

陈见行,代鑫.全长锚固锚杆支护破断行为数值计算[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(1):8-14. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.002

CHEN J H, DAI X. Numerical Study on the Rupture Behaviour of Fully Grouted Rock Bolts [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(1):8-14. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.002

全长锚固锚杆支护破断行为数值计算

陈见行^{1,2*}, 代鑫¹

(1.煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室,北京 100013;2.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083)

摘要:数值计算广泛应用于锚杆支护力学性能研究中,其中三维有限差分软件 FLAC^{3D} 含有能够模拟支护的结构单元,常用于巷道支护的模拟研究中.但该软件中锚结构单元没有考虑杆体破断行为,模拟效果与实际情况有较大出入.因此本文采用桩结构单元模拟锚杆,首先对比锚结构单元和桩结构单元力学特点,发现桩结构单元能够模拟杆体破断行为,且模拟结果与物理试验结果一致;随后研究拉伸破断应变对锚杆支护性能的影响,发现无围压和有围压条件下拉伸破断应变增加,导致锚杆破断时对应拉拔位移增加,并通过线性拟合得到两者间关系式.此外,杆体破断前锚杆轴力从拉拔端向自由端逐渐递减,杆体破断后锚杆轴力迅速下降至零附近.

关键词:锚杆支护;拉拔模拟;破断行为;拉伸破断应变

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)01-0008-07

Numerical Study on the Rupture Behaviour of Fully Grouted Rock Bolts

CHEN Jianhang^{1,2}, DAI Xin¹

(1. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Numerical calculation is widely used in studying the mechanical performance of rock bolting. Among them, the three-dimensional finite difference software FLAC^{3D} has the structure elements that can simulate the rock reinforcement. Therefore, it is widely used in numerical investigation of the roadway support. However, in this program, the cable element neglects the rupture behaviour of bolts. This leads to the significant difference between simulation and physical test results. Therefore, this paper uses the pile elements to simulate rock bolts. First, the mechanical performance between cable and pile elements is compared. It is found that the pile elements can simulate the bolt rupture behaviour. Moreover, there is a close match between simulation and physical test results. Then, the influence of the tensile failure strain on the bolting performance is studied. It shows that no matter whether the confinement is applied or not, the pullout displacement where rupture occurs, increases with the tensile failure strain. Linear regression is conducted to acquire the relationship between them. Additionally, before rupture, the axial load in the bolt decreases gradually from the loaded end to free end. However, after rupture, the axial load in the bolt decreases rapidly to around zero.

Keywords: rock bolting; pull-out simulation; rupture behaviour; tensile failure strain

收稿日期:2020-12-20

基金项目:煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室开放基金资助项目(SKLIS202422);国家自然科学基金资助项目(52034009;52174093)

*通信作者, E-mail: jianhang.chen@cumtb.edu.cn

锚杆支护是煤矿巷道和硐室围岩加固的一种常用方式,实际应用中常采用树脂或水泥砂浆锚固剂将杆体与周围煤岩体进行黏结^[1].基于黏结长度可以将锚杆支护分为端头锚固、加长锚固和全长锚固^[2].本文主要研究全长锚固锚杆力学传递性能.众多研究方法中^[3-4],美国 Itasca 公司开发的 FLAC^{3D} 软件具有计算速度快且含有能够模拟岩体加固的结构单元等特点,广泛应用于巷道支护和锚杆力学传递性能研究.

FLAC^{3D} 软件内的锚结构单元将杆体与锚固剂接触行为处理成弹簧-滑块系统以模拟锚杆支护系统.LI 等^[5]研究了锚固剂内聚力对锚杆承载性能的影响,并基于现场拉拔试验提出一种确定锚固剂内聚力的新方法;NEMCIK 等^[6]分析了锚杆与锚固剂接触面上黏结应力分布规律,发现锚杆受载过程中黏结应力峰值从加载端向自由端逐渐传播;MA 等^[7]利用结构单元模拟锚杆支护对巷道稳定性的影响,发现使用结构单元后巷道收敛值有所减少;MA 等^[8]研究了锚杆支护中自由端滑移对锚杆支护性能的影响;刘少虹^[9]研究了爆破震动作用下锚杆轴力损失问题,发现动载荷作用下锚杆轴力依次经历平稳、下降和平稳 3 个阶段;付世雄等^[10]研究了锚固长度对锚杆最大承载力的影响,发现随锚固长度增加锚杆最大承载力逐渐增大;刘建伟等^[11]研究了深井高应力条件下锚杆支护蠕变效应,发现锚杆轴力依次经历增阻阶段和平衡阶段;杜学领^[12]研究了构件数量对锚杆承载性能的影响,发现构件数量改变时锚杆最大承载力也发生变化并建议数值模拟中构件长度应与网格长度一致;MOHAMED 等^[13]模拟了煤柱中锚杆的轴向力学性能,发现锚杆承载性能随煤柱强度增加而增大.

