

软弱岩体锚杆物理锚固装置参数优化分析及试验研究

郭鹏飞, 王 戎, 徐飞龙, 孙 岩, 刘 鑫

(绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴, 312000)

摘 要: 对于软弱岩体的锚杆支护, 传统锚固剂锚固往往不能发挥理想的锚固效果。针对软弱岩体锚固性能差、锚固力易衰减的技术难题, 提出一种物理锚固装置对软岩进行锚固, 增强锚杆对软弱岩体的支护效果, 确保锚固能力的持续稳定。采用数值模拟及室内试验相结合的方法开展系统研究。数值模拟结果表明: 在设计参数范围内, 锚固装置上倒齿的高度越大, 锚固力越大; 倒齿的角度越小, 锚固力越小; 倒齿的排数越多, 锚固力越大, 而倒齿间距对锚固力影响不显著。在数值模拟的基础上, 选取锚固装置倒齿的最优参数并进行拉拔试验。试验结果表明: 物理锚固装置能保证锚固力长时间不衰减, 并且 3 排倒齿的锚固装置能提供的锚固力高于传统锚固剂锚固。本研究有助于解决软岩条件下锚杆锚固性能差的核心问题, 为确保软弱岩体的锚杆支护效果提供了重要参考。

关 键 词: 软弱岩体; 锚杆支护; 物理锚固; 参数优化; 拉拔试验

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 10-2961-10

Parameter optimization and experimental study of anchorage device for soft rock mass bolt

GUO Peng-fei, WANG Xu, XU Fei-long, SUN Yan, LIU Xin

(School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

Abstract: Traditional anchoring agents often fail to provide effective bolt support for soft rock mass. To address the issues of poor anchoring performance and easy attenuation of anchoring force in soft rock mass, a physical anchoring device is proposed. This device aims to enhance the support effect of bolt and ensure continuous stability of anchoring ability. This study combines numerical simulations and laboratory experiments for systematic research. Numerical simulation results show that within the range of design parameters, higher inverted teeth on the anchoring device results in greater anchoring force. A smaller tooth angle decreases the anchoring force. More rows of inverted teeth increase the anchoring force, while the spacing of inverted teeth has no significant effect on the anchoring force. Based on numerical simulations, the optimal parameters for the inverted teeth of the anchoring device were selected, and drawing experiments were carried out. Experimental results show that the physical anchoring device maintains anchoring force over a long period. The three-row inverted teeth anchoring device provides higher anchoring force compared to traditional anchoring agents. This study helps to solve the core problem of poor anchoring performance in soft rock conditions, and provides a valuable reference for improving bolt support in soft rock mass.

Keywords: soft rock mass; bolt support; physical anchoring; parameter optimization; pull-out experiment

1 引 言

20 世纪以来, 随着采矿、隧道等地下工程领域在世界范围内兴起, 锚杆作为一种简单、有效、经济的支护工具普遍用于地下工程建设中^[1-4]。然而, 随着工程建设向着高难度、大深度的方向发展, 越

来越多复杂软弱的地质环境威胁着地下空间的稳定, 预应力锚杆的应用面临愈来愈多的挑战。由于岩体条件复杂多样, 导致工程建设中时常出现锚杆锚固易失效、锚固力衰减过快等问题, 严重影响了施工质量、安全及进度, 对施工人员生命财产造成了极大的威胁^[5-7]。

收稿日期: 2023-12-16

录用日期: 2024-03-11

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 59104188)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (59104188).

第一作者简介: 郭鹏飞, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事深部岩体灾害防控、无煤柱开采等方面的研究。E-mail: gpf20101989@163.com

软弱岩体作为工程建设中常见的岩体类型,由于其强度低、易变形等特点,使得锚杆支护很难发挥作用,严重影响锚杆支护效果。对此,国内外学者开展了多方位的研究,取得了丰硕的成果。

如朱家锐等^[8]利用数值模拟技术,对软岩巷道的破坏原因、影响浆液扩散半径的因素以及注浆后锚索的加固效果进行了深入研究,进而提出了一种新的锚固方法,即使用高压注浆+高强锚杆和锚索来加固软岩巷道。张伟光等^[9]通过试验研究发现,使用局部扩孔锚固技术能够提升锚固体和周围岩体的相互影响力。王志等^[10]针对深部煤矿巷道中应力分布复杂和软弱围岩易变形的问题,提出了一种端部扩孔锚固技术,通过构建理论模型和数值模拟,深入分析了扩孔锚固界面的应力分布情况,以及脱锚长度的扩展过程和端面挤压应力的分布特性;此外,还探讨了不同锚固方式对巷道围岩变形和应力集中的影响,为矿井支护提供了新的理论依据和技术支持。

刘宇鹏等^[11]深入探讨了高地应力软岩隧道短锚杆支护失效机制,构建了一个综合考虑长锚杆和短锚杆的联合支护力学模型,并通过对比分析了仅使用短锚杆支护与长短锚杆联合支护两种情况下的围岩响应曲线。研究结果表明,采用长短锚杆联合支护的策略能显著提高高地应力软岩隧道的变形控制效果。张红军等^[12]综合现场监测数据和试验结果,提出了一种以高预应力锚杆、注浆锚杆(索)和 U 型钢架为关键组成部分的分步刚柔耦合支护技术。这种支护技术在软弱围岩的支护中展现出了卓越的效果。余伟健等^[13]结合试验结果和理论成果,提出了一种以注浆加固为核心,辅以锚杆和锚索联合支护的综合控制方案,并用该方案在林场煤矿进行了工业性试验。现场监测所收集的数据表明,该支护方案能有效地抑制煤巷中弱胶结粉砂岩顶板的变形。刘方等^[14]提出了一种管片衬砌联合支护技术,该技术通过管片间的相互嵌挤和错动移位,巧妙地调节了衬砌壁后接触力。同时,锚杆形成的锚固区域对围岩的蠕变变形起到了有效的控制作用,不仅显著提升了围岩自身的承载能力,还增强了整个支护结构的稳定性。

贾后省等^[15]研发了一种锚杆锚固增效装置,该装置能够提升树脂锚固剂的搅拌均匀度,增强锚固区域药体的密实性,通过提升锚固剂的锚固状态,从而增强锚固效果。同时,殷齐浩等^[16]提出了一种全长黏结大变形让压锚杆,这种锚杆与普通锚杆相比,能够提供更大的让压距离和持续的工作阻力,

