## DOI: 10.11779/CJGE202109006

# 岩石蠕变扰动效应理论及其在深地动压工程 支护中的应用

## 黄万朋, 孙远翔, 陈绍杰

(山东科技大学能源与矿业工程学院,山东 青岛 266590)

要: 深部岩体工程围岩蠕变性强,受外部中量级循环冲击载荷(冲击能量等级介于10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup> J) 扰动影响时会发生 摘 长期大变形动力灾害。基于近年来对岩石蠕变扰动效应理论的相关研究,采用岩石动力学试验、围岩动态变形破坏理 论分析并结合现场工程实践的综合研究方法,对中量级冲击载荷作用下深地岩体工程的长期大变形机制以及稳定性控 制进行了系统研究。通过研究,总结分析了岩石蠕变扰动变形规律,确定了蠕变岩石对外部冲击扰动敏感的应力、应 变阈值指标; 根据地应力梯度与围岩强度梯度关系重新划分了深地动压工程围岩状态区域, 发现了以围岩蠕变扰动敏 感区动态演化发育为本质的深地围岩长期大变形失稳机制新认识:探讨了围岩应力场分布及演变规律,确定了深地动 压岩体工程长期稳定性控制原理,即给扰动敏感区边界处提供足够的侧向围压,使该区域围岩的抗扰动强度梯度提高 至静载集中应力水平,迫使扰动敏感区消失;基于理论分析、实验室测试以及现场动载监测等手段,提出了深地动压 岩体工程围岩支护设计方法,优化了支护参数设计流程,并在多个工程实例中取得了良好的应用效果。 关键词: 深地工程; 蠕变扰动; 动力灾变; 机制分析; 支护控制

中图分类号: TU435 文章编号: 1000 - 4548(2021)09 - 1621 - 10 文献标识码: A 作者简介:黄万朋(1985一),男,副教授,博士生导师,主要从事岩体力学、矿山压力与岩层控制等方面的研究。E-mail: hwp20033@sdust.edu.cn.

# Theory of creep disturbance effect of rock and its application in support of deep dynamic engineering

#### HUANG Wan-peng, SUN Yuan-xiang, CHEN Shao-jie

(College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The surrounding rock of deep engineering shows obvious creep characteristics. When it is affected by the external cyclic impact load with medium-grade energy (impacting energy of  $10^3 \sim 10^5$  J), a long-term large deformation dynamic disaster will occur. Based on the recent researches on the theory of creep disturbance effect of rock, the long-term large deformation mechanism and the stability control of deep dynamic engineering under cyclic medium-grade impact load are studied. The comprehensive research methods include the rock dynamics experiment, theoretical analysis of dynamic deformation and failure of the surrounding rock combined with the field engineering practice are adopted. According to the researches, the deformation law of creep disturbance of rock is summarized and analyzed. The stress and strain threshold indexes of creep rock mass sensitive to the external impact disturbance are determined. According to the relationship between the in-situ stress gradient and the strength gradient of surrounding rock, the state zone of the surrounding rock in deep dynamic engineering is re-divided. A new understanding about the mechanism of long-term large deformation and instability in deep surrounding rock is discovered based on the dynamic movement of e sensitive zone of disturbanc within the surrounding rock. The distribution and evolution law of the stress field in the urrounding rock is discussed. Then the long-term stability control principle of deep dynamic engineering is determined. That is, the supporting structures provide sufficient lateral confining pressure at the boundary of the sensitive zone of the disturbance. The lateral confining pressure must increase the anti-disturbance strength gradient in this zone to the static concentrated stress level. It can make the sensitive zone of disturbance disappear. The design

method for support of the surrounding rock for deep dynamic engineering is also proposed based on the theoretical analysis, laboratory testing and field monitoring of dynamic load.

基金项目:国家自然科学基金项目(51774195,51304127);山东科技 大学科研创新团队支持计划项目(2019TDJH101) 收稿日期: 2020-12-25

The designing process of supporting parameters is optimized. The research findings have been applied in multiple field engineering examples with ideal results.

Key words: deep engineering; creep disturbance; dynamic disaster; mechanism analysis; supporting system

# 0 引 言

人类社会进入 21 世纪以来,随着科学技术水平的 不断提高以及持续战略发展的需求,人们开始逐步对 深地空间进行科学研究与工程探索。而大部分观点认 为,当前的深部岩体工程实践活动是超前于基础理论 研究的,深部资源开发等大型深地岩体工程活动普遍 面临较多的安全隐患,其中动力灾害预防及其工程围 岩的长期稳定性控制是首当其冲所要解决的关键科学 问题<sup>[14]</sup>。

