

巷道含水软岩顶板锚索树脂锚固增效方法

贾后省^{1,2}, 王璐瑶¹, 刘少伟^{1,2}, 贺德印¹, 江文渊³, 潘坤¹, 王银伟¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003;
3. 济宁山云字内机电科技有限公司, 山东 济宁 272400)

摘要: 针对含水软岩顶板巷道锚索锚固力低下、锚索高强支护难以发挥等问题, 以李家壕煤矿含水软岩顶板巷道为工程背景, 通过理论分析、数值模拟、实验室试验和现场试验等综合研究方法, 提出锚索锚固增效方法, 研发一种安装使用方便、结构简单、不影响锚索正常施工的锚固增效装置, 揭示锚索锚固增效机制。研究表明: 由于巷道顶板深部含水岩层位置与顶板的距离的变化, 合理的锚固层位确定存在难度, 当锚索锚固到含水松软岩层中, 锚固力明显下降, 且有达不到锚固要求的较大隐患; 锚固增效结构设有搅拌装置和封堵导升装置, 可有效提高树脂锚固剂搅拌均匀程度、增加锚固区域锚固药体密实性, 进而增加锚固药体的锚固效力。相比无处理的锚索锚固力, 现场试验锚索锚固力可增加30%以上, 有效促进了顶板形成稳定的锚固结构, 顶板变形明显降低, 顶板稳定性得以增强。

关键词: 岩石力学; 含水软岩; 锚索; 锚固力; 树脂锚固剂; 锚固质量提升

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)05 - 0938 - 10

A method for improving the anchorage effect of the resin-anchored cable bolts in roadway roof with water-bearing soft rock

JIA Housheng^{1,2}, WANG Luyao¹, LIU Shaowei^{1,2}, HE Deyin¹, JIANG Wenyuan³, PAN Kun¹, WANG Yinwei¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;
2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety, Henan Province, Jiaozuo, Henan 454003, China;
3. Jining Shanyunyunnei Electrical Technology Co., Jining, Shandong 272400, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult for high strength cable bolts to come into action in roadway roof with water-bearing soft rock and taking Lijiahao coal mine as an example, theoretical analysis, numerical simulation, laboratory experiment and field test were adopted to propose a method for improving the anchorage effect of cable bolts. A new device which is easy to install and simple in structure without affecting the normal installation of cable bolts was developed and the anchorage improving mechanism of the device was revealed. The results indicate that, as the distance between the water-bearing rock stratum and the roof changes, it is difficult to determine the reasonable anchorage position. When cable bolts are anchored in irregular distribution soft rock stratum, the anchoring force significantly declines and may not meet the anchoring requirements. The device including mixing structure and sealing-lifting structure can increase the uniformity and density of the resin grout to improve the anchoring force. The field test demonstrates that the anchoring force can be increased by more than

收稿日期: 2018 - 10 - 11; **修回日期:** 2018 - 12 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604094, 51674098); 河南省重点研发与推广专项科技攻关项目(182102210316)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51604094 and 51674098) and Henan Province Key Research and Development and Promotion of Special Science and Technology Projects(Grant No. 182102210316)

作者简介: 贾后省(1988 -), 男, 2015年于中国矿业大学(北京)采矿工程系获博士学位, 现任副教授, 主要从事巷道支护理论与技术方面的教学与研究。E-mail: jiahousheng@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1180

30% compared with the normal anchored cable bolts. The device can promote the roof to form a stable anchorage structure and hence, reduce the roof deformations obviously and enhance the roof stability.

Key words: rock mechanics; water-bearing soft rock; cable bolts; anchoring force; resin grout; anchorage quality improvement

1 引言

树脂锚固剂已经是锚杆和锚索支护技术中普遍采用的锚固方式, 具有承载快、强度高、抗疲劳、适应性强、使用方便等优点。矿井开采条件越来越复杂, 锚索的破断力在逐步增加, 目前很多矿井已经使用了直径 17.8, 21.6, 28.0 mm 的锚索, 这种大直径的高破断力锚索支护在保证巷道安全、维护巷道围岩稳定性方面起着至关重要的作用^[1-4]。然而, 在一些特殊地质条件下, 如塑性区恶性扩展区域、断层破碎带、含水软岩等松软煤岩体条件, 这类锚索的树脂锚固质量很难保证, 其高支护强度优势很难发挥^[5-8], 围岩很难或者无法形成稳固的锚固结构, 造成巷道顶板稳定性较差。

针对松软煤岩体巷道锚固力低下的问题, 目前采取主要方式之一就是布置更多锚固剂, N. Aziz 等^[9-11]通过一系列试验发现锚固剂搅拌时间、锚固孔深度等参数对于锚固力有显著影响, 且有效锚固长度增加 1 cm, 锚固力增加量将超过 10 kN, 但增加锚固剂的方式极易造成在上部锚固剂搅拌时, 下部锚固剂已产生凝固反应, 造成锚固区域锚固药体分布不均, 以至于锚固剂效力分布不均, 整体锚固效力难以充分发挥; S. Ma 等^[12]将全长锚固锚杆切割成若干长度为 100 mm 的锚固段, 并分别对其进行了压推试验, 发现各锚固段的载荷-位移曲线有所差别, 进而可知, 尽管在有限锚固长度内, 不同位置锚固剂的锚固效果也会千差万别, 而且锚固力随着锚杆长度的变化较明显。

由于锚索表面较为光滑, 难以充分、均匀地搅拌锚固剂, 刘少伟等^[13-21]从改善锚固结构、优化锚固孔径等方面, 提出了提升锚杆和锚索锚固力的方法和技术。刘少伟等^[13-16]针对煤矿巷道锚固系统失效问题, 认为影响软弱岩层锚固系统失效的主要因素为锚固剂黏结失效, 根据理论分析成果, 提出了采用改变锚固孔底形状提高锚固力的方法。A. Zingano 等^[17-18]通过调查发现“手套现象”及锚固剂搅拌不充分是锚杆支护巷道普遍存在的问题, 据此对锚杆结构进行了优化, 试验发现锚杆端部为倒棱结构时锚固效果最佳。P. Altounyan 等^[19]开发了

一种新的锚杆安装方法, 认为在搅拌锚固剂之前, 通过推动锚杆穿过锚固剂包装袋可提高锚固剂混合均匀程度, 并削弱“手套现象”的影响。张玉芳等^[20-21]研制出一种预制内锚头新型锚索, 从其结构设计、锚固机制及结构特点入手, 分析其受力模式与计算方法, 并通过室内足尺模型试验, 对比分析了传统压力集中型锚索和新型锚索的锚固效果。