进一步提升了支护性能。赵象卓^[17]、林健^[18]、Cao^[19]等采用数值模拟和试验研究的手段系统地研究了锚杆直径、形状、肋参数等对锚固系统黏结性能的影响,同时探究了锚杆的合理肋参数,如肋高和肋间距等。研究表明,锚杆外形在很大程度上会影响锚固系统的黏结性能和载荷传递特征,优化锚杆肋参数有助于提高锚固系统的黏结特性。Ho 等^[20]研究了锚固系统的约束边界条件对其黏结性能的影响,强调了约束边界条件对锚固系统黏结力的重要性。

刘学伟等^[21]分析了围岩失稳破坏大变形的原因,基于深部软弱破碎巷道,提出了一种格栅拱架、锚杆、锚索的分步联合支护技术,并应用于工程实际,最大程度地发挥了格栅支架-锚杆索支护效能。吴拥政等^[22]提出了针对软岩巷道围岩“一隔三强”的稳定性控制原理与方法,并给出相应的全断面“锚索+网+注浆+喷浆”的综合控制方案,强化了锚索锚固力、预紧力扩散效能与围岩承载能力。

饶泉宇等^[23]研究了水泥灌浆材料的力学性能对锚固系统黏结性能的影响,研究发现,水泥灌浆材料的水灰比是影响锚固系统黏结特性的关键因素之一,适当降低水泥灌浆材料的水灰比能有效提高锚固系统的黏结性能,进而增强锚固系统的承载特性。考虑到锚固界面的承载机制,Teymen 等^[24]探究了锚固剂内添加矿物材料或钢介质对锚固系统黏结性能的影响,研究结果表明,锚固剂内添加矿物材料或钢介质可以有效增强锚固界面的力学行为,提高锚固系统的黏结特性。

由上述研究可知,当前软岩锚固支护研究主要针对改进支护技术、改善锚固方法、优化锚杆参数、增强锚固剂锚固效果等方面,有效推动了软岩条件下锚杆支护发展,为提升锚杆锚固效果提供了理论和技术支持。然而对软弱岩体条件下锚固剂与岩体之间容易脱黏、锚固力易于衰减的问题并没有很好地解决。

因此,为有效解决在软岩条件下预应力锚杆支护存在的问题,本文提出一种倒齿锚杆,由端部刻有螺纹的普通锚杆和物理锚固装置组成。通过物理锚固控制岩体,以达到锚固力长时间稳定的目的。为进一步研究倒齿锚杆对岩体的支护控制作用,通过数值模拟对物理锚固装置的结构参数进行设计优化,分析其锚固效果,并通过室内大型拉拔试验装置验证其有效性,以期提升对软弱岩体锚杆支护的控制质量。

2 锚固装置结构构造及工作原理

2.1 锚杆物理锚固装置设计

锚杆物理锚固装置由钻进膨胀装置和倒齿锚固装置组成，并配合锚杆连接装置使用，其结构示意图如图 1 所示。物理锚固装置的各个结构设计参数可以根据锚孔和锚杆的尺寸进行调整，以使该装置能适用于各直径的锚杆。其中锚杆连接结构端部的外螺纹用于紧密连接钻进锚固装置，锚固装置中的钻进膨胀装置由刻有内外螺纹的内部空腔圆筒结构和顶端带有一定锥度的实体迫胀头组成，内螺纹起到与锚杆连接适配的作用，外螺纹与倒齿锚固装置相连接，而迫胀头则起着胀开和支撑的作用，迫胀头的长度小于内外螺纹的长度，保证钻进膨胀

装置能与倒齿锚固装置有效连接。倒齿锚固装置由刻有内螺纹内部空腔圆筒结构和顶端带有 4 条切缝的锥体中空结构组成。其中，刻有内螺纹的空腔圆筒结构的内径与钻进膨胀装置的外径相同，用来与钻进膨胀装置的外螺纹相连接，空腔圆筒的外径略小于锚孔的直径，保证锚固装置能顺利进入锚孔中；锥体中空结构的 4 条切缝成对称分布，将锥体切成 4 个相同的锥形胀片，每个胀片上都有单排或多排的一体化的倒齿，对称两个倒齿之间最大距离不大于锚孔的直径，倒齿呈现类似倒楔形的结构。当钻进膨胀装置的迫胀头进入锥体中空结构时，膨胀片受到向外的胀开力，对岩体产生挤压作用，最后使倒齿嵌入岩体内，同时实体迫胀头起到了支撑作用，防止膨胀片弹性回缩。

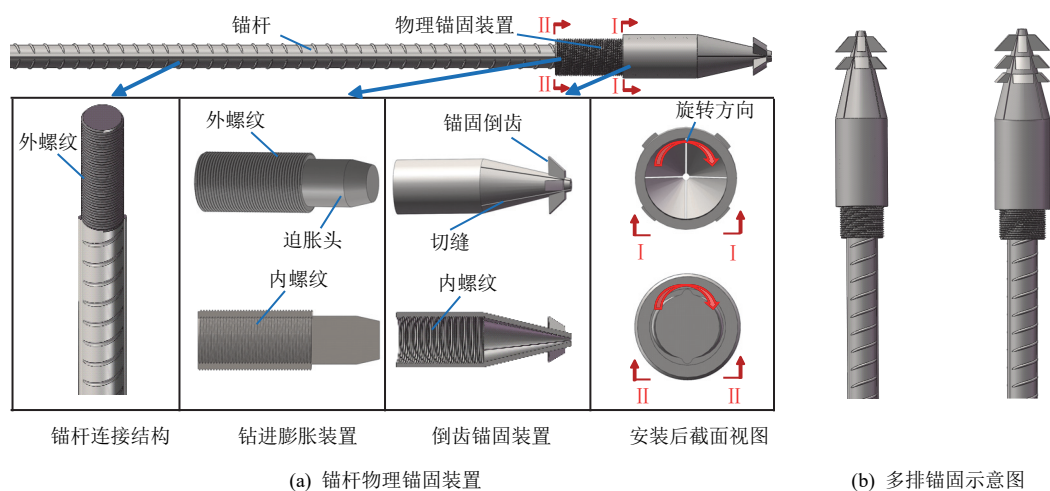


图 1 锚杆及物理锚固装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of bolt and physical anchorage device

2.2 锚杆物理锚固装置工作原理

对锚杆物理锚固装置的结构进行设计时充分考虑了其功能要求及应用条件，以下将对倒齿锚杆的具体工作过程进行分析，以增进对物理锚固装置工作原理和特点的了解，主要工作过程如图 2 所示。

