

巷道支护理论与技术

深井油页岩伴生条件下第三系煤层巷道围岩控制技术研究与应用

范明建^{1,2}, 毕玉成³, 谢玉祥³, 吕 德³

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013;
3. 中煤能源黑龙江煤化工有限公司 依兰第三煤矿, 黑龙江 依兰 154854)

摘 要 为解决深井油页岩伴生条件下第三系煤层巷道围岩节理裂隙发育、煤岩体强度低、围岩初期变形量大且长期蠕变的支护难题, 针对矿井煤系地层断层数量多落差大、地应力水平高、巷道频繁穿越不同岩层等复杂地质条件, 在系统地质力学测试、围岩锚固性试验、断面形式与支护参数选取原则确定的基础上, 采用“强力锚网喷支护与破碎围岩注浆加固于一体”的围岩控制方法, 实现了对深井油页岩伴生条件下巷道围岩的有效控制, 改变了传统深部复杂巷道变形持续时间长、变形量大、维护难度高的特征, 显著改善了巷道围岩控制效果。

关键词 深部矿井; 油页岩; 第三系煤层; 围岩控制

中图分类号 TD353 **文献标识码** A **文章编号** 1006-6225 (2017) 04-0039-05

Study of Roadway Surrounding Rock Controlling in Tertiary Coal Seams with Associated Oil Shale in Deep

FAN Ming-jian^{1,2}, BI Yu-cheng³, XIE Yu-xiang³, LV De³

(1. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. Mining Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

3. The Third Coal Mine of Yilan, China Coal Energy Heilongjiang Coal Chemical Industry Co., Ltd., Yilan 154854, China)

Abstract: In order to solve the supporting difficulty problems of the Tertiary coal seam roadways with associated oil shale condition in deep, which is surrounding rock joint fissures development, low strength of coal and rock, large initial deformation of surrounding rock and long time creeping, to the complicated geological condition that large amount and falling faults, high level crustal stress, roadway run across different strata frequency, under system geomechanical testing, surrounding rock anchorable testing, section type and supporting parameters, then the surrounding rock controlling method that ‘strengthen anchor, net and gushing coupling supporting and broken surrounding rock grouting reinforcement’ was applied, roadway surrounding rock was controlled effectively under associated oil shale condition in deep, the characters of traditional complicated roadway in deep, that long time deformation, large deformation and high difficulty of maintaining, roadway surrounding rock controlling effects was improved remarkable.

Key words: mine in deep; oil shale; the Tertiary coal seam; surrounding rock controlling

油页岩作为一种高灰分的固体可燃有机矿物, 是一种重要的能源。油页岩与煤的主要区别是其灰分超过 40%, 与碳质页岩的主要区别是含油率大于 3.5%。油页岩的沉积环境从海相到陆相均有分布, 我国油页岩主要以陆相沉积为主。油页岩的形成时代比较广泛, 从寒武系以来的地层中均有分布, 以第三系岩层为主。我国油页岩主要分布在东部、中部和青藏区域, 其中东部区域油页岩资源占全国资源的 48%^[1]。煤和油页岩在盆地同时代地层中产生的现象比较普遍, 在不同的盆地中, 油页岩

和煤的赋存形式不同。断陷型盆地是油页岩和煤共生的最有利盆地类型, 依兰盆地位于郯庐断裂带北延分支——依兰~伊通断裂带, 是我国典型的新生代断陷型盆地。研究表明, 依兰盆地是我国最具有代表性的同时发育煤和油页岩沉积的区域。依兰盆地不整合于前中生界花岗岩之上, 沉积盖层为古近系始新世达连河组。盆地中煤与油页岩存在 3 种不同的赋存方式, 即下部煤与油页岩互层发育、中部油页岩段油页岩与泥页岩互层但不发育煤、上部砂页岩段的局部地区发育煤但不发育油页岩^[2]。

收稿日期 2017-03-16

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2017.04.011

基金项目 国家自然科学基金煤炭联合基金重点项目 (U1261211); 中国煤炭科工集团面上项目 (2014MS034)

作者简介 范明建 (1981-), 男, 山东滕州人, 副研究员, 长期从事煤矿巷道矿压与支护技术方面的研究与技术推广工作。

引用格式 范明建, 毕玉成, 谢玉祥, 等. 深井油页岩伴生条件下第三系煤层巷道围岩控制技术研究与应用 [J]. 煤矿开采, 2017, 22 (4): 39-43, 9.

