文章编号:1003－5923(2003)02－0047－03

支护阻力对软岩巷道围岩变形控制作用的研究

杨超[1],都海龙[2],边强[2]

(1. 同济大学 地下建筑与工程系,上海 200092; 2. 晋城煤业集团 技术中心,山西 晋城 048026)

摘 要:本文研究了围压对软岩峰后软化特性的影响,根据三轴压缩试验的应力—应变曲线,运用 Hoek 提出的由主应力圆包络线确定粘聚力和内摩擦角等效值的方法和曲线拟合的方法,研究软岩的宏观物性参数峰后应变软化规律,建立了峰后应变软化数值模型。对软岩巷道的数值计算研究表明软岩巷道中支护阻力使巷道周边围岩由二向受力状态转变为三向受力状态,产生一定的围压,从而提高其残余强度,并减小其强度随塑性应变增大而衰减的速度,从而实现了对围岩破碎区范围的控制,最终控制巷道位移量。

关键词:应变软化;软岩巷道支护;支护阻力

中图分类号:TD353 文献标识码:A

1 引 言

巷道支护的主要功能是对围岩施加支护阻力,支护阻力对提高围岩自承能力及控制围岩变形具有重要作用。根据经典的弹塑性理论,假设岩石破坏后体积变化为零,按照该理论进行计算,巷道围岩变形量一般不超过 100 mm,支护阻力对围岩的稳定作用和对围岩变形的控制作用很小,该结果与软岩巷道支护实践明显不符。本文在软岩的三轴压缩试验的基础上建立软岩峰后应变软化数值模型,并对支护阻力对软岩巷道围岩变形控制的作用进行了数值计算。

2 软岩峰后应变软化数值模型

2.1 软岩峰后应变软化规律

三轴压缩试验表明:软岩发生塑性屈服后可分为三个阶段:应变硬化阶段、应变软化阶段和残余阶段,软岩的力学特性主要由后两个阶段决定。当围压小于临界围压时,软岩的应变软化阶段和残余阶段对围压有很强的敏感性;围压对软岩峰后软化特性的影响主要表现在两个方面:随围压增大,在应变软化阶段,软岩强度随变形增大而下降的速度减小;随围压增大,达到残余强度时的应变量增大,软岩峰后残余强度增大。

假设岩石在峰后软化阶段任一点应力状态均处于破坏的临界状态,与在该应力状态下由弹性状态达到塑性屈服的岩石具有相同的强度,软岩在峰后段内任一点的广义粘聚力和广义内摩擦角与在该应力状态下由弹性状态达到塑性屈服的岩石的粘聚力和内摩擦角具有相同的量值。以下从宏观角度出发,利用三轴实验的应力－应变曲线,应用弹塑性理论和曲线拟合的方法,建立岩石峰后强度与广义粘聚力和广义内摩擦角的对应关系,以广义粘聚力和广义内摩擦角的弱化描述峰后软化特性。

考虑到峰后软化特性是影响软岩变形、破坏的主要因素,本文将应变硬化阶段简化为弹性段的外延,软岩在峰值点应力状态产生塑性屈服。采用广义 Druke－Prager 屈服准则:

$$f_s = q\left(\cos\theta - \frac{\tan\Phi_0}{\sqrt{3}}\sin\theta\right) + p\tan\Phi_0 - c_0$$

式中 c_0——广义粘聚力;

Φ_0——广义内摩擦;

θ——lode 角。

软岩峰后应变软化特性可以用广义粘聚力和广义内摩擦角的弱化来反映,在应变软化阶段 c 与 $\tan\Phi$ 服从软化规律[4]:

$$\begin{aligned} c &= c_0\{r_c + (1 - r_c)\exp[-b_c(\gamma^p)^2]\} \\ \tan\Phi &= \tan\Phi_0\{r_m + (1 - r_m)\exp[-b_\Phi(\gamma^p)^2]\} \end{aligned} \quad (1)$$

