



移动阅读

王晓卿,杨景贺,李建忠,等. 考虑脱锚的全长锚固锚杆典型工况力学特性分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 599-608.

WANG Xiaoping, YANG Jinghe, LI Jianzhong, et al. Analysis of mechanical properties of fully-grouted bolts considering de-bonding under typical conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 599-608.

## 考虑脱锚的全长锚固锚杆典型工况力学特性分析

王晓卿<sup>1,2,3</sup>, 杨景贺<sup>1,2,3</sup>, 李建忠<sup>1,2,3</sup>, 杨磊<sup>1,2,3</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验, 北京 100013)

**摘要:** 全长锚固锚杆存在连续变形承载、非连续变形承载和拉拔承载3种典型工况。为系统研究全长锚固锚杆在不同典型工况下的力学特性, 利用经过验证的数值模拟方法以及开发的脱锚算法开展数值试验, 分析不同连续变形量级、不同裂隙参数与不同围压拉拔条件下全长锚固锚杆的轴力与剪应力分布规律, 以及脱锚对不同工况条件下锚杆力学特性的影响。研究表明: ① 在连续变形工况下, 全长锚固锚杆的轴力沿杆体先增大后减小, 中性点以外剪应力指向锚杆头部, 逐渐减小; 中性点以里剪应力指向锚杆尾部, 先增大后减小。锚杆头部脱锚后, 中性点向锚杆尾部转移, 脱锚范围轴力与剪应力基本为0。② 在非连续变形工况下, 全长锚固锚杆轴力峰值与裂隙对应。脱锚前轴力与裂隙张开位移呈正比, 剪应力在裂隙位置达到峰值, 向两侧呈指数衰减, 但方向相反; 在裂隙位置脱锚后, 轴力在脱锚段保持最大值, 剪应力在脱锚范围两侧达到峰值, 脱锚范围两侧剪应力方向相反。③ 在拉拔工况下, 全长锚固锚杆的初始拉拔力快速增大, 渐进脱锚后拉拔力表现为锯齿形升降, 完全脱锚后拉拔力迅速衰减。峰值和残余拉拔力随围压而增大。未脱锚时轴力与剪应力从锚杆头部向尾部呈指数衰减; 部分脱锚时轴力在脱锚段达到最大, 剪应力峰值转移至脱锚范围以里; 全部脱锚后轴力沿锚杆呈线性衰减, 并随围压而增大。

**关键词:** 全长锚固锚杆; 连续变形; 非连续变形; 锚杆拉拔; 脱锚

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2020)S2-0599-10

## Analysis of mechanical properties of fully-grouted bolts considering de-bonding under typical conditions

WANG Xiaoping<sup>1,2,3</sup>, YANG Jinghe<sup>1,2,3</sup>, LI Jianzhong<sup>1,2,3</sup>, YANG Lei<sup>1,2,3</sup>

(1. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Fully-grouted bolts usually work under three typical conditions: continuous deformation, discontinuous deformation and pulling out. To systemically investigate the mechanical behavior of fully grouted bolts under different typical conditions, some numerical experiments are performed using verified simulation method and bolt de-bonding algorithm developed. The axial force and shear stress distribution of fully-grouted bolts under different continuous-deformation magnitudes, different fracture parameters and different pulling-out confining pressures are analyzed. The influences of de-bonding on the mechanical properties of fully-grouted bolts under different typical conditions are investigated.

收稿日期: 2020-02-23 修回日期: 2020-03-11 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0259

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904153, 51774185); 天地科技股份有限公司开采设计事业部资助项目(KJ-2019-TDKCQN-06)

作者简介: 王晓卿(1988—), 男, 河北高邑人, 助理研究员, 博士。E-mail: wangxiaoping@tdkcsj.com

The results show that for fully-grouted bolt, ① under continuous-deformation condition, the axial force increases first and then decreases along bolt. The shear stress is directed to the near end of the bolt outside the neutral point and gradually decreases. The shear stress points to the far end of the bolt inside the neutral point, first increases and then decreases. After de-bonding of bolt head, the neutral point is transferred to the far end. The axial force and shear stress are zero in de-bonding range. ② under discontinuous-deformation condition, the peaks of axial force correspond to fractures. Before debonding, the axial force is proportional to the fracture aperture. The shear stress reaches the peak at the fracture position and decays exponentially to both sides of the peak in opposite directions. After de-bonding at fracture positions, the axial force maintains the maximum in de-bonding range, the shear stress reaches a peak and the directions of shear stress are opposite on both sides of the de-bonding range. ③ under pulling-out conditions, the pulling-out force first increases rapidly, then the force shows a zigzag increase after progressive de-bonding, last the force decays rapidly after complete debonding. The peak and residual pulling-out force increase with confining pressure. The axial force and shear stress decay exponentially from the near end to the far end of bolt when no de-bonding. The axial force reaches the maximum in de-bonding range, and the peak of shear stress shifts inside the de-bonding range when partly de-bonding. The axial force decays linearly along bolt and the axial force increases with confining pressure when completely de-bonding.

**Key words:** full-grouted bolt; continuous deformation; discontinuous deformation; pulling-out; bolt de-bonding

全长锚固锚杆被广泛应用于地面岩土工程和地下煤矿工程。围岩变形导致锚杆承受轴向拉力(下称轴力)与锚固界面剪应力(下称剪应力),锚杆通过剪应力限制围岩向自由面变形。围岩变形分为连续变形和非连续变形,连续变形多出现于高应力软岩,非连续变形多发生于裂隙岩体。此外,锚杆拉拔试验是锚杆支护质量检测的重要手段<sup>[1]</sup>。因此,连续变形承载、非连续变形承载和拉拔承载是全长锚固锚杆的3种典型工况。无论锚杆处于何种工况,均可出现锚杆杆体破断和锚固界面脱锚2种典型失效破坏形式,其中脱锚主要由低锚固质量导致,多发生于破碎围岩环境。

全长锚固锚杆力学特性的研究方法主要有理论分析、实验室试验、现场监测与数值模拟。FREEMAN<sup>[2]</sup>现场监测了全长锚固锚杆的轴向受力过程与剪应力分布情况,指出全长锚固锚杆受力存在中性点,中性点处轴力最大、剪应力为0,中性点以外部分剪应力指向锚杆头部,将锚杆拉向自由面;中性点以里部分剪应力指向锚杆尾部,将锚杆推向围岩深部。王明恕<sup>[3]</sup>和姚显春等<sup>[4]</sup>均通过理论分析证实了中性点的存在,并给出了连续变形条件下轴力与剪应力的分布。LI<sup>[5]</sup>和DAS等<sup>[6]</sup>通过理论分析指出在裂隙岩体中受裂隙张开影响全长锚固锚杆存在多个中性点。DAS等<sup>[6]</sup>利用理论模型分析了裂隙张开度、裂隙位置、裂隙数量与黏结刚度对锚杆力学性能的影响规律。NIE等<sup>[7]</sup>利用非连续变形分析(DDA)方法研究了单裂隙张开条件下全长锚固锚杆的力学特性,重点分析了端部条件、裂隙

