$\epsilon_c$  — 普通混凝土极限应变

$u_r^e$  — 无支护时巷道周边径向流变位移

$[\sigma]$  — 喷层支护单轴抗压强度

$u_r^{e \cdot \max}$  — 无支护时巷道周边径向最大流变位移

$\sigma_{r \cdot c}$  — 喷层径向应力

$u_r^q \cdot \max$  — 在荷载集度  $q$  作用下巷道周边最大径向流变位移

$q$  — 喷层支护在极限荷载状态下给围岩的应力可以取喷层支护单轴抗压强度的  $1/10 \sim 1/15$

## 1、椭圆形巷道周边应力、位移弹性分析

地下巷道埋藏深度一般远远大于巷道断面尺寸,由于巷道一般较长,沿巷道轴线方向不发生变形。所以研究巷道的受力问题,可归结为无限大体中开孔平面形变问题。当不考虑地质构造应力时侧压力系数  $\lambda < 1$ 。

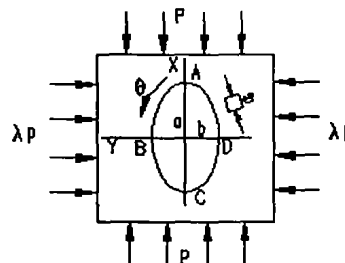


图 1 椭圆形巷道受力简图

孙学毅：柳州欧维姆机械有限责任公司

如图 1 所示, 当远离巷道处作用力为  $P$  与  $\lambda P$  时则巷道周边径向应力及剪应力为零, 即  $\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0$ 。所以影响巷道稳定的是切向应力  $\sigma_\theta$  值。当周边应力小于岩石屈服限时, 巷道仅产生弹性应力和位移。从应力角度分析巷道的稳定, 于学馥教授 [3] 已得出结论: 弹性状态轴比  $\frac{b}{a} = \lambda$  时巷道最稳定。生产实践表明巷道开挖当时是稳定的, 随着时间的增长巷道产生变形同时支护的喷射混凝土受力。当支护抗力不足时, 往往导致支护破坏巷道失稳。所以有必要从位移角度来分析巷道的稳定性。

由弹性理论 [4] 得平面变形时巷道周边位移:

$$2G(u_1 + iu_2) = \bar{\sigma} \frac{\omega'(\sigma)}{[\omega'(\sigma)]^2} [(3-4\mu)\varphi(\sigma) - \frac{\omega(\sigma)}{\omega'(\sigma)}\bar{\varphi}'(\sigma) - \psi(\sigma)] \quad (1)$$

对于椭圆形巷道, 变换式  $\omega = R(\frac{1}{\sigma} + m\sigma)$ ,  $\sigma = e^{i\theta}$ ,

$$R = \frac{a+b}{2}, \quad m = \frac{a-b}{a+b}$$

解 (1) 式得:

$$u_r = \frac{PR}{4G[(m \cos 2\theta - 1)^2 + (m \sin 2\theta)^2]^{\frac{1}{2}}} \cdot (A + B \cos 2\theta) \quad (2)$$

$$iu_\theta = \frac{PR}{4G[(m \cos 2\theta - 1)^2 + (m \sin 2\theta)^2]^{\frac{1}{2}}} \cdot (3-4\mu)(1-\lambda) \cdot \sin 2\theta \quad (3)$$

式中:

$$A = (m^2 - 1)(1 + \lambda) + m(1 - \lambda)(3 - 4\mu) - (1 + \lambda)$$

$$(1 - 2\mu) - m^2(1 + \lambda)(1 - 2\mu)$$

$$B = 4m(1 + \lambda)(1 - \mu) - (1 - \lambda)(5 - 4\mu)$$

由 (3) 式得在巷道顶底板及两帮中点处切向位移为零, 即:

$$(u_\theta)_{A \cdot B \cdot C \cdot D} = 0 \quad (4)$$

所以巷道周边的切向位移不是影响椭圆形巷道稳定的主要因素。

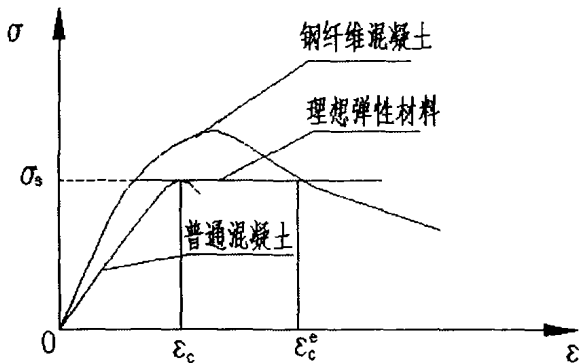


图 2 纤维混凝土  $\sigma - \varepsilon$  曲线

将 (2) 式对  $\theta$  求导得  $\theta = 0, \pi$  时  $u_r$  有极值。所以研究巷道顶底板中点径向位移对了解巷道的稳定具有重要意义。