锚结构单元达到最大支护阻力后,支护阻力保持不变,忽略了杆体破断行为,与工程实际不符^[14-17].因此,如果使用锚结构单元对锚杆支护进行正确模拟需要对其进行修正^[18-20].

除锚结构单元外,Itasca 公司开发了桩结构单元并设置了破断行为,但采用桩结构单元模拟锚杆支护方面的研究相对较少.因此本文采用桩结构单元模拟锚杆支护并研究拉伸破断应变对锚杆破断行为的影响,为揭示锚杆支护中杆体破断行为提供参考.

1 建立计算模型

轴向拉拔试验是锚杆承载性能研究中常采用的手段^[21].因此利用 FLAC^{3D} 构建锚杆拉拔数值计算模型,如图 1 所示,其长、宽、高分别为 1.0,0.4,0.4 m.

该模型沿 X 轴、 Y 轴、 Z 轴方向划分单元体数目分别为 30,10,10,并由 3 000 个单元体和 3 751 个节点组成.网格本构方程为摩尔-库伦模型.在网格中部且平行于网格长边设置长度为 1.1 m 的桩结构单元,由 22 个构件和 23 个节点组成.对网格内部 1.0 m 的范围进行锚固,露出网格 0.1 m 的范围为自由段,该结构单元内部的材料参数如表 1 所示.

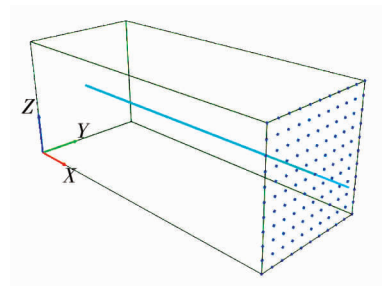


图 1 锚杆拉拔数值计算模型

表 1 结构单元内部的材料参数

参数	数值
杨氏模量/GPa	210
泊松比	0.25
拉伸破断应变	1e-4
抗拉极限/kN	150
横截面积/m ²	6.16e-4
锚杆周长/m	8.8e-2
极惯性矩/m ⁴	6.03e-8
二次惯性矩/m ⁴	3.02e-8
锚固剂剪切刚度/(N/m/m)	1.2e8
锚固剂内聚力/(kN/m)	200
锚固剂内摩擦角/(°)	35

在网格前端设置滚筒支撑边界条件,约束网格前端沿 x 轴方向的位移.同时在锚杆最外端设置大小为 1×10^{-7} m/s 的拉拔速度.计算开始后,记录锚杆拉拔端轴力和位移并利用该力与位移曲线反映锚杆承载性能.

2 桩和锚结构单元性能对比

对该模型采用时间步方式加载,计算结束后得到锚杆拉拔力和位移曲线.为了对比桩结构单元和锚结构单元工作性能,采用相同方法对锚结构单元进行拉拔模拟,对比结果如图 2 所示.结果表明:使用桩结构单元和锚结构单元模拟锚杆时,两者力学行为在达到抗拉极限前几乎一致;但两者力学行为在达到抗拉极限后显著不同.使用桩结构单元时,锚杆承载性能在达到抗拉极限后迅速下降至零,表示锚杆发生破断并失去承载能力.VLACHOPOULOS 等^[22]对锚固长度为 879 mm 的锚杆进行了室内拉拔试验,发现随拉拔位移增加锚杆支护阻力逐渐达到抗拉极限.此时杆体断裂且锚杆承载能力迅速消失.这表明桩结构单元模拟锚杆承载性能效果与物理试验结果较为符合,能够反映锚杆破断行为.但锚结构单元模拟锚杆时,锚杆达到抗拉极限后支护阻力保持不变,与实际情况明显不符.因此选用桩结构单元模拟锚杆能更好地反映锚杆工作性能.

