

文章编号: 1673-3363-(2015)04-0571-07

# 深井高应力软岩巷道围岩变形破坏机制及控制

张广超, 何富连

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要** 为解决深井高应力软岩巷道出现的围岩大变形和支护问题, 以邢东矿-980大巷为例, 采用现场调研、数值模拟、井下试验等方法, 分析围岩大变形等级和变形破坏机理。研究认为其破坏的主要因素有围岩裂隙发育且敏感性强、高地应力、复杂地质构造、水理作用, 确定其属于应力扩容膨胀型(HJS)复合地质软岩。巷道变形破坏动态过程为: 围岩裂隙发育、强度低(高应力扰动作用下)→形成大范围破碎带→水理、复杂地质构造及流变特性→大变形失稳。基于上述研究, 提出以高强锚网索、可缩性环形支架、注浆加固为核心的多层次耦合支护系统, 分析具体支护形式与围岩的耦合作用机理, 并进行支护参数设计。工程实践表明: -980大巷扩修60d后围岩变形速率降至1 mm/d, 顶板最大收敛值193 mm, 两帮最大收敛值114 mm, 底板最大收敛值151 mm, 实现了深井软岩巷道稳定性控制。

**关键词** 软岩巷道; 深井; 变形破坏机制; 多层次耦合支护

**中图分类号** TD 322      **文献标志码** A      **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.04.008

## Deformation failure mechanism of high stress deep soft roadway and its control

ZHANG Guangchao, HE Fulian

(School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract** In order to solve the problems of large deformation and support of high stress deep soft roadway, taking Xingdong ore-980 as an example, combined with field study, numerical calculation and field test, etc, the degree of the large deformation and deformation failure mechanism of surrounding rock have been analyzed. The causes of its failure have been summarized as follows: fracture development and strong sensitivity, high crustal stress, complex geological conditions and hydro-physical property, according to which, the research has indicated that ore-980 roadway is the stress dilatancy expansion type composite geological soft rock. The main reasons for the instability of ore-980 roadway have been found to be the development of surrounding rock fracture and the lower strength (under the high stress disturbance) leading to a wide range of breakage, together with the hydro-physical property, complex geological structures and rheological characteristics, resulting in the large deformation. Based on the above research, the multiple dimensions coupling support which is centered with high strength anchor, yieldable ring support and grouting reinforcement has been proposed, and surrounding rock coupling support mechanism and specific support form have been analyzed, and the design of parameters of

收稿日期: 2014-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51234005); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010YZ02)

作者简介: 张广超(1987—), 男, 山东省泰安市人, 博士, 主要从事矿山压力与岩层控制、安全技术及灾害防治等方面的研究。

**E-mail:** zhangguangcaikuang@163.com

**Tel:** 18810538302

concrete support has been done. Field practice has shown that after 60 d of expansion of ore-980 roadway, the convergence rate of surrounding drops 1 mm/d with roof subsidence reaching 193 mm, roadway's side deformation reaching 114 mm, floor heave reaching 151 mm, which has achieved the goal of effective control of deep roadway with soft surrounding rock.

**Key words** soft rock roadway; deep mine; deformation failure mechanism; multiple dimensions coupling support

我国很多矿区陆续进入深部开采状态, 深部巷道所处的“三高一扰动”复杂环境使得围岩呈现出围岩变形量大、变形速率快、持续时间长、破坏性强、支护体损毁严重等非线性大变形现象, 巷道维护异常困难, 采用常规支护形式难以保证巷道稳定。我国的淮南、邢台、开滦、兖州等多个煤炭基地都存在深井软岩巷道控制难题<sup>[1]</sup>。

近年我国专家学者在深井软岩巷道控制方面进行了不断探索与实践。袁亮等<sup>[2]</sup>提出了深部岩巷围岩稳定控制理论, 并针对深部岩巷围岩分类标准体系形成了相应的深部围岩控制技术体系。孙晓明等<sup>[3]</sup>提出了与深部软岩巷道在强度、刚度和结构上相匹配的锚网索耦合支护技术和柔层桁架支护技术。康红普等<sup>[4]</sup>提出了高预应力、强力支护理论, 开发了相应的高预应力强力支护系统。柏建彪等<sup>[5]</sup>认为深部巷道围岩控制的基本方法是提高围岩强度、转移围岩高应力以及采用合理的支护技术。何富连等<sup>[6]</sup>提出采用高预应力高强锚杆、顶板桁架锚索和煤帮锚索-槽钢桁架联合支护技术进行深井软岩大跨度巷道围岩控制。然而由于深部巷道围岩性质、力学环境、地质工程条件的差异性较大, 各种支护技术均存在局限性, 对于特定条件下的巷道围岩赋存特点及矿压显现特征, 需采取针对性的支护理念和控制措施。

