



西部矿区弱胶结地层工程围岩稳定性控制研究进展

纪洪广 孙利辉 宋朝阳 张月征 王九红 孟志强

引用本文：

纪洪广, 孙利辉, 宋朝阳, 等. 西部矿区弱胶结地层工程围岩稳定性控制研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 117–127.
JI Hongguang, SUN Lihui, SONG Zhaoyang. Research progress on stability control of surrounding rock in weakly cemented strata engineering in western China mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 117–127.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1784>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

弱胶结软岩煤巷锚杆索-围岩变形协同控制方法研究

Research on collaboration control method of bolt/cable–surrounding rock deformation in coal roadway with weakly cemented soft rock
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 198–207 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.01.015>

动载冲击地压巷道围岩稳定性多层次控制技术

Multi-layer control technologies for surrounding rock stability of dynamic-loading rock burst roadway
煤炭科学技术. 2019(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7dca6b01-e2e4-423c-91dc-8f4043575449>

复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展

Research progress of roadway surrounding strata rock control technologies under complex conditions
煤炭科学技术. 2022, 50(6): 29–45 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6bea9f5d-aca3-4640-a564-ccc8fcfa68e8>

深部大断面巷道交叉点围岩稳定性分析及控制技术

Stability analysis and control technology of surrounding rocks at deep large cross-section roadway
煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/47578ae1-c03d-41c9-9c79-43d559d68a41>

软弱破碎顶板巷道围岩变形机理及控制技术

Deformation mechanism and control technology of surrounding rock in soft and broken roof roadway
煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4ea78363-675e-4d8a-acbe-4435f213ab56>

弱胶结地层重复采动条件下地表最大沉降模型研究及应用

Research and application of maximum surface subsidence model under the condition of repeated mining in weakly cemented strata
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 1–10 <https://doi.org/10.12438/est.2022-1814>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

纪洪广,孙利辉,宋朝阳,等.西部矿区弱胶结地层工程围岩稳定性控制研究进展[J].煤炭科学技术,2023,51(1):117-127.

JI Hongguang, SUN Lihui, SONG Zhaoyang, et al. Research progress on stability control of surrounding rock in weakly cemented strata engineering in western China mining area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 117-127.

西部矿区弱胶结地层工程围岩稳定性 控制研究进展

纪洪广^{1,2},孙利辉^{1,3},宋朝阳^{1,4},张月征^{1,2},王九红⁵,孟志强³

(1.北京科技大学 城市地下空间工程北京市重点实验室,北京 100083;2.矿山深井建设技术国家工程研究中心,北京 100013;3.河北工程大学
矿业与测绘工程学院,河北 邯郸 056038;4.北京中煤矿山工程有限公司,北京 100013;5.兖矿能源(鄂尔多斯)有限公司,
内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要:我国西部矿区开采地层主要由侏罗系、白垩系地层构成,该地层岩石总体表现为强度低、胶结性差、易崩解等特性,属于弱胶结岩石。弱胶结地层工程围岩与中东部矿区地层岩石差异性较大,工作面顶板控制、巷道围岩控制等采用传统的控制技术很难有效保障工程的安全性,常出现巷道大变形失稳、工作面压架、突水、溃沙、冲击地压等灾害。通过大量的调研和室内试验,获得弱胶结岩石抗拉、抗压等力学指标远小于中东部矿区同类岩石力学指标,建立了多因素耦合作用下的弱胶结岩石的变异程度评估指标体系,初步获得了典型矿区弱胶结岩石的变异性程度。以红庆河煤矿弱胶结岩石为例,发现了弱胶结岩石在力、水等载荷作用下,具有“类相变”现象,分析了胶结度对类相变现象的影响,给出了弱胶结粗粒砂岩的“类相变”状态特征及其敏感性参数。分析了导致工作面支架压架、突水溃沙灾害发生的覆岩垮落带、断裂带动态发育规律以及巷道围岩大变形规律,推演了弱胶结地层大采高工作面不同开采阶段垮落带动态变化表达式,建立了支架-围岩相互作用模型,给出了工作面来压和非来压期间支架工作阻力;针对弱胶结地层的松散弱特性,提出了巷道围岩双壳加固技术,可为工作面安全开采和巷道围岩控制提供保障。

关键词:弱胶结岩石;围岩控制;围岩稳定性;岩石力学;双壳支护

中图分类号:TD313 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)01-0117-11

Research progress on stability control of surrounding rock in weakly cemented strata engineering in western China mining area

JI Hongguang^{1,2}, SUN Lihui^{1,3}, SONG Zhaoyang^{1,4}, ZHANG Yuezheng^{1,2}, WANG Juhong⁵, MENG Zhiqiang³

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. National Engineering Research Center of Deep Shaft Construction, Beijing 100013, China; 3. College of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 4. Beijing China Coal Mine Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China; 5. Yankuang Energy(Ordos) Co., Ltd., Ordos 017010, China)

Abstract: The mining strata in the western mining area of China are mainly composed of Jurassic and Cretaceous strata. The strata are characterized by low strength, poor cementation and easy disintegration, which belong to weakly cemented rocks. The surrounding rock of the weakly cemented stratum project is quite different from the stratum rock of the central and eastern mining areas. It is difficult to effectively guarantee the safety of the project by using traditional control technologies such as roof control of the working face and surrounding rock control of the roadway. Disasters such as large deformation and instability of the roadway, crushing of the working face, water inrush,

收稿日期:2022-10-28 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1784

基金项目:国家自然科学基金项目(52074100);内蒙古“科技兴蒙”行动重点专项(2022EEDSKJXM009);山东省科技重大创新项目(2019SDZY02,2019SDYZ05)

作者简介:纪洪广(1963—),男,山东青州人,教授,博士,博士生导师。E-mail: jihongguang@ces.ustb.edu.cn

通讯作者:孙利辉(1978—),男,辽宁清原人,副教授,博士。E-mail: slh2002789@sina.com

sand inrush, rock burst and so on. Through a large number of investigations and laboratory experiments, the mechanical indexes such as tensile and compressive strength of weakly cemented rocks are much smaller than those of similar rocks in the central and eastern mining areas. The evaluation index system of the variation degree of weakly cemented rocks under the coupling of multiple factors is established, and the variation degree of weakly cemented rocks in typical mining areas is preliminarily obtained. Taking the weakly cemented rock in Hongqinghe Coal Mine as an example, it is found that the weakly cemented rock has the phenomenon of 'phase transition' under the action of force, water and other loads. The influence of cementation degree on the phase transition phenomenon is analyzed, and the 'phase transition' state characteristics and sensitivity parameters of weakly cemented coarse-grained sandstone are given. The dynamic development law of overburden caving zone and fracture zone and the large deformation law of roadway surrounding rock are studied and analyzed, which lead to the support crushing, water inrush and sand inrush disasters in the working face. The dynamic change expression of caving zone in different mining stages of large mining height working face in weakly cemented strata is deduced, and the support-surrounding rock interaction model is established. The working resistance of support during weighting and non-weighting of working face is given. Aiming at the loose and weak characteristics of weakly cemented strata, the double shell reinforcement technology of roadway surrounding rock is proposed, which can provide guarantee for safe mining of working face and control of roadway surrounding rock.