从巷道围岩控制角度分析,油页岩作为典型的松散破碎岩体,具有明显的流变特性,围岩初期变形速度快、持续时间长且总体变形量较大,主要表现为随时间在地下工程各个方向发生非线性挤出性变形。王俊光等^[3],对油页岩进行了三轴蠕变试验并对不同支护强度和应力状态下的蠕变特征进行了分析,结果表明:油页岩蠕变具有非线性特征,控制油页岩巷道围岩过量变形的根本途径是改变围岩的应力状态,适当提高锚杆、锚索的初始预应力。赵红超等^[4],以民和盆地窑街煤田海石湾煤矿油页岩巷道为例,在巷道变形破坏机理分析的基础上,提出“高强预紧、适度让压、封闭裂隙、切断水源”的围岩控制思想,通过高强度可让压锚杆配合喷浆、注浆,减缓了岩石的流变速度,有效改善了围岩控制效果。王泮飞等^[5],针对北皂煤矿油页岩与煤共生的赋存条件,通过数值计算和矿压规律分析,确定油页岩上行开采软岩巷道支护必须根据地质条件进行综合分析,在正常地质条件下可选用“锚喷”联合支护;对于围岩极其破碎、矿压显现剧烈、片帮严重的区域,应采取“工字钢棚与喷浆、锚网带与喷浆、U 型钢棚与喷浆”等联合支护形式。

本文以我国深部油页岩伴生条件下第三系煤层开采为工程背景,在对深部巷道围岩地质力学参数测定与可锚性试验的基础上,提出深部油页岩伴生条件巷道围岩控制原则;通过支护形式与参数优化、支护材料及组合构件的合理匹配和井下工业性试验,实现了对深部油页岩伴生条件巷道围岩的有效控制,改善了巷道支护效果,为矿井的安全高效建设提供了技术保障。

1 煤层赋存与开采条件

依兰煤田位于黑龙江省依兰县与方正县境内,区域地层出露较全、分布较广。最古老地层为下元古界变质岩系与片麻花岗岩,出露于依兰县城东北及东南部山区,与中、西部的上古生界海西期花岗岩和中生界白垩系碎屑沉积岩建造构成煤盆基底。含煤地层为第三系达连河组地层,以河流、泥沼、湖泊相为主的陆相含煤、油页岩、碎屑岩沉积建造。自上而下划分为砂泥岩段、油页岩段、砂砾岩段及含煤段。含煤段下部由洪积、冲积的花岗质长石砂岩、泥岩、油页岩组成;上部由泥炭沼泽相煤层群、炭质泥岩、湖相油页岩及砂岩等组成,可采煤层为上 1、上 2、中及下煤层。各煤层平均厚度 1.76, 1.69, 6.06, 1.43m, 煤层平均间距 12.7,

12.44 和 7.77m。各煤层顶底板岩层均以油页岩和细粒砂岩为主,有少量炭质泥岩、中粗粒砂岩构成煤层直接顶板。

矿区总体呈单斜构造,倾向南,发育次一级向背斜,地层倾角 17° 。区域断层发育,据地质勘查资料显示,矿区落差大于 30m 的断层 15 条,落差小于 30m 的断层 80 条,并派生大量的小断层。井田煤层埋藏深度为 400~1200m,采用立井开拓,井筒深度均大于 700m。由于矿井断层构造发育,在井底车场及大巷揭露过程中,遇到裂隙发育的花岗岩、结构松散的复合岩层、强度低易风化的油页岩等多种不同的围岩条件,多数巷道不可避免地需多次穿越不同性质的岩层,围岩控制难度较大。