位置与黏结刚度的影响,初步探讨了脱锚条件下锚杆轴力与剪应力的分布规律。BJÖRNFOT等<sup>[8]</sup>通过现场监测给出了全长锚固锚杆在未脱锚与部分脱锚条件下的轴力与剪应力分布曲线。FARMER<sup>[9]</sup>研究了全长锚固锚杆在拉拔载荷作用下的受力特性,指出在脱锚前锚杆轴力与剪应力均从锚杆头部向尾部呈指数衰减,并给出了部分脱锚条件下锚杆轴力的分布曲线。贺若兰等<sup>[10]</sup>针对拉拔工况开展了全过程仿真分析,总结了未脱锚与部分脱锚条件下锚杆轴力与剪应力沿杆体全长的分布规律,并通过现场拉拔试验验证了模拟结果。徐开山<sup>[11]</sup>采用实验室试验与数值模拟方法开展了全长锚固锚索拉拔试验研究,分别得到了浆岩破坏、筋浆破坏与钢筋拉断破坏条件下拉拔力与拉拔位移曲线。周世昌等<sup>[12]</sup>建立了以锚固界面的双指数曲线剪切滑移模型和锚杆线性强化弹塑性本构模型为基础的数值模型,重点探讨锚固长度为1.5 m锚杆的轴向应力和剪应力分布情况,并通过拉拔试验验证了模拟结果。近些年来,其他国内外学者也在全长锚固锚杆力学特性研究方面做了大量工作<sup>[13-17]</sup>。

综上所述,已有大量关于全长锚固锚杆力学特性的研究,但比较分散,或者研究某种受力条件,或者分析某种参量变化,尤其缺乏对脱锚失效的系统考虑。理论分析方法难以适用脱锚等复杂条件并且推导繁琐;实验室试验与现场监测方法则受制于监测手段难以高效、准确获取数据,而数值模拟方法则可有效解决上述难题。为系统研究全长锚固锚杆的力学特性,利用经过验证的数值模拟方法以及开发的脱锚算法,

分别针对连续变形承载、非连续变形承载和拉拔承载 3 种典型工况开展数值试验,分析不同连续变形量级、不同裂隙参数与不同围压拉拔条件下全长锚固锚杆的轴力与剪应力分布规律,以及脱锚对不同工况条件下锚杆力学特性的影响,并将部分数值模拟结果与已有成果比对,验证结果的正确性。系统研究典型工况条件下全长锚固锚杆的力学特性有助于理解全长锚固锚杆在不同工程条件下的作用方式和失效行为,指导支护设计。

## 1 数值模拟可行性验证及脱锚算法

### 1.1 单裂隙条件下全长锚固锚杆受力分析

DAS 等<sup>[6]</sup>基于弹性假设建立了单裂隙围岩圆形巷道全长锚固锚杆加固模型,推导了单裂隙张开条件下锚杆变形、轴力与剪力的表达式。圆形巷道围岩位移包括围岩弹性位移和裂隙处的位移陡变,如图 1 所示。

巷道围岩位移  $u_r$  可表示为

$$u_r = U_{r0}e^{-nx} + \Delta H(x - L_j) \quad (1)$$

其中,  $H(x - L_j)$  为阶跃函数,表示为

$$H(x - L_j) = \begin{cases} 1, & \text{if}(x - L_j) < 0 \\ 0, & \text{if}(x - L_j) > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $U_{r0}$  为无裂隙条件下的巷道边界位移;  $n$  为控

制参数,介于 0~1 之间;  $x$  为围岩与巷道边界的距离;  $\Delta$  为裂隙处的位移陡变;  $L_j$  为裂隙与巷道边界的距离。

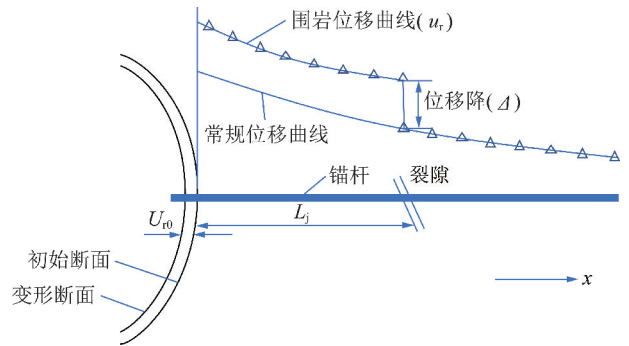


图 1 单裂隙条件下圆形巷道围岩位移示意

Fig. 1 Diagram of displacement of surrounding rock in circular roadway containing single fracture

在围岩中安装锚杆,由于围岩变形,锚杆承受轴向载荷,并在锚固界面形成剪切载荷。提取锚固界面微元,如图 2 所示,建立锚杆轴力与剪力的平衡关系式:

$$A_b \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx = -F_s dx \quad (3)$$