锚杆膨胀装置工作时的具体操作如下：首先，根据钻进膨胀装置的内螺纹在锚杆端部刻制相同型号和长度的外螺纹，在锚杆装入锚孔之前通过螺纹将锚杆和钻进膨胀装置相连接，同时倒齿锚固装置与钻进膨胀装置的部分螺纹相连接；然后，将带有物理锚固装置的锚杆放入岩体锚孔之中，锚杆的另一端接入钻机，通过钻机的转动带动锚杆的旋转，进而带动钻进膨胀装置的旋转，对锚杆施加顶压力；随着钻机的转动，倒齿锚固装置的膨胀片在迫胀头的挤压力作用下向外张开，倒齿开始嵌入岩

体，物理锚固装置因此得到固定；最后，钻进膨胀装置全部进入到倒齿锚固装置中，膨胀片也完全张开，使倒齿全部嵌入岩体中，至此完成锚杆的物理锚固施工。



图 2 物理锚固装置主要工作过程

Fig.2 Main working process of physical anchoring device

结合上述装置的工作过程及结构特点可知,由于螺纹的作用,当迫胀头完全顶开膨胀片后,固定在了倒齿锚固装置空腔内,相当于给膨胀片一个约束,避免其因弹性回缩。倒齿的结构有助于嵌入岩体,当锚杆受拉时岩体将抵抗锚杆的移动,进而为锚杆提供持续锚固力。

由上述分析可知,物理锚固装置各部件的协同工作为解决软弱岩体通过锚固剂难以锚固的问题提供了一种可靠的技术支持,有望在软弱岩体条件下锚杆支护中发挥积极作用。

3 倒齿结构参数对锚杆锚固性能影响数值模拟

3.1 数值模型建立

为更清楚地了解锚杆锚固齿的结构参数对锚杆锚固性能的影响,进行了同一软弱岩体条件下,不同倒齿参数的锚杆拉拔数值模拟。根据不同锚固倒齿尺寸参数,进行了4种不同倒齿锚固状态时锚杆锚固性能模拟。考虑物理锚固装置和锚孔的尺寸限制,倒齿的高度设计在10 mm以内;考虑倒齿实际嵌入岩体情况,倒齿的角度设计为 90° 以内;考虑锥形膨胀片尺寸限制,第1排倒齿宽度设计为5 mm,第2排倒齿高度、宽度分别设计为8、7 mm,第3排倒齿高度、宽度分别设计为6、9 mm。以双排倒齿为例,倒齿各参数如图3所示。

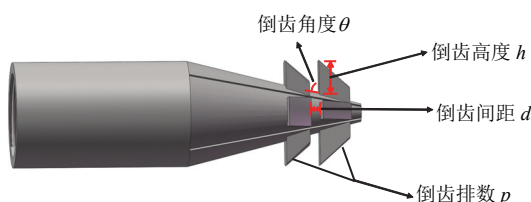


图3 物理锚固装置各尺寸参数
Fig.3 Size parameters of physical anchoring device

本次数值模拟对单排不同倒齿高度锚固、不同倒齿角度锚固、不同排倒齿锚固和多排倒齿不同间距锚固进行研究。具体模拟方案如表1所示。

表1 数值模拟方案
Table 1 Scheme of numerical simulation

类型	模拟参数				锚固深度/mm
	高度 h /mm	角度 $\theta/(^{\circ})$	间距 d /mm	排数 p /排	
不同高度	10, 8, 6, 4	90	—	1	300
不同角度	10	90, 75, 60	—	1	300
不同间距	10	90	1.5, 2.5, 3.5	3	300
不同排数	10	90	—	1, 2, 3	300

依据上述模拟方案开展数值模拟,本次数值模

拟目的旨在研究锚固倒齿尺寸参数对锚杆锚固能力的影响,故仅对已经胀开的锚固装置进行模拟。本次模拟采用 ABAQUS 有限元模拟软件,建立的数值模型如图4所示。模型中岩体底面为500 mm的正方形,高度为400 mm;模型中锚孔深度为300 mm,直径为30 mm;锚杆长度为400 mm,直径为18 mm。同时,此次数值模拟的力学参数皆是由前期室内预试验获取,数值模拟参数如表2所示。

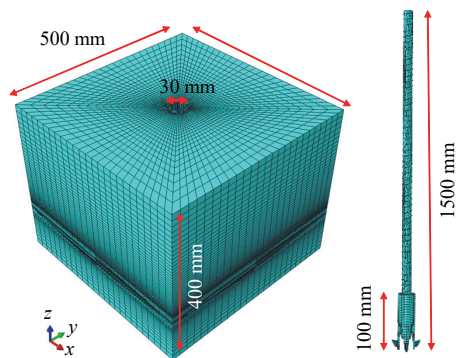


图4 岩体及锚固装置数值模型
Fig.4 Numerical model of rock mass and anchorage device

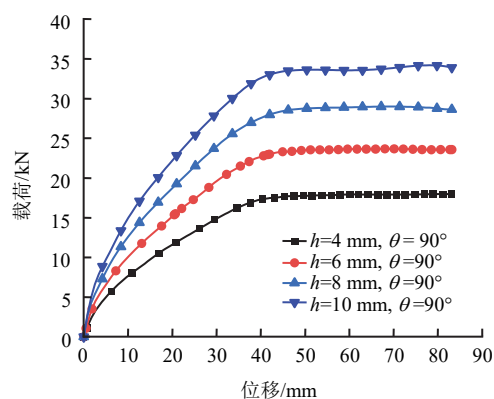
表2 数值模拟参数
Table 2 Numerical simulation parameters

模型单元	弹性模量/GPa	密度/(t · mm ⁻³)	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/MPa
锚杆	200.00	7.85×10^{-9}	0.30	—	—
物理锚固装置	210.00	7.85×10^{-9}	0.30	—	—
软弱岩体	1.86	2.20×10^{-9}	0.25	35	1.2