目前, 含水软岩顶板巷道中, 可以增加的锚固剂数量有限, 主要是通过加设辅助搅拌结构来增加锚索锚固力。然而, 现有辅助搅拌结构仍存在一些问题, 或是破坏钻孔孔壁, 造成孔壁碎渣掺杂到锚固剂里, 影响锚固效果, 或是结构复杂、成本高、操作不便、影响施工速度。本文以提高锚固剂搅拌均匀程度、增加锚固区域锚固药体密实性为主线, 提出了一种能够增加锚索锚固剂效力的方法, 并形成了便于安装的锚固增效结构, 对含水软岩顶板巷道高强度锚索的锚固质量提升将具有实际意义。

2 巷道工程地质概况与锚固性能测试

2.1 巷道工程地质概况

试验巷道为李家壕煤矿 2-2 中煤 11216 工作面的回风平巷, 巷道长度 3 400 m, 平均埋深 180 m, 煤层倾角在 5° 以下, 煤层平均厚度 2.02 m, 岩层厚度变化较大, 煤层及相邻围岩性质较软弱。为了掌握巷道顶板岩层组合情况、岩性变化、围岩结构以及岩石力学性质, 在 11216 工作面邻近位置 2-2 煤主运巷进行了 2 组岩层取芯工作, 2 组取芯地点相距 25 m, 取芯深度为 8.0 m, 取芯直径 35 mm, 图 1 为 2 组取芯结果及其岩性、采取率分析, 表 1 为 2-2 中煤顶板岩石力学参数测定结果。

由图 1 所示的 2-2 煤主运巷 2 组岩芯结果可以看出, 2-2 煤顶板岩层分布差别变化较大, 顶板岩层依次为砂质泥岩、煤、砂质泥岩, 整体强度较低且受水的影响显著, 砂质泥岩软化系数仅为 0.08。顶板整体主要是砂质泥岩, 泥质胶结特点显著, 固结程度较差, 顶板 8.0 m 范围内, 中间夹厚度 0.4 m 左右的煤, 其余全为砂质泥岩。从岩芯采取率来看, 2 组测点不同位置顶板采取率普遍不高且差别较大, 都比较破碎, 岩石力学参数强度也较低, 最大

岩性名称	岩性描述	层厚/m	采取率/%	岩芯照片	岩性名称	岩性描述	层厚/m	采取率/%	岩芯照片	
砂质泥岩	泥质交结, 固结程度差	1.1	50		砂质泥岩	泥质交结, 固结程度差	0.64	64		
			66		煤	黑色	0.30	40		
煤	黑色	0.4	40		57	砂质泥岩	泥质交结, 固结程度差	3.43		53
			55		67					
			65		66					
			70		67					
			73		30					
砂质泥岩	泥质交结, 固结程度差	3.2	67							

(a) 1号岩芯 (b) 2号岩芯

图1 2-2中煤主运巷岩芯钻取结果与分析

Fig.1 Result analyses of cores in 2-2 coal seam main haulage gateway

表1 2-2中煤顶板岩石力学参数测定表

Table 1 Rock mechanics parameters of 2-2 coal seam

岩石名称	含水状态	单轴抗压强度/MPa	变形参数			软化系数 K_1
			$E_0/(10^4 \text{ MPa})$	$E_{50}/(10^4 \text{ MPa})$	μ_{50}	
煤	自然风干	13.6	1.09	0.95	0.23	0.14
砂质泥岩	自然风干	14.7	1.32	1.19	0.31	0.08

注: E_0 为初始切线模量, E_{50} 为 50% 强度处对应的割线模量, μ_{50} 为 50% 强度处对应的泊松比。

采取率为 70%, 且长度大于 10 cm 的岩芯段长度之和不足钻孔进尺的 25%, 属于松软破碎顶板, 围岩可锚性不能保证。

同时, 11216 工作面两侧回采巷道掘进过程中, 钻孔深度为 7.0 m 时频繁出现涌水现象, 锚固孔钻进过程中, 锚固范围内部分区域为含水层, 且不同层位水的富集程度无明显规律, 企图通过调整锚索长度及锚固位置躲避含水层位是不可行的。锚固结束后, 巷道大部分区域依然有顶板淋水现象, 将本就松软的顶板岩层强度进一步弱化, 而且影响树脂锚

固剂与围岩的相互作用, 造成锚索锚固力无法保证。然而, 锚索又是巷道围岩稳定性控制的有力手段, 保证锚索的锚固效果是巷道得以稳定的重要前提。

2.2 锚索锚固性能测试

为掌握这种含水软弱顶板条件下锚索锚固特征, 采用大量程锚索张拉仪, 对不同锚固长度与锚固层位锚索锚固强度进行了拉拔力测试, 试图确定锚固效果最佳的锚固层位与锚固长度。

由于锚索张拉设备最大拉拔力有限, 为反映单位锚固长度所能提供的锚固力, 保证拉拔过程中锚索不破断, 采用 1/3 锚固长度(1 卷 K2350 锚固剂)进行破坏性拉拔试验, $\phi 17.8 \text{ mm}$ 锚索极限破断力为 355 kN, 最佳的锚固效果应该是锚索破断前不发生脱锚, 所以 $\phi 17.8 \text{ mm}$ 锚索 1/3 锚固长度所能提供的锚固力应不低于 119 kN。试验地点选择 11216 工作面回风平巷淋水区域进行, 共进行 4 组试验, 每组试验设有 5 个锚固层位: 7.3, 6.8, 6.3, 5.8, 5.3 m, 每组试验位置间隔 50 m。图 2 为 $\phi 17.8 \text{ mm}$ 锚索不同位置、不同层位拉拔力测试结果。

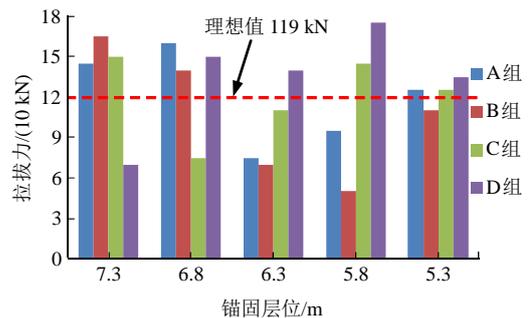


图2 $\phi 17.8 \text{ mm}$ 锚索不同位置、不同层位拉拔力测试结果
Fig.2 Pull test results of $\phi 17.8 \text{ mm}$ cable bolt in different positions

