

文章编号: 1673-3363-(2015)03-0498-06

# 加锚节理岩体锚杆横向抗剪导轨作用规律研究

周玉<sup>1,3</sup>, 宋宏伟<sup>1,2</sup>, 赵斌<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 西澳大学土木环境和采矿工程学院, 澳大利亚 珀斯 6009)

**摘要** 采用数值模拟计算与物理模型相似试验, 并与正交设计相结合, 分析了锚杆“导轨作用”效应受各影响因素的影响程度以及影响趋势规律。结果表明: 对锚杆轴力影响最大的是岩性, 随着节理错动, 锚杆直径和节理性质的影响增大; 直径和锚固角是分离量的主要影响因素, 剪切位移最大时, 岩性成为最大影响因素, 交角与分离量呈负增长, 其他因素均为正相关; 对岩体剪切强度影响最大的因素是岩性, 节理性质次之, 除锚固角外, 其他因素均与剪切力呈正增长。在影响规律基础上, 分析了各因素对锚杆导轨效应影响的内在机理, 并通过室内试验做了进一步验证。研究成果对煤炭开采等工程载荷下裂隙岩体稳定性的锚杆加固控制以及保证工程安全具有积极意义。

**关键词** 非连续岩体; 横向加固; 导轨效应; 锚杆; 影响规律

**中图分类号** TD 353      **文献标志码** A      **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.03.024

## Study on transverse railway effect of bolts in discontinuous rock mass

ZHOU Yu<sup>1,3</sup>, SONG Hongwei<sup>1,2</sup>, ZHAO Bin<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;  
2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;  
3. School of Civil, Environmental and Mining Engineering, The University of Western Australia, Perth 6009, Australia)

**Abstract** By doing numerical analysis and physical tests, combined with orthogonal design, influence extent and law of various factors on transverse railway effect of bolt have been achieved. The result has shown that lithology is the biggest factor on axial stress of bolt, and effects of bolt diameter and friction coefficient increase with the shear shift. Diameter and anchorage angle are major factors on separation, and lithology is the most important factor when the shift is the biggest. Among the factors on strength of jointed rock, lithology comes first, and joint comes second. Other factors are positively correlated with shear force, except for anchorage angle. Based on the influence rules, internal mechanisms have been derived. Advanced laboratory test has shown that the results are in reasonable agreement with those acquired from experiment and the simulation model is suitable for modeling transverse effect. The research achievement has a positive significance on the jointed rock mass stability controlling by bolt and engineering security under the coal mining load.

**Key words** discontinuous rock mass; transverse reinforcement; railway effect; anchor; the law of effect

收稿日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978251); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX12\_0953); 国家留学基金项目(201306420042)

作者简介: 周玉(1984—), 女, 山东省潍坊市人, 博士研究生, 从事岩石力学与地下工程稳定性方面的研究。

E-mail: zhyumail@163.com

Tel: 13813455935

锚杆作为岩体的加固手段，在岩土工程中应用广泛，国内外对锚杆机理的研究已有不少成果<sup>[1-2]</sup>，但锚杆横向局部化变形的研究在20世纪80年代才首次被提出<sup>[3]</sup>。B. Ludvig、葛修润、刘建武<sup>[4-5]</sup>认为节理面加固锚杆在一相当大的区段内发生了明显的剪切变形。M. Holmberg, A. M. Ferrero<sup>[6-7]</sup>提出描述锚杆的力学行为应该以锚杆变形后的实际状态为基础。随着锚杆在滑坡、深基坑等非连续岩体支护中的应用，以及计算机技术的迅速发展，越来越多的学者对锚杆横向抗剪局部变形进行了研究<sup>[8-9]</sup>。刘波、陶龙光、李先炜等<sup>[10-13]</sup>描述了锚杆拉剪大变形位形变化，并给出锚杆应变计算公式、应力变化规律等。总结之前这些锚杆局部化变形的研究，重点大多放在锚杆自身对非连续岩体强度的增强上。但一些研究者<sup>[14-15]</sup>很早提出节理面正应力对锚杆剪切强度影响很小，这一结论却被很多研究者忽视。宋宏伟等<sup>[16-17]</sup>对锚杆的横向局部化作用机理进行研究时，发现锚杆在起到横向加固作用的同时，还存在着“导轨作用”效应，对岩体的抗剪强度存在着负面的削弱作用。其后，贾颖绚等<sup>[18-19]</sup>对这一现象开展了探索研究。