以深部煤矿开采为例,在千米深度以下的工程地 质环境中,由于岩体工程开挖所造成的应力集中将高 达 50~70 MPa 以上,在该应力场中,即使是中等强 度的围岩体也将表现出持续的强蠕变性,稳定性变得 很差,很容易因外部冲击扰动的影响而打破围岩的短 期平衡状态,使巷道产生动力灾害现象<sup>[5]</sup>。对巷道围 岩产生扰动影响的外部冲击载荷来自煤矿生产过程中 的各个环节,包括高能量级的地震冲击、冲击地压冲 击等(冲击能量一般>10<sup>5</sup> J);中等能量级的顶板岩层 断裂冲击、临近巷道掘进放炮震动冲击等(冲击能量 介于 10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup> J);以及较弱等级的矿车运行震动冲击 等等(冲击能量<10<sup>2</sup> J)。部分冲击载荷(如掘进爆破、 顶板周期断裂等)甚至可能会对巷道围岩产生循环冲 击影响<sup>[6-7]</sup>。

不同类型的冲击载荷蕴含不同等级的冲击能量, 会使巷道围岩产生不同的变形失稳模式。其中由顶板 断裂等造成的中量级循环冲击载荷,由于其广泛存在 性和扰动的持久性,成为深地岩体工程中最常见的一 种动力灾害来源。该类型冲击载荷虽然不会使巷道围 岩产生瞬发性破坏,但由于其长期存在,会使蠕变状 态下的深部煤岩体变形速率增大,累积扰动变形与长 期蠕变变形叠加,从而增加巷道的维修工作量及维护 成本。目前,国内外对高能量级的冲击地压灾害的防 控已经取得了重要的研究进展<sup>[8-10]</sup>,然而对中量级循 环冲击载荷扰动下的深部工程岩体的变形机制与长期 稳定性控制尚缺乏相关研究。

根据上述分析,本文基于近年来对岩石蠕变扰动 效应理论的研究进展,提出一种中量级循环冲击载荷 作用下深部围岩变形机制的新认识,建立了深地动压 工程围岩抗冲击支护控制原理与支护技术体系;并结 合具体工程应用实例,为深部动压巷道的长期稳定性 控制提供指导。

## 1 岩石蠕变扰动效应理论

## 1.1 岩石蠕变扰动效应理论研究概述

"岩石蠕变扰动效应"亦称"岩石流变扰动效应", 最早由中国矿业大学(北京)高延法教授所提出的力 学新概念。所谓岩石蠕变扰动效应是指岩石在一定的 应力状态下,受到外部冲击扰动载荷作用后会产生对 应的蠕变扰动变形增量这一力学现象。该种变形增量 是原本处于静平衡状态下的岩石单纯由冲击扰动引发 的一种不可恢复的永久变形<sup>[5,11]</sup>。研究岩石蠕变扰动 效应对于深部高应力动压岩体工程的围岩长期稳定性 控制具有关键的指导作用。自该理念提出以来,作者 所在科研团队通过自主研发的"岩石流变扰动效应试 验系统",对岩石蠕变扰动效应理论展开了深入研究探 索,取得了一定的研究进展。如高延法、崔希海等针 对典型的红砂岩和泥岩试件试验研究了其流变扰动变 形规律,得到岩石在不同的蠕变阶段具有不同的扰动 效应;同时建立了岩石在不同流变阶段的流变扰动效 应的本构方程[12-13];范庆忠研究了岩石的非线性蠕变 特征、对扰动荷载敏感的邻域范围、强度极限邻域内 的蠕变扰动效应等,提出岩石蠕变扰动效应存在一个 明显的应变阈值[14]; 付志亮研究了岩石的循环冲击扰 动损伤与冲击扰动次数和扰动荷载冲量的相关性,并 推导了岩石材料的蠕变损伤本构关系[15]。近年来,随 着该课题的进一步研究,黄万朋研究发现中硬岩石在 蠕变过程中受外部冲击荷载影响时,同样会发生扰动 变形增加的现象,实测粉砂岩试件的"强度极限邻域" 左边界阈值与其长期强度相当,其应变阈值为极限应 变的 79%~85%<sup>[16]</sup>; 王波研发了 RRTS-IV 型岩石流变 扰动效应试验系统,重点研究了不同围压状态下红砂 岩试件的流变扰动变形规律[17-18]。

上述研究对于深地动压岩体工程的围岩稳定性控 制具有重要指导作用。

## 1.2 岩石蠕变扰动变形规律分析

深部岩体工程围岩进入蠕变状态后,受中量级冲击载荷循环扰动影响下是如何从变形到破坏逐渐发展的,对深部工程岩体开挖后的支护设计具有重要的指导意义。通过对软弱和中硬的岩石试件的试验研究结果显示,不同岩性岩石试件的扰动变形增量曲线表现出相同的规律性,其蠕变扰动变形过程大体经历两个阶段,分别为冲击硬化阶段和损伤发展阶段<sup>[16]</sup>,如图1 所示。图中,静载应力水平以岩石试件的极限强度

为极值分为若干等级,自第1级往后逐渐增加;在每 一级静载应力水平下,施加扰动载荷进行冲击,进而 测试其扰动变形发展规律。在动载荷施加过程中,取 3kg的冲击砝码,以11cm的落体高度进行冲击扰动, 拟合得到的冲击载荷量级约为10<sup>3</sup>J左右,属中等偏小 量级的冲击扰动载荷。