由图 2 可知: (1) 含水富集区域内锚固力明显下降, 且有达不到锚固要求的隐患, 从总体来看, 未达到理想锚固力的锚索数量占总数的 40%, 其中 5.8, 6.3 m 两个层位未达到理想锚固力的锚索占比为 67%。(2) 仅在 150 m 范围内的试验巷道里, 不同锚固层位的锚索锚固力分布并无明显规律, 4 组试验锚固力最低的层位分别为 6.3, 5.8, 6.8, 7.3 m; 5.3 m 层位锚索锚固力相对较好。(3) 结合钻孔施工情况, 含水富集区域与顶板的距离存在变化, 合理的锚固层位确定存在难度。

同时, 锚索工作期间的支护力情况也与拉拔测试结果基本对应, 在淋水区域巷道掘进工作面附近随机抽取 3 根 $\phi 17.8 \text{ mm}$ 锚索进行了支护力监测,

如图 3 所示, 3 根锚索的最大支护力分别仅为 88, 123, 120 kN, 仅为最大支护力的 24.8%, 34.6%, 33.8%。且在监测 10 d 之后呈逐渐下滑趋势。这种含水软岩条件下的锚索锚固问题必须有针对性的锚固增效技术。

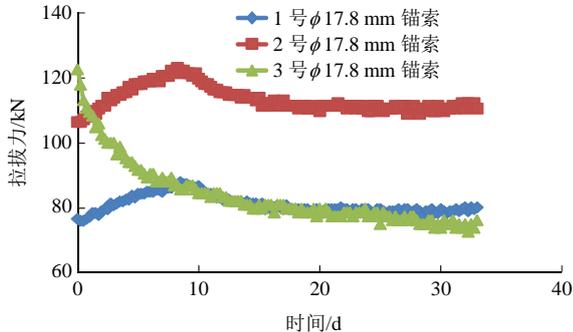


图 3 淋水区域巷道顶板锚索支护力监测曲线

Fig.3 Monitoring curves of the supporting force of cable bolts in roadway roof in water spraying area

3 锚索锚固增效机制与技术

3.1 树脂锚固药体力学性能分析

锚索在高速旋转的过程中, 由于索体表面相对光滑, 不具有传统左旋无纵肋螺纹钢锚杆的左旋凸起结构, 锚固剂本身容易随着锚索旋转形成一个形状不规则的柔性带体, 以至于树脂锚固剂被挤到锚固范围外, 使得锚固胶泥与固化剂不能充分混合、反应, 造成树脂锚固药体存在孔隙, 降低了锚索锚固效果。

这种锚固药体孔隙分布与抗压强度之间的关系, 可以借助混凝土抗压强度与孔径之间的关系进行分析, M. Robler 和 I. Odler^[22]通过对不同水灰比混凝土强度进行试验研究, 采用线性回归方法将孔径分布与材料抗压强度之间联系到一起。杨钱荣等^[23]进行孔径分级工作, 初步实现了孔径对强度的影响从定性研究到定量计算的转变, 提出了适应性更加广泛的新公式:

$$f_c = Kf_0(1-p)r_m^{-1/2} \quad (1)$$

式中: p 为总孔隙率, r_m 为平均分布孔径(mm), K 为试验常数, f_c 为锚固药体抗压强度(MPa), f_0 为锚固药体孔隙率为 0 时的抗压强度(MPa)。

由式(1)可以看出, 锚固药体的密实程度对锚固药体的强度影响显著, 增加树脂锚固剂在预定的锚固范围内搅拌混合均匀、密实是保证锚固药体强度的关键因素。这就需要: (1) 不同凝固时间锚固剂的合理搭配; (2) 锚固剂凝固时间内, 锚固区域锚固剂搅拌均匀; (3) 锚固剂搅拌过程中, 需有向孔

底导升的趋势, 保证搅拌后的锚固剂有足够的密实性; (4) 凝固后的锚固药体在预定的锚固范围内将围岩与锚索充分黏结。

3.2 锚索锚固增效方法及结构

为了实现不同凝固时间锚固剂的合理搭配、锚固区域锚固剂均匀搅拌、锚固药体与围岩的充分黏结, 提出了锚索锚固增效方法, 该方法在于安装锚索时采用不同凝固速度的锚固剂, 由孔外至孔内锚固剂凝固速度依次加快, 钻孔结束后先将快速锚固剂塞入孔底再依次向孔内塞入中速锚固剂、慢速锚固剂, 保证不同深度锚固剂搅拌混合过程中外部锚固剂不会产生凝固反应, 锚固剂搅拌总时间小于慢速锚固剂的凝固时间, 其锚固增效结构对锚固剂进行充分搅拌和封堵。

锚固增效结构是实现锚索锚固增效的关键技术, 设计的锚固增效结构由搅拌装置和封堵装置组成, 搅拌装置和封堵装置之间的距离为锚固长度。其搅拌装置顶部设有搅拌齿, 实现锚固药卷初期的搅拌均匀, 搅拌装置的内部孔剖面为锥形, 便于搅拌装置套装于锚索端部。

锚固剂搅拌过程中的封堵可有效保障锚固药体的密实性。然而, 软弱围岩钻孔施工中, 为保障锚索外露长度符合要求, 实际钻孔深度一般要比设计深度稍大, 加之钻孔直径的微小变化, 导致锚索最终的锚固长度很难精确定, 如果采用强制封堵(封堵直径与钻孔直径相当), 封堵装置的位置就很难确定, 封堵装置与搅拌装置的距离过短, 势必会有少部分锚固剂得不到充分搅拌, 封堵装置与搅拌装置的距离过长, 锚固药体的密实性又难以保证。同时, 由于钻孔孔壁的粗糙不平, 强制封堵可能给施工造成一定的影响, 锚索很难快速送入孔底位置。据此, 设计了封堵导升装置, 其外部设有左旋螺纹凸起, 锚索搅拌过程中, 靠这种左旋螺纹凸起的旋转作用, 封堵装置处的锚固药体可得到持续导升, 避免了搅拌后锚固剂下流的同时, 又不会强制封堵锚固剂, 可最大限度保证设计锚固区域的锚固药体搅拌均匀程度和密实性。具体实施时, 封堵导升装置与搅拌装置的距离一般要比设计锚固长度小 3~5 cm。

3.3 锚索锚固增效机制理论分析

锚索锚固增效结构的核心作用主要是搅拌装置的搅拌功能(见图 4), 对于锚索锚固增效程度的分析, 可借助于搅拌功率的计算^[24]。当采用普通锚固时, 起到搅拌锚固剂作用的仅为锚索索体本身, 其

