

杜云楼,冯国瑞,康红普,等. 不同黏结长度锚杆拉拔承载特性研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(3): 033012.

DU Yunlou, FENG Guorui, KANG Hongpu, et al. Investigation on the pull-out bearing characteristics of bolts with different bond lengths[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(3): 033012.

不同黏结长度锚杆拉拔承载特性研究

杜云楼^{1,2,5}, 冯国瑞^{1,2}, 康红普^{3,4}, 张玉江^{1,2}, ZHANG Xihong⁵

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省绿色采矿工程技术研究中心, 山西 太原 030024; 3. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 4. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 5. Centre for Infrastructural Monitoring and Protection, School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Bentley, WA 6102, Australia)

摘要:黏结长度是影响锚杆承载性能的关键因素之一,研究不同黏结长度锚杆的拉拔承载特性对锚杆支护设计具有重要意义。为此,基于锚固界面的“三线性”黏结-滑移模型,采用FLAC^{3D}数值软件研究了不同黏结长度锚杆的拉拔承载特性。研究表明:黏结长度会显著影响锚杆拉拔载荷-位移曲线的形态和发展过程,增大锚杆黏结长度能够提高其承载能力,提高锚杆抵抗失效的能力。随着黏结长度的增加,锚杆峰值拉拔载荷先快速增大后稳定增大,锚杆软化载荷和摩擦载荷先逐渐增大后保持不变,锚杆存在临界黏结长度。拉拔载荷作用下,锚杆轴力沿锚杆长度方向逐渐降低,峰值剪应力最先出现在锚杆加载端,并逐渐向锚杆自由端移动。随着黏结长度的增加,锚杆轴力作用范围增大,锚杆剪应力的不均匀性增加。研究结果可为锚杆支护设计提供有益参考。

关键词:黏结-滑移关系;拉拔试验;黏结长度;承载特性

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:2096-7187(2021)03-3012-08

Investigation on the pull-out bearing characteristics of bolts with different bond lengths

DU Yunlou^{1,2,5}, FENG Guorui^{1,2}, KANG Hongpu^{3,4}, ZHANG Yujiang^{1,2}, ZHANG Xihong⁵

(1. School of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Research Center of Green Mining Engineering Technology in Shanxi Province, Taiyuan 030024, China; 3. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 5. Centre for Infrastructural Monitoring and Protection, School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Bentley, WA 6102, Australia)

Abstract: Bond length is one of the key factors affecting the bearing performance of rock bolts. It is of great significance to study the pull-out bearing characteristics of bolts with different bond length for the design of bolt support. For this purpose, based on the "trilinear" bond-slip model of the anchoring interface, the FLAC^{3D} numerical software was used to study the pull-out bearing characteristics of bolts with different bond length. The research results show that the bond length significantly affects the shape and development process of the pull-out load-displacement curve of a bolt. Increasing the bond length can improve the bearing capacity of the bolt and enhance its ability to resist failure. With the increase of the bond length, the peak pull-out load of the bolt first increases rapidly and then

收稿日期:2020-09-15

修回日期:2020-11-19

责任编辑:李青

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51925402);国家自然科学基金资助项目(U1710258, 52004172);中国博士后科学基金资助项目(2020M682215)

作者简介:杜云楼(1990—),男,湖北荆门人,博士研究生。E-mail:duyl2016@163.com

通信作者:冯国瑞(1976—),男,山西阳城人,教授,博士,主要从事特殊开采与岩层控制等方面的教学与科研工作。E-mail:fguorui@163.com

steadily. The softening load and friction load of the bolt increase first and then remain unchanged. There is a critical bond length of the bolt. Under the pull-out load, the axial force of the bolt gradually decreases along the length of the bolt, the peak shear stress first appears at the loading end of the bolt and gradually moves to the free end of the bolt. With the increase of the bond length, the range of the bolt axial force increases and so does the unevenness of the bolt shear stress. The research results may provide a useful reference for the design of bolt support.

Key words: bond-slip relationship; pull-out test; bond length; bearing characteristics

锚杆支护作为一种简单而有效的围岩加固技术,已被广泛应用于煤矿巷道围岩控制,且取得了较好的应用效果^[1-2]。

锚杆支护是通过锚固剂将锚杆与岩石黏结起来的连续机械耦合系统^[3],根据黏结长度的不同将锚固方式分为:端头锚固、加长锚固和全长锚固^[4]。已有研究表明^[5],黏结长度是影响锚杆承载性能的关键因素之一,因此,研究不同黏结长度对锚杆承载性能的影响对锚杆支护设计具有重要意义。

近年来,国内外学者围绕黏结长度对锚杆承载性能的影响进行了大量研究,并取得了较好的研究成果。龙照^[6]等基于锚杆围岩的相互作用机制,推导了锚杆合理黏结长度的计算公式;李怀珍、黄明华^[7-8]等基于锚固界面的受力特征,给出了锚杆合理黏结长度的计算方法,并分析了黏结长度对锚杆承载特性的影响;王洪涛^[9]等通过建立不同黏结长度下巷道围岩力学分析模型,分析了黏结长度对锚杆应力分布的影响;周辉^[10]等研究了锚杆不同黏结长度对巷道围岩稳定性及支护效果的影响;LI C C^[11]等探究了黏结长度对锚杆承载特性的影响,发现锚杆的承载能力与黏结长度有很大关系;肖同强^[12]等研究了黏结长度对锚杆拉拔力的影响,发现锚杆黏结长度会影响锚固失效方式;姚强岭^[13]等研究了黏结长度对锚杆轴力和锚固界面剪应力分布特征的影响。以上研究从理论与试验的角度着重分析了黏结长度对锚杆承载能力的影响,探讨了锚杆的合理黏结长度,但关于黏结长度对锚杆拉拔承载过程及受力特征演化方面的研究尚存在不足之处。

鉴于此,本文基于目前常用的锚固界面“三线性”黏结-滑移模型^[14],采用FLAC^{3D}数值软件对不同黏结长度的锚杆进行了拉拔试验,系统探究了不同黏结长度下锚杆拉拔载荷-位移特征和锚杆受力分布,分析了黏结长度对锚杆拉拔承载特征的影响,以期锚杆支护设计提供有益参考。