Key words: weakly cemented rock; control of surrounding rock; stability of surrounding rock; rock mechanics; double shell reinforcement

0 引言

在我国西部矿区,由于特殊的成岩环境和沉积过程,该区域内含煤地层主要由中生代侏罗系、白垩系等地层构成。与中东部矿区地层相比,该地层成岩时间比较晚、胶结程度差,主要表现为强度低、易崩解、胶结性差等特性,在工程上常将该类地层称为弱胶结地层^[1-3]。该类地层的弱胶结、富含水、扰动变异等典型特征决定了隧道、井巷、硐室、工作面开采围岩的承载能力较低、围岩自稳时间短、能力差,从而常导致矿井建设、巷道掘进以及开采过程中出现突水、溃沙、塌方等灾害事故^[4-6]。而无论从实践上还是理论上,对西部白垩系和侏罗系地层岩石的基本物理力学性能及其在工程扰动作用下的变异性认识不足,尤其是在工程上,仍然采用以中东部地区地层岩体力学性能为基础建立起来的基本理论和工程技术对策时,对所存在的不确定性及其所可能导致的风险问题认识不足^[7]。因此笔者以项目组开展的相关研究工作为基础,结合西部地区典型弱胶结地层特征,对弱胶结岩石物理力学性能及其变异性,弱胶结岩石变异性评价方法等方面开展的研究进行了总结,并结合弱胶结地层岩体在开采扰动作用下所存在的岩石类相变现象及其工程敏感性特征,对有关采场覆岩移动、地压显现规律的变异性以及巷道塌方、围岩失稳、突水溃沙等工程问题及其防控对策进行了介绍和总结。

1 有关弱胶结地层岩石物理力学性能研究及其进展

近年来,处于对工程的需求和对弱胶结岩石工

程性能的关注,相关研究卓有成效。在知网检索的5300余条文献资料中,以研究弱胶结岩石物理力学性能为最多,包括弱胶结岩石受力后应力应变关系、声发射特征、蓄能规律、本构关系等。

王渭明^[8-9]、ZHAO Zenghui 等^[10]研究了弱胶结软岩巷道弹塑性损伤机理,以及煤岩组合条件下围岩变形规律,成果应用于立井井壁支护。刘钦等^[11]研究了新疆哈密矿区弱胶结砂岩的孔隙结构,提出了基于孔隙储水的保水采煤理念。任建喜等^[12]研究了弱胶结砂岩在饱水状态的变形破坏与声发射现象,为预测岩石破坏提供了理论依据。宋朝阳等^[13-14],纪洪广等^[15]研究了弱胶结岩石受力破坏后的细观结构特征,为认识弱胶结岩石的损伤演化规律提供了依据。朱杰^[16]应用损伤力学建立了白垩系软岩岩石裂隙压密阶段的损伤本构方程和一种增量型的统一损伤本构模型,并通过白垩系地层软岩进行三轴实验,得到岩石应力-应变曲线,验证了损伤模型的可靠性。孟庆彬等^[17-18]基于弱胶结岩石成岩时间晚,胶结差,强度低,易风化,遇水泥化崩解的特点,研究了弱胶结岩体再生结构的形成机理,以岩石扩容与强度之间的关系,建立了岩石扩容的本构模型。

在所开展的研究工作中,尽管所关注问题的角度和所解决问题的重点存在差异,但都统一认识到,与我国东部地区地层相比,该类地层及其岩体的物理力学性能有着显著的差异性。

1.1 弱胶结岩石的矿物组分及其力学性能变异性特征

我国西部及西北矿区大部分矿井开采煤层的顶底板岩层为弱胶结岩石,为侏罗系和白垩系地层。而西部及西北矿区是我国重要的煤炭基地,开采历

史较中东部矿井要晚很多,对弱胶结岩石的物理力学性能认识方面主要为强度低、胶结性差、易崩解等定性结论。

笔者通过大量的调研和室内试验,获得了6个典型弱胶结地层矿区砂岩物理力学参数,并与常见砂岩力学参数对比,发现弱胶结岩石的弹性模量、抗压强度、抗拉强度、黏聚力普遍远低于常见砂岩的对应参数,弱胶结岩石的密度、孔隙率较中东部矿区常

见砂岩小,而孔隙率二者之间差别见表1。

在红庆河煤矿现场采集了不同类型砂岩进行了矿物组分分析,结果表明,粗粒砂岩和中粒砂岩方解石较高分别占31.8%、40.3%,泥质砂岩绿泥石占37.5%,白垩系粗粒砂岩石英占34.6%;弱胶结砂岩矿物主要为方解石、石英、长石、云母;胶结物主要为伊利石、绿泥石、高岭石等黏土矿物矿物和铁质、钙质胶结物或游离氧化物。

表1 常见砂岩与西部典型矿井砂岩物理力学参数对比^[19]

Table 1 Comparison of parameters of physical and mechanical of sandstone between Middle mining area and Western mining area^[19]

岩性	弹性模量E/GPa	泊松比 μ	抗压强度 σ_c /MPa	抗拉强度 σ_t /MPa	黏聚力C/MPa	内摩擦角 ϕ (°)	密度 ρ (g·cm ⁻³)	孔隙率n/%
常见砂岩	11~39	0.12~0.20	36.30~143	1.30~17.60	7.80~39.20	35~50	2~2.6	3~30
大井南砂岩	0.23~2.30	0.17~0.26	3.20~62	0.06~2.15	0.6~7.40	19.65~38.43	1.94~2.46	—
大海则砂岩	2.07~2.79	0.19~0.27	1.32~95.32	0.19~2.71	0.42~8.52	50.24~67.60	2.13~2.65	0.38~26.12
高头窑砂岩	2.55~33.20	0.15~0.32	2.9~47.70	0.31~3.86	0.6~13.50	16.2~40.47	1.95~2.59	2.92~25.99
苇子沟砂岩	—	—	14.1~78.20	0.16~5.40	1.11~6.61	27~38.60	2.35~2.76	1.45~7.91
陶忽图砂岩	0.13~10.21	0.11~0.38	1.91~44.56	—	0.24~17.28	1.43~35.59	1.86~2.58	—
营盘壕砂岩	0.65~14.36	0.11~0.38	3.01~61.64	—	0.48~16.5	10.56~30.65	1.88~2.6	—

上述数据表明,弱胶结岩石与中东部同类型的岩石有显著的差异。

为了定量分析这种差异性,根据岩石的结构组成、成岩环境、强度参数等参数,确定了岩石变异性指标,建立了多因素耦合作用下的弱胶结岩石的变异程度评估指标,设置各影响因素的评估指标权重,后进行加权得出弱胶结岩石的变异性指数。具体评价方法见文献[1]。

通过分析表明,新疆准东大井南矿变异性指数:0.54~0.57,大海则矿变异性指数:0.52~0.56,红庆河、台格庙、陶忽图变异性指数:0.45~0.52,西一矿变异性指数:0.54、0.58(图1)。由此可知,新疆准东矿区为中等弱胶结地层,鄂尔多斯盆地中北部为弱胶结地层,蒙东矿区为极弱胶结地层。通过弱胶结岩石的变异性指数,可以对不同矿区弱胶结岩石的变异性程度进行对比分析,为工程应用提供指导。

