

赵洪瑞. 软岩巷道锚索多段扩孔树脂锚固增强技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2026, 8(2): 023513.

ZHAO Hongrui. Research on multi-segment reaming resin anchoring enhancement technology for cable bolts in soft rock roadways[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2026, 8(2): 023513.

软岩巷道锚索多段扩孔树脂锚固增强技术研究

赵洪瑞^{1,2}

(1. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122; 2. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 为解决软岩巷道锚索扩孔锚固中树脂锚固剂搅拌不充分、扩孔区域充填不密实、锚索偏心及孔壁损伤等问题, 提出一种基于多段扩孔锚固 MRAE 的树脂锚固增强技术。通过理论分析揭示了 MRAE 的“分级破碎-梯度搅拌”、“导升-封堵”协同控流及“居中限位-径向支撑”作用机理, 阐明其对树脂锚固剂搅拌效果、锚固体强度、抗拔力及锚索居中性能的提升机制; 采用数值模拟对比分析了 MRAE 与普通锚索对树脂锚固剂的搅拌流场特征, 验证了 MRAE 对树脂运移速度和扩散范围的增强作用; 通过实验室试验研究了 MRAE 对锚索钻进推力、扭矩及拉拔力的影响, 结果表明增强锚固组拉拔力峰值平均值 (36.5 kN) 是普通锚固组 (14.9 kN) 的 2.5 倍, 且居中度显著提高; 现场试验进一步验证了该技术的有效性, 软岩巷道中增强锚固锚索的拉拔力和预紧力均达到设计值, 顶板离层位移量较普通锚固减少 1.52 倍, 在不扩孔工况下其锚固力也满足工程要求。研究成果为软岩巷道锚索锚固质量提升提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 软岩巷道; 锚索扩孔锚固; MRAE; 锚固增强技术; 顶板控制

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2026)02-3513-22

Research on multi-segment reaming resin anchoring enhancement technology for cable bolts in soft rock roadways

ZHAO Hongrui^{1,2}

(1. CCTEG Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: To address issues such as insufficient stirring of resin anchoring agent, inadequate filling in reamed areas, eccentricity of cable bolts, and damage to hole walls during cable bolts reaming anchoring in soft rock roadways, a resin anchoring enhancement technology based on the Multi-segment Reaming Anchoring Enhancement (MRAE) component was proposed. Through theoretical analysis, the mechanisms of MRAE, including the "graded crushing-gradient stirring", the synergistic flow control of "ascending guidance-sealing", and the "centralized limiting-radial support" were revealed, and the mechanisms by which MRAE enhances the stirring effect of resin anchoring agent, the strength of the anchor solid, the pull-out resistance, and the centering performance of the cable bolt were also clarified. Besides, numerical simulations were conducted to comparatively analyze the characteristics of the stirring flow field of resin anchoring agent between MRAE and ordinary cable bolts, verifying that MRAE enhances the migration speed and diffusion range of resin. Moreover, laboratory experiments were performed to study the influence of MRAE on the drilling thrust, torque, and pull-

out force of cable bolts. The results show that the average peak pull-out force of the enhanced anchoring group (36.5 kN) is 2.5 times that of the ordinary anchoring group (14.9 kN), and the centering degree is significantly improved. Field tests further verify the effectiveness of this technology. In soft rock roadways, both the pull-out force and pre-tightening force of the enhanced anchoring cable bolts meet the design values. The roof separation displacement is reduced by a factor of 1.52 compared with ordinary anchoring. Even under non-reaming conditions, its anchoring force still meets engineering requirements. The research results provide a theoretical basis and technical support for improving the anchoring quality of cable bolts in soft rock roadways.

Key words: soft rock roadway; reaming resin; MRAE; anchoring reinforcement; roof anchoring control

锚索树脂锚固以其锚固深度大、控制范围广、承载能力强、可提供高预紧力、锚固系统稳定可靠等特点在采矿和岩土工程围岩控制中发挥了显著作用^[1-3]。但对于岩体强度低,层理、节理、割理等结构面裂隙发育的软弱围岩体,常导致锚索锚固力低,围岩变形量大,支护效果不理想^[4-5]。因此,常通过加大钻孔深度至坚硬岩层、增加锚固长度、扩大钻孔直径、围岩注浆及钻孔底部多段扩孔等方法提高软弱围岩体锚索锚固效果^[6-8]。其中,钻孔底部多段扩孔法较其他几种方法成本更低、效果更好,并已在煤矿软岩巷道支护、基坑和边坡锚固及滑坡治理等工程中广泛应用^[9-10]。

以煤矿软岩巷道支护为例,当前巷道锚索进行扩孔锚固时,仍按照传统圆柱形钻孔的锚固方式锚固。即用锚索顶住树脂锚固剂推入钻孔中,在钻机推进作用下,将多卷树脂锚固剂强力挤压推进至孔底区域。并按照任意动力参数(搅拌速率、搅拌时间及推进速度)推进搅拌不同固化速度的树脂锚固剂,待锚索无法继续推进搅拌时完成锚固。由于锚索外表无助较光滑,锚固深度大,搅拌路径长,仅依靠锚索无法对树脂锚固剂有效破碎和均匀搅拌。并且在螺旋钻进过程中锚索和其搅拌端直接与钻孔孔壁接触,易损伤钻孔空间结构,这种锚固方式往往无法保证其锚固性能^[11-13]。而锚索扩孔锚固性能的优劣对软弱围岩体巷道支护效果起关键作用,树脂锚固剂充分破碎混合和均匀密实充满扩孔区域是扩孔锚固工程中重要的2个关键点,扩孔锚固性能与树脂锚固剂搅拌效果和围岩与树脂锚固剂界面间的物理力学性质密切相关^[14-15]。对此,许多学者进行了相关方面的研究与试验。刘少伟、罗宏保、付孟雄等^[16-18]发明一种树脂锚固剂定向导升装置和锚索孔内扩孔工艺并通过试验验证了其树脂

锚固剂的定向导升性能和预应力锚索孔内扩孔效果; CAMPBELL 等^[19]发现锚索不能有效搅拌树脂锚固剂,时常导致部分树脂锚固剂未破碎或未充分反应;王伟等^[20-21]提出一种锚杆、锚索树脂锚固增效技术并通过系列试验验证了其锚固增效性能; AZIZ 等^[22-24]通过试验发现锚索锚固力与其有效锚固长度密切相关,且有效锚固长度每增加 10 mm,锚固力至少增加 10 kN。大量试验及工程案例表明^[25-26],锚索锚固系统的薄弱环节是围岩体与树脂锚固剂间的界面,其界面黏结强度较低。王曾辉、FU 等^[27-28]发现扩孔条件下锚固体与岩土体之间的有效接触面积越大,锚杆在受拉时的锚固力越高,锚固体与围岩体之间的相互作用力越大,并认为锚杆扩孔技术有较强的适用性和推广价值;刘少伟等^[29]通过数值模拟和实验室试验确定了楔角为 40°的正楔形为最佳锚固扩孔形状,并验证了正楔形扩孔的作用机理与提高锚固系统锚固力的有效性;贾后省等^[30-31]通过试验确定了锚索在软弱围岩体中进行多圆锥形扩孔锚固可有效防止锚固力的衰减;CAO 等^[32]通过试验发现将一些金属颗粒混入树脂锚固剂中,可有效提高锚杆拉拔试验的平均峰值载荷和系统的总吸能量。综上所述,学者们通过探究树脂锚固剂搅拌方式、普通圆柱形钻孔锚固增效技术、扩孔锚固空间结构和树脂锚固剂改性等方面对锚固性能的影响,对增强软弱围岩体锚杆、锚索树脂锚固性能做了大量研究,并得出许多有益成果。但以上研究成果均未从锚索推进过程控制、树脂锚固剂正确破碎搅拌和扩孔区域均匀密实充填等方面进行整体性研究,并且目前尚无针对软弱围岩体锚索多段扩孔树脂锚固增效方面的研究。因此,本文基于研制的锚索多段扩孔锚固增强组件(MRAE),通过理论分析、数值模拟、实验室试验和现场试验等方

法, 分析其工作原理, 验证 MRAE 的系列有益效果, 提出一种锚索多段扩孔树脂锚固增强技术, 对提升软弱围岩锚索锚固质量具有重要工程意义。

1 软岩巷道锚索扩孔锚固特征与锚固增强机理分析

1.1 软岩巷道锚索扩孔锚固特征

在锚索锚固前, 预先钻孔并使用多段扩孔刀具^[30]进行孔底扩孔, 然后按照支护参数向钻孔内逐个安放树脂锚固剂, 在长距离螺旋推进过程中, 锚索弯折紧贴孔壁, 破坏钻孔空间结构, 使锚固路径偏移不能到达孔底, 导致锚索与钻孔不居中, 锚索

外露长度大且施加的预紧力低(图 1(a))。同时由于扩孔区域空间较大且树脂锚固剂间接触自由无约束, 使得部分树脂锚固剂不规则堆集在扩孔区域, 不参与搅拌(图 1(a))。在锚固过程中, 使用不合理参数(推进速度、搅拌速度及搅拌时间)搅拌树脂锚固剂, 常发生外部树脂锚固剂已经固化, 而里部树脂锚固剂未搅拌的情况, 严重减小锚固长度(图 1(b))。由于锚索外表无肋较光滑, 搅拌效果差, 致使扩孔区域四周聚集了大量未参与搅拌反应的树脂锚固剂, 导致锚索与扩孔孔壁无效黏结(图 1(c))。且不同区域树脂锚固剂的密实度差异大, 树脂锚固剂外流损失严重(图 1(d))。

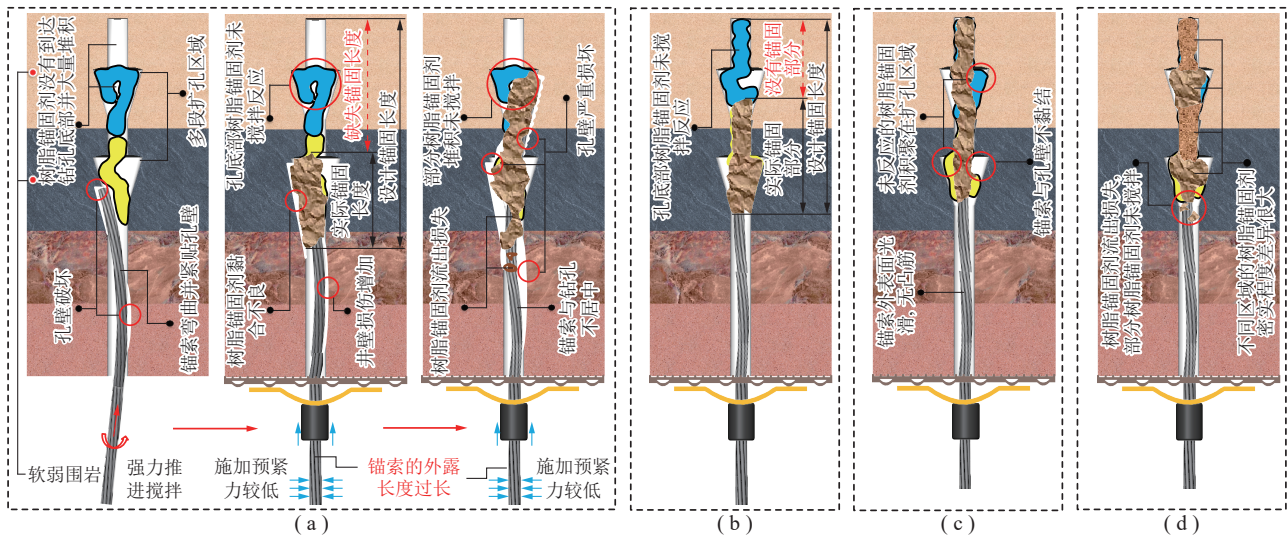


图 1 软岩巷道锚索扩孔锚固不良现象及特征示意

Fig. 1 Schematic diagram of phenomena and characteristics of poor anchoring in cable bolt reaming for soft rock roadways

1.2 与传统锚索扩孔技术对比分析

传统锚索扩孔技术中, 普通扩孔锚固虽通过扩大孔底空间试图提升锚固效果, 但因缺乏有效的搅拌和导向结构, 常出现树脂锚固剂搅拌不充分、锚固体密实度不足的问题, 且锚索易与孔壁接触造成孔壁损伤, 影响锚固力的发挥。分段锚固技术在一定程度上考虑了不同区域的锚固需求, 然而其各段之间的协同作用较弱, 难以实现树脂锚固剂在整个扩孔区域的均匀分布和充分反应。预应力锚固技术虽能施加预紧力, 但在软岩这种特殊地质条件下, 由于锚固体与围岩界面黏结强度低, 预紧力损失较快, 难以长期维持有效的支护效果。

针对上述问题, 笔者研制的 MRAE 通过“分级破碎-梯度搅拌”设计, 可解决普通扩孔锚固中树脂

锚固剂搅拌不充分的问题; 通过“导升-封堵”协同控流设计, 可克服分段锚固中树脂锚固剂分布不均的缺陷; 借助“居中限位-径向支撑”设计, 可减少预应力锚固中因锚索偏心导致的预紧力损失, 可显著提升在软岩巷道中的锚固性能。

1.3 MRAE 对锚索扩孔锚固性能理论分析

基于 1.1 节和 1.2 节所述扩孔锚固特征, 本文通过笔者研制的 MRAE (图 2) 可对树脂锚固剂进行充分、高效的破碎搅拌和封堵导升, 使扩孔区域充满均匀密实的树脂锚固剂, 确保锚索与钻孔居中, 不损伤孔壁, 增强锚固系统的锚固力。

MRAE 由钻进搅拌装置(图 2(a))、扩孔搅拌装置(图 2(b))、封堵装置(图 2(c))和居中限位装置(图 2(d))组成。其中钻进搅拌装置由上至下依次为