1 数值模型的建立

1.1 锚固界面力学行为及FLAC的实现

对于锚杆支护系统而言,在其他支护参数一定时,锚杆的承载性能在很大程度上取决于锚固界面的黏结特性^[15]。已有研究表明^[16-18],锚固界面的黏结-滑移关系可采用“三线性”模型表示,如图1所示, τ_p 和 δ_1 分别为锚固界面的峰值黏结力及对应位移, τ_f 和 δ_2 分别为残余黏结力及对应位移。“三线性”黏结-滑移模型分为弹性段、软化段和摩擦段3部分,且锚固界面黏结应力 τ 与位移 δ 的关系可表示为

$$\tau = \begin{cases} k_1 \delta & (0 \leq \delta < \delta_1) \\ k_2 \delta + b_2 & (\delta_1 \leq \delta < \delta_2) \\ b_3 & (\delta \geq \delta_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中, k_1 和 k_2 分别为弹性段和软化段锚固界面的黏结刚度; b_2 和 b_3 分别为软化段与摩擦段锚固界面的相关系数,可根据锚固界面的相应黏结参数确定。

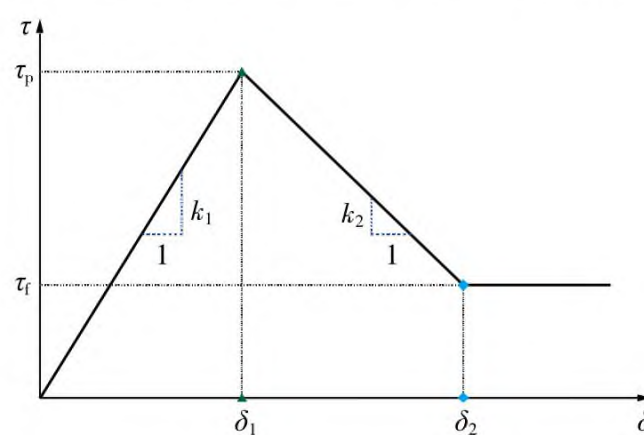


图1 “三线性”黏结-滑移模型

Fig. 1 Trilinear bond-slip model

在FLAC^{3D}中,Cable和Pile结构单元均可模拟锚杆。Cable单元采用弹簧-滑块系统来描述锚杆与围岩的相互作用^[19],弹簧组件代表锚固界面的黏结刚度,滑块组件代表锚固界面的最大黏结力,如图2所示。Pile结构单元与Cable结构单元类似,只是由耦合弹簧参数来替代水泥浆参数^[20]。在Pile结构单元中,耦合弹簧是非线性的连接体,可通过用户自定

义的Fish语言“cs_sctable”实现锚固界面的应变软化行为。

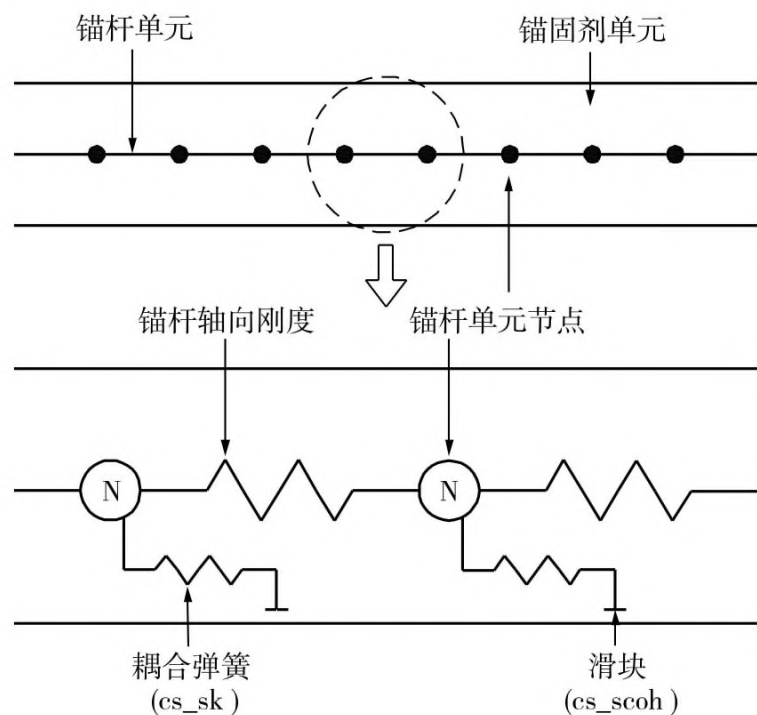


图2 弹簧-滑块模型
Fig. 2 Spring-slider model

1.2 数值模型及方案

为分析不同黏结长度锚杆的拉拔承载特性,采用FLAC^{3D}建立了如图3所示的圆柱体数值计算模型,其中模型长度为锚杆黏结长度 L ,模型直径为约束岩石直径 ϕ 。本次研究中模拟锚杆的直径为20 mm,模拟锚固孔的直径为30 mm,黏结长度的范围为100 ~ 3 000 mm,约束岩石直径为200 mm。模型中所有节点限制沿锚杆径向的位移,且锚杆加载节点所在的模型表面额外限制约束岩石沿锚杆轴向的位移,拉拔速率设为 10^{-6} m/step。

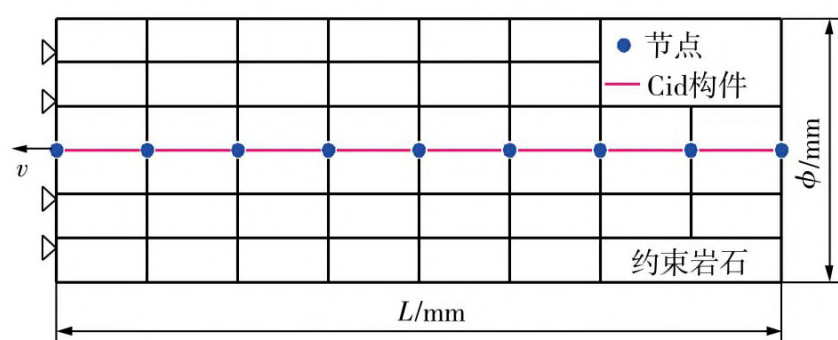


图3 数值计算模型
Fig. 3 Numerical calculation model

在数值模型中,采用Pile结构单元来模拟锚杆并实现锚固界面的应变-软化特征。基于实验室拉拔试验的结果^[14],建模所需的锚固界面黏结强度参数及其他输入参数见表1和表2。需要说明的是,研究中假定锚杆始终处于弹性状态而不发生屈服,故将锚杆屈服强度值设为足够大。图4为锚固界面数值力学模型与输入力学模型比较,两者表现出较好的一致性。

表1 锚固界面黏结强度参数

Table 1 Bond strength parameters of anchoring interface

δ_1 /mm	δ_2 /mm	τ_p /MPa	τ_r /MPa
11.80	19.60	14.90	5.10

表2 数值建模所需的输入参数

Table 2 Input parameters required for numerical model

类型	参数	数值
锚杆	周长/m	9.42×10^{-2}
	截面积/ m^2	3.14×10^{-4}
	弹性模量/MPa	2.00×10^5
	泊松比	0.25
	屈服强度/MPa	6.00×10^4
	黏结力/MPa	9.35×10^5
岩石	黏结刚度/(MPa· m^{-1})	7.92×10^7
	体积模量/MPa	16.04×10^3
	剪切模量/MPa	12.02×10^3
	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	2.80×10^3

