

基于复合岩体弹性模量优化底板注浆加固深度^{*}

许成富¹, 苗葳^{2,3}, 张博淞², 李磊¹, 王立彬²

(1.焦作煤业(集团)有限责任公司九里山矿, 河南 焦作市 454002;

2.中国矿业大学(北京)能源学院, 北京 100083;

3.焦作煤业(集团)有限责任公司, 河南 焦作市 454002)

摘要:以焦作矿区底板注浆加固改造工作面为研究背景,采用超声波法实测工作面底板注浆前后岩体弹性模量,定量分析了注浆深度范围内复合岩层整体强度变化特征,研究了底板注浆加固对工作面复合岩层底板破坏带的影响。结果表明:经注浆加固后,底板泥岩、砂质泥岩、砂岩、L9灰岩、L8灰岩的弹性模量分别增长了640%~852%、241%~641%、221%~247%、176%、40%~159%,底板破坏深度由30.59 m降低至11.7 m,减少了约62%;随着注浆加固后底板破坏深度减小,绝对隔水层厚度随之增加,对工作面底板注浆加固深度进行优化,采用双层立体布孔方式,在保证底板注浆效果的同时,降低3140 m工程总钻探进尺,并较原计划节约了35 d施工工期。

关键词:大水矿床开采;弹性模量;底板注浆加固;复合岩体强度;超声波法

中图分类号:TD745 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)04-0138-06

0 引言

焦作矿区是全国有名的大水矿区,具有底板含水层富水性强、含水层补给水源充沛、水压高、隔水层薄等水文地质特征^[1-2]。该矿区自1999年引入了井下底板注浆加固改造技术以来,通过二十余年的生产实践,证明了该技术可以有效防止工作面底板大型突水,降低了底板突水的频次与水量^[3-6]。但工作面底板注浆深度基本选择采用经突水系数法反算后得到的唯一深度,该方法优点是可最大限度地预留足够的安全深度,但是未考虑底板岩层在加固后的强度变化和底板破坏带变化情况,在部分底板含水层富水性弱或水压较低、未超突水系数临界值的区域,则会造成工程资源浪费,底板注浆加固工期延长等,严重影响了工作面的生产接替。

底板注浆加固技术主要通过裂隙、岩溶内的流

动浆液置换其中水或空气的贮存空间,凝固的结石体提高了破碎岩体的完整性,进而提高了岩体强度^[7]。根据以往学者的研究,单叶民^[8]使用新型浆液对破碎砂岩进行加固,加固后的结石体抗压强度增加约73%。吴思宇等^[9]通过粉质砂岩和紫砂岩注浆加固,研究结果表明改造后的岩体弹性模量变化量较小,强度约为原岩残余强度的2倍。翟守俊等^[10]研究认为破碎岩体注浆后,其注入介质强度与改造后岩体强度成反比。王琦等^[11]对破碎围岩改造后的单轴抗压强度和破碎程度进行分析,认为破碎程度与改造后的强度无明显相关关系,试件破坏形式为轴向劈裂。刘泉声等^[12]对加固后的泥岩岩样进行抗剪试验,发现含单一裂隙的泥岩加固后的剪切刚度增加,粗糙裂隙内的凸台和固结后的浆体可以共同传递剪切应力,起到提高裂隙岩体抗剪强度的效果。许延春等^[13]建立了注浆加固工作面底板突水“孔隙-裂隙升降型”力学模型,研究了注浆及采动对岩体孔隙-裂隙类型升降变化的影响,揭示了注浆加固提升岩体类型的力学机理。

以往研究成果多集中于注浆后岩体强度变化方面,很少有将工作面现场实测岩体力学变化结果应用在确定底板注浆加固深度方面。本文以焦作矿区九里山矿、赵固二矿底板注浆加固工作面为例,采用超声波技术现场实测底板注浆加固岩体的弹性模量,综合测定底板加固前后的破坏情况,并应用于确定工作面底板注浆加固深度。

1 岩体强度测定方法

1.1 测定原理

岩体声波测试技术可用于研究纵波和横波在岩

^{*} 收稿日期:2023-04-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51934008)。

