

文章编号: 1673-3363-(2012)03-0381-05

# 基于复合材料力学的锚固巷道数值模拟研究

刘希亮, 刘洪玉, 韩宪军

(河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要** 为了建立一种符合锚喷支护围岩稳定性分析和支护参数总体评价的简化等效计算方法, 应用复合材料力学的基本原理, 建立了加锚岩体的复合材料力学模型。首先将锚杆和砂浆视为弹性体, 推导了锚杆-砂浆复合体等效力学模型的弹性参数; 然后将岩体和锚杆-砂浆复合体视为复合增强材料, 建立了横观各向同性体模型, 并推导了该等效力学模型相应参数的确定公式。在此基础上依据工程实例, 分别进行了复合后巷道模型与常规离散巷道模型的数值模拟研究; 通过对巷道两帮、顶、底部位移和围岩应力的对比分析, 验证了该等效方法的可行性和适用性。

**关键词** 复合材料力学; 巷道稳定性; 加锚岩体; 锚喷支护; 数值模拟

**中图分类号** TD 322

**文献标识码** A

## Numerical Simulation of Bolted Roadway Based on Composite Material Mechanics

LIU Xi-liang, LIU Hong-yu, HAN Xian-jun

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**Abstract** To establish a simplified equivalent method accorded with the stability analysis of surrounding rock and support parameters evaluation in the bolt-shotcrete support, a mechanics model of composite materials for anchored rock mass is established in this paper, according to the basic principle of composite material mechanics. First, regarding the anchor and mortar as elastic body, the elastic parameters of equivalent anchor-mortar mechanical model are deduced. Then, regarding the rock and anchor-mortar complex as composite reinforced materials, the transverse isotropic body model is established, and the defined formula of corresponding parameters from the equivalent mechanical model are deduced. Moreover, based on the engineering example, numerical simulations are conducted to study the composite roadway model and conventional discrete roadway model. After the comparative analysis about the displacements in two sides, top and bottom of roadway and surrounding rock stress, the feasibility and applicability of the equivalent method is verified.

**Key words** composite material mechanics; roadway stability; bolted rock mass; anchor-shotcrete support; numerical simulation

随着锚杆支护应用范围的日益扩大, 国内外许多学者对锚喷支护巷道围岩的稳定性进行了大量研究, 其中数值模拟方法被广泛应用。锚喷支护的数值模拟方法有 2 类基本形式: 1) 将岩体和锚杆

独立建模, 采取离散分析研究; 该方法对于岩土与锚杆的相互作用的研究体现出明显的优势。2) 将岩体和锚杆按组合模型建模, 采取复合等效模型; 该方法对于围岩变形规律的研究具有简单方便特

收稿日期: 2011-06-11

作者简介: 刘希亮 (1964-), 男, 山东省寿光市人, 教授, 博士, 从事深部矿井建设相关问题的研究。

E-mail: xlliu@hpu.edu.cn

Tel: 0391-3987632

点,对于分析以控制变形为主的巷道围岩的稳定性分析和支护参数的整体效果评价有独特的优势。

对于将岩体-锚杆作为支护承载整体的力学模型,国内外学者开展了一些研究:Gerrard<sup>[1]</sup>将层状岩体视为连续的层状板,然后等效为正交同性材料,确定了其等效弹性常数的计算公式;陈胜宏等<sup>[2-4]</sup>将岩体、砂浆、锚杆、岩体砂浆接触面、砂浆锚杆接触面等视为多重介质,提出了复合单元的概念,并借助阶谱的概念将复合单元纳入常规有限单元法分析中去;李新平等<sup>[5-6]</sup>将岩体锚杆支护系统看作一种复合材料,利用复合材料力学的方法和观点建立了锚杆加固岩体的细观力学等效模型,并对其宏观力学性质与材料性能及细观结构之间的定量关系进行了研究;李术才等<sup>[7]</sup>建立的断续节理岩体断裂损伤计算模型可以较好地反映出裂隙岩体的力学特性及锚杆的加固作用;Sharma<sup>[8]</sup>等用等价矩阵和有限单元的方法将锚杆和岩土简化为一种等效材料,对节理岩体边坡的稳定性进行了分析。这些研究只针对加锚岩体的代表单元进行了力学分析与研究,没有从整体上对复合等效后的围岩整体稳定性的效果和复合等效的可行性做出评价。