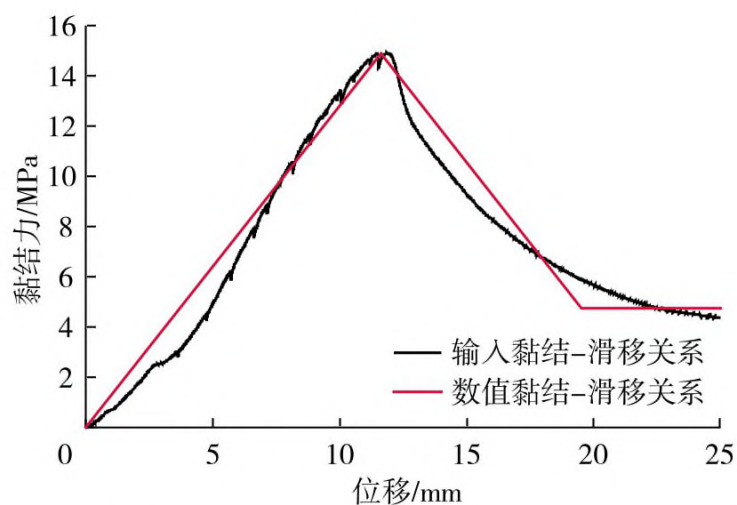


图4 锚固界面数值力学模型与输入力学模型比较

Fig. 4 Comparison of numerical mechanics model of anchoring interface and input mechanics model

2 数值计算结果分析

2.1 不同黏结长度锚杆拉拔承载特性

2.1.1 锚杆拉拔载荷-位移曲线特征

图5为不同黏结长度锚杆的拉拔载荷-位移曲线特征。由图5可知,锚杆黏结长度对拉拔载荷-位移曲线的形态有显著影响。

当锚杆黏结长度较小时,锚固界面剪应力分布较为均匀,拉拔载荷随位移的增加呈先线性增加至峰值拉拔载荷后又线性减小至残余拉拔载荷的特征,且峰值拉拔载荷相对较小。随着锚杆黏结长度的增大,锚固界面剪应力分布不均匀性增加,拉拔载荷的初始增长速率增加,峰值拉拔载荷逐渐增大,且拉拔载荷-位移曲线会逐渐出现一段明显的

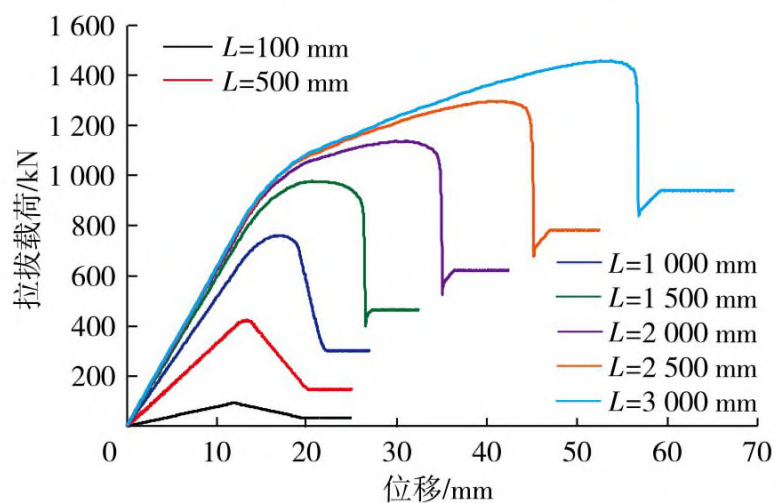


图5 不同黏结长度的锚杆端头拉拔载荷-位移曲线
Fig. 5 Pull-out load-displacement curves of bolt end with different bond lengths

缓慢增长区,说明锚杆黏结长度增加能够提高锚杆的承载能力,增强锚杆承载的延性特征;峰后拉拔载荷的降低趋势也逐渐由平缓变得陡峭,这可能是由于锚固界面弹性段消失引起的载荷降幅远大于摩擦段增加带来的载荷增幅的缘故。

为详细探究不同黏结长度锚杆的拉拔载荷-位移曲线特征,结合锚固界面剪应力的演化特征,选取锚杆黏结长度为100,500,1000和2000 mm这4种情况进行分析,如图6所示。由图6可知:①随着锚杆黏结长度的增大,锚杆的拉拔承载过程有较大差异,且锚杆存在临界软化长度。对于本研究中所选

用的锚固界面黏结强度参数,锚杆的临界软化长度约为1000 mm。当锚杆黏结长度小于1000 mm时,锚杆的拉拔承载过程会出现完全软化阶段;当锚杆黏结长度大于等于1000 mm时,锚杆的拉拔承载过程不会出现完全软化阶段;②当黏结长度为100 mm时,由于锚杆黏结长度较小,锚固界面剪应力分布较为均匀,不会出现明显的软化-摩擦阶段。故锚杆拉拔载荷-位移曲线分为4个阶段:弹性阶段、弹性-软化阶段、软化阶段和摩擦阶段。当黏结长度为500 mm时,锚杆拉拔载荷-位移曲线分为5个阶段:弹性阶段、弹性-软化阶段、软化阶段、软化-摩擦阶段和摩擦阶段。当黏结长度为1000 mm时,此时锚杆黏结长度为临界软化长度,锚杆拉拔承载过程会在弹性-软化阶段后直接进入软化-摩擦阶段,而不出现完全软化阶段。故锚杆拉拔载荷-位移曲线分为4个阶段:弹性阶段、弹性-软化阶段、软化-摩擦阶段和摩擦阶段。当黏结长度为2000 mm时,锚杆拉拔载荷-位移曲线分为5个阶段:弹性阶段、弹性-软化阶段、弹性-软化-摩擦阶段、软化-摩擦阶段和摩擦阶段;③锚杆峰值拉拔载荷的出现阶段会随锚杆黏结长度的增大而发生变化。锚杆黏结长度为100,500和1000 mm时,锚杆峰值拉拔载荷