1.2 弱胶结地层岩体的“类相变”现象

试验研究表明,受弱胶结粗粒砂岩细观结构和矿物成分的特点所决定,其破裂过程可体现为2种主要类型:

1)颗粒之间的胶结物质发生破坏,颗粒接触状态由连续接触状态转变为离散状态,此时颗粒和胶结物质形成的结构依然能够承受荷载,具有一定的抗压强度,但抗拉强度急剧降低,岩石及其原生结构在受压状态下依然具有一定的稳定性。

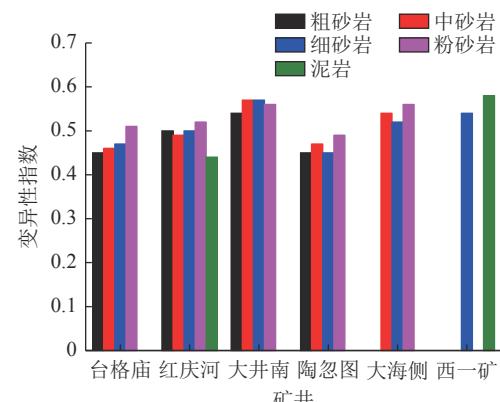


图1 典型矿井弱胶结岩石变异性指数

Fig.1 Variability index of weakly cemented rock in typical coal mine

2)在颗粒在受力加载过程中颗粒从滑移、错动到快速流动的临界状态,此时颗粒和胶结物质形成的系统结构无论其抗压强度还是抗拉强度都迅速降低,岩石原生系统结构的稳定性急剧降低。

通过对弱胶结粗粒砂岩断口形貌特征及其细观结构分析可知,在加载受力过程中,细观结构层面处的胶结物质强度较低,会率先发生破坏并形成内部裂纹,其扩展路径也多为多点扩展方式,即微裂纹弥散分布,并主要沿颗粒边界在胶结物质中扩展,因而会导致颗粒物质由连续接触状态转化为离散状态,这一点与硬岩裂纹沿一条主裂纹扩展有显著不同。

在物理学上,相变过程是物质从一个相转变到

另一个相的过程^[20]。在宏观上,弱胶结粗粒砂岩性能主要通过强度特征和稳定性特征来表征,据此,可将弱胶结粗粒砂岩的破裂过程归结为破坏和失稳的过程^[21]。弱胶结粗粒砂岩的各种物理现象与力学行为机制发生的内因在于其内部成分和结构的变化。

从微观结构方面看,弱胶结粗粒砂岩是由骨架颗粒物质、黏土胶结物质和孔隙所组成的颗粒胶结系统。其中,黏土胶结物质的强度较低,在单轴压缩状态下弱胶结粗粒砂岩的胶结物质首先发生破坏,导致弱胶结粗粒砂岩的颗粒接触状态发生改变。因此,从弱胶结粗粒砂岩微观颗粒的接触特性的演化规律来看,在其受力变形、破坏过程中内部颗粒接触状态会发生由近连续状态、到离散状态、再到快速流动状态的一系列状态转变。

根据弱胶结粗粒砂岩微观结构上颗粒聚集状态变化特征,可以将其破坏的临界状态表征为内部颗粒由连续接触状态逐步演化、过渡为离散状态的过程,这一特征十分类似“相变”过程,因此,可以把弱胶结粗粒砂岩破裂过程的临界现象,定义为类相变过程。

也就是说,在达到类相变状态之前,其外部荷载是由内部的颗粒物质和胶结物质共同承担。而一旦达到类相变状态后,随着原生结构的破坏,颗粒间的作用变为以动摩擦为主,内部颗粒之间发生滑移、错动,直至胶结颗粒发生流动破坏而迅速整体失稳。

因此,研究决定该类岩石存在“类相变”的影响因素,阐明该临界状态条件对于工程围岩控制有着十分重要的意义。经过前期工作,对此有了以下基本认识。

1)胶结度对弱胶结粗粒砂岩“类相变”状态有着显著影响。胶结度的大小取决于颗粒矿物成分、弱胶结粗粒砂岩成岩过程中的颗粒压实特性及胶结物质胶结特性、胶结物质含量等微观因素^[15]。图2为不同胶结度砂岩的应力-应变曲线。当胶结度 $\alpha=1$,岩石胶结程度高,应力应变曲线为 $O-F-Q-D$,岩石发生脆性破坏,具有与硬岩类似形变特征;当胶结度 $0<\alpha<1$,应力应变曲线为 $O-F-K-E$,岩石破坏具有明显的剪切蠕变特征,具有与普通软岩类似形变特征;当胶结度 $\alpha\rightarrow 0$,应力应变曲线为 $O-F-N$,岩石达到峰值强度后,应力变急剧跌落,屈服阶段不明显甚至缺失,与硬岩、软岩的应力应变具有较大差异,具有显著的脆性破坏特征。因此,当岩石胶结度 α 小于临界胶结度 α_{cr} 时,在受力变形破坏过程中就存在“类相变临界”状态。

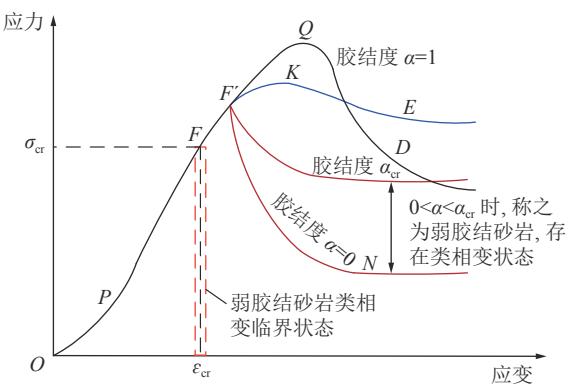


图2 胶结砂岩在不同胶结度时的应力-应变曲线
Fig.2 Stress-strain curves of consolidated sandstones at different degrees of cementation

2)弱胶结粗粒砂岩的“类相变”状态及其显著特征。图3为弱胶结粗粒砂岩与硬岩、软岩的应力-应变曲线的差异性对比。由图3可知,硬岩的应力应变曲线呈现典型的四阶段;而软岩无明显峰值,且有明显的剪切蠕变阶段(GH 段),具有延性破坏特征;弱胶结粗粒砂岩峰值前与硬岩、软岩类似,峰值后因胶结物破坏,颗粒聚集状态开始转为离散状态,表现为散体特性,通过颗粒之间的咬合力和动摩擦力来承担外载荷。

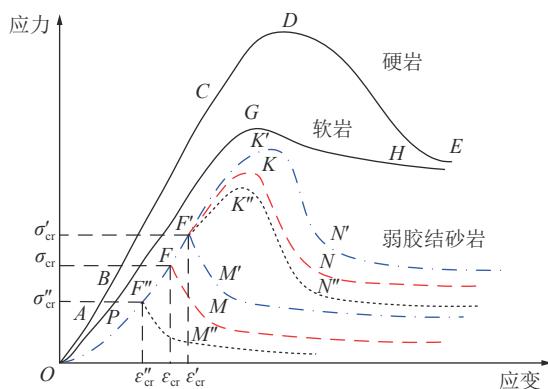


图3 弱胶结粗粒砂岩与硬岩、软岩的应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of weakly consolidated coarse-grained sandstones, hard rocks, and soft rocks