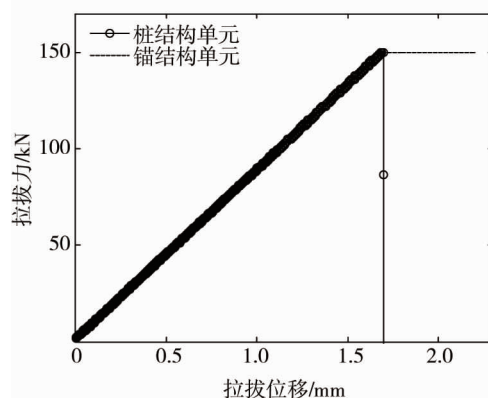


图2 桩结构单元和锚结构单元工作性能对比

3 桩结构单元支护性能分析

3.1 拉伸破断应变影响作用

为了研究桩结构单元工作性能,对其继续进行拉拔模拟试验.首先研究拉伸破断应变对锚杆承载性能的影响.桩结构单元中,杆件破断行为主要受拉伸破断应变的影响,因此,仍然采用图 1 中模型和表 1 中参数进行模拟,并将结构单元拉伸破断应变分别设置为 1×10^{-4} 、 3×10^{-3} 和 5×10^{-3} ,计算结果如图 3 所示.结果表明:拉伸破断应变对锚杆达到抗拉极限前的行为没有影响,但对锚杆达到抗拉极限后的破断行为有明显影响.当拉伸破断应变为 1×10^{-4} 时,锚杆达到抗拉极限后迅速发生破断且承载力下降至 0.当拉伸破断应变增大至 3×10^{-3} 时,锚杆达到抗拉极限后支护阻力保持不变并持续一段时间.待拉拔位移增大至 1.85 mm 时锚杆发生破断且支护阻力迅速下降.当拉伸破断应变增大至 5×10^{-3} 时,锚杆达到抗拉极限后,支护阻力随拉拔位移增加继续保持不变.但拉拔位移增大至 1.95 mm 时,锚杆发生破断且支护阻力迅速下降.

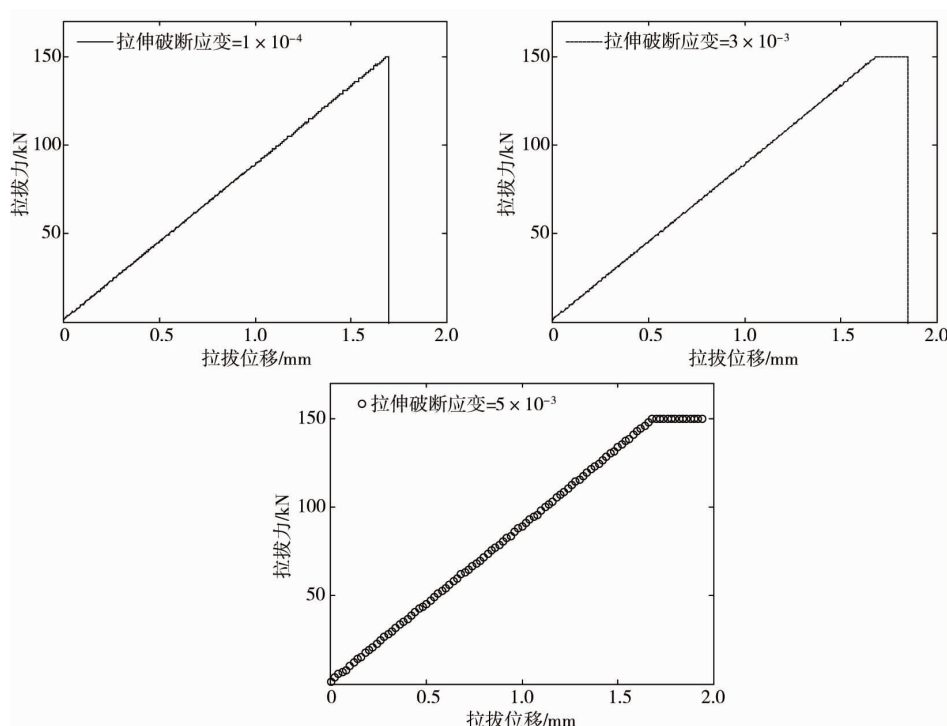


图3 拉伸破断应变对锚杆破断行为的影响

以上研究表明:拉伸破断应变对锚杆发生破断时对应拉拔位移有明显影响.当拉伸破断应变较小时,锚杆达到抗拉极限后立即发生破断;而当拉伸破断应变较大时,锚杆达到抗拉极限后会保持一段时间,待拉拔位移增加至一定数值后发生破断.