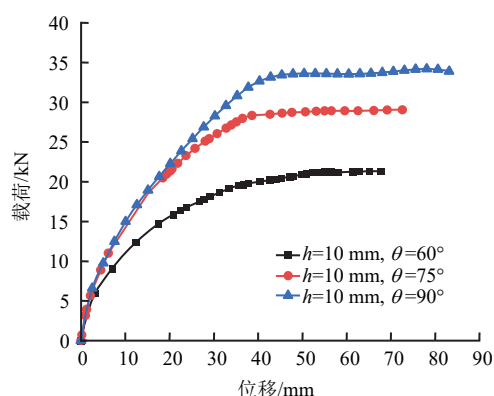
锚杆模型采用三维实体建模,因为锚杆及锚固装置的弹性模量远大于软弱岩体的弹性模量,故将锚杆及锚固装置视为弹性体,软弱岩体采用弹塑性体,并符合摩尔-库仑准则;锚杆锚固装置与岩体接触均设置表面与表面接触的相互作用,接触属性为切向行为与法向行为,其中,锚杆表面采用光面,岩体无黏性行为,故切向行为视为无摩擦,法向行为设置硬接触。另外,对岩体两侧边界设置法向约束,仅约束其水平位移,底部采用固定约束形式,约束其水平位移和竖向位移,岩体顶部不设置约束。岩体和锚杆及锚固装置均采用 C3D8R 实体单元进行划分,并对倒齿处岩体进行局部网格加密,设置参考点并耦合在锚杆外露顶端表面,模拟时对参考点施加 Z 轴正向位移控制。

3.2 数值模拟结果分析

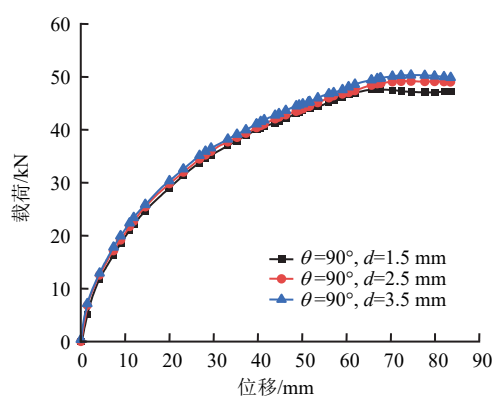
通过提取锚杆顶端耦合点的应力,将其处理成作用于面上的载荷,获得不同倒齿参数锚固下的载荷-位移曲线,如图5所示。



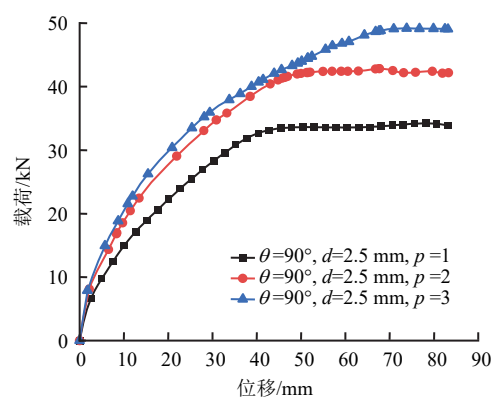
(a) 单排倒齿不同高度载荷-位移曲线



(b) 单排倒齿不同角度载荷-位移曲线



(c) 3排倒齿不同间距载荷-位移曲线



(d) 不同排倒齿载荷-位移曲线

图 5 不同倒齿参数下的载荷-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves under different parameters of inverted teeth

由上述锚杆加载过程中的载荷-位移曲线可知,在单排倒齿情况下,保持其他变量不变(锚杆倒齿排数为单排,倒齿角度 $\theta=90^\circ$),倒齿高度 h 分别为4、6、8、10 mm的物理锚固系统的极限荷载分别为17.73、23.35、28.76、33.60 kN,随后载荷趋于长期稳定阶段。由此可知,倒齿高度对锚杆锚固性能有着显著的影响,倒齿高度每增大2 mm,锚杆的极限锚固力就增大5~6 kN,锚杆锚固力随着倒齿高度的增大而线性增长,不同倒齿高度的载荷-位移的变化趋势一致。

在单排倒齿情况下,控制其他变量不变(锚杆倒齿排数为单排,倒齿高度 $h=10$ mm),倒齿角度 θ 分别为 60° 、 75° 、 90° 时锚杆的极限荷载分别为21.04、28.72、33.53 kN,随后载荷趋于长期稳定阶段。随着倒齿角度的增大,锚杆的极限锚固力也随之增大,但是锚固力增量逐渐减小。倒齿角度对锚杆锚固性能也有着显著的影响,在限定的角度范围内,倒齿的角度越大越能发挥锚杆锚固性能。

控制其他变量不变(锚杆倒齿排数为3排,倒齿倒齿角度 $\theta=90^\circ$),对多排倒齿不同间距情况下的锚杆进行数值模拟,结果表明,倒齿间距分别为1.5、2.5、3.5 mm时锚杆的极限荷载均在48 kN左右,倒齿间距的改变对锚杆锚固性能的影响较小,载荷-位移曲线的变化趋势相同。

在上述分析的基础上,设置倒齿排列数为单排、双排和3排,而保持其他条件不变(倒齿角度 $\theta=90^\circ$,倒齿间距 $d=2.5$ mm)分析倒齿排数对锚固效果的影响。由图可知,在 $p=1$ 、2、3排的情况下锚杆的极限荷载分别为33.60、42.25、49.06 kN,随后载荷不再增长,趋于稳定阶段。研究表明,随着倒齿排数的增多,锚杆的极限锚固力也随之增大,倒齿排数对提升锚杆锚固性能也有着显著的影响,但是随着倒齿排数的增多,锚固力增量逐渐减小。

综合数值模拟结果可知,在物理锚固装置所允许的结构尺寸范围内,倒齿高度越大,角度越大,排数越多,锚杆的锚固性能就越好,能够承受的轴向承载能力就越大,但数值模拟是在倒齿充分胀开的条件下得出的结论,在实际应用时受试验环境的影响较大。为了更好地反映物理锚固装置对锚杆锚固的优势,还须在实验室开展多排倒齿锚杆锚固的试验研究。

4 锚杆物理锚固装置锚固性能试验

4.1 试验方案及材料

根据数值模拟的结果拟选取单排、双排、3排的倒齿锚杆开展室内拉拔试验,同时增加等直径普

通锚杆进行传统锚固剂锚固作为试验对照, 以对比分析倒齿锚杆的实际效果, 试验方案如表 3 所示。

为真实地体现软弱岩体锚杆物理锚固的特点, 此次对比试验的试样和装置参数与数值模型的参数为 1:1 等比。锚杆直径为 18 mm, 物理锚固装置直径为 30 mm, 倒齿宽度为已确定宽度, 分别为 9、7、6 mm; 通过数值模拟结果确定倒齿角度为 90°, 间距为 2.5 mm, 单、双、3 排高度分别为 10、8、6 mm。