式中,  $A_b$  为锚杆的横截面积;  $\sigma_{xx}$  为锚杆的轴向应力;  $F_s$  为单位锚固长度的剪力。

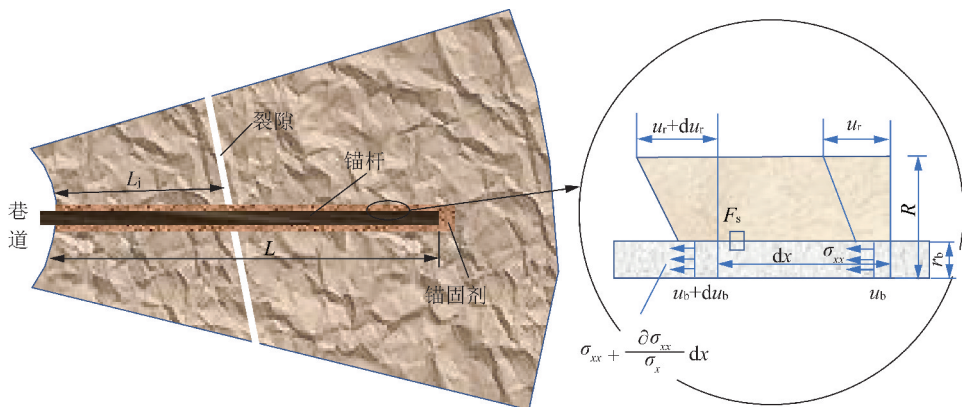


图 2 全长锚固锚杆锚固界面应力分析

Fig. 2 Stress analysis of anchoring interface of fully-grouted bolt

将式(3)进行变换可得

$$\frac{d\sigma_{xx}}{dx} = -\frac{F_s}{A_b} \quad (4)$$

通过构建锚杆的应力应变关系,  $\sigma_{xx}$  可表示为

$$\sigma_{xx} = E_b \frac{du_b}{dx} \quad (5)$$

式中,  $E_b$  为锚杆的弹性模量;  $u_b$  为锚杆的轴向变形。

在不考虑锚固界面破坏条件下,锚固界面剪力表

示为

$$F_s = k(u_r - u_b) \quad (6)$$

式中,  $k$  为锚固界面的剪切刚度。

联立式(4)~(6),则可建立围岩位移与锚杆变形的关系式,其为二阶非齐次线性常微分方程,即

$$\frac{d^2 u_b}{dx^2} - \alpha^2 u_b = -\alpha^2 u_r \quad (7)$$

式中,  $\alpha^2 = k/(A_b E_b)$ 。

将式(1)代入式(7),并且在全长锚固锚杆两端处存在边界条件,联立如下:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_b}{dx^2} - \alpha^2 u_b = -\alpha^2 [U_{i0} e^{-\alpha x} + \Delta H(x - L_j)] \\ \frac{du_b}{dx}(0) = 0 \\ \frac{du_b}{dx}(L) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,在已知围岩位移参数  $U_{i0}$ ,  $n$ ,  $\Delta$  和  $L_j$  的情况下可得到锚杆变形  $u_b$  的表达式,进一步可得到锚杆轴力与剪力的表达式。鉴于锚杆轴力与剪力的表达式非常冗长,在此不列出,可参阅文献[6]。

## 1.2 验证示例与过程

为验证数值模拟方法的可行性,建立如图3所示的全长锚固锚杆单裂隙承载模型,块体A和B均为边长为0.95 m的高强度立方体,全长锚固锚杆布置在模型正中部位,长度为1.8 m、直径为20 mm、弹性模量为200 GPa、锚固界面的剪切刚度为1 GPa,固定块体B的同时张拉块体A,张拉位移共计为0.617 mm。分别采用理论分析与数值模拟方法研究基于上述模型与参数的全长锚固锚杆的受力特性,并予以对比。

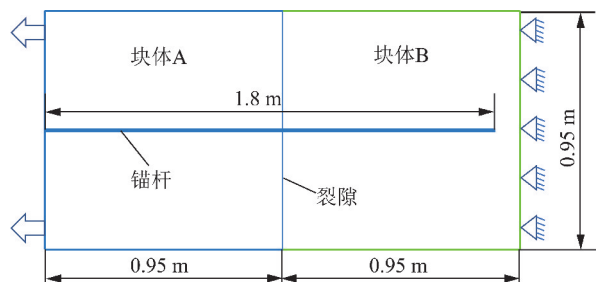
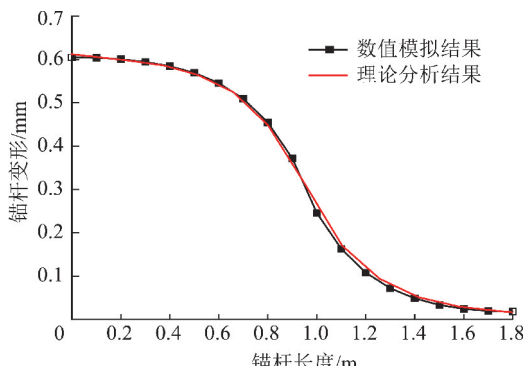


图3 全长锚固锚杆数值模拟验证模型

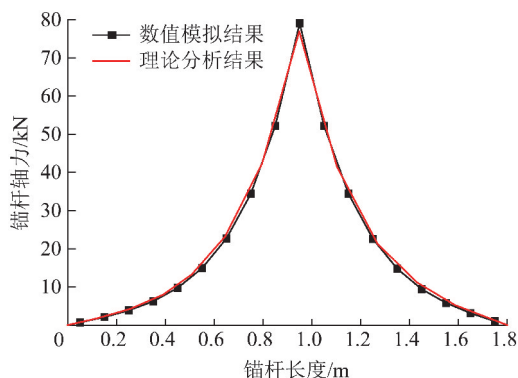
Fig. 3 Verification model of numerical simulation for fully-grouted bolt

图3所示模型为DAS等<sup>[6]</sup>理论分析模型的特例,设置  $U_{i0} = 0$ 、 $n = 1$ 、 $\Delta = 0.617$  mm 和  $L_j = 0.95$  m, 则可得到图3所示模型中全长锚固锚杆变形、轴力与剪力的解析解。在FLAC<sup>3D</sup>软件中,建立与图3完全一致的数值模型,块体单边网格数量为30个,共计54 000个网格。块体使用弹性本构模型,为尽量减小块体变形,弹性模量设置为500 GPa。锚杆使用cable结构单元模拟,共划分为18个分段。通过对块体A施加速度模拟张拉,张拉速度被确定为  $1 \times 10^{-7}$  m/步,计算6 170步以达到0.617 mm的张拉位移。将数值模拟结果与理论分析结果提取并对比,如图4所示,可以看出在锚杆变形、锚杆轴力与锚固界面剪力方

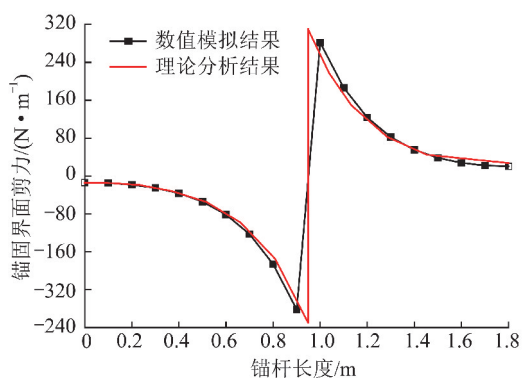
面,数值模拟结果均与理论分析结果高度吻合,表明采用数值模拟方法研究全长锚固锚杆的力学特性是切实可行的。



(a) 锚杆变形



(b) 锚杆轴力



(c) 锚固界面剪力

图4 数值模拟结果与理论分析结果对比

Fig. 4 Comparison between numerical results and theoretical results

## 1.3 脱锚算法

在FLAC<sup>3D</sup>中使用cable结构单元模拟全长锚固锚杆时,在载荷作用下,锚杆与围岩单元之间出现相对变形,从而在锚固界面形成剪力,当剪力达到锚固界面的黏结力时,锚杆发生滑移。利用FISH语言开发脱锚算法,在每个时步中遍历所有锚杆构件,如果某个锚杆构件的2个端点均发生滑移,则将该锚杆构件识别为脱锚单元,将其黏结力与黏结刚度设置为0,实现全长锚固锚杆在载荷作用下的渐进脱锚模拟。