为进一步研究拉伸破断应变对锚杆破断行为的影响,进行多组拉拔模拟试验.设置拉伸破断应变变化为 $1 \times 10^{-4} \sim 7 \times 10^{-3}$,并记录锚杆发生破断时对应拉拔位移,如图 4 所示.

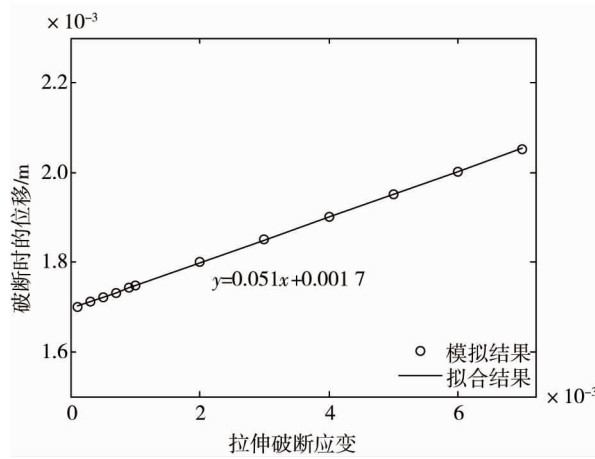


图 4 拉伸破断应变改变时锚杆发生破断时的位移

结果表明:随拉伸破断应变增加,锚杆发生破断时对应位移也在增加且两者基本呈线性关系.通过拟合得到锚杆破断时对应拉拔位移与拉伸破断应变间关系式为

$$y = 0.051x + 0.0017. \quad (1)$$

式中: y 为锚杆破断时拉拔位移; x 为锚杆拉伸破断应变.

查阅 FLAC^{3D}手册可知,桩结构单元受载后内部塑性拉伸应变可通过式(2)计算得到^[23].

$$\varepsilon_{pl} = \sum \varepsilon_{pl}^{ax} + \sum \frac{d}{2} \frac{\theta_{pl}}{L}. \quad (2)$$

式中: ε_{pl} 为总塑性拉伸应变; ε_{pl}^{ax} 为拉伸作用导致的塑性拉伸应变; d 为锚杆直径; θ_{pl} 为构件平均转角; L 为构件长度.

本文不考虑侧向荷载对锚杆的剪切作用,因此加载过程中锚杆没有发生弯曲,构件转角为 0 ($\theta_{pl} = 0$).将其代入式(2)中可以得到式(3).

$$\varepsilon_{pl} = \sum \varepsilon_{pl}^{ax}. \quad (3)$$

因此,本文中锚杆总塑性拉伸应变均由轴向加载作用产生.加载时软件自动记录结构单元节点上塑性拉伸应变,并通过式(3)计算得到锚杆总塑性拉伸应变.当其超过用户设定的拉伸破断应变时锚杆发生断裂,承载力迅速下降至 0.

以拉伸破断应变为 1×10^{-4} 时的计算模型为例,提取锚杆破断前后杆体内部轴力并作出锚杆轴力分布曲线,如图 5 所示.锚杆破断前靠近拉拔端位置处锚杆轴力最大;靠近非拉拔端位置处锚杆轴力最小且几乎为 0.在锚固范围以外的自由段,锚杆轴力相等.进入锚固段后,随锚固深度增加锚杆轴力逐渐递减.模拟结果与姚强岭等^[24]在室内试验中发现的规律基本一致,验证了模拟结果的有效性.锚杆发生破断后,拉拔端和杆体内部轴力基本降至 0 附近.该结果显示锚杆破断后杆体轴力迅速消失.