2 巷道围岩应力环境与锚固性能测定

2.1 地质力学参数测定

采用单孔多参数矿井地质力学测试系统,对巷道围岩地应力、围岩强度和围岩结构进行系统测试^[6-8]。西翼辅运大巷开口位置处于海西期花岗岩区域,测得围岩最大水平主应力、最小水平主应力、垂直主应力分别为 33.84, 17.38, 17.17MPa,属于超高地应力区域;西翼回风大巷中煤层区域,测得最大水平主应力、最小水平主应力、垂直主应力分别为 19.68, 10.71, 16.97MPa,属于高地应力区域。最大水平主应力方向为北偏东。围岩偏应力作用明显,水平方向的主应力差值在 8.97~16.46MPa 之间。巷道围岩岩性变化频繁,围岩强度变化幅度较大(图 1)。采用围岩强度原位测定装置,测得花岗岩强度 85~115MPa,复合岩层中的砂质泥岩、细砂岩、粗砂岩平均强度在 31.32~56.48MPa 之间,泥岩平均强度为 16.66~30.49MPa;测得油页岩、中煤层和下煤层的平均强度分别为 17.08, 20.45 和 24.06MPa。围岩原生裂隙较为发育,相同岩性的岩石强度曲线波动较大。矿井巷道围岩集中了埋藏深度大、地应力水平高、复合岩层岩性变化频繁、节理裂隙发育、油页岩伴生煤岩体强度低等多重复杂条件,为深部巷道围岩控制造成极大困难。

2.2 岩石与黏土矿物成分分析

采用 X 射线衍射分析方法对矿井典型岩样的岩石及黏土矿物成分进行了测定和分析。砂岩中非黏土矿物以石英、钾长石和钠长石为主。其中,石英含量在 25.2%~45.1% 之间;钾长石含量在 7.3%~18.5% 之间;钠长石含量在 18.2%~38.4% 之间。黏土矿物平均含量 19.3%,以伊利

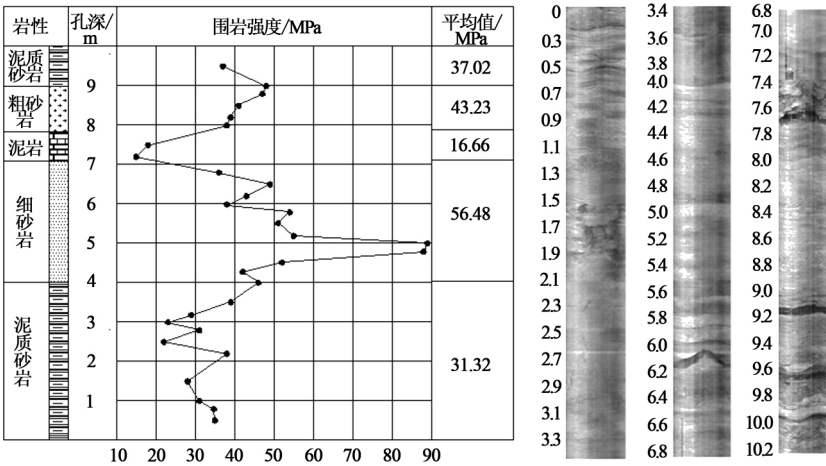


图 1 复合岩层围岩强度与岩体结构测试结果

石、高岭石、伊蒙混层、绿泥石为主，其中高岭石平均绝对含量达 13.9%。基于高岭石的遇水软化特性，判断矿井各类砂岩层具有明显的遇水软化特性。同时，对粉砂岩进行了水理试验，在岩石浸水 30min 后，出现明显的崩解现象。

2.3 围岩可锚性试验

对于软岩矿井而言，围岩的可锚性试验是判断巷道能否采用锚杆支护形式并合理确定锚固参数的前提。尤其是对于深部软岩矿井，锚杆的锚固效果将直接影响锚杆支护对巷道围岩的控制能力。针对矿井大巷掘进过程中揭露的海西期花岗岩、复合岩

