

小孔径预应力锚索内锚力增强技术研究

杨永刚 杨张杰 余大军

(安徽省煤炭科学研究院 矿山支护技术中心 安徽 合肥 230001)

摘要:为解决目前深井高应力及复杂环境下巷道存在的小孔径预应力锚索内锚强度低、锚固可靠性差的问题,采用现场调研、实验室仿真试验方法,分析总结了常规预应力锚索可能的失效原因,指出锚索索体光滑是导致锚索内锚可靠性较低的重要原因之一,基于上述研究提出了一种内锚力增强技术即叶片式锚索锚固结构。实验室仿真试验及现场工程应用结果表明:叶片式锚索能够有效避免钢绞线穿过锚固剂而发生的假性锚固;能够将树脂锚固剂聚酯薄膜包装袋充分搅碎,并将固化剂与胶泥充分混合均匀,对提高锚索内锚强度、锚固可靠性及控制高应力、深部复杂巷道围岩变形效果显著。

关键词:小孔径; 内锚强度; 树脂锚固剂; 叶片式锚索

中图分类号: TP79 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2017)04-0014-06

Study on internal anchoring force enhanced technology of small diameter hole pre-stressed anchoring cable

Yang Yonggang, Yang Zhangjie, Yu Dajun

(Technology Center of Mine Support, Anhui Academy of Coal Science, Hefei 230001, China)

Abstract: In order to solve a low internal anchoring strength of the small diameter hole pre-stressed anchor cable and poor anchoring reliability problems existed in the mine roadway under the conditions of the present high stress in the deep mine and the complicated environment, a site investigation and lab simulation test method was applied to analyze and summarized the possible failure causes of the conventional pre-stressed anchoring cable. The paper pointed out that a smooth body of the anchoring cable was one of the important causes to cause a low reliability of the anchoring cable. Based on the above study, a internal anchoring force enhanced technology, namely the anchoring structure of the vane type anchoring cable was provided. The lab simulation test and the site engineering application results showed that the vane type anchoring cable could effectively avoid the pseudo anchoring occurred when the steel strand passed through anchoring cartridge, could fully crush the polyester film packing bag of the resin cartridge, could fully and evenly mix the curing agent and the clay, and could improve the internal anchoring strength of the anchoring cable and the anchoring reliability as well as could control the high stress and the surrounding rock deformation of the complicated roadway with an obvious effect.

Key words: small diameter hole; internal anchoring strength; resin anchoring cartridge; vane type anchoring cable

0 引言

我国自20世纪60年代将锚索锚固技术引入煤矿井巷工程领域,特别是1996年研制成功小孔径树脂锚固预应力锚索后,锚索在煤矿巷道中得到了普遍推广,显著扩大了锚杆支护应用范围,提高了锚梁网支护巷道的安全性和可靠性^[1-2]。历经几十年的

快速发展,矿用锚索在直径、索体结构、破断力等方面均发生了很大改变,从引进之初的φ15.24 mm,1×7结构,破断力为240 kN逐渐发展为φ22 mm,1×19结构,破断力达600 kN的新型锚索,同时索体延伸率也获得较大增长,在高地应力巷道、大断面巷道及受采动影响巷道等困难条件下得到了广泛应用,锚杆与锚索支护已经成为目前煤矿巷道支护的主要技

收稿日期: 2016-12-21; 责任编辑: 赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.04.003

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划资助项目(1704a082130); 安徽省自然科学基金青年基金资助项目(1308085QE90)

作者简介: 杨永刚(1979—)男,河北定州人,副研究员,硕士。Tel: 15309699928 E-mail: yyg0919@126.com

引用格式: 杨永刚, 杨张杰, 余大军. 小孔径预应力锚索内锚力增强技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(4): 14-19.

Yang Yonggang, Yang Zhangjie, Yu Dajun. Study on internal anchoring force enhanced technology of small diameter hole pre-stressed anchoring cable [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 14-19.