3.2 抗拉极限影响作用

随后研究抗拉极限对锚杆承载性能的影响.设置锚杆

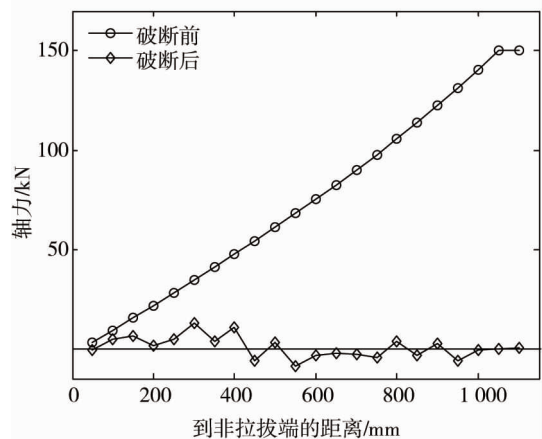


图 5 锚杆破断前后内部轴力分布曲线

拉伸破断应变为 1×10^{-4} , 其它参数与表 1 中参数相同, 进行 4 次拉拔模拟试验, 模拟过程中设定锚杆抗拉极限分别为 50, 100, 150, 200 kN, 得到锚杆承载力和位移曲线, 如图 6 所示. 结果表明: 随着抗拉极限增加, 锚杆支护性能明显增加. 但由于设置了拉伸破断应变, 锚杆支护阻力达到抗拉极限后杆体均发生破断, 锚杆承载力迅速下降至 0.

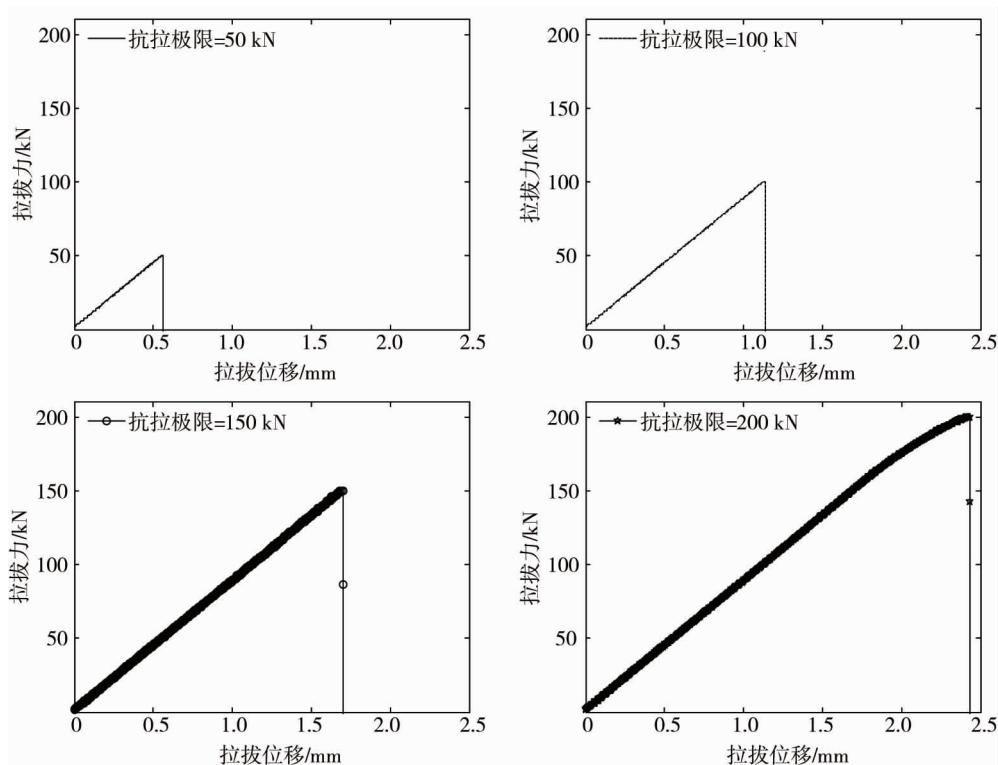


图 6 抗拉极限对锚杆承载性能的影响

4 摩擦作用时桩结构单元支护效果

以上研究中桩结构单元虽然设置了锚固剂摩擦角, 但网格周围并没有应力约束, 导致网格内部没有初始应力, 因此锚固剂摩擦角不能发挥作用, 锚杆承载力仅由锚固剂内聚力提供. 实际环境中, 锚杆承载力由锚固剂内聚力和摩擦力共同提供^[25]. 因此本节模拟时在网格周围施加大小为 2 MPa 的压应力, 如图 7 所示, 并自动求解至网格内产生均匀压应力.