作者简介:许成富(1968—),男,河南社旗人,高级工程师,研究方向为矿山开采与安全管理,E-mail:13782610285@139.com。

通信作者:苗葳(1988—),男,河南焦作人,博士研究生,高级工程师,研究方向为近水体矿床开采与灾害防治,E-mail:wilson09@126.com。

体内部的传播速度及规律,据此推断岩体相关的物理力学状态,获得岩体的弹性模型,为评价工程岩体质量提供参考。由于裂隙和结构面的存在,岩体不能看作是理想的均匀介质。从工程角度考虑,当超声波波长远小于所测量原岩体的空间尺寸时,可将岩体视为连续的各向同性线弹性材料。岩体内部波速与岩体弹性模量关系如下^[14]。

$$E_d = \frac{\rho(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}{1-\mu_d} V_p^2 \quad (1)$$

$$\Delta E = E_d - E'_d \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{E'_d - E_d}{E_d} \times 100\% \quad (3)$$

式中, ρ 表示岩体密度, g/cm^3 ; E_d 、 E'_d 分别为注浆前后岩体动弹性模量, GPa ; ΔE 为注浆前后岩体动弹性模

量变化量, GPa ; μ_d 为岩体动泊松比; V_p 为岩体内部纵波波速, km/s ; λ 为注浆加固岩体动弹模增强率, %。

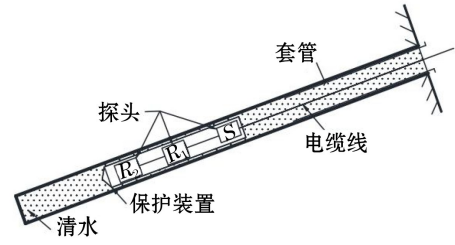
1.2 测定设备

选用 ZBL-U520 型单孔超声波非金属超声波探测仪,该探测仪包括一个发射换能器(点位 S)和两个接收换能器(点位 R_1 、 R_2),其中 S 至 R_1 的距离 L 为源距, R_1 、 R_2 之间的距离 ΔL 为间距。通过主机激励发射换能器 T 辐射声波,满足入射角等于第一临界角的声线,在岩体中声波折射角等于 90° ,即声波沿孔壁滑行,然后折射回孔中,由接收换能器 R_1 、 R_2 分别接收。通过接收声波在岩体中的传播时间差 Δt 来计算岩体内部声波速度,从而求得岩体弹性力学参数。超声波法所测岩体动弹性模量为 E_d ,根据转换公式 $E_j = 0.25E_d^{1.3}$,可得岩体静弹性模量 E_j ,即一般概念上的弹性模量 E 。



图 1 ZBL-U520 型单孔超声波非金属超声波探测仪

Fig.1 ZBL-U520 single-hole ultrasonic non-metallic ultrasonic detector



2 复合岩层底板破坏突水评价

2.1 煤层底板复合岩层的抗压强度计算

采场底板的岩体由不同岩性、不同厚度的岩层构成,具有非均质特性,如图 2 所示。在探测得到各个岩层具体的力学参数后,根据实际地层赋存概况,建立多岩层复合底板的关键参数计算体系,并据此对注浆工作面突水危险性进行评价。

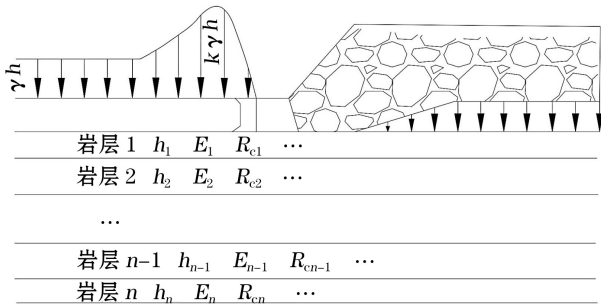


图 2 采场应力分布与岩层参数位置

Fig.2 Stress distribution in stope and location of rock parameters

针对煤层底板多岩层力学问题,可通过平均模量法进行分析。本次计算视厚度为权值,按照式(4)和式(5)对底板岩体的强度进行加权平均,而后再对

容重等相关参数进行平均,最终得出适合该工作面的统一参数值。

$$\bar{R}_C = \frac{h_1 R_{C1} + h_2 R_{C2} + \dots + h_i R_{Ci} + \dots + h_n R_{Cn}}{h_1 + h_2 + \dots + h_i + \dots + h_n} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i R_{Ci}}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (4)$$