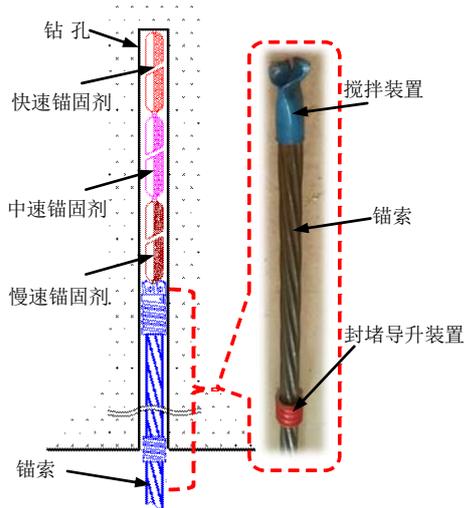


图4 锚索锚固增效装置示意图及工作原理

Fig.4 Anchorage synergism device for cable bolts and the working principle

索体由多根钢绞线旋转拧制成，可简化为斜桨搅拌结构，假设锚索锚固长度为 1 500 mm，可将此索体段视为拥有 10 层斜桨的搅拌结构，其搅拌功率可表示为

$$P_1 = 10N_p \rho N^3 d_1^5 \quad (2)$$

式中： N_p 为单层斜桨的功率准数； ρ 为锚固剂密度， $\rho = 1\ 600\ \text{kg/m}^3$ ； N 为锚索转速， $N = 8.33\ \text{r/s}$ ； d_1 为索体的旋转直径， $d_1 = 17.8\ \text{mm}$ 。

N_p 可表示为

$$N_p = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{1000 + 1.2Re^{0.66}}{1000 + 3.2Re^{0.66}} \right)^p \left(\frac{H_1}{D_1} \right)^{(0.35 + b_1/D_1)} (\sin \theta)^{1.2} \quad (3)$$

式中： Re 为雷诺系数， $Re = \frac{d_1^2 N \rho}{\mu}$ ， μ 为锚固剂黏

度系数， $\mu = 0.03\ \text{kg/m} \cdot \text{s}$ ； θ 为索体钢绞线倾角， $\theta = 60^\circ$ ； D_1 为钻孔直径， $D_1 = 28\ \text{mm}$ ； A ， B ， p 均为方程式参数，可分别表示为

$$A = 14 + \left(\frac{b_1}{D_1} \right) \left[670 \left(\frac{d_1}{D_1} - 0.6 \right)^2 + 185 \right] \quad (4)$$

$$B = 10^{1.3 - 4 \left(\frac{b_1}{D_1} - 0.5 \right) - 1.14 \left(\frac{d_1}{D_1} \right)} \quad (5)$$

$$p = 1.1 + 4 \left(\frac{b_1}{D_1} \right) - 2.5 \left(\frac{d_1}{D_1} - 0.5 \right)^2 \quad (6)$$

以 $\phi 17.8\ \text{mm}$ 锚索为例，其索体钢绞线形成的肋结构凸起 $b_1 = 1.2\ \text{mm}$ 。将各参数值代入至式(2)~(6)，得到 $\phi 17.8\ \text{mm}$ 锚索 1 500 mm 锚固区域的搅拌

功率 $P_1 = 0.011\ \text{W}$ 。

采用锚索增效锚固时，其搅拌装置可简化为四叶涡轮式，其搅拌功率取决于搅拌器的形状和叶片旋转直径。搅拌功率可按式计算：

$$P_2 = K_p N^2 d_2^3 \mu \quad (7)$$

式中： K_p 为功率常数，叶片高度为 12.0~27.5 mm，四叶涡轮式结构 K_p 取 550~800； d_2 为搅拌装置叶片旋转直径， $d_2 = 26.0\ \text{mm}$ 。将各参数值代入至式(7)可得 $P_2 = 0.030 \sim 0.044\ \text{W}$ 。由此可知，采用锚索锚固增效结构，其搅拌功率可提升 2.72~4.00 倍，从搅拌锚固剂的层面看，锚索锚固增效结构效果显著。

3.4 锚固增效结构作用机制数值分析

由于在煤矿井下锚索安装过程中，从锚固剂药卷装入钻孔到锚固剂最终凝固提供锚固力的过程十分复杂，影响因素也是多方面的。根据所研究的问题及内容，为简化模拟计算过程，本模拟做以下基本假设：(1) 忽略锚固剂的安装、破碎和凝固过程，只考虑锚索穿过锚固剂后的单纯旋转搅拌过程；(2) 在整个模拟计算过程中，锚固剂未发生凝固，即锚固剂黏度系数为定值；(3) 在模拟对锚固剂封堵及搅拌时，将锚索与锚固剂封堵装置和锚固剂搅拌装置视为整体，赋予相同的转速，不考虑其相互作用。

3.4.1 模型构建

本模拟的主要目的是为了验证锚固剂封堵装置和锚固剂搅拌装置在锚固剂的搅拌过程中所发挥的作用，在模型构建过程中，首先利用 Solid Works 软件建立 3D 模型，然后导入至 ANSYS ICEM CFD 软件中进行网格划分等其他前处理操作，最后通过 ANSYS 中 Fluent 流体分析插件进行分析计算，所建模型如图 5 所示。

本模型 z 向长度为 430 mm，其中锚固剂搅拌装置最顶端位于 415 mm 处，可观测孔底区域锚固剂的运动状态。锚索直径为 $\phi 18\ \text{mm}$ ，长度为 400 mm，入口端锚固剂封堵装置 z 向长度为 30 mm，内径 18 mm，外径 25 mm，安装位置距入口 30 mm，顶端锚固剂搅拌装置 z 向长度为 55 mm，内径 18 mm，外径 25 mm，安装在锚索顶端，锚固剂流体域直径为 32 mm。

Fluent 计算边界条件：入口边界条件设置为压力入口(标准大气压)边界，出口设置为壁面出口。采用 MRF 多重参考系方法，模型中心锚索为旋转部位，其轴向旋转速度为 500 r/min，外流体域设置为静止域，其余部件均设置为静止壁面。

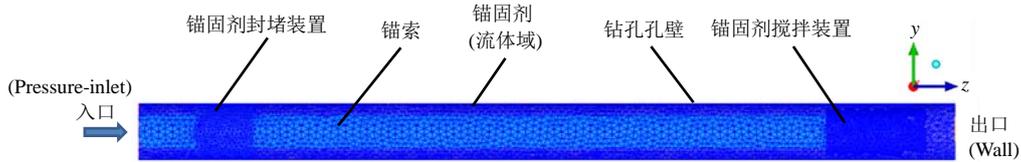


图 5 数值模拟模型

Fig.5 Numerical simulation model

计算模型选用 Viscous 中的 $k-\epsilon$ 湍流模型，锚固剂材料的密度设置为 $1\ 600\ \text{kg/m}^3$ ，黏度系数为 $0.03\ \text{kg/m}\cdot\text{s}$ 。以 z 轴正向为钻孔参照方向，设置重力加速度为 $-9.81\ \text{kg/s}^2$ ，运算步长均设置为 1 000 步。