本文基于锚杆“导轨作用”，结合正交设计试验，通过数值模拟分析和试验验证，深入分析锚杆直径、摩擦因数、锚杆与节理面交角以及岩性等因素对岩体位移和强度特性的影响，得到了加锚节理岩体锚杆导轨效应的因素影响程度及影响规律。

## 1 锚杆横向“导轨作用”的定义及机理

非连续岩体通过锚杆进行加固时，锚杆在横向上起到加固作用的同时，还存在着“导轨作用”效应<sup>[17-18]</sup>。岩块沿非连续面错动时，锚杆作用犹如轨道，岩块会沿锚杆变形位移滑动，使岩块产生劈裂。在这一过程中，锚杆局部承受拉、压、弯、剪等力的综合作用，当滑动达到一定位移时，锚杆产生“S”变形，岩块沿锚杆变形滑动，使节理面两侧岩块分离。锚杆“导轨作用”削弱节理面抗剪强度，对岩体整体承受抗剪荷载的能力起到负面效应。

## 2 数值模型建立与正交试验设计

为研究锚杆的横向剪切“导轨”效应，选取锚杆加固非连续岩体的局部，采用有限元数值软件ANSYS建立三维数值模型。模型中仅考虑2个节理面，并假定相互平行，这样可取得2组对称数据，加强模拟试验的可靠性；取锚杆与非连续面法线交

角分别为 $-15^\circ$ ， $0^\circ$ ， $15^\circ$ 这3种布置方案，如图1所示。

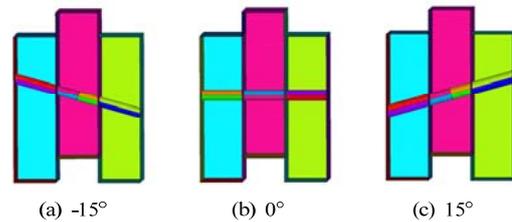


图1 数值计算模型

Fig.1 Numerical models

### 2.1 建模设定与参数

模型假定：1) 三岩块均为连续均匀介质；2) 通过设置接触单元模拟非连续面间以及锚杆和岩体接触面之间的连接关系，实现非线性接触状态；3) 非连续面间以及岩体与锚杆之间接触面的摩擦效应采用库仑摩擦模型，其中，岩锚之间摩擦因数取0.9。

模型参数与坐标：1) 岩块尺寸为 $240\text{ mm}\times 130\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ ，锚杆垂直贯穿岩块，中间岩块与两侧岩块在垂向错开 $40\text{ mm}$ ；2) 坐标原点位于中间岩块底面中心以下 $40\text{ mm}$ 处，沿锚杆轴向为 $X$ 向，模型垂直向上的方向为 $Y$ 向， $Z$ 向沿岩块的宽度方向；3) 两侧岩块底部施加 $Y$ 向位移约束，中间岩块顶部施加竖向位移荷载 $-5$ ， $-10$ ， $-15$ ， $-20\text{ mm}$ ，实现岩体的剪切错动。

采用煤、泥岩和砂岩3种最具代表性的岩石材料，钢筋为Q235圆钢，具体材料力学参数如表1所列。

表1 模型材料主要力学参数  
Table 1 Mechanical parameters of materials

| 材料  | $E/\text{GPa}$ | $\mu$ | $S_t/\text{MPa}$ | $S_c/\text{MPa}$ | $S_{bs}/\text{MPa}$ |
|-----|----------------|-------|------------------|------------------|---------------------|
| 煤   | 3              | 0.28  | 0.9              | 9                | —                   |
| 泥岩  | 10             | 0.23  | 3.0              | 30               | —                   |
| 砂岩  | 12             | 0.20  | 4.0              | 45               | —                   |
| 钢锚杆 | 200            | 0.25  | —                | —                | 240                 |