式中, $\bar{R}_C$ 为底板岩层抗压强度加权平均值, MPa ; h_i 为第 i 岩层的厚度, m ; R_{Ci} 为第 i 层岩层的抗压强度, MPa 。

根据断裂力学理论公式,底板破坏带深度为:

$$h = \frac{1.57\gamma^2 h^2 L}{4\bar{R}_C^2} \quad (5)$$

式中, γ 为底板隔水层平均容重, N/m^3 ; h 为煤层开采深度, m ; $\bar{R}_C$ 为底板岩层抗压强度加权平均值, MPa ; L 为工作面长度, m 。

由式(5)可知,底板岩层的抗压强度与底板破坏深度成反比例关系,即底板岩层抗压强度增强,底板破坏深度将减少。

根据底板突水系数计算公式 $T = P/(M -$

b_d)。其中, P 为受威胁含水层水压; M 为绝对隔水层厚度(经注浆加固合格的隔水层); b_d 为底板破坏带深度。当底板破坏深度 b_d 减小时,底板绝对隔水层厚度增大,突水危险系数 T 减小。根据《煤矿防治水细则》,当正常地带突水系数选取临界值 0.1 MPa/m 时,可算出绝对隔水层厚度值。

2.2 岩体强度变化测定

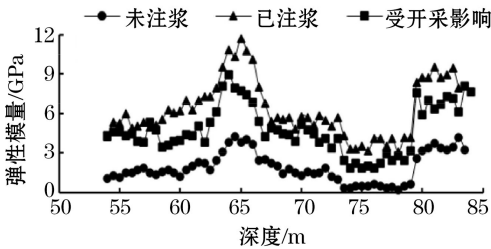
在焦作矿区九里山矿 15091 工作面选择一个底板钻孔,利用超声波法于工作面开采前后分别测定两次注浆加固后的岩体弹性模量(第 2 次由于钻孔变形,仅探测至孔深 36.3 m);在赵固二矿 11030 工作面选取同一底板钻孔,利用超声波法分别测定加固前、加固后和工作面开采影响期间的底板弹性模量。两工作面底板岩层组合基本一致,主要充水含水层为 L8 灰岩含水层,距离煤层 23~26.5 m,间接充水含水层为 L2 灰岩含水层,距离煤层 72~75 m,含水层之间由泥岩、砂质泥岩、薄层灰岩组成的复合岩体隔水层隔开。测定区域避开工作面回采、断层构造等影响因素。

探测钻孔孔口至垂深 12 m 处因安置了金属套管,现场实测自超声波探头完全出套管进入岩层后进行,每 2 m 收集一次数据,到进入 L8 灰岩含水层垂距 4.5 m 底终止(未穿过 L8 灰岩)。

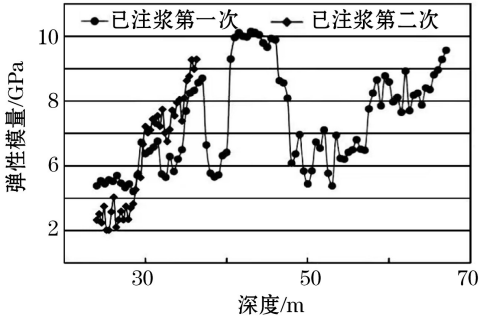
为提高观测精度,在观测过程中确保钻孔中注满水。将超声波测量电缆另一头与超声仪连接,利用超声仪记录下探头所在的不同位置岩层的波速。

观测完毕后,将塑料管、电缆及探头一起从钻孔中取出。通过对工作面底板注浆加固前后的底板岩层进行波速观测与对比分析,得到注浆浆体对底板岩层力学性质的影响。

由图 3 和表 1 可以看出,底板岩层经过注浆加固后,弹性模量出现明显增强。由岩性与弹性模量增长比例可以看出,泥质岩类一般硬度小,受到高压注浆等外因劈裂作用后,更易产生裂隙,浆液充填裂隙凝固后使得岩体弹性模量有了较大增长。