邢东矿-980 大巷埋深超过 1 000 m, 巷道掘进和支护过程中顶板剧烈下沉并多处冒落、帮部明显挤出、强烈底鼓、锚杆(索)扭曲失效等非线性大变形现象突出。本文针对-980 大巷存在的大变形破坏现象, 综合采用现场调研、理论分析、数值计算、井下试验等方法, 研究其变形破坏机制, 在此基础上针对性地提出多层次耦合控制技术及支护方案, 并在-980 大巷进行工业性试验。

## 1 工程概况

-980 大巷是邢东矿二水平采区轨道运输、行人和通风的永久性大巷, 巷道全长 383 m, 设计断面直墙拱形, 宽×高=4.5 m×3.5 m, 埋深 1 040 m, 属于深

部高应力巷道。初期支护为锚网喷支护, 选用  $\Phi 22$  mm×L2400 mm 的 MG335 硅锰钢螺纹钢锚杆, 间排距 800 mm×800 mm, 选用 2 卷 Z2360 锚固剂;  $\Phi 14$  mm 钢筋梯子梁,  $\Phi 6$  mm 冷拔丝金属网, 喷浆选用 C20 混凝土, 初喷、复喷均 50 mm, 仅构造复杂段选用  $\Phi 21.8$  mm×L6500 mm 钢绞线锚索加强支护, 如图 1。二次整修改用  $\Phi 22$  mm×L3000 mm 的 MG500 硅锰钢螺纹钢锚杆进行锚喷支护, 局部地段增设反底拱结构。

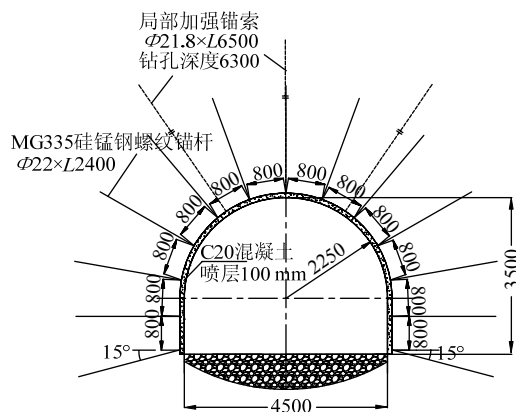
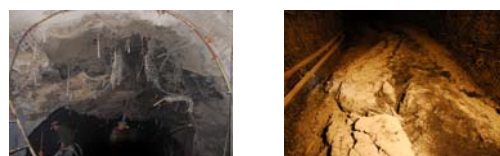


图 1 原有巷道支护断面图 (mm)

Fig.1 Supporting section of original support plan

-980 大巷围岩变形破坏如图 2 所示。



(a) 顶板围岩支护系统破坏 (b) 巷道底板走向大裂缝

图 2 -980 大巷变形破坏实录

Fig.2 Photos of deformation and failure of -980 roadway

-980 大巷开掘不久便出现围岩大变形和支护失效现象: 顶板剧烈下沉, 构造复杂地段出现垮冒事故; 两帮围岩挤出变形严重, 尤以中部偏上部位变形最为突出, 严重地段两帮移近量近 1.0 m; 整体底鼓严重, 变形后底板呈倒三角形, 底板变形多由巷道中间开始, 两边随后出现裂缝, 裂缝沿巷道走向延伸; 锚杆扭曲、松动、脱落, 托盘损坏, 钢筋梁压弯, 钢筋网撕裂, 衬砌开裂现象普遍, 局部

甚至出现锚索剪断现象。-980 大巷先后进行多次整修仍无法控制围岩大变形, 不得不安排专门巷修队伍对-980 大巷进行不间断的整修。由图 2 可见, -980 大巷围岩变形具有变形量大、持续时间长、返修率高、破坏性强、自稳时间长等特点。