## 2、纤维混凝土应力-应变曲线研究结果

近年来国内外对纤维混凝土的力学特性进行了系统的研究, 直径为 0.4mm 长度为 25~35mm 的钢纤维其含量为水泥重量的 4% 时典型的应力-应变曲线如图 2 所示 [5][6]。

从图上可以看出钢纤维混凝土初裂后还具有较大的残余强度, 纤维混凝土的极限应变强度为普通混凝土极限应变强度的 5~10 倍, 即  $(5 \sim 10) \varepsilon_c = \varepsilon_c^e$ 。在工程上为了利用这种变形性能, 将钢纤维混凝土的  $\sigma - \varepsilon$  曲线简化为两段, 即认为应力达到一般混凝土强度值时钢纤维混凝土开始屈服, 即  $\sigma_s = [\sigma]$ , 在  $\sigma_s$  以前简化为斜直线看作弹性体, 在  $\sigma_s$  以后简化为平直线, 看作塑性材料。这样做计算工作可大大简化, 其计算结果工程上又偏于安全, 所以是可行的。

## 3、椭圆形巷道位移流变学分析

由理论分析 [7] 和现场量测 [8] 得出软弱岩体具有流变性特征。为了便于探明喷射纤维混凝土支护与岩体的相互作用的主导因素, 假定岩体是均质和各向同性的线性流变介质。考虑巷道弹性位移是瞬间完成的, 巷道开挖后到支护完成需要一段时间, 所以认为喷射混凝土支护只能受流变位移作用。根据流变学定理 [9] 可推出在无支护作用下巷道围岩的流变位移为:

$$u_r = u_r^{e\max} \cdot [1 - \exp(-\frac{G_\infty}{\eta} \cdot t)] \quad (5)$$

式中:

$$u_r^{e\max} = \frac{PR}{4G_\infty[(m \cos 2\theta - 1)^2 + (m \sin 2\theta)^2]^{\frac{1}{2}}} \cdot (A + B \cdot \cos 2\theta)$$

支护之后, 随着时间的发展岩体变形使支护受载荷  $P_i$  作用, 在支护与岩体接触面上岩体的径向应力及径向位移就是支护的载荷及径向变形。由于  $P_i$  是时间  $t$  及极角  $\theta$  的函数, 故使问题难于求解, 为了得出便于应用的结果, 做如下工程上

允许的假设：

①由于喷层支护很薄，假设喷层内力  $\sigma_\theta$  在厚度方向是均匀分布的。

②由于纤维混凝土初裂后还具有较大残余强度，因此将纤维混凝土视为理想弹塑性材料。

由(2)式知，巷道顶板中点(A点)位移最大，此处的喷层支护在强迫位移作用下内力  $\sigma_\theta$  首先达到  $\sigma_s$  值，此后认为  $\sigma_\theta$  值不再随位移增长而增加。由于位移的增长，其它各点支护内力  $\sigma_\theta$  将逐渐增加。认为巷道稳定时支护内力  $\sigma_\theta$  将达到极限平衡状态。此时将喷层支护作为受均匀载荷处理。根据作用力与反作用力相等定理，巷道周边也作用有集度为  $q$  的均匀压力。

基于上面的分析，当时间  $t \rightarrow \infty$  时可得到巷道周边荷载集度为  $q$  作用下最大的流变位移：

$$u_r^{\max} = \frac{R}{4G_\infty[(m \cos 2\theta - 1)^2 + (m \sin 2\theta)^2]} [P(A+B \cos 2\theta) - q(C+D \cos 2\theta)] + \frac{q(1-2\mu)}{2G_\infty} (a \cos^2 \theta - b \sin^2 \theta) \quad (6)$$