3)水对弱胶结地层岩石性能及其“类相变”状态有着显著影响。水的渗入会导致弱胶结粗粒砂岩微观结构发生显著变化,故弱胶结粗粒砂岩在遇水后泥化、软化、崩解特性明显^[22],导致颗粒物质和胶结物质胶结程度降低, F 点(类相变临界状态)下降至 F'' ,此时类相变点的临界应力(σ''_{cr})和临界应变(ε''_{cr})也减小。

1.3 弱胶结地层岩体状态及其变化具有显著的扰动敏感性

对于地下工程围岩,其稳定性一方面取决于原

始地层的原岩应力状态, 同时又取决于工程扰动的影响。弱胶结砂岩在受力加载过程中, 处于不同状态时, 对工程扰动的敏感性会呈现出很大差异。

图4为弱胶结粗粒砂岩类相变临界状态, F 点(类相变临界状态)之前, 试件对扰动或者振动不敏感; 当达到 F 点附近时, 试件对振动或者扰动则变得异常敏感, 微小的应变 $\Delta\epsilon$, 也易达到其类相变临界状态, 由连续接触向离散状态的转化; 而在 F 点之后, 弱胶结粗粒砂岩内部的剪切带内已转化为离散的颗粒物质, 随着受力的加载, 颗粒物质发生滑移、错动^[23]。

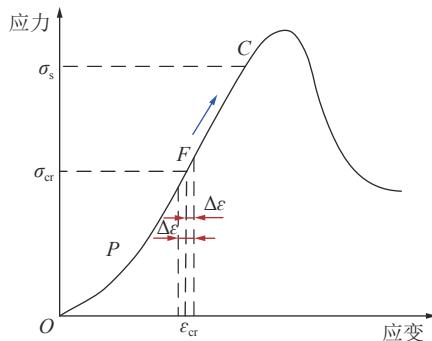


图4 弱胶结粗粒砂岩类相变临界状态分析

Fig.4 Phase-transition-like critical state of weakly consolidated coarse-grained sandstones

因此, 在弱胶结地层中, 工程开挖过程中软岩让压支护的传统的思想或者被动支护方式对弱胶结地层支护措施不再适用。而应采取主动支护的方式, 一方面应采取合理的开挖步骤和开挖顺序, 以尽可能降低扰动的次数和扰动的幅度, 同时还应尽可能提供足够的支护强度, 要充分保证围岩受力状态不要跨越其“类相变”临界状态。否则, 即便是微小的扰动作用, 也极易导致工程围岩的大范围失稳, 甚至溃沙、突水。

2 弱胶结地层采场覆岩矿压活动规律及其变异性研究进展

众多学者以经典的砌体梁、关键层、传递岩梁理论为基础^[24-25], 构建了采场采时和采后的力学模型^[26], 分析工作面顶板破断步距^[27]、“三带”分布^[28]、岩层移动规律等^[29], 指导了现场安全开采。宁建国等^[30]通过分析弱胶结地层工作面支架受力, 给出了工作面覆岩破断形式, 指导工作面支架选型。很多学者研究发现, 西部弱胶结地层采场开采支架受力、覆岩“三带”均较相同采高的中东部地层采场要大, 来压强度、来压步距也更加复杂。

2.1 工作面开采的覆岩冒落岩体充填压实变形规律

基于对西部矿区弱胶结地层岩石物理力学性能

及其变异性的认识, 进一步分析了由于弱胶结地层条件的特殊性所导致的采场覆岩移动与矿压活动的变异性。采场开采扰动下, 围岩将发生变形破坏、冒落、压缩等现象, 以此出现顶板周期来压、地表沉降等矿压显现, 建立了工作面覆岩破裂-冒落-充填-崩解-再破碎-压实-固结模型, 阐明了弱胶结岩石受开采扰动全过程发生的膨胀、冒落、压缩、固结等随时间的变化规律, 并以岩石碎胀系数作为指标, 分析了弱胶结岩石冒落-破碎-压实-固结的变形规律。

按开采时序采空区垮落带内岩层受开采扰动后经历4个阶段: 岩石受力变形膨胀阶段(第I阶段、 AB 段)、岩石破碎冒落阶段(第II阶段、 BC 段)、冒落岩石充填压实阶段(第III阶段、 CD 段)、采空区矸石蠕变类固结阶段(第IV阶段、 DE 段), 如图5所示。其中 AB 和 BC 两个阶段主要对工作面支架及巷道支护结构产生影响, CD 和 DE 两个阶段则对地表沉陷、地下水运动、“三带”演化等产生影响。并通过室内试验、相似材料模拟试验, 对比分析了坚硬岩层、中硬岩层及弱胶结岩层在不同采动阶段的形变规律, 结果表明: AB 段、 BC 段岩石产生的碎胀程度由小到大为坚硬岩石、中硬岩石、弱胶结岩石、中等弱胶结岩石、极弱胶结岩石; CD 段岩石的碎胀程度由小到大为坚硬岩石、中硬岩石、弱胶结岩石、中等弱胶结岩石、极弱胶结岩石, 极弱胶结岩石碎胀冒落后充填压实的变形量最大, 受压缩持续周期也最长; DE 段岩石的残余碎胀系数由小到大为极弱胶结岩石、中等弱胶结岩石、弱胶结岩石、中硬岩石、坚硬岩石, 而固结所需时间正好相反, 如图6所示。

上述研究表明, 弱胶结岩石受开采扰动产生的变形破坏较同类型的中硬岩石、坚硬岩石要大, 由此在相同采高条件下工作面覆岩垮落带高度也较中东部地层工作面垮落带大, 甚至出现超高垮落带现象。并根据弱胶结地层大采高工作面覆岩特点, 建立了

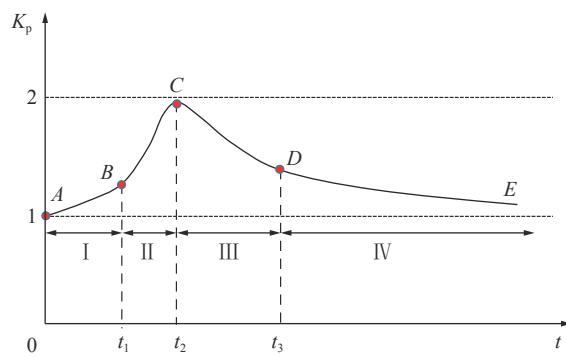
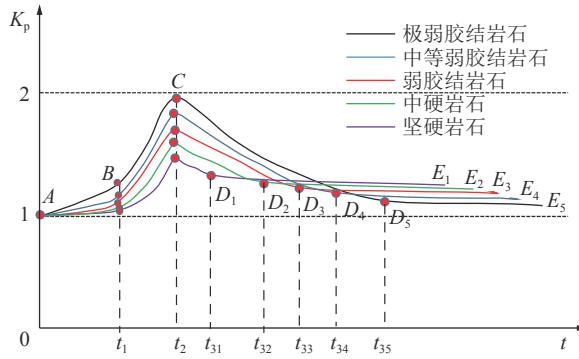