## 2 深井高应力软岩巷道变形破坏机制分析

### 2.1 工程难度评价及围岩大变形分级

文献[7]提出采用难度系数  $D_f$  表示深部地下工程稳定性控制的难易程度, 其关系式如下:

$$D_f = \frac{H}{H_{cr}} \quad (1)$$

式中:  $H$  为地下工程实际深度;  $H_{cr}$  为深部工程的临界深度。-980 大巷埋深近 1 000 m, 开采揭露的岩性主要为粉砂岩岩组, 其第一临界开采深度为 800 m, 代入式(1), 可得软化难度系数为 1.2, 围岩处于非线性大变形工作状态, 属于较难支护的工程。

文献[8]以巷道表面位移与跨度之比-岩体强度与最大初始地应力之比作为判定指标, 对软岩巷道围岩大变形进行等级划分, 如图 3。-980 大巷平均表面位移量 500~600 mm, 巷道跨度为 4 500 mm, 收敛应变比 11%~13%; 围岩强度与最大初始地应力的比值在 0.15 以内。-980 大巷围岩变形处于图 3 中 E 区, 围岩处于极其严重的挤压变形状态中。

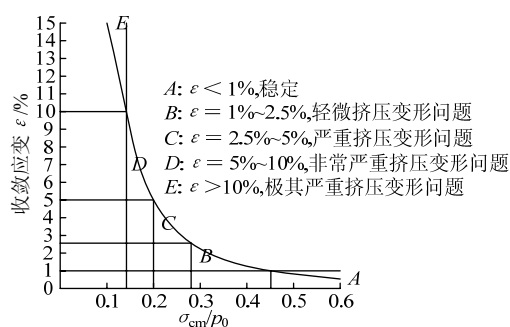


图3 围岩变形等级判断示意图<sup>[8]</sup>

Fig.3 Classification of surrounding rock deformation

### 2.2 -980 大巷维护特点分析

通过对-980 大巷地质生产条件、巷道围岩特征及矿压显现特征现场调研, 分析得出-980 大巷维护特点如下: ① 围岩裂隙发育, 敏感性强。-980 大巷工程岩组以 2<sup>#</sup>煤层、泥岩、粉砂岩为主, 围岩节理裂隙发育, 强度低, 自稳能力差, 易受工程扰动作用而破碎; -980 大巷经历多次整修, 且其位于二水平巷道群, 长期受到相邻巷道开挖及开采的强烈扰动, 造成围岩大范围松散破碎。② 巷道埋藏深

度大, 地应力高。-980 大巷平均埋深 1 040 m, 仅自重应力可达 25 MPa; 由于断层褶曲构造发育, 构造应力突出, 最大水平应力为 40~60 MPa, 巷道开挖引起的集中应力可达 60~80 MPa, 而围岩强度保持较低应力值, 高应力与围岩低强度间的突出矛盾必将造成围岩大变形<sup>[2]</sup>。③ 地质构造复杂, 局部围岩破碎。-980 大巷掘进过程中揭露褶曲、断层小构造较多, 对巷道稳定性影响较大的断层有 5 条, 其中 SF17, F22 断层最大落差分别为 12 m 和 45 m, 其与-980 大巷轴向夹角 30°~60°, 断层的普遍存在增大了围岩破碎程度和支护难度, 这也是-980 大巷掘进支护期间多次发生冒顶、垮帮的主要原因。④ 水理作用。-980 大巷底板为砂质页岩或泥质胶结的粉砂岩, 含伊利石、蒙脱石成分, 围岩具有明显膨胀性, 对水、空气敏感性强; 而-980 大巷底板未及时铺设水沟, 围岩长期处于浸泡状态, 底板膨胀变形显著(图 2b)。

### 2.3 -980 大巷变形破坏机制分析

由上述分析知, -980 大巷属于高应力-膨胀性-节理化(HJS)的应力扩容膨胀型复合地质软岩<sup>[9]</sup>, 力学变形机制为高水平构造应力、自重应力及高工程偏应力、蒙脱石和微裂隙膨胀、断层和随机节理共同作用的 I<sub>AC</sub>II<sub>ABD</sub>III<sub>ABE</sub> 复合型变形力学机制。其中, 高应力与相对较低的岩体强度是-980 大巷破坏失稳的根本原因, 复杂地质构造、水理作用等则进一步加剧了围岩大变形破坏。