注： $E$ 为弹性模量； $\mu$ 为泊松比； $S_t$ 为抗拉强度； $S_c$ 为抗压强度； $S_{bs}$ 为屈服强度。

### 2.2 正交模拟实验设计

主要考虑了岩性、锚杆直径( $\Phi$ )、节理摩擦因数( $M_0$ )、锚杆与非连续面法线的交角( $A$ )4个因素对节理岩体锚杆“导轨作用”效应的影响规律，采用正交试验设计，每个因素取3个水平。正交试验安排如表2所列。

表 2 正交模拟试验设计安排表  
Table 2 Design of orthogonal test

| 试验号 | 锚杆直径 $\Phi/mm$ | 岩体属性  | 节理摩擦因数 $M_0$ | 交角 $A(^{\circ})$ |
|-----|----------------|-------|--------------|------------------|
| 1   | 1(16)          | 1(煤炭) | 1(0.2)       | 1(-15)           |
| 2   | 1(16)          | 2(泥岩) | 2(0.5)       | 2(0)             |
| 3   | 1(16)          | 3(砂岩) | 3(0.8)       | 3(15)            |
| 4   | 2(18)          | 1(煤炭) | 2(0.5)       | 3(15)            |
| 5   | 2(18)          | 2(泥岩) | 3(0.8)       | 1(-15)           |
| 6   | 2(18)          | 3(砂岩) | 1(0.2)       | 2(0)             |
| 7   | 3(20)          | 1(煤炭) | 3(0.8)       | 2(0)             |
| 8   | 3(20)          | 2(泥岩) | 1(0.2)       | 3(15)            |
| 9   | 3(20)          | 3(砂岩) | 2(0.5)       | 1(-15)           |

### 3 非连续岩体锚杆横向导轨效应规律分析

根据锚杆“导轨作用”效应的定义<sup>[18]</sup>，通过对非连续加锚岩体的正交试验模拟，分析了左节理各因素不同水平下锚杆轴向拉应力、节理面分离距离以及岩体抗剪强度的变化规律，得到节理岩体锚杆横向“导轨作用”效应在各因素作用下的变化规律。

#### 3.1 锚杆轴向最大拉伸应力变化规律

岩块剪切错动时，在非连续面附近，锚杆沿轴线产生“S”变形，在加载岩块侧的锚杆段下部和非加载侧的锚杆段上部，锚杆局部轴向拉应力集中；受拉锚杆段沿轴线相对的区域，锚杆承受压应力。由于锚杆拉压基本对称，仅提取锚杆轴向最大拉应力  $S_{xmax}$  进行正交模拟分析。

不同剪切位移外载下，各因素对锚杆  $S_{xmax}$  影响程度见图 2。

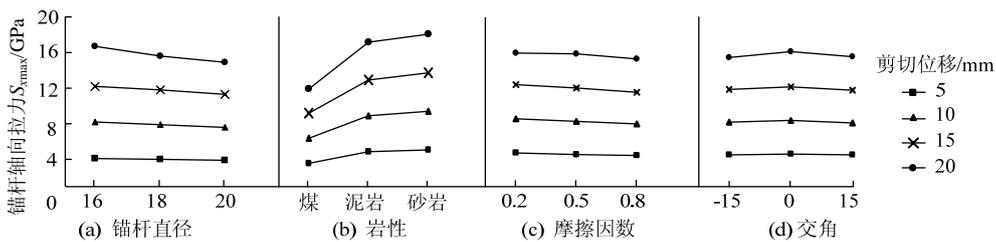


图 3 各因素对锚杆最大轴向拉应力影响规律

Fig.3 Influence laws of various factors on the maximum axial stress of bolt

其他因素相同条件下，锚杆直径增大，受力截面变大，轴向应力相应变小。节理摩擦因数越大，锚杆轴向拉应力越小；因为根据库仑摩擦定律，摩擦因数的增大使得节理面的抗剪强度增大，锚杆承担的剪切外载减小，轴向应力自然变小。当交角为  $0^{\circ}$ ，即锚杆与节理面法线平行时，锚杆承受的剪切应力最大，轴力亦最大；只要锚杆与节理面斜交，锚杆的轴向应力就会减小。