## 1 锚固岩体复合力学模型的建立

首先将锚固岩体视作一种复合增强材料,岩体作为复合材料的基体,锚杆-砂浆作为人工增强材料,确定出横观各向同性复合材料的本构关系;然后根据锚杆-砂浆的等效力学模型,确定人工增强材料的等效参数;最后建立复合岩体的等效力学模型及相应参数的计算公式。

为了研究锚固岩体复合体的力学性质,从中取出一个体积代表单元,如图 1 所示。

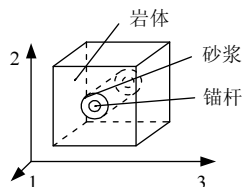


图 1 锚杆岩体布置示意图

Fig.1 Sketch map of anchoring composite mass

根据横观各向同性的定义,选取材料的主方向:1 方向为锚杆轴向,垂直于巷道表面;2,3 方向为锚杆的间排距方向,平行于巷道表面。

定义复合单元垂直巷道表面方向的纵向弹性模量为  $E_1$ ,纵向泊松比记为  $\nu_{12} = \nu_{13}$ ,剪切模量记为  $G_{12} = G_{13}$ 。平行于巷道表面的横向弹性模量记为

$E_2 = E_3$ ,横向泊松比记为  $\nu_{23}$ ,剪切模量记为  $G_{23}$ 。

在计算复合材料的等效弹性常数时,采用下列简化假定<sup>[5-6,9]</sup>:

- 1) 锚杆、砂浆、岩体之间完全黏结,不发生脱离;
- 2) 锚杆和砂浆的截面为圆形,且沿着轴向无变化;
- 3) 锚杆、砂浆、岩体均服从弹性定律;
- 4) 认为锚杆、砂浆和岩体内部的应力(或应变)沿一个方向上是可变化的。

根据锚固岩体复合材料的横观各向同性性质和复合材料力学的假设,可知其本构关系为:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{Bmatrix}$$

式中独立的弹性常数有 5 个:  $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}, G_{12}$ 。

### 1.1 锚杆-砂浆复合等效力学模型的建立

将锚杆和砂浆视为同心圆柱体,其横截面如图 2 所示。图中锚杆半径为  $a$ ,砂浆外径为  $b$ 。

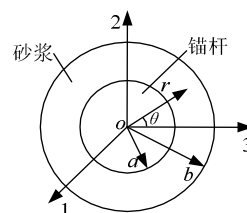


图 2 锚杆-砂浆复合材料计算模型图

Fig.2 Computing model of anchor-mortar composite materials

当锚杆作用于岩体之中时主要受拉作用。在单向复合材料中,沿着纵向的弹性模量数值最大,起着重要的作用。假定锚杆和砂浆为完全黏结,在锚杆方向作用均匀的应变  $\varepsilon_{11}$ ;根据黏结面应力有限和砂浆体位移单值的基本条件,通过引用经典弹性力学中的广义平面轴对称问题的解,可以得到锚杆-砂浆复合体的弹性常数计算公式如下<sup>[9]</sup>:

$$E_{f1} = E_g V_g + E_s V_s + \frac{2E_s E_g V_g V_s (\nu_g - \nu_s)^2}{E_s V_s (1 - \nu_g - 2\nu_g^2) + E_g V_g (1 - \nu_s - 2\nu_s^2) + E_g (1 + \nu_s)}$$

$$E_{f2} = \frac{2KE_{f1}(1 - \nu_{f23})}{E_{f1} + 4\nu_{f12}^2 K}$$

$$\nu_{f12} = \nu_s - \frac{2E_g V_g (\nu_s - \nu_g)(1 - \nu_s^2)}{E_s V_s (1 - \nu_g - 2\nu_g^2) + E_g V_g (1 - \nu_s - 2\nu_s^2) + E_g (1 + \nu_s)}$$

$$\nu_{f23} = \nu_g V_g + \nu_s V_s \left[ \frac{1 + \nu_s - \nu_{f12}(E_s / E_{f1})}{1 - \nu_s^2 - \nu_s \nu_{f12}(E_s / E_{f1})} \right]$$

$$G_{f12} = G_s \frac{(G_g + G_s) + (G_g - G_s)V_g}{(G_g + G_s) - (G_g - G_s)V}$$

$$G_{f23} = \frac{G_s G_g}{G_g V_s + G_s V_g}$$

式中:  $K = \frac{(K_g + G_s)K_s + (K_g - K_s)G_s V_g}{(K_g + G_s) - (K_g - K_s)V_g}$ ;