综合现场调研和分析, 认为-980 大巷围岩失稳和支护失效的动态过程为: 巷道开挖在围岩中产生高应力, 由于围岩强度较低、敏感性强, 围岩短时间内不可避免地形成较大范围的破碎区和塑性区, 造成围岩强度衰减, 局部受复杂地质构造和水理作用围岩破坏更加显著; 同时由于-980 大巷围岩变形具有强烈的时效性, 巷道长期处于等速蠕变状态, 而原有支护中锚杆索强度、长度偏低, 底板支护强度不足等, 未能对巷道各个部位进行有力支护, 破碎围岩向自由面强烈挤出, 产生较大收敛变形, 甚至出现垮帮、冒顶等事故, 支护系统严重损毁。以上各种因素相互影响、相互促进, 恶性循环, 最终导致巷道全断面失稳、无法使用。-980 大巷围岩变形破坏机制如图 4 所示。

由上述分析可知, 采取合理的支护措施大幅度提高围岩承载能力, 控制和弱化高应力对围岩的破坏作用, 并同时采取底板加固、破碎围岩修复等综合措施方可实现-980 大巷围岩稳定性控制。

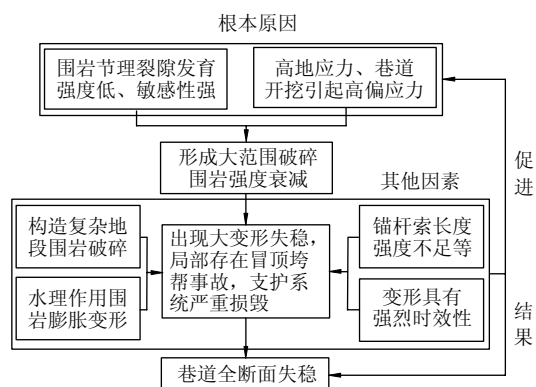


图 4 -980 大巷围岩失稳机制

Fig.4 Failure mechanism of -980 roadway surrounding rock

### 3 多层次耦合围岩控制系统及支护技术

#### 3.1 -980 大巷围岩稳定性控制对策

根据耦合支护原理可知,对于(HJS)应力扩容膨胀型复合地质软岩,其支护对策是首先通过巷道扩修、断面优化将围岩变形能充分释放,使其转化为较为简单的  $\text{II}_{\text{ABD}}\text{III}_{\text{ABE}}$  型;通过锚杆三维优化技术、锚索关键部位支护等技术有效控制围岩结构效应,提高围岩承载能力,使其转化为  $\text{II}_{\text{ABD}}$  型;最后通过可缩性环形支架、深浅孔注浆等技术实现围岩中高水平构造应力和工程偏应力分布均匀化,最终转化为以重力为主( $\text{II}_{\text{B}}$ )的单一型机制<sup>[9]</sup>。变形力学机制转化过程如图 5 所示。

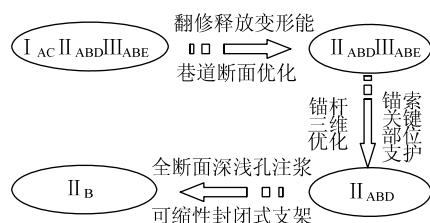


图 5 变形力学机制转化过程

Fig.5 Conversion course of mechanical mechanism of deformation

基于上述分析,综合考虑邢东矿现有施工条件、技术水平、经济等因素,提出“高强锚网喷+大直径高强锚索+36U可缩性环形支架+滞后注浆加固”的多层次耦合支护系统进行-980大巷整修,通过各支护形式在时间和空间上有机结合,达到支护体系与围岩特性在强度、刚度和结构上的耦合,实现巷道长期稳定。