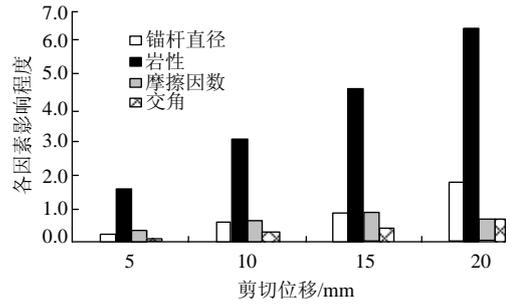


图 2 锚杆最大轴向拉力受各因素影响程度

Fig.2 Influence extent of various factors on the maximum axial stress of bolt

由图 2 可看出：在不同剪切位移水平下，岩性均是影响锚杆轴向拉应力的主要因素，影响程度远大于其他因素。剪切量从 5 mm 增大到 15 mm 时，节理摩擦因数的影响程度居于岩性之后；随着剪切位移的增大，从 15 mm 增大到 20 mm，锚杆直径的影响程度超过摩擦因数，原因是锚杆变形增大，岩块沿锚杆“导轨”滑动时，岩块局部产生了分离，削弱了节理摩擦力的影响。对锚杆轴力影响程度最小的是锚杆与节理面法线的交角。

图 3 为在不同剪切位移外载下，锚杆  $S_{xmax}$  随各因素变化的趋势规律。可以看出，岩性作为锚杆轴力的主要影响因素，随着岩性的提高，锚杆轴向应力逐渐增大。因为随着岩石弹性模量的提高，在节理附近锚杆承担的荷载相应增多，锚杆与锚杆孔接触处岩石变形就小，而锚杆变形变大，其最大拉伸应力也加大。

#### 3.2 节理岩体最大分离量变化规律

岩块之间的分离量是锚杆“导轨”作用的直接影响量，也体现了这一效应的显著程度。提取模型在 5~20 mm 剪切位移下岩块的最大分离量，分析各因素对试件最大分离量的影响程度和规律，分别如图 4, 5 所示。图 4 显示，在不同剪切位移下，各因素对岩块最大分离量影响程度的规律比较复杂，但总体上不难看出：在 5 mm 剪切位移下，影

响程度是锚杆直径 > 交角 > 摩擦因数 > 岩性。随着剪切位移增大，交角和岩性影响作用逐渐增大，而且岩性影响作用增速最大。剪切位移为 10, 15 mm 时，交角的影响程度超过锚杆直径，交角和锚杆直径分别为主要因素和次要因素，岩性的影响程度超过摩擦因数居于锚杆直径之后，摩擦因数的影响最小。当剪切位移在 20 mm 时，岩性的影响继续增大而超过交角，成为最大影响因素，交角次之，摩擦因数居后，锚杆直径的影响程度最小。

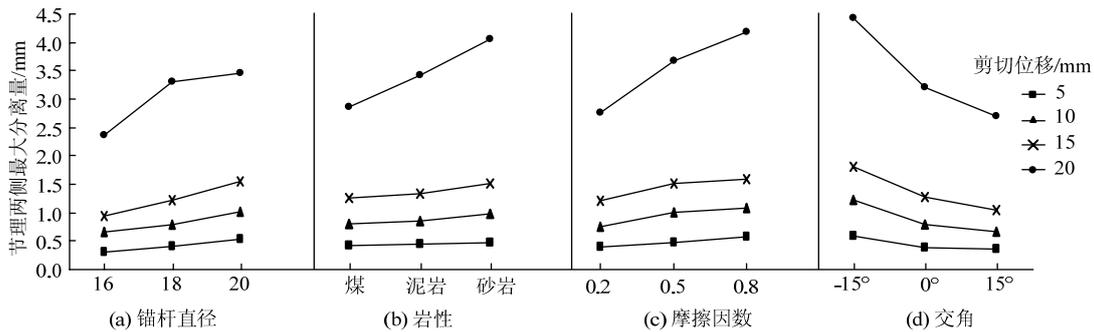


图 5 各因素对节理分离量影响规律  
Fig.5 Influence laws of various factors on separation of joint