$$K_g = \frac{E_g}{2(1 - \nu_g - 2\nu_g^2)}; \quad K_s = \frac{E_s}{2(1 - \nu_s - 2\nu_s^2)};$$

$$G_s = \frac{E_s}{2(1 + \nu_s)}; \text{ 下标 } g, s, f \text{ 分别表示锚杆、砂浆}$$

和锚杆-砂浆复合体部分。

## 1.2 锚固复合岩体材料弹性常数的确定

将锚杆-砂浆复合体和岩体应用材料力学的方法进行复合, 复合后的锚固岩体为横观各向同性复合材料。取 2-3 截面作为复合几何模型 (如图 3 所示), 由于对称性, 图中仅表示了锚杆-砂浆复合体和岩体的 1/4 部分。

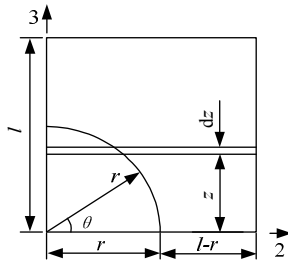


图3 加锚岩体力学分析的几何模型

Fig.3 Geometric model of mechanics analysis about anchoring composite mass

在 3 轴方向取厚度为  $dz$  的薄片, 假定每个薄片内锚杆-砂浆复合体和岩体的应力和应变是均匀的; 但沿着  $z$  轴方向应力和应变是可变化的、是  $z$  的函

数。设在边界上作用均匀应变  $\varepsilon_1^0$ 。根据应力平衡条件和协调方程, 可求得锚固复合岩体的等效弹性系数如下 (下标  $m, f$  分别表示岩体、锚杆-砂浆复合体) [9]:

$$E_1 = V_f (E_{f1} - E_m) + E_m = E_{f1} V_f + E_m V_m$$

$$E_2 = E_m \left[ 1 - \sqrt{\frac{4V_f}{\pi}} - \frac{\pi}{2(1 - E_m / E_{f2})} + \frac{2}{(1 - E_m / E_{f2})^2 \sqrt{\left[ E_{f2} / (E_{f2} - E_m) \right]^2 - 4V_f / \pi}} \right] \cdot \tan^{-1} \frac{\sqrt{\frac{E_{f2}}{E_{f2} - E_m} + \sqrt{4V_f / \pi}}}{\sqrt{\frac{E_{f2}}{E_{f2} - E_m} - \sqrt{4V_f / \pi}}}$$

$$\nu_{12} = V_f (\nu_{f12} - \nu_m) + \nu_m$$

$$\nu_{23} = \nu_{f23} V_f + \nu_m V_m \left[ \frac{1 + \nu_m - \nu_{12}(E_m / E_1)}{1 - \nu_m^2 - \nu_m \nu_{12}(E_m / E_1)} \right]$$

$$G_{12} = G_m \left[ 1 - \sqrt{\frac{4V_f}{\pi}} - \frac{\pi}{2(1 - G_m / G_{f12})} + \frac{2}{(1 - G_m / G_{f12})^2 \sqrt{\left[ G_{f12} / (G_{f12} - G_m) \right]^2 - 4V_f / \pi}} \right] \cdot \tan^{-1} \frac{\sqrt{\frac{G_{f12}}{G_{f12} - G_m} + \sqrt{4V_f / \pi}}}{\sqrt{\frac{G_{f12}}{G_{f12} - G_m} - \sqrt{4V_f / \pi}}}$$

$$G_{23} = \frac{G_{f23} G_m}{G_m V_f + G_{f23} V_m}$$

## 2 加锚岩体的数值模拟试验

### 2.1 计算模型建立

选取望峰岗井-820 m 水平 C15 底板运输巷作为建模依据, 选取 5 倍的巷道半径为开挖影响研究范围 [10], 其断面尺寸如图 4 所示。对进行锚杆加固区复合等效模型建模时, 将锚杆长度范围内的加固体简化为横观各向同性体。

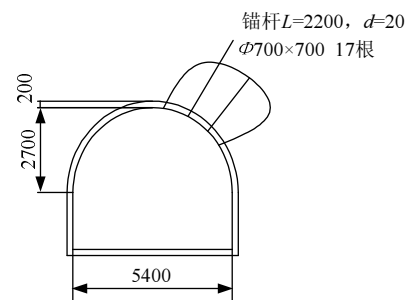


图4 巷道断面及支护简图 (mm)