图 1 典型岩石蠕变冲击作用下的累计扰动变形曲线

Fig. 1 Curves of cumulative disturbance deformation of typical

rock under creep

(1) 阶段 I——冲击硬化阶段

在较低等级静载应力水平下,处于蠕变初级阶段 的岩石试件扰动变形增量在前几次冲击时一般呈线性 方式增长;但是随着冲击次数的增加,扰动变形增量 开始逐渐衰减而趋于零,增量曲线呈水平状态发展。 这说明岩石试件在蠕变初期,内部原生微裂隙在冲击 作用下闭合后,会产生冲击硬化现象,冲击载荷无法 使岩石内部产生新的冲击裂隙和损伤,因此在该阶段 岩石对外部扰动的反应是不敏感的。

(2) 阶段 II——损伤发展阶段

将静载应力加至较高水平后,随冲击次数逐渐增加,扰动变形增量不再有明显的衰减迹象,曲线后半段明显出现上翘现象,扰动变形增量呈现先减小后增大的阶梯状发展趋势。说明在该阶段内,外部冲击扰动载荷使岩石内部损伤出现并逐渐加剧,岩石开始由冲击硬化阶段向损伤破坏发展阶段转变,此阶段内岩石开始对外部冲击扰动载荷变得敏感。

在试验最后,较软弱岩石的扰动变形增量几乎呈 线性阶段发展,破坏过程较为缓和;而中硬以上岩石 试件在继续施加冲击后,往往出现突然的崩裂破坏, 如图1(b)所示。

#### 1.3 岩石蠕变扰动敏感区与非敏感区划分

在前述试验研究过程中发现,蠕变岩石存在明显 的扰动敏感区和非敏感区,在不同状态下的扰动变形 增量具有较大的差异,因此获得敏感区和非敏感区过 渡点处的应力或应变判别指标,对于深地工程的支护 具有重要的指导作用。

(1) 应变阈值指标

鉴于试验过程控制,直接利用试验手段精确获得 敏感区阈值的应力指标存在较大难度。在前期研究过 程中发现,岩石蠕变扰动变形增量由冲击硬化阶段向 损伤发展阶段演化过程中,应变指标具有良好的标志 性和可获取性;即,岩石蠕变只有发育至某一程度后, 才会对外部冲击载荷变得敏感<sup>[12-16]</sup>。其中典型岩石应 变指标阈值见表 1。

#### 表 1 典型岩石试件扰动敏感区应变阈值指标

Table 1 Strain threshold indexes of sensitive zone of disturbance

of typical fock samples				
1-1-1 Jul-	极限应变	应变阈值	比值	
石性	$(\varepsilon_0)$	$(\varepsilon_{\rm r})$	$(\varepsilon_{ m r}^{\prime}/\varepsilon_{ m 0}^{\prime})$	
砂质泥岩 (	8.34×10 <sup>3</sup>	$7.42 \times 10^{3}$	89%	
红砂岩(软一	6.27×10 <sup>3</sup>	5.64×10 <sup>3</sup>	90%	
甲硬石) 细砂岩(中硬)	5.63×10 <sup>3</sup>	4.89×10 <sup>3</sup>	87%	
粉砂岩(中硬)	$6.95 \times 10^{3}$	$5.86 \times 10^{3}$	84%	

## (2) 应力阈值指标

岩石蠕变扰动效应试验过程中,为了获得较为准确的扰动敏感区应力阈值指标,需要对静载应力水平 进行多级细分,而在同级静载应力水平下,蠕变岩石 处于不同变形阶段时,对外界扰动的敏感程度亦不同, 如图 2 所示。

该图显示红砂岩试件在较高静载应力水平作用下 进入稳定蠕变阶段后,在不同应变变形阶段对外部冲 击扰动的响应。施加静载应力确保岩石试件进入稳定 蠕变后,在试件应变约为极限应变的65%时施加第一 次扰动,该次扰动共冲击12次,岩石试件表现出明显 的冲击硬化特征;随后在第2次到第4次扰动,冲击 时的初始应变分别为极限应变的70%,75%和80%, 与第一次冲击规律相同。然而当岩石试件继续变形至 极限应变的92%左右施加冲击扰动后,扰动变形增量 曲线呈现损伤发展阶段曲线特征,试件在此时开始对 外部冲击敏感。根据曲线显示,从第一次冲击到第五 次冲击,扰动变形增量呈先减小(曲线1-2-3)后增大 (曲线3-4-5)的典型性趋势。



#### 图 2 红砂岩试件同级静载应力水平下的扰动增量曲线

Fig. 2 Curves of cumulative disturbance deformation of red sandstone under same static stress level