表 3 拉拔对比试验方案

Table 3 Comparison scheme for pull-out experiment

编号	锚杆分类	锚固类型	倒齿参数		锚固深度 /mm
			高度/mm	角度/(°)	
A	普通锚杆	传统锚固	—	—	300
B1	单排倒齿锚杆	物理锚固	10	90	300
B2	双排倒齿锚杆	物理锚固	10, 8	90	300
B3	3 排倒齿锚杆	物理锚固	10, 8, 6	90	300

相似软弱岩体由尺寸为 500 mm×500 mm×400 mm 的亚克力箱体浇筑而成, 其中, 锚孔为预留孔, 由相应形状的模具生成, 锚固孔直径均为 30 mm, 锚固孔深度为 300 mm。在满足研究需求的前提下, 结合试验设备条件选取长度为 1 500 mm 的锚杆, 仅对端部 300 mm 长度进行锚固, 物理锚固装置为具有良好塑性的低碳钢材料, 锚固剂为快硬硫铝酸盐水泥锚固剂, 水灰比为 0.45。本次试验所需要的主要材料如图 6 所示。

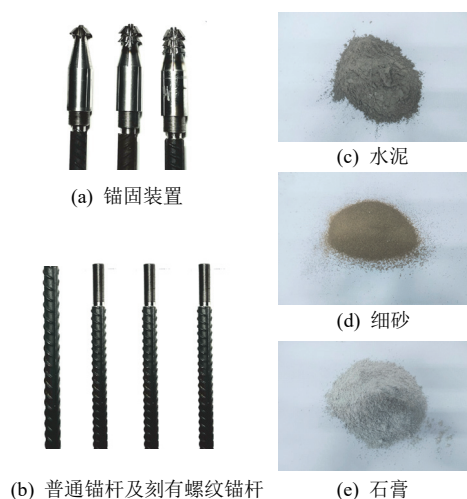


图 6 主要试验材料

Fig.6 Main experimental materials

4.2 试样制作及试验装置

为更好地完成相似软弱岩体试件的制备, 在前期试验中进行了几组不同材料配比试件强度测试, 最终选定的材料配比为细砂: 水泥: 石膏: 水=1:0.162:

0.040:0.242, 在该配比条件下 3 个强度测试试件的单轴抗压强度分别为 7.4、9.28、8.64 MPa, 平均为 8.44 MPa, 弹性模量为 1.86 GPa, 泊松比为 0.25, 该配比下相似材料的抗压强度较为符合本研究对软弱岩体的模拟需求, 材料配比强度测试如图 7 所示。同时, 经过抗剪强度测试, 得到此配比下试样的内摩擦角为 35°, 黏聚力为 1.5 MPa。

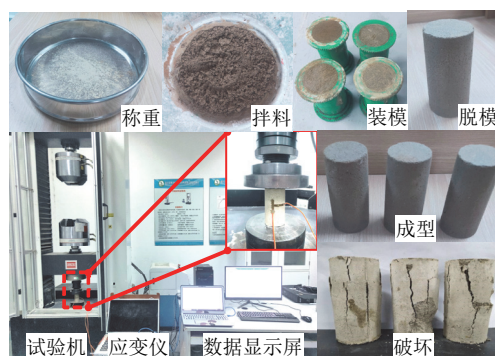


图 7 材料强度配比测试

Fig.7 Material strength ratio test

在进行相似软弱岩体试件制作时, 选用 5 块开槽或打孔的亚克力板制作成底面为 500 mm×500 mm、高度为 400 mm、壁厚为 15 mm 的长方体作为浇筑软弱岩体的容器, 锚固孔为预留孔, 由相应形状的模具生成。锚固孔直径为 30 mm, 锚固孔深度为 300 mm, 从而使得相似软弱岩体试件中锚固孔的尺寸与物理锚固装置未胀开前最大直径保持一致。根据单轴试验所确定的岩体配比称量相应的材料, 搅拌混合均匀后装入亚克力箱中, 并使用振捣工具进行压密压实, 以确保相似软弱岩体试件的制作质量, 试件制作过程如图 8 所示。

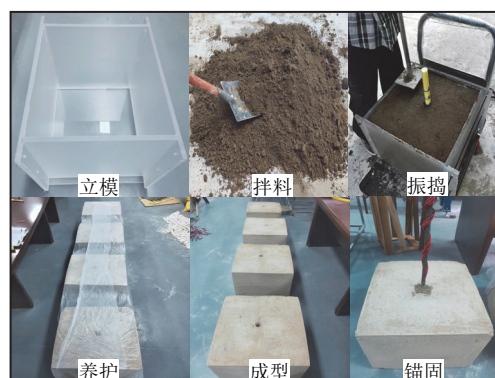


图 8 软弱岩体浇筑流程图

Fig.8 Soft rock pouring flow chart

锚杆拉拔试验平台由主机加载系统、油源系统及

软件控制系统组成，为立体框架结构，可实现 1:1 大型拉拔试验。主机加载系统主要包括主机框架、伺服驱动及传动装置、滚珠丝杠传动装置、T 型丝杆调节装置、主动液压夹具、被动液压夹具、轴向载荷测量装置和设备基座等。试验过程中，先在装样前将锚杆锚固在岩体里，然后用吊机将锚固试件及锚杆安装至

T 型丝杆夹头处，通过 T 型丝杆按钮移动 T 型丝杆，让锚杆另一端置于滚珠丝杠处的夹具内，然后锁紧滚珠丝杠夹具。试验加载过程如图 9 所示。通过软件内置系统对锚杆进行轴向拉拔，同时对系统内置的载荷传感器和径向位移传感器加载来实时记录数据，试验采用位移加载，加载速率为 3 mm/min。