(a) 11030 工作面注浆前后底板岩层弹性模量



(b) 15091 工作面注浆后岩层弹性模量

图 3 超声波观测底板岩层弹性模量变化曲线

Fig.3 Curves of elastic modulus of floor strata observed by ultrasonic

表 1 底板岩层超声波观测成果

Table 1 Ultrasonic observation results of floor strata

底板垂深/m	弹性模量平均值/GPa			11030 工作面 注浆前后弹性模量		15091 工作面弹性模量		岩性
	11030 工作面 注浆前	11030 工作面 注浆后	15091 工作面 注浆后	增加值/GPa	λ /%	增加值/GPa	λ /%	
12~17.4	1.7	5.9	5.29	4.2	247	3.59	221	砂岩
17.5~18.4	3.8	10.5	10.49	6.7	176	6.69	176	L9 灰岩
18.5~22.9	1.7	5.8	12.60	4.1	241	10.9	641	砂质泥岩
23~28.4	0.5	3.7	4.76	3.2	640	4.26	852	泥岩
28.5~33.5	3.4	8.8	4.76	5.4	159	1.36	40	L8 灰岩

2.3 15091 工作面底板复合岩层抗压强度

15091 回采工作面位于焦作矿区九里山矿东翼,煤层厚度平均为 5.5 m,工作面长为 110 m,采深最大为 470 m。底板直接充水含水层 L8 灰岩含水层厚约 8.5 m,底板隔水层厚度约 23 m,水压约 1.92 MPa,突水系数为 0.08 MPa/m;间接充水含水层 L2 灰岩含水层厚约 12 m,底板隔水层厚度约 75 m,水压约 3.8 MPa,突水系数为 0.05 MPa/m。工作面采用直

流电法实测的底板破坏带深度为 15 m。为避免工作面回采过程中发生水害事故,回采前进行了 L8 灰岩底板注浆与断层注浆加固工程,其中底板注浆加固深度为 L8 灰岩下垂距 35 m,即煤层底板下 66.5 m。

由于超声波实测过程中煤层底板垂深 12 m 以上有套管阻隔,未能实测数值,采用相同岩性的弹性模量进行计算。不同岩性、构造特征下沉积岩单轴抗压强度与弹性模量之间的关系式见表 2^[15]。

表 2 沉积岩单轴抗压强度与弹性模量关系式

Table 2 Relationship between uniaxial compressive strength and elastic modulus of sedimentary rock

岩性	关系式
砂岩	$E=0.0887R_C^{1.0851}$
泥岩	$E=0.0924R_C^{1.1339}$
砂质泥岩	$E=0.0186R_C^{1.7426}$
灰岩	$E=0.0913R_C^{1.2053}$

将换算后的底板不同岩层抗压强度数值代入式(4),计算得 15091 工作面 L8 灰岩及以上底板复合岩层抗压强度,具体结果见表 3,原岩复合岩层总体抗压强度为 13.40 MPa,加固后复合岩层总体抗压强度为 36.17 MPa。

表 3 15091 工作面底板复合岩层抗压强度计算结果

Table 3 Calculation results of compressive strength of composite rock on the floor of 15091 working face

岩性	厚度/ m	原岩平均 弹性模量/ GPa	加固后岩 层平均弹 性模量/ GPa	换算后 原岩抗压 强度/ MPa	换算后 加固岩层 抗压强度/ MPa
泥岩	2.2	0.5	4.76	4.43	32.34
砂质泥岩	3.8	1.7	12.60	13.34	42.12
砂岩	5.5	1.7	5.29	13.34	43.28
L9 灰岩	1.5	3.8	10.49	22.05	51.21
砂质泥岩	4.5	1.7	12.60	13.34	42.12
泥岩	5.5	0.5	4.76	4.43	32.34
L8 灰岩	8.5	3.4	4.76	20.11	26.59

2.4 工作面底板加固深度安全性评价

将转换后的原岩复合岩层抗压强度值代入式(5)。根据工作面地质资料, γ 取 2.4×10^4 N/m³, h 取 470 m, L 取 110 m,可得在原岩状态下,底板破坏深度为 30.59 m,煤层距离 L8 灰岩含水层 23 m,则工作面底板破坏带直接连通浅部 L8 灰岩含水层,将造成突水。