根据上述研究结论分析,确定岩石蠕变扰动敏感 区的应力阈值指标与应变特征密切相关。如图3所示, 在岩石蠕变第一阶段即减速蠕变阶段,其最终应变 $\varepsilon_1$ 尚无法达到对冲击敏感的应变阈值指标;而在进入蠕 变第二阶段即等速蠕变阶段后,岩石应变开始呈线性 增长,最终其应变将达到对冲击敏感的应变阈值指标 (该过程可能为一个较为长期的过程)。因此基于安全 考虑,将岩石进入稳定蠕变阶段门槛处(B点处)所 对应的静载应力水平作为岩石对外部冲击敏感的应力 阈值指标是较为合理的。根据前人研究, B 点处对应 的静载应力水平为岩石蠕变速度为零时的最大荷载, 即岩石的长期强度,因此可将该强度作为岩石对外部 扰动敏感的阈值指标,笔者将其定义为岩石的"抗扰 动强度"。通过在实验室内对不同岩性岩石进行的大量 蠕变扰动效应试验,结果也倾向于这一结论。这揭示 了一个很重要的认识,即岩石当进入稳定蠕变阶段后, 即开始对外部一定量级的冲击扰动变得敏感。



# 2 中量级循环冲击载荷作用下深部围 岩长期变形机制新认识

深部工程岩体的蠕变扰动变形破坏机制,与深部 高静载应力水平、围岩体的动力学参数以及冲击载荷 量级、冲击次数等具有密切相关性,其变形特征是长 期的和动态渐变的,相比于浅部巷道围岩变形要复杂 很多。因此,已经不适合再用浅部围岩变形理论去分 析其长期大变形机理。在此,利用岩石蠕变扰动效应 基础理论,通过对深部巷道围岩状态区域重新划分和 动态应力场的演变规律分析,去阐明其大变形机理。

# 2.1 基于地应力梯度与强度梯度关系的围岩状态分区

为了便于理论分析,对围岩分区模型作如下简化 假设:①巷道开挖在单一均质岩层中,不受围岩结构 差异性影响;②巷道断面为圆形断面;③巷道开挖后 的各状态区域短时形成过程中不考虑冲击扰动影响。 基于岩石蠕变扰动效应理论,建立巷道开挖后工程围 岩状态分区模型及应力分布如图4所示。



图 4 深部工程开挖瞬间围岩状态分区模型 Fig. 4 Model for state zoning of surrounding rock after excavation of deep engineering



图 5 蠕变扰动敏感区动态演化发展示意图

Fig. 5 Dynamic developing rules of sensitive zone of creep disturbance of surrounding rock

深部岩体工程开挖后,会产生较大应力集中,自 巷道壁向围岩内部的地应力分布曲线如图4中 $\sigma_{\theta}$ (围 岩集中切向应力)所示,其中p为原岩应力;在巷道 开挖瞬间,其巷道壁处的切向集中应力最大可达2倍 原岩应力,然后向围岩内部逐渐呈降低趋势。同时, 巷道开挖后,巷道壁处的工程岩体由原三向应力状态 向单向应力状态转化,围岩抗压强度等各项强度指标 均降低;自巷道壁向围岩内部,由于外部围岩的侧向 约束力越来越大,围岩又逐渐向三向受力状态转化, 各项强度逐渐提高,图4中分别列出了工程岩体极限 强度( $\sigma_c$ )、抗扰动强度( $\sigma_1$ )和蠕变阀值强度( $\sigma_t$ ) 的发展曲线。根据以上地应力集中应力水平与工程岩 体上述3个强度参数的关系,可将其划分为3个梯度, 并依此将围岩状态划分为4个区域。

(1) I ——破裂区 (*AB* 区域): 该区域内静载集 中应力第一梯度高于岩体的极限强度梯度,即其应力 状态为 $\sigma_{\theta} \ge \sigma_{c}$ ,使得围岩在巷道开挖后短时间内即 发生了破坏,内部裂隙大量发育,岩体强度降低至其 残余强度,导致围岩失去原有的承载能力。

(2) II——蠕变扰动敏感区(BC 区域)。在本 区域内,降低后的静载集中应力第二梯度高于岩体抗 扰动强度但是低于其极限强度,其应力状态关系为  $\sigma_1 \leq \sigma_e \leq \sigma_c$ ,因此该区域不会发生瞬时破裂,但是 仍处于不稳定状态;根据岩石蠕变扰动效应理论,蠕 变围岩体对外部冲击敏感,受扰动后易发生不可逆转 的累计扰动变形,当变形持续增加至围岩极限变形后, 该区域会转化为破裂区,。

(3) III——蠕变扰动非敏感区 (*CD* 区域): 该 区域内的应力状态关系为 $\sigma_t \leq \sigma_\theta \leq \sigma_1$ ,进一步降低 后的静载集中应力梯度高于围岩蠕变阀值强度,但低 于了围岩的抗扰动强度。因此该区域内围岩处于衰减 蠕变阶段,对外部冲击扰动不敏感,呈现冲击硬化特 性。围岩变形以逐渐衰减的蠕变变形为主,但不会给 巷道造成长期危害。