#### 3.2 深井软岩巷道多层次耦合支护技术

##### 3.2.1 强力锚杆索联合支护技术

研究表明:在巷道围岩安设高预应力高强锚杆,能提高围岩固有抗剪强度,严格限制围岩沿原

生裂隙和次生破裂滑移面的剪切变形<sup>[10]</sup>,在锚固区形成刚度较大的预应力承载结构;锚索能对围岩施加高压应力,与锚杆施加产生的压应力区形成骨架网状结构,进而形成浅、深部连接的较大范围高稳定性围岩承载结构,该结构内围岩处于三向受压状态,围岩残余强度和峰值强度大幅提升,能有效抑制围岩变形发展,控制围岩强度的早期衰减,保障锚固区域内岩体完整性。-980大巷围岩本身裂隙发育,且经历多次整修扰动,围岩大范围松散破碎,自承能力极差,因此,扩刷初期应及时采用强力锚杆索主动支护,在锚固区内形成具有一定刚、强度的承载结构,最大程度地提高围岩承载能力,以便在围岩应力调整过程限制围岩初期大变形。锚固区域内围岩承载能力  $p$  是锚杆索支护效果的重要判别标准,其关系式<sup>[11]</sup>如下:

$$p = \frac{2Q_s(1+\sin\varphi)(l_s \tan\alpha - D_a)}{D_a D_l \tan\alpha(1-\sin\varphi)(2R+l_s-D_a)} + \frac{2Q_c(1+\sin\varphi)(l_c \tan\alpha' - D'_a)}{D'_a D'_l \tan\alpha'(1-\sin\varphi)(2R+l_c-D'_a)} \quad (2)$$

式中:  $Q_s$ ,  $Q_c$  为锚杆索预紧力;  $\varphi$  为锚固岩体内摩擦角,约为  $30^\circ$ ;  $l_s$ ,  $l_c$  为锚杆、锚索有效长度;  $D_a$ ,  $D_l$  为锚杆间排距;  $D'_a$ ,  $D'_l$  为锚索间排距;  $\alpha$ ,  $\alpha'$  为锚杆、锚索控制角,取  $45^\circ$ ;  $R$  为巷道有效半径。由式(2)可知:锚杆索长度越大、间排距越小、施加预紧力越大,围岩承载能力越强,只有实现锚杆索参数的最优组合,才能最大限度提高围岩强度。常规的  $\Phi 22 \text{ mm} \times L 2400 \text{ mm}$  螺纹钢锚杆易发生剪断、扭弯,且存在锚杆长度短、锚固基础不可靠、预紧力偏低等问题,  $\Phi 21.8 \text{ mm} \times L 6500 \text{ mm}$  钢绞线锚索存在支护密度小、长度不足等问题;将原有支护中相关参数代入式(2)可得,原有支护方案下锚杆索承载结构的强度仅有  $0.19 \text{ MPa}$ 。

根据上述分析及邢东矿工程经验和数值分析,综合确定-980大巷锚杆索支护参数如下:①锚杆选用  $\Phi 22 \text{ mm} \times L 3000 \text{ mm}$  高强左旋螺纹钢长锚杆,间排距  $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ ,施加预紧力不低于  $100 \text{ kN}$ ,配合钢托板、钢筋梁和金属网;②加强锚索选用直径为  $21.8 \text{ mm}$  的最新型的  $1 \times 19$  丝锚索,长度  $8500 \text{ mm}$ ,间排距  $2000 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ ,施加预紧力不得低于  $125 \text{ kN}$ ,并采用  $14^\#$  槽钢走向连接。将相关支护参数代入式(2)可得,现有支护下围岩承载能力可达  $1.92 \text{ MPa}$ ,巷道围岩支护系统稳定性显著提高。

##### 3.2.2 大吨位可缩性环形支架二次耦合支护技术

-980大巷围岩变形呈现持续时间长、流变特性

显著等特点,且底板在高水平构造应力作用下容易发生底鼓变形(图 2b),因此,有必要在强力锚杆索支护系统的基础上采用封闭式环形支架进行二次支护。可缩性环形支架虽为被动支护,但其具有封闭性、可缩性等特点,可实现支架围岩有效耦合<sup>[12]</sup>:

① 环形支架架设初期,支架与围岩间的预留空隙可实现围岩变形能的二次释放;② 随着围岩变形发展,变形较大部位围岩与环形支架首先接触并将变形压力施加到支架上,环形支架为封闭式立体结构,可将局部变形压力传递到整个支架上,避免局部过载造成支架破坏;③ 当巷道围岩进入流变变形阶段,支架与围岩可充分接触,支架以高支护阻力限制围岩变形发展,同时可实现底板高水平应力向帮部低应力区的转移、扩散,降低底板应力集中程度,限制底板围岩变形。