## 2 连续变形承载工况

### 2.1 数值模型建立

为产生连续变形,建立了如图 5 所示的连续变形锚杆承载模型。模型长宽高为  $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 1\text{ m}$ ,使用弹性本构模型,中间布置半径为  $0.3\text{ m}$  的圆形巷道,锚杆布置在巷道右帮,长度为  $1.8\text{ m}$ ,使用 cable 结构单元模拟,划分为 18 个分段,在模型  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴 3 向施加相等应力,模型参数见表 1。

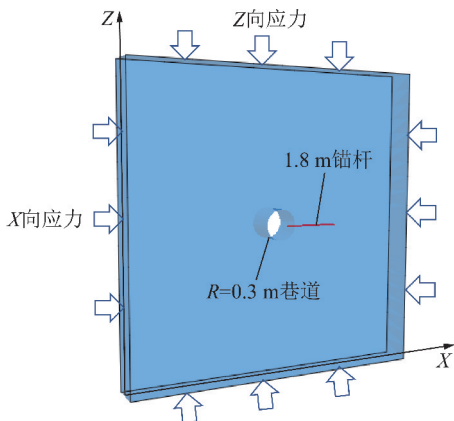


图 5 连续变形锚杆承载数值模型

Fig. 5 Numerical model of bolt bearing under continuous deformation

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

对象	参数	数值
块体	本构模型	弹性
	弹性模量/GPa	50
	泊松比	0.2
	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2 500
锚杆	弹性模量/GPa	200
	黏结力/( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	1.0
	黏结刚度/GPa	1.0
	抗拉强度/kN	500
	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	30

### 2.2 模拟结果分析

通过施加不同应力,分别在巷道周边产生最大变形为  $4.5$ 、 $9.0$ 、 $18.0$  和  $25.0\text{ mm}$  的连续变形,全长锚固锚杆在不同连续变形量级下的模拟结果如图 6 所示。当最大变形为  $4.5\text{ mm}$  和  $9\text{ mm}$  时,锚杆轴力沿杆体先增高再降低,在靠近锚杆头部达到最大值,与此对应,剪应力在锚杆头部至轴力最大值部分指向锚杆头部,并逐渐降低为 0;在轴力峰值以里部分,剪应力指向锚杆尾部,先增大再降低,但量值远小于剪应

力最大值。剪应力为 0 且轴力最大的位置则为中性点,不同变形且非脱锚条件下,中性点位置相同。当最大变形增大至  $18$  和  $25\text{ mm}$  时,锚杆头部范围发生脱锚,脱锚范围锚杆轴力与剪应力基本为 0,锚杆轴力最大值与中性点均向围岩深部转移,脱锚范围至中性点部分剪应力指向锚杆头部,先线性增大后指数衰减,中性点以里剪应力指向锚杆尾部并呈增大趋势。无论是否脱锚,轴力峰值越大,剪应力峰值越大。未脱锚时的轴力与剪应力分布与王明恕<sup>[3]</sup>、姚显春等<sup>[4]</sup>和 LI<sup>[5]</sup>的结果较为一致。部分脱锚时的轴力与剪应力分布与 BJÖRNFOT 等<sup>[8]</sup>的结果较为一致。

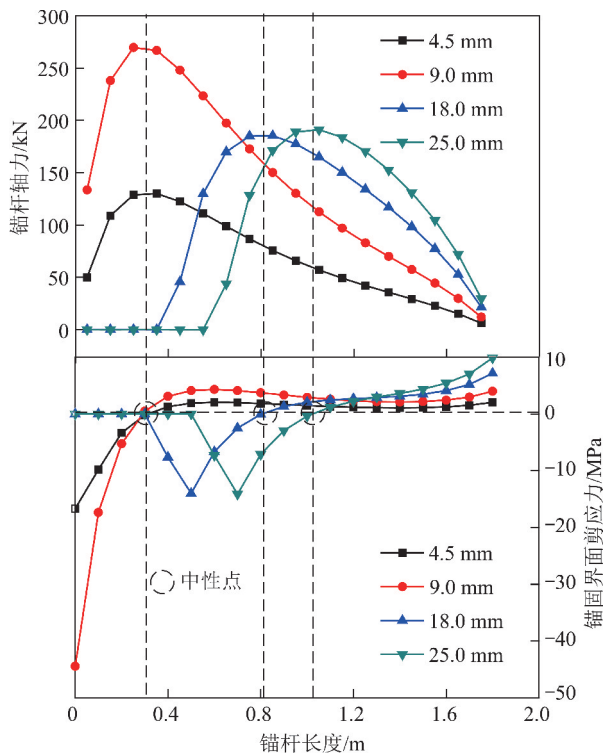


图 6 不同连续变形量级下锚杆承载模拟结果

Fig. 6 Simulation results of bolt bearing under different continuous-deformation magnitudes

## 3 非连续变形承载工况

### 3.1 数值模型建立

非连续变形可简化为单个或多个裂隙的张开过程。为分析裂隙参数,包括裂隙张开度、位置与数量,对全长锚固锚杆力学特性的影响,建立如图 7 所示的数值模型。

裂隙张开度分析时分别采用裂隙居于中间部位的单裂隙模型和裂隙分处左侧、中间与右侧的 3 裂隙模型。裂隙位置分析时将单裂隙分别布置于模型左侧、中间与右侧。裂隙数量分析时分别采用单裂隙、双裂隙与 3 裂隙模型。对于多裂隙模型,采用单裂隙依次加载的方式实现多裂隙张开模拟。为保证裂隙