图5 冒落破碎岩石时变曲线

Fig.5 Time-deformation curve of falling broken rock

图6 不同类型岩石时变差异^[31]Fig.6 Time-deformation difference of different types of rock^[31]

直接顶内有结构岩层和无结构岩层2类覆岩结构下,工作面不同开采阶段内垮落带动态演化方程,获得了采空区垮落带的动态分布规律,垮落带高度变化与覆岩结构岩层厚度、容重、工作面开采时间、冒落矸石初始碎胀系数及压缩模量等相关;垮落带的最大高度可作为计算工作面支架工作阻力的依据,具体见文献[32]。

另外,垮落带与其上覆的断裂带也相互关联紧密,断裂带随着工作面开采逐渐增大,具有线性相关特征,当工作面开采到一定距离后断裂带达到最大值,不再继续增大;垮落带岩石整体下沉期间,断裂带随垮落带减小而减小,并在一定时间后均趋于稳定。根据断裂带内裂隙具有产生-发育-贯通-闭合的现象,建立了整体下沉期间断裂带随垮落带变化的关系式。其中AC段:二者联系不大,CE段:断裂带与岩体触碰,二者有力的联系,断裂带内部分裂隙闭合,断裂带减小,并逐渐趋于稳定,如图7所示。

2.2 弱胶结地层工作面控顶对策

弱胶结岩石的松、散、弱特性,是导致工作面开采过程中覆岩上方垮落带和断裂带发育高度大的主要原因,一旦采用传统经验公式计算,得到的顶板压力估算结果和垮落带高度通常偏小,从工作面支架选型阶段就开始出现问题,后续开采过程中的一系列强矿压现象。

基于弱胶结岩层的软弱特性,借助压力拱理论,提出了基于覆岩裂隙拱结构的弱胶结地层大采高工作面支架工作阻力计算方法,分别建立了工作面非来压期间(图8)和来压期间(图9)支架-围岩作用结构模型,获得了工作面非来压和来压期间的支架工作阻力,以此作为支架选型的基本依据。式(1)为工作面非来压期间支架工作阻力表达式。

$$F_z = \frac{1}{2b} \sum_{i=1}^k Q_i (l_i + d_i \cot \alpha_i) + \frac{1}{b} \sum_{i=1}^k R_i d_i \cot \alpha_i \quad (1)$$

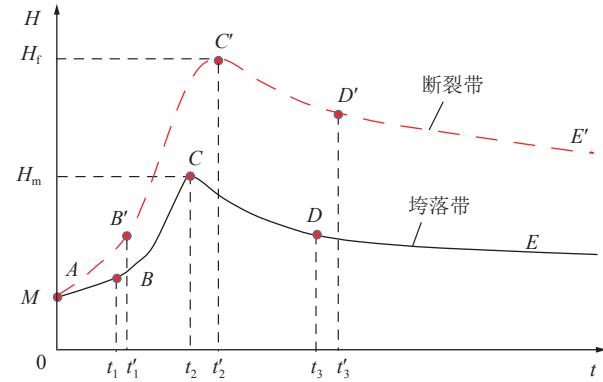


图7 垮落带与断裂带协同演化规律模型

Fig.7 Interaction between collapse zone and fracture zone

式中: F_z 为工作面支架工作阻力,kN; b 为支架支撑点距离煤壁距离,m; k 为直接顶短悬顶层数量,m; Q_i 、 l_i 、 d_i 、 α_i 、 R_i 分别为第*i*层岩层的质量、长度、厚度、破断角及载荷力。

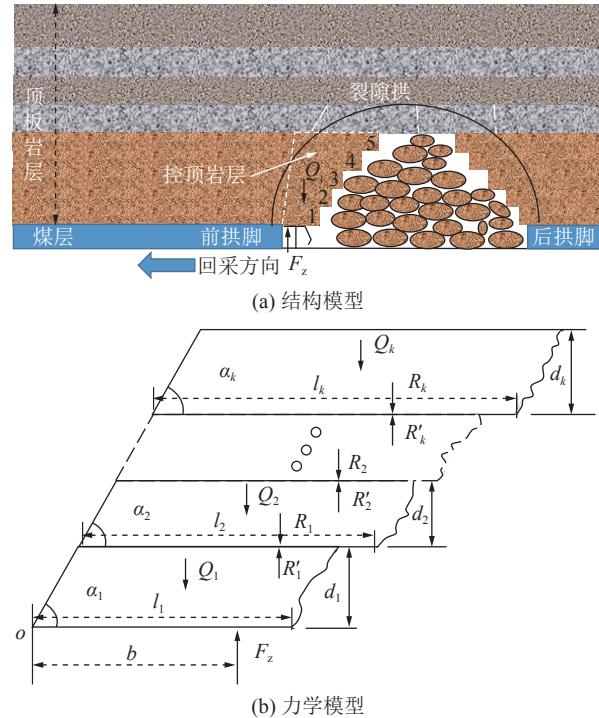


图8 工作面非来压期间支架-围岩相互作用结构模型

Fig.8 Structural model of interaction between support and surrounding rock during non-pressure period of working face

根据式(2)建立的支架-围岩之间的力平衡和力矩平衡,可求出为工作面来压期间支架工作阻力。

$$\begin{cases} Q_j = F_z + R_z \\ F_z x = Q_j(x - x_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_j 为裂隙拱结构载荷,kN; R_z 为采空区矸石支反力,kN。