在残余阶段,广义粘聚力和广义内摩擦角保持不变:

$$\begin{aligned} c &= c_0 r_c \\ \tan\Phi &= \tan\Phi_0 r_\Phi \end{aligned} \quad (2)$$

收稿日期:2003－02－26

作者简介:杨超(1974—),河北省蠡县人,2000 年毕业于中国矿业大学采矿工程系,现为同济大学博士研究生。

万方数据

式中 $\gamma^p=\sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}^p\varepsilon_{ij}^p}$

$$=\frac{1}{6}\sqrt{(\varepsilon_1^p-\varepsilon_2^p)^2+(\varepsilon_2^p-\varepsilon_3^p)^2+(\varepsilon_3^p-\varepsilon_1^p)^2}$$

$$(i\leqslant j,i,j=1,3)$$

ε_j^p——主应变塑性分量；

r_c、b_c——广义粘聚力软化参数，分别反映 c 的软化程度和软化速度；

r_Φ、b_Φ——广义内摩擦角软化参数，分别反映 Φ 的软化程度和软化速度。

2.2 软岩峰后应变软化模型参数的确定

由以上分析，软岩从峰值进入塑性屈服，峰值点应力状态位于屈服面上，满足：

$$q=\beta_0+\beta_1 p \tag{3}$$

式中 $\beta_0=\frac{c_0}{\cos\theta-\sin\theta\tan\Phi_0/\sqrt{3}}$，

$\beta_1=\frac{-\tan\Phi_0}{\cos\theta-\sin\theta\tan\Phi_0/\sqrt{3}}$

根据一系列围压下三轴压缩试验的峰值点应力状态，采用最小二乘法得到 β_1 和 β_2，从而确定软岩的广义粘聚力 c_0 和广义内摩擦角 Φ_0：

$$\tan\Phi_0=\frac{\beta_1\cos\theta}{\beta_1\sin\theta/\sqrt{3}-1}$$

$$c_0=\beta_0(\cos\theta-\sin\theta\tan\Phi_0/\sqrt{3}) \tag{4}$$

本文假设岩石在峰值点开始出现宏观裂隙，沿裂隙面产生滑移摩擦，直至达到残余强度。根据 Hoek 提出的由主应力圆包络线的切线来确定粘聚力和内摩擦角的等效值的方法[5]，即式(4)和曲线拟合的方法研究广义粘聚力和广义内摩擦角软化参数与围压的关系。

$$\Phi=\frac{\pi}{2}-\arcsin\left(\frac{2\tau}{\sigma_1-\sigma_3}\right)$$

$$c=\tau-\sigma_n\tan\Phi \tag{5}$$

式中 $\sigma_n=\sigma_3+\frac{(\sigma_1-\sigma_3)^2}{2(\sigma_1-\sigma_3)+\frac{1}{2}m\sigma_c}$，

$\tau=(\sigma_n-\sigma_3)\sqrt{1+\frac{m\sigma_c}{2(\sigma_1-\sigma_3)}}$

利用岩体分类指数(PMR)和 Hoek－Brown 准则，根据试件在峰值点和残余阶段的破裂形态得出对应的 m、s，然后由式(4)可得到峰值点的广义粘聚力 c_0 和广义内摩擦角及残余阶段的广义粘聚力 c_m 和广义内摩擦角。由此可得到该围压下的软化参数 r_c、r_Φ。根据不同围压下三轴试验得到的 r_c、r_Φ 与围压的散点图，利用曲线拟和的方法可得到 r_c、r_Φ 与围压的关系：$r_c=f_1(\sigma_3)$，$r_\Phi=f_2(\sigma_3)$。