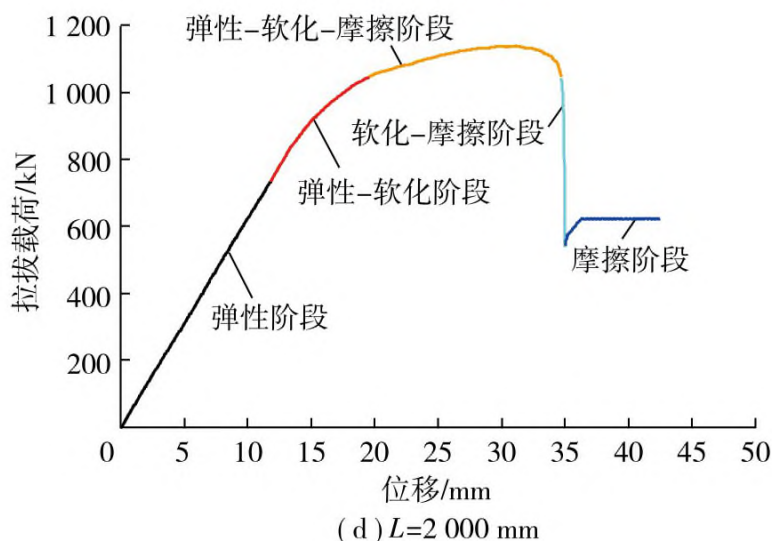
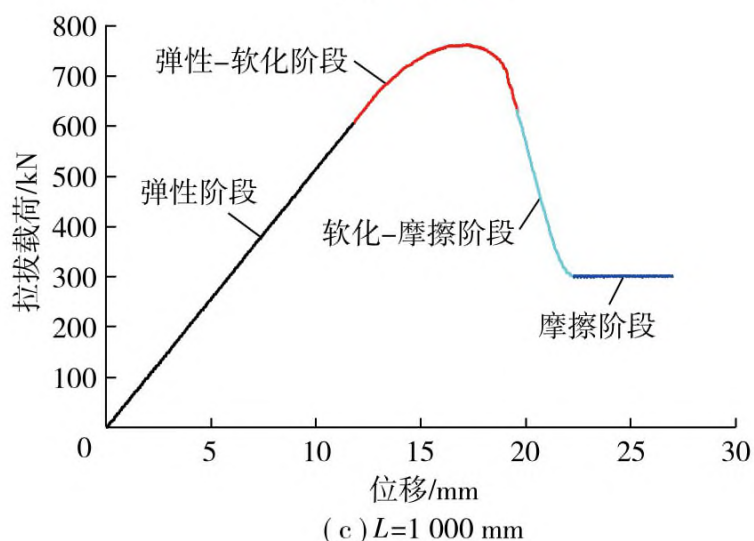
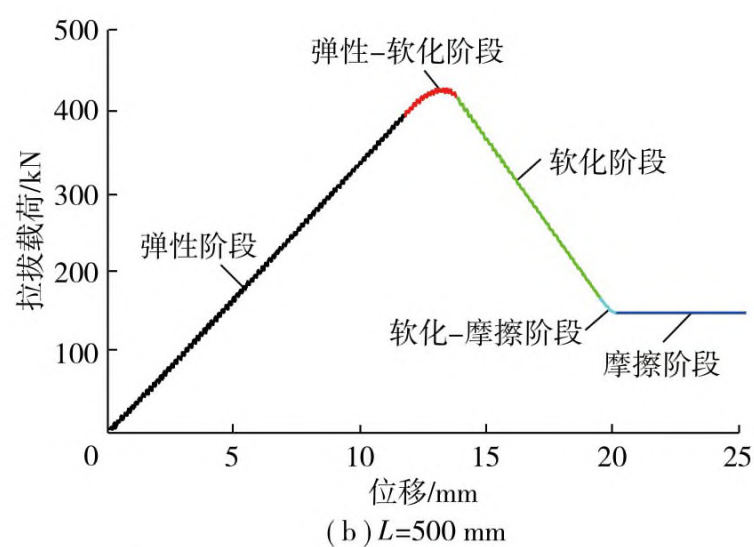
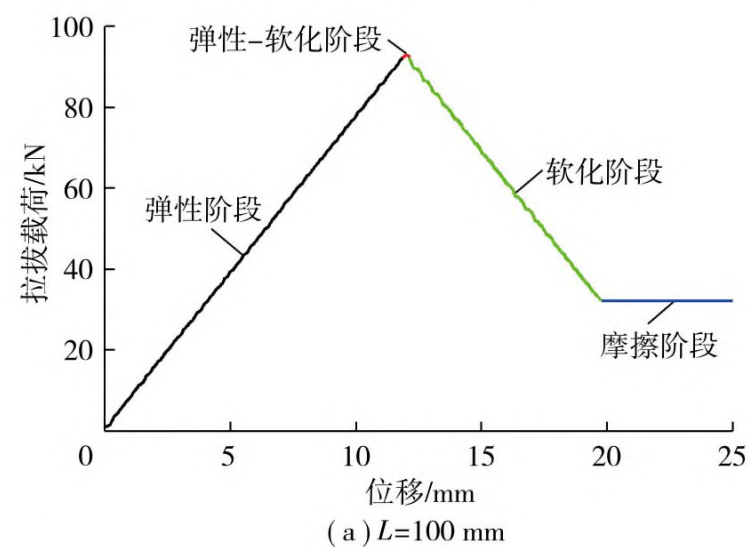


图6 不同黏结长度锚杆拉拔载荷-位移曲线特征

Fig. 6 Pull-out load-displacement characteristic of bolt with different bond lengths

出现在弹性-软化阶段,而锚杆黏结长度为2 000 mm时,锚杆峰值拉拔载荷出现在弹性-软化-摩擦阶段。说明增大锚杆黏结长度有利于锚杆承载性能的充分发挥。在根据真实锚杆拉拔载荷-位移曲线确定锚固界面黏结强度参数时要充分考虑锚杆黏结长度的影响。

2.1.2 锚杆拉拔峰值载荷与位移关系特征

图7为不同黏结长度锚杆的峰值拉拔载荷特征。由图7可知,随着锚杆黏结长度的增大,峰值拉拔载荷呈现出2种增长趋势:当锚杆黏结长度小于1 250 mm时,峰值拉拔载荷随黏结长度的增大而快速增加;当黏结长度大于1 250 mm时,峰值拉拔载荷的增加趋势变缓,且随黏结长度的增大而稳定增加。为了更好地解释锚杆黏结长度对峰值拉拔载荷的影响,对不同黏结长度锚杆峰值拉拔载荷所对应的锚固界面状态特征进行了分析,如图8所示。当锚杆黏结长度小于1 250 mm时,随着黏结长度的增大,峰值拉拔载荷所对应的锚固界面弹性段长度和软化段长度均增大,并且弹性段长度的增幅明显大于软化段,因此峰值拉拔载荷呈快速增长趋势。当锚杆黏结长度大于1 250 mm时,随着黏结长度的增大,峰值拉拔载荷所对应的弹性段和软化段长度基本保持不变,而增加的只有摩擦段长度,因此峰值拉拔载荷呈稳定增长趋势。