工作面注浆加固后,底板岩体强度得到明显提升。根据加固后复合岩层抗压强度计算,底板破坏深度为 11.7 m,与现场实测底板破坏深度基本一致。底板破坏深度取计算与现场实测最大值 15 m,突水系数按临界值 0.1 MPa/m 考虑(断层破碎带已加固),则除去底板破坏带后的注浆加固绝对隔水层厚度应为 53 m,工作面实际底板注浆加固深度为底板下 66.5 m,超过绝对隔水层厚度 13.5 m。

由以上分析可知,在加固底板隔水层留设有一

定余量的前提下,目前采用的底板整体加固深度虽然保证了足够的绝对隔水层厚度,但在水文地质条件相对简单的工作面,会造成一定程度的人工、材料与工期浪费。

3 底板注浆深度优化实例

3.1 九里山矿 16131 工作面

16131 工作面位于 16 采区东翼,与 15091 工作面属同一水文地质单元,地质与水文地质情况基本一致。工作面长为 129 m,埋深为 463 m,共有一条断层(落差为 1.4 m)。

工作面 L8 灰岩含水层厚为 8.0 m,最高水压为 0.83 MPa,最小隔水层厚度约为 23 m;间接充水含水层为 L2 灰岩含水层,厚约 12 m,最高水压为 3.6 MPa,最小隔水层厚度约为 76 m。16131 工作面含水层水压与断层条件优于 15091 工作面。

3.2 底板注浆深度优化

(1) 绝对隔水层厚度。将工作面注浆后的复合岩层抗压强度值及工作面各项参数代入式(5),得出 L8 灰岩注浆加固后底板破坏深度为 13.2 m,与 15091 工作面实测底板破坏深度相比取最大值,即 15 m。

(2) 加固深度。L8 灰岩注浆加固后,主要威胁含水层为 L2 灰岩含水层,水压为 3.6 MPa,底板破坏深度取计算与现场实测最大值 15 m,突水系数按临界值 0.1 MPa/m 考虑,则除去底板破坏带后的注浆加固绝对隔水层厚度为 51 m,即工作面实际底板注浆加固层位应至少位于 L8 灰岩下 20 m 处,相较于 15091 工作面,16131 工作面底板注浆加固工程设计垂深可减少 15 m。

(3) 底板加固钻孔设计优化。根据工作面水文地质特征与加固后岩体特征,对工作面底板注浆加固设计进行如下调整。一是采用双层立体布孔方式交错布孔。根据以上计算结果,采用交叉布孔方式将部分钻孔终孔垂深减少,并分两个层次进行钻孔终孔位置设计:第一层次钻孔施工深度为 L8 灰岩底板下垂深 20 m,满足计算求得的注浆加固绝对隔水层厚度;第二层次保留原设计深度,即 L8 灰岩底板下垂深不少于 35 m,以消除深部导水裂隙的威胁(见图 4),形成双层网状结构。二是需设计专门的断层加固钻孔,对断层面和断层上下盘含水层进行注浆加固,消除断层导水性。三是对物探低阻异常区进行钻探验证。

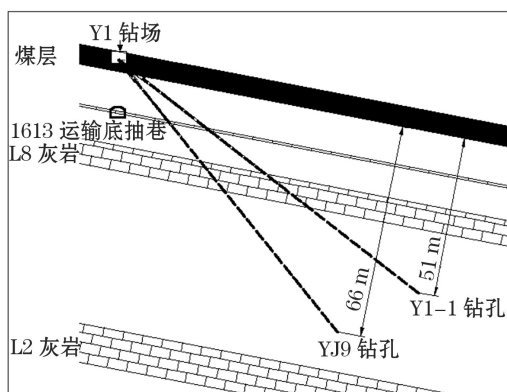


图4 16131工作面Y1钻场双层立体布孔剖面

Fig.4 Double-layer stereoscopic layout profile in Y1 drilling field of 16131 working face