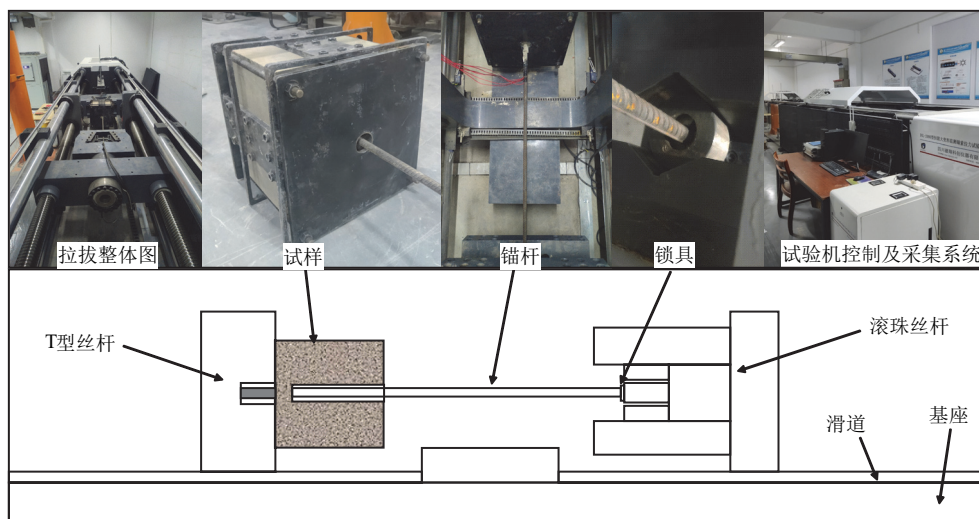


图 9 锚杆拉拔测试试验机
Fig.9 Anchor pull-out test machine

4.3 试验结果分析

4.3.1 室内试验与数值模拟结果对比分析

本文的第 3 章通过数值模拟进行了不同尺寸参数的倒齿锚杆拉拔试验，得到多组倒齿锚杆的荷载-位移曲线，并选出了最优倒齿尺寸参数。利用室内

试验对与数值模拟同尺寸同条件的多排倒齿锚杆模型进行拉拔试验，得到荷载-位移曲线，将其结果与多排倒齿锚杆数值模拟的荷载-位移曲线相互验证检验。图 10 为倒齿锚杆室内试验与数值模拟结果对比图。

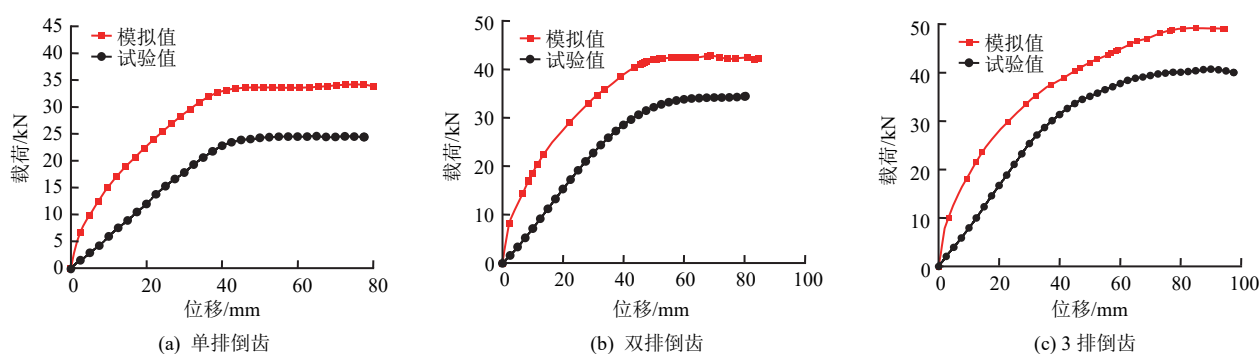


图 10 倒齿锚杆室内试验与数值模拟结果对比图

Fig.10 Comparison between simulation and experiment results of different rows of inverted toothed bolts

4.3.2 拉拔测试结果分析

为对比分析相同锚固长度下采用传统锚固和物理锚固时锚杆的锚固效果，根据表 3 中的试验方案共制作 4 组试件，试件编号分别为 A、B1、B2 和 B3，锚固拉拔结束后荷载-位移曲线如图 11 所示。

根据试验结果分析可知，不同倒齿排数下软弱岩体的破坏阶段大致可分为岩体弹性变形阶段、岩

体塑性变形阶段和岩体屈服破坏阶段。在加载初期，岩体处于弹性阶段，此阶段下锚杆的承载力快速增大；在加载中期，随着拉拔力的增大，岩体进入塑性变形阶段，此时锚杆荷载-位移曲线斜率逐渐变缓；在加载末期，倒齿对岩体的压力超过当前状态的临界压力，倒齿变截面处岩体发生剪切破坏，此时锚杆位移继续增大，而载荷基本保持不变。

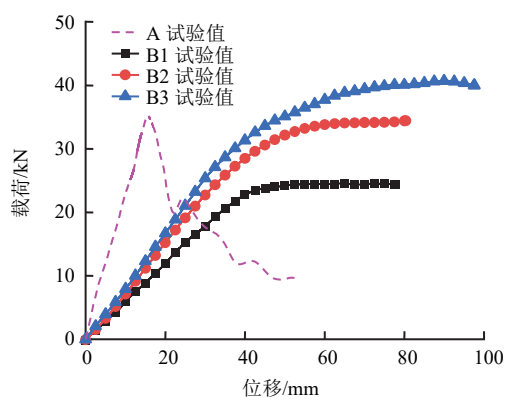


图 11 传统锚固和物理锚固拉拔测试对比曲线

Fig.11 Comparison curves of traditional anchorage and physical anchorage pull-out test

在相同的锚固长度下,在传统锚固下位移加载到 15 mm 左右时锚杆就到达了极限拉拔力 35 kN,随之锚杆就迅速脱黏、锚固失效,锚固力出现大幅度衰减。相比之下,采用物理锚固装置进行拉拔时,岩体逐渐从弹性阶段到塑性破坏阶段,在此过程中锚固力逐渐增大,并随着岩体到达屈服破坏阶段后达到极限锚固力,随后趋于稳定。3 排倒齿锚杆极限锚固力相比传统锚固提升了近 14.3%,极限位移提升了 300%。

由多排倒齿锚杆物理锚固载荷-位移曲线可知,3 排倒齿锚杆的极限拉拔力最大,为 40.09 kN,极限位移也最大,为 60 mm 左右;双排倒齿锚杆的极限拉拔力为 33.88 kN,极限位移为 54 mm 左右;单排倒齿锚杆的极限拉拔力最小,为 24.12 kN,极限位移也最小,为 42 mm 左右。可以看出,随着倒齿排数的增多,锚杆的最大拉拔力和所达到的极限位移明显增大,说明排数的增多有助于提升锚杆的承载性能。