(4) Ⅳ——非蠕变区(D点以后区域)。该区域内静载集中应力逐渐趋于原岩应力水平,其应力梯度低于围岩蠕变阀值强度,围岩基本处于弹性变形状态,对巷道变形影响不大。

## 2.2 循环冲击下巷道围岩变形机制分析

根据上述围岩状态区域划分,破裂区于巷道开挖 后短时形成,该区域围岩的碎胀变形是造成巷道早期 大变形的主要原因;而蠕变扰动敏感区的存在是深部 动压巷道长期变形失稳的关键因素。其动态发展演变 过程如图 5 所示。

蠕变扰动敏感区形成后,该区域围岩本身处于稳 定蠕变阶段,蠕变变形呈线性发展;同时当有中量级 循环冲击载荷影响时,其累积扰动变形增量亦会持续 发展。蠕变变形与扰动变形二者的叠加会造成该区域 围岩变形速率增大,加速巷道失稳。当围岩自身变形 量超过其所能承受的极限变形时,该区域围岩会自外 向内(由 B 点到 C 点方向)破坏失稳,从而演变为破 裂区。如图 5 所示,在循环冲击载荷持续作用下,蠕 变扰动敏感区内 BB'部分首先发生失稳破坏,演变为 破裂区,使得原破裂区范围增大,支护难度增加;而 扰动影响区会继续向围岩内部转移,原属于蠕变扰动 非敏感区的围岩 CC'演化为蠕变扰动敏感区。在该过 程中,新形成的蠕变扰动敏感区尺寸较原区域尺寸小,即 BC>B'C'。

在扰动敏感区向围岩内部动态演变的过程中,静 载集中应力会进一步降低,而内部围岩的极限强度及 抗扰动强度均相应增大,当减小的围岩应力峰值 $\sigma'_{\theta}$ 与 增大的围岩抗扰动强度 $\sigma'_{1}$ 相同时,即 $\sigma'_{\theta} \leq \sigma'_{1}$ ,围岩 蠕变扰动敏感区最终消失,破裂区发展至最大范围, 巷道达到一个长期平衡状态。

综上,在中量级的循环冲击扰动载荷作用下深部 巷道的长期大变形失稳,本质上是由于在深部高静载 应力及外部扰动荷载作用下,围岩的蠕变扰动敏感区 不断向内部发育发展的结果。如果该过程得不到有效 控制,则最终围岩会形成较大范围的破裂区,导致巷 道发生长期的大变形失稳。

# 3 深地动压岩体工程抗冲击控制原理 与支护设计方法

## 3.1 循环冲击下蠕变围岩支护控制原理

根据对中量级循环冲击载荷作用下深部围岩状态 分区及其长期大变形机制分析,抑制深部围岩蠕变扰 动敏感区不断向内部的动态发育才能保证深部动压岩 体工程长期稳定性。而围岩蠕变扰动敏感区在冲击扰 动作用下的动态演化发育又是由于较高的静载集中应 力超过了围岩自身的抗扰动强度,导致其对外部冲击 敏感所致。因此,如何有效提高该区域围岩的整体强 度水平(包括极限强度、抗扰动强度等关键参数)、增 强其抗冲击能力是人工支护结构所要解决的关键核心 问题。

根据岩石强度准则,岩石在一定应力状态下,侧 向围压的增大能够有效提高其自身强度;基于该认识, 为了提高围岩蠕变扰动敏感区的抗扰动强度,可以在 巷道内构建二级复合支护结构体,如图6所示。首先 初级支护为锚杆索+混凝土喷层+围岩注浆强化等技术 手段组成,其作用之一为将破裂区转变为锚固区,阻 止裂隙围岩的碎胀大变形,使围岩形成一个整体,并 强化其承载能力;其作用之二为该区域围岩能够给外 部蠕变扰动敏感区提供一定的侧向围压,使扰动敏感 区围岩由低围压下的受力状态向高围压下的受力状态 转化;其次,在巷道内构筑高强二次支护结构体,该 结构属于被动支护范畴,可以采用高强U型钢支架、 钢管混凝土支架等支护产品。该结构体与巷道壁之间 预留一定的让压空间,待该空间闭合后,给围岩提供 高强支护阻力。



图 6 深部动压巷道二级复合支护结构体

Fig. 6 Two-level composite supporting structures for deep dynamic roadway

在上述复合支护体系中,锚固体与巷道内的高强

支护体共同作用,为内部蠕变扰动敏感区提供一个足够的侧向围压 F,如图 7 所示。蠕变扰动敏感区围岩 由低围压下的受力状态转变为高围压下的受力状态 后,其强度梯度得到有效提高,抗扰动强度曲线与极 限强度曲线均得到有效上移。待 B 点处的围岩抗扰动 强度与静载集中应力水平相同时,围岩扰动敏感区最 终消失,从而提高了巷道周边围岩的抗冲击特性,深 部动压巷道达到长期稳定的平衡状态。根据上述分析, 支护体提供的支护反力 F 越大,扰动敏感区越早消失, 支护效果越佳。