图 6 为“锚杆索支护”和“锚杆索+可缩性环形支架”2 种支护形式下围岩主应力差分布云图。其中,锚杆为  $\Phi 22 \text{ mm} \times L3000 \text{ m}$  超强左旋螺纹钢锚杆,间排距  $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ ;锚索规格为  $\Phi 21.8 \text{ mm} \times L8500 \text{ mm}$ ,间排距  $2.0 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ ,环形支架采用带有 shell 结构单元体模拟。

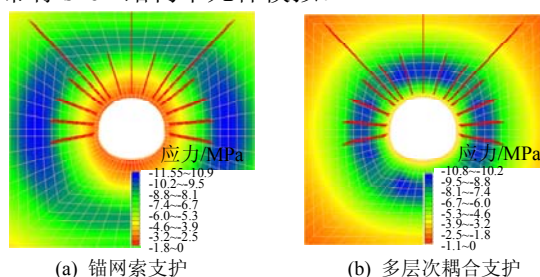


图 6 不同支护条件下巷道主应力差分布图

Fig.6 Principal stress difference distribution changes with different support condition

由图 6a 可知:锚杆索支护下顶板、两帮卸压范围约  $1.2 \text{ m}$ ,底板卸压范围约  $1.6 \text{ m}$ ;主应力差峰值带位于围岩深部  $3.0 \sim 3.5 \text{ m}$  处,锚杆仅有部分锚固在稳定围岩中;各部位围岩应力集中程度相差较大,两帮应力集中程度最高( $11.5 \text{ MPa}$ ),顶底板围岩次之( $9.4 \text{ MPa}$ )。采用大吨位可缩性环形支架后(图 6b),通过支架与围岩的充分接触,可向围岩提供高侧向压力,实现了浅部围岩真正意义上的三向受力,提高围岩残余强度,控制围岩变形,并实现围岩中高集中应力向低应力区的转移、扩散,此时,底板卸压范围约为  $0.1 \text{ m}$ ,主应力差峰值带转移至浅部围岩  $1.2 \text{ m}$  处,峰值应力降为  $10.6 \text{ MPa}$ ,且峰值带均匀分布于巷道四周,锚杆锚固在稳定岩层

中。图 7 为封闭式环形支架主应力差分布图。由图可以看出:环形支架整体处于受压状态,顶板、两帮、底板主应力差值分别为  $11.4, 12.6, 10.5 \text{ MPa}$ ,应力差距不大且保持较低应力值,支架处于稳定工作状态。

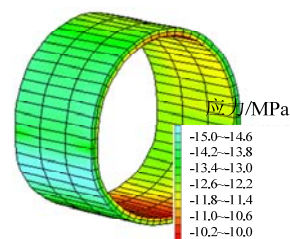


图 7 大吨位可缩性环形支架主应力差分布图

Fig.7 Principal stress difference distribution changes of large-tonnage yieldable ring support

根据上述数值分析以及邢东矿实际地质生产条件与工程经验,综合确定可缩性环形支架参数:环形支架采用大吨位的 36U 型钢制作,支架由 4 节构成,节节之间采用热处理的卡缆连接,卡缆间距  $80 \text{ mm}$ ;长环形断面,顶底部曲线较为平缓,利于支架和顶底板的充分接触;安装时,支架间距  $800 \text{ mm}$ ,相邻支架用扁钢连杆连接,并采用充填方法保证支架围岩接触密实。

### 3.2.3 分区注浆加固围岩修复技术

巷道的稳定性和表面位移  $u$  主要取决于岩层原岩应力  $p$  以及反映岩石强度性质的内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $C$  等,它们之间的关系<sup>[13]</sup>如下:

$$u = \frac{(p + C \cot \varphi) \frac{1}{\sin \alpha} (1 - \sin \varphi)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}}{2G(p_i + C \cot \varphi)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} / r_0 \sin \varphi} \quad (3)$$

式中:  $p$  为原岩应力;  $p_i$  为支护阻力;  $r_0$  为圆形巷道半径;  $C$  为围岩黏聚力;  $G$  为围岩的剪切弹性模数。由式(3)可看出:巷道围岩位移随着巷道所处区域原岩应力的增大呈指数函数关系迅速增长;指数的大小取决于围岩的内摩擦角  $\varphi$  的变化,  $\varphi$  值越大,指数越小,  $u$  值增长减缓。邢东矿-980 大巷服务时间长,经过多次扩刷整修,围岩经历多次破裂,较深区域裂隙发育,且由于埋藏深度大,巷道仍具有一定程度的围岩应力,仅靠锚杆索支护无法保障煤柱稳定;因此,可采用围岩注浆使裂隙得到充填胶结,减小围岩变形指数,减弱或减缓高应力作用下围岩变形破坏,实现支护与围岩的进一步耦合。其固结修复的作用机理主要体现在以下几个方面<sup>[14]</sup>:

① 提高围岩裂隙面的变形刚度和抗剪强度;② 浆液固结体的网络骨架作用:巷道围岩的破坏条件由





## 5 结 论

1) -980 大巷围岩变形具有变形量大、持续时间长、返修率高、破坏性强、自稳时间长等特点, 围岩裂隙发育、高地应力、强烈构造应力、水理作用是-980 大巷变形破坏的主要因素。

2) -980 大巷围岩属于高应力-膨胀性-节理化(HJS)的应力扩容膨胀型复合地质软岩, 巷道失稳动态过程为: 围岩裂隙发育、强度低(高应力扰动作用下)→形成大范围破碎→水理、复杂地质构造及流变特性→大变形。提出了“高强锚网喷+大直径高强锚索+36U可缩性环形+滞后注浆加固”的多层次耦合支护方案。

3) 强力锚杆索可有效提高围岩承载能力, 控制围岩初期大变形, 限制围岩强度的早期衰减; 可缩性环形支架可实现围岩中高应力向低应力区转移、扩散, 均衡围岩主应力差分布, 控制巷道底板变形; 注浆加固可提高围岩强度, 限制围岩变形增长。

4) 井下试验表明: 巷道扩修 60 d 后围岩变形速率降至 1 mm/d, 顶板、两帮、底板最大收敛值分别为 193, 114, 151 mm, 均在安全范围之内。

## 参考文献:

- [1] 刘泉声, 康永水, 白运强. 顾桥煤矿深井岩巷破碎软弱围岩支护方法探索[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3097-3104.  
LIU Quansheng, KANG Yongshui, BAI Yunqiang. Research on supporting method for deep rock roadway with broken and soft surrounding rock in Guqiao Coal Mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3097-3104.
- [2] 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 coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 535-543.
- [3] 孙晓明, 何满潮. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 34(2): 166-169.  
SUN Xiaoming, HE Manchao. Numerical simulation research on coupling support theory of roadway within soft rock at depth[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 34(2): 166-169.
- [4] 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.  
KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. High pre-tension stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1233-1238.
- [5] 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 & Technology, 2006, 35(2): 145-148.
- [6] 何富连, 杨绿刚, 杨洪增, 等. 千米深井大跨度煤巷顶帮桁架联合控制技术[J]. 中国矿业, 2011, 20(3): 65-68, 85.  
HE Fulian, YANG Lyugang, YANG Hongzeng, et al. Combined control technology of large-span coal entry with top and side cable truss in kilometer deep mine[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(3): 65-68, 85.
- [7] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2854-2858.  
HE Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2854-2858.
- [8] HOEK E. Big tunnels in bad rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(9): 726-740.
- [9] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 105-107.
- [10] 任利, 谢和平, 朱哲明, 等. 裂隙岩石拉伸断裂破坏理论分析试探[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 21-27.  
REN Li, XIE Heping, ZHU Zheming, et al. Failure analysis of cracked rock specimen under tension[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 21-27.
- [11] 余伟健, 高谦, 朱川曲. 深部软弱围岩叠加拱承载体强度理论及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2134-2142.  
YU Weijian, GAO Qian, ZHU Chuanqu. Study of strength theory and application of overlap arch bearing body for deep soft surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2134-2142.
- [12] 杨本生, 高斌, 孙利辉, 等. 深井软岩巷道连续“双壳”治理底鼓机理与技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 587-592.  
YANG Bensheng, GAO Bin, SUN Lihui, et al. Study on technology and mechanism of continuous “double shell” harnessing floor heave in deep soft-engineering rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(4): 587-592.
- [13] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 256-259.
- [14] 王成, 汪良海, 张念超. 高应力软岩巷道围岩流变动态演化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 14-18.  
WANG Cheng, WANG Lianghai, ZHANG Nianchao. Research on the dynamic evolutionary of rock rheology in soft rock with high ground stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 14-18.