术手段^[3-4]。

然而,在实际施工过程中锚索内锚力达不到设计要求的情况频繁出现,这种情况极易导致顶板离层过大,甚至冒顶事故的发生,给巷道支护安全带来极大隐患^[5-8]。尤其在进入深部开采以后,锚梁网支护巷道中新的技术难题不断出现,包括巷道围岩流变导致的大变形难以控制、支护体损坏现象严重、巷道冒顶事故仍然时有发生等,这其中包括地应力加大、大型采掘设备要求的巷道断面的增加以及煤矿开采地质环境日趋复杂等因素的影响,但作为主要加固手段的锚索内锚力低,达不到设计要求是导致上述问题的重要原因。因此进行小孔径预应力锚索内锚力增强技术的研究,使锚索支护系统中锚索索体的高强度与内锚强度相匹配^[9-10],对提高锚索对围岩变形的控制能力,以及提升深部巷道锚梁网支护巷道的安全性与可靠性具有重要意义。

1 锚索锚固失效原因分析与测试

1.1 锚索工况调研及内锚失效原因分析

通过对安徽省内多个矿区30余条煤矿巷道共约100根不同规格的锚索载荷观测结果(表1)可见,锚索的平均载荷只有120 kN,锚索在其载荷远没有达到其额定工作载荷时发生卸载;锚索工作状况表面上看上去完好,但顶板却发生离层和沉降,表明锚索的内锚已经发生松动或松脱。

表1 部分煤矿锚索载荷实测统计

Table 1 Statistical of anchor cable load in part coal mine

载荷/kN	<60	≥60~100	≥100~150	≥150~200	≥200	合计
频数	16	23	23	21	10	93
频率/%	17.2	24.7	24.7	22.6	10.8	100

根据笔者现场经验及对锚索施工过程的观测分析认为,锚索内锚固失效的可能原因如下^[11-15]:

1) 内锚段岩体松散破碎严重,树脂胶泥搅拌后被挤入围岩裂隙,导致内锚不密实。

2) 钻孔冲洗不干净,锚固段为泥岩的情况下,更导致锚固剂与围岩不能有效黏结。

3) 由于孔壁粗糙或钻孔与锚固剂直径不匹配,导致锚固剂未推送至孔底,而在钻孔中段被顶破。

4) 在搅拌过程中,出现间隔或停顿搅拌,导致发生初凝的固化剂反应链被破坏,致使锚固失效。

然而,锚索本身光滑的索体结构不能将树脂胶泥和固化剂充分搅拌均匀这一现象,却并未引起广大科研工作者的关注或足够重视^[16]。

1.2 锚索内锚实验室试验

1.2.1 试验材料及设备

采用3组无缝钢管模拟钻孔,钢管内径分别为28、30、34 mm,壁厚5 mm,长度总长7 m,由2段组成,下段长度5 m,用于模拟锚索自由段,上段长度2 m,用以模拟内锚固段。为方便查看锚固段锚固情况,将上段2 m沿长度方向剖开,并焊接联接耳,顶端用钢板焊接封闭,上下2段之间采用法兰盘联接;锚索φ22 mm,1×19结构,长度7.5 m;锚索钻机型号MQF-120;空压机型号LG-6.0/8G;高清工业内窥镜型号OLYMPUS IPLEX。

1.2.2 试验过程

1) 将无缝钢管联接并竖直固定在试验地点。

2) 按煤矿井下锚索安装方法,将3支Z2360树脂锚固剂分2次缓慢推送至孔底,期间采用高清工业内窥镜观察锚固剂在推送过程中在孔内的运动情况。

3) 开动钻机,一边顶进一边搅拌,推送至孔底后充分搅拌30 s,随后保持30 s后卸下钻机。

4) 拆卸锚固段无缝钢管,并打开联接耳,剖开钢管,查看锚固剂固化情况。

1.2.3 试验结果分析

1) 锚固剂在未被送入孔底前顶破。当试验钻孔φ34 mm时,2支锚固剂在钢绞线送入4.6 m左右时交叉重叠,锚固剂被顶破,锚索穿过此段后,将上部剩余锚固剂送入孔底,如图1a所示。由于锚索索体光滑,在自由段遗留的锚固剂并不能被充分搅拌参与锚固作用,同时也导致内锚段实际锚固长度降低,影响内锚强度。