裂隙拱结构的下边界为垮落带的上边界,裂隙拱结构的上边界为断裂带的上边界,因此, Q_j 可以根

据断裂带内岩石重量近似求得。

$$Q_j = \gamma H_i \quad (3)$$

式中: γ 为岩石容重, kN/m^3 ; H_i 为断裂带高度, m 。

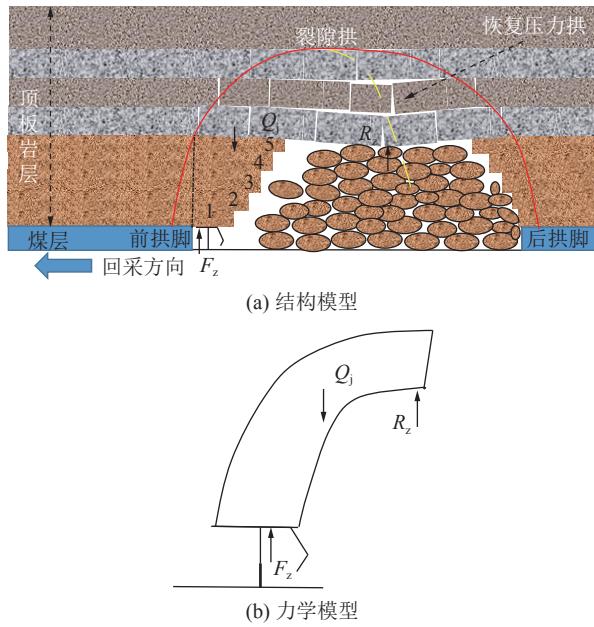


图 9 支架-围岩相互作用结构模型

Fig.9 Interaction structure model of hydraulic support and surrounding rock

3 弱胶结地层巷道变形规律及其变异性研究进展

软弱岩层中开掘巷道, 围岩极易发生片帮、冒顶、底鼓等问题^[33], 且具有流变的特征。针对该类特殊地层条件, 国内外专家学者普遍认为巷道围岩变形破坏主要是由于支护体与围岩的非协调变形导致支护结构失效、围岩大变形等^[34-36], 并提出了巷道高预应力强支护技术^[37]、恒阻耦合让压技术^[38]、有控让压支护技术^[39]、分步联合支护技术^[40-41]、钢管混凝土支护技术、工字钢、钢筋网+混凝土衬砌的联合支护技术^[42]等, 解决了很多复杂条件巷道围岩控制难题, 但弱胶结煤岩体特殊的物理力学性能导致单纯的一种支护技术并不具有较好的普适作用^[43-44]。

3.1 弱胶结地层巷道强烈大变形分析

研究表明, 弱胶结岩石力学性能与中东部软岩力学性质以及二者巷道围岩形变规律既有相似性也有其特殊性, 特殊性主要表现在: ①弱胶结岩石成岩环境异于中东部矿区岩石, 岩石成岩时间短、成岩不充分, 在外界因素扰动下, 弱胶结岩石宏观裂隙还未贯通时, 即整体发生崩塌性破坏, 转变为散体, 其力学行为的峰前屈服和峰后崩塌历时短暂、过程复杂, 弱胶结岩石失稳判据和巷道围岩失稳判断存在难度。

②弱胶结岩石的物理力学特性也与传统软岩有一定差别, 软岩与弱胶结岩石均具有强度低的特性, 软岩受力达到峰值强度后还具有一定的残余强度, 并具有蠕变特征, 而弱胶结岩石达到峰值强度后则基本不再具有强度, 破碎成散体形态, 因此, 弱胶结岩石破裂的“类相变”特征是传统软岩所不具备的。③弱胶结岩石独特的物理力学性质, 导致该类地层中巷道围岩变形破坏规律、围岩与支护结构作用机理也与传统巷道不同, 常规支护方法可能对巷道围岩控制效果不佳。典型弱胶结地层巷道大变形失稳如图 10 所示。



图 10 典型弱胶结地层巷道变形破坏形态

Fig.10 Typical deformation and failure patterns of weakly consolidated strata roadway

3.2 弱胶结地层巷道围岩双壳加固对策

弱胶结岩石软弱易风化崩解特性, 决定该类地层巷道开掘后首先必须及时封闭围岩, 这样可以将空气、水蒸气、水等与围岩表面隔离, 起到防止围岩风化、崩解的作用。同时传统的巷道锚网支护通常采用端锚或加长锚固的方式, 现场实践发现锚杆、锚索有与顶板岩层同步运动的现象, 这有 2 种可能, ①锚杆锚索锚固段锚固剂可能脱锚, 不能起到锚固作用; ②锚固段范围内岩层均已破坏, 锚杆锚索与破坏岩层同步运动^[45-47]。因此, 提出巷道围岩双壳加固技术。

巷道围岩双壳加固技术可进一步提高锚杆锚索的支护刚性、支护靶向性, 当围岩变形锚杆锚索产生的支护阻力能够及时、高效作用到变形区, 起到及时、

高效的支护作用,支护阻力可靶向性地控制围岩变形区域的变形。优势主要体现在以下3个方面:①及时承载,阻止围岩形变,满足巷道初期稳定要求。②实现了锚杆、锚索的全长锚固;防水隔气,延长锚杆(锚索)服务年限;改变支护材料承载模式,提高了整体支护系统的刚度;提高岩体抗拉拔、剪切能力;强化支护材料与围岩之间力学联系。③实现围岩的增强改性:围岩起到网络骨架、粘结补强、压密增强作用。

建立了深部巷道“双壳”支护体系,由“单壳”“连续双壳”和“非连续双壳”组成^[48-50],如图11所示。单壳:锚杆或锚索+浅部或中深部围岩注浆组成。连续双壳由锚杆+浅部注浆体形成支护壳,锚索+深孔高压叠加注浆形成深部支护壳,二者为连续壳体结构。非连续双壳由浅部支护壳、柔性层、深部支护壳组成,柔性层协调深、浅壳体的变形,起缓冲作用。双壳加固技术已经在软岩巷道工程中进行了广泛的应用。

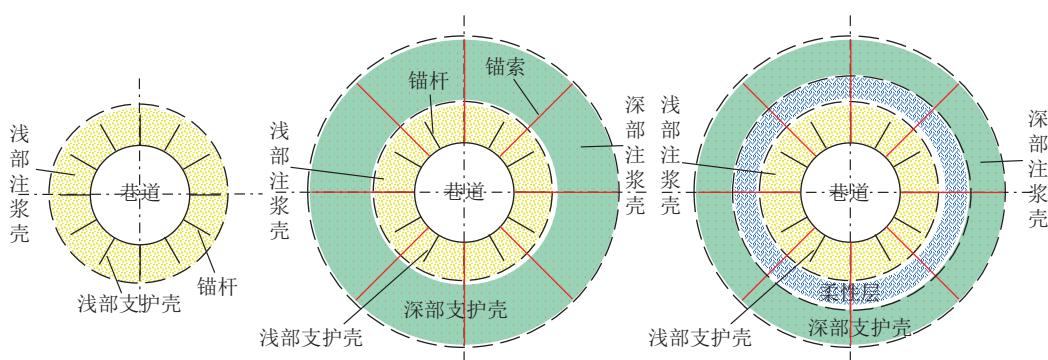


图11 巷道双壳支护结构模型
Fig.11 Double shell support structure model of roadway

4 结 论

1)通过大量的岩石力学试验,统计获得弱胶结岩石抗拉、抗压等力学指标远小于中东部矿区同类岩石力学指标,建立了多因素耦合作用下的弱胶结岩石的变异程度评估指标体系,初步确定典型矿区弱胶结岩石的变异性程度。

2)发现了弱胶结砂岩在力、水耦合作用下具有“类相变”现象,分析了胶结度对类相变现象的影响,给出了弱胶结粗粒砂岩的“类相变”状态特征及其敏感性参数。

3)揭示了弱胶结地层工作面采空区覆岩垮落带、断裂带突增导致压架、突水溃沙等灾害机理,分析了垮落带与断裂带协同演化规律。建立了支架-围岩相互作用模型,给出了工作面来压和非来压期间支架工作阻力。

4)针对弱胶结岩石的松散弱特性,并异于传统软岩力学性质,提出了弱胶结地层巷道双壳支护加固对策,包括单壳支护、连续双壳支护、非连续双壳支护。

参考文献(References):

- [1] 孙利辉,纪洪广,张月征.弱胶结地层大采高采场覆岩运动规律与地压控制[M].北京:科学出版社,2020: 1-3.