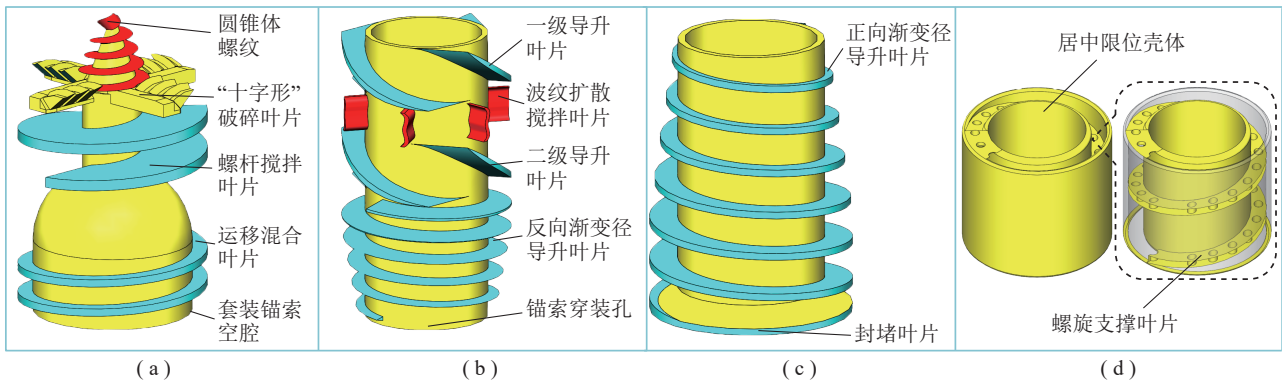


图2 MRAE 设计图

Fig. 2 MRAE design drawing

圆锥体螺纹、“十字形”破碎叶片、螺杆搅拌叶片、运移混合叶片和套装锚索空腔。扩孔搅拌装置由上至下依次为一级导升叶片、波纹扩散搅拌叶片、二级导升叶片、反向渐变径导升叶片及锚索穿装孔。封堵装置由上至下依次为正向渐变径导升叶片和封堵叶片。居中限位装置由上至下依次为居中限位壳体 and 螺旋支撑叶片 (此装置不参与树脂锚固剂搅拌)。

1.3.1 MRAE 设计理念

MRAE 的设计核心是通过结构化的功能模块协同作用, 解决树脂锚固剂在扩孔区域的均匀填充、高效搅拌及锚索居中问题, 其设计理念深度融合了搅拌动力学、流体力学及岩土力学原理。

(1) 基于搅拌动力学的“分级破碎-梯度搅拌”设计

树脂锚固剂的固化效果依赖于其与锚索、孔壁的充分接触, 而扩孔区域的空间不规则性会导致搅拌不充分。MRAE 通过钻进搅拌装置与扩孔搅拌装置的分级协作, 实现锚固剂的高效破碎与混合, 其原理如下:

① “十字形”破碎叶片的剪切破碎机制

钻进搅拌装置顶部的“十字形”破碎叶片采用高剪切力设计, 当组件旋转时, 叶片边缘与锚固剂形成瞬时剪切面, 将块状锚固剂破碎为细小颗粒 (搅拌动力学中的“分散相破碎”原理)。这种设计可降低后续搅拌阻力, 为均匀混合奠定基础。

② 螺杆搅拌叶片与运移混合叶片的轴向输运与径向扩散

螺杆搅拌叶片的螺旋结构借鉴了螺杆泵的流体输送原理, 通过旋转产生轴向推力, 将破碎后的锚固剂向下输送; 而运移混合叶片的倾斜角度 (通常设计为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$) 则在轴向输运的同时, 产生径

向离心力, 使锚固剂向孔壁方向扩散 (搅拌动力学中的“径向混合”效应), 避免局部堆积。

③ 波纹扩散搅拌叶片的湍流强化作用

扩孔搅拌装置中的波纹扩散搅拌叶片表面的凹凸结构, 在旋转时会引发锚固剂流体的湍流扰动 (流体力学中的“边界层分离”现象)。湍流状态下, 锚固剂的分子扩散系数显著提高, 可增强其与孔壁缝隙的渗透融合, 解决扩孔区域“边角填充不足”的问题。

(2) 基于流体力学的“导升-封堵”协同控流设计

扩孔区域的树脂锚固剂易因重力或钻孔倾斜出现“沉降-流失”, MRAE 通过扩孔搅拌装置的导升叶片与封堵装置的梯度限流, 实现锚固剂的定向流动与区域约束, 原理如下:

① 一级/二级导升叶片的轴向泵送效应

扩孔搅拌装置的一级、二级导升叶片采用反向螺旋设计 (与螺杆搅拌叶片旋向相反), 旋转时产生向上的轴向升力 (类似轴流泵的“升力原理”), 可将下沉的锚固剂向上导升, 平衡重力引起的沉降, 确保扩孔区域上部填充饱满。

② 正向/反向渐变径导升叶片的压力梯度调控

封堵装置的正向渐变径导升叶片与扩孔搅拌装置的反向渐变径导升叶片形成“收缩-扩张”流道。

正向渐变径导升叶片 (直径由小到大) 使锚固剂流体在流动中因截面扩大而压力降低 (伯努利原理), 减缓流速以减少飞溅; 反向渐变径导升叶片 (直径由大到小) 则通过截面收缩提高局部流速, 增强锚固剂对孔壁的冲刷填充 (类似水枪的“射流填充”效应)。

③ 封堵叶片的边界约束作用

封堵装置的封堵叶片直径略小于扩孔区域最

大直径(预留 1~2 mm 间隙), 其作用类似“动态密封圈”。旋转时, 叶片与孔壁形成柔性约束, 既允许少量锚固剂通过间隙渗透(确保孔壁湿润), 又能阻挡大部分锚固剂向孔外流失, 通过控制“漏失量”维持扩孔区域的压力平衡, 保证锚固剂在高压下密实填充。

(3) 基于流体力学与岩土力学的“居中限位-径向支撑”设计

锚索的居中与否直接影响锚固力的均匀分布, MRAE 的居中限位装置通过力学平衡与流体阻力协同作用, 实现锚索在复杂孔道中的稳定居中, 原理如下:

①螺旋支撑叶片的径向力平衡原理

居中限位装置的螺旋支撑叶片采用对称分布设计(通常为 3~4 片), 旋转时叶片与孔壁接触产生径向支撑力, 且对称结构确保各方向支撑力大小相等(力学中的“力系平衡”), 抵消锚索因自重或钻孔偏斜产生的偏心力矩, 实现轴向居中。

1.3.2 MRAE 对锚索搅拌性能影响分析

在搅拌动力参数确定情况下, 锚固增强技术的核心在于如何高效搅拌树脂锚固剂。因此, 为研究锚索搅拌性能, 选取与 MRAE 相同长度的锚索段, 分别计算其搅拌功率, 计算模型如图 3 所示。

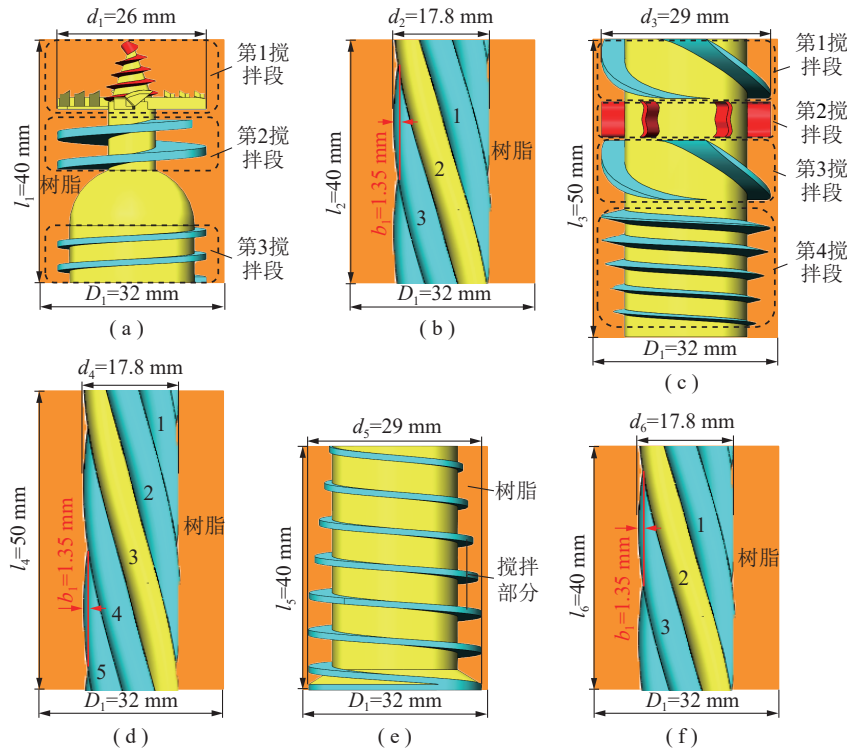


图 3 锚索与 MRAE 搅拌功率计算模型

Fig. 3 Cable bolt and MRAE stirring power calculation model

由图 3 所示, 仅用锚索搅拌时, 位于同一斜交中心的前后两股扭曲钢绞线可视为一对倾斜交错叶片(图 3(b)、(d)、(f)中锚索段黄色部分)。因此, 在 $l_2=40\text{ mm}$ 、 $l_4=50\text{ mm}$ 、 $l_6=40\text{ mm}$ 的锚索段内, 可分别将其视为拥有 3 对、5 对、3 对倾斜交错叶片的搅拌装置, 则 l_2 、 l_4 、 l_6 锚索段的搅拌功率 P_{l_2} 、 P_{l_4} 、 P_{l_6} ^[21, 33] 分别为

$$P_{l_2} = N_{p_{l_2}} \rho S_r^3 d_2^5 \quad (1)$$

$$P_{l_4} = N_{p_{l_4}} \rho S_r^3 d_4^5 \quad (2)$$

$$P_{l_6} = N_{p_{l_6}} \rho S_r^3 d_6^5 \quad (3)$$

式中, $N_{p_{l_2}}$ 、 $N_{p_{l_4}}$ 、 $N_{p_{l_6}}$ 分别为 l_2 、 l_4 、 l_6 锚索段内单对倾斜交错叶片的功率准数, 具体计算方法见式(4)~(6); ρ 为树脂锚固剂密度, $\rho=2\ 400\text{ kg/m}^3$; S_r 为锚索搅拌速率, $S_r=8.33\text{ r/s}$; d_2 、 d_4 、 d_6 分别为锚索旋转外接圆直径, $d_2=17.8\text{ mm}$, $d_4=17.8\text{ mm}$, $d_6=17.8\text{ mm}$ 。

$$N_{p_{l_2}} = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{1\ 000 + 1.2R_c^{0.66}}{1\ 000 + 3.2R_c^{0.66}} \right)^p \left(\frac{l_2}{D_1} \right)^{(0.35+b_1/D_1)} (\sin \theta)^{1.2} \quad (4)$$

$$N_{P_4} = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{1000 + 1.2R_c^{0.66}}{1000 + 3.2R_c^{0.66}} \right)^p \left(\frac{l_4}{D_1} \right)^{(0.35+b_1/D_1)} (\sin \theta)^{1.2} \quad (5)$$

$$N_{P_6} = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{1000 + 1.2R_c^{0.66}}{1000 + 3.2R_c^{0.66}} \right)^p \left(\frac{l_6}{D_1} \right)^{(0.35+b_1/D_1)} (\sin \theta)^{1.2} \quad (6)$$

式中, A 、 B 、 p 为方程式参数, 如式 (7)~(9); Re 为雷诺系数, $Re = \frac{d_2^2 N \rho}{\mu} = \frac{d_4^2 N \rho}{\mu} = \frac{d_6^2 N \rho}{\mu}$, μ 为树脂锚固剂黏度系数, $\mu=0.04 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$; D_1 为钻孔直径, $D_1=32 \text{ mm}$; b_1 为锚索扭曲斜肋凸起高度, $b_1=1.35 \text{ mm}$; θ 为锚索钢绞线扭曲角, $\theta=60^\circ$ 。

$$A = 14 + \left(\frac{b_1}{D_1} \right) \left[670 \left(\frac{d_2}{D_1} - 0.6 \right)^2 + 185 \right] \quad (7)$$

$$B = 10 \left[1.3 - 4(b_1/D_1 - 0.5)^2 - 1.14(d_2/D_1) \right] \quad (8)$$

$$p = 1.1 + 4(b_1/D_1) - 2.5(d_2/D_1 - 0.5)^2 \quad (9)$$

将各参数分别代入式 (1)~(9) 中, 可得 l_2 、 l_4 、 l_6 锚索段的搅拌功率 P_{l_2} 、 P_{l_4} 、 P_{l_6} 分别为 0.005 3、0.009 5、0.005 3 W。

采用 MRAE 搅拌时, 搅拌功率主要取决于各个增强组件的形状和旋转外接圆直径。其中, 钻进搅拌装置考虑 3 个搅拌部分, 由上至下分别可视为四叶螺旋桨结构、右旋宽叶螺杆结构、右旋窄叶螺杆结构 (图 3(a) 中虚线框选部分)。扩孔搅拌装置考虑 4 个搅拌部分, 由上至下分别可视为四叶左旋斜桨结构、弯叶圆盘涡轮结构、四叶左旋斜桨结构、左旋反向渐变径螺杆结构 (图 3(c) 中虚线框选部分)。封堵装置由上至下可视为左旋正向渐变径螺杆结构 (图 3(e))。则 MRAE 各组件的搅拌功率 P_{ds} (钻进搅拌装置)、 P_{bes} (扩孔搅拌装置)、 P_b (封堵装置) 分别为^[34]

$$P_{ds} = K_{ds} N^2 d_1^2 \mu \quad (10)$$

$$P_{bes} = K_{bes} N^2 d_3^2 \mu \quad (11)$$

$$P_b = K_b N^2 d_5^2 \mu \quad (12)$$

式中, K_{ds} 、 K_{bes} 、 K_b 分别为钻进搅拌装置、扩孔搅拌装置、封堵装置的功率常数, 其中 K_{ds} 为钻进搅拌装置中 3 个搅拌结构功率常数的平均值, K_{bes} 为扩孔搅拌装置中 4 个搅拌结构功率常数的平均值, $K_{ds} = 120$ 、 $K_{bes} = 150$ 、 $K_b = 100$; d_1 、 d_3 、 d_5 分别为钻进搅拌装置、扩孔搅拌装置、封堵装置的旋转外接圆直径, $d_1=26 \text{ mm}$, $d_3 = d_5=29 \text{ mm}$ 。

将各参数分别代入式 (10)~(12) 中, 可得搅拌功率 $P_{ds} = 0.225 2 \text{ W}$, $P_{bes} = 0.350 1 \text{ W}$, $P_b = 0.187 6 \text{ W}$ 。

综上所述, 采用 MRAE 搅拌时, 其搅拌功率远大于锚索数十倍。因此, 从树脂锚固剂搅拌效果看, 锚索安装 MRAE 较仅锚索情况, 可以给予树脂锚固剂更高的搅拌动力作用, 尤其是对扩孔区域的树脂锚固剂施加的动力作用最强, 有效促进了树脂锚固剂的高效混合反应。

