

DOI: 10.7672/sgjs2025110129

# GFRP 岩石锚钉锚固特性模型试验研究\*

孟宪伟<sup>1</sup>, 刘毅<sup>1</sup>, 孙涛<sup>2</sup>, 高雁丽<sup>2</sup>, 杨法凯<sup>2</sup>, 刘召亮<sup>3</sup>, 康子谦<sup>2</sup>, 杨俊杰<sup>4</sup>

(1. 青岛瑞源工程集团有限公司, 山东 青岛 266555; 2. 山东科技大学, 山东 青岛 266590;

3. 青岛第一市政工程有限公司, 山东 青岛 266001; 4. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

[摘要] 以矿山岩质边坡的锚钉为研究对象, 利用 C20 混凝土模拟岩质边坡环境, 通过拉拔试验研究端部扩大型 GFRP 锚杆的锚固破坏过程。试验结果表明, 端部扩大型锚杆的极限抗拔承载力为普通全长黏结型锚杆的 1.1~1.3 倍。全长黏结型锚杆荷载-位移曲线分为弹性阶段、塑性滑移变形阶段、破坏阶段和失效滑移阶段, 端部扩大型锚杆荷载-位移曲线在塑性滑移变形阶段和破坏阶段之间还存在端部承载阶段。端部扩大型锚杆锚筋-灌浆体界面的极限黏结强度较全长黏结型锚杆可提高 10%~30%, 灌浆体-岩体界面的极限黏结强度较全长黏结型锚杆可提高 5%~25%。直接击入式锚杆在荷载较小时会发生拔出破坏, 其锚杆锚筋-岩体界面黏结强度为全长黏结型锚杆的 0.07~0.13 倍, 为端部扩大型锚杆的 0.05~0.11 倍。

[关键词] 岩石; 锚钉; 拉拔试验; 锚固; 力学性能

[中图分类号] TU473

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0129-05

## Experimental Study on Anchorage Characteristics of GFRP Rock Anchors Using Model Tests

MENG Xianwei<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, SUN Tao<sup>2</sup>, GAO Yanli<sup>2</sup>, YANG Fakai<sup>2</sup>, LIU Zhaoliang<sup>3</sup>,  
KANG Ziqian<sup>2</sup>, YANG Junjie<sup>4</sup>

(1. Qingdao Ruiyuan Engineering Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266555, China;

2. Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Qingdao First Municipal Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266001, China;

4. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract:** Taking the anchor of mine rock slope as the research object, C20 concrete is used to simulate the environment of rock slope, and the anchorage failure process of end-expanded GFRP anchor is studied by pull-out test. The test results indicate that the ultimate uplift bearing capacity of the end-expanded anchor is 1.1~1.3 times that of the ordinary full-length bonded anchor. The load-displacement curve of the full-length bonded anchor can be divided into elastic stage, plastic slip deformation stage, failure stage and failure slip stage. The load-displacement curve of the end-expanded anchor also has an end resistance stage between the plastic slip deformation stage and the failure stage. The ultimate bond strength of the end-expanded anchor bar-grouting body interface can be increased by 10%~30% compared with the full-length bonding anchor. And the ultimate bond strength of the grouting body-rock mass interface can be increased by 5%~25% compared with the full-length bonding anchor. The pull-out failure of the direct-impact anchor occurs when the load is small. The bond strength of the anchor-rock interface is 0.07~0.13 times that of the full-length bonded anchor, and 0.05~0.11 times that of the end-expanded anchor.

**Keywords:** rock; anchor nails; pullout test; anchoring; mechanical properties

\* 国家自然科学基金面上项目(51779235); 山东省自然科学基金面上项目(ZR201808040034)

[作者简介] 孟宪伟, 高级工程师, E-mail: mxw63929637@163.com

[通信作者] 孙涛, 研究员, 博士, E-mail: suntao@sdust.edu.cn

[收稿日期] 2024-12-30

## 0 引言

矿产资源的开采带来巨大经济效益的同时, 也对当地生态环境造成了严重破坏, 露天采矿也产生

了大量的人工边坡<sup>[1-3]</sup>。抹面、喷射混凝土等传统的护坡方法对钢筋、混凝土等材料的需求量大,这类材料在生产过程中会造成大量碳排放,与我国节能环保的产业发政策背道而驰。