2) 锚固剂包装袋未被完全搅碎。锚固剂顶推到位后光滑的索体不能将具有一定强度、韧度的聚酯薄膜包装袋搅碎,部分锚固剂包装袋碎片长度25 cm、宽度6 cm、面积达150 cm²。部分锚固剂封闭在包装袋内并不能参与聚合反应,同时较大块度的聚酯薄膜存在,也降低了锚固体本身强度,如恰好在锚固体与锚索或孔壁之间,则会导致锚索锚固失效,如图1b所示。

3) 锚索从锚固剂中心穿过。如图1c所示,锚索在推进过程中,锚索端头并未将锚固剂包装袋完全搅碎,锚索从胶泥母袋中穿过,同时光滑的索体结构导致锚固剂子袋中的固化剂部分搅碎,形成了“穿糖葫芦”形态。此时锚固剂中树脂胶泥与固化剂比例发生变化,参与反应的固化剂比例降低,容易导致锚固体强度达不到设计要求,或部分树脂胶泥由于

未能有效与固化剂混合而不能固化,锚索内锚强度相应降低。

4) 光滑的索体结构难以将树脂胶泥和固化剂搅拌均匀。由于树脂胶泥黏性大,在锚固剂搅拌过程中形成以锚索为中心的旋转黏滞结构^[17],当锚索索体外围9根钢丝之间的空隙被填实后,锚索索体光滑度更高,搅拌作用大幅降低,H2355型树脂锚固剂搅拌后采用高清工业内窥镜窥视结果如图1所示。

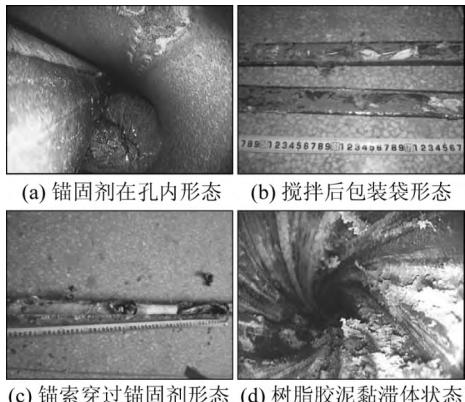


图1 锚索锚固试验照片

Fig. 1 Photo of anchor cable anchorage test

2 叶片式锚索研制

基于上述分析可见,锚索锚固过程中,锚索既需要刺破锚固剂包装袋,也要将2种组分的材料搅拌均匀,才能实现锚固剂的充分固化和锚索的良好锚固。由于锚索索体表面光滑,其旋转时与锚固剂之间所产生的摩擦力较小,同时由于锚固剂具有较高的黏稠度,这也增加了锚索搅拌锚固剂的困难,会出现锚索穿过锚固剂、或者锚固剂包装袋不能被充分搅碎的现象,进而导致锚索内锚力不足甚至失效。为解决上述问题,研制了叶片式搅拌锚索,如图2所示。



图2 叶片式锚索结构

Fig. 2 Vane type anchor cable structure

搅拌叶片采用金属薄壁金属筒在压力机上压制而成。搅拌叶片式锚索制作过程如下:

1) 截割金属圆筒,内径25 mm、厚度1 mm,要求该金属圆筒具有良好的延展性及强度,截割长度30 mm,并去除毛刺。

2) 搅拌叶片压制。将锚索按设计位置水平放置在专用模具上,为保证搅拌叶片与锚索索体之间固定良好,可预先在锚索索体上涂刷1层环氧树脂胶。为保证锚索搅拌效果,同时考虑到越靠近锚索端头,搅拌叶片发挥作用越明显,内锚段上共安装3组搅拌叶片,第1组位于锚索端头10 cm,第2组距端头40 cm,第3组距端头70 cm。

加载压力应保证叶片宽度为28~29 mm,如果加载压力低于设计值,则可能导致叶片宽度小,同时叶片不够锋利,搅拌效果降低;如果加载压力高于设计值,则可能导致叶片宽度过大,难以送入钻孔或叶片厚度太薄,容易损坏。