1.3.3 MRAE 对锚固体强度及抗拔力影响分析

锚固体强度是岩锚体系在长期荷载作用下保持稳定性和耐久性的重要因素。而传统锚索扩孔锚固方式常因锚固段局部不密实或空锚, 存在众多空洞或无效黏结区域 (图 1), 造成锚固体力学性能降低。根据锚固体抗压强度与其内部各种空洞体积总和间的关系得^[20](式 (13)), 锚固体抗压强度 R_c 与其内部各种空洞体积总和 V_k 为一次反比关系, 即锚固体内部各种空洞的体积总和 V_k 越大, 抗压强度 R_c 越小。所以, 如何将 V_k 值降到最小是保证锚固体强度的关键。而锚索在 MRAE 封堵装置作用下, 可将树脂锚固剂全部压缩封堵在锚固长度内, 并持续导升不外流。同时在扩孔搅拌装置作用下, 可将锚固长度内的树脂锚固剂充分扩散搅拌, 充填密实。因此, 锚索在 MRAE 搅拌作用下提高了锚固体密实度, 进而增强了扩孔锚固体强度。

$$V_k = -\frac{V_T \sqrt{r_a}}{QR_0} R_c + V_T \quad (13)$$

式中, V_k 为锚固体内部各种空洞的体积总和, m^3 ; V_T 为锚固长度内充填密实的锚固体总体积, m^3 ; R_c 为锚固体抗压强度, MPa ; Q 为试验调整系数; R_0 为锚固体孔隙率为 0 时的抗压强度, MPa ; r_a 为锚固体平均孔径, mm 。

抗拔力不足是造成支护结构破坏的主要诱发因素。而传统锚索扩孔锚固方式形成的有效黏结区域小, 承载能力低 (图 1)。所以, 如何有效增强抗拔力是锚索扩孔锚固成功的关键。对于 MRAE 对树脂锚固剂的封堵导升和多级扩散搅拌充填密实的综合作用可简易等效为上下挤压树脂锚固剂的自膨胀作用。而自膨胀作用引发的正应力和密实度的提升效应是增强锚固体抗拔力的重要因素^[35]。锚固体及孔周边塑性区内外环单元体正应力和密实度提升效应如图 4 所示。

由图 4 可知, 当 MRAE 对树脂锚固剂搅拌作用等效为施加自膨胀应力后, 体积应变和界面正应力增量均会相应提高, 使得锚固体密实度和界面黏结

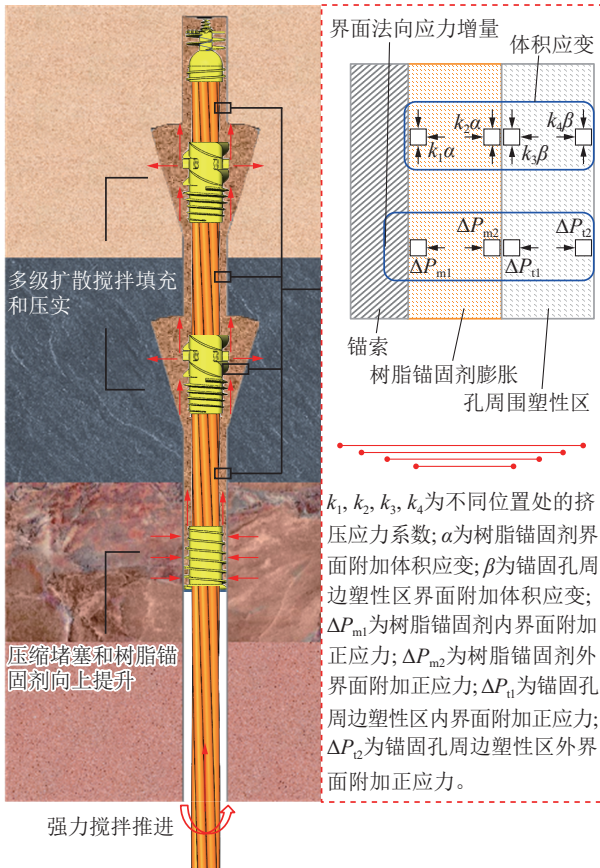


图4 锚固体及孔周边塑性区内外环单元体正应力和密实度提升效应示意

Fig. 4 Schematic diagram of the positive stress and compactness improvement effect of the inner and outer ring elements in the plastic zone around the anchorage body and the hole

强度明显增大(锚固体界面黏结强度可采用库仑抗剪强度公式表示,如式(14),其与界面法向应力为一次正比关系,具有相同变化趋势)^[36],最终导致扩孔锚固体抗拔力大幅提升。

$$\tau_u = c_i + \sigma_n \tan(\varphi_i) \quad (14)$$

式中, τ_u 为锚固体-锚固孔界面黏结强度; c_i 、 φ_i 为锚固体-锚固孔界面剪切强度指标,分别为界面黏聚力和界面内摩擦角; σ_n 为锚固体-锚固孔界面的法向应力。

1.3.4 MRAE 对锚索居中锚固性能及钻孔孔壁影响分析

锚索锚固偏心易导致锚固系统失效,对锚固质量存在重大影响。同时钻孔孔壁是否完整无损也将直接影响支护系统的剪切刚度(即影响对节理岩体滑移的控制性能)。而传统锚索扩孔锚固方式常因锚索长度大且易弯曲扭转致使锚索端头与索体

在螺旋推进过程中持续磨损孔壁,尤其在软岩节理岩体巷道中节理面孔口将会受到挤压破碎严重,剪切位移增加显著(图5(a))。并且由于扩孔区域空间变大和楔形顶面形状限制极易导致锚索不能正常到达孔底,倾斜锚固在楔形扩孔区域一侧,减小锚固长度,大幅削弱锚固力(图5(b))。通过简化计算锚索搅拌前在钻孔内顶住树脂锚固剂至无法继续推进时的挠度发现(式(15))^[37],锚索最大挠度 δ 位于钻孔内索体的中点,并且锚索在持续旋转搅拌作用下磨损孔壁,索体挠度不断增加,弯曲程度不断变大。孔壁受到索体的持续挤压摩擦产生破坏,呈喇叭状(图5(a))。同时根据锚索最大拉拔力表达式(式(16))^[38]看出,锚索拉拔力与锚索直径及弹性模量、树脂锚固剂弹性模量及泊松比、剪切强度、树脂锚固剂环形厚度(锚索相对钻孔的居中度)、有效锚固长度、围岩弹性模量及泊松比等因素有关^[39-41]。在具体工程背景下,除了树脂锚固剂环形厚度和有效锚固长度等因素与施工方式直接相关外,其余因素均为定值。所以如何提升锚索居中锚固性能(树脂锚固剂环形厚度均匀性)和增大有效锚固长度是保证锚固系统高抗拔力的决定因素。

$$\delta = e \left(\sec \frac{Fl}{2EI_z} - 1 \right) \quad (15)$$

式中, e 为对锚索的轴向压力偏离中心轴线的距离, m ; F 为对锚索的初始轴向压力, kN ; l 为钻孔内锚索搅拌前顶住树脂锚固剂至无法继续推进时的长度, m ; EI_z 为锚索在 $l/2$ 处平面内的弯曲刚度, $N \cdot mm^2$; E 为锚索的弹性模量, MPa ; I_z 为锚索在 $l/2$ 处截面的惯性矩, m^4 。

$$P_{max} = \pi d_b s_p \left[\omega \left(L + \frac{d_b}{2\alpha} \ln \omega - \Delta - x_0 \right) + \frac{1}{2} \Delta (1 + \omega) + \frac{d_b}{2\alpha} (1 - \omega) \right] \quad (16)$$

其中,

$$\omega = \frac{s_r}{s_p}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{2G_r G_g}{E_b \left[G_r \ln \left(\frac{d_g}{d_b} \right) + G_g \ln \left(\frac{d_0}{d_g} \right) \right]}}$$

$$G_r = \frac{E_r}{2(1 + \mu_r)}$$

$$G_g = \frac{E_g}{2(1 + \mu_g)}$$

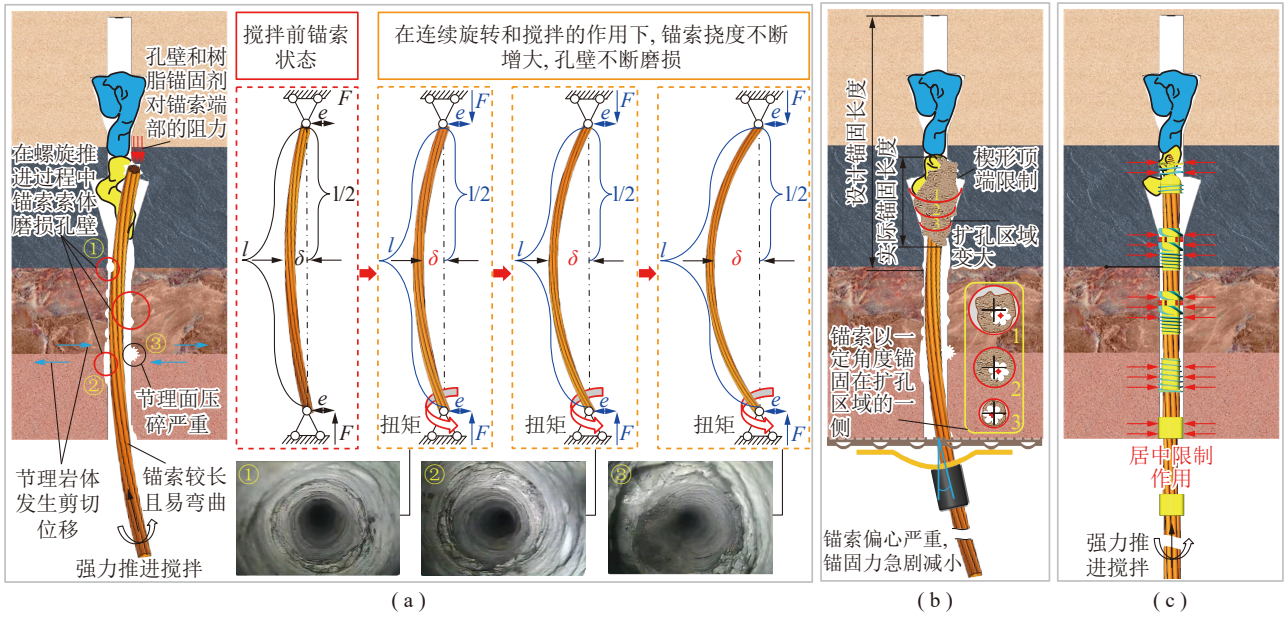


图5 传统锚索与加装 MRAE 锚索扩孔锚固居中性能对比示意

Fig. 5 Schematic diagram of comparison on centering performance between traditional cable bolt and cable bolt with MRAE added for reaming and anchoring

式中, s_r , s_p 分别为残余剪切强度、峰值剪切强度, MPa; L 为有效锚固长度, m; E_b , E_r , E_g 分别为锚索、围岩, 树脂锚固剂的弹性模量, MPa; d_g , d_b , d_0 分别为钻孔直径、锚索直径、锚索影响范围直径, m; μ_r , μ_g 分别为围岩、树脂锚固剂的泊松比; Δ 为锚索剪应力-剪应变曲线中线性部分剪应变的变化量, m; x_0 为锚索剪应力-剪应变曲线中剪应力为 0 时的应变值。

因此, 锚索加装 MRAE 后, 初期进入钻孔时由 MRAE 钻进搅拌装置、扩孔搅拌装置和封堵装置 3 者共同限位保证锚索端部与钻孔居中, 避免锚索端头损伤孔壁 (图 5(c))。而后为完全消除锚索旋转搅拌过程中其产生的最大挠度对孔壁的损伤影响, 不仅需对钻孔内索体二分之一中点位置居中限位, 也需对其他易产生挠度的中点位置限位, 所以锚索在等间距 (间距为 0.5 m) 安装若干个居中限位装置后可确保锚索居中, 避免索体磨损孔壁 (图 5(c))。当锚索进入扩孔区域后, 钻进搅拌装置钻入树脂锚固剂, 在其锥形螺纹结构作用下, 锚索受到的前进阻力较小, 不易弯曲。加之在扩孔搅拌装置、封堵装置及若干个居中限位装置的共同辅助下, 锚索最终顺利穿过多段扩孔区域到达孔底, 既与钻孔较为居中, 又保证了有效锚固长度充足。

1.3.5 扩孔锚固体强度对比分析

根据 Dulaska 的观点, 锚索在节理岩体中产生

横向变形时, 在索体弯矩最大处形成沿节理面反对称的 2 个塑性铰点, 且认为 2 个塑性铰点之间锚索所受的横向载荷是均匀分布的。提出节理面处锚固体抗剪强度 T_b 为

$$T_b = D_b^2 0.2 \sigma_y \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma_c}{0.03 \sigma_y \sin^2 \beta}} - 1 \right) \quad (17)$$

式中, D_b 为节理面处锚索直径, m; σ_y 为锚索屈服强度, MPa; σ_c 为锚固围岩单轴抗压强度, MPa; β 为锚索与节理面法向方向的夹角, ($^\circ$)。

基于式 (17), 因扩孔区域节理面处安装 MRAE 的锚索的直径大于普通锚索, 所以安装增强组件的锚索锚固体抗剪强度较普通锚索更高。

根据锚固体孔隙率与其抗剪压强度之间的关系

$$R_c = QR_0(1-p)r_a^{-\frac{1}{2}} \quad (18)$$

式中, R_c 为锚固体抗剪压强度, MPa; Q 为试验调整系数; R_0 为锚固体孔隙率为 0 时的抗压强度, MPa; p 为锚固体孔隙率; r_a 为锚固体平均孔径, mm。

由式 (18) 得, 锚固体孔隙率 p 与其抗压强度 R_c 为一次函数关系, p 越小, R_c 越大。同时锚固体孔隙率又与树脂锚固剂搅拌密实度为反比例函数关系, 锚固体孔隙率越小, 搅拌密实度越高。所以, 扩孔区域在 MRAE (扩孔搅拌装置) 的搅拌作用下提高了锚固体密实度, 进而提高了扩孔锚固体的抗剪压强度。