为了探寻倒齿排数对锚杆承载力的影响规律,现对不同排数倒齿锚杆锚固承载力展开分析,如图 12 所示,不同倒齿排数的锚杆,达到最大拉拔力的值明显不同。在采用物理锚固的 3 根锚杆中(B1~B3),对于单排倒齿锚固的锚杆,拉拔力最后维持在 24 kN 左右;对于双排倒齿锚固的锚杆,拉拔力最后维持在 34 kN 左右,相比于单排倒齿的锚杆提升了 41.7%;对于 3 排倒齿锚固的锚杆,拉拔力最后维持在 40 kN 左右,相比于双排倒齿的锚杆提升了 17.6%。

由上述结果可知,对于不同排数倒齿锚固的锚杆,锚固力随着锚杆的排数增多而增大,同比增长速率随着倒齿排数增多而减小,出现这种结果的原因是:由于物理锚固装置中膨胀片的尺寸是圆锥形,

多排倒齿情况下,不同排的倒齿的尺寸是不同的。以 3 排倒齿物理锚固装置为例,在锥形膨胀片尺寸的限制下,第 1 排倒齿的高度最大为 10 mm,但是宽度最小为 5 mm;第 2 排倒齿的高度为 8 mm,宽度为 7 mm;同理第 3 排倒齿的高度为 6 mm,宽度为 9 mm。在物理锚固装置嵌入岩体后,当锚杆受到轴向的拉拔力时,岩体会首先抵抗第 3 排倒齿,接着第 3 排与第 2 排倒齿之间部分重叠区域岩体随着拉拔而失效,则锚杆开始移动时,仅有第 3 排倒齿和不同排倒齿之间的不重叠区域受力。经计算,第 2 排倒齿的不重叠区域面积为 64 mm²,第 1 排倒齿的不重叠区域面积为 48 mm²,说明受力面积的同比增长率随着排数增多而减小,符合图 12 所示规律。

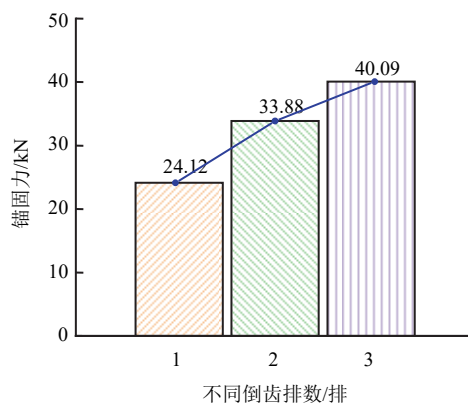


图 12 不同排倒齿锚固承载力分析

Fig.12 Analysis of anchorage bearing capacity of different rows of inverted teeth

4.3.3 物理锚固效果分析

为了更好地了解物理锚固装置的作用机制,探究倒齿锚杆在软弱岩体中拉拔破坏形式,对锚杆拉拔过后的物理锚固装置胀开形态和岩体破坏形态展开分析。图 13 为锚杆拉拔过后不同排物理锚固装置胀开示意图。图 14 为软弱岩体破坏剖面图。

由图 13 可知,不同排数倒齿的物理锚固装置能够有效地胀开,同时钻进膨胀装置将倒齿锚固装置胀开后,能够抵抗膨胀片回缩,有效地保证了物理锚固质量。观察双排物理锚固装置和 3 排物理锚固装置,发现倒齿之间均黏结有岩体,说明倒齿锚固装置胀开嵌入岩体后,上下倒齿重叠区域之间的岩体在锚杆拉拔过程中并不能提供承载力,且随着锚杆拉拔并一直黏附在倒齿之间。此外,通过观察图 14 可知,胀开后的倒齿能够有效嵌入岩体中,随着锚杆的拉拔,岩体产生了屈服破坏,并最终发生局部剪切破坏,同时锚杆的锚固力并没有随着拉拔的进行而失效,而是持续作用于岩体中,有效地提升了锚固质量。



图 13 不同排物理锚固装置倒齿胀开示意图

Fig.13 Schematic diagram of inverted teeth expansion of different rows of physical anchoring devices

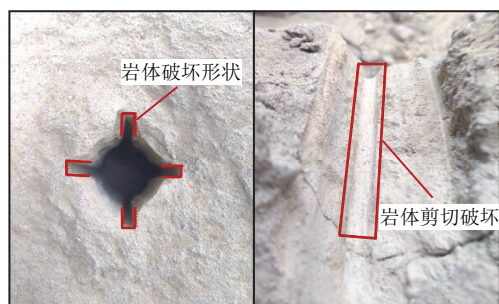


图 14 物理锚固作用下软弱岩体破坏形态

Fig.14 Failure mode of weak rock mass under physical anchoring effect

5 结 论

(1) 为确保软弱岩体中锚杆的锚固效果, 本文提出了一种物理锚固方法, 研发了一种物理锚固装置, 并设计了物理锚固装置的结构构造, 同时对该物理锚固装置的工作原理进行分析, 明确了该装置在软弱岩体中的工作机制。

(2) 通过建立不同倒齿排数物理锚固装置的数值模型, 对锚杆进行了拉拔数值模拟, 掌握了不同倒齿尺寸参数的锚杆拉拔规律, 进而得到了锚固效果最好的最优倒齿参数。数值模拟结果表明, 在物理锚固装置所允许的结构尺寸范围内, 倒齿高度越大, 角度越大, 排数越多, 锚杆的锚固性能就越好, 能够承受的轴向承载能力就越大。

(3) 为了验证数值模拟结果的有效性, 开展了室内对比拉拔试验。试验结果显示, 倒齿排数的增多会提升锚杆锚固力, 而且锚固力的增加趋势符合数值模拟规律; 同时与传统锚固试验结果对比发现, 采用物理锚固装置进行拉拔的锚杆, 不会发生锚固力衰减问题, 且与 3 排倒齿锚杆极限锚固力相比, 锚固力提升近 14.3%, 极限位移提升了 300%。

参 考 文 献

[1] 康永水, 耿志, 刘泉声, 等. 我国软岩大变形灾害控制技术方法与研究进展[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2035-2059.
KANG Yong-shui, GENG Zhi, LIU Quan-sheng, et al.

Research progress on support technology and methods for soft rock with large deformation hazards in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(8): 2035-2059.

[2] PINAZZI P C, SPEARING(SAM) A J S, JESSU K V, et al. Mechanical performance of rock bolts under combined load conditions[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2020, 30(2): 167-177.