3.3 工程效果验证

工程施工底板注浆钻孔共381个(含断层加固钻孔),累计钻探进尺为42 024.50 m,钻孔总出水量为2629.29 m³/h,注入干料为8327.19 t(其中水泥为2625.35 t,黏土为5701.84 t)。加固前瞬变电磁探测异常区为10处。加固后瞬变电磁勘探的区域均已变为相对高阻区。

16131工作面底板注浆加固工程已通过评价验收,并开始回采,工作面没有底板涌水情况。较原计划减少了3140 m工程总钻探进尺,并节省约35 d的钻孔施工工期,保证了工作面正常接替。

4 结论

(1) 通过实测底板注浆前后岩体弹性模量,发现经底板注浆加固后岩体弹性模量明显增强:泥岩增长了640%~852%,砂质泥岩增长了241%~641%,砂岩增长了221%~247%,L9灰岩增长了176%,L8灰岩增长了40%~159%。由岩性与弹性模量增长比例可以看出,泥质岩类易受到高压注浆劈裂作用产生裂隙,浆液充填裂隙凝固后使得岩体弹性模量增幅最大。

(2) 根据实测底板岩体弹性模量计算复合岩层的抗压强度,换算后求得原岩状态下底板破坏深度为30.59 m,加固后岩体底板破坏深度为11.7 m,深度减少了约62%;随着注浆加固后底板破坏深度减小,绝对隔水层厚度随之增加。

(3) 根据注浆加固后底板绝对隔水层厚度计算,优化九里山矿16131工作面底板注浆加固工程设计,采用立体双层布孔方式,在保证工程质量的同时,减少了3140 m工程总钻孔进尺,较原计划节约了35 d的施工工期。

参考文献(References):

- [1] 苗葳,许延春,阚雪冬,等.大水矿区底板采动“两带”实测方法研究[J].煤炭技术,2022,41(3):116-119.
MIAO Wei, XU Yanchun, KAN Xuedong, et al. Research on measurement of mining effect on floor “two zones” in abundant underground water mining area [J]. Coal Technology, 2022, 41(3): 116-119.
- [2] 盖秋凯,黄磊,赵霖.基于因子分析法的焦作矿区底板突水模型研究[J].煤炭工程,2021,53(1):123-127.
GAI Qiukai, HUANG Lei, ZHAO Lin. Floor water inrush model of Jiaozuo mining area based on factor analysis [J]. Coal Engineering, 2021, 53(1): 123-127.
- [3] 尹尚先,徐维,尹慧超,等.深部开采底板隔厚水层突水危险性评价方法研究[J].煤炭科学技术,2020,48(1):83-89.
YIN Shangxian, XU Wei, YIN Huichao, et al. Study on risk assessment method of water inrush from thick floor aquifuge in deep mining [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 83-89.
- [4] 武强,李慎举,刘守强,等.AHP法确定煤层底板突水主控因素权重及系统研发[J].煤炭科学技术,2017,45(1):154-159.
WU Qiang, LIU Shenju, LIU Shouqiang, et al. AHP method determining the weight of main factors controlling water inrush from coal seam floor and system research and development [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 154-159.
- [5] 查华胜,张海江,连会青,等.潘二煤矿A组煤层底板灰岩水害微震监测[J].煤炭学报,2022,47(8):3001-3014.
ZHA Huasheng, ZHANG Haijiang, LIAN Huiqing, et al. Microseismic monitoring on limestone water inrush at coal seam floor for group A coal layer of Pan'er coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3001-3014.
- [6] 张党育,蒋勤明,高春芳,等.华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(6):31-36.
ZHANG Dangyu, JIANG Qinming, GAO Chunfang, et al. Study progress on key technologies for regional treatment of karst water damage control in the floor of North China coalfield [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 31-36.
- [7] 胡少银,刘泉声,李世辉,等.裂隙岩体注浆理论研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2022,50(1):112-126.
HU Shaoyin, LIU Quansheng, LI Shihui, et al. Advance and review on the grouting critical problems in fracture rock mass [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 112-126.
- [8] 单叶民.模拟注浆材料加固散煤体实验效果分析[J].煤炭技术,2014,33(11):170-172.
SHAN Yemin. Simulation studies of grouting materials reinforcing loose coal [J]. Coal Technology, 2014, 33(11): 170-172.
- [9] 吴思宇,李奇霏,张华帅.注浆加固对破裂岩体力学性能的影响[J].才智,2010(5):72.