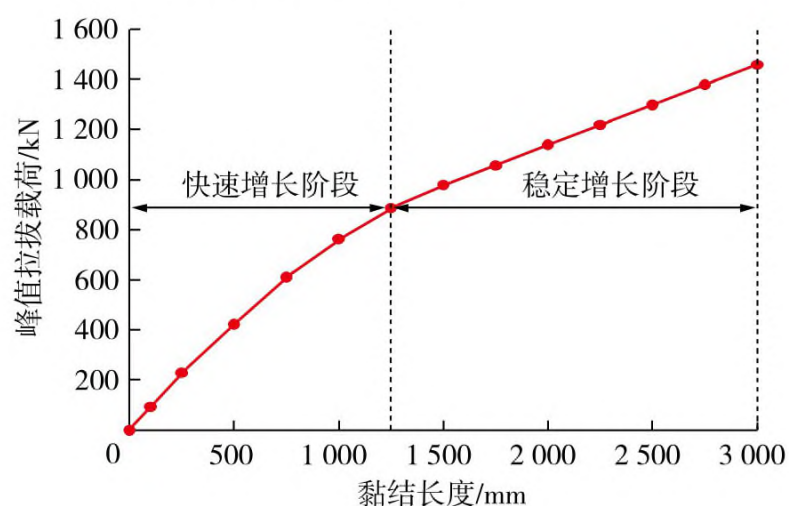


图7 不同黏结长度锚杆峰值拉拔载荷特征
Fig. 7 Peak pull-out load characteristics of bolt with different bond lengths

图9为不同黏结长度锚杆峰值拉拔载荷对应的位移特征。由图9可知,随着锚杆黏结长度的增大,峰值拉拔载荷对应的位移逐渐增大,表明锚杆黏结长度的增大能够提高锚杆抵抗失效的能力,增强锚杆支护的耐久性。

2.1.3 锚杆拉拔软化载荷与摩擦载荷特征

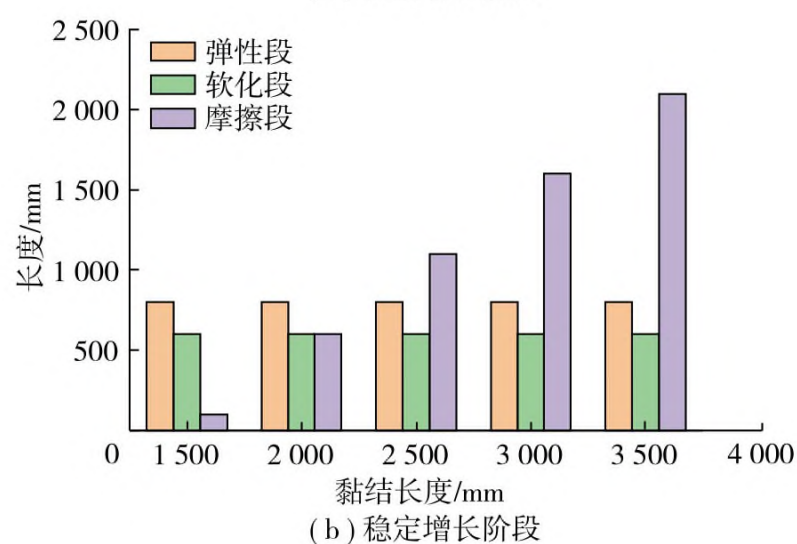
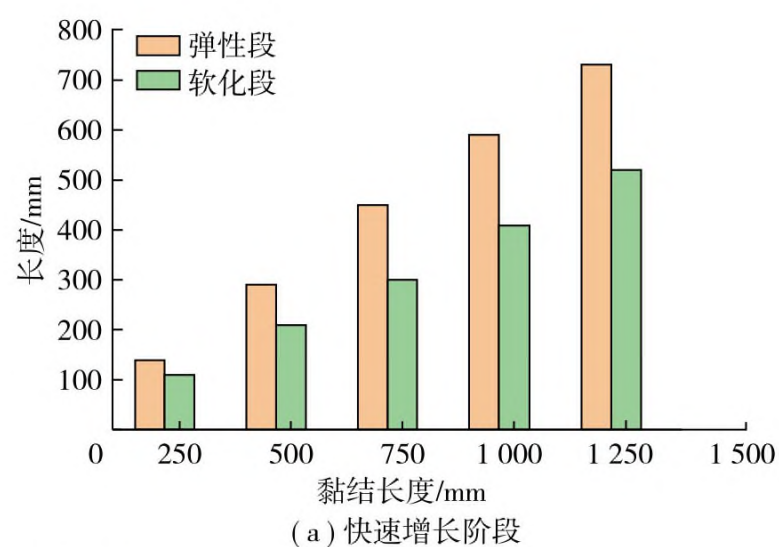


图8 锚杆峰值拉拔载荷对应的锚固界面状态特征
Fig. 8 Characteristics of the anchoring interface state corresponding to the peak pull-out load of bolt

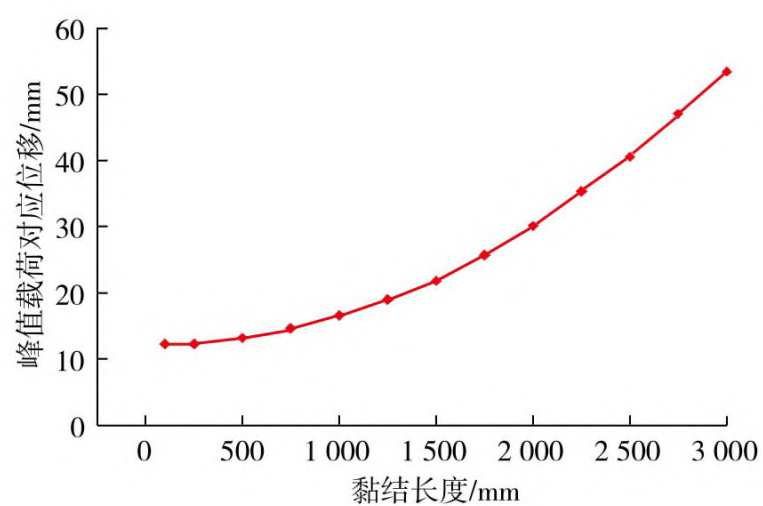


图9 锚杆峰值拉拔载荷对应的位移特征
Fig. 9 Displacement characteristics corresponding to peak pull-out load of bolt

图10为不同黏结长度锚杆的软化载荷和摩擦载荷特征。由图10可知:① 随着锚杆黏结长度的增大,锚杆软化载荷逐渐增大。当锚杆黏结长度超过2 000 mm时,锚杆软化载荷不再随黏结长度的增大而增大,且基本保持不变;② 随着锚杆黏结长度的增大,锚杆摩擦载荷呈快速增长-稳定增长-慢速增长-保持稳定的变化趋势。锚杆摩擦载荷同样在黏结长度超过2 000 mm后基本保持不变。因此,增大锚杆黏结长度能够提高锚杆承载能力,充分激发