3.4.2 锚固剂封堵及搅拌模拟分析

仅有锚索以及安装有锚固剂封堵装置和锚固剂搅拌装置 2 种情况下，锚固剂搅拌时 z 向速度矢量及云图如图 6 所示。

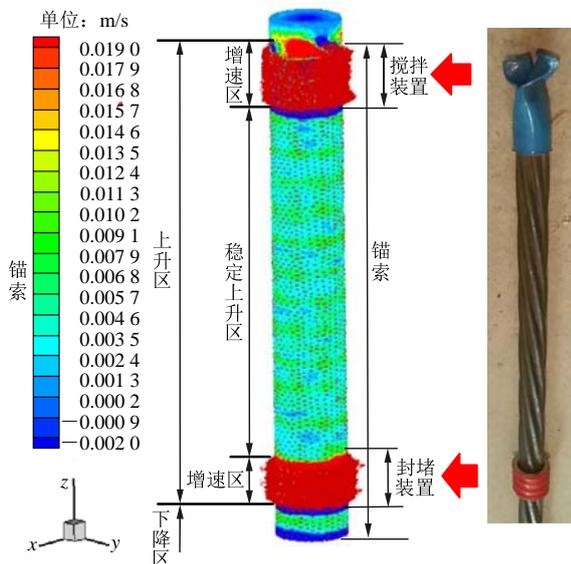


图 6 锚固剂运移速度数值模拟结果

Fig.6 Numerical simulation result of resin grout migration velocity

由图 6 可看出，在装有锚固剂封堵装置和锚固剂搅拌装置后，在左旋螺纹凸起结构的导升作用下，封堵装置和搅拌装置作用部位锚固剂 z 向最大速度约为 $0.019\ \text{m/s}$ ，位于封堵装置作用区域的上方仅有锚索作用的区域，其速度值全部为正值， z 向最大速度多在 $0.01\ \text{m/s}$ 以上，这说明该装置可有效防止锚固剂向外流动，即实现了对锚固剂的封堵和二次导升作用。对于模型顶端低速区域，该区是为了观察锚索上部小范围内锚固剂的运动状态而特意选择建立的，由于没有锚索的搅拌作用，因此该部分锚固剂在重力作用下的速度值为负值。

同时，在锚固剂搅拌装置上方区域，一定范围

的速度值也较大，说明这部分锚固剂的流动性比较好，反映了锚固搅拌装置对孔底部位原始状态的锚固剂起到了很好的搅拌效果，能有效地促进锚固剂整体的均匀分布，有助于提高锚索整体锚固力。

4 锚索锚固增效结构试制与试验

4.1 锚索锚固增效结构试制

针对目前煤矿广泛应用的 $\phi 17.8\ \text{mm}$ 锚索，其锚固孔为 $\phi 28\ \text{mm}$ ，锚固剂为 $\phi 23\ \text{mm}$ 。根据现场锚索施工要求，结合锚固增效结构作用机制理论分析与数值模拟，设计了搅拌装置加工模具，进行了锚固增效结构试制。根据锚固长度的要求、树脂药卷使用的长度和数量、钻孔大小、扩孔形状等参数的不同，设计了不同类型的搅拌装置，如图 7 所示。封堵导升装置外径为 $26.5\ \text{mm}$ ，左旋螺纹凸起结构高度为 $16\ \text{mm}$ ，采用 Solid Works 三维设计后注塑制成，其材质为具有一定热缩性质的塑料，内径为 $18.3\ \text{mm}$ ，套于锚索索体后，施加 $75\ ^\circ\text{C}$ 的温度(可采用热水)，即可实现封堵导升装置紧固在索体指定位置。

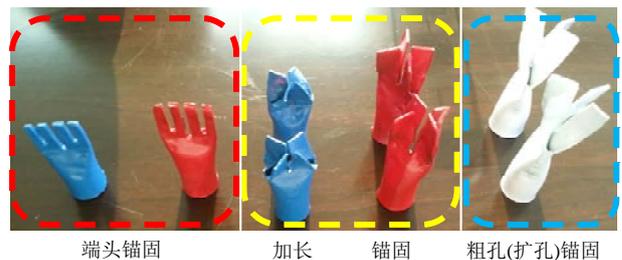


图 7 不同类型的搅拌装置

Fig.7 Different types of mixing structure

4.2 锚索锚固增效实验室试验

为验证锚索锚固增效结构的锚固效果，并能将锚固效果直观展现，采用巷道锚杆(索)综合施工工艺仿真试验台，在实验室进行了锚索锚固相似模拟试验，如图 8 所示。为呈现软弱围岩力学性质，相似模拟材料选用沙子、石膏、碳酸钙，配比号为 637，相似材料围岩单轴抗压强度为 $1.8\ \text{MPa}$ ，图 9 为装



图8 巷道锚杆(索)综合施工工艺仿真试验台
Fig.8 Simulation experiment table for bolt(cable bolt) comprehensive construction process in roadway



图9 钻孔结束后的围岩相似材料
Fig.9 Simulated material of surrounding rock after borehole drilling

入试验台围岩体、钻孔结束后的围岩相似材料，其钻孔为提前预制孔，孔径为 28 mm。

采用试验台配套钻机进行 $\phi 17.8\text{ mm}$ 锚索锚固，锚固剂为普通 K2350 锚固剂一卷，分普通锚固、增效锚固。待锚固稳定后，进行围岩剥离，观察锚固药体均匀、密实性及其与围岩的结合情况，如图 10 所示，可以看出，采用锚索锚固增效结构进行锚固增效，锚固药体搅拌、封堵效果较好，其均匀、密实性较普通锚固均有较大的改善，同时，剥离过程中锚固药体与围岩的结合情况也更好，说明了该结构较好地起到了锚固增效作用。

在实验室内，同时进行了 6 根 $\phi 17.8\text{ mm}$ 锚索拉拔试验，分普通锚固与增效锚固 2 组进行。由于锚索张拉设备最大拉拔力有限，同样采用 1/3 锚固长度(1 卷 K2350 锚固剂)进行破坏性拉拔试验，围岩体相似材料配比相同，如图 11 所示。图 12 为 6 组锚索拉拔试验的结果，在 1 卷 K2350 锚固剂用量条件下，普通锚固的 3 根锚索的锚固力分别为 37.5，31.0，32.0 kN，采用增效锚固方法的 3 根锚索锚固力分别为 87.5，83.0，90.0 kN，是未做增效处理