3 锚索锚固力增强技术仿真试验

为检验叶片式锚索锚固效果,首先选择在特制的无缝钢管试验装置上进行锚固剂搅拌试验,然后在锚索水平试验台上进行锚固力测试。

3.1 叶片式锚索搅拌试验

试验设备、材料及试验过程同1.2节所述。

图3a、图3b分别为使用常规锚索与叶片式锚索搅拌后树脂锚固剂包装袋形态照片。对比明显可见,两者对锚固剂包装袋的搅碎程度存在巨大差别。叶片式锚索旋转推进时,固定在钢绞线上的搅拌叶片随钢绞线一起高速旋转并搅拌锚固剂;由于搅拌叶片具有锐利的棱边,通过叶片的刺入和旋转,可以刺破并切碎锚固剂包装袋,使之均匀的分布在锚固剂中,使锚固剂得以充分搅拌,显著提高锚索锚固质量,如图3b所示。

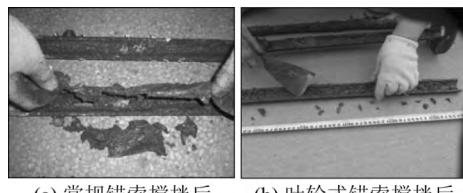


图3 锚索搅拌后包装袋状态

Fig. 3 Photo of packing bag state after anchor cable agitation

3.2 锚索内锚强度测试试验

3.2.1 试验材料及设备

采用2组长度2 m、内径424 mm钢管作为锚索锚固仿真试验台。钢管内部按配比填装水泥砂浆,模拟巷道围岩,其抗压强度为30 MPa左右,每组之间采用法兰联接,在预制好的模型中心采用钻机钻孔,孔径30 mm,孔深3.5 m。锚索ø22 mm,1×19结构,长度

4 m。锚索钻机型号 MQF-120; 空压机型号 LG-6.0/8G; 锚索压力表量程 560 kN; 锚索张拉仪型号 YCW100B; 高清工业内窥镜型号 OLYMPUS IPLEX。

3.2.2 试验过程

1) 试验台正中施工水平钻孔, 孔径 30 mm, 钻孔长度 3.5 m。

2) 推送锚固剂, 锚固剂采用 2 种型号, 一种为常规的 3 支中速 Z2355 树脂锚固剂; 另一种为研制的缓凝型树脂锚固剂 H2550, 固化时间 2 h, 目的是防止在锚索推进过程中锚固剂固化, 导致锚固失败。

3) 锚索锚固及张拉。使用常规 Z2355 树脂锚固剂进行锚固试验的, 在锚索安装完成后 1 h 张拉; 使用常规 H2550 树脂锚固剂进行锚固试验的, 在锚索安装完成后 3 h 张拉, 如图 4 所示。

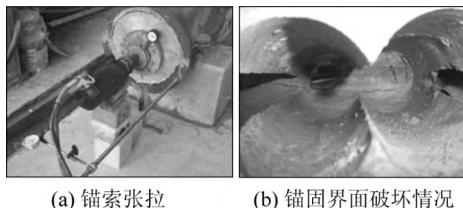


图 4 锚索内锚固强度测试试验照片

Fig. 4 Photo of anchor cable anchorage strength test

表 2 锚索锚固力测试统计

Table 2 Statistical of anchor cable anchorage strength

锚索类别	锚索直径/mm	锚固剂型号	锚索孔/mm	理论锚固长度/mm	实际锚固长度/mm	锚固力/kN
常规锚索	22	Z2355	30	1 650	800	166
	22	Z2355	30	1 650	300	86
	22	H2550	30	1 500	1 100	136
	22	H2550	30	1 500	300	64
叶片式	22	Z2350	30	1 500	1 200	321
	22	Z2350	30	1 500	1 200	320
	搅拌锚索	H2550	30	1 500	1 300	402
		H2550	30	1 500	1 300	368