由于客土中的水分及肥料等容易造成钢筋锈蚀,本防护体系选用 GFRP 筋替代钢筋作为支护锚杆。并依据锚固长度将锚杆分为三类,分别为:①穿过边坡主滑面的全长黏结型锚杆(主锚);②控制边坡次滑裂面,辅助主锚提高边坡结构稳定性的全长黏结型锚杆(次锚);③解决坡面破坏以及客土稳定性问题的直接击入或全长黏结型锚杆(锚钉)。

边坡的锚杆支护主要依靠锚杆与黏结介质、黏结介质与周围岩体的机械摩擦力、黏结力等实现,当拉拔荷载超过界面层的黏结力后,界面层的滑移会导致整个锚固系统失效。提高锚固力的方式有增加黏结锚固长度、利用高强度黏结介质等,然而锚杆锚固长度存在临界值,依靠增大锚固段的长度提高抗拔力有限。因此,将锚杆优化为端部扩大型锚杆是提高锚杆抗拔力的有效途径。根据工程设计和岩土体性质,扩径锚杆有多种形式,比较常见的形式有端部扩大型和连续扩大型等。端部扩大型锚固技术是在锚固体钻孔过程中,在钻孔底部通过爆破、机械或高压水力进行扩大,以保证灌入浆液后形成扩大头。连续扩大型锚固技术钻孔原理与端部扩大型锚固技术相似,钻孔中扩大体称为扩孔段,扩孔段的个数可依据需要设定<sup>[4-11]</sup>。

本文基于端部圆锥形扩体型岩石锚杆锚固方式,利用 C20 混凝土模拟岩质边坡环境并开展试验研究。扩孔后灌入水泥浆并插入 GFRP 筋,研究扩体段深度及直径对锚杆极限承载力的影响,分析圆锥端部扩大型锚杆极限承载力的影响因素。通过与全长黏结型锚杆在相同锚固长度、相同灌浆体厚度条件下进行对比,验证该锚固方式的可行性。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

#### 1) GFRP 筋

GFRP 筋表面为全螺纹型,全螺纹型表面凸肋设计增加了与锚固体的接触面积,增大了咬合力,并且可用配套的锚盘和螺母进行外部锚固。GFRP 筋杆体直径 18mm,杆体抗拉强度 $\geq 550\text{MPa}$ ,杆体抗剪强度 $\geq 110\text{MPa}$ 。托盘面积  $140\text{mm}^2$ ,高 39mm、厚 10mm、孔径 28mm,托盘抗压强度 $\geq 80\text{kN}$ 。螺母内径 18mm,螺母长 $\geq 75\text{mm}$ ,螺母的保证荷载 $\geq 80\text{kN}$ 。

#### 2) 混凝土

由于本研究不提前在混凝土模具中预设孔位,

而是在混凝土养护 28d 后利用电锤在其上钻孔,因此采用 C20 混凝土。

### 3) 锚固介质

锚固介质以 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥熟料和适量的石膏及规定的混合材料制成。

## 1.2 试验仪器

试验装置由加载装置、数据采集装置组成,其中加载装置采用 60t 的 RRH-6010 型穿心液压千斤顶,利用压力为 60MPa 的手动液压泵匀速加载。千斤顶所提供的荷载通过 MSJ-202 型三弦锚索测力计测量,测力计标定系数为 0.438,杆端位移采用精度为 0.01mm、量程为 50mm 的百分表进行测量,如图 1 所示。

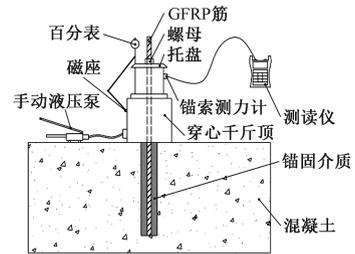


图 1 仪器连接结构

Fig. 1 Instrument connection structure

## 1.3 扩孔钻头及施工工艺

端部扩大型钻头设计直径分别为 28, 32mm, 钻头扩大部分高度分别为 28, 32mm。钻杆中间有圆球状支点,其直径与钻头直径相同,杆体直径比钻头直径小 10mm,以便钻头在孔内顺时针转动操作,如图 2 所示。