[3] ZHU C X, CHANG X, MEN Y D, et al. Modeling of grout crack of rockbolt grouted system[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2015, 25: 73-77.

[4] LIU S W, HE D Y, JIA H S, et al. Anchoring eccentricity features and rectifying devices for resin grouted bolt/cable bolt[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2022, 32(5): 1059-1073.

[5] 王文杰, 刘超, 黄永祥, 等. 动静载下全长砂浆锚固玻璃钢锚杆受力及失效特征分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3617-3628.
WANG Wen-jie, LIU Chao, HUANG Yong-xiang, et al. Stress and failure characteristics of full-length mortar anchored GFRP bolts under dynamic and static loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(12): 3617-3628.

[6] HE D Y, LIU S W, FU M X, et al. Experimental study on resin-anchored bolt concentricity including a device for more consistent bolt centering[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2021, 148.

[7] 康红普, 崔千里, 胡滨, 等. 树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 1-10.
KANG Hong-pu, CUI Qian-li, HU Bin, et al. Analysis on anchorage performances and affecting factors of resin bolts[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(1): 1-10.

[8] 朱家锐, 毛明发, 常伟华, 等. 注浆加固在强动压下软岩巷道支护中的作用[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 37-39.
ZHU Jia-rui, MAO Ming-fa, CHANG Wei-hua, et al. The role of grouting reinforcement in soft rock roadway support under strong dynamic pressure[J]. **Coal Technology**, 2017, 36(11): 37-39.

[9] 张伟光, 陈全君, 刘少伟, 等. 软岩巷道锚杆孔孔底增孔锚固方式及扩孔参数研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 53-58.
ZHANG Wei-guang, CHEN Quan-jun, LIU Shao-wei, et al. Study on bottom enlarged anchoring mode and reaming parameters of bolt boreholes in mine soft rock roadway[J]. **Coal Science and Technology**, 2017, 45(12): 53-58.

[10] 王志, 尹延春, 赵同彬, 等. 软岩巷道扩孔锚固机理及支护控制数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 35-43.
WANG Zhi, YIN Yan-chun, ZHAO Tong-bin, et al.

- Numerical simulation of reaming anchoring mechanism and support control in soft rock roadway[J]. **Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)**, 2021, 40(3): 35-43.
- [11] 刘宇鹏, 夏才初, 吴福宝, 等. 高地应力软岩隧道长、短锚杆联合支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 105-114.
- LIU Yu-peng, XIA Cai-chu, WU Fu-bao, et al. A combined support technology of long and short bolts of soft rock tunnels under high ground stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(1): 105-114.
- [12] 张红军, 李海燕, 张太平, 等. 深部软岩巷道高预应力增阻大变形锚杆研究及工程应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 409-418.
- ZHANG Hong-jun, LI Hai-yan, ZHANG Tai-ping, et al. Research and engineering application of high pre-stressed resistance and large deformation bolt in deep soft rock roadway[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(2): 409-418.
- [13] 余伟健, 李可, 刘泽, 等. 煤巷弱胶结顶板稳定性分析与变形控制技术[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 2): 382-391.
- YU Wei-jian, LI Ke, LIU Ze, et al. Stability analysis and deformation control technology for weakly cemented roof of coal roadway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.2): 382-391.
- [14] 刘方, 胡雄玉, 高峰. 管片衬砌配合碎石可压缩层与锚杆的支护型式研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(11): 55-62.
- LIU Fang, HU Xiong-yu, GAO Feng. Study on support type of segment lining with crushed stone compressible layer and bolt[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2019, 51(11): 55-62.
- [15] 贾后省, 王璐瑶, 刘少伟, 等. 巷道含水软岩顶板锚索树脂锚固增效方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 938-947.
- JIA Hou-sheng, WANG Lu-yao, LIU Shao-wei, et al. Anchor cable resin anchoring synergistic method for roadway water-bearing soft rock roof[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(5): 938-947.
- [16] 殷齐浩, 王洪闪, 李廷春, 等. 全长黏结大变形让压锚杆波纹套筒阻力计算及试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(1): 27-32.
- YIN Qi-hao, WANG Hong-shan, LI Yan-chun, et al. Calculation and experimental study on the resistance of corrugated sleeve of full-length bonded and large deformation yielding bolt[J]. **Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)**, 2021, 40(1): 27-32.
- [17] 赵象卓, 张宏伟, CAO Chen, 等. 不同围岩条件下锚杆肋间距与锚固力优化研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1263-1270, 1280.
- ZHAO Xiang-zhuo, ZHANG Hong-wei, CAO Chen, et al. Optimization of bolt rib spacing and anchorage force under different surrounding rock conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(4): 1263-1270, 1280.
- [18] 林健, 任硕. 树脂全长锚固锚杆外形尺寸优化数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 273-278.
- LIN Jian, REN Shuo. Numerical simulation study on the size optimization of resin full-length anchored bolt[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2015, 32(2): 273-278.
- [19] CAO C, NEMCIK J, AZIZ N, et al. Analytical study of steel bolt profile and its influence on bolt load transfer[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 60: 188-195.
- [20] HO D A, BOST M, RAJOT J P. Numerical study of the bolt-grout interface for fully grouted rockbolt under different confining conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2019, 119: 168-179.
- [21] 刘学伟, 刘泉声, 汪志强, 等. 基于格栅拱架的软岩巷道分步联合控制技术研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 1): 469-478, 489.
- LIU Xue-wei, LIU Quan-sheng, WANG Zhi-qiang, et al. Step by step and combined supporting technique with steel grid frame for soft and fractured rock roadway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.1): 469-478, 489.
- [22] 吴拥政, 郭罡业, 汪占领. 弱含水层下软岩巷道“一隔三强”控制原理与技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 72-82.
- WU Yong-zheng, GUO Gang-ye, WANG Zhan-ling. Control principle and technology of soft rock roadway under weak aquifer[J]. **Coal Science and Technology**, 2023, 51(2): 72-82.
- [23] 饶梟宇, 唐树名, 张永兴, 等. 注浆体配合比改善岩锚抗拔特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 390-396.
- RAO Xiao-yu, TANG Shu-ming, ZHANG Yong-xing, et al. Experimental study on improving the anti-pulling characteristics of rock anchor by grouting mixture ratio[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 390-396.
- [24] TEYMEN A, KILIC A. Effect of grout strength on the stress distribution (tensile) of fully-grouted rockbolts[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 77: 280-287.