图 7 支护后巷道围岩应力分布状态

Fig. 7 Distribution of stress of surrounding rock after support

假设深部巷道开挖后,锚固区与扰动敏感区围岩 仍然符合莫尔-库仑强度准则,按最危险力学条件分 析,根据力学理论计算,得到该最小支护反力的计算 公式为

 $F = [P(1+\sin\varphi)+C\cos\varphi - \sigma_{1B}][(1-\sin\varphi)/(1+\sin\varphi)]$ 。(1) 式中 P为深地岩体工程所处的原岩应力; C为原始 状态下的工程围岩黏聚力;  $\varphi$ 为原岩状态下的围岩内 摩擦角;  $\sigma_{1B}$ 为 B点处围岩在一定量级冲击载荷循环 扰动作用下的抗扰动强度。

### 3.2 深地动压岩体工程围岩支护设计方法

深地动压岩体工程的支护设计相较于浅部岩体工 程支护具有较大复杂性。基于岩石蠕变效应理论与深 部动压岩体工程围岩支护控制原理,在深地岩体工程 开挖前后,其具体的支护设计流程如图8所示。

第一,工程开挖前,对其原岩地应力水平、工程 围岩结构、面临的外部冲击载荷量级及冲击频率等参 数进行测定。

第二,对工程围岩体进行取样并进行实验室力学 性能测试分析,采用常规岩石静力学试验对围岩的静 力学参数如极限抗压强度、弹性模量、内聚力及内摩 擦角等进行测定;采用岩石蠕变扰动效应试验对其动 力学参数如抗扰动强度、冲击敏感应变阈值、累计扰 动变形增量等进行测定。

第三,在深部复杂地质环境下,工程岩体的整体

性、节理裂隙发育程度以及高温高水压等的影响会使 室内岩石力学试验所得到的岩石试样强度与实际工程 岩体强度存在较大差别。因此,需要对深部工程围岩质 量和稳定性进行合理评价(如 RMR 分类评价法、RQD 指标分类法等),确定深部工程岩体的力学强度弱化指 标,从而为现场工程支护设计提供可靠的参数<sup>[19-20]</sup>。

第四,根据工程岩体开挖尺寸,基于围岩强度梯度与地应力梯度关系,对工程围岩的状态分区进行有效划分,确定破裂区、扰动敏感区区域范围;尤其确定破裂区与扰动敏感区交界处的静载应力水平与围岩抗扰动强度的对应关系,根据理论计算式确定人工支护体所需提供的最小支护反力*F*。

第五,以上述支护反力为基础,进行工程岩体初 级支护与二级支护参数设计;计算锚固区所能给内部 围岩提供的支护反力 *F*<sub>1</sub>、计算二次加强支护支架所能 提供的支护反力 *F*<sub>2</sub>,其总支护反力 *F*<sup>2</sup> = *F*<sub>1</sub>+ *F*<sub>2</sub>。只要 保证 *F*<sup>2</sup>*kF*(其中 *k* 为支护安全系数)即可满足支护 要求。

## 4 工程实例应用

## 4.1 工程案例1

济矿集团阳城煤矿北三采区深部皮带下山位于 -980 m水平,平均埋深-1100 m左右,属于千米深井 范畴。巷道设计断面为浅底拱圆形,净宽 4000 mm, 地坪宽 2600 mm,净高 3500 mm。巷道围岩以软弱一 中硬的砂岩为主。根据对北三采区地应力实测结果, 原岩地应力以垂向应力为主,26.56 MPa。北三采区深 部皮带下山的主要动载荷来源为临近工作面开采后的 顶板断裂,根据对相邻采区同标高工作面开采过程中的微震监测分析,得到工作面正常推采过程中顶板断裂时的震源能量平均约为2.15×10<sup>5</sup> J,冲击能量传播 至巷道位置处时的残余值约为2.98×10<sup>3</sup> J。

根据北三采区深部皮带下山巷道所处地质力学环 境分析,取其典型围岩试样制作岩石力学试件进行实 验室力学测试分析。该试验为特定冲击载荷下的蠕变 扰动试验,根据现场冲击载荷监测结果,取实验室动 载冲击强度为 3.0×10<sup>3</sup> J。试验得到了相应的室内岩石 试样力学参数。同时在对围岩节理、地下水等综合因 素分析基础上,利用 RMR 系统分类指标及评分方法, 得到围岩力学强度指标弱化参数为 0.63,最终得到的 围岩力学参数结果见表 2。

将得到的上述参数代入式(1),得到人工支护体 所要提供的最小支护强度约为1.67 MPa。基于此,针 对阳城煤矿北三采区深部皮带下山具体条件,设计了以 钢管混凝土支架为主体的二级复合支护结构体系<sup>[21-22]</sup>, 具体见表3。

阳城煤矿北三采区深部皮带下山采用以钢管混凝 土支架为主体的支护技术后,取得了较为良好的支护 效果,如图9所示。

巷道经过初期的碎胀变形后,后期的冲击扰动变 形以及长期蠕变变形均得到了很好的控制,一年后巷 道的整体收敛变形量仅为65 mm 左右,说明构建的支 护体系及设计的支护强度对内部围岩起到了较好的承 载效果,能够有效抵抗蠕变冲击影响,保证巷道的长 期稳定性。