1.3.6 搅拌密实度对锚固性能影响分析

根据锚固药体孔隙率与其抗压强度之间的关系, 将式 (18) 变换可得:

$$p = -\frac{\sqrt{F_a}}{QR_0} R_c + 1 = kR_c + 1 \quad (19)$$

式中, k 为常数, $k = -\frac{\sqrt{F_a}}{QR_0}$ 。

由 (19) 式可得, 锚固体孔隙率 p 与其抗剪压强度 R_c 呈一次函数分布关系, 即 p 越大, R_c 越小。不同的搅拌效果导致锚固剂的密实度不同, 而孔隙率分布直接体现了密实度的优劣, 因此, 锚固体的密实程度直接决定了其抗压强度的高低, 即锚固体密实度越大, 其抗剪压强度越高。根据 1.3.1 节所述, 扩孔区域在 MRAE(扩孔搅拌装置) 的搅拌作用下

提高了其锚固体密实度。

1.4 软岩巷道锚索扩孔锚固性能增强机理

根据钻孔长度将若干居中限位装置等间距 (间距为 0.5 m) 套入锚索并黏结固定, 最上端的居中限位装置与封堵装置间隔 0.5 m。而后按照设计锚固长度和扩孔位置依次将封堵装置和扩孔搅拌装置套入锚索相应位置黏结固定, 最后将钻进搅拌装置黏结固定在锚索端头 (图 6(a))。此时, 锚索在 MRAE 作用下, 使钻进搅拌装置顶部的圆锥体螺纹刚好与树脂锚固剂底端中心点对点接触, 经点钻定位后 (锚索与树脂锚固剂同心), 将树脂锚固剂缓慢送入钻孔深部, 随着锚索不断深入, 若干居中限位装置逐个进入钻孔, 共同确保锚索居中不磨损孔壁, 锚索至孔底后使用合理参数 (表 1 和表 2) 搅拌

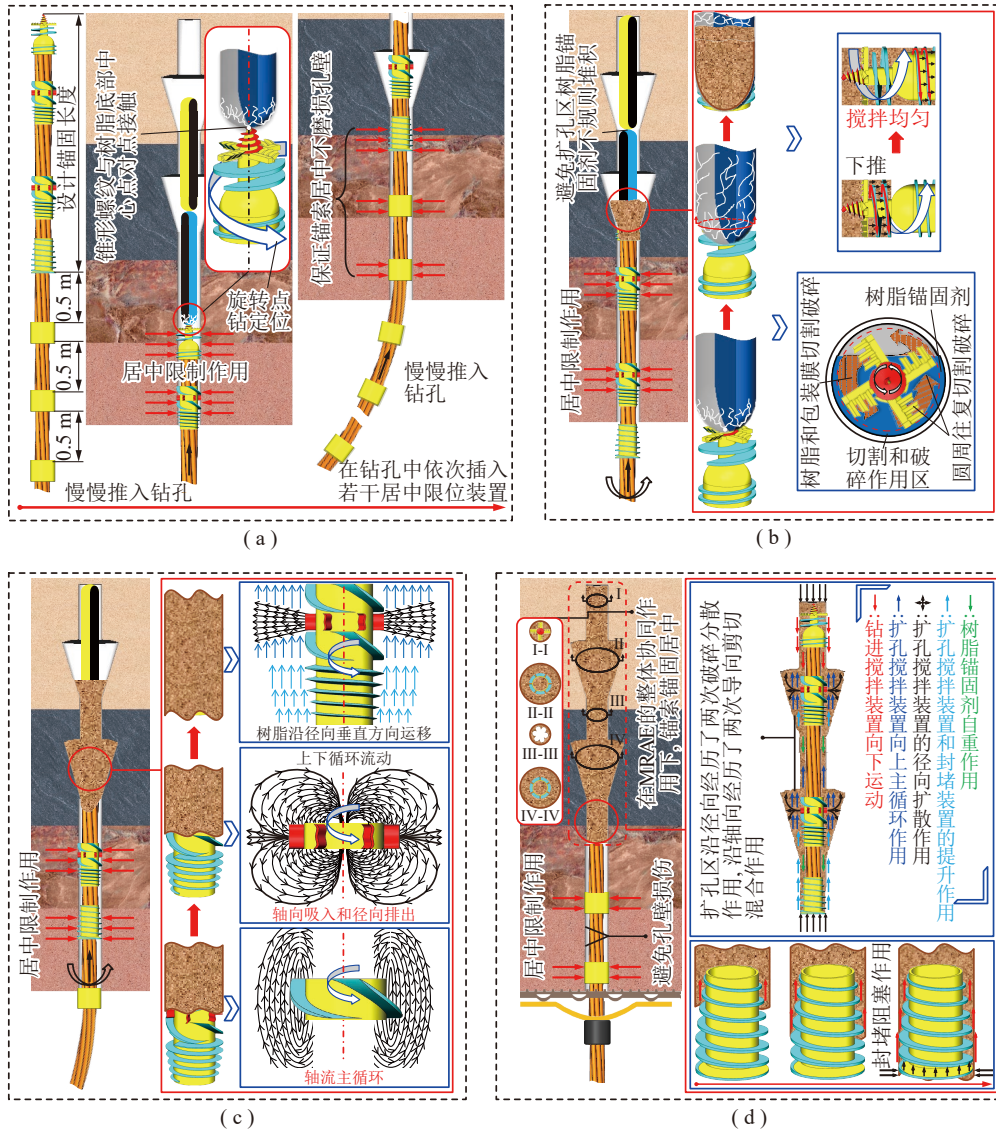


图 6 锚索扩孔锚固性能增强技术工作原理

Fig. 6 Working principle of the technology for enhancing the anchoring performance of cable bolt with hole enlargement

(图 6(a))。在右旋螺纹易于钻进作用下, 由点→小面→大面 (接触面不断增大), 力矩不断增大, 增加了钻进强度, 加之树脂锚固剂的自重作用, 可避免树脂锚固剂在扩孔区域不规则堆集 (图 6(b))。随着圆锥体螺纹钻进, “十字形” 破碎叶片与树脂锚固剂接触, 在破碎叶片若干截齿作用下, 可对树脂锚固剂包装膜进行圆周往复的多次切削破碎, 并搅拌树脂锚固剂分散成小块向下运移 (图 6(b))。接着块状的树脂锚固剂在螺杆搅拌叶片推移输送下搅拌混合, 并在运移混合叶片作用下二次搅拌反应 (图 6(b))。当锚索钻进第一段扩孔区域时, 树脂锚固剂与扩孔搅拌装置顶部接触, 在该装置的一级导升叶片的导升作用和贯穿整个叶片区域的轴向流主循环作用下, 树脂锚固剂螺旋向上方运移 (图 6(c))。随着锚索继续钻进, 扩孔搅拌装置逐步进入第一段扩孔区域, 并通过装置的波纹扩散搅拌叶片将树脂锚固剂从轴向吸入沿径向排出, 排出的树脂锚固剂一部分向上运动, 另一部分向下运动, 在扩孔区域内形成上、下两个循环流动, 且在每个叶片背后均有一对高速转动的漩涡, 有利于搅拌 (图 6(c))。待树脂锚固

剂运移至二级导升叶片时, 与一级导升叶片同理, 树脂锚固剂螺旋向上方运移 (图 6(c))。当扩孔搅拌装置完全进入第一段扩孔区域后, 树脂锚固剂经反向渐变径导升叶片作用会再次向上方推移 (图 6(c))。因此在扩孔搅拌装置 (波纹扩散搅拌叶片作用) 径向流作用明显, 有利于搅拌和 (一级导升叶片和二级导升叶片作用) 轴向流作用明显, 有利于扩孔区域内各层流间混合的双重作用下, 可提高扩孔区域内树脂锚固剂的充填密实度和搅拌均匀性。当锚索钻进至孔底后, 扩孔搅拌装置 (共 2 个) 分别进入上、下段扩孔区域, 至此每段扩孔区域内的树脂锚固剂均经历了两次沿径向方向的破碎分散作用 (波纹扩散搅拌叶片作用) 和沿轴向方向的导升剪切混合作用 (一级导升叶片和二级导升叶片作用), 使得树脂锚固剂充分混合, 反应完全 (图 6(d))。加之在封堵装置的渐变导升作用 (正向渐变径导升叶片) 和自锁阻挡作用 (封堵叶片) 下, 可持续导升和封堵树脂锚固剂向下外流 (图 6(d)), 最大程度保证设计锚固长度内充满均匀反应且密实度一致的树脂锚固剂, 并且树脂锚固剂与孔壁 (尤其是扩孔孔壁) 黏

表 1 树脂锚固剂单一使用搅拌参数参考

Table 1 Resin anchoring agent single use stirring parameter reference

树脂锚固剂类型	搅拌树脂锚固剂最优动力参数搭配			搅拌各类树脂锚固剂的动力因素显著性排序及参数调整
	搅拌速率 A/(r·min ⁻¹)	搅拌时间 B/s	推进速度 C/(mm·s ⁻¹)	
CK	500	15	23	考虑使用 CK 型 350 mm 树脂锚固剂和其动力因素显著性排序 (C>A>B), 修改搅拌时间为树脂锚固剂长度 L_{rc} /推进速度 C
K	500	25	14	考虑使用 K 型 350 mm 树脂锚固剂和其动力因素显著性排序 (A>B>C), 修改推进速度为 L_{rc}/B
Z	600	30	12	考虑使用 Z 型 350 mm 树脂锚固剂和其动力因素显著性排序 (B>A>C), 修改推进速度为 L_{rc}/B

表 2 树脂锚固剂组合使用搅拌参数参考

Table 2 Reference for stirring parameters of resin anchoring agent combination

树脂锚固剂类型	搅拌树脂锚固剂最优动力参数搭配			搅拌各类树脂锚固剂的动力因素显著性排序及参数调整
	搅拌速率 A/(r·min ⁻¹)	搅拌时间 B/s	推进速度 C/(mm·s ⁻¹)	
CK(里)	500	13	23	考虑使用 CK 型和 K 型 350 mm 树脂锚固剂及其动力因素显著性排序与混合使用时空关系, 修改 CK 型搅拌时间为 13s; 修改 K 型推进速度为树脂锚固剂长度 $L_{rc}/12(25-13)$
K(外)	500	25{12(穿过 K 型)+13(穿过 CK 型)}	29	
K(里)	500	20	17.5	考虑使用 K 型和 Z 型 350 mm 树脂锚固剂及其动力因素显著性排序与混合使用时空关系修改 K 型搅拌时间为 20 s 推进速度为 $L_{rc}/20$; 修改 Z 型推进速度为 $L_{rc}/10(30-20)$
Z(外)	600	30{10(穿过 Z 型)+20(穿过 K 型)}	35	
CK(里)	500	15	23	考虑使用 CK 型和 Z 型 350 mm 树脂锚固剂及其动力因素显著性排序与混合使用时空关系, 修改 CK 型搅拌时间为 $L_{rc}/23$; 修改 Z 型推进速度为 $L_{rc}/15(30-15)$
Z(外)	600	30{15(穿过 Z 型)+15(穿过 CK 型)}	23	

结牢固(图 6(d))。锚索在 MRAE 整体协同作用下不仅有效避免了钻孔空间结构的磨损破坏,也明显提高了锚索与树脂锚固剂和钻孔的相对居中度(锚固体环形厚度均匀),极大地增强了扩孔锚固系统的稳定性和抗拔能力。

2 MRAE 搅拌效果数值分析

2.1 数值模拟方案

在理论分析 1.3 节软岩巷道锚索扩孔锚固性能增强机理的基础上,为进一步理清和展示 MRAE 的作用机理,制定如下模拟方案:

- (1) 仅锚索搅拌树脂锚固剂过程模拟;
- (2) 安装增强组件(钻进搅拌装置、扩孔搅拌装置、封堵装置)的锚索搅拌树脂锚固剂过程模拟。

2.2 基本假设

锚索多段扩孔锚固过程十分复杂,在不影响研究目的的基础上,对模拟作如下假设:

- (1) 将锚索与 MRAE 视为一体,搅拌中两者间无相互运动和作用;
- (2) 为直观展示锚固范围内各部分的搅拌效果,搅拌中忽略树脂锚固剂包装袋的破碎过程和锚索的螺旋钻进运动,仅考虑锚索在树脂锚固剂中的搅拌作用;

(3) 本章仅研究 MRAE 对树脂锚固剂流场的搅拌作用分布特征,所以搅拌中忽略树脂锚固剂的固化反应,并视整个锚固区域内树脂锚固剂的黏度系数相同且为定值。

2.3 模型构建

通过 SOLIDWORKS 软件建立锚索和 MRAE 的 3D 模型,导入 Workbench 18.1 软件建立树脂锚固剂流体域,并利用 ICEM CFD 划分模型网格,待所有前处理操作完成,使用 FLUENT 插件进行数值计算分析,数值模型如图 7 所示。

模型尺寸: (a) 锚索数值模型直径为 17.8 mm,沿 Y 向长度为 555 mm。对应流体域(树脂锚固剂)沿 Y 向长度为 558 mm,其中两段扩孔区域沿 Y 向长度分别为 70 mm,扩孔直径最大值为 81 mm。圆孔区域直径为 31 mm,沿 Y 向总长度为 418 mm; (b) 安装 MRAE 的锚索数值模型沿 Y 向长度为 555 mm。对应流体域沿 Y 向长度为 558 mm,其中两段扩孔区域沿 Y 向长度分别为 70 mm,扩孔半径最大值为 81 mm。圆孔区域直径为 31 mm,沿 Y 向

总长度为 418 mm。钻进搅拌装置、扩孔搅拌装置(共 2 个)和封堵装置的长度分别为 40、50 和 40 mm,外径最大值分别为 28、30 和 30 mm,分别位于沿 Y 轴正向 65、160 与 330、515 mm 位置。

网格划分:模型由 Quad Dominant 型壳网格和 Tetra /Mixed 型体网格自动组合生成。在整体网格划分中,将锚索、MRAE、流体域和钻孔的网格尺寸最大值分别设置为 2.5、1.5、0.5 和 3.0 mm。

边界条件和求解方法:为模拟现场实际工况,将模型入口边界条件设为标准大气压下的压力入口边界,钻孔围岩表面、孔壁、锚索、MRAE 和出口均设为壁面。MRAE 与锚索为旋转体,转速为 500 r/min。采用 Viscous 中的 $k-\epsilon$ 湍流模型求解,以 Y 向为正向,设置重力加速度为 -9.81 kg/s^2 。流体域(树脂锚固剂)密度和黏度系数分别为 2000 kg/m^3 和 $0.03 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$,迭代运算步长均为 3000 步。