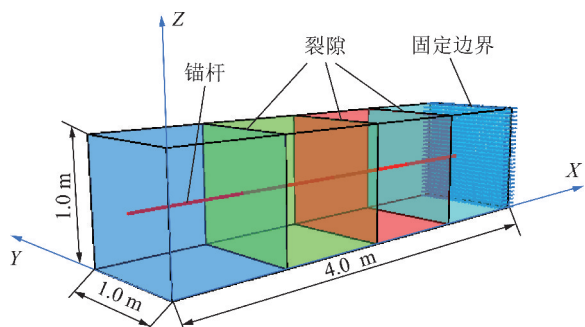


图7 裂隙参数分析数值模型

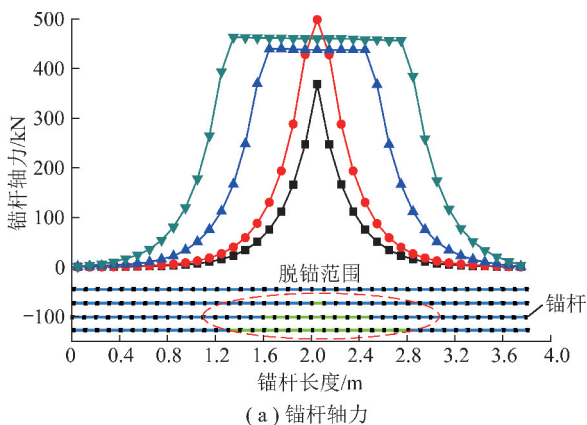
Fig. 7 Numerical model for analysis of fracture parameters

间距,模型长度设置为4 m,宽度和高度均设置为1 m,锚杆长度设置为3.8 m,锚杆右端未及模型边界,锚杆分段为38个。通过施加横向速度模拟裂隙张开,张拉速度确定为 $1 \times 10^{-6}$  m/步(可确保准静力状态)。模型参数见表1。

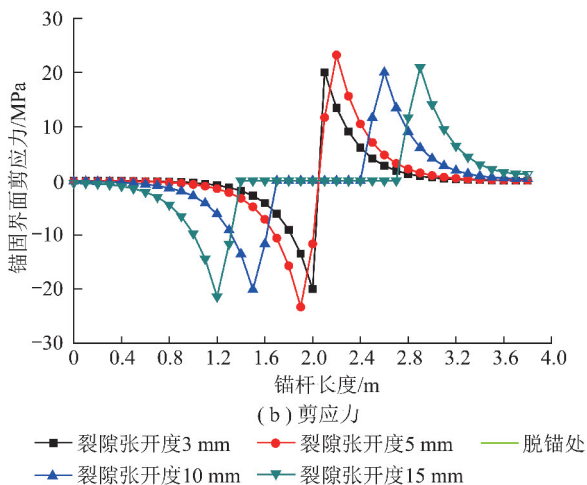
### 3.2 裂隙张开度的影响

#### 3.2.1 单裂隙条件

在单裂隙条件下,不同裂隙张开度的模拟结果如图8所示。由图8(a)可知,在裂隙张开3 mm和



(a) 锚杆轴力



(b) 剪应力

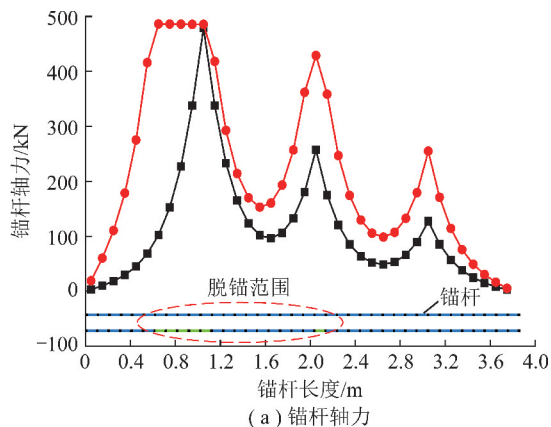
—■— 裂隙张开度3 mm    —●— 裂隙张开度5 mm    —▲— 脱锚处  
—▼— 裂隙张开度10 mm    —◆— 裂隙张开度15 mm

图8 不同裂隙张开度模拟结果(单裂隙)

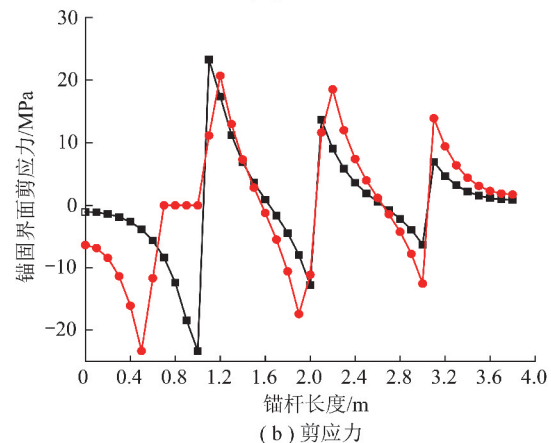
5 mm时,锚杆轴力均存在峰值,分别为370 kN和500 kN;裂隙张开3 mm时,无脱锚发生,裂隙张开5 mm时,仅裂隙所在锚杆分段发生脱锚。当裂隙张开位移增大到10 mm和15 mm时,脱锚范围显著增大,轴力曲线出现与脱锚范围对应的“平顶”,由于脱锚导致锚杆轴力降低,其最大值略低于破断力500 kN。如图8(b)所示,无脱锚时,剪应力在锚杆轴力峰值处达到最大值,并向两侧呈指数衰减,峰值两侧剪应力方向相反;存在脱锚时,剪应力在靠近脱锚范围两侧达到峰值,分别面向脱锚范围近似线性衰减和背向脱锚范围指数衰减,脱锚范围两侧剪应力方向相反,脱锚范围剪应力为0。对比图8(a)和(b)可知,轴力峰值越大,剪应力峰值越大。未脱锚时的轴力与剪应力分布与DAS等<sup>[6]</sup>和NIE等<sup>[7]</sup>的结果基本一致。

#### 3.2.2 多裂隙条件

在多裂隙条件下,不同裂隙张开度的模拟结果如图9所示。由于巷道围岩变形由内至外逐渐增大,在此将3裂隙模型类比为巷道围岩,设置裂隙分别张开



(a) 锚杆轴力



(b) 剪应力

—■— 裂隙张开度1, 2, 4 mm    —▲— 脱锚处  
—●— 裂隙张开度2, 4, 8 mm

图9 不同裂隙张开度模拟结果(多裂隙)

Fig. 8 Simulation results of different fracture apertures (under single fracture)

Fig. 9 Simulation results of different fracture apertures (under multiple fractures)

1,2,4 mm 和 2,4,8 mm。裂隙张开 1,2,4 mm 时,轴力曲线表现为 3 个峰值,张开位移越大轴力峰值越大,分别为 127,257 和 479 kN。与此对应,剪应力在轴力峰值处达到最大,分别为 23.0,13.0,7.0 MPa,剪应力峰值随轴力峰值而增大。裂隙张开 2,4,8 mm 时,由于左侧裂隙附近锚杆发生脱锚,导致锚杆轴力曲线表现为 2 个峰值、1 个“平顶”,剪应力在脱锚范围为 0。未脱锚时的轴力与剪应力分布与 LI<sup>[5]</sup> 和 DAS 等<sup>[6]</sup> 的结果基本一致。

