

文章编号: 1673-3363-(2015)05-0721-07

# 深部高应力工程软岩巷道非连续 “双壳”围岩控制机理研究

杨本生<sup>1,2,3,4</sup>, 王仲永<sup>1,3,4</sup>, 贾永丰<sup>1,3,4</sup>, 孙利辉<sup>1,3,4</sup>, 高斌<sup>1,3,4</sup>

(1. 河北工程大学资源学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省煤炭资源综合开发与利用协同创新中心,  
河北 邯郸 056038; 3. 河北省资源勘测研究重点实验室, 河北 邯郸 056038;  
4. 河北省煤炭矿井建设工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038)

**摘要** 深部巷道围岩变形破坏严重, 传统支护难以实现巷道围岩有效控制。本文以陶二煤矿新南总回风巷道全断面变形破坏为研究对象, 通过现场调研和监测, 分析其破坏状况和因素。研究认为巷道全断面变形破坏原因是巷道围岩在高地应力作用下首先发生剪切破坏, 而后在高瓦斯压力及水理作用下进一步发生膨胀破碎和蠕变。应用非连续“双壳”围岩控制理论, 分析了非连续“双壳”围岩控制机理, 构建了“U型钢(外部应力支护壳体)+柔性垫板(柔性层)+锚杆锚索注浆(内部应力加固壳体)”的非连续“双壳”围岩控制关键技术, 取得良好支护效果。

**关键词** 深部巷道; 工程软岩; 非连续“双壳”; 控制机理

中图分类号 TD 322 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.004

## Study on mechanism of the discontinuous “double shell” surrounding rock control in deep soft-engineering rock roadway

YANG Bensheng<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Zhongyong<sup>1,3,4</sup>, JIA Yongfeng<sup>1,3,4</sup>, SUN Lihui<sup>1,3,4</sup>, GAO Bin<sup>1,3,4</sup>

(1. College of Resource, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. Collaborative Innovation Center of the Comprehensive Development and Utilization of Coal Resource, Hebei Province, Handan, Hebei 056038, China;  
3. Key Laboratory of Resource Survey and Research of Hebei Province, Handan, Hebei 056038, China;  
4. Hebei Technology Research Center of Coal Mine Construction Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract** When the deep roadway has been deformed seriously, it is difficult for the traditional support to achieve effective control of roadway surrounding rock. Taking the distortion and breakage of the whole section of the New South total return air roadway of Tao'er coal mine as the research object, the damaged condition and the factors that cause the damage have been analyzed through the field investigation and monitoring. The study has shown that the reason of the distortion and breakage of the whole section of roadway is that firstly surrounding rock shear and breakage occurs under the effect of high ground stress, and then the surrounding rock gets further expansion break and creep under the effect of gas pressure and water conditioning. The paper has also analyzed the control mechanism of discontinuous “double shell” surrounding rock with the application of discontinuous “double shell” surrounding rock control theory. Additionally, this study has helped to build the key technology of the control of

收稿日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174070); 河北省自然科学基金项目(E2015402038, E2011402046)

作者简介: 杨本生(1956—), 男, 河北省武安市人, 教授, 从事深部软岩巷道支护方面的研究。

E-mail: yangbensheng@sina.com

Tel: 0310-8579527

discontinuous “double shell” surrounding rock as the U-shaped steel (external stress supports shell)+flexible plate (soft layer)+grouting anchor bars(internal stress reinforces shell), and finally obtained good supporting effect.

**Key words** deep roadway; soft-engineering rock; discontinuous “double shell”; control mechanism

现阶段,我国大中型煤矿深部开采延伸速度已达 10~25 m/a,预计未来 20 年我国大中型煤矿将进入到 1 000~1 500 m 开采深度。矿井进入深部开采后,在“三高一扰动”复杂力学环境影响下<sup>[1-2]</sup>,巷道矿压显现强烈,全断面变形破坏严重,巷道维护变得非常困难<sup>[3-4]</sup>;同时,现场调研表明,传统巷道支护方式已经不能满足深部巷道支护要求<sup>[5-6]</sup>。