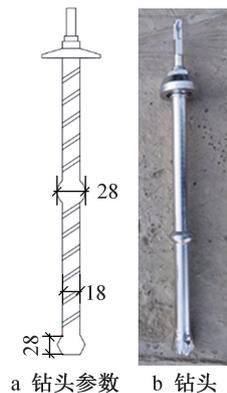


图 2 扩孔钻头

Fig. 2 Reaming drill bit

端部扩大型全长黏结锚杆施工工艺流程:先用普通等直径钻头钻孔,钻孔深度按照试验设计要求而定;更换扩孔钻头,利用冲击钻,调至只回转不冲击的档位,将钻头下放到设定深度后,沿顺时针方

向摆动冲击钻 2~3 圈后形成扩孔。扩大头直径约为钻头直径的 1.3 倍,操作原理如图 3 所示。

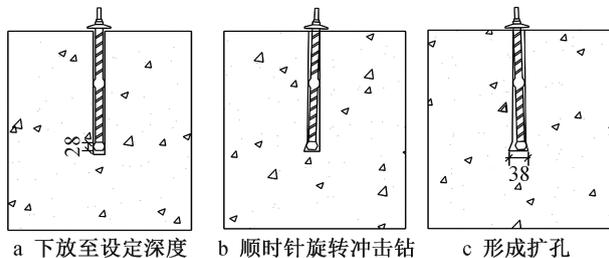


图 3 扩孔钻头操作原理

Fig. 3 Operating principle of reaming drill bit

利用混凝土块模拟岩体,按照试验设定尺寸将混凝土养护 28d 后,用普通冲击钻在其上钻孔,再注入水泥作为灌浆体,最后插入锚杆。养护 1 周后利用穿心液压千斤顶进行拉拔试验,并用百分表测试其在拉拔过程中的位移变化量。

#### 1.4 试验设计

设计 3 种不同锚固模式的试验:钻孔直径为 18mm 的直接击入式锚杆锚固、钻孔直径为 28, 32mm 的全长黏结锚杆锚固、钻孔直径为 28, 32mm 的端部扩大型黏结锚杆锚固。其中,直接击入式锚杆锚固设计 15d, 17d, 18d ( $d$  为 GFRP 筋直径,为 18mm) 3 种不同锚固长度,鉴于本文研究重点为黏结型锚杆,且试件数量较多,为控制试件间距,直接击入式锚杆锚固长度仅设计 1 个试件。全长黏结型锚固和端部扩大型锚固设计 15d, 17d, 18d 锚固长度,每种长度设计 3 个平行试验。本研究共计开展 39 个试验,试件编号 Q28-15-1 代表孔径为 28mm、锚固模式为全长黏结型锚固、锚固长度为 15d 的第 1 组试验,K32-17-2 代表孔径为 32mm、锚固模式为端部扩大型锚固、锚固长度为 17d 的第 2 组试验,W18-15-1 代表孔径为 18mm、锚固模式为直接击入式锚固、锚固长度为 15d 的第 1 组试验,其他类推。

## 2 试验过程

1) 混凝土表面平整,保证空心千斤顶加载时不产生偏心荷载。放置空心千斤顶、锚索轴力计,二者对中,并保持 GFRP 筋在圆心中间。

2) 拧入托盘、螺母,为防止筋材受力过大,造成螺母与筋材螺纹连接处发生破坏,可叠加多个螺母共同受力,增大螺母与筋材的咬合面积,提高托盘螺母的外锚固极限承载力。

3) 连接空心千斤顶与手动液压泵,检查油量和排气。通过手动液压泵施加 1kN 预应力,保证各个仪器连接紧密,排除仪器挤压作用产生的位移干扰影响。

4) 连接测读仪黑线与锚索轴力计黑线,通过测读仪红线依次与锚索轴力计红、黄、蓝线连接读取频率模数初值。利用磁座将百分表固定在锚盘上,指针调零,加载时指针每转动 2 圈(经过 2mm)记录 1 次荷载值,读数方式与记录初值相同(见图 4)。



图 4 拉拔试验

Fig. 4 Drawing test

## 3 试验结果及分析

### 3.1 失效破坏模式

在所有 GFRP 锚杆拉拔试验中,有 5 根锚杆发生拔出破坏(Q28-15-1, Q32-17-1 和直接击入式锚固的 3 个试件),剩余 34 根均发生剪切滑移破坏。