2.4 树脂锚固剂搅拌效果仿真对比分析

按照 2.1 节所述方案,安装 MRAE 的锚索和仅锚索搅拌树脂锚固剂各截面的流体速度分布云图如图 8 所示。

由图 8 得,数值模型沿 Y 轴绕顺时针方向转动搅拌时,安装 MRAE 的锚索各截面的树脂锚固剂流动速度明显数倍高于仅锚索情况,尤其是安装 MRAE 区域的整体平均流动速度(钻进搅拌装置区域为 3.82 m/s,扩孔搅拌装置区域分别为 2.85 m/s 和 3.23 m/s,封堵装置区域为 2.65 m/s)均显著高于图 8(b)锚索中的对应区域(扩孔区域为 0.64 m/s,圆柱孔区域为 0.98 m/s)。说明安装 MRAE 可以使锚索对树脂锚固剂施加更高的搅拌运移速度,极大地提升了锚固混合反应的高效完全性。

由图 8 数值模型中不同截面位置的环形树脂锚固剂速度分布云图看出,流体域(树脂锚固剂)内安装 MRAE 的锚索整体的搅拌作用辐射区(环形云图中速度为 0 的蓝色区域之外的其他颜色区域)和搅拌动能明显较仅锚索情况时更大。其中,安装 MRAE 区域的搅拌作用辐射区范围和搅拌动能是图 8(b)锚索中对应区域的 X 倍左右(X 为无量纲常数且 $X > 1$)。尤其是扩孔区域(扩孔搅拌装置区域)的搅拌效果对比最为明显。如图 8(a)中截面 170.0 mm、截面 188.0 mm、截面 196.0 mm、截面 201.0 mm、截面 344.0 mm、截面 359.0 mm、截面 365.0 mm、截面 373.0 mm 和图 8(b)中截面

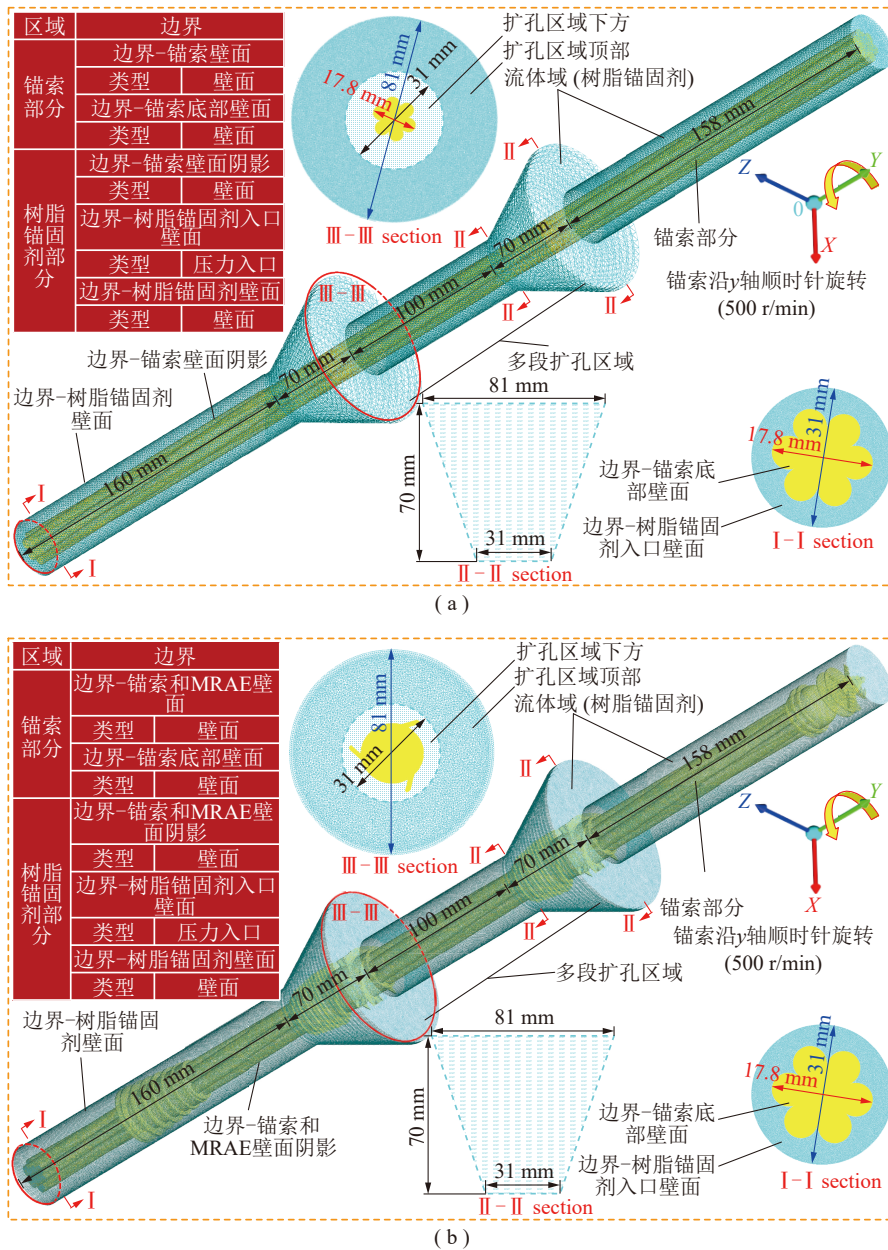


图7 锚索和MRAE搅拌树脂锚固剂数值模型

Fig. 7 Numerical model of cable bolt and MRAE stirred resin anchoring agent

230.5 mm、截面 400.5 mm 的环形云图所示。图 8 (a) 中扩孔区域各截面的树脂锚固剂运移动能辐射区几乎充满整个环形截面且整体运移动能大。而图 8(b) 中相同扩孔区域各截面的运移动能辐射区范围约为该截面的 1/4。说明安装 MRAE 的锚索可有效提升扩孔锚固区域内树脂锚固剂的扩散流动性。同时发现图 8(a) 中各截面环形云图的树脂锚固剂运移速度沿径向呈大→小→大分布, 而图 8(b) 中各截面的树脂锚固剂运移速度沿径向呈大→小→0 分布。说明安装 MRAE 的锚索较普通锚索不仅能使树脂锚固剂与锚索界面间拥有较高的运

移动能, 而且还能使树脂锚固剂与孔壁围岩界面间的运移速度更高, 这有助于促进锚固体的黏度和环向厚度更加均匀。

综上分析充分展现了 MRAE 搅拌作用的高效功能性, 为进一步验证其工作性能将进行实验室和现场试验研究。

3 锚索扩孔锚固性能增强技术实验室试验

3.1 锚索锚固钻进与锚固系统拉拔试验

3.1.1 试验材料及过程

基于 3D 打印技术, 采用高强度 PLA+打印材料

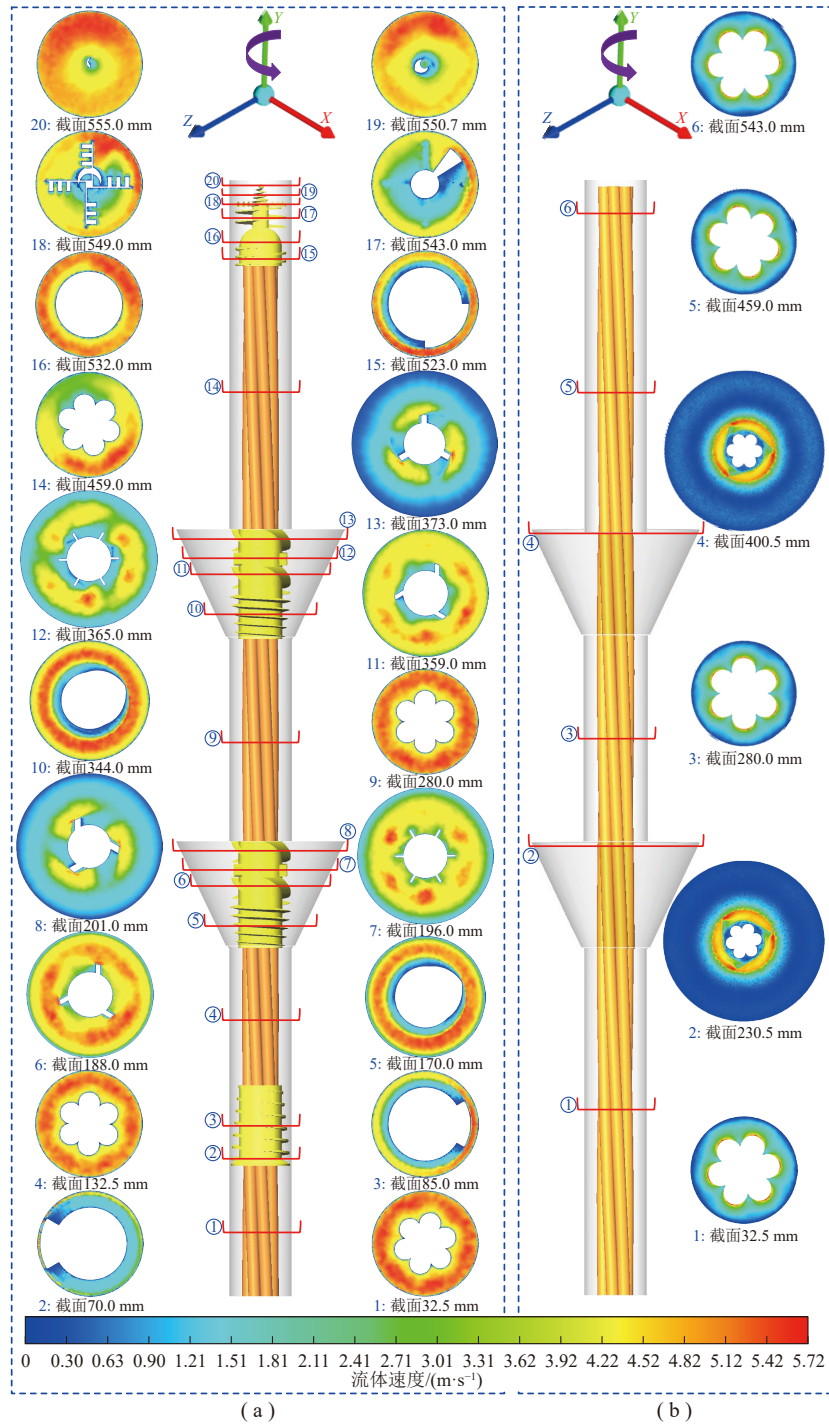


图 8 搅拌树脂锚固剂各截面流体速度分布云图

Fig. 8 Cloud map of fluid velocity distribution in each section of mixing resin anchoring agent

对锚索多段扩孔锚固性能增强组件进行试制。PLA+材料的弯曲应力为 ± 54.4 MPa, 拉伸强度为 80.0 MPa, 弯曲模量为 80.0 MPa, 断裂伸长率为 175%(MD), 密度为 1239 kg/m^3 。锚索锚固钻进与锚固系统拉拔试验过程如图 9 所示。

为验证锚索扩孔锚固性能增强技术效果, 设计两组试验方案(图 9(a)), 分别标记为 CZM 组(增强

锚固)和 CPM 组(普通锚固), 每组 5 个试件。选取直径 17.8 mm、长度 810 mm 的 7 股钢绞线锚索, 根据扩孔位置和设计锚固长度(374 mm)将 MRAE 与锚索黏结固定(图 9(b))。选取外径 48 mm、内径 32 mm、长度 160 mm 的钢管依次与内部车削扩孔(图 9(a)钢管剖面中锥形圆台部分)长度 170 mm 和 180 mm 的两段等径钢管同轴心焊接作为钻孔(图 9

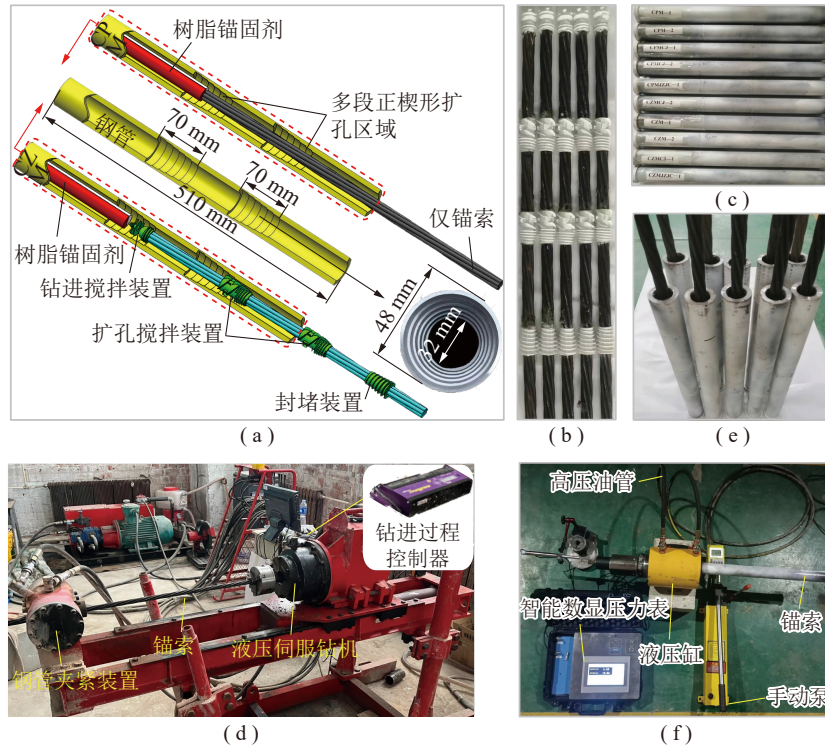


图9 锚索锚固钻进与锚固系统拉拔试验过程

Fig. 9 Process of cable bolt anchoring drilling and anchoring system pull-out test

(c)。为避免人为因素影响试验精度,采用数控伺服液压钻孔机进行锚索锚固钻进搅拌试验(图9(d)),将锚索和钢管同轴心依次居中固定在钻机钻头和卡紧装置内,并以表2中K+Z型树脂锚固剂搅拌参数为指导,分别准备1卷195 mm长的K型和Z型树脂锚固剂,按照里部K型外部Z型的顺序放入钢管。搅拌试验完成后各组试件(图9(e))恒温25℃静置4小时,采用数显锚索拉拔计对每组中的4个试件进行拉拔试验(图9(f))。