层、煤层等不同围岩条件，分别进行了锚杆拉拔试验，为确定巷道锚杆支护的锚固参数提供依据。试验表明，锚固到不同岩性中的锚杆锚索均能达到良好的锚固效果。考虑到围岩结构的随机性和锚固性能的可靠性，确定直径 22mm、BHRB400 的锚杆采用“1 支 k2350+1 支 Z2350”树脂药卷进行加长锚固，直径 18.9mm 的锚索采用“1 支 K2350+2 支 Z2350”树脂药卷进行锚固。在受地质构造影响和煤岩体岩性变化的巷道段，通过调整树脂锚固剂的凝固时间和钻孔注浆，实现对锚杆（索）的全长预应力锚固。

表 1 围岩可锚性试验结果

岩层条件	锚固参数	孔径/mm	锚固长度/mm	拉拔力
复合岩层（含砾砂岩、泥岩、粉砂岩）	φ22mm 锚杆 1 支 K2350	30	635	>230kN，无松动
	φ18.9mm 锚索 1 支 K2350+1 支 Z2350	28	1239	>190kN，无松动
花岗岩	φ22mm 锚杆 1 支 K2350	30	635	>200kN，无松动
	φ18.9mm 锚索 1 支 K2350+1 支 Z2350	28	1239	>190kN，无松动
煤层（油页岩）	φ22mm 锚索 1 支 K2350	30	635	150kN
	φ22mm 锚索 1 支 K2350+1 支 Z2350	30	1270	>210kN，无松动

3 断面形式与支护参数选取原则

矿井受断裂构造及断层影响，煤系地层地质构造复杂。井底车场及大巷掘进过程中，揭露岩层变化频繁，巷道反复穿越泥岩、含砾砂岩、粉砂岩、油页岩以及海西期花岗岩等岩层。揭露的油页岩、粉砂岩、砂质泥岩不仅强度低而且极易风化，加之花岗岩段节理裂隙发育且淋水严重，为巷道围岩控制带来极大困难。鉴于巷道围岩地质条件的复杂性，提出以下巷道断面与支护参数选取的原则：

(1) 优先选择自稳能力强的拱形断面 对于岩性频繁变化、节理裂隙发育的破碎围岩，巷道掘进时很难保证顶板形成连续的承载结构，因此应优先选择自稳能力强的拱形或微拱形断面。巷道拱高可根据围岩破碎程度及掘进时顶板围岩冒落状况进

行调整。巷道开挖后，在高预应力锚杆的及时、主动支护作用下，在围岩浅部快速形成强力承载结构，避免破碎围岩的大面积垮落。

(2) 及时封闭巷道围岩原则 矿井煤系地层为第三系煤层，揭露的含砾砂岩、粗砂岩和粉砂岩强度偏低且易分化崩解，应调整掘进工艺和工序，及时封闭围岩，减少水和空气对围岩强度影响。

(3) 全断面强力支护与关键区域强化支护原则^[4] 矿井井底车场及大巷埋深达到 700m，地应力水平为高地应力—超高地应力区域且偏应力作用明显。深部巷道围岩变形一般具有来压快、持续时间长、破坏范围“由局部到整体”快速发展的特点。对于深部高应力破碎围岩巷道开挖后必须及时支护并提高主动支护强度，做到快速有效控制围岩的初期变形，减轻因围岩初期变形量过大而造成后

期维护难度加大。对于岩层倾角较大的拱形巷道,应对巷道两帮及肩角等关键区域进行强化支护,有效避免因巷道局部变形破坏而造成的支护系统整体失稳。实践证明,通过提高巷道两帮的支护强度,可明显减轻顶板尖角现象和巷道底鼓程度。