由软化规律式(1)、(2)，在满足工程的精度要求下，可认为在残余强度点满足式(6)：

$$(1-r_c)\exp(-b_c(\gamma^p)^2)=0.01r_c$$

$$(1-r_\Phi)\exp(-b_\Phi(\gamma^p)^2)=0.01r_\Phi \tag{6}$$

根据残余点的应力、应变状态得到 b_c 和 b_Φ：

$$b_c=\ln(1-r_c)-\ln(0.01r_c)/(\gamma^p)^2$$

$$b_\Phi=\ln(1-r_\Phi)-\ln(0.01r_\Phi)/(\gamma^p)^2$$

根据不同围压下三轴试验得到的 b_c、b_Φ 与围压的散点图，利用曲线拟和的方法可得到 b_c、b_Φ 与围压的关系：$b_c=f_3(\sigma_3)$，$b_\Phi=f_4(\sigma_3)$。

3 支护阻力对软岩巷道变形控制的数值计算

软岩巷道变形主要是破碎岩体中岩块沿裂隙面相对错位、滑动、开裂和旋转等大位移引起的峰后体积碎胀所造成的。经典的弹塑性理论中体积不可压缩的假设难以适用，采用有限变形力学理论可以得到准确解，但数学上非线性求解比较困难。本文利用有限差分法进行数值计算研究支护阻力与围岩位移的关系。

本文中软岩的本构关系采用上述的应变软化模型，具体参数根据文献[6]中对沙曲泥岩的三轴压缩实验数据确定。

数值计算模型：半圆拱形巷道，直径为 4 m，墙高 1.5 m，埋深 500 m，假设巷道处于自重应力场中，岩石容重为 25 kN/m^3，弹性模量为 1.9 GPa。沿巷道全断面施加均布的支护阻力，取支护阻力的变化范围为 0～1 MPa。

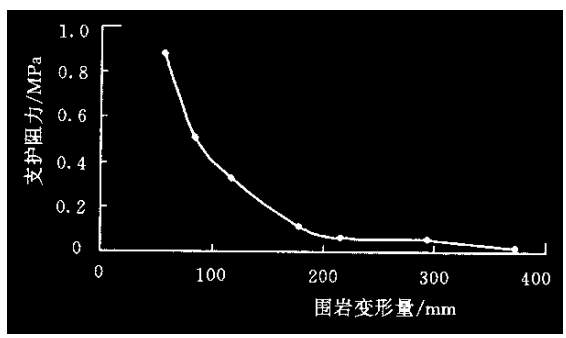

图 1 支护阻力与围岩变形量的关系

图 1 给出了巷道围岩稳定时，支护阻力与围岩变形量的关系。数值模拟的结果表明：支护阻力为 0.1 MPa 时，巷道围岩与支架支护体系稳定时，围岩变形量达到 200 mm；支护阻力为 0.3 MPa 时，巷道围岩与支架支护体系稳定时，围岩变形量达到 110 mm；支护阻力为 0.5 MPa 时，巷道围岩与支架支护体系稳定时，围岩变形量达到 90 mm。支护阻力较小时，支护阻力的提高可以迅速减小围岩的

万方数据

表 2　沙曲泥岩的性状参数和软化特性

广义粘聚力/MPa	广义内摩擦角/°	抗拉强度/MPa	膨胀角/°	弹性模量/GPa	泊松比
2.1	19	0.76	28	1.7	0.22
各软化参数、软化规律	r_c 与围压关系	$r_c=1-\exp(-0.15\sigma_3^3+0.11\sigma_3^2-0.23\sigma_3-0.19)$			
	r_Φ 与围压关系	$r_\Phi=\exp(0.026\sigma_3^2-0.14\sigma_3-0.056)$			
	b_c 与围压关系	$b_c=\exp(-1.88\sigma_3^3+3.75\sigma_3^2-3.26\sigma_3+14.19)$			
	b_Φ 与围压关系	$b_\Phi=\exp(-1.81\sigma_3^3+3.31\sigma_3^2-2.19\sigma_3+12.95)$			