### 3.3 裂隙位置的影响

不同裂隙位置的模拟结果如图 10(裂隙张开 3 mm)和图 11(裂隙张开 10 mm)所示。由图 10(a)可知,裂隙张开 3 mm 时,锚杆轴力在裂隙位置达到

峰值,约为 368 kN,在峰值处向两侧呈指数衰减。锚杆轴力峰值随裂隙位置变化,与裂隙位置表现为对应关系。锚杆均无脱锚。如图 10(b)所示,剪应力也在裂隙位置达到峰值,约为 20 MPa,并向两侧呈指数衰减,峰值两侧剪应力方向相反。模拟结果与 DAS 等<sup>[6]</sup> 的理论分析结果基本一致。

由图 11(a)可知,裂隙张开 10 mm 时,锚杆轴力仍然在裂隙位置达到最大值,并随裂隙位置变化,但裂隙附近一定长度范围的锚杆发生脱锚,导致锚杆轴力最大值低于破断力,约为 440 kN,并且表现为“平顶”。脱锚后剪应力变化趋势与中间单裂隙脱锚相同,只是位置不同,如图 11(b)所示。

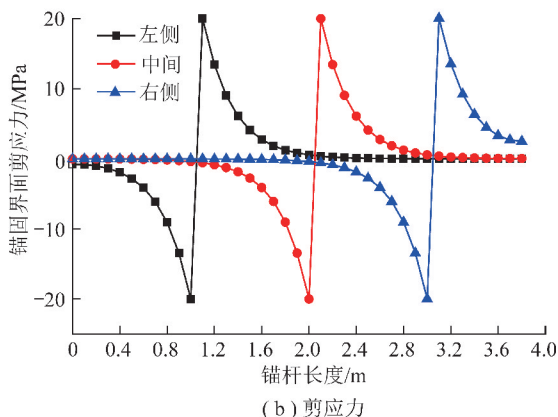
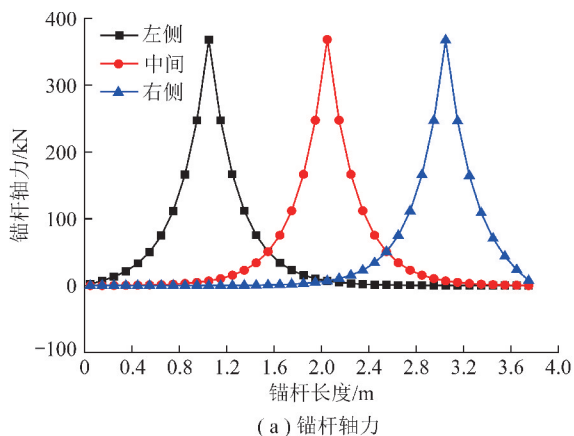


图 10 不同裂隙位置模拟结果(裂隙张开 3 mm)

Fig. 10 Simulation results of different fracture positions (with fracture aperture of 3 mm)

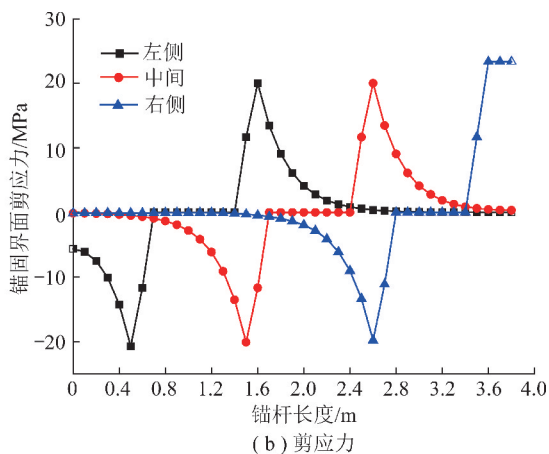
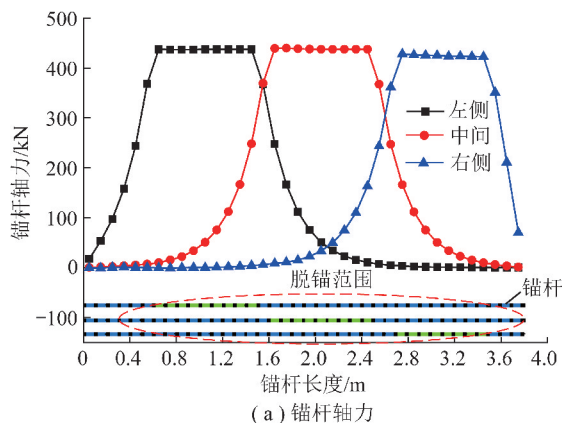


图 11 不同裂隙位置模拟结果(裂隙张开 10 mm)

Fig. 11 Simulation results of different fracture positions (with fracture aperture of 10 mm)

### 3.4 裂隙数量的影响

不同裂隙数量模拟结果如图 12 所示,裂隙张开位移为 3 mm。由图 12(a)可知,无论模型存在几条裂隙,锚杆轴力均在裂隙位置达到峰值,在 370~380 kN,峰值数量与裂隙数量对应,锚杆均无脱锚。

存在 3 条裂隙时,由于裂隙间距较近,导致裂隙间锚杆轴力衰减较小,轴力约为 100 kN。剪应力也在裂隙位置达到峰值,并向裂隙两侧衰减,如图 12(b)所示。模拟结果与 DAS 等<sup>[6]</sup> 的理论分析结果基本一致。