从图 5 可以看出，4 个因素对岩块分离量的影响趋势是：岩块分离量随着锚杆直径的增大而增大，这是因为锚杆直径越大，延缓了锚杆在岩石中的嵌入，能发挥更多的变形，锚杆“导轨作用”增强，致使岩块分离量变大；同样岩性强度越高，锚杆不易嵌入使其能分担更多的剪切载荷，变形增大，“导轨作用”增强，岩块分离量增大，这与岩性增强，锚杆轴向应力增大的规律相对应；节理摩擦因数越大，岩块分离量增大，原因是模型锚杆和岩块之间的摩擦因数为 0.9，随着节理摩擦因数增大，越接近 0.9，锚杆和岩块之间的刚度过渡越平缓，延长了锚杆变形时间；交角对岩块分离量的影响规律呈反变关系，这是由于交角为 -15° 时，锚杆的倾向与导轨变形的趋势一致，随着交角逐渐变为正值，锚杆的布置与导轨产生趋势相反，阻碍了导轨现象的发生，使分离量随交角的增大而减小。

3.3 加锚节理岩体抗剪强度变化

在不同剪切位移外载下，总剪切应力的大小反映了加锚非连续岩体的抗剪能力。

图 6 为各因素对总剪切强度的影响极差，分析可知：岩性的影响最大，是最主要因素；节理摩擦因数次之；剪切量为 5 mm 时，锚杆直径的影响程度大于交角，当剪切量增大至 10 mm 后，交角的影

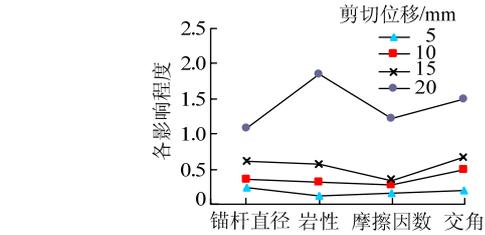


图 4 岩块分离量受各因素的影响程度  
Fig.4 Influence extent of various factors on joint separation

响程度大于锚杆直径。

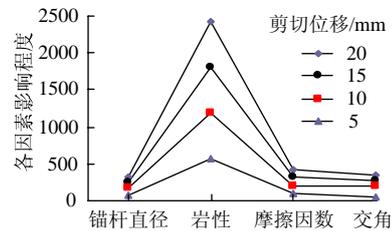


图 6 岩体剪切强度受各因素的影响程度  
Fig.6 Influence extent of various factors on shear strength of rock mass

从各因素影响趋势规律(图 7)可知：岩性、锚杆直径、节理摩擦因数均与总剪切力呈正增长关系，但是交角与总剪切强度为开口向上的抛物线变化关系。岩性越高，锚杆直径的增大，除本身提供更多的强度外，还使岩块能发挥的强度更多，岩体整体抗剪强度相应增强。节理摩擦因数的增大，使节理面摩擦力增大，节理抗剪强度增大，总剪切应力有所提高。交角与总剪切力为开口向上的抛物线变化关系，原因是交角为 0° 时，锚杆与非连续面垂直，锚杆弯曲变形最大，锚杆“导轨”效应明显，对抗剪强度的削弱作用增强，总剪切力最小；而存在一定交角时，锚杆不易弯曲变形，锚杆“导轨”效应减弱，节理面抗剪强度增强。

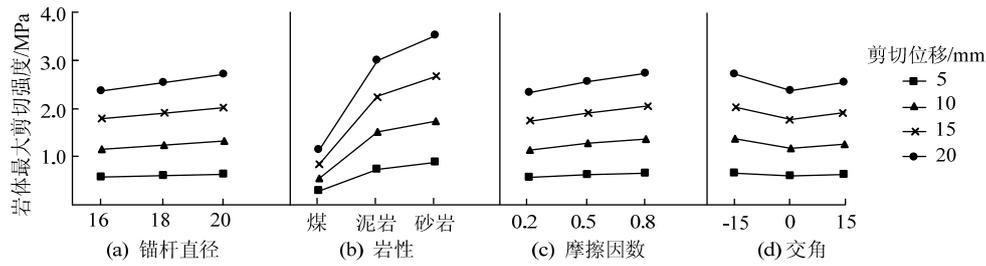


图 7 各因素对岩体剪切强度影响规律

Fig.7 Influence laws of various factors on shear strength of rock mass

### 4 相似材料模型实验验证

在数值计算四体模型的基础上，参照抗剪试验设计<sup>[19]</sup>，进行了新的室内试验模型的改进，如图 8。改进的模型仍采用 3 块试块和贯穿试块的钢筋作为主要试件，但模型的三试块通过 2 块槽钢和 4 根带弹簧螺帽钢筋 a 固定在一起，通过钢筋 c 固定上下 2 把电子千分卡尺，测量岩块的水平分离位移，加载平台上安装千分表，记录竖向剪切位移。采用 TYE-2000 型电液伺服压力机，通过连续加载方式，由压力表盘直接读取剪切压力，竖向位移每变化 0.1 mm，记录加载荷载、水平位移以及加载前后试件的破坏形态。