Fig.4 Supporting diagram of roadway

1) 模型边界条件

模型左右边界施加水平约束,即边界水平位移量为零;模型底部边界固定,即底部边界水平、垂直位移量均为零;模型顶部为应力边界,施加 24 MPa 的垂直载荷;考虑研究范围内岩体自重荷载。

2) 模型的力学参数

望峰岗井 C15 底板运输巷为 II 级围岩,锚杆杆体材料采用 V 号钢,喷层为 200 mm。模型的基本力学参数见表 1。为了对 2 种建模方式的稳定性进行对比分析,在建立巷道计算模型时取岩体、砂浆、锚杆均为弹性体,并进行组合计算确定对应参数。

表 1 模型的基本力学参数  
Table 1 Basic mechanical parameters of model

	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$
围岩级别 II	2.6	10	0.25
混凝土 C30	2.5	30	0.20
锚杆	7.8	200	0.30

2.2 巷道变形对比分析

巷道围岩变形是评价巷道支护参数合理的依据之一<sup>[11]</sup>,为了验证复合材料力学计算方法在巷道支护数值模拟中的可行性和应用性,采用巷道关键点(巷道顶点、巷道底板中点、巷道两帮)位移的综合量化评价指标进行对比分析<sup>[12]</sup>。

经过数值分析,得到了锚喷支护巷道复合前与复合后的位移云图,见图 5。

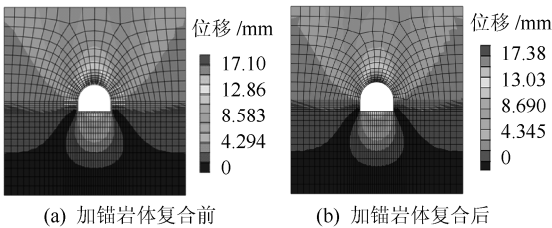


图 5 位移云图  
Fig.5 Displacement figure

1) 关键控制点最大位移

巷道顶底板和两帮中部位移通常是巷道变形最显著部位,这些点位移的大小影响着支护结构的稳定和使用状态。通过复合后巷道模型与常规离散模型的数值模拟研究,巷道周边关键点的位移见表 2 所示。通过表 2 的数据分析可知:顶点位移、底板位移、左帮位移和右帮位移的相对误差分别为 1.14%, 0.71%, 1.72%和 1.16%。

表 2 加锚岩体复合前后关键点的位移(巷道周边)  
Table 2 Displacement of key point in anchoring rock mass before and after composite (The periphery of roadway) mm

模型	顶点位移 $v_T$	底板位移 $v_B$	两帮围岩	
			$u_L$ (左)	$u_R$ (右)
复合前	17.1808	12.7334	4.78981	4.80061
复合后	16.9852	12.6436	4.70732	4.74506

2) 巷道顶底板相对收敛率

在同一围岩条件和应力环境下,关键点位移随巷道高度或跨度的增大而增大。为了统一判断标准,引入顶底板相对收敛率  $K_g$ ,定义为顶底板收敛位移与巷道高度之比:

$$K_g = \frac{|v_T| + |v_B|}{H}$$

式中:  $v_T$ ,  $v_B$  分别为巷道顶、底板位移(收敛)值;  $H$  为巷道高度。

根据以上公式计算得符合前收敛率  $K_{g1}$  为 0.634%, 复合后收敛率  $K_{g2}$  为 0.628%, 相对误差为 0.95%。

3) 巷道两帮相对收敛率

两帮相对收敛率  $K_b$ ,定义为巷道两帮中部相对收敛与巷道跨度之比:

$$K_b = \frac{|u_L| + |u_R|}{b}$$

式中:  $u_L$ ,  $u_R$  分别为巷道左帮、右帮位移(收敛)值;  $b$  为巷道跨度。

根据以上公式计算得符合前收敛率  $K_{b1}$  为 0.165%, 复合后收敛率  $K_{b2}$  为 0.163%, 相对误差为 1.44%。

2.4 围岩应力对比分析

经过数值分析,巷道复合前与复合后应力云图,如图 6 所示。由于在锚杆加固区内采用了复合岩体材料弹性常数,必然导致复合区域外沿岩体应力分布的变化,因此在关键点的应力采集,考虑到锚杆受力对围岩应力分布的影响,将对比点取在支护区外沿增加一个巷道半径周边的关键点上。采集的关键点应力情况见表 3。