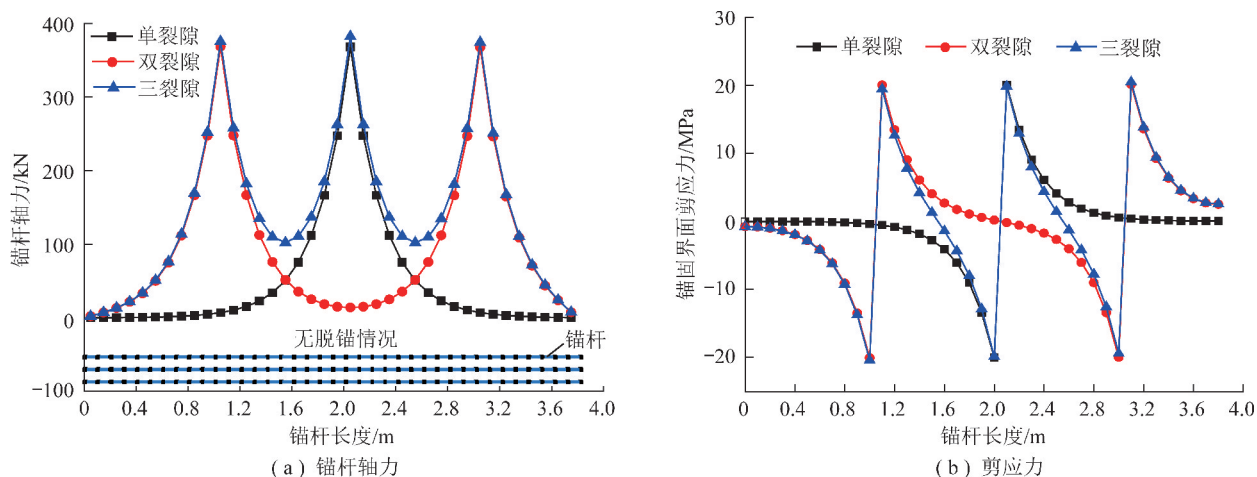


图 12 不同裂隙数量模拟结果

Fig. 12 Simulation results of different numbers of fractures

## 4 拉拔承载工况

### 4.1 数值模型建立

为分析拉拔条件下全长锚固锚杆的力学特性,建立如图 13 所示的锚杆拉拔数值模型。模型为长方体,尺寸为  $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,使用弹性本构模型。锚杆沿  $X$  轴布置在模型正中部位,长度为  $1.8\text{ m}$ ,使用 cable 结构单元模拟,分段数为 18 个。对模型  $Z$  轴双面与  $Y$  轴双面施加面力以模拟围压,围压相等。固定左侧端面  $X$  方向位移,对锚杆左侧端部节点施加横向速度模拟拉拔,拉拔速度确定为  $1 \times 10^{-6}\text{ m/步}$ (可确保准静力状态)。锚杆拉拔导致模型左侧端面聚集不平衡力,所有结点不平衡力的合力则为拉拔力,可通过编制 FISH 函数获取。模型参数见表 1。

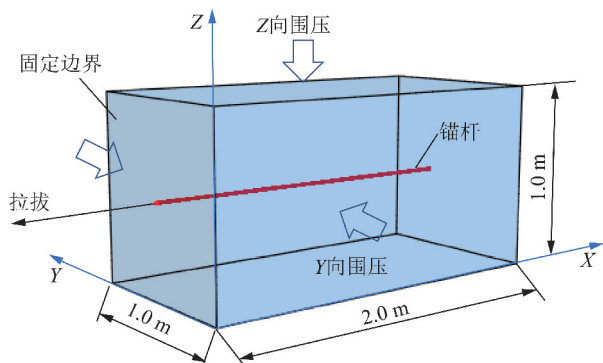


图 13 锚杆拉拔数值模型

Fig. 13 Numerical model of pull-out test of bolt

### 4.2 不同围压锚杆拉拔模拟结果

不同围压条件下全长锚固锚杆拉拔模拟结果如图 14 所示,拉拔位移共计  $20\text{ mm}$ 。无围压时,拉拔力初始快速增加,及至  $341\text{ kN}$  时头部锚杆分段脱锚,拉拔力下降,随拉拔位移增大,锚杆分段渐进脱锚,拉拔力曲线表现为一系列锯齿,待锚杆全部脱锚后,拉拔

力衰减为 0。当围压为  $1, 2, 3\text{ MPa}$  时,锚杆均在全长范围脱锚,拉拔力曲线仍表现为系列锯齿,由于围压与摩擦,锚杆全部脱锚后仍保持有残余拉拔力,分别为  $26, 88, 152\text{ kN}$ ,围压越大,峰值和残余拉拔力越大。随围压增高,脱锚部分锚杆摩擦力贡献增大,导致锯齿段拉拔力增量变大,锯齿段拉拔力曲线愈发倾斜。当围压为  $4\text{ MPa}$  时,设置锚杆轴力达到破断力时发生破断,可以看出当拉拔力达到  $500\text{ kN}$  时快速衰减到 0,此时仅有头部  $0.8\text{ m}$  范围锚杆发生脱锚,锚杆未及全部脱锚锚杆杆体则发生破断。

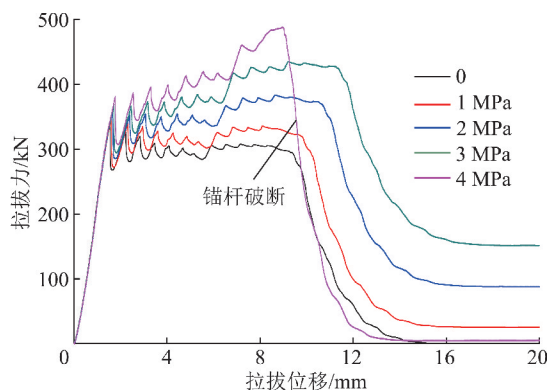


图 14 不同围压锚杆拉拔模拟结果

Fig. 14 Simulation results of pull-out tests of bolts under different confining pressures

锚杆轴力与剪应力在不同脱锚条件下的模拟结果如图 15 所示。由图 15(a)可知,未脱锚时,锚杆轴力与剪应力均从锚杆头部向尾部呈指数衰减。当拉拔到一定位移后,锚杆头部部分锚杆分段发生脱锚,锚杆轴力峰值范围增大,在脱锚段表现为“平顶”,在“平顶”边缘向锚杆尾部呈指数衰减;与此对应,剪应力峰值转移到脱锚范围以里,面向脱锚范围呈近似线性衰减,背向脱锚范围呈指数衰减,脱锚范围剪应力为 0,如图 15(b)所示。全部脱锚后,无围压时,锚杆

轴力基本为 0;有围压时,锚杆轴力从锚杆头部向尾部呈线性衰减,如图 15(c)所示。全部脱锚后锚杆与围岩之间仍存摩擦力,导致锚杆头部轴力大于尾部,以及锚杆轴力随围压而增大。未脱锚与部分脱锚时的轴力与剪应力分布与 FARMER<sup>[9]</sup>和贺若兰等<sup>[10]</sup>的结果基本一致。