- [2] 李化敏,李回贵,宋桂军,等.神东矿区煤系地层岩石物理力学性质[J].*煤炭学报*,2016,41(11): 2661-2671.
LI Huamin, LI Huigui, SONG Guijun, et al. Physical and mechanical properties of the coal-bearing strata rock in Shendong coal field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11): 2661-2671.
- [3] 纪洪广,陈波,孙利辉,等.红庆河煤矿弱胶结砂岩单轴加载条件下声发射特征研究[J].*金属矿山*,2015,44(10): 56-61.
JI Hongguang, CHEN Bo, SUN Lihui, et al. Research on the acoustic emission of weakly consolidated sandstone under uniaxial compression in Hongqinhe Coal Mine[J]. *Metal Mine*, 2015, 44(10): 56-61.
- [4] 鞠金峰,许家林,朱卫兵.关键层结构提前滑落失稳对浅埋近离煤层出煤柱压架灾害的影响[J].*煤炭学报*,2015,40(9): 2033-2039.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Influence of overlying key strata structure pre-sliding on support failure disaster while mining in the lower coal seam cut across below the upper adjacent coal pillar under shallow cover[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 2033-2039.
- [5] 许家林,朱卫兵,鞠金峰.浅埋煤层开采压架类型[J].*煤炭学报*,2014,39(8): 1625-1634.
XU Jialin, ZHU Weibing, JU Jinfeng. Support crushing types in the longwall mining of shallow seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1625-1634.
- [6] 范立民,马雄德.浅埋煤层矿井突水溃沙灾害研究进展[J].*煤炭科学技术*,2016,44(1): 8-12.
FAN Limin, MA Xiongde. Research progress of water inrush hazard in shallow coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1): 8-12.

- ard in shallow buried coal seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(1): 8–12.
- [7] 孙利辉. 西部弱胶结地层大采高工作面围岩结构演化与矿压活动规律研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- SUN Lihui. Structural evolution and rock pressure activity regularity of weakly cemented strata of the large mining height work face in Western China [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [8] 王渭明, 王磊, 代春泉. 基于强度分层计算的弱胶结软岩冻结壁变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 4110–4116.
- WANG Weiming, WANG Lei, DAI Chunquan. Frozen wall deformation analysis in weakly cemented soft rock based on layered calculation of strength [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S2): 4110–4116.
- [9] 王渭明, 赵增辉, 王磊. 考虑刚度和强度劣化时弱胶结软岩巷道围岩的弹塑性损伤分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 679–689.
- WANG Weiming, ZHAO Zenghui, WANG Lei. Elastic-plastic damage analysis for weakly consolidated surrounding rock regarding stiffness and strength cracking [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(5): 679–689.
- [10] ZHAO Zenghui, LYU Xianzhou, WANG Weiming, et al. Damage evolution of bi-body model composed of weakly cemented soft rock and coal considering different interface effect [J]. Springer Plus, 2016, 5(8): 1–19.
- [11] 刘钦, 孙亚军, 徐智敏, 等. 侏罗系弱胶结砂岩孔隙介质特征及其保水采煤意义[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3): 857–864.
- LIU Qin, SUN Yajun, XU Zhimin, et al. Pore media characteristics of Jurassic weak cemented sandstone and its significance for water-preserved coal mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 857–864.
- [12] 任建喜, 景帅, 刘朝科. 弱胶结砂岩破坏规律及其声发射特性试验研究[J]. *煤炭技术*, 2019, 38(6): 1–4.
- REN Jianxi, JING Shuai, LIU Chaoke. Experimental study on deformation and failure laws and acoustic emission characteristics of weak cemented sandstone [J]. *Coal Technology*, 2019, 38(6): 1–4.
- [13] 宋朝阳. 弱胶结砂岩细观结构特征与变形破坏机理研究及应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- SONG Chaoyang. The analysis and application of mesoscopic structure characteristic and deformation and failure mechanism of weak cemented sandstone [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [14] 宋朝阳, 纪洪广, 刘志强, 等. 饱和水弱胶结砂岩剪切断裂面形貌特征及破坏机理[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(9): 2444–2451.
- SONG Chaoyang, JI Hongguang, LIU Zhiqiang, et al. Morphology and failure mechanism of the shear fracture surface of weakly cemented sandstone with water saturation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(9): 2444–2451.
- [15] 纪洪广, 蒋华, 宋朝阳, 等. 弱胶结砂岩遇水软化过程细观结构演化及断口形貌分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 993–999.
- JI Hongguang, JIANG Hua, SONG Chaoyang, et al. Analysis on the microstructure evolution and fracture morphology during the softening process of weakly cemented sandstone [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 993–999.
- [16] 朱杰, 徐颖, 李栋伟, 等. 白垩系软岩的一种增量型统计损伤本构模型[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(6): 49–54.
- ZHU Jie, XU Ying, LI Dongwei, et al. An increment-type statistical damage constitutive model of Cretaceous soft rock [J]. *Hydrogeological Engineering Geology*, 2013, 40(6): 49–54.
- [17] 孟庆彬, 钱唯, 韩立军, 等. 极弱胶结岩体再生结构的形成机制与力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 1–14.
- MENG Qingbin, QIAN Wei, HAN Lijun, et al. Experimental study on formation mechanism and mechanical properties of regenerated structure of very weak cemented rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 1–14.
- [18] 孟庆彬, 王杰, 韩立军, 等. 极弱胶结岩石物理力学特性及本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S1): 1–11.
- MENG Qingbin, WANG Jie, HAN Lijun, et al. Physical and mechanical properties and constitutive model of very weakly cemented rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S1): 1–11.
- [19] 孙利辉, 纪洪广, 杨本生. 西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3): 865–873.
- SUN Lihui, JI Hongguang, YANG Bensheng. Physical and mechanical characteristic of rocks of the weakly cemented strata in Western representative mining area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 865–873.
- [20] 于渌, 郝柏林, 陈晓松. 边缘奇迹: 相变和临界现象[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 34–35.
- [21] 卫振海. 岩土材料结构性问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [22] 宋朝阳, 纪洪广, 刘志强, 等. 干湿循环作用下弱胶结岩石声发射特征试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(4): 812–819.
- SONG Chaoyang, JI Hongguang, LIU Zhiqiang, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of weakly cemented granular rocks affected by dry-wet cycling process [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(4): 812–819.
- [23] 宋朝阳, 纪洪广, 曾鹏, 等. 西部典型弱胶结粗粒砂岩单轴压缩破坏的类相变特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(5): 1027–1036.
- SONG Chaoyang, JI Hongguang, ZENG Peng, et al. Phase-like transition characteristics of uniaxial compression failure of weakly cemented coarse-grained sandstone in western China [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(5): 1027–1036.
- [24] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [25] 宋振骐. 实用矿山压力[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [26] 郝海金. 长壁大采高上覆岩层结构及采场支护参数的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2004.
- HAO Haijin. Study on the structure in upper rock layer and support parameter in longwall full-seam cutting mining workface [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2004.
- [27] 黄庆享, 钱鸣高, 石平五. 浅埋煤层采场基本顶周期来压的结构