图 8 中量级循环冲击载荷作用下深地工程围岩支护设计流程 Fig. 8 Design process of support for deep dynamic rock engineering

表 2 巷 道 围 岩 力 学 参 数

		•• =				
	Tab	le 2 Mechanical parame	eters of surroundi	ng rock of roa	dway	
围岩岩性	单轴抗压强 /MPa	度  残余强度 /MPa	内聚力 <i>c</i> /MPa	残余内聚 /MPa	そ力 内摩擦角 /(°)	抗扰动强度 /MPa
中砂岩	49.6	0.7	12.2	0.06	30	45.4
		表3支护	技术体系及参数	表		
	Т	able 3 System of suppo	rting technologie	s and paramet	ers	
支护结	构	Ĵ.	型号规格		参数	支护强度/MPa
锚杆       初级支护     锚索       金属网     混凝土喷层	锚杆	◆22 mm×2400 mm 高强预应力左旋无纵筋锚杆			间排距 0.8 m×0.8 m	0.32
	锚索	Φ21.6 mm×8000 mm 预应力钢绞线锚索			间排距 1.2 m×1.6 m	0.18
	金属网	2000 mm×1000 mm 铁丝方格网			—	—
	混凝土喷层	C20 等级混凝土		厚度 80 mm	—	
二次加强支护	钢混支架	Φ194 mm×10 mm 钢管配 C40 等级的混凝土		排距 0.8 m	1.46	
辅助支护	围岩注浆	普通	单液水泥浆		—	—
		合计				1.96





## 4.2 其他工程案例

岩石蠕变扰动效应理论对于深地动压巷道工程的 支护设计具有重要的指导作用,本文提出的岩体工程 抗冲击控制原理与支护设计方法近年来较好地解决了 多个深部煤矿动压巷道的长期稳定性控制难题,并取 得了较大的经济效益和社会效益。部分应用矿井现场 如图 10 所示。该理论及其支护技术体系不仅在深部资 源开采领域,在其他深地动压岩体工程(千米深度以 下)中,也具有相同的适用性和广阔的推广应用前景。



甘肃新安矿变电所(-750 m)



山东华丰矿中央水泵房(-1100 m)



山东华丰矿五水平大巷(-1100 m)



河北邢东矿二水平皮带下山(-1200 m)图 10 部分工程应用实例Fig. 10 Partial examples of engineering application

# 5 结 论

(1)岩石蠕变扰动效应理论重点研究煤岩体在进入蠕变状态后对外部冲击扰动载荷的力学响应特征, 岩石当进入稳定蠕变阶段后,开始对外部一定量级的冲击扰动变得敏感,其敏感区间的应力阈值指标—— 抗扰动强度与其长期强度相当,对于指导深地岩体工程的长期稳定性控制具有重要作用。

(2)基于地应力梯度与围岩强度梯度关系对深地 工程开挖后的围岩状态进行了重新分区,提出了中量 级循环冲击载荷作用下深部蠕变围岩长期变形机制新 认识,认为围岩蠕变扰动敏感区的存在及其不断向围 岩内部的动态转移是深地工程长期大变形的本质。

(3)深地动压工程围岩的长期稳定性控制,关键 是要有效抑制破裂区围岩的短时碎胀大变形以及蠕变 扰动敏感区向围岩内部的长期动态演化。支护结构要 能给扰动敏感区边界处提供足够的侧向围压,使该区 域抗扰动强度梯度提高至静载集中应力水平,使围岩 内部的扰动敏感区消失。

(4)建立了深地动压岩体工程围岩支护设计方法,优化了支护参数设计流程,并在阳城煤矿北三采 区深部皮带下山等多个深地动压岩体工程中取得了良好的应用效果。

#### 参考文献:

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨,等. 深地科学领域的若干颠覆性 技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1 - 8. (XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 1-8. (in Chinese))
- [2] 李夕兵,周 健,王少锋,等. 深部固体资源开采评述与探索[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(6): 1236 1262. (LI Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236 1262. (in Chinese))
- [3] 谢和平. "深部岩体力学与开采理论"研究构想与预期成 果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1 - 16. (XIE He-ping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1 - 16. (in Chinese))
- [4] 姜耀东,赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188 2204. (JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188 2204. (in Chinese))
- [5] 高延法,范庆忠,崔希海,等. 岩石流变及其扰动效应试验 研究[M]. 北京:科学出版社, 2007: 1 - 10. (GAO Yan-fa, FAN Qing-zhong, CUI Xi-hai, et al. Experimental Study on the Perturbation Effect of Rock Rheology[M]. Beijing: Science Press, 2007: 1 - 10. (in Chinese))
- [6] GAO Y F, HUANG W P, QU G L, et al. Perturbation effect of rock rheology under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(7): 1684 – 1695.
- [7] 黄万朋,高延法,王 军. 扰动作用下深部岩巷长期大变 形机制及控制技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 822 - 828.
  (HUANG Wan-peng, GAO Yan-fa, WANG Jun. Deep rock tunnel's long large deformation mechanism and control

technology under disturbance effects[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(5): 822 - 828. (in Chinese))