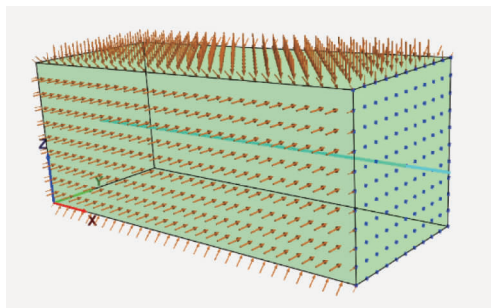


图 7 在网格周围施加压应力以模拟围压作用下锚杆支护效果

桩结构单元材料参数与表 1 相同, 但设定锚杆抗拉极限为 240 kN. 此时对锚杆进行拉拔直至杆体破断. 进行 3 次拉拔模拟并将锚杆拉伸破断应变分别设置为 1×10^{-4} , 3×10^{-3} , 5×10^{-3} , 计算结果如图 8 所示.

围压作用下锚杆支护阻力由锚固剂内聚力和摩擦力共同提供, 锚杆支护性能明显提高. 当拉伸破断应变为 1×10^{-4} 时, 锚杆支护阻力达到抗拉极限后瞬间发生破断; 拉伸破断应变增加至 5×10^{-3} 时, 锚杆支护阻力达到抗拉极限后保持不变, 待拉拔位移增大至 2.97 mm 时锚杆发生破断且杆体承载力迅速下降. 这表明

有围压条件下拉伸破断应变对锚杆破断行为的影响规律,与无围压条件下的规律基本一致,即随拉伸破断应变增加锚杆发生破断时对应拉拔位移也增加。

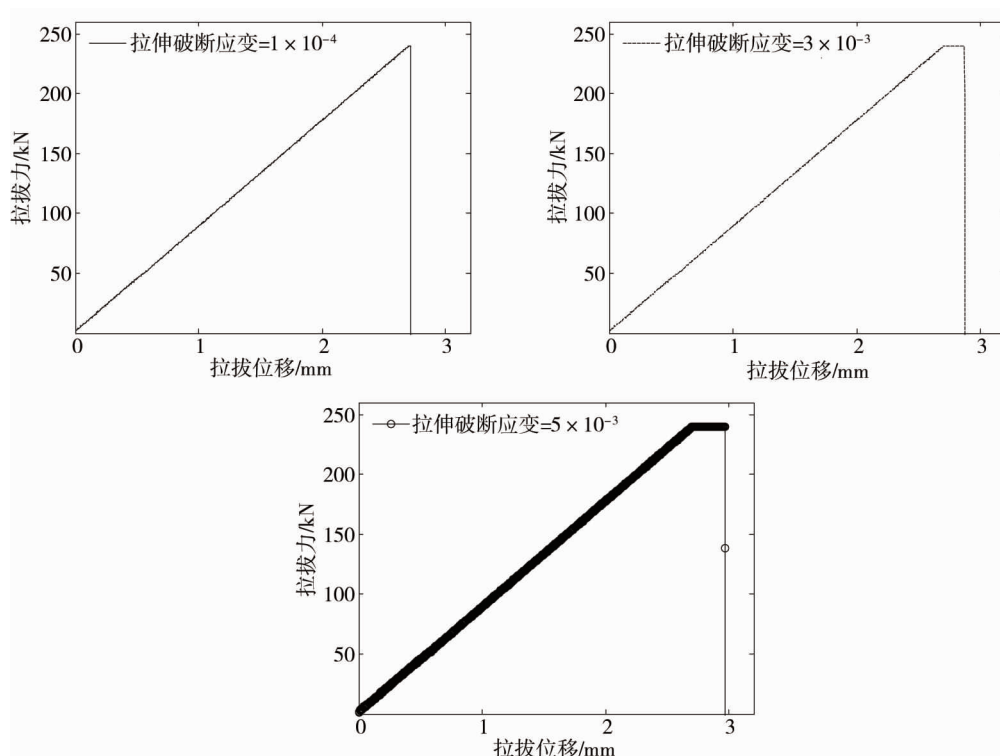


图8 摩擦作用下锚杆承载性能曲线

5 结论

1) 锚结构单元达到抗拉极限后不发生破断,与实际不符;桩结构单元达到抗拉极限和拉伸破断应变后杆体发生断裂,支护阻力迅速消失,与物理试验结果较为一致。

2) 当拉伸破断应变较小时,锚杆支护阻力达到抗拉极限后迅速发生破断;但当拉伸破断应变较大时,锚杆支护阻力达到抗拉极限后保持不变,待拉拔位移增加到一定数值后杆体发生断裂,支护阻力迅速下降至0。