全长黏结型锚固状态下,孔径为 28mm 时,锚固长度为 15d, 17d, 18d 时的破坏荷载均值分别为 40.18, 46.25, 55.20kN;孔径为 32mm 时,锚固长度为 15d, 17d, 18d 时的破坏荷载均值分别为 46.21, 58.64, 55.62kN。

端部扩大型锚固状态下,孔径为 28mm 时,锚固长度为 15d, 17d, 18d 时的破坏荷载均值分别为 44.59, 60.65, 64.31kN;孔径为 32mm 时,锚固长度为 15d, 17d, 18d 时的破坏荷载均值分别为 57.79, 63.39, 69.51kN。

直接击入式锚固状态下,孔径为 28mm 时,锚固长度为 15d, 17d, 18d 时的破坏荷载均值分别为 2.10, 2.92, 4.59kN。

### 3.2 锚杆荷载-位移变化

锚杆荷载-位移变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,全长黏结型锚杆的荷载-位移曲线变化分为 4 个阶段:①弹性阶段:当荷载较小时,锚杆的黏结力主要以锚筋与灌浆体的化学黏结力为主,荷载随着位移的增大而线性增大;②塑性滑移变形阶段:随着位移的增大,界面的化学黏结力逐渐消失,此时摩擦力和机械咬合力开始发挥作用,随着荷载的逐渐增加,锚筋位移增大,同时在锚筋周围的灌浆体中产生斜裂缝,表现为位移随着荷载的增加而大幅度增大,黏结-滑移曲线呈下凹型;③破坏阶段:由于锚筋位移过大,逐渐与灌浆体脱离,灌浆体开裂严重,无法稳定承担荷载,灌浆体破坏,荷载迅速下降;④失效滑移阶

段:当灌浆体破坏后,GFRP 锚筋黏结力只剩下与破碎灌浆体之间的机械咬合力,黏结强度随着位移的增大发生小范围波动,直到试验结束。

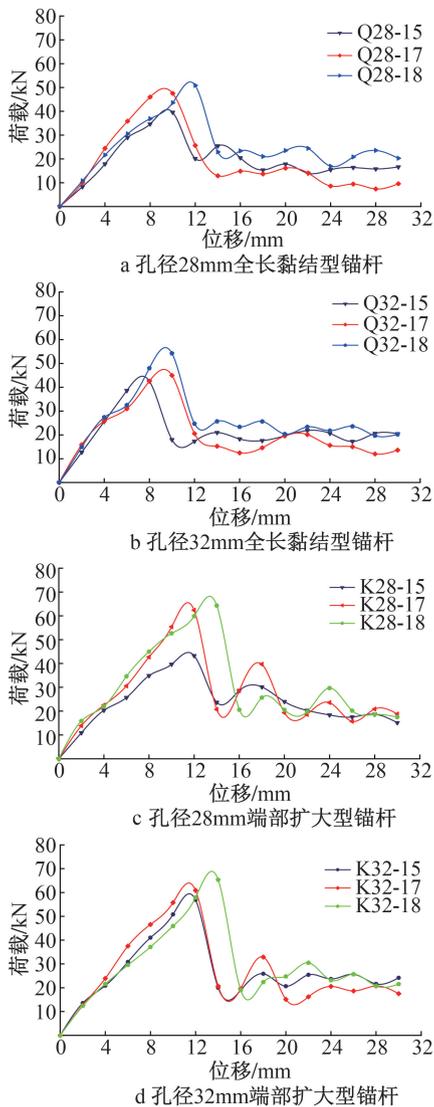


图5 锚杆荷载-位移曲线

Fig. 5 Anchors load-displacement curve

端部扩大型锚杆的荷载-位移曲线变化分为5个阶段:①弹性阶段:当荷载较小时,锚杆的锚固力仅依靠非扩大锚固部分的侧壁受力,荷载-位移曲线呈线性增长,原理与全长黏结型锚固相同;②塑性滑移变形阶段:该阶段曲线斜率略微减小,扩大部分开始提供抗拔力,锚杆的承载力继续增大;③端部承载阶段:随着锚杆受到的拉拔力增大,扩大头承压端和扩大头共同受力,并在荷载作用下与周围混凝土不断挤压密实;④破坏阶段:当荷载增加打破锚杆锚固极限平衡状态后,扩大头发生破坏,荷载下降;⑤失效滑移阶段:在锚杆发生破坏后继续增加荷载的过程中,扩大头锚杆位移收敛,锚杆荷载继续增长,但涨幅比破坏荷载小,达到极限平衡