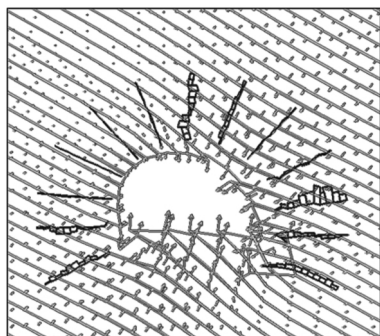


图 2 巷道变形状况与关键区域

(4) 全长预应力锚固与注浆加固原则 矿井巷道围岩集中了埋深大、应力水平高、偏应力作用明显、岩石强度低且节理裂隙发育等困难条件。全长预应力锚固结构不仅可以保证锚杆(索)在松散破碎围岩中的锚固效果,而且可以通过高预紧力的施加,及时主动控制围岩的初期变形,实现深部巷道围岩的快速稳定。另外,全长预应力锚固可以减小因复合岩层错动而造成的锚杆(索)杆体剪切破坏几率。

(5) 重视护表构件匹配与支护应力扩散效果的原则 锚杆支护应力的扩散主要依靠适用围岩条件的锚杆(索)组合构件,与锚杆锚索强度相匹配的组合构件应具备护表面积大、不易发生变形、结构尺寸有利于支护应力在围岩中有效扩散的特点。合理的组合构件形式不仅能够在保证巷道支护效果的前提下降低支护密度,而且可以减轻施工难度。比如对于围岩松散破碎的拱形巷道采用抗变形能力强、安装轻便的 W 钢护板代替 W 钢带、钢筋托梁、工字钢梁等构件,能够有效扩大锚杆支护应力的作用范围,主动支护能力得到大幅提升。

4 井下试验与效果评价

矿井西翼辅运大巷对应标高 $-594\sim-577\text{m}$,平均埋深 685m 。掘进过程中揭露的主要断层有落差 $30\sim65\text{m}$ 、倾角 60° 的 F25 正断层和落差 $0\sim30\text{m}$ 、倾角 60° 的 F14 正断层以及大量的派生断层。巷道在 F25 断层以东揭露岩层为海西期花岗岩, F14 断层以西沿中煤层底板掘进,断层 F25 与 F14 之间穿越油页岩、泥岩、粉砂岩等复合岩层。受地质构造影响,多数巷道围岩节理裂隙发育,在花岗岩区域

出现裂隙长期淋水现象。考虑到巷道围岩条件的多变性与复杂性,设计巷道断面为直墙半圆拱形,掘进宽度 5.5m ,墙高 1.75m 。根据西翼辅运大巷围岩赋存条件,在地质力学参数测定与黏土矿物成分分析、岩层可锚性试验、支护参数选取原则确定的基础上,结合现有深部软岩巷道围岩控制理论与工程实践成果^[10-13],确定采用“全断面强力锚网喷与注浆加固相结合”的围岩控制方法。巷道开挖后进行锚网喷支护时,重视拱顶两肩、巷帮等关键区域的初期支护强度,控制围岩的初期变形,避免因局部变形严重而造成的巷道整体破坏。

巷道开挖并初喷后,进行锚网索初次支护。设计杆体直径 22mm ,屈服强度不低于 500MPa 的螺纹钢锚杆,树脂全长预应力锚固,预紧力 $60\sim80\text{kN}$ 。选用厚度 5mm ,宽度 280mm ,长度 450mm 的双向四肋井型 W 钢护板作为强力锚杆的组合构件,实现锚杆支护应力的有效扩散。锚杆排距 900mm ,拱顶间距 900mm ,巷帮间距 700mm 。锚索直径 18.9mm ,拱部长度 6.3m ,帮锚索长度 4.3m ,初始张拉力 $200\sim250\text{kN}$,锚网索支护参数如图 3 所示。锚索选用承载能力与钢绞线强度相匹配的 $300\text{mm}\times300\text{mm}\times16\text{mm}$ 强力拱形托板,锚索排距 1.8m ,每排 5 根。护网选用强度高、刚度大、主动支护能力强的钢筋网,网孔规格 $100\text{mm}\times100\text{mm}$ 。锚网支护系统中的 W 钢护板、锚索托板、直径 6.5mm 的钢筋网共同组成巷道围岩的护表系统。在对锚杆(索)施加较高预紧力的同时,对钢筋网进行张紧,实现了支护系统对巷道围岩的强力主动支护。在巷道围岩开挖、初喷、强力锚网支护完成后,待初期变形稳定后,对巷道表面进行复喷。同时,对巷道掘进揭露的断层影响区域和岩性变化的交界区域,采取“钻孔注浆”的方式,恢复破碎围岩的完整性,提高巷道围岩的承载能力和抗变形能力,避免因巷道服务期间的各种动压显现而造成的围岩持续变形与破坏。