变形量；支护阻力达到 0.3～0.4 MPa 时，已经可以有效地将围岩变形量控制在 100 mm 左右。

4　总结

(1) 利用宏观性状参数广义粘聚力和广义内摩擦角描述软岩的峰后软化特性，运用 Hoek－Brown 准则、曲线拟合理论和弹塑性理论可分析研究围压与软岩峰后应变软化参数的关系，建立了峰后应变软化数值模型。

(2) 数值结算结果表明在软岩巷道中支护阻力通过提供围压影响巷道周边岩体软化后的力学性质状态参数的分布规律，通过使其由二向受力状态转变为三向受力状态，对围岩产生一定的围压，从而提高其残余强度，并减小其强度随塑性应变增大而衰减的速度，从而实现了对围岩破碎区范围的控制，最终控制巷道位移量。

参考文献：

[1] 王悦汉，陆士良. 壁后充填对提高巷道支护阻力的研究[J]. 中国矿业大学学报，1997，26(4)：1－3.

[2] 陆士良，汤雷. 巷道锚注支护机理的研究[J]. 中国矿业大学学报，1996，25(2)：1－6.

[3] 陆士良，汤雷. 大变形巷道锚杆和框式支架工作阻力的研究[J]. 煤炭学报，1998，23(4)：371－375.

[4] Shao J F，Sibai M，Chiarelli A S，Hoteit N. Modeling of Coupled Elastplastic Damage in Rock Material[A]. Numerical models in Geomechanics [C]. G. N. PANDE & S. PIETRUSZCZAK eds.，Balkema，ROTTERDAM，1999.

[5] Hoek E. Technical Vote Estimation Mohr－Coulomb Friction and Cohesion Values From the Hoek－Brown Failure Criterion [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1990，27(3)：227－229.

[6] 陆士良，付国彬，汤雷. 煤层巷道大跨度软弱顶板锚杆支护和控制技术的研究[R]. 徐州：中国矿业大学，1997.

(上接第 46 页)

$\varepsilon=9\times10^{-5}$，弹性模量 $E=539\times10^8$ N/m²，粘性模量 $\eta_1=45\times10^{14}$ 泊(1 泊＝0.098 N.s/mm²)，抗拉强度$[\sigma_{t1}]=1421\times10^4$ N/m²，碎胀矸石的抗压强度 $k=294\times10^2$ N/m²，残余碎胀系数 $k_c=1.025$，老顶岩梁承受载荷 $q_z=5586\times10^3$ N/m²。

将上述参数代入式(2)、(13)得到：回采巷老顶岩梁破断距，$L_m=30.4$ m；达到稳定状态所需时间 $T=62$ d 。

为对计算结果进行验正，当 303 回采工作面采过 50 d 时，开始沿空送巷，对所掘出的巷道进行观测，变形增量非常小，巷道在下区段回采工作面整个使用期间几乎未受影响。为探测老顶岩梁在侧向煤体的断裂位置，掘出两条侧巷，一条掘到 4 m，另一条掘到 5.2 m 时发现顶板有裂缝出现，断定是老顶在煤体中的断裂位置。

总之，该沿空送巷的计算预测结果与实际观测结果基本相符

4　结论

(1) 建立了回采巷老顶岩梁的力学结构模型，导出了破断距方程，由于考虑了采空区冒落矸石的压缩下沉对破断距的影响，所建方程更接近于实际。

(2) 运用流变学理论，推导了回采巷老顶岩梁的下沉动态方程及其变化规律，以及回采巷老顶岩梁达到稳定状态时所需时间计算公式，该结果可用于指导沿空送巷。

(3) 本文沿空送巷的理论结果使用于薄煤层较厚直接顶开采的采场。

参考文献：

[1] 钱鸣高，刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京：煤炭工业出版社，1999. 78～113.

[2] 宋振骐. 实用矿山压力及控制[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1993.

[3] 高延法，张庆松. 矿山岩体力学[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2000. 42～63.

[4] 梁冶明，丘侃，陆耀洪. 材料力学[M]. 北京：高等教育出版社，1993. 105～139.

万方数据