后,发生第2次破坏。

全长黏结型锚杆与端部扩大型锚杆3个平行试验极限锚固力均值对比如图6所示。由图6可知,孔径为28mm、锚固长度为15d,17d,18d的端部扩大型锚杆极限锚固力依次比全长黏结型锚杆极限锚固力提高11%,31%,3%。孔径为32mm、锚固长度为15d,17d,18d的端部扩大型锚杆极限锚固力依次比全长黏结型锚杆极限锚固力提高25%,8%,25%。

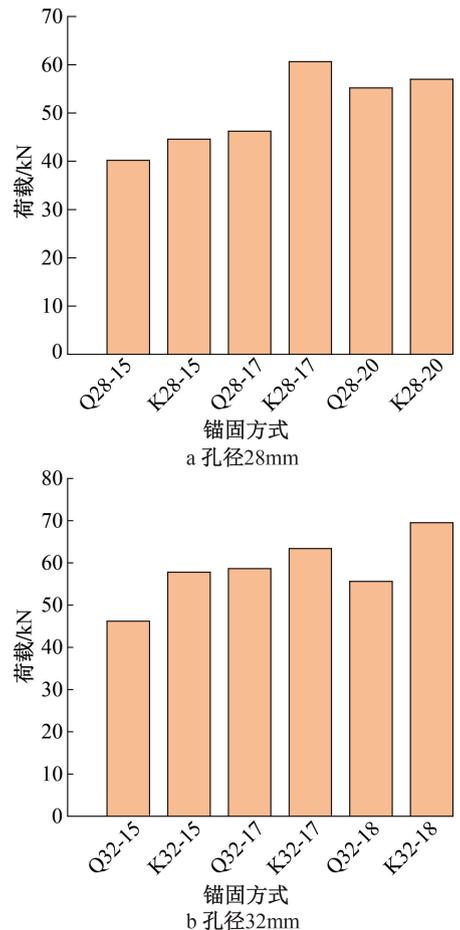


图6 极限锚固力对比

Fig. 6 Comparison of ultimate anchoring forces

综上所述,端部扩大型锚固方式可提高锚杆的锚固力,锚固力为普通锚杆的1.1~1.3倍,应用于工程中,比普通黏结型锚杆所需的锚固长度小,可降低在高陡边坡上施工锚钉的难度。

### 3.3 黏结锚固强度

针对全长黏结型锚杆和端部扩大型锚杆,将黏结锚固机理分为锚筋-灌浆体界面和灌浆体-岩体界面进行分析。其中,锚筋-灌浆体界面的平均黏结强度 $f_1$ 为:

$$f_1 = F/A_1 \quad (1)$$

式中: $F$ 为锚杆拉拔承载力(kN); $A_1$ 为锚筋与灌浆

体接触面积( $m^2$ )。

灌浆体-岩体界面的平均黏结强度 $f_2$ 为:

$$f_2 = F/A_2 \quad (2)$$

式中: $A_2$ 为灌浆体与周围岩体接触面积( $m^2$ )。

通过计算得到全长黏结型锚杆锚筋-灌浆体界面平均黏结强度为 2.63~3.46MPa,灌浆体-岩体界面平均黏结强度为 1.69~1.96MPa。端部扩大型锚杆锚筋-灌浆体界面平均黏结强度为 2.92~3.84MPa,灌浆体-岩体界面平均黏结强度为 1.84~2.26MPa。直接击入式锚杆锚筋-岩体界面黏结强度为 0.13~0.26MPa。

端部扩大型锚杆在拉拔试验中锚筋-灌浆体界面的极限黏结强度比全长黏结型锚杆的极限黏结强度可提高 10%~30%,在灌浆体-岩体界面的极限黏结强度比全长黏结型锚杆的极限黏结强度可提高 5%~25%。