试验试块为加工的青石材料，采用 ZC5 型回弹仪测得其强度为 93.5 MPa；锚杆为 Q235 光圆钢筋，共有  $\Phi 6$  mm 和  $\Phi 10$  mm 这 2 种，节理分为光滑和

黏结。试验模型尺寸与数值计算尺寸一致。

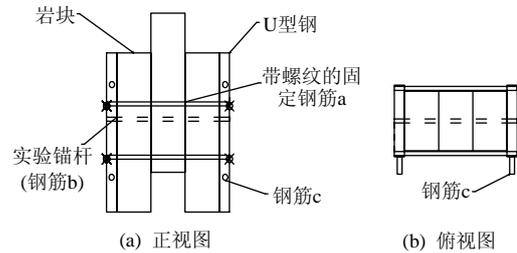


图 8 相似材料物理试验模型

Fig.8 Similar materials test model

依据锚杆“导轨”效应的特点，即锚杆变形作为诱因，岩块沿节理面发生分离为直接现象，对岩体抗剪强度起削弱作用为结果，对节理岩体的分离量及抗剪强度进行测试及分析，得到试验结果如图 9 所示。

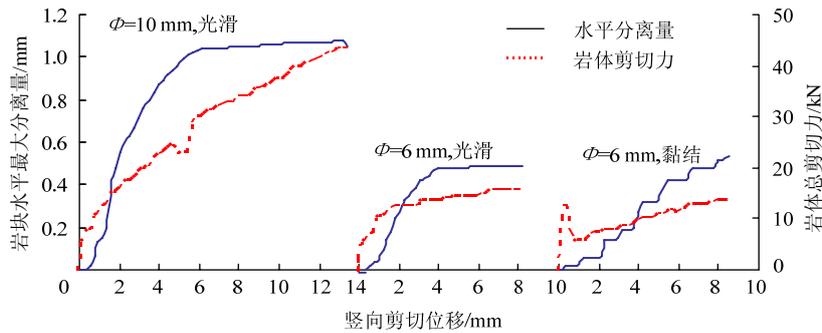


图 9 分离量和剪切力与剪切位移的关系

Fig.9 Relationships between shear displacement and separation, shear force

图 9 表明，随锚杆直径的增大，岩块分离量越大，由于锚杆刚度的直接增强，导致岩体抗剪强度也有所提高，这与数值分析的结果相符。其他条件一致，黏结的节理面与光滑节理面相比，最终分离量稍有增大，但分离过程更加趋缓，岩体抗剪强度起初明显增大，一旦岩块发生分离，抗剪强度减小又增大，最终结果与光滑节理面岩体基本一致。这是由于试验用黏结材料为脆性，岩块一旦错动，锚

杆变形，岩块分离，此时与光滑节理试件受力无异，而数值分析中摩擦因数在整个剪切过程中均发挥作用，且锚杆与岩块之间摩擦作用的存在，也提高了节理面的抗剪强度，从而对岩体的整体剪切强度有提高作用。

### 5 结论

1) 锚杆的“导轨作用”受锚杆直径、岩性、节

理性质和锚固角的影响,且各因素的影响程度不同。

2) 裂隙岩体通过锚杆加固时,锚杆直径越大,其轴向最大拉应力越小,但节理分离量增大,“导轨”效应变强。岩性越硬,锚杆轴向应力越大,最大分离量变大,“导轨”变形越明显。“导轨作用”的增大虽然对岩体强度有削弱作用,但岩性和锚杆直径的提高能更大幅度地提高岩体的总抗剪强度。