- 分析[J]. *煤炭学报*, 1999, 24(6): 581–585.
- HUANG Qingxiang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Structural analysis of main roof stability during periodic weighting in long-wall face[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(6): 581–585.
- [28] 夏小刚. 采动岩层与地表移动的“四带”模型研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- XIA Xiaogang. Study on “four-zone” models of mining strata and surface movement [D]. Xian: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [29] Syd S. Peng, 李化敏, 周英, 等. 神东和准格尔矿区岩层控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [30] 宁建国, 刘学生, 谭云亮, 等. 浅埋煤层工作面弱胶结顶板破断结构模型研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(4): 569–579.
- NING Jianguo, LIU Xuesheng, TAN Yunliang, et al. Fracture structure model of weakly cemented roof in shallow seam[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2014, 31(4): 569–579.
- [31] 孙利辉, 纪洪广, 蒋华, 等. 弱胶结地层条件下垮落带岩层破碎冒落特征与压实变形规律试验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2565–2572.
- SUN Lihui, JI Hongguang, JIANG Hua, et al. Experimental study on characteristics of broken caving and regularity of compaction deformation of rocks in caving zone in the weakly cemented strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2565–2572.
- [32] 向鹏, 孙利辉, 纪洪广, 等. 大采高工作面垮落带动态分布特征及确定方法[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(5): 862–867.
- XIANG Peng, SUN Lihui, JI Hongguang, et al. Dynamic distribution characteristics and determination method of caving zone in overburden strata with large mining height[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(5): 862–867.
- [33] 何满潮, 袁越, 王晓雷, 等. 新疆中生代复合型软岩大变形控制技术及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(3): 434–441.
- HE Manchao, YUAN Yue, WANG Xiaolei, et al. Control technology for large deformation of Mesozoic compound soft rock in Xinjiang and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(3): 434–441.
- [34] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 泥质弱胶结软岩巷道变形破坏特征与机理分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(6): 1014–1022.
- MENG Qingbin, HAN Lijun, QIAO Weiguo, et al. Deformation failure characteristics and mechanism analysis of muddy weakly cemented soft rock roadway[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2016, 33(6): 1014–1022.
- [35] 乔卫国, 韦九洲, 林登阁, 等. 侏罗白垩纪极弱胶结软岩巷道变形破坏机理分析[J]. *山东科技大学学报*, 2013, 32(4): 1–6.
- QIAO Weiguo, WEI Jiuzhou, LIN Dengge, et al. The deformation failure mechanism of very weakly cemented soft rock formed during Jurassic-cretaceous period in roadways[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology*, 2013, 32(4): 1–6.
- [36] 李廷春, 卢振, 刘建章, 等. 泥化弱胶结软岩地层中矩形巷道的变形破坏过程分析[J]. *岩土力学*, 2014, 35(4): 1077–1083.
- LI Tingchun, LU Zhen, LIU Jianzhang, et al. Deformation and failure process analysis of rectangular roadway in muddy weakly cemented soft rock strata[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4): 1077–1083.
- [37] 康红普, 王国法, 姜鹏飞, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(7): 1789–1800.
- KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1000 m[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1789–1800.
- [38] 康红普, 林健, 王金华. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(4): 649–664.
- KANG Hongpu, LIN Jian, WANG Jinhua. Case studies of rock bolting in coal mine roadways[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(4): 649–664.
- [39] 柏建彪, 侯朝炯. 深部巷道围岩控制原理与应用研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(2): 145–148.
- BAI Jianbiao, HOU Chaojiong. Control principle of surrounding rocks in deep roadway and its application[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2006, 35(2): 145–148.
- [40] 袁亮, 薛俊华, 刘泉声, 等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(4): 535–543.
- YUAN Liang, XUE Junhua, LIU Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coalmine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(4): 535–543.
- [41] 刘泉声, 卢兴利. 煤矿深部巷道破裂围岩非线性大变形及支护对策研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3273–3279.
- LIU Quansheng, LU Xingli. Research on nonlinear large deformation and support measures for broken surrounding rocks of deep coal mine roadway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3273–3279.
- [42] 高延法, 王波, 王军, 等. 深井软岩巷道钢管混凝土支护结构性能试验及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 28(S1): 2604–2609.
- GAO Yanfa, WANG Bo, WANG Jun, et al. Test on structural property and application of concrete-filled steel tube support of deep mine and soft rock roadway[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 28(S1): 2604–2609.
- [43] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 极弱胶结地层煤巷支护体系与监控分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 234–245.
- MENG Qingbin, HAN Lijun, PU Hai, et al. Research and monitoring analysis of coal roadway bolting system in very weakly cemented stratum[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 234–245.
- [44] 孟庆彬, 韩立军, 乔卫国, 等. 极质弱胶结地层开拓巷道围岩演化规律与监测分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(4): 572–579.
- MENG Qingbin, HAN Lijun, QIAO Weiguo, et al. Evolution of surrounding rock in pioneering roadway with very weakly cemented strata through monitoring and analysising[J]. *Journal of*

- China Coal Society, 2013, 38(4): 572–579.
- [45] 孙利辉, 杨本生, 孙春东, 等. 深部软岩巷道底鼓机理与治理试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(2): 235–242.
SUN Lihui, YANG Bensheng, SUN Chundong, *et al.* Experimental research on mechanism and controlling of floor heave in deep soft rock roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(2): 235–242.
- [46] 孙利辉, 张海洋, 张小建, 等. 极软煤层动压巷道围岩大变形特征及全锚索支护技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 937–945.
SUN Lihui, ZHANG Haiyang, ZHANG Xiaojian, *et al.* Research on characteristics of large deformation and full cable support technology of dynamic pressure roadway in extremely soft coal seams[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 937–945.
- [47] 孙利辉, 杨贤达, 张海洋, 等. 强动压松软煤层巷道煤帮变形破坏特征及锚注加固试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(2): 232–239.
SUN Lihui, YANG Xianda, ZHANG Haiyang, *et al.* Experimental research on characteristics of deformation and failure of roadway ribs in soft coal seams under strong dynamic pressure and bolt-grouting reinforcement[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(2): 232–239.
- [48] 孙利辉, 杨本生, 杨万斌, 等. 深部巷道连续双壳加固机理与实验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(5): 687–691.
SUN Lihui, YANG Bensheng, YANG Wanbin, *et al.* Reinforcement mechanism and experimental study on continuous double shell of deep roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(5): 687–691.
- [49] 杨本生, 贾永丰, 孙利辉, 等. 高水平应力巷道连续“双壳”治理底臌实验研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1504–1510.
YANG Bensheng, JIA Yongfeng, SUN Lihui, *et al.* Experimental research on the continuous “double shell” harnessing floor heave in high horizontal stress roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1504–1510.
- [50] 杨本生, 王仲永, 贾永丰, 等. 深部高应力工程软岩巷道非连续“双壳”围岩控制机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(5): 721–727.
YANG Bensheng, WANG Zhongyong, JIA Yongfeng, *et al.* Study on mechanism of the discontinuous “double shell” surrounding rock control in deep soft-engineering rock roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32(5): 721–727.