直接击入式锚杆在荷载较小时,即发生拔出破坏,其锚杆锚筋-岩体界面黏结强度为全长黏结型锚杆的 0.07~0.13 倍,为端部扩大型锚杆的 0.05~0.11 倍。

#### 4 结语

1)端部扩大型锚杆极限抗拔承载力为全长黏结型锚杆的 1.1~1.3 倍。因此选择端部扩大型锚杆锚固方式可以有效提高锚固力,同时也能减小锚固长度,节省材料。

2)全长黏结型锚杆荷载-位移曲线分 4 个阶段:弹性阶段、塑性滑移变形阶段、破坏阶段和失效滑移阶段。端部扩大型锚杆荷载-位移曲线在塑性滑移变形阶段和破坏阶段之间还增加了端部承载阶段。

3)将锚筋锚固界面分为锚筋-灌浆体界面和灌浆体-岩体界面分别讨论,端部扩大型锚杆在拉拔试验中锚筋-灌浆体界面的极限黏结强度比全长黏结型锚杆的极限黏结强度可提高 10%~30%,在灌浆体-岩体界面的极限黏结强度比全长黏结型锚杆的极限黏结强度可提高 5%~25%。

4)直接击入式锚杆在荷载较小时发生拔出破坏,其锚杆锚筋-岩体界面黏结强度为全长黏结型锚杆的 0.07~0.13 倍,为端部扩大型锚杆的 0.05~0.11 倍。

#### 参考文献:

[1] 包扬,苏德,杨巍,等.铜尾矿库土壤修复效应及周边植被恢复模式研究[J].矿产综合利用,2022(1):74-81.

BAO Y, SU D, YANG W, et al. Study on soil remediation effect of copper tailings pond and surrounding vegetation restoration model [J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 2022(1):

74-81.

[2] 李瑞娟,周冰.安徽铜陵铜尾矿土壤污染评价及综合利用研究[J].矿产综合利用,2021(4):36-40.

LI R J, ZHOU B. Study on soil pollution evaluation and multipurpose utilization of copper tailings in Tongling, Anhui [J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 2021(4):36-40.

[3] 何振嘉,罗林涛,杜宜春,等.碳中和背景下矿区生态修复减排增汇实现对策[J].矿产综合利用,2022(2):9-14,56.

HE Z J, LUO L T, DU Y C, et al. Countermeasures to realize ecological restoration and emission reduction and increase of sinks in mining areas under the background of carbon neutrality [J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 2022(2):9-14,56.

[4] 刘颖浩,袁勇.全螺纹 GFRP 黏结型锚杆锚固性能试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):394-400.

LIU Y H, YUAN Y. Experimental research on anchorage performance of full-thread GFRP bonding anchor bolts [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29(2):394-400.

[5] 罗小勇,唐谢兴,匡亚川,等.腐蚀环境下 FRP 锚杆耐久性能试验研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(6):1341-1347.

LUO X Y, TANG X X, KUANG Y C, et al. Test on erosion resistance of FRP anchor bolt [J]. Journal of railway science and engineering, 2015, 12(6):1341-1347.

[6] 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 T Q, LI H M, LI H Y, et al. Pull-out properties of bolt with different anchorage length [J]. Journal of mining & safety engineering, 2017, 34(6):1075-1080.

[7] 卢肇钧,吴肖茗,刘国楠.锚定式支护工程实践中几个问题的探讨[J].中国铁道科学,1995,16(3):24-31.

LU Z J, WU X M, LIU G N. On some special problems in the design of anchored retaining walls [J]. China railway science, 1995, 16(3):24-31.

[8] 张钦喜,孙家乐,刘柯.深基坑锚拉支护体系变形控制设计理论与应用[J].岩土工程学报,1999,21(2):161-165.

ZHANG Q X, SUN J L, LIU K. Principle and application of deformation control design for retaining structure in deep excavation [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1999, 21(2):161-165.

[9] 陈宇佳.端部扩大型锚杆受力机理的现场试验研究[D].太原:太原理工大学,2011.

CHEN Y J. Study of test about mechanism of headed end anchor subjecting to force on the spot [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.

[10] 尤志嘉.土层锚固体应力分布规律与失效机理的细观力学研究[D].青岛:山东科技大学,2018.

YOU Z J. Meso mechanical study on stress distribution and failure mechanism of soil anchorage [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.

[11] 李洪. MRA-1 型锚杆扩底机具的结构特点及使用情况[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(11):34-36.

LI H. Performance and structure specialty of anchor reaming tool MRA-1 [J]. Exploration engineering (drilling & tunneling), 2005, 32(11):34-36.