式中： $C=2(m^2-1)$ ， $D=4m$

在 A 点处：

$$(u_r^{\sigma_{\max}})_A = \frac{R}{4G_\infty(m-1)} [P(A+B) - q(C+D)] + \frac{qa(1-2\mu)}{2G_\infty} \quad (7)$$

由前面的分析知， $\varepsilon_z=0$ ， $(u_\theta)_A=0$ ，故可略去喷层与围岩界面的摩阻力。对应于 A 点处，下列式子成立，

$$(\varepsilon_\theta \cdot c)_A = \frac{1-\mu_c}{E_c} [(\sigma_\theta \cdot c)_A - \frac{\mu_c}{1-\mu_c} (\sigma_r \cdot c)_A] \quad (8)$$

$$(\varepsilon_\theta \cdot c)_A = \frac{(u_r \cdot c)_A}{r} \quad (9)$$

在喷层与围岩界面处，根据陶振宇教授[2]的结果，喷层支护径向应力  $\sigma_r$  和切向应力  $\sigma_\theta$  将是：

$$(\sigma_r \cdot c)_A \approx q, (\sigma_\theta \cdot c)_A \approx q/d \quad (10)$$

由于喷层很薄， $\alpha \ll 1$ ，故  $\sigma_r \ll \sigma_\theta$ ，

在(8)式中略去  $\sigma_r$  项得：

$$(\varepsilon_\theta \cdot c)_A = \frac{(1-\mu_c^2)q}{E_c \cdot d} \quad (11)$$

将(11)式代入(9)式得：

$$(u_r \cdot c)_A = \frac{(1-\mu_c^2)qR}{E_c \cdot d} \quad (12)$$

联立(12)式与(7)式求得：

$$d = \frac{qR(1-\mu_c^2)}{\frac{E_c}{2G_\infty} \frac{R}{2(m-1)} [P(A+B) - q(C+D)] + (1-2\mu)qa} \quad (13)$$

$$\delta = \frac{dR}{1+d} \quad (14)$$

#### 4、工程实例及应用喷射纤维混凝土支护探讨

近年来作者参加了张家洼粘土质砂砾岩巷道支护稳定性的研究，巷道开挖距地面 500 米深度水平，岩石单轴抗压强度  $200\text{kg/cm}^2$ ，泊松系数  $\mu=0.41$ ，巷道断面为  $13\text{米}^2$ 。原设计巷道跨为 4 米，增高 2 米，拱高 1.4 米。在施工过程中发现开挖之后顶板即发生冒落，如图 3 所示。

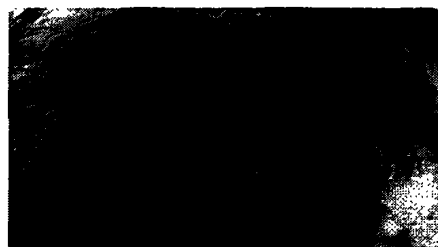


图 3 粘土砂砾岩巷道开挖后顶板冒落照

在现场实测 17 个断面，所得结果如图 4 所示。从实测断面稳定形状分析看出，如果把巷道挖成  $a=2.8$  米， $b=2$  米的椭圆是最稳定的。这一事实说明调整巷道轴比对巷道稳定确有实际意义。

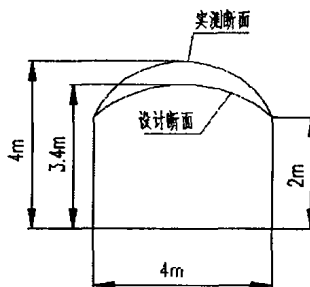


图 4 13m<sup>2</sup> 巷道实测断面与设计断面示意图

在几年的现场试验研究中作者参与了很多巷道径向位移的量测工作，最有趣的是图 5、图 6 表示的结果[8]。

图 5 为 13 米<sup>2</sup> 巷道喷射 5 厘米混凝土时顶板位移-时间曲线。经过 8 个月位移曲线斜率保持不变，8 个月以后位移曲线斜率增加，经过 12 个月顶板发生冒落。图 6 为 13 米<sup>2</sup> 巷道喷射 10 厘米纤维混凝土支护，底板用 25 厘米浇注混凝土封闭支护。位移曲线表明 1 年后巷道变形近于停止，周边