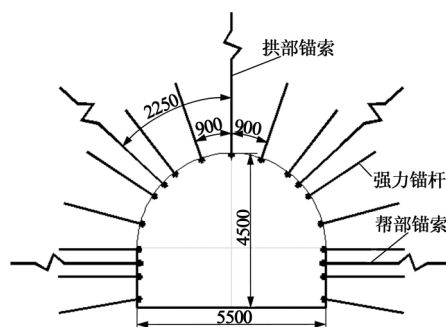


图 3 锚网索支护参数

巷道掘进期间矿压监测结果(图4)显示,两帮移近量88mm,顶底移近量70mm。其中,下帮移近量为55mm,顶板下沉量、上帮移近量与底鼓量相当,一般在30~40mm左右。总体来看,巷道掘进期间变形量较小,且在距迎头80~90m后趋于稳定,巷道支护系统保持良好的整体稳定性。顶板离层值较小,深部离层最大值为2mm,浅部离层值为1mm。除巷道拱肩锚杆(索)受力变化幅度较大外,多数锚杆(索)受力变化较小且能够较快稳定。锚杆(索)受力在距迎头60~80m后趋于稳定。锚杆(索)受力合理,稳定后的锚杆受力集中在50~90kN之间,是杆体屈服载荷的23.8%~42.9%。锚索受力稳定在110~200kN之间,是锚索破断载荷的26.8%~48.8%。高预应力强力锚杆支护系统既可有效控制围岩的初期变形,又为巷道服务期间抵抗各种压力显现留有一定的安全系数。

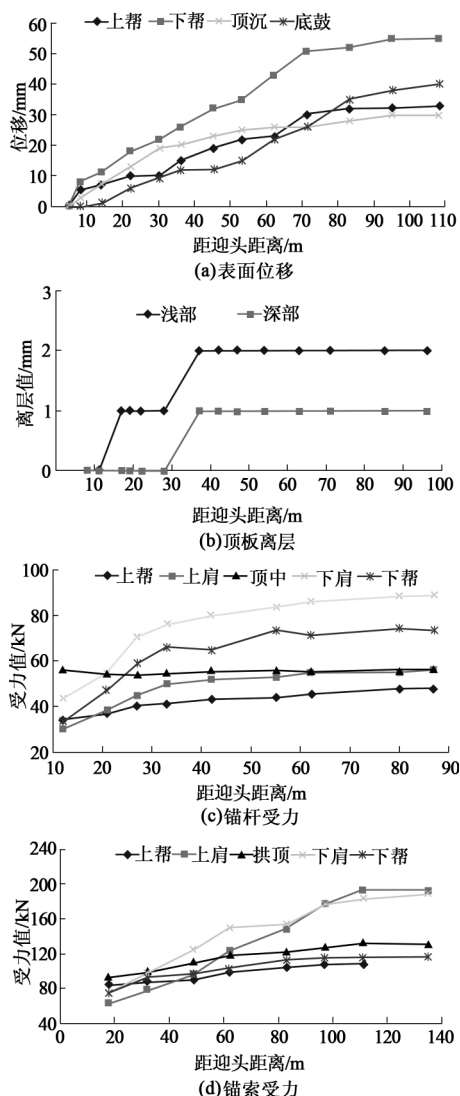


图4 掘进期间巷道矿压监测结果

5 结论

(1) 断陷型盆地是油页岩和煤共生的有利盆地类型,受断裂构造的影响,煤与油页岩共生的区域多为地质条件复杂区域。依兰矿区是我国典型的新生代断陷型盆地,矿区深部资源赋存集中了埋藏深度大、地应力水平高、复合岩层岩性变化频繁、节理裂隙发育、油页岩伴生煤岩体强度低等多重复杂条件,巷道围岩控制难度极大。