3.1.2 锚索锚固钻进试验性能分析

由图9(d)得各组锚索锚固钻进推力-位移分布特征(图10)。

由图10(a)看出,两组锚索钻进推力-位移分布对比明显,进一步分析发现(图10(b)),CZM组(增强锚固)和CPM组(普通锚固)锚索平均钻进推力在a阶段(圆柱形孔锚固段0~65.0 mm)和b阶段(扩孔锚固段65.0~148.5 mm)彼此交错,相差不大,而在c阶段(圆柱形孔锚固段148.5~222.8 mm),d阶段(扩孔锚固段222.8~306.3 mm)和e阶段(圆柱形孔锚固段306.3~363.0 mm)CZM组显著高于CPM组。且在c、d、e阶段内,CPM组锚索钻进推力相对CZM组波动幅度小,分布较平缓,而

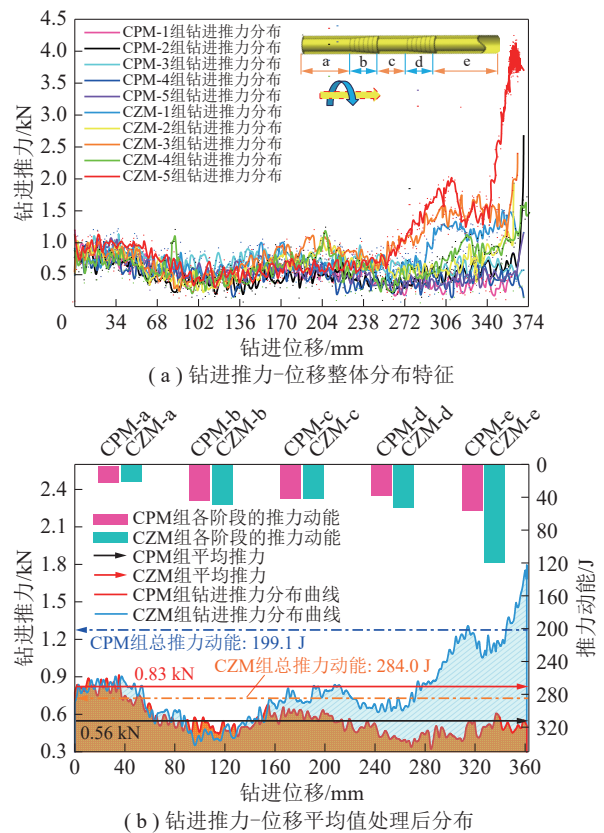


图10 锚索锚固钻进推力-位移分布特征

Fig. 10 Cable bolt anchoring drilling thrust-displacement distribution characteristics

CZM 组锚索钻进推力先逐渐升高, 再逐渐降低, 然后快速稳步升高, 至第 2 个峰值后经历短暂下降又升高至第 3 个峰值, 锚索即将到达孔底前推力升高至第 4 个峰值, 锚索到达孔底后推力急速下降为 0。这种分布特征表明:

(1) a 和 b 阶段内 CPM 组和 CZM 组锚索的钻进性能差别不大, 主要是因为锚索初步搅拌树脂锚固剂 (该段树脂锚固剂自由无堆积), 两组锚索浸入树脂锚固剂中的体积大体一致且较小, 所以受到锚固系统的钻进阻力大体一致。

(2) c、d、e 阶段内 CZM 组锚索随着 MRAE 逐个与树脂锚固剂搅拌作用, 其钻进性能同步大幅提升, 且当 MRAE 全部搅拌作用时, CZM 组锚索钻进性能最佳 (钻进推力最大), 显著优于 CPM 组锚索。对于 CZM 组锚索钻进推力分布呈现前述特征是由于, 锚索顶端钻进搅拌装置穿过第 1 段扩孔区域进入 c 阶段圆柱形孔锚固段后, 第 1 个扩孔搅拌装置同步参与搅拌并以其结构优势, 保持锚索与钻孔居中, 使锚索钻进过程中不摩擦孔壁仅与环向分布的树脂锚固剂接触, 且树脂锚固剂经钻进搅拌装置搅拌后黏度均匀, 摩擦阻力小。随着锚索钻进第 2 段扩孔区域 (d 阶段), 第 1 个扩孔搅拌装置逐步钻进第 1 段扩孔区域, 由于扩孔区域空间逐渐变大, 树脂锚固剂在波纹扩散搅拌叶片作用下沿径向逐渐向四周扩大运移, 使得锚索与树脂锚固剂间的搅拌作用面积逐渐减小, 从而摩擦阻力逐渐减小, 所以钻进推力逐渐升高, 并保持在 0.8 kN 上下浮动。而后随着锚索逐步钻进 e 阶段区域, 第 1 个扩孔搅拌装置同步钻进 c 阶段圆柱形孔锚固段, 由于钻孔空间突然变小, 并且树脂锚固剂在扩孔搅拌装置两级导升叶片的导升作用下持续向上运移, 使得锚索与树脂锚固剂间的搅拌作用面积逐渐增加, 摩擦阻力逐渐增大, 所以钻进推力逐渐降低。当第 2 个扩孔搅拌装置接触树脂锚固剂钻进第 1 段扩孔区域时, 第 1 个扩孔搅拌装置同步钻进第 2 段扩孔区域, 此时两个扩孔搅拌装置共同搅拌树脂锚固剂, 使锚索受到的摩擦阻力大幅减小, 所以钻进推力快速稳步升高至第 1 个峰值。此时在长距离搅拌工作下, 钻进搅拌装置顶端的圆锥体螺纹被破坏, 使得锚索顶端与树脂锚固剂的切削角缺失, 摩擦阻力增大, 所以钻进推力短暂下降。当锚索即将到达孔底时, 树脂锚固剂接触封堵装置, 并在该装置正向渐变径导

升叶片作用下向下运移, 在作用力与反作用力影响下, 树脂锚固剂对锚索会施加一个螺旋向上的反作用力, 此时锚索钻进推力在 MRAE 全部搅拌作用下快速升高, 达到第 2 个峰值。

最后由图 10 左上部还可看出, CZM 组锚索钻进全过程的平均钻进推力 (0.83 kN) 和总钻进推力动能 (284.0 J) 明显高于 CPM 组锚索 (分别为 0.56 kN 和 199.1 J), 这也反映了目前仅使用普通锚索进行多段扩孔锚固时的钻进效果不佳和使用 MRAE 的必要性。为进一步验证 MRAE 的搅拌动力性能, 将对两组锚索锚固钻进扭矩-位移分布特征对比分析, 如图 11 所示。

由图 11(a) 下部看出, 无论是 CZM 组还是 CPM 组, 每组 5 个锚索试件的钻进扭矩-位移分布曲线交错重叠, 分布趋势大体一致, 表明各组试验正常, 未产生数据失真无效个例, 故对各组锚索钻进扭矩进行算术平均处理发现 (如图 11(b)), CZM 组 (增强锚固) 锚索钻进扭矩在 c、d、e 阶段均时刻高于 CPM 组 (普通锚固), 其中, CPM 组锚索钻进扭矩在 a、b 阶段均高于 177.2 N·m (CPM 组锚索平均

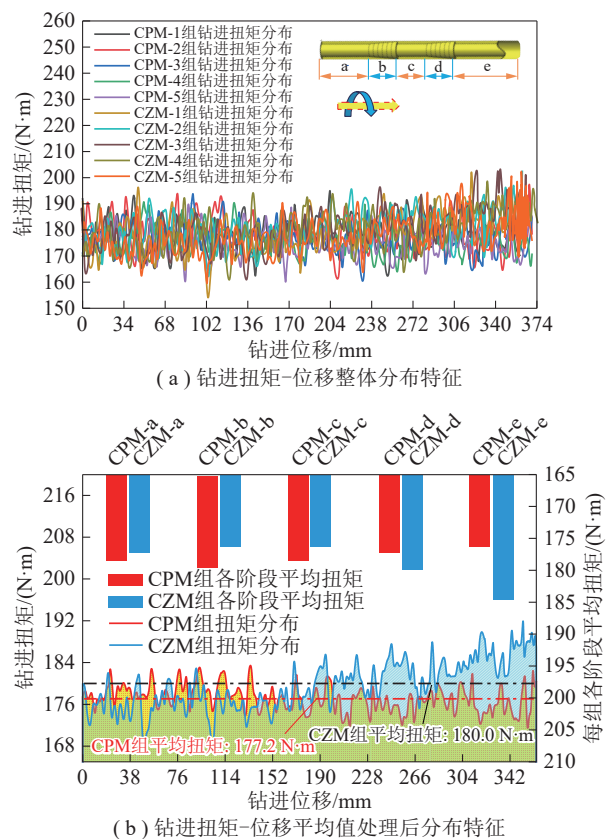


图 11 锚索锚固钻进扭矩-位移分布特征

Fig. 11 Distribution characteristics of cable bolt anchoring drilling torque-displacement

钻进扭矩), 而进入 c、d、e 阶段后全体基本小于 177.2 N·m。CZM 组锚索钻进扭矩在 a、b 阶段均低于 180.0 N·m (CZM 组锚索平均钻进扭矩) 且幅值及其周期变化较大, 而进入 c、d、e 阶段后全体基本高于 180.0 N·m。锚索钻进扭矩是指在一个周期内钻机钻头驱动锚索旋转的力量, 扭矩的大小直接影响锚索的转动难易程度和搅拌效率。所以上述分布特征表明, 仅锚索参与搅拌时 (CPM 组), 钻进前期 (a、b 阶段) 锚固长度小, 树脂锚固剂挤压程度小, 钻进阻力低, 所以锚索搅拌力量大。而钻进后期 (c、d、e 阶段) 随着锚固长度逐渐变大, 锚索弯曲变形摩擦孔壁程度逐渐严重, 传动效率逐渐降低, 并且树脂锚固剂挤压堆集严重 (图 1(a)), 使得锚索钻进和转动困难, 加之锚索外表无肋较光滑, 搅拌作用有效辐射范围整体较小 (试验结果与图 8(b) 所示云图分布情况恰好一致), 尤其是扩孔区域搅拌作用范围有限, 易导致扩孔孔壁附近树脂锚固剂未充分搅拌或堆集未搅拌的情况。当锚索与 MRAE 组合使用时 (CZM 组), 钻进前期 (a、b 阶段) 锚索的扭转力和搅拌效率低于钻进后期 (c、d、e 阶段)。表明随着 MRAE 逐个参与搅拌反应, 锚索整体的扭转力量越大, 当 MRAE 全部搅拌作用时, 锚索钻进扭矩最高。充分体现了 CZM 组锚索可以在相同或较低的转速下, 达到更高的扭转力, 并可持续保持的优异性能, 特别是对现场动力效果不好的钻具其使用效果尤为显著。

3.1.3 锚固系统拉拔试验性能分析

由图 9(f) 得各组锚索锚固拉拔力分布 (图 12)。由图 12 看出, CZM 组 (增强锚固) 锚索拉拔

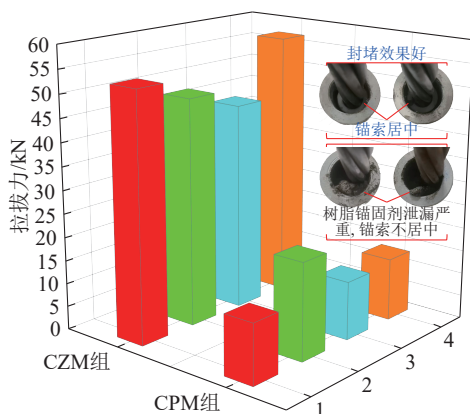


图 12 锚索扩孔锚固拉拔力对比分析

Fig. 12 Comparative analysis of pull-out force of cable bolt with enlarged-hole anchorage

力峰值均多倍高于 CPM 组 (普通锚固), 即 CZM 组锚索拉拔力峰值平均值 (36.5 kN) 是 CPM 组 (14.9 kN) 的 2.5 倍。此结果表明锚索加装 MRAE 在提供强大锚固力和高预紧力方面较仅锚索情况效果更强。同时由图 12 实物图看出, CZM 组试件的锚索居中度 and 封堵树脂锚固剂性能明显优于 CPM 组锚索 (该组锚索偏心明显且尾端外漏较多树脂锚固剂), 此现象也说明锚索锚固力与锚索居中度 and 封堵树脂锚固剂性能呈正相关变化关系, 因此, 为进一步验证 MRAE 的居中性能, 将对各组锚索锚固居中性能对比分析, 如图 13 所示。

3.2 锚索锚固居中性能试验

3.2.1 试验材料及过程

按照图 13 所示试验方案对图 9(e) 中的 CZM-5 和 CPM-5 试件进行多截面切割, 并根据公式 $C = \left(1 - \frac{2S_{o_1o_2}}{D-d}\right) \times 100\%$ 计算各组锚索居中度^[3] (如图 13 下部所示)。其中, C 为锚索居中度; $S_{o_1o_2}$ 为偏心距, 即锚索中心 O_1 与钻孔中心 O_2 间的距离, mm; D 为钻孔直径, mm; d 为锚索直径, mm。

3.2.2 锚索居中性能试验分析

由图 13 得, CZM 组 (增强锚固) 锚索各截面偏心距均成倍小于 CPM 组 (普通锚固), 即 CZM 组锚索的平均偏心距 (1.13 mm) 约为 CPM 组 (3.98 mm) 的 3/10。锚索偏心易引发锚索两侧的剪应力分布不均, 导致树脂锚固剂产生剪切破坏, 且偏心距越大, 应力差越大, 对锚索产生的附加弯矩作用越强, 抗拔能力越差。同时 CZM 组锚索的平均居中度 (84.13%) 显著高于 CPM 组 (43.98%), 说明 CZM 组锚索的居中性能较 CPM 组更为优异。因此, 锚索加装 MRAE 可确保锚索与钻孔居中, 有效避免了如图 1 所示情况的发生, 大大降低了因锚索严重偏心而导致锚固系统失效的可能性。

4 锚索扩孔锚固性能增强技术现场试验

4.1 试验巷道及地质概况

中国辽宁省辽阳市红阳三矿 7 号煤层巷道因其顶板为泥岩, 含植物化石碎片和数层夹矸, 具条带状层理, 为典型软岩巷道, 且经常发生锚索脱锚失效现象, 所以需对锚索进行锚固增效。故试验选择在该矿 7 号煤层 705 工作面运输巷内进行。705 工作面运输巷覆岩结构情况如图 14 所示。