锚杆的承载潜能,但当锚杆黏结长度增大到一定值后,继续增大锚杆黏结长度对锚杆的承载性能影响不再明显,即锚杆支护存在临界黏结长度。对于本研究中所选用的锚固界面黏结强度参数,在考虑锚杆支护承载能力以及支护性能充分发挥的前提下,锚杆的临界黏结长度约为2 000 mm。

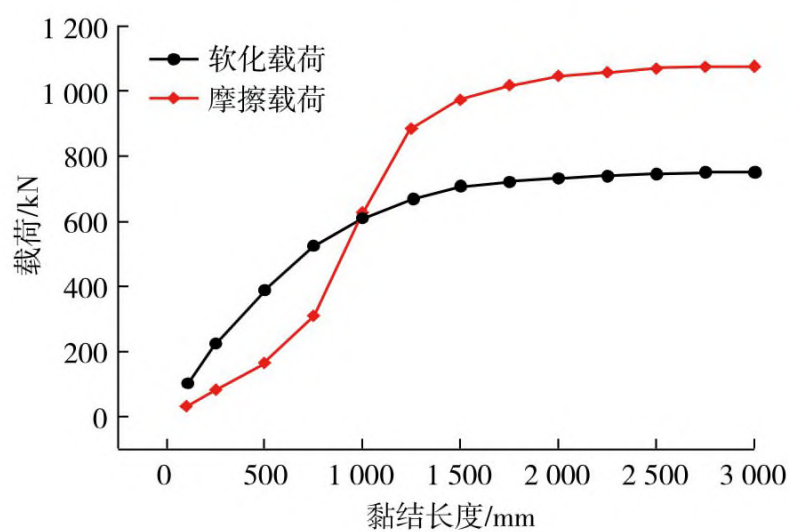
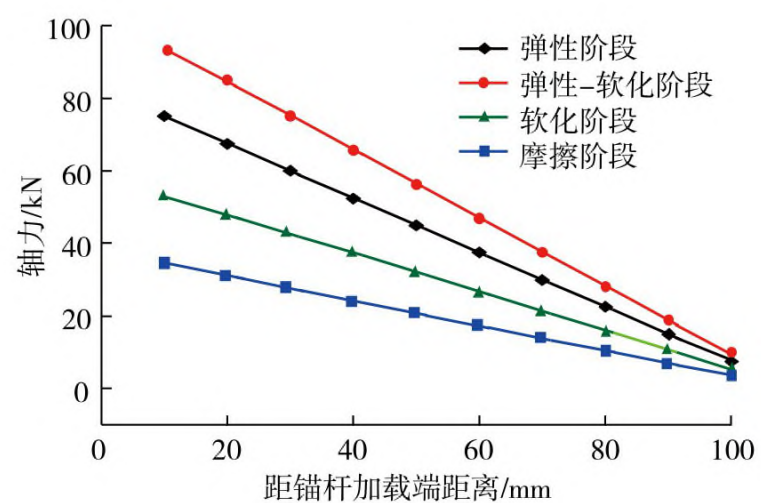


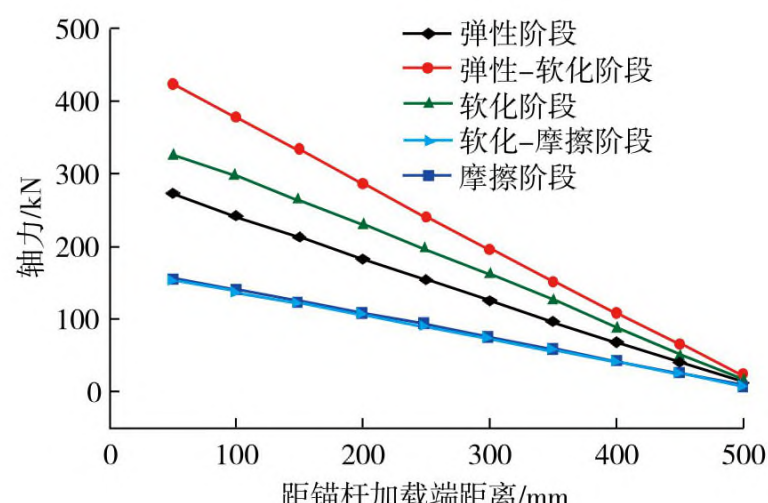
图10 不同黏结长度锚杆软化载荷与摩擦载荷特征
Fig. 10 Characteristics of softening load and friction load of bolt with different bond lengths

2.2 不同黏结长度锚杆轴力分布特征

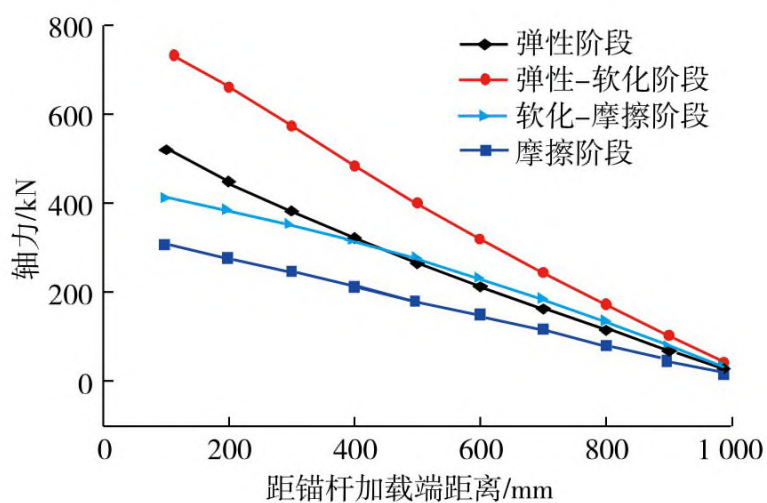
根据锚杆拉拔载荷-位移曲线的发展过程,图11为黏结长度为100, 500, 1 000和2 000 mm的锚杆轴力分布特征。由图11可知:①拉拔载荷作用下不