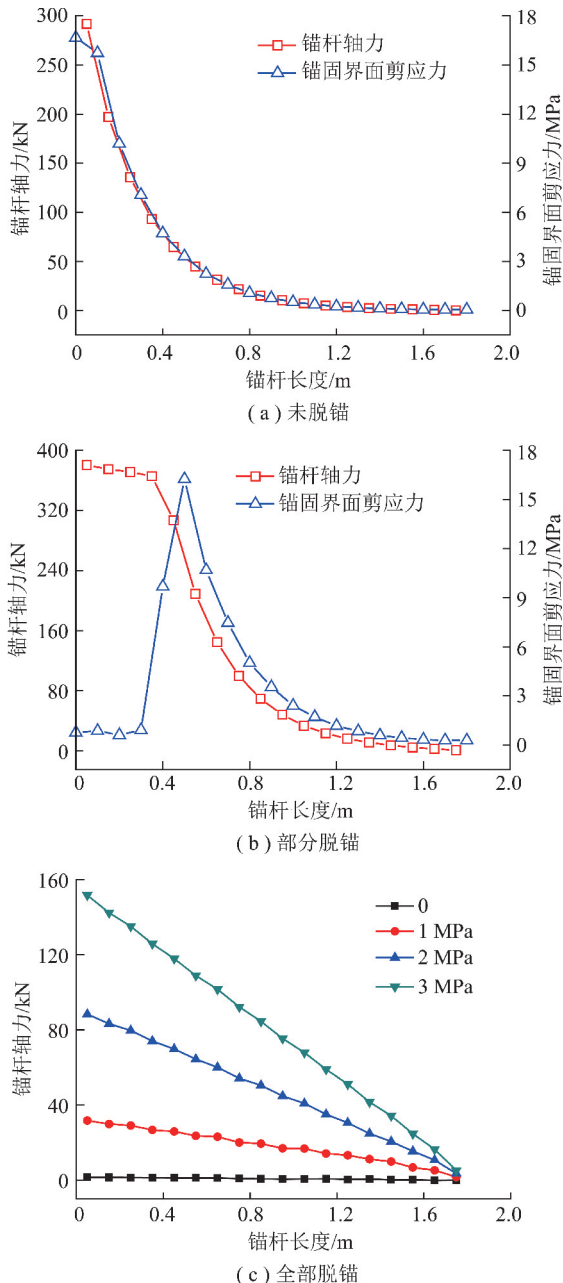


图 15 拉拔试验锚杆承载模拟结果

Fig. 15 Simulation results of bolts bearing in pull-out tests

## 5 结 论

(1)在连续变形工况下,全长锚固锚杆的轴力沿杆体先增大后减小,中性点以外剪应力指向锚杆头部,逐渐减小;中性点以里剪应力指向锚杆尾部,先增大后减小。锚杆头部脱锚后,中性点向锚杆尾部转

移,脱锚范围轴力与剪应力基本为 0。

(2)在非连续变形工况下,全长锚固锚杆的轴力峰值与裂隙对应。脱锚前轴力与裂隙张开位移呈正比,剪应力在裂隙位置达到峰值,向两侧呈指数衰减,但方向相反;锚杆在裂隙位置脱锚后,轴力在脱锚段保持最大值,剪应力在脱锚范围两侧达到峰值,脱锚范围两侧剪应力方向相反。

(3)在拉拔工况下,全长锚固锚杆的初始拉拔力快速增大,渐进脱锚后拉拔力表现为锯齿形升降,完全脱锚后拉拔力迅速衰减。峰值拉拔力和残余拉拔力随围压而增大。未脱锚时轴力与剪应力从锚杆头部向尾部呈指数衰减;部分脱锚时轴力在脱锚段达到最大,剪应力峰值转移至脱锚范围以里;全部脱锚后轴力沿锚杆呈线性衰减,随围压而增大。

## 参考文献 (References) :

- [1] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071-1081.  
KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071-1081.
- [2] FREEMAN T J. The behaviour of fully-bonded rock bolts in the Kielder experimental tunnel [J]. Tunnels and Tunnelling, 1978(7): 37-40.
- [3] 王明恕. 全长锚固锚杆机理的探讨[J]. 煤炭学报, 1983(1): 40-47.  
WANG Mingshu. Mechanism of fully-column rock bolt [J]. Journal of China Coal Society, 1983(1): 40-47.
- [4] 姚显春, 李宁, 陈蕴生. 隧洞中全长粘结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2272-2276.  
YAO Xianchun, LI Ning, CHEN Yunsheng. Theoretical solution for shear stresses on interface of fully grouted bolt in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2272-2276.
- [5] LI C. Analytical models for rock bolts [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1999, 36(8): 1013-1029.
- [6] DAS K, SEKHAR G P R, DEB D, et al. Analytical model for fully grouted rock bolts with multiple joints [A]. The 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, Montreal [C]. 2015: 1-8.
- [7] NIE W, ZHAO Z Y, NING Y J, et al. Development of rock bolt elements in two-dimensional discontinuous deformation analysis [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(6): 2157-2170.
- [8] BJÖRNFOOT F, STEPHANSSON O. Interaction of grouted rock bolts and hard rock masses at variable loading in a test drift of the Kirunavaara Mine, Sweden [A]. Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting [C]. Rotterdam: Balkema, 1984: 377-395.
- [9] FARMER I W. Stress distribution along a resin grouted rock anchor [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(11): 347-351.

- [10] 贺若兰,张平,李宁. 拉拔工况下全长粘结锚杆工作机理[J]. 中南大学学报(自然科学版),2006,37(2):401-407.  
HE Ruolan,ZHANG Ping,LI Ning. Working mechanism of fully grouted bolt in pull-out working state[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2006,37(2):401-407
- [11] 徐开山. 全长粘结锚固系统拉拔变形与破坏机理研究[D]. 青岛:山东科技大学,2017.  
XU Kaishan. Study on drawing deformation and failure mechanism of wholly grouted anchoring system[D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology,2017.
- [12] 周世昌,朱万成,于水生. 基于双指数剪切滑移模型的全长锚固锚杆荷载传递机制分析[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S2):20-28.  
ZHOU Shichang,ZHU Wancheng,YU Shuisheng. Analysis of load transfer mechanism for fully grouted rockbolts based on the bi-exponential shear-slip model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(S2):20-28.
- [13] 吕爱钟,刘宜杰,张晓莉. 圆形隧洞全长黏结锚杆力学分析的解析方法[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(7):1561-1573.  
LÜ Aizhong,LIU Yijie,ZHANG Xiaoli. A theoretical solution for a circular tunnel reinforced by fully grouted rock bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(7):1561-1573.
- [14] 袁彦辉,肖明,陈俊涛. 全长黏结式锚杆沿程应力分布模拟方法[J]. 岩土力学,2018,39(5):371-379.  
YUAN Yanhui,XIAO Ming,CHEN Juntao. A method for simulating stress distribution along fully grouted anchor [J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(5):371-379.
- [15] CHANG X,LI Z,WANG S,et al. Pullout performances of grouted rockbolt systems with bond defects[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering,2018,51(3):861-871.
- [16] TEYMEN A,KILI A. Effect of grout strength on the stress distribution (tensile) of fully-grouted rockbolts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2018,77:280-287.
- [17] HE L,AN X M,ZHAO Z Y. Fully grouted rock bolts: An analytical investigation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48(3):1181-1196.