3) 锚杆破断时对应拉拔位移与拉伸破断应变基本呈线性关系。随拉伸破断应变增大,杆体发生断裂时对应拉拔位移也线性增加。

4) 锚杆破断前杆体内部轴力从拉拔端向非拉拔端逐渐递减,模拟结果与物理试验结果一致。但锚杆破断后杆体内部轴力迅速消失。

5) 抗拉极限对锚杆支护性能有明显影响。随抗拉极限增加锚杆支护性能显著增加。但支护阻力达到抗拉极限且杆体塑性应变达到杆体拉伸破断应变后杆体发生断裂。

参考文献:

- [1] 刘德军, 左建平, 刘海雁, 等. 我国煤矿巷道支理论及技术的现状与发展趋势[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(1): 22-33.
- [2] KANGH P. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 261-277.
- [3] CHENJ H, SAYDAM S, HAGAN P C. Numerical simulation of the pull-out behaviour of fully grouted cable bolts[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 1148-1158.
- [4] 王伸, 李化敏, 李东印, 等. 横肋对螺纹钢树脂锚杆荷载传递的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2805-2813.

- [5] LI B, QI T Y, WANG Z Z, et al. Back analysis of grouted rock bolt pullout strength parameters from field tests[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 28: 345–349.
- [6] NEMCIK J, MA S Q, AZIZ N, et al. Numerical modelling of failure propagation in fully grouted rock bolts subjected to tensile load[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 71: 293–300.
- [7] MA S Q, NEMCIK J, AZIZ N. Simulation of fully grouted rockbolts in underground roadways using FLAC^{2D}[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(8): 911–920.
- [8] MA S Q, NEMCIK J, AZIZ N, et al. Numerical modeling of fully grouted rockbolts reaching free-end slip[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2016, 16(1): 04015020.
- [9] 刘少虹. FLAC^{3D}中爆破震动下锚杆轴力损失的修正及应用[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(11): 2721–2733.
- [10] 付世雄, 邵志强, 岳炜. 基于锚杆拉拔的临界锚固长度测试研究[J]. *煤炭技术*, 2016, 35(11): 46–49.
- [11] 刘建伟, 王永佳, 宋选民, 等. 超千米深井锚杆支护煤巷蠕变规律数值模拟研究[J]. *矿业研究与开发*, 2017, 37(6): 14–17.
- [12] 杜学领. FLAC^{3D}中 Cable 数量对锚杆拉拔模拟试验结果的影响[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(7): 215–220.
- [13] MOHAMED K, RASHED G, RADAKOVIC-GUZINA Z. Loading characteristics of mechanical rib bolts determined through testing and numerical modeling[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(1): 17–24.
- [14] 刘金海, 孙广京, 谭文峰. 深埋巷道锚杆破断失效机理[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(2): 8–13.
- [15] FENGX W, ZHANG N, XUE F, et al. Practices, experience, and lessons learned based on field observations of support failures in some Chinese coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104097.
- [16] MA S Q, CHEN Y. Application of hydraulic fracturing and energy-absorption rockbolts to improve the stability of a gob-side roadway in a 10-m-thick coal seam: case study[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(12): 05017002.
- [17] WANG M, BAI J B, LI W F, et al. Failure mechanism and control of deep gob-side entry[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(11): 9117–9131.
- [18] 李为腾, 杨宁, 李廷春, 等. FLAC^{3D}中锚杆破断失效的实现及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(4): 753–767.
- [19] 杨宁, 李为腾, 玄超, 等. FLAC^{3D}可破断锚杆单元完善及深部煤巷应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(2): 251–258.
- [20] YAN S, SONG Y B, BAI J B, et al. A study on the failure of resin end-anchored rockbolts subjected to tensile load[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(6): 1917–1930.
- [21] YUS S, ZHU W C, NIU L L, et al. Experimental and numerical analysis of fully grouted long rockbolt load-transfer behavior[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 85: 56–66.
- [22] VLACHOPOULOS N, CRUZ D, FORBES B. Utilizing a novel fiber optic technology to capture the axial responses of fully grouted rock bolts[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(2): 222–235.
- [23] ITASC A. FLAC^{3D} Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions[M]. Minneapolis, America: Consulting Group Incorporation, 2016.
- [24] 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.
- [25] THOMPSON A G, VILLAESCUSA E, WINDSOR C R. Ground support terminology and classification: an update[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, 30(3): 553–580.