3) 节理越粗糙,锚杆轴力相对变小,分离量增加更均匀,虽能提高岩体初始抗剪强度,但最终强度无明显增大,说明注浆措施只能在岩体初始滑动中起到加固作用。锚固角为 $0^\circ$ 时,锚杆轴向应力和变形最大,“导轨”效应明显,对岩体抗剪强度的削弱最强,因此提高锚固角,可以减小锚杆“导轨作用”负面效应,增强支护效果。

4) 改进的“四体”物理试验模型操作简单,能较真实地体现局部加锚节理岩体的受力状态,可以很好地验证锚杆“导轨作用”效应。数值计算与物理试验结果基本吻合,但对节理摩擦因数等需要进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] BJURSTROM S. Shear strength on hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts[C]// Proceeding of the 3rd International Congress on Rock Mechanics. Washington D C: National Academy of Science, 1974, 2(B): 1194-1199.
- [2] BARTON N, BAKHTAR K. Bolt design based on shear strength[C]// A A Balkma. Proceeding of the International Symposium on Rock Bolting. Abisko, Sweden, 1983: 367-376.
- [3] SNYDER V M. Analysis of beam building using fully grouted roof bolts[C]// A A Balkma. Proceeding of the International Symposium on Rock Bolting. Abisko, Sweden, 1983: 188-194.
- [4] LUDVIG B. Shear tests on rock bolts[C]// A A Balkema. Proceeding of the International Symposium on Rock Bolting. Stockholm, 1984: 113-123.
- [5] 葛修润, 刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(1): 8-19.  
GE Xiurun, LIU Jianwu. Study on the resistance behavior of bolted rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(1): 8-19.
- [6] HOLMBERG M. The mechanical behavior of untensioned grouted rock bolts[D]. ISRN KTH/JOB/R-91-SE, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1991.
- [7] FERRERO A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 595-605.
- [8] 刘波. 锚杆横向效应及综合抗力研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1998.
- [9] 焦玉勇, 葛修润, 谷先荣. 三维离散元法中地下水及锚杆的模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 6-11.  
JIAO Yuyong, GE Xiurun, GU Xianrong. Modeling of groundwater and rock bolts in 3D DEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 6-11.
- [10] 刘波, 陶龙光, 李先炜. 锚杆拉剪大变形应变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 334-338.  
LIU Bo, TAO Longguang, LI Xianwei. Analysis on bolt strain with large deformation under shearing-tensile load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 334-338.
- [11] LIU B, LI X W, TAO L G, et al. Lateral large deformation of a bolt in discontinuous rock[J]. Science and Technology, 2002, 99: 427-430.
- [12] LIU B, TAO L G, ZHOU H W, et al. Calculation of complete curve of shear resistance for bolted rock joints based on large deformation analysis[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 140-144.
- [13] LIU B, TAO L G, YUE Z Q. Analytical large deformation shear strength for bolted rough discontinuous rock[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2004, 10(1): 24-28.
- [14] HASS C J. Analysis of rock bolting to prevent shear movement in fractured ground[J]. Journal of Mining Engineering, 1981(6): 698-704.
- [15] YOSHINAKA R. Experimental study on the rock bolt reinforcement in discontinuous rocks[C]// 6th Proceedings on ISRM. Canadian, 1987: 1329-1332.
- [16] SONG H W, ZHAO J, JIA Y X. Numerical simulation on transverse effect of bolt in discontinuous rock mass[C]// LIN Y M. Proceedings of the 2th International Symposium on New Development in Rock Mechanics and Engineering. Princeton USA: Rinton Press, 2002: 277-280.
- [17] 宋宏伟. 非连续岩体中锚杆横向作用的进一步研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(2): 23-26.  
SONG Hongwei. Further study on transverse effect of bolt in discontinuous rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(2): 23-26.
- [18] 贾颖绚, 宋宏伟, 段燕艳. 非连续岩体锚杆导轨作用的物理模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 614-617.  
JIA Yingxuan, SONG Hongwei, DUAN Yanyan. Physical simulation study on railway effect of bolt in discontinuous rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(4): 614-617.
- [19] SONG H W, DUAN Y Y, YANG J. Numerical simulation on bolted rock joint shearing performance[J]. Mining Science and Technology, 2011, 20(3): 460-465.