(2) 在确保围岩锚固性能和可靠锚固参数的前提下,采用“全断面强力锚网喷支护与破碎围岩注浆加固”相结合的围岩控制方法。高预应力强力锚网喷支护实现了对深部软岩开挖后的及时封闭和主动支护,有效控制了围岩的初期变形和持续蠕变,提高支护系统的抗扰动能力;在初次强力锚网喷支护的基础上,通过“钻孔注浆”加固,恢复破碎围岩的完整性,提高围岩的整体承载能力。

(3) 全断面强力复合支护和关键部位的强化支护,可避免因巷道局部变形破坏而造成的整体失稳。工程实践表明,深部高应力软岩地质构造影响区域和煤岩体岩性变化区域,是巷道矿压显现最明显的区域。应在强力锚网喷支护的基础上,采取岩体注浆、架设U棚、壁后注浆等综合加固措施,保证永久巷道的长期稳定。

(4) “强力锚网喷支护与破碎围岩注浆加固”为解决深井高应力油页岩伴生条件下巷道围岩控制难题提供了有效途径。矿井西翼辅运大巷在距迎头80~90m后趋于稳定,断面收敛率低于2%,整体支护效果良好。

参考文献

- [1] 刘招君,董清水,叶松青,等.中国油页岩资源现状[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(6):869-876.
- [2] 柳蓉,刘招君,柳世友,等.依兰盆地煤与油页岩赋存特征及成矿规律研究[J].煤炭学报,2012,37(5):776-781.
- [3] 王俊光,梁冰.油页岩地下开采巷道围岩的流变特性及工程应用[J].防灾减灾工程学报,2010,30(6):685-690.
- [4] 赵红超,曹胜根,张科学,等.深部油页岩巷道变形破坏机理及稳定性控制研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(2):178-184.
- [5] 王泮飞,刘国磊,袁承录,等.北皂煤矿油页岩上行开采对软岩巷道的影响分析及支护对策[J].煤炭工程,2011,43(7):53-55.
- [6] 康红普,林健.我国巷道围岩地质力学测试技术新进展[J].煤炭科学技术,2001,29(7):27-30.(下转9页)

含水构造反映明显, 曲线出现剧烈跳跃起伏, 这是识别不含水构造的典型电性特征。

(2) 对于含水构造, 整体电位值相对较高, 视电阻率值相对较低, 电位和视电阻率曲线较为圆滑衰减, 反演深度较正常岩层深度要浅, 其电性响应特征与锚网等铁器干扰的电性响应特征相类似, 如能排除现场铁器干扰, 则较易识别含水构造。

(3) 对于含水采空区, 整体电位值相对偏高, 视电阻率值相对偏低, 且随着含水采空区面积分布范围的扩大, 典型响应曲线特征点大幅增加, 呈束状分布, 这是识别含水采空区的典型特征。

(4) 对于不含水采空区, 整体电位值相对偏低, 视电阻率值相对偏高, 局部曲线出现剧烈跳跃起伏, 且随着不含水采空区面积分布范围的扩大, 剧烈跳跃点增多, 亦呈束状分布, 易于识别。

各类地质异常体电性响应特征分析均未考虑现场铁器、电力、水力等干扰条件和干扰体对响应曲线的影响, 亦未考虑仪器及软件不同参数选取对响应曲线的特征影响, 因此, 以后的试验工作中需加大这方面的研究工作, 以期更符合实际条件。