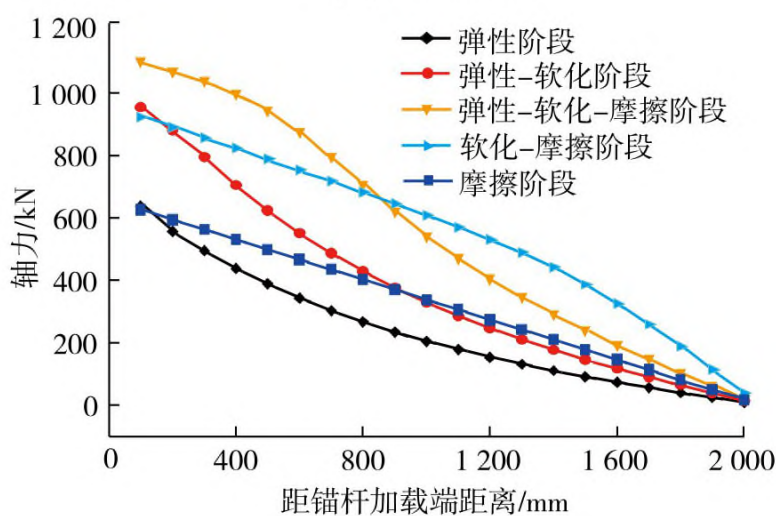
(a) $L=100$ mm



(b) $L=500$ mm



(c) $L=1000$ mm



(d) $L=2000$ mm

图11 不同黏结长度锚杆轴力分布特征

Fig. 11 Axial force distribution characteristics of bolt with different bond lengths

同黏结长度锚杆的轴力分布特征基本相似,锚杆轴力沿锚杆长度方向呈减小趋势,锚杆加载端轴力最大,自由端轴力最小;②随着锚杆黏结长度的增加,锚杆轴力的变化趋势逐渐由线性降低转为非线性降低。锚杆黏结长度为100, 500 mm时,锚杆轴力沿锚杆长度方向线性降低。黏结长度分别为1 000, 2 000 mm时,锚杆轴力沿锚杆长度方向非线性降低的趋势逐渐明显。这是由于锚杆黏结长度增加导致锚杆剪应力分布不均匀性增加的缘故;③随着锚杆黏结长度的增大,锚杆加载端的轴力逐渐增大,并且锚杆轴力的作用范围也增大,说明增大锚杆黏结长度有利于提高锚杆的承载能力,增强锚杆的支护效果。

2.3 不同黏结长度锚杆剪应力分布特征

图12为黏结长度为100, 500, 1 000和2 000 mm的锚杆剪应力分布特征。由图12可知:①锚杆黏结长度为100 mm时,锚杆剪应力呈均匀分布,这验证了采用短封装锚固体拉拔试验获得锚固界面黏结强度参数的合理性。随着锚杆黏结长度的增大,锚杆剪应力分布的不均匀性逐渐增加。因此,在锚杆支护设计过程中要充分考虑锚杆剪应力的不均匀分布特征,以避免高估锚杆的承载能力而给工程带

来安全隐患;②拉拔过程中,峰值剪应力总是最先出现在锚杆加载端附近,并随着拉拔位移的增加逐渐向锚杆自由端转移。这说明锚固界面的失效是由锚杆加载端开始,并逐渐向锚杆自由端发展的过程,表现出渐进失效的特征;③随着锚杆黏结长度

的增大,锚杆自由端锚固界面剪应力的变化幅度增大,锚杆对拉拔载荷的响应范围也增大,因此锚杆的承载能力增加。这是由于增加的锚杆黏结长度同样起到锚固作用,并会在拉拔载荷的作用下逐渐发挥其承载能力。

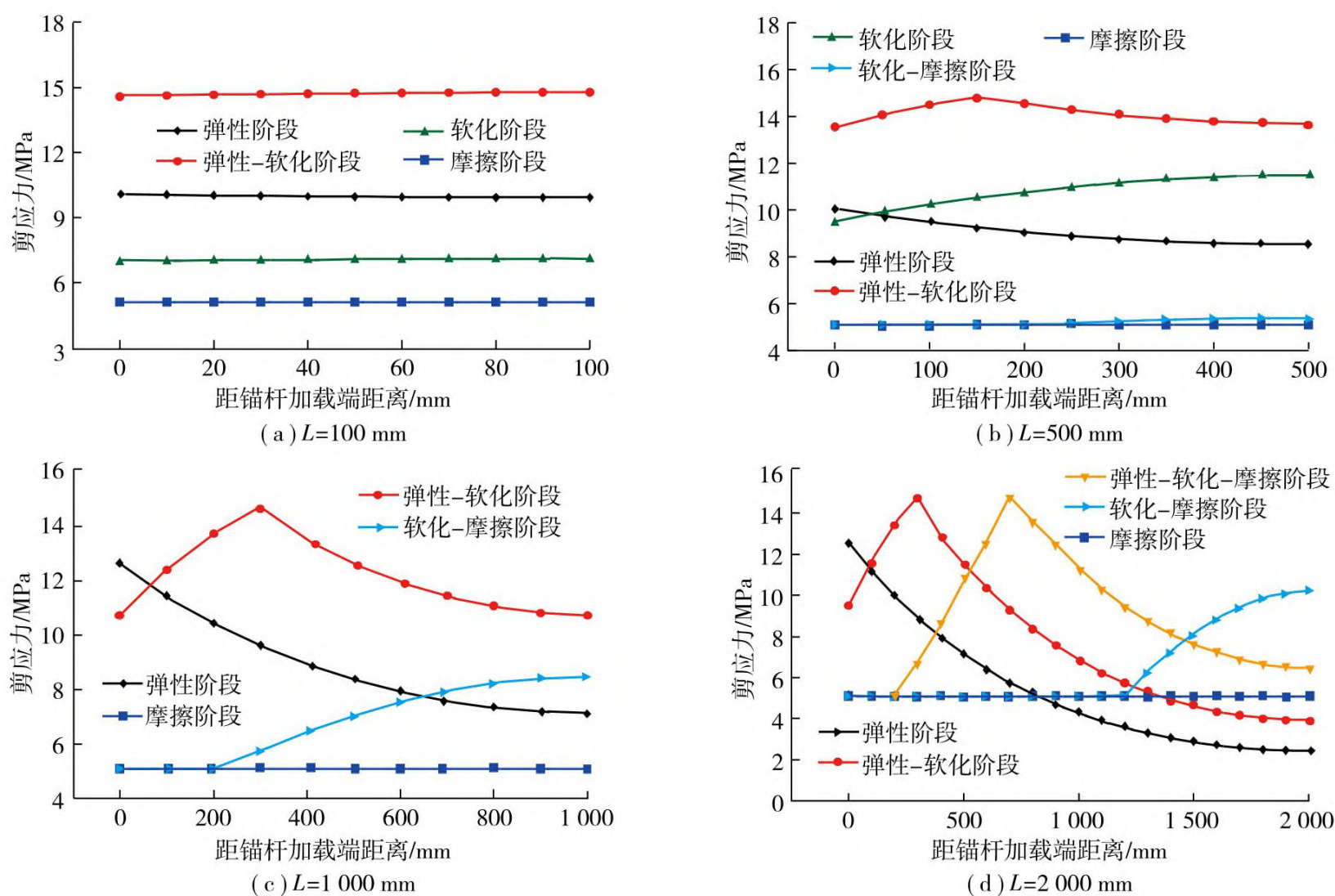


图12 不同黏结长度锚杆剪应力分布特征

Fig. 12 Shear stress distribution characteristics of bolt with different bond lengths