在深部巷道围岩控制研究过程中,不同学者提出不同深部围岩控制理论及技术<sup>[6-15]</sup>。何满潮等<sup>[6]</sup>根据软岩巷道支护中出现的大变形、大地压、难支护问题提出了软岩巷道耦合支护力学理论;董方庭等<sup>[7]</sup>通过对开巷后的围岩状态研究提出了巷道围岩松动圈支护理论,认为巷道支护的目的在于防止围岩松动圈发展过程中的有害变形;牛双建等<sup>[9]</sup>提出初期柔性“固”、中期高应力“卸”、后期高刚度高强度“抗”的刚柔耦合动态支护技术。这些理论和技术在一定程度上能够实现对深部巷道围岩控制,但没有对巷道支护承载区进行系统研究,对巷道围岩变形破坏形态认识不足,对围岩全断面变形破坏机理认识不清,在实际应用过程中不能取得良好的支护效果。

本文以陶二煤矿新南总回风巷全断面变形破坏为研究背景,根据现场监测和调查对影响巷道全断面变形的因素和机理进行分析,提出并应用非连续“双壳”加固关键技术,建立了“U 型钢(外部应力支护壳体)+柔性垫板(柔性层)+锚杆锚索注浆(内部应力加固壳体)”的非连续“双壳”支护方案,证明对深部巷道围岩控制、特别是底鼓治理起到了重要的稳定作用。

## 1 工程概况

新南总回风巷位于陶二矿四下采区南翼以南约 280~320 m,部分位于三下采区北翼采空区的上部,巷道埋深 800 m 左右,所在层位为粉砂岩,裂隙较发育,较软,含黄铁矿、钙质结核;夹层为 0.4 m 的薄层泥岩,极软、易破碎。实测最大水平主应力为 30.63 MPa,方向为近东西向,与巷道交角 75°,巷道受到较高地应力影响,围岩虽较硬但变形破坏严重,属典型的工程软岩巷道。

### 1.1 原支护形式

巷道设计断面为直墙半圆拱形巷道,净断面宽×高=4500 mm×3550 mm。原支护参数为:帮顶均采用  $\Phi 22$  mm×L2400 mm 螺纹钢锚杆,间排距 800 mm×800 mm;顶板每排对称布置 3 根  $\Phi 17.8$  mm×L8000 mm 锚索,间排距 1800 mm×1600 mm;锚杆间使用梯子梁连接,锚索间使用纵向梯子梁连接;表面喷射 120 mm 厚的混凝土。巷道顶和两帮采用锚梁网喷联合支护。原支护设计见图 1。

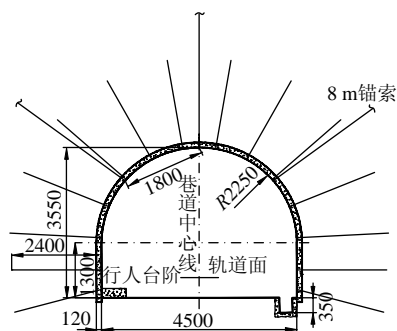


图 1 新南总回风巷原支护设计 (mm)

Fig.1 The original support of New South roadway

### 1.2 围岩变形特征

根据现场勘测,巷道全断面变形严重。巷道两帮收敛量达 2 m 左右,顶底板相对移近量在 2.3~2.6 m 之间,其中底鼓量在 1.5~1.8 m 左右,顶板下沉量为 0.8 m 左右。同时巷道中、下部涌水量较大,围岩遇水弱化现象严重。巷道围岩在各方向上都有较大松散破碎圈存在,网兜较多。此外,两帮及顶板均有多处锚杆整体外移现象出现。巷道变形后与设计断面比较如图 2。由于该巷道为南采区、扩大区的首采区和南三采区生产时服务的专用回风巷道,巷道断面的较大变形严重影响煤矿正常生产。

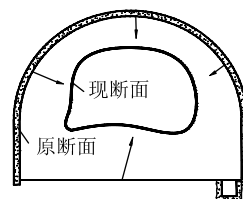


图 2 新南回风巷变形前后巷道断面对比图

Fig.2 The contrast of New South roadway section before and after deformation

## 2 新南总回风巷全断面变形破坏原因及机理分析

研究表明,影响深部巷道围岩变形破坏因素很多,不同巷道其变形破坏原因也有着较大不同。综合多方面资料与研究,针对陶二新南总回风巷具体地质条件,巷道变形破坏因素分析如下:

1) 巷道埋深大,所受地应力较大。新南总回风巷采用应力解除法测试结果表明,巷道最大水平主应力为 30.63 MPa,最小主应力为 14.11 MPa,垂直主应力为 16.8 MPa,侧压系数平均达到 1.33,巷道处于高地应力状态。现场调查表明,巷道许多地段在高水平应力影响下,拱顶处有明显剪切破坏带出现而且锚杆整体外移现象随处可见,这是巷道围岩在高应力作用下发生碎胀蠕变的重要显现。