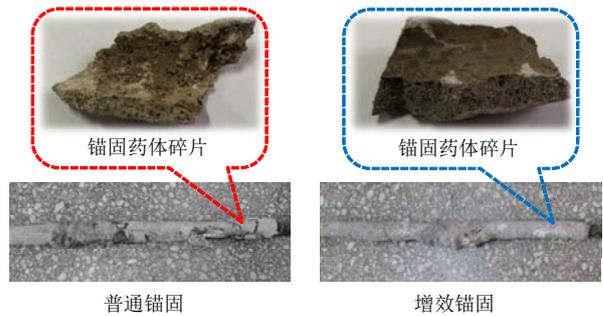


图 10 锚固药体均匀、密实性比较
Fig.10 Comparison of the uniformity and the solidification of resin grout

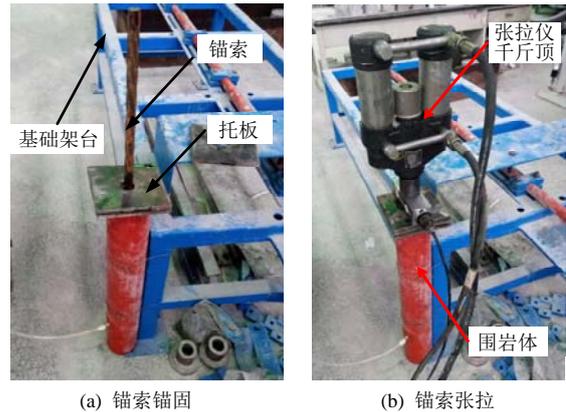


图 11 锚索张拉试验

Fig.11 Photos of anchor cable tension test

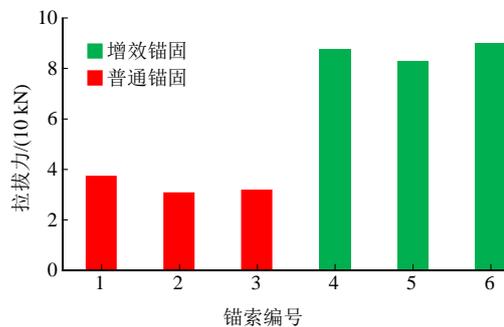


图 12 锚索拉拔试验结果
Fig.12 Results of cable bolt pull tests

锚索锚固力的 2.2 倍以上，锚固效力增加的效果很显著。需要指出的是，采用增效锚固方法的锚索锚固力仍未达到理想值，主要是由于相似材料配制的围岩体强度较小，其单轴抗压强度为 1.8 MPa，进行增效锚固锚索破坏性拉拔试验时，相似围岩体发生了一定程度的损坏。

5 锚索锚固增效技术现场试验

5.1 锚固剂选取

当前大部分煤矿井下树脂锚(杆)索支护用到的锚固剂都是不饱和聚酯树脂锚固剂，不饱和聚酯树

脂锚固剂没有亲水性，当钻孔内有淋涌水时，锚固剂在被搅拌的过程中，会将部分水混进树脂胶泥中，导致树脂固化反应后所形成的坚硬固体中，存在许多类似“水泡”的弱空区。水泡破坏了固化物整体的完整性，固化物强度降低，同时大大缩减了锚固剂与钻孔岩壁以及锚(杆)索表面的黏结面积。因此，钻孔淋涌水会大幅降低普通锚固剂锚固力效果。

针对李家壕煤矿 2-2 中煤顶板含水特征与锚固特点，设计采用防水锚固剂^[25-26]，防水锚固剂的主要成分是高强度、高活性和耐水性好的防水型不饱和聚酯树脂，其促进剂为芳叔胺，比传统的二甲苯胺效果要好，能够使锚固剂快速固化，添加剂可以超快吸水，能有效阻止水对锚固剂固化的影响。

5.2 锚索锚固性能试验

针对李家壕煤矿顶板锚索锚固力不足的问题，对锚索锚固增效结构的性能进行了现场试验，试验地点为该矿 11216 工作面回风平巷距巷口 2 650 m 位置处。为了防止因拉拔试验对顶板造成损害，设计安装大托盘(方形钢板)，将穿入锚索尾部的钢板紧贴钢带和金属网，通过钢板上的 4 个孔用铁丝固定在金属网上，防止其掉下伤人。钻孔直径均采用 $\phi 28$ mm，锚索长度 7.0 m，设计锚固层位为 6.8 m 处的砂质泥岩，鉴于锚索张拉仪最大拉拔力有限，力求最大限度地验证锚固增效方法的效果，试验采用 3 根较短树脂药卷，顶部一卷超快 CK2330 防水锚固剂，中部一卷快速 ZK2330 防水锚固剂，下部一卷中速 ZK2330 防水锚固剂，试验锚固长度 90 cm，是设计锚固长度(1 500 mm)的 60%，所以试验拉拔力理想值为 213 kN，拉拔试验结果如图 13 所示。

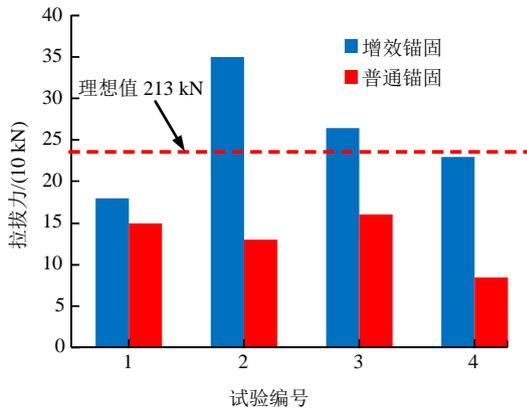


图 13 普通锚固与增效锚固试验结果对比

Fig.13 Testing result comparison of normal anchorage and synergism anchorage

由图 13 可以看出，采用锚索锚固增效方法，60% 树脂药卷用量条件下，锚固力可达 175~350

kN，绝大多数试验锚固力达到了拉拔力理想值，相比无处理的锚索锚固力，锚固力增加 30% 以上，锚索的锚固力得到大幅稳步提升，对保障锚索稳定的锚固力具有实际意义。

5.3 巷道围岩控制效果分析

李家壕煤矿 11216 工作面回风平巷断面尺寸较大，高度为 3 300 mm，宽度达到了 5 400 mm，顶板采用锚杆 + 锚索联合支护形式，支护设计如图 14 所示，顶板锚索参数为 $\phi 17.8$ mm \times 7 000 mm，间排距为 2 000 mm \times 2 000 mm，锚杆采用 $\phi 20$ mm \times 2 500 mm 左旋无纵筋螺纹钢锚杆，间排距为 1 000 mm \times 1 000 mm。