参考文献

- [1] 张 彬. 煤矿隐蔽灾害井下精细探测技术与优化 [J]. 煤矿开采, 2016, 21 (4): 26-32.
- [2] 姜志海. 巷道掘进工作面瞬变电磁超前探测机理与技术研究 [J]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2008.
- [3] 陈明生, 闫 述, 石显新, 等. 二维地质体的瞬变电磁场响应特征 [J]. 地震地质, 2001, 23 (2): 252-256.
- [4] 闫 述, 陈明生, 傅君眉. 瞬变电磁场的直接时域数值分析 [J]. 地球物理学报, 2002, 45 (2): 275-284.
- [5] 姜国庆, 贾春梅, 牟 义, 等. 矿井瞬变电磁法全空间处理及三维解释方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30 (5): 2164-2170.
- [6] 郭 纯, 刘白宙, 白登海. 地下全空间瞬变电磁技术在煤矿巷道掘进头的连续跟踪超前探测 [J]. 地震地质, 2006, 28 (3): 456-462.
- [7] 刘志新, 岳建华, 刘仰光. 扇形探测技术在超前探测中的应用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36 (6): 822-868.
- [8] 程久龙, 王玉和, 于师建, 等. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28 (4): 60-62.
- [9] 孙庆先, 牟 义, 杨新亮. 红柳煤矿大采高综采覆岩“两带”高度的综合探测 [J]. 煤炭学报, 2013, 38 (2): 283-286.
- [10] 姜志海, 岳建华, 刘树才. 多匝重叠小回线装置形式的矿井瞬变电磁观测系统 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (11): 1152-1156.
- [11] 殷长春, 李吉松. 任意角度瞬变电磁测深正演问题计算方法 [J]. 物探与化探, 1994, 18 (4): 297-303.
- [12] 窦文武, 牟 义, 邱 浩, 等. 基于 Voxler 的瞬变电磁勘探三维解释技术研究 [J]. 煤炭科技, 2015 (4): 37-39.
- [13] 张振勇, 韩德品, 陈香菱, 等. 综合电法在煤矿积水老空区探查中的应用 [J]. 矿业安全与环保, 2013, 40 (1): 77-80.
- [14] 牟 义. 矿井超前精细探测技术方法与应用 [J]. 煤矿安全, 2012, 43 (11): 88-91.
- [15] 夏春鹏, 窦文武, 樊林林, 等. 不同视电阻率导体对瞬变电磁法的响应特征分析 [J]. 中州煤炭, 2015 (11): 114-117.
- [16] 征与支护技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (11): 2227-2241.
- [17] 范明建, 任勇杰, 王德田. 深井高地应力复合岩层巷道围岩控制技术 [J]. 中国矿业, 2015 (7): 95-99.
- [18] 林 健, 范明建, 汪占领. 软岩巷道锚杆支护研究及应用实例分析 [J]. 煤矿开采, 2015, 20 (6): 54-59, 72.
- [19] 许兴亮, 张 农, 徐基根, 等. 高地应力破碎软岩巷道过程控制原理与实践 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24 (1): 51-55.
- [20] 康红普, 王金华, 林 健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (12): 1233-1238.
- [21] 康红普, 范明建, 高富强, 等. 超千米深井巷道围岩变形特征与支护技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (11): 2227-2241.
- [22] 范明建, 任勇杰, 王德田. 深井高地应力复合岩层巷道围岩控制技术 [J]. 中国矿业, 2015 (7): 95-99.
- [23] 林 健, 范明建, 汪占领. 软岩巷道锚杆支护研究及应用实例分析 [J]. 煤矿开采, 2015, 20 (6): 54-59, 72.
- [24] 许兴亮, 张 农, 徐基根, 等. 高地应力破碎软岩巷道过程控制原理与实践 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24 (1): 51-55.
- [25] 康红普, 王金华, 林 健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (12): 1233-1238.
- [26] 何国清, 杨 伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉陷学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
- [27] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要巷道保护煤柱留设与压煤开采规程 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 土地复垦方案编制规程 (TD/T 1031.3—2011) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [29] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路路基设计规范 (JTG D30—2015) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.

责任编辑: 徐乃忠