2) 围岩性质。新南总回风巷所在层位为粉砂岩,裂隙较发育,且含有 0.4 m 厚泥岩夹层,膨胀性软岩成分含量较高。在这样条件下,巷道围岩极易发生变形破坏。

3) 支护方式。新南总回风巷原支护为普通锚梁网喷支护,且支护对象仅考虑巷道两帮和顶板,底板处于无支护状态。由于巷道对底板无支护,使巷道底板处于敞开状态,导致底板成为应力集中区域,成为高应力和变形能释放的空间,底鼓非常严重。

4) 水理作用。巷道中、下部涌水量较大,排水管道导流不及时,围岩长时间与水接触,弱化了自身强度和承载能力,且破坏的围岩由于水的渗入残余强度将大幅降低,易发生崩解;巷道围岩中含有少量高岭石、伊利石等遇水易膨胀矿物,水的侵入导致围岩膨胀变形,呈现松散破碎状态。

5) 瓦斯压力。巷道大部分层位位于 2<sup>#</sup>煤层底板下部约 8~16 m 处,2<sup>#</sup>煤层内部瓦斯压力约 5 MPa,属于突出煤层,内部存在高瓦斯应力,围岩在高瓦斯应力的作用下处于长时蠕变状态,变形随时间持续增大。

## 3 非连续“双壳”围岩控制理论与机理

### 3.1 非连续“双壳”围岩控制理论

通过对巷道浅部进行支护形成外部应力支护壳,对巷道深部进行加固形成内部应力加固壳,两壳体之间预设变形层形成中部柔性层,内外“应力承载壳体”和中部柔性层形成的支护体系,即巷道非连续“双壳”支护。

### 3.2 非连续“双壳”巷道围岩控制技术体系

在非连续“双壳”围岩控制理论下,构建了“U型钢(外部应力支护壳体)+柔性垫板(柔性层)+锚杆锚索注浆(内部应力加固壳体)”的非连续“双壳”支护体系,如图 3 所示。封闭式长环形支架形成外部应力支护壳体,高分子聚乙烯垫板形成中部柔性层,巷道顶帮实施高强度预应力锚杆、锚索支护,底板实施注浆加固形成内部应力加固壳。

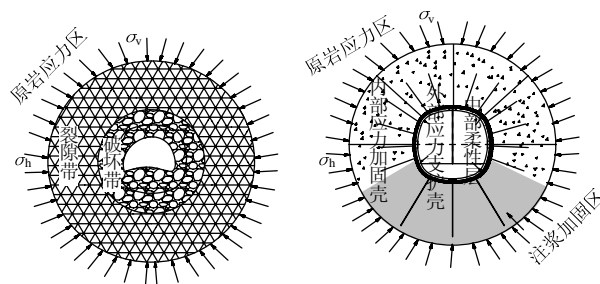


图3 非连续“双壳”巷道围岩控制体系

Fig.3 Control system of roadway surrounding rock with discontinuous “double shell”

### 3.3 非连续“双壳”巷道围岩控制机理

1) 外部应力支护壳是一个闭合受力体,支架在 4 个接头处的可缩量可以实现自行调节,对巷道在使用过程中不同的来压方向适应性强,特别对于巷道四角压力大、围岩受力不均匀时,长环形支架能提供较高承载能力。

2) 当巷道围岩作用到长环形支架上的压力超过一定值后,长环形支架利用本身较大的可缩性,可产生一定的屈服缩动,避免了支架受压过载导致失效。支架内部的支护阻力会随着支架的缩动不断增加,进而限制巷道围岩的变形,同时随着支架的缩动巷道围岩也可以释放一定积聚在围岩内部的围岩压力。外部应力支护壳既能阻止又能适应一定围岩变形,实现了真正的“高阻让压”支护。