4 工业化试验

为检验叶片式锚索锚固及对巷道围岩变形控制效果, 选择淮南矿业集团潘三煤矿 17181(1) 瓦斯综合治理巷道进行工业化试验。

4.1 巷道地质条件

17181(1) 瓦斯综合治理巷为潘三矿东四采区 -750 m 瓦斯集中抽排巷。巷道顶板为 10~15 m 的粉细砂岩或中砂岩, 钻孔窥视及取心结果表明, 巷道顶板虽然以中细砂岩、粗砂岩为主, 岩体强度较高,

3.2.3 试验结果

1) 常规锚索在其中一次试验中虽推入深度 1 200 mm, 但张拉完成后拉拔出来的锚索黏结有效长度仅为 300 mm, 通过钻孔窥视, 钢绞线从锚固剂胶泥间穿入, 未与固化剂混合, 锚固剂黏附于孔壁, 未参与反应, 此段未锚固; 而叶片式锚索基本是送入的长度和锚固长度一致, 锚固质量得到大幅提高。

2) 根据表 2 试验结果, 常规锚索锚固力基本为 60~166 kN, 有效锚固长度的降低, 显著影响了锚索内锚力, 平均锚固力仅为 113 kN, 这与前述表 1 调查结果及现场实测结果相近^[18~21]; 采用叶片式搅拌锚索后, 锚索锚固力显著提升, 平均锚固力达 353 kN, 较常规锚索锚固力提高 3 倍。

3) 内锚段的破坏具有渐进性, 破坏时伴随间歇性的巨大声响与震动。图 4b 为锚固界面破坏情况, 由此可见, 锚固段的破坏不仅发生在锚固介质与周围岩体界面, 也同时发生在锚索与锚固介质界面上, 发生的顺序可能有先有后, 需要后期试验进一步验证。

4) 由于本次仿真试验是水平试验台, 锚索的搅拌、锚固质量等可能受到一定影响。

但岩体完整性较差, 裂隙较为分散; 巷道底板为 0~15 m 的泥岩或砂质泥岩。

4.2 巷道支护方案

1) 巷道顶板采用锚杆配合 T 型钢带、钢筋网支护。T 型锚带沿顶板倾斜方向铺设并压紧钢筋网, 锚杆间排距 900 mm×900 mm, 规格 $\phi 22 \text{ mm} \times 2 500 \text{ mm}$, 如图 5 所示。

2) 喷射砂浆支护。锚杆初次支护后喷射砂浆, 封闭巷道围岩及钢筋网。砂浆标号不低于 C30, 喷层厚度 50~80 mm。

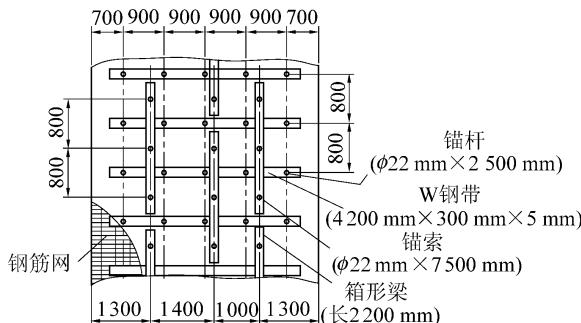


图5 巷道顶板支护设计

Fig. 5 Design of roadway floor support

3) 组合锚索支护。喷浆后施工组合锚索支护,组合锚索由T3钢带与锚索组成,一梁三索,组合锚索沿巷道走向布置,每棚布置3排。锚索间排距1200 mm×900 mm,锚索规格φ22 mm×7500 mm。

4.3 叶片式锚索载荷观测结果

在巷道掘进期间共使用叶片式锚索100余根,试验巷道长度50 m。在试验段内和非试验段内分别安装1组锚索载荷测站,观测锚索载荷增长规律。叶片式锚索载荷观测曲线如图6a所示,由图6a可见,在锚索安装后,受巷道掘进影响,其载荷缓慢增长,当巷道推过约40 d后,锚索载荷基本维持不变,平均为120 kN左右;在观测至360余天后,受17181(1)工作面采动形成的侧向支承压力影响,巷道围岩变形剧烈,且锚索载荷在急剧升高,最大达450 kN,平均400 kN左右;常规锚索载荷观测曲线如图6b所示,由图6b可见,锚索载荷最大仅为150 kN,此后维持不变,而外锚状态良好,表面内锚松脱或失效。