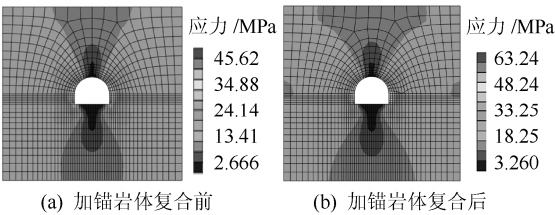


图 6 应力云图  
Fig.6 Stress figure

表 3 加锚岩体复合前后关键点的应力（复合区域外沿+巷道的半径的外沿）

Table 3 Stress of key point in anchoring rock mass before and after composite (The outside of composite area add the radius of roadway) N/mm<sup>2</sup>

模型	顶点	底板	两帮围岩	
			左	右
复合前	12.5338	6.02161	20.0925	20.1235
复合后	12.5131	5.91046	20.1171	20.0905

根据采集应力数据可知：在复合区域外沿+巷道的半径外沿顶点应力、底板应力、左帮应力和右帮应力的相对误差分别为 0.17%，0.18%，-0.12% 和 0.16%；误差均小于 0.2%。

通过岩体和锚杆独立建模、岩体和锚杆复合等效模型两种方式，对锚喷支护巷道实例的数值模拟对比研究可知：2 种模式下巷道关键点的位移和应力误差均在 1.7%之内，满足工程的精度控制要求。从而验证了上述复合模型理论公式在巷道围岩稳定性数值模拟中的可行性和适用性。

3 结 论

1) 应用材料力学和弹性力学的基本原理，建立了由岩体、锚杆和砂浆组成的锚固岩体复合材料的等效力学模型，并将其视为横观各向同性体，在此基础上推导了该模型相应的有效弹性常数。

2) 引入的复合等效模型，即将锚杆、砂浆和岩体简化为一种复合增强材料，使计算问题代替复杂的前处理问题，不用单独考虑锚杆与围岩的相互作用及其力学性质，具有参数输入简单、计算速度快的优点。

3) 结合工程实例，将复合后巷道模型与常规离散模型进行数值模拟研究，结果显示巷道两帮、顶底部位移和围岩应力分布的误差均在 1.7%之内，能够满足工程的精度控制要求，从而验证了该等效方法的可行性和适用性。

参考文献：

[1] GERRARD C M. Equivalent elastic moduli of a rock mass consisting of orthorhombic layers[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1982, 19(1): 9-14.

[2] 陈胜宏，强晟，陈尚法. 加锚岩体的三维复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 1-8. CHEN Sheng-hong, QIANG Sheng, CHEN Shang-fa. Study on the three-dimensional composite element model

of bolted rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 1-8.

[3] 何则干，陈胜宏. 加锚节理岩体的复合单元法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1544-1550. HE Ze-gan, CHEN Sheng-hong. Study on bolted discontinuous rock mass by composite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1544-1550.

[4] CHEN Sheng-hong, SHAHROUR. Composite element method for the bolted discontinuous rock masses and its application[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(3): 384-396.

[5] 李新平，宋桂红，陈先仿，等. 锚固岩体复合材料力学性质的数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(4): 79-86. LI Xin-ping, SONG Gui-hong, CHEN Xian-fang, et al. Research on the composite material mechanical properties of anchoring rock mass[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(4): 79-86.

[6] 王涛. 基于复合材料力学的层状岩体锚固支护系统研究与数值模拟[D]. 武汉. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 2006.

[7] 李术才，李树忱，朱维申，等. 三峡右岸地下电站厂房围岩稳定性断裂损伤分析[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 193-197. LI Shu-cai, LI Shu-chen, ZHU Wei-shen, et al. Fracture-damage stability analysis of underground powerhouse in right bank of Three Gorges[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 193-197.

[8] SHARRNA K G, PANDE G N. Stability of rock masses reinforced by passive fully-grouted rock bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, 25(5): 273-285.

[9] 陈烈民，杨宝宁. 复合材料的力学分析[M]. 北京：中国科学技术出版社, 2006.

[10] 刘泉声，高玮，袁亮. 煤矿深部岩巷稳定控制理论与支护技术及应用[M]. 北京：科学出版社, 2010.

[11] 宋广太. 煤巷围岩锚固技术与工程实践[M]. 北京：煤炭工业出版社, 2007.

[12] 杨志强，高谦，王正辉. 预应力锚索支护参数优化研究及在金川二矿区的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1362-1366. YANG Zhi-qiang, GAO Qian, WANG Zheng-hui. Research on prestressed cable parameters optimization designs and its application to Jinchuan Mine No.2 [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1362-1366.