位移拱顶处最大, 顶板未发生冒落。

上述事实说明本文所作的巷道位移分析是合于实际的, 对工程有一定指导意义。下面以试验巷道支护为例来说明本文得出的结果可应用于喷层支护厚度设计。

在现场测得:

$$G_{\infty} = 6.7 \times 10^4 \text{kg/cm}^2, \mu_c = 0.25, E_c = 1.8 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$$

$$m = 0.17, R = 2.4 \text{米}, P = \tau H = 125 \text{kg/cm}^2$$

$$q = 10 \text{kg/cm}^2, \mu = 0.41, \lambda = 0.71, A+B = -3.207$$

$$C+D = -1.262$$

将上述数据代入 (13)、(14) 式得:

$$d = \frac{10 \times 240(1 - 0.25^2)}{\frac{1.8 \times 10^5}{2 \times 6.7 \times 10^4} \left( \frac{240}{2 \times (0.17 - 1)} \left[ 125 \times (-3.207) - 10 \times (-1.262) \right] + (1 - 2 \times 0.41) \times 10 \times 280 \right)} = 0.03$$

$$\delta = \frac{0.03 \times 240}{1 + 0.03} = 7 \text{cm}$$

从算得结果看, 是令人信服的。事实上, 13 米<sup>2</sup>巷道喷射 5 厘米混凝土支护不能使巷道稳定。如图 5 的结果支护一年后巷道顶板开裂, 冒落。除了试验地段而外, 在该工地其它 13 米<sup>2</sup>巷道有多处发生喷层支护开裂现象。若采用 7~10 厘米喷射钢纤维混凝土支护, 尽管某些局部地点可能开裂, 但由于纤维混凝土初裂后仍有很高的残余强度, 所以不会导致巷道的失稳。这对于一般服务年限不是很长的矿山巷道具有很大的实用意义。

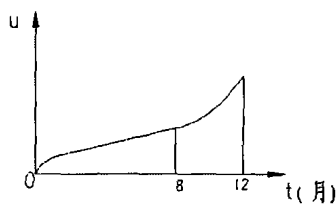


图 5 13m<sup>2</sup>巷道喷射 5cm 厚混凝土支护拱顶 u-t 曲线

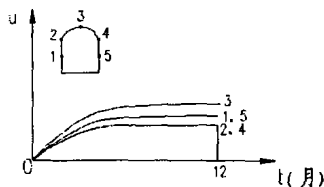


图 6 13m<sup>2</sup>巷道喷射 10cm 厚纤维混凝土支护周边 u-t 曲线

## 5、结语

20 世纪 80 年代初英国和西德的煤矿开始应用钢纤维喷射混凝土支护, 1973 年美国在华盛顿地铁进行试验应用, 1974 年瑞典在波立登铁矿开始应用钢纤维喷射混凝土。

近年来在国内水利、建筑、冶金等部门开始进行钢纤维混凝土和钢纤维喷射混凝土的研究工作, 并在水利、铁路和矿山支护方面进行试验应用, 取得良好效果。

在研究中特别注意了钢纤维喷射混凝土的应力-变形特性, 它表现出很大的裂后承载性能。如钢纤维混凝土梁中的裂隙宽度达 6 毫米时仍能继续承受一些载荷。

本文根据这一特点对钢纤维喷射混凝土支护机理进行分析, 指出对于矿山系统服务年限不长的巷道, 特别是软弱岩体中的巷道应用喷射钢纤维混凝土支护具有一定实际价值。

## 参考文献

- [1] 刘宝琛: 喷射混凝土支护的作用机理 金属学报, 第 15 卷第 3 期
- [2] 陶振宇: 岩石的流变特性及其在喷锚支护中的应用, 地下工程, 1980 年第四期
- [3] 于学夔: 轴变论, 冶金工业出版社, 1960 年
- [4] 徐芝伦: 弹性力学, 上册第五章, 人民教育出版社, 1979 年 1 月
- [5] 华东水利学院: 钢纤维砂浆试验报告 1977 年 9 月
- [6] Surendra p. shah B. vijaya Rangan (Journal of the American concrete Institute) 1971.2
- [7] M. Reiner lectures on Theoretical Rheology, Zrded, North - Holland, Amsterdam 1960
- [8] 马鞍山矿山研究院: 张家洼矿区软弱岩体工程喷锚支护量测技术, 1978 年 8 月
- [9] 傅作新: 徐变理论讲义, 华东水利学院, 1963 年