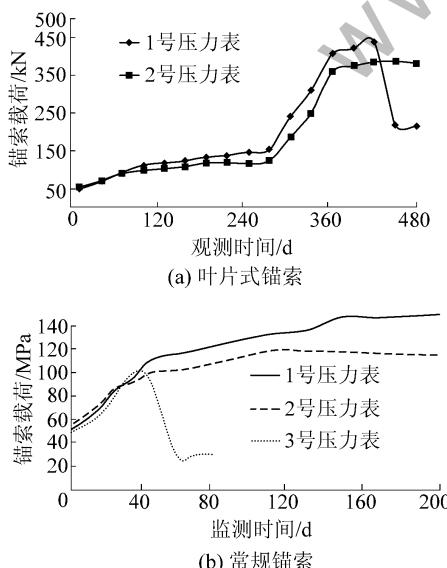


图6 不同种类锚索载荷观测结果

Fig. 6 Observation result for different kinds of anchor cable load

5 结 论

1) 常规锚索由于索体光滑,会出现聚酯薄膜未被搅碎或部分固化剂不能参与反应等问题,不能充分将树脂锚固剂2种组分充分搅拌均匀,有效锚固长度低于设计锚固长度,严重影响了锚索锚固效果。

2) 研制了叶片式搅拌锚索,并进行了搅拌及拉拔仿真试验,结果表明,在锚索设计位置安装的叶片,能够将树脂锚固剂包装袋聚酯薄膜充分搅碎,锚索内锚力得到大幅提升。

3) 将小孔径预应力锚索内锚力增强技术用于工业化试验,结果表明锚索载荷平均能够达到400 kN左右,显著提高了锚索内锚强度,对控制巷道围岩变形效果显著。

参考文献(References):

- [1] 唐中华.高强度树脂锚索在高应力区巷道支护中的应用[J].煤炭科学技术,2013,41(1):72-78.
Tang Zhonghua. Application on roadway support with high strength resin cable bolts in high stress area [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 72-78.
- [2] 康红普,王金华.煤巷锚杆支护理论与成套技术[M].北京:煤炭工业出版社,2007:134-140.
- [3] 李树刚,成小雨,刘超等.破碎围岩动压巷道锚索支护与注浆加固技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(1):67-72.
Li Shugang, Cheng Xiaoyu, Liu Chao et al. Research on technology of anchor cable supporting and grouting reinforcement for dynamic pressurized tunnel with crushed surrounding rock [J]. Coal Science and Technology 2016 44(1): 67-72.
- [4] 李树刚,成小雨,刘超等.破碎围岩动压巷道锚索支护与注浆加固技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(1):67-72.
Li Shugang, Cheng Xiaoyu, Liu Chao et al. Research on technology of anchor cable supporting and grouting reinforcement for dynamic pressurized tunnel with crushed surrounding rock [J]. Coal Science and Technology 2016 44(1): 67-72.
- [5] 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.
- [6] 贾明魁.锚杆支护煤巷冒顶成因分类新方法[J].煤炭学报,2005,30(10):568-570.
Jia Mingkui. New method of classification of reasons of coal roadway roof of anchor support [J]. Journal of China Coal Society 2005, 30 (10): 568-570.
- [7] 陈耕汉,丁帮祥.煤巷锚杆支护巷道冒顶原因分析[J].江苏煤炭,2003(3):8-9.
Chen Genghan, Ding Bangxiang. Analysis on roadway roof fall rea-

sons of coal roadway supported by anchors [J]. Jiangsu Coal ,2003 (3) :8-9.

[8] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒. 地下工程围岩稳定性分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 22-23.

[9] 康红普, 杨景贺, 姜鹏飞. 锚索力学性能测试与分析 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6) :29-33.

Kang Hongpu ,Yang Jinghe ,Jiang Pengfei. Tests and analysis on mechanical properties for cable bolts [J]. Coal Science and Technology ,2015 ,43(6) :29-33.

[10] 吕文华, 刘二文, 张利清. 小孔径预应力锚索力学效应分析 [J]. 煤矿开采, 2007 ,12(1) :17-19 ,28.