3 结 论

(1) 黏结长度会显著影响锚杆拉拔载荷-位移曲线形态。随着黏结长度的增大,拉拔载荷-位移曲线逐渐呈现明显的缓慢增长区,且峰后拉拔载荷的下降趋势逐渐由平缓变得陡峭。

(2) 随着锚杆黏结长度的增加,锚杆拉拔承载过程发生明显变化。黏结长度增大能充分发挥锚杆承载性能。黏结长度较小时,峰值拉拔载荷出现在弹性-软化阶段。随着黏结长度的增加,峰值拉拔载荷会出现在弹性-软化-摩擦阶段。

(3) 黏结长度增加能提高锚杆的承载性能,增强锚杆抵抗失效的能力。随着黏结长度的增加,锚杆峰值拉拔载荷及对应位移均增大,锚杆软化载荷和摩擦载荷先逐渐增大后保持不变。锚杆存在临界黏结长度。

(4) 拉拔载荷作用下,锚杆轴力沿锚杆长度方

向逐渐降低,峰值剪应力最先出现在锚杆加载端,并逐渐向锚杆自由端移动。随着黏结长度的增加,锚杆轴力和剪应力的作用范围增大,锚杆轴力的变化趋势逐渐由线性降低变为非线性降低,锚杆剪应力分布的不均匀性逐渐增加。

本次研究采用数值模拟的方法探究了锚杆黏结长度对其承载性能的影响,研究结果能为锚杆支护设计提供一定的有益参考。后续作者将结合该研究结果采用试验的方法进一步分析和验证。

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] 康红普,王金华,林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649-664.

- KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4):649-664.
- [3] AGHCHAI M H, MAAREFVAND P, RAD H S. Analytically determining bond shear strength of fully grouted rock bolt based on pullout test results[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2020, 64(1):212-222.
- [4] 康红普,王金华,等. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2007.
- [5] 杨双锁,曹建平. 锚杆受力演变机理及其与合理锚固长度的相关性[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(1):5-11.
YANG Shuangsoo, CAO Jianping. Evolution mechanism of anchoring stress and its correlation with anchoring length[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1):5-11.
- [6] 龙照,赵明华,张恩祥,等. 锚杆临界锚固长度简化计算方法[J]. 岩土力学,2010,31(9):2991-2994.
LONG Zhao, ZHAO Minghua, ZHANG Enxiang, et al. A simplified method for calculating critical anchorage length of bolt[J]. Rock and Soil Mechanism, 2010, 31(9):2991-2994.
- [7] 李怀珍,李学华. 基于界面滑移脱黏的锚杆合理锚固长度研究[J]. 岩土力学,2017,38(11):3106-3112.
LI Huaizhen, LI Xuehua. Determination of rational anchorage length of bolt based on slip-debonding failure mode of interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11):3106-3112.
- [8] 黄明华,赵明华,陈昌富. 锚固长度对锚杆受力影响分析及其临界值计算[J]. 岩土力学,2018,39(11):4033-4041.
HUANG Minghua, ZHAO Minghua, CHEN Changfu. Influence of anchorage length on stress in bolt and its critical value calculation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11):4033-4041.
- [9] 王洪涛,王琦,王富奇,等. 不同锚固长度下巷道锚杆力学效应分析及应用[J]. 煤炭学报,2015,40(3):509-515.
WANG Hongtao, WANG Qi, WANG Fuqi, et al. Mechanical effect analysis of bolts in roadway under different anchoring lengths and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3):509-515.
- [10] 周辉,徐荣超,张传庆,等. 预应力锚杆内锚固段长度效应研究[J]. 岩土力学,2015,36(9):2688-2694.
ZHOU Hui, XU Rongchao, ZHANG Chuanqing, et al. Research on effect of interior bonding section length of prestressed anchor rod[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9):2688-2694.
- [11] LI C C, KRISTJANSSON G, HØIEN A H. Critical embedment length and bond strength of fully encapsulated rebar rockbolts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 59:16-23.
- [12] 肖同强,李化敏,李海洋,等. 不同锚固长度下锚杆拉拔特性研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(6):1075-1080.
- XIAO Tongqiang, LI Huamin, LI Haiyang, et al. Pull-out properties of bolt with different anchorage length[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6):1075-1080.
- [13] 姚强岭,王伟男,孟国胜,等. 树脂锚杆不同锚固长度锚固段受力特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2019,36(4):643-649.
YAO Qiangling, WANG Weinan, MENG Guosheng, et al. Experimental study on mechanical characteristics of resin bolt anchorage section with different anchorage lengths[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(4):643-649.
- [14] DU Y L, FENG G R, KANG H P, et al. Investigation on the mechanical behavior and failure characteristics of fully grouted bolts under tension[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020:1-15.
- [15] MA S Q, ZHU X, QIN W W, et al. Determination of the bond-slip relationship of fully grouted rockbolts[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(9):326.
- [16] 刘波,李东阳,段艳芳,等. 锚杆-砂浆界面黏结滑移关系的试验研究与破坏过程解析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2790-2797.
LIU Bo, LI Dongyang, DUAN Yanfang, et al. Experimental study of bond-slip relationship between bolt and mortar and theoretical solution to failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1):2790-2797.
- [17] 郭锐剑,谌文武,段建,等. 考虑界面软化特性的土层锚杆拉拔受力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(10):4003-4009.
GUO Ruijian, CHEN Wenwu, DUAN Jian, et al. Pullout mechanical analysis of soil anchor based on softening behavior of interface[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(10):4003-4009.
- [18] 雒亿平,史盛,言志信. 抗拔荷载作用下锚固体与岩土体界面剪切作用[J]. 煤炭学报,2015,40(1):58-64.
LUO Yiping, SHI Sheng, YAN Zhixin. Shear interaction of anchorage body and rock and soil interface under the action of uplift load[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1):58-64.
- [19] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D (Version 5.0) users manual[R]. USA:ITASCA Consulting Group Inc., 2012.
- [20] 王晓卿,康红普,赵科,等. 黏结刚度对预应力锚杆支护效用的数值研究[J]. 煤炭学报,2016,41(12):2999-3007.
WANG Xiaoqing, KANG Hongpu, ZHAO Ke, et al. Numerical analysis of bonding stiffness for support effectiveness of pre-stressed bolts[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12):2999-3007.