图 13 锚索锚固居中性性能分析

Fig. 13 Analysis of the centralizing performance of cable bolt anchoring

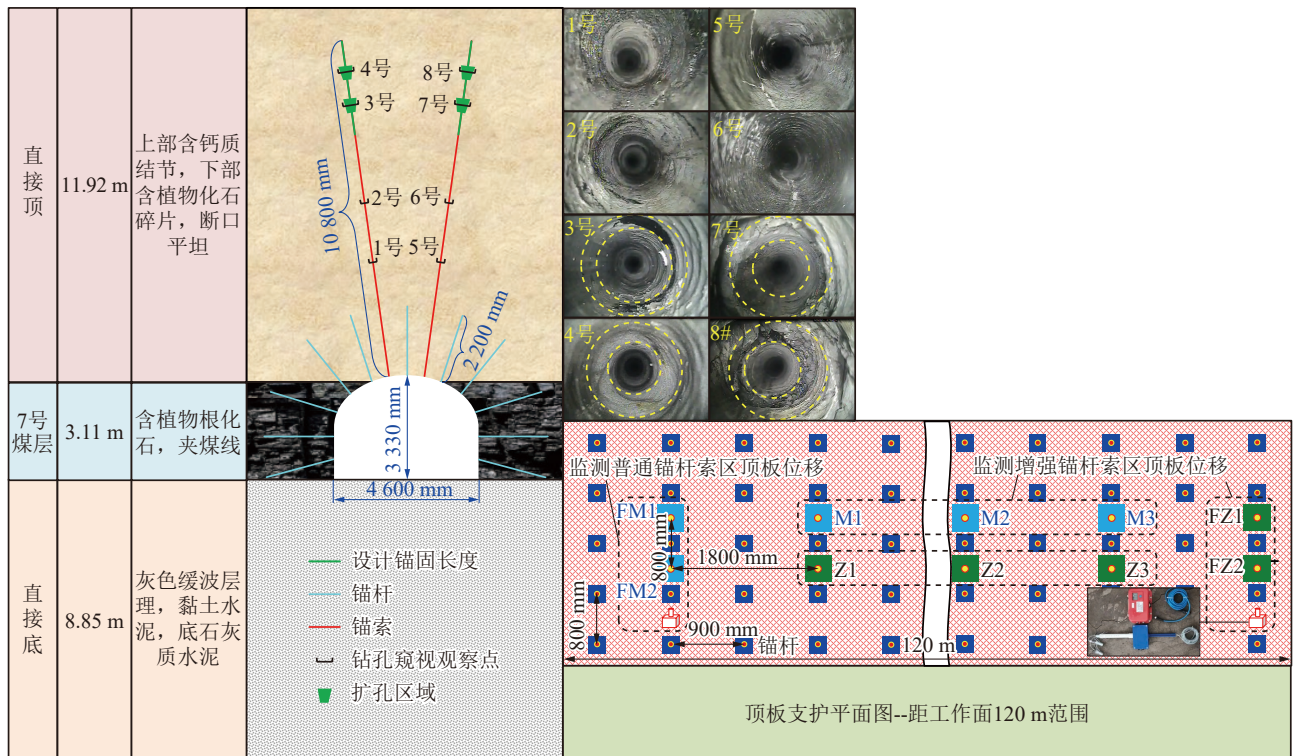


图 14 705 工作面运输巷覆岩结构及顶板支护情况

Fig. 14 Overlying strata structure and roof support conditions of 705 working face haulage roadway

在 705 工作面运输巷距掘进工作面 120 m 范围内钻打 30 个直径 30 mm, 深度 10.8 m 的钻孔 (各钻孔沿巷道轴向间隔 1 孔相邻) 并分别对孔底进行多段扩孔。抽取其中 6 个钻孔 (M1-3 和 Z1-3) 进行锚索扩孔锚固性能测试, 并同步进行顶板围岩控制效果分析。对任意 2 个钻孔进行窥视发现, 各钻孔

孔壁较软弱破碎且层理发育, 锚固区域内泥岩层含有厚度为 20~85 mm 的薄层夹矸、裂隙破碎带或植物化石碎片, 为软岩顶板, 钻孔空间结构不完整, 可锚性差锚固质量难以保证。

4.2 锚索扩孔锚固性能试验过程及结果

按照设计锚固长度 (1 245 mm) 分别准备 1 卷

直径 23 mm、长 500 mm 的 MSK 型和 MSZ 型树脂锚固剂, 并按照里部 MSK 型外部 MSZ 型的顺序依次分别放入 705 工作面运输巷已钻好的 30 个钻孔中。并选取破断力 583 kN、直径 21.8 mm、长度 11.1 m 的 19 股钢绞线锚索。将 MRAE 黏结安装在锚索对应位置(图 15(a))。采用表 2 中 K+Z 型树脂锚固剂组合使用的参数钻进搅拌。共安装 30 根锚索, 抽取其中 6 个钻孔(M1-3 和 Z1-3), 3 根正常锚固(M1、M2、M3), 3 根增强锚固(Z1、Z2、Z3)。锚固后直接使用锚索张拉仪对试验锚索进行拉拔试验(图 15(b))。试验分析结果如图 16 所示。

由图 16 可知, 增强锚固锚索(Z1、Z2、Z3)的拉拔力和预紧力均明显高于正常锚固锚索(M1、M2、M3), 且各组(Z1、Z2、Z3)的拉拔力和预紧力均高于或等于设计值(该矿直径 21.8 mm 的 19 股钢绞线锚索的设计拉拔力值为锚索破断载荷(583.0 kN)

的 50%~60%, 即 329.2 kN。设计预紧力值为锚索设计拉拔力值的 80%, 即 263.4 kN。)。而正常锚固锚索(M1、M2、M3)的拉拔力和预紧力均小于设计值, 锚索受采动影响易脱锚失效, 顶板易离层。同时看出, 除 M2 组锚索尾端外露长度远超标准范围外(150~250 mm), 其他各组锚索均处于标准范围内。说明锚索在正常锚固时, 有可能因树脂锚固剂挤压堆积致使阻力变大, 无法到达孔底, 严重削弱锚固强度, 这也与图 1(a) 所示情况一致。同样也说明在锚索能够到达孔底情况下, 两组锚索的锚固效果差异明显。锚索安装 MRAE 抗拔力大, 抗动载作用强, 控顶范围大, 围岩自适应稳定性高。而仅通过锚索进行扩孔锚固, 则承载能力弱, 易脱黏失效致使顶板离层严重。

4.3 锚索扩孔锚固顶板围岩控制效果分析

由 4.1 节所述, 在 705 工作面运输巷距掘进工作面 120 m 范围内分别在锚索增强锚固区域(30 根锚索, 从掘进工作面往外 45 m 范围)和锚索正常锚固区域(从掘进工作面 50 m 位置往外至 120 m 位置)各安装 1 个 YHDW150W 矿用本安型无线顶板离层监测仪, 监测结果如图 17 所示。

由图 17 看出, 监测期间锚索正常锚固和增强锚固的顶板离层位移总量分别为 137.1 mm 和 90.2 mm。同时看出, 锚索增强锚固后顶板围岩控制效果良好, 位移量较小, 在监测后期顶板变形趋于平缓稳定。而正常锚固区域顶板离层量较大(是增强锚固区域离层位移量的 1.52 倍), 且在监测后期持续增加未平缓稳定, 有进一步扩大离层的风险。

锚索正常锚固区域顶板的离层位移量近 70% 集中发生在顶板 0~4 m 范围, 可见正常锚固顶板的变形主要在浅部, 这主要是因为无法对锚索施加高预紧力, 使得层间压紧力低, 浅部顶板下沉离层。

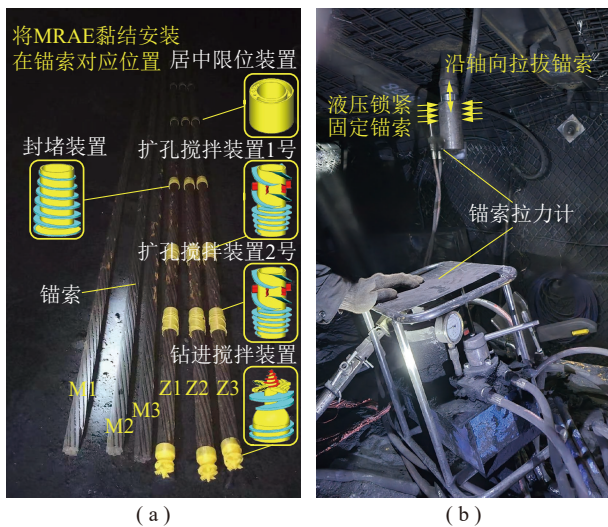


图 15 锚索增强锚固性能试验过程

Fig. 15 Test process of cable bolt enhanced anchoring performance

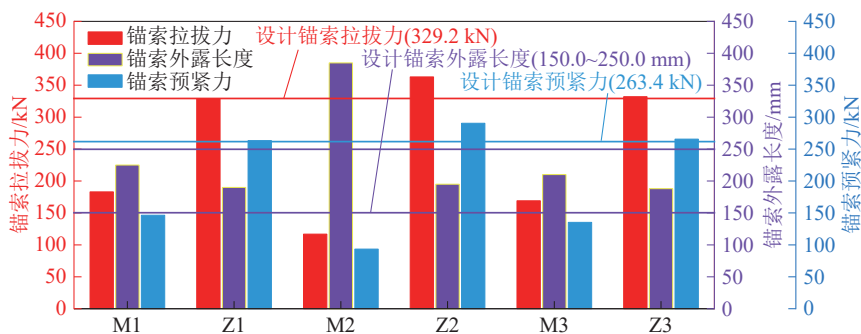


图 16 锚索锚固性能对比

Fig. 16 Comparison of cable bolt anchoring performance

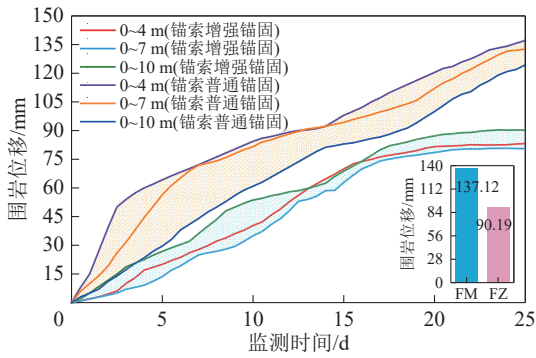


图 17 顶板围岩位移监测结果
Fig. 17 Monitoring results of roof surrounding rock displacement

而高抗拔力是高预紧力的基础, 所以提升锚索锚固强度和预紧力对控制软岩顶板变形有着重要安全意义。尤其在该工作面或相邻工作面一次见方或多次见方期间, 受采动和矿山压力影响, 传统锚固锚索脱锚失效风险较大。

5 锚索不扩孔锚固性能增强技术现场试验

为验证 MRAE 在不扩孔工况下应用的锚固性能, 故开展 MRAE 在正常圆柱形钻孔工况下的锚索锚固试验, 对比在不扩孔条件下的锚固增强效果, 以增加 MRAE 的适用性。

5.1 试验巷道及地质概况

锚索不扩孔锚固性能增强技术现场试验选择在中国辽宁省辽阳市红阳三矿 7 号煤层的 71103 工作面进风巷内进行。71103 工作面进风巷覆岩结构情况如图 18 所示。

为掌握试验地点顶板锚固区域内的围岩情况, 钻打 8 个直径为 30 mm, 深度为 7.9 m 的锚固孔(图 18 中 A1~A4, B1~B4)并分别进行钻孔窥视, 部分窥视图像见图 18, 窥视结果表明, 各锚固孔 2.9~3.2、3.4~3.6、6.8~8.0 m 段内孔壁较破碎且裂隙发育, 锚固区域内岩层含有厚度不超过 300 mm 的薄层泥岩、裂隙破碎带或节理, 属典型含软弱夹层类顶板, 围岩可锚性差, 锚固效果难以保证。

5.2 试验过程及结果

按照设计锚固长度为 1132 mm 分别准备 350 mm 长的 CK 型和 650 mm 长的 K 型锚固剂各 1 卷, 并按照里部 CK 型外部 K 型的顺序依次分别放入 71103 工作面进风巷道已钻打好的 8 个锚固孔中, 并选取直径为 21.8 mm, 长度为 8 m 的 19 股钢绞线锚索, 将 MRAE 中的钻进搅拌装置和封堵装置与锚索黏结固定(图 19(a)), 因为是要验证 MRAE 在不扩孔工况下应用的锚固性能, 所以此处不使用

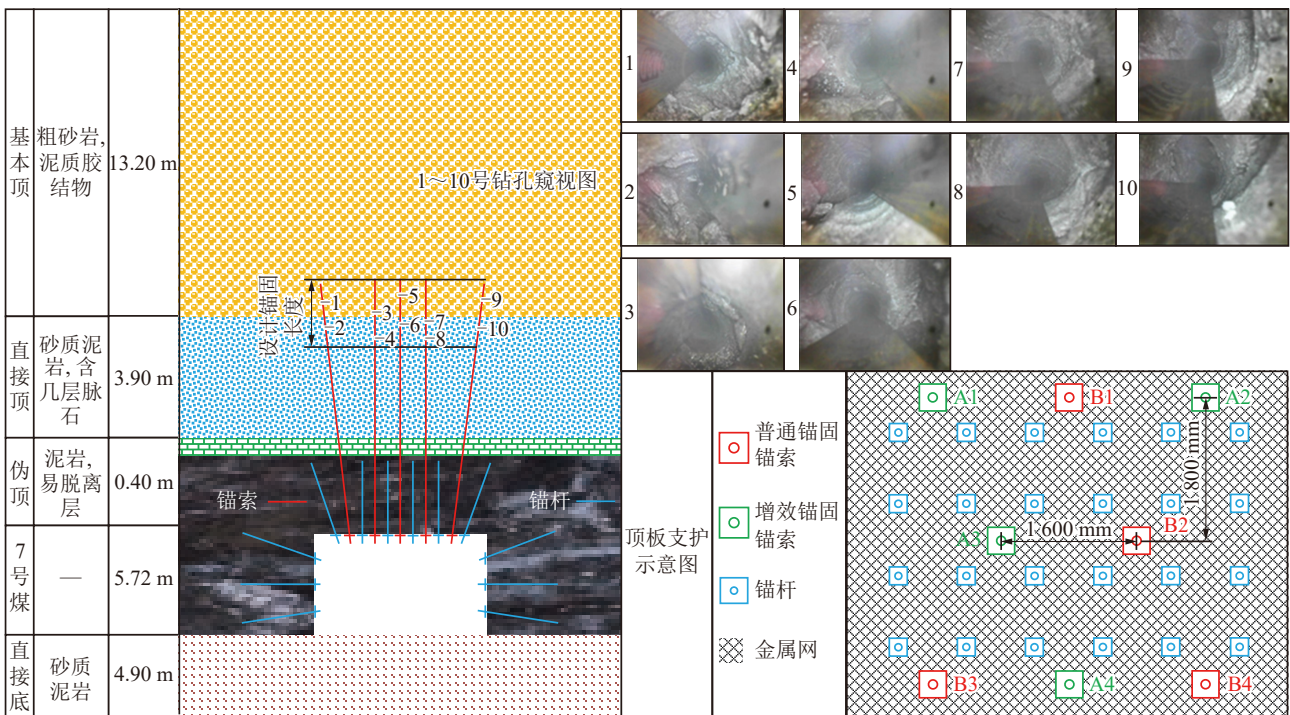


图 18 71103 工作面进风巷覆岩结构及顶板支护情况
Fig. 18 Overlying strata structure and roof support conditions of the 71103 working face air intake roadway