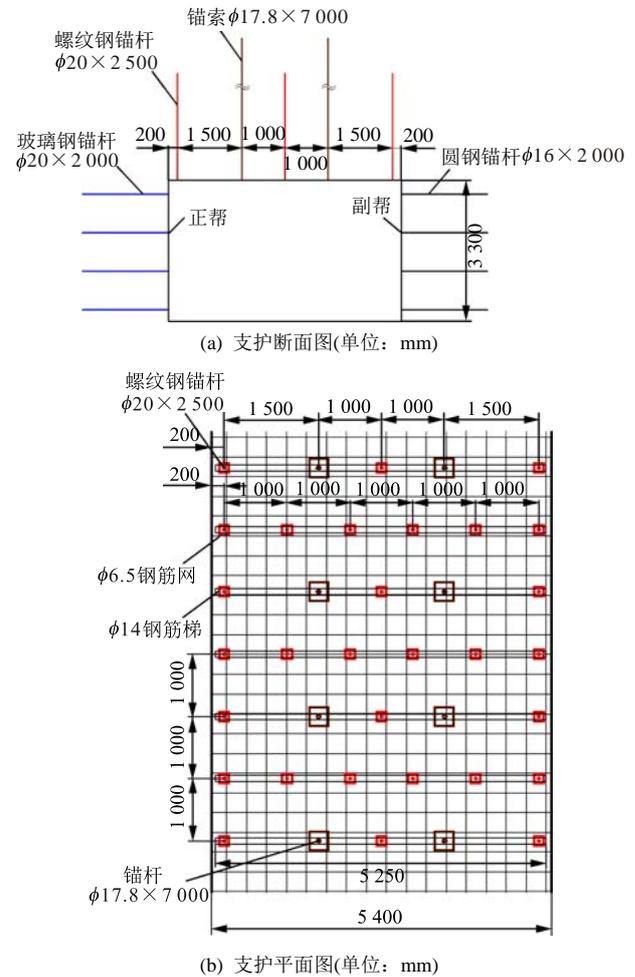


图 14 试验巷道支护设计图

Fig.14 Support design of test roadway

在未进行锚索增效锚固处理前，在李家壕矿 11216 工作面回风平巷 1 300~1 900 m 区域布置了 5 组表面位移测站，每组测站均是滞后掘进工作面 10 m 布置，监测时间均为 30 d，监测结果如图 15 所示。可以看出，掘巷后顶板变形量为 155~190 mm，并且 70%~85% 的顶板下沉量集中发生在监测时间的前 15 d，15 d 后顶板下沉趋于缓和，顶板变形虽有

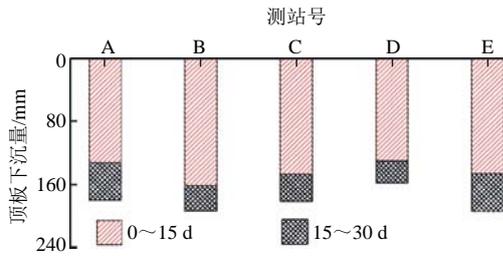
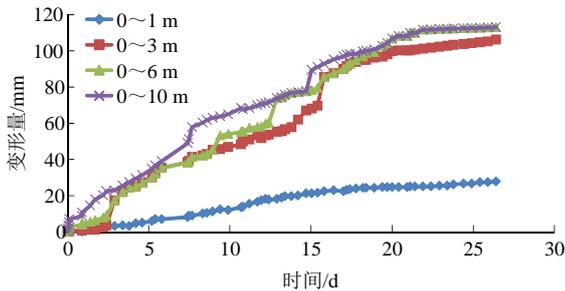


图 15 无锚索增效锚固时顶板下沉统计结果

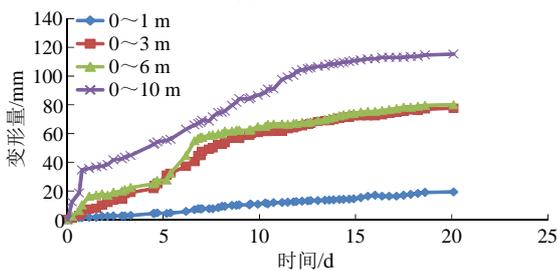
Fig.15 Statistical results of roof subsidence without synergism anchorage

稳定的趋势，但总体变形量较大，存在锚索锚固失效的隐患。

同时，在 11216 工作面回风平巷 2 650~2 750 m 区域进行了锚索锚固增效方法试验，并安设了 4 个基点顶板深部位移监测仪，监测结果如图 16 所示。可以看出，监测期间顶板总位移量分别为 113.2, 115.8 mm，并且大部分变形量发生在 3 m 范围内顶板，顶板变形快速趋于平稳，相比未进行锚索增效锚固处理前，顶板变形有显著减小，基本杜绝了锚索支护失效现象，有效促进了顶板形成稳定的锚固结构，顶板稳定性得以增强。



(a) 2 680 m 处测站



(b) 2 740 m 处测站

图 16 锚索增效锚固后顶板深部位移监测结果

Fig.16 Monitoring results of deep displacement of the roof with synergism anchorage

6 结 论

(1) 当锚索锚固到含水松软岩层中，锚固力明显下降，且有达不到锚固要求的隐患，李家壕煤矿含水软岩顶板巷道锚索锚固力不合格占比可达

40%。但是，顶板深部含水岩层位置与顶板的距离存在变化，很难确定合理的锚固层位，造成不同锚固层位的锚索锚固力分布并无明显规律，采用简单、有效的锚固结构是提高含水软岩顶板巷道锚索锚固力的有效途径。

(2) 以提高锚固剂搅拌均匀程度、增加锚固区域锚固药体密实性为主线，设计了锚固增效结构，该结构由搅拌装置和封堵装置组成，理论分析、数值模拟与实验室试验结果显示，锚固增效结构可最大限度保证锚固区域的锚固药体密实程度。同时，现场安装锚索时应采用不同凝固速度的锚固剂，由孔外至孔内锚固剂凝固速度依次加快，保证不同深度锚固剂搅拌混合过程中，外部锚固剂不会产生凝固反应。

(3) 锚索锚固增效方法现场试验结果显示，配合防水锚固剂的使用，绝大多数锚索锚固力可达到理想值，相比无处理的锚索锚固力，锚固力增加 30% 以上，可有效促进顶板形成稳定的锚固结构，减小顶板变形，保障顶板稳定。

参考文献(References):