- WU Siyu, LI Qifei, ZHANG Huashuai. Influence of grouting reinforcement on mechanical properties of fractured rock mass[J]. Ability and Wisdom, 2010(5):72.
- [10] 翟守俊,王文学,胡巍,等.基于 ADINA 的动压影响下巷道围岩稳定性数值分析[J].能源技术与管理,2011(1):25-26.
ZHAI Shoujun, WANG Wenxue, HU Wei, et al. Numerical analysis of roadway surrounding rock stability under dynamic pressure based on ADINA [J]. Energy Technology and Management, 2011(1):25-26.
- [11] 王琦,王雷,刘博宏,等.破碎围岩注浆体孔隙特征和力学性能研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(6):1197-1205.
WANG Qi, WANG Lei, LIU Bohong, et al. Study of void characteristics and mechanical properties of fractured surrounding rock grout[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019,48(6):1197-1205.
- [12] 刘泉声,周越识,卢超波,等.含裂隙泥岩注浆前后力学特性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(3):509-514+520.
LIU Quansheng, ZHOU Yueshi, LU Chaobo, et al. Experimental study on mechanical properties of mudstone fracture before and after grouting[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016,33(3):509-514+520.
- [13] 许延春,李见波.注浆加固工作面底板突水“孔隙-裂隙升降型”力学模型[J].中国矿业大学学报,2014,43(1):49-55.
XU Yanchun, LI Jianbo. “Pore-fractured lifting type” mechanical model for floor water inrush of the grouting enforcement working face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014,43(1):49-55.
- [14] 许延春,谢小锋,刘世奇,等.注浆加固工作面底板岩体力学性质“增强-损伤”的定量测定[J].采矿与安全工程学报,2017,34(6):1186-1193.
XU Yanchun, XIE Xiaofeng, LIU Shiqi, et al. Quantitative determination of mechanical property of “enhance-damage” for floor rock mass in grouting reinforcement working face [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017,34(6):1186-1193.
- [15] 何鹏,刘长武,王琛,等.沉积岩单轴抗压强度与弹性模量关系研究[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(4):7-12.
HE Peng, LIU Changwu, WANG Chen, et al. Correlation analysis of uniaxial compressive strength and elastic modulus of sedimentary rocks [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011,43(4):7-12.

Optimization of Floor Grouting Reinforcement Depth Based on Elastic Modulus of Composite Rock Mass

XU Chengfu¹, MIAO Wei^{2,3}, ZHANG Bosong², LI Lei¹, WANG Libin²

(1.Jiulishan Coal Mine of Jiaozuo Coal Industry Group, Jiaozuo, Henan 454002, China;

2.School of Energy, China University of Mining Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

3.Jiaozuo Coal Industry (Group) Co., Ltd., Jiaozuo, Henan 454002, China)

Abstract: Taking the floor grouting reinforcement and renovation working face in Jiaozuo mining area as the research background, the elastic modulus of rock mass before and after floor grouting was measured by ultrasonic method, the change characteristics of the overall strength of composite rock strata within the range of grouting depth were obtained quantitatively, and the influence of floor grouting reinforcement on the failure zone of composite rock floor was analyzed. The research shows that the elastic modulus increases respectively after grouting reinforcement. Mudstone increases by 640%–852%, sandy mudstone increases by 241%–641%, sandstone increases by 221%–247%, L9 limestone increases by 176% and L8 limestone increases by 40%–159%. The failure depth of floor decreases by about 62%, which is from 30.59 m to 11.7 m. As the failure depth of the floor decreases after grouting reinforcement, the thickness of the absolute waterproof layer increases. The depth of grouting reinforcement for the floor of working face was optimized by adopting a double-layer three-dimensional hole layout method. While ensuring the grouting effect of the floor, the total drilling depth of the 3140 m project was reduced, and the construction period was saved by 35 days compared to the original plan.

Key words: Mining of heavy-water deposit, Elastic modulus, Floor grouting reinforcement, Strength of composite rock mass, Ultrasonic method