扩孔搅拌装置。考虑到顶板锚固区域内孔壁较破碎且裂隙发育, 所以 MRAE 之间的距离设为 900 mm, 共锚固 3 排 8 根锚索, 其中 4 根采用普通锚固, 4 根采用增效锚固, 具体分布如图 18 所示。搅拌完成后通过锚索张拉仪 (图 19(b)) 对锚固好的锚索进行拉拔试验 (图 19(c)), 试验结果如图 20 所示。

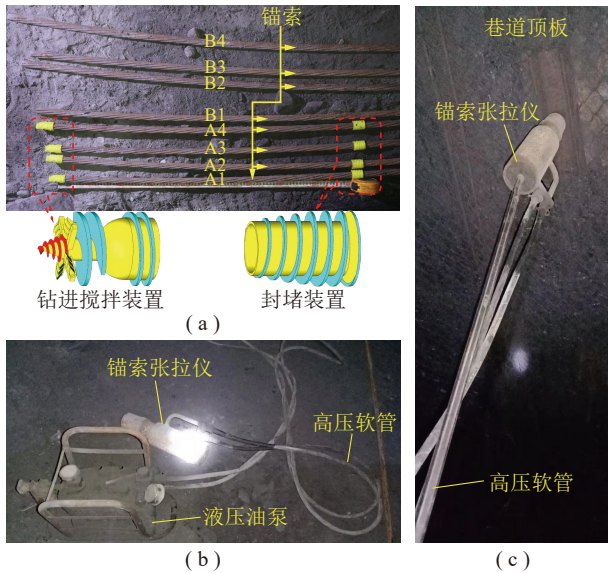


图 19 MRAE 安装

Fig. 19 MRAE installation

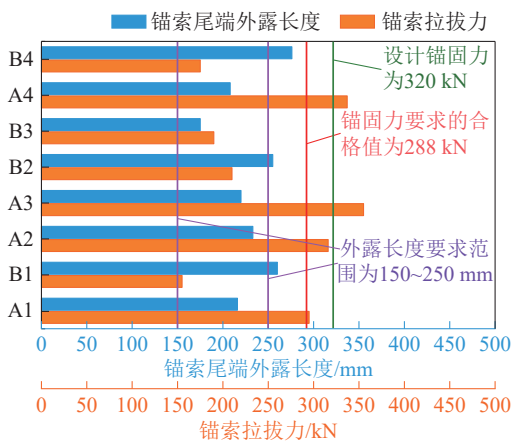


图 20 锚索增效锚固性能对比

Fig. 20 Comparison of cable bolt enhanced anchoring performance

由图 20 可知, 采用 MRAE 锚固的锚索 (A1、A2、A3、A4), 其锚固力均明显大于普通锚固锚索, 且各组锚固力均高于或等于工程要求值 (对于该矿直径 21.8 mm 的 19 股钢绞线锚索要求锚固力最低标准值为设计锚固力 320 kN 的 90%, 即 288 kN), 其中有两组锚固力高于设计锚固力 320 kN。而采用普通锚固的锚索 (B1、B2、B3、B4), 其锚固力均

低于工程要求值, 锚固失效风险较大。同时看出, B1~B4 组锚索锚尾外露长度大部分未处于工程要求范围内 (对于该矿直径 21.8 mm 的 7 股钢绞线锚索要求锚尾外露长度应处于 150~250 mm 内), 且高于范围最大值, 由此说明锚索在普通锚固过程中, 推进阻力较大, 不能完全到达锚固孔底, 导致有效锚固长度和岩层控制范围减小。相反 A1~A4 组锚索因其上设置的搅拌破碎构件顶部的锥形钻头易于钻进的特性, 均能顺利到达孔底且锚尾外露长度符合工程要求范围。

6 结论

(1) 针对软岩巷道锚索扩孔锚固中存在的树脂锚固剂搅拌不充分、扩孔区域充填不密实、锚索偏心及孔壁损伤等问题, 研制的 MRAE 通过“分级破碎-梯度搅拌”、“导升-封堵”协同控流及“居中限位-径向支撑”设计, 可显著提升树脂锚固剂搅拌效果与锚固性能。

(2) 理论分析与数值模拟表明, MRAE 能提供更高搅拌功率, 促进树脂锚固剂高效混合反应, 提升扩孔区域树脂锚固剂流动速度与扩散流动性, 增强锚固体密实度、界面黏结强度及抗拔力, 同时保证锚索居中, 减少孔壁损伤。

(3) 实验室试验显示, 加装 MRAE 的锚索 (CZM 组) 平均钻进推力 (0.83 kN)、总钻进推力动能 (284.0 J) 及平均拉拔力 (36.5 kN) 均显著高于普通锚索 (CPM 组), 且居中度 (84.13%) 更优, 验证了其在提升钻进性能、锚固力及居中性能方面的有效性。

(4) 现场试验表明, 在红阳三矿 705 工作面运输巷的多段扩孔工况中, 增强锚固锚索的拉拔力和预紧力均达标, 顶板离层位移量 (90.2 mm) 小于普通锚固区域 (137.1 mm), 围岩控制效果良好; 在 71103 工作面进风巷的不扩孔工况中, 采用 MRAE 的锚索锚固力均满足工程要求, 优于普通锚固锚索。

(5) 锚索多段扩孔树脂锚固增强技术适用于软岩巷道等复杂地质条件下的锚索锚固, 可有效提升锚固质量与围岩控制效果, 具有重要工程应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 刘少伟, 张润泽, 侯建军, 等. 巷道底板锚索扩孔注浆锚固机理及参数研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025,

- 7(3): 033032.
- LIU Shaowei, ZHANG Runze, HOU Jianjun, et al. Research on mechanism and parameters of reaming anchorage for grouted anchor cable in roadway floor[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2025, 7(3): 033032.
- [2] FU Mengxiong, HUANG Shuaishuai, LIU Shaowei, et al. Argillized characteristics of drilling cuttings in argillaceous surrounding rock and the design of an anti-adhesion drill bit for borehole drilling of rock bolt[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025, 58(11): 12837–12861.
- [3] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 1–30.
- KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 1–30.
- [4] LI Chong, WANG Zhongliang, LIU Tao. Principle and practice of coupling support of double yielding shell of soft rock roadway under high stress[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(4): 513–518.
- [5] FAN Kesong, YAN Ao, LIU Shaowei, et al. Ultrasonic guided wave nondestructive testing of anchorage quality of rebar resin bolt based on EMD-PCA[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 15239.
- [6] 刘泉声, 雷广峰, 彭星新. 深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 312–332.
- LIU Quansheng, LEI Guangfeng, PENG Xingxin. Advance and review on the anchoring mechanism in deep fractured rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 312–332.
- [7] MENG Qingbin, HAN Lijun, SUN Jingwu, et al. Experimental study on the bolt-cable combined supporting technology for the extraction roadways in weakly cemented strata[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(1): 113–119.
- [8] LIU Shaowei, HE Deyin, JIA Housheng, 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.
- [9] SHI Hao, SONG Lei, ZHANG Houquan, et al. Experimental and numerical studies on progressive debonding of grouted rock bolts[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(1): 63–74.
- [10] 胡建林, 张培文. 扩体型锚杆的研制及其抗拔试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(6): 1615–1619.
- HU Jianlin, ZHANG Peiwen. Research on development of expanded type anchor bolt and its pull test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1615–1619.
- [11] CHANG Qingliang, ZHOU Huaqiang, XIE Zhihong, et al. Anchoring mechanism and application of hydraulic expansion bolts used in soft rock roadway floor heave control[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, 23(3): 323–328.
- [12] WANG Qi, XU Shuo, HE Manchao, et al. Dynamic mechanical characteristics and application of constant resistance energy-absorbing supporting material[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(3): 447–458.
- [13] 张辉, 程利兴. 松软煤层锚固孔底扩孔锚固机理及锚固性能研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(3): 18–21.
- ZHANG Hui, CHENG Lixing. Study on anchoring mechanism and anchoring performances of bottom reaming for anchoring borehole in soft seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(3): 18–21.
- [14] ZHANG Weiguang. Hole enlarging anchorage technology of surrounding rock of roadway in weakly consolidated formation[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(23): 735.
- [15] 黄伟达, 张明, 蓝永基, 等. SMW 工法及扩孔锚杆在深大基坑中的工程实践[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(S1): 261–264.
- HUANG Weida, ZHANG Ming, LAN Yongji, et al. Practice of SMW method and reamer anchors in deep and large foundation pits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(S1): 261–264.
- [16] LIU Shaowei, HE Yafei, ZHAI Xinxian, et al. An experimental study on the influence of pH values of mine waters on the shear strength of resin grout[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 21: e03592.
- [17] 罗宏保, 王全成, 张勇, 等. 预应力锚索孔内扩孔工艺的研究[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 2016, 43(10): 44–48.
- LUO Hongbao, WANG Quancheng, ZHANG Yong, et al. Research on pre-stressed anchor cable hole reaming technology[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(10): 44–48.
- [18] FU Mengxiong, LIU Shaowei, JIA Housheng, et al. Experimental study of an orientation and resin-lifting device for improving the performance of resin-anchored roof bolts[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(1): 211–231.
- [19] CAMPBELL R, MOULD R J. Impacts of gloving and un-mixed resin in fully encapsulated roof bolts on geotechnical design assumptions and strata control in coal mines[J]. *International journal of coal geology*, 2005, 64(1–2): 116–125.
- [20] WANG Wei, PAN Yishan, XIAO Yonghui. Synergistic

- resin anchoring technology of rebar bolts in coal mine roadways[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 151: 105034.
- [21] WANG Wei, PAN Yishan, XIAO Yonghui. Synergistic mechanism and technology of cable bolt resin anchoring for roadway roofs with weak interlayers[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(6): 3451–3472.
- [22] AZIZ N, CRAIG P, MIRZAGHORBANALI A, et al. Factors influencing the quality of encapsulation in rock bolting[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(8): 3189–3203.
- [23] AZIZ N. Proceedings of the 2006 Coal Operators' Conference[C]. Wollongong: University of Wollongong, 2006: 18–20.
- [24] AZIZ N. Proceedings of the 2008 Coal Operators' Conference[C]. Wollongong: University of Wollongong, 2008.
- [25] 王爱文, 高乾书, 代连朋, 等. 锚杆静-动力学特性及其冲击适用性[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(11): 2999–3006.
WANG Aiwen, GAO Qianshu, DAI Lianpeng, et al. Static and dynamic performance of rebar bolts and its adaptability under impact loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(11): 2999–3006.
- [26] SERRANO A, OLALLA C. Tensile resistance of rock anchors[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(4): 449–474.
- [27] 王曾辉. 扩孔锚杆在基坑支护中的应用[J]. *福建建设科技*, 2010(4): 20–21.
WANG Zenghui. Application of reaming anchor bar in the foundation pit[J]. *Fujian Construction Science & Technology*, 2010(4): 20–21.
- [28] FU Mengxiong, HUANG Shuaishuai, LIU Shaowei, et al. Experimental study of a borehole repairing and strengthening device for improving the performance of resin-anchored bolts in soft and broken surrounding rock[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 145: 105618.
- [29] 刘少伟, 尚鹏翔, 张辉, 等. 煤矿软弱围岩巷道锚杆孔钻扩机理与试验[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(8): 1753–1760.
LIU Shaowei, SHANG Pengxiang, ZHANG Hui, et al. Reaming mechanism of bolt hole in entry within weak surrounding rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(8): 1753–1760.
- [30] JIA Housheng, WANG Yinwei, LIU Shaowei, et al. Development and testing of a tool to create multiple conical reamed cable bolt anchorages in weak rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(12): 7887–7897.
- [31] JIA Housheng, WANG Yinwei, LIU Shaowei, et al. Experimental study on double cuneiform reamed anchorages for cable bolt boreholes in soft rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 158: 105198.
- [32] CAO Chen, REN Ting, CHRIS C. Introducing aggregate into grouting material and its influence on load transfer of the rock bolting system[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2014, 24(3): 325–328.
- [33] FAN Kesong, HE Deyin, LIU Shaowei, et al. Effect analysis of uneven thickness of resin annulus on anchorage failure of cable bolt and uniformity guarantee device[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 158: 107990.
- [34] FENG Chao, LIU Shaowei, FU Mengxiong, et al. Failure mechanism and strengthening countermeasures of end-anchored cable free section under combined tension and shear[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 157: 107949.
- [35] 刘杰, 孙涛, 杨渝南, 等. 高强预压锚固技术抗拔力提升效应[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2): 323–332.
LIU Jie, SUN Tao, YANG Yunan, et al. Uplift effect of high strength preloaded anchorage[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2): 323–332.
- [36] 陈昌富, 李伟, 朱世民, 等. 基于黏弹-塑性圆孔扩张理论压力注浆锚杆锚-土界面黏结强度计算方法[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(2): 41–51.
CHEN Changfu, LI Wei, ZHU Shimin, et al. Method for calculating soil-grout interface bond strength of pressure-grouted anchors based on viscoelastic-plastic cavity expansion theory[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(2): 41–51.
- [37] FENG Chao, LIU Shaowei, JIA Housheng, et al. Strengthening device for improving shear performance of anchor cable in rock support[J]. *Materials*, 2023, 17(1): 197.
- [38] LI C, STILLBORG B. Analytical models for rock bolts[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(8): 1013–1029.
- [39] PENG S. Roof bolting and underground roof falls[J]. *Geohazard Mechanics*, 2023, 1(1): 32–37.
- [40] PAN Yishan, Wang Aiwen. Disturbance response instability theory of rock bursts in coal mines and its application[J]. *Geohazard Mechanics*, 2023, 1(1): 1–17.
- [41] FU Mengxiong, LIU Shaowei, HUANG Shuaishuai, et al. Resin flow characteristics and anchoring performance of resin-anchored bolts in soft and broken surrounding rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(3): 1579–1601.