- [1] 康红普, 吴拥政, 何杰, 等. 深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2 225 - 2 233.(KANG Hongpu, WU Yongzheng, HE Jie, et al. Rock bolting performance and field practice in deep roadway with rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2 225 - 2 233.(in Chinese))
- [2] 何满潮, 王炯, 孙晓明, 等. 负泊松比效应锚索的力学特性及其在冲击地压防治中的应用研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 214 - 221.(HE Manchao, WANG Jiong, SUN Xiaoming, et al. Mechanics characteristics and applications of prevention and control rock bursts of the negative Poisson's ratio effect anchor[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 214 - 221.(in Chinese))
- [3] 余伟健, 王卫军, 黄文忠, 等. 高应力软岩巷道变形与破坏机制及返修控制技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(4): 614 - 623.(YU Weijian, WANG Weijun, HUAGN Wenzhong, et al. Deformation mechanism and rework control technology of high stress and soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 614 - 623.(in Chinese))
- [4] 王金华. 全煤巷道锚杆锚索联合支护机制与效果分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 1 - 7.(WANG Jinhua. Analysis on mechanism and effect of rock bolts and cables in gateroad with coal seam as roof[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 1 - 7.(in Chinese))
- [5] 赵志强, 马念杰, 郭晓菲, 等. 大变形回采巷道蝶叶型冒顶机制与控制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2 932 - 2 939.(ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, GUO Xiaofei, et al. Falling principle and support design of butterfly-failure roof in large deformation mining roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 2 932 - 2 939.(in Chinese))

- [6] 马念杰, 冯吉成, 吕 坤, 等. 煤巷冒顶成因分类方法及其支护对策研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 34 - 40.(MA Nianjie, FENG Jicheng, LYU Kun, et al. Study on cause classification method and support countermeasures of roof falling in coal drift[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 34 - 40.(in Chinese))
- [7] JIANG L, SAINOKI A, MITRI H S, et al. Influence of fracture-induced weakening on coal mine gateroad stability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 88: 307 - 317.
- [8] JIANG L, MITRI H S, MA N, et al. Effect of foundation rigidity on stratified roadway roof stability in underground coal mines[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(1): 1 - 12.
- [9] AZIZ N, CRAIG P, MIRZAGHORBANALI A. Factors Influencing the quality of encapsulation in rock bolting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 3 189 - 3 203.
- [10] AZIZ N, HILLYER J, JOYCE D, et al. New approach to resin sample preparation for strength testing[C]// AZIZ N, KINNINMONTH B, eds. Proceedings of the 13rd Underground Coal Operators' Conference. Wollongong: [s. n.], 2013: 152 - 155.
- [11] AZIZ N, JALALIFAR H, CONCALVES J. Bolt surface configurations and load transfer mechanism[C]// Proceedings of the 7th Underground Coal Operators Conference. Wollongong: [s. n.], 2006: 236 - 244.
- [12] MA S, AZIZ N, NEMCIK J, et al. The effects of installation procedure on bond characteristics of fully grouted rock bolts[J]. Geotechnical Test Journal, 2017, 40: 846 - 857.
- [13] 刘少伟, 李文彬, 张 辉. 煤矿巷道正楔形锚固孔锚固性能与参数优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 53 - 60.(LIU Shaowei, LI Wenbin, ZHANG Hui. Study on anchorage performance and parameters optimization of positive wedge anchorage hole in roadway[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 53 - 60.(in Chinese))
- [14] 张 辉, 李国盛, 程利兴. 软弱煤岩体巷道围岩锚固力衰减特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(6): 104 - 108.(ZHANG Hui, LI Guosheng, CHENG Lixing. Study on characteristics of anchoring force attenuation in surrounding rock of roadway with soft coal and rock mass[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(6): 104 - 108.(in Chinese))
- [15] 张 辉, 程利兴. 松软煤层锚固孔孔底扩孔锚固性能试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(10): 28 - 32.(ZHANG Hui, CHENG Lixing. Experimental study on anchorage performance by reaming in bottom of bolt hole for soft coal seam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(10): 28 - 32.(in Chinese))
- [16] 刘少伟, 尚鹏翔, 张 辉, 等. 煤矿软弱围岩巷道锚杆孔钻扩机制与试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1 753 - 1 760.(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): 1 753 - 1 760.(in Chinese))
- [17] ZINGANO A, KOPPE J, COSTA J F, et al. In-situ tests and numerical simulation about the effect of annulus thickness on the resin mixture for fully grouted resin bolt[C]// Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown: [s. n.], 2008: 284 - 290.
- [18] CAMPBELL R, MOULD R, ACGREGOR S. 2004. Investigation into the extent and mechanisms of gloving and un-mixed resin fully encapsulated roof bolts[C]// Proceedings of 2003 Coal Operator's Conference. Wollongong: University of Wollongong, 2004: 203 - 214.
- [19] ALTOUNYAN P, BUGDEN A, O'CONNOR D, et al. Developments in improving the standard of installation and bond strength of full column resin roof bolts[C]// Proceedings of the 22nd International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown: [s. n.], 2003: 263 - 269.
- [20] 张玉芳, 袁 坤. 双锚固段新型锚索锚固性能研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(增1): 461 - 468.(ZHANG Yufang, YUAN Kun. Experimental study and application of anchor performance of a new type anchor cable with double anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Supp.1): 461 - 468.(in Chinese))
- [21] 袁 坤, 张玉芳, 李 健, 等. 预制内锚头新型锚索锚固性能研究及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 77 - 86.(YUAN Kun, ZHANG Yufang, LI Jian, et al. Performance and application of anchor with a new pressure-type of anchor cable with precast anchor head[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 77 - 86.(in Chinese))
- [22] ROBLER M, ODLER I. Investigations on the relationship between properties of concrete and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydration[J]. Cement and Concrete Research, 1985: 15(3): 401 - 410.
- [23] 杨钱荣, 朱蓓蓉, 杨全兵, 等. 高频振捣对引气混凝土气泡特征参数的影响[J]. 建筑材料学报, 2007, (3): 331 - 336.(YANG Qianrong, ZHU Beirong, YANG Quanbing, et al. Effects of high-frequency vibration on air void parameters of air-entrained concrete[J]. Journal of Building Materials, 2007, (3): 331 - 336.(in Chinese))
- [24] 王 凯, 虞 军. 搅拌设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 57 - 74.(WANG Kai, YU Jun. Mixing devices[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2003: 57 - 74.(in Chinese))
- [25] 严 红, 何富连, 段其涛. 淋涌水碎裂煤岩顶板煤巷破坏特征及控制对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 524 - 533.(YAN Hong, HE Fulian, DUAN Qitao. Failure characteristic of coal roadway with water spraying and gushing in fragmentation roof and its control countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 524 - 533.(in Chinese))
- [26] 杨绿刚. 防水树脂锚固剂的试验研究[J]. 煤矿安全, 2008, (3): 11 - 13.(YANG Lugang. Experimental study of water proof resin anchorage agent[J]. Safety in Coal Mines, 2008, (3): 11 - 13.(in Chinese))