Lyu Wenhua ,Liu Erwen ,Zhang Liqing. Mechanics effect analysis of pre-stressing bolting rope with small aperture [J]. Coal Mining Technology ,2007 ,12(1) :17-19 ,28.

[11] 康红普, 吴拥政, 祇晓威, 等. 小孔径锚索预应力损失影响因素的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2011 ,36(8) :1246-1251.

Kang Hongpu ,Wu Yongzheng ,Chu Xiaowei *et al*. Tests on affecting factors for pretension loss of cables with small borehole [J]. Journal of China Coal Society ,2011 ,36(8) :1246-1251.

[12] 周其同, 秦国辉. 锚索锚固失效原因与改进措施 [J]. 水力采煤与管道运输, 2009 (1) :66-67.

Zhou Qitong ,Qin Guohui. The cause of failure of cable anchorage and improvement measures [J]. Hydraulic Coal Mining & Pipeline Transportation ,2009 (1) :66-67.

[13] 王海宁, 汪占领, 孟宪志. 锚索锚固性能不稳定原因分析及解决途径 [J]. 煤矿开采, 2014 ,19(3) :65-67.

Wang Haining ,Wang Zhanling ,Meng Xianzhi. Anchored property instability reason and solving approach of anchored cable [J]. Coal Mining Technology ,2014 ,19(3) :65-67.

[14] 左建平, 孙运江, 王金涛, 等. 大断面破碎巷道全空间桁架锚索协同支护研究 [J]. 煤炭科学技术, 2016 ,44(3) :1-6.

Zuo Jianping ,Sun Yunjiang ,Wang Jintao ,*et al*. Study on full space truss and anchor coordinative support of mine large cross section broken roadway [J]. Coal Science and Technology ,2016 ,44(3) :1-6.

[15] 闫明. 锚索锚固失效原因分析及防治 [J]. 煤炭技术, 2008 ,27(7) :100-101.

Yan Ming. Analysis of invalid reason and prevention and cure for anchorage cable supported [J]. Coal Technology ,2008 ,27(7) :100-101.

[16] 何炳银, 杨永刚. 锚索锚固技术的仿真实验研究 [J]. 江西煤炭科技, 2014 (4) :154-156.

He Bingyin ,Yang Yonggang. Study on simulation experiment of anchor cable reinforcement technology [J]. Jiangxi Coal Science & Technology ,2014 (4) :154-156.

[17] 何炳银. 锚索搅拌性能与锚固力关系分析 [J]. 煤矿安全, 2014 ,45(7) :198-200.

He Bingyin. Relationship analysis between anchoring force and stirring performance of anchor cable [J]. Safety in Coal Mines ,2014 ,45(7) :198-200.

[18] 林健, 康红普. 煤矿锚索预紧应力损失原因分析及解决途径 [J]. 煤矿开采, 2008 ,13(6) :6-8.

Lin Jian ,Kang Hongpu. Cause analysis of pre-tightening loss of anchor cable and settling approach [J]. Coal Mining Technology ,2008 ,13(6) :6-8.

[19] 何炳银. 锚索支护巷道的冒顶事故分析及其预防 [J]. 煤炭科技, 2008 ,34(7) :52-54.

He Bingyin. Roof caving accidents in bolt-anchoring cable supported roadways: analysis and prevention [J]. Coal Science & Technology Magazine ,2008 ,34(7) :52-54.

[20] 顾金才, 沈俊, 陈安敏, 等. 锚索预应力在岩体内引起的应变状态模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000 ,19(S1) :917-921.

Gu Jincai ,Shen Jun ,Chen Anmin ,*et al*. Model testing study of strain distribution regularity in rock mass caused by prestressed anchorage cable [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2000 ,19(S1) :917-921.

[21] 康红普, 林健, 吴拥政, 等. 全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用 [J]. 煤炭学报, 2009 ,34(9) :1153-1159.

Kang Hongpu ,Lin Jian ,Wu Yongzheng ,*et al*. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure [J]. Journal of China Coal Society ,2009 ,34(9) :1153-1159.