- [8] 袁 亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究 进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1557 - 1566. (YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557 - 1566. (in Chinese))
- [9] 李振雷,何学秋,窦林名. 综放覆岩破断诱发冲击地压的防治方法与实践[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 162 171. (LI Zhen-lei, HE Xue-qiu, DOU Lin-ming. Control measures and practice for rock burst induced by overburden fracture in top-coal caving mining[J]. Journal of China University of Ming and Technology, 2018, 47(1): 162 171. (in Chinese))
- [10] 王爱文,潘一山,李忠华,等.冲击地压巷道锚杆-围岩系 统复刚度特性[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):183-189. (WANG Ai-wen, PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, et al. Complex stiffness characteristics of bolt and surrounding rock system in bump-prone roadways[J]. Journal of China University of Ming and Technology, 2018, 47(1):183-189. (in Chinese))
- [11] 朱万成, 牛雷雷, 李少华, 等. 岩石蠕变-冲击试验研究
  —现状与展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(1):
  013003. (ZHU Wan-cheng, NIU Lei-lei, LI Shao-hua, et al. Creep-impact test of rock: status-of-the-art and prospect[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1):
  013003. (in Chinese))
- [12] 高延法,肖华强,王 波,等. 岩石流变扰动效应试验及 其本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 3180 - 3185. (GAO Yan-fa, XIAO Hua-qiang, WANG Bo, et al. A rheological test of sandstone with perturbation effect and its constitutive relationship study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3180 - 3185. (in Chinese))
- [13] 崔希海,李进兰,牛学良,等. 岩石扰动流变规律和本构 关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1875 - 1881. (CUI Xi-hai, LI Jin-lan, NIU Xue-liang, et al. Experimental study on rheological regularly and constitutive relationship of rock under disturbing loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1875 - 1881. (in Chinese))
- [14] 范庆忠,高延法. 软岩蠕变特性及非线性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(2):391 396. (FAN

Qing-zhong, GAO Yan-fa. Study on creep properties and nonlinear creep model of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(2): 391 – 396. (in Chinese))

- [15] FU Z L, ZHENG Y R, LIU Y X. Rock bending creep and disturbance effects[J]. Journal of Central South University, 2008, 15(S1): 438 - 442.
- [16] HUANG W P, XING W B, CHEN S J, et al. Experimental study on sedimentary rock's dynamic characteristics under creep state using a new type of testing equipment[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017: 1 -13.
- [17] 王 波, 刘重阳, 陈学习, 等. RRTS-IV 型岩石流变扰动 效应试验系统[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊 2): 484 491.
  (WANG Bo, LIU Chong-yang, CHEN Xue-xi, et al. Experimental system of rheological disturbance effect of RRTS-IV rock[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S2): 484 491. (in Chinese))
- [18] 王 波,高昌炎,陈学习,等. 岩石流变扰动效应三轴压 缩试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(增刊 2): 403 - 411.
  (WANG Bo, GAO Chang-yan, CHEN Xue-xi, et al. Triaxial load test study on the perturbation effect of rock rheology[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 403 - 411. (in Chinese))
- [19] 张艳博, 何满潮, 刘文涛. 基于三维路线精测方法确定深

部工程岩体强度[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1431 - 1435. (ZHANG Yan-bo, HE Man-chao, LIU Wen-tao. Obtaining strength of deep rock mass based on the accurate measurement along three dimension routine lines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1431 - 1435. (in Chinese))

- [20] 刘业科,曹 平, 衣永亮,等. 基于地下深部工程岩体特性的RMR 系统修正[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010,
  41(4): 1497 1505. (LIU Ye-ke, CAO Ping, YI Yong-liang, et al. Revised RMR system on underground deep engineering rock mass property[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(4): 1497 1505. (in Chinese))
- [21] HUANG W P, YUAN Q, TAN Y L, et al. An innovative support technology employing a concrete-filled steel tubular structure for a 1000-m-deep roadway in a high in situ stress field[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 73: 26 - 36.
- [22] 王 军,黄万朋,左建平,等. 深井交岔点围岩流变扰动 效应及钢管混凝土组合支架支护技术研究[J]. 岩石力学与 工程学报, 2018, 37(2): 461 - 472. (WANG Jun, HUANG Wan-peng, ZUO Jian-ping, et al. Rheological perturbation effect of rock and combined support of concrete filled steel tubes in deep coal mine roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 461 - 472. (in Chinese))

## 彩色插图索引

DOI: 10.11779/CJGE202109002 一文彩色插图		(后插1)
DOI: 10.11779/CJGE202109003 一文彩色插图		(后插2)
DOI: 10.11779/CJGE202109011 一文彩色插图		(后插2)
DOI: 10.11779/CJGE202109014 一文彩色插图	(后插	自4,封3)
DOI: 10.11779/CJGE202109017 一文彩色插图		(后插3)
DOI: 10.11779/CJGE202109018 一文彩色插图		(后插3)
DOI: 10.11779/CJGE202109019 一文彩色插图		(后插3)