3) 外部应力支护壳改变了底板受力状态,使底板围岩由两向受力状态转变为三向受力状态,提高了底板岩体的强度极限,扩大了底板围岩应力承载范围。

4) 由于外部应力支护壳体的限制作用,当底板围岩发生变形破坏时,外部应力支护壳体可以限制底板破碎岩石向巷道空间的挤出,减少底板变形量,控制底鼓。

5) 中部柔性层能够适应一定的岩体变形量,协调内、外壳体协同变形,吸收部分岩体变形能;同时传递外壳支护阻力,提高岩体支护强度,有效预

防岩体变形破坏。

6) 中部柔性层实现了对长环形支架架后空间的填充,改善了围岩和支架的受力情况,使外部应力支护壳整体承载,充分发挥外部应力支护壳的承载能力,实现外部应力支护壳-中部柔性层-内部应力加固壳三者共同承载,提高支护结构的整体性。

7) 内部应力加固壳通过在巷道帮顶实施高强度锚杆、锚索支护,并施加较大的预紧力,实现了对巷道帮顶浅部围岩的预紧压缩,改善了巷道浅部围岩的应力状态,限制了浅部围岩的破坏变形。通过锚索作用,调动了巷道深部岩层对浅部围岩变形的限制作用,减少了巷道帮顶围岩的变形量。锚杆、锚索支护结构强度与围岩强度耦合成一体,提高围岩骨架承载能力,阻隔深部高围岩应力的传播,减小高围岩应力对外部应力支护壳以及中部柔性层带来的影响,内部支护结构和围岩共同保护外部应力支护壳和中部柔性层的承载能力。

8) 内部应力加固壳中底板注浆对巷道中下部的导水裂隙进行封堵、填充,降低了水对巷道围岩的侵蚀作用,强化了巷道底板围岩的强度,增强了巷道底板岩层的承载能力,限制了底板围岩的变形破坏。

## 4 非连续“双壳”围岩控制技术及治理效果

### 4.1 非连续“双壳”围岩控制技术

根据对深部工程软岩巷道围岩变形破坏影响因素的研究,结合非连续“双壳”围岩控制机理,针对陶二煤矿新南总回风巷道围岩全断面变形破坏严重的情况,提出了如下围岩控制关键技术:巷道顶帮实施高强度锚梁网索支护,底板实施注浆加固,形成内部应力加固壳体;封闭式长环形支架支护围岩形成外部应力支护壳体;两壳体之间的垫设柔性垫板形成柔性层。支护结构如图 4 所示。

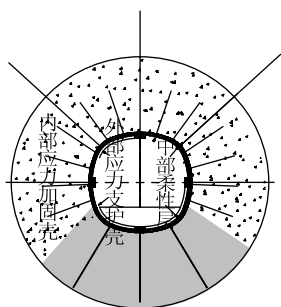


图 4 非连续“双壳”支护效果图

Fig.4 The effect drawing of support of the discontinuous “double shell”

围岩控制方案具体施工工艺过程为:巷道扩修至设计断面→初喷混凝土→锚梁网索一次支护→复喷混凝土→施工底板注浆孔→底板注浆→长环形支架二次支护→添加柔性层→石子进行底板回填。具体为:

1) 对于全断面变形破坏的巷道围岩,首先根据巷道断面要求进行扩帮、挑顶、卧底,使巷道断面达到设计要求,即  $5154\text{ mm} \times 4944\text{ mm}$ (宽×高)。

2) 施工锚梁网索一次支护并进行底板注浆加固(内部应力加固壳)。通过对新南总回风巷道钻孔窥视和围岩松动圈测试,基本确定了围岩破碎发育情况,巷道两帮及顶板从表面至围岩  $1.5\text{ m}$  范围之内围岩破碎严重,深部围岩存在分区破坏现象且影响范围较大。为充分发挥锚杆、锚索对浅部围岩变形破坏的限制及锚索对深部分区破碎围岩悬吊的作用,锚杆选用  $\Phi 22\text{ mm} \times L2400\text{ mm}$  超强螺纹钢锚杆,帮锚索选用  $\Phi 17.8\text{ mm} \times L4200\text{ mm}$  预应力锚索,顶锚索选用  $\Phi 17.8\text{ mm} \times L8000\text{ mm}$  预应力锚索。具体支护参数为:巷道顶帮每排布置 13 根  $\Phi 22\text{ mm} \times L2400\text{ mm}$  超强螺纹钢锚杆,间排距为  $800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ ,其中顶板锚杆预紧力为  $75\text{ kN}$ ,两帮锚杆预紧力为  $35\text{ kN}$ 。巷道顶帮每排布置 5 根锚索,其中顶板对称布置 3 根  $\Phi 17.8\text{ mm} \times L8000\text{ mm}$  的预应力锚索,间排距  $2000\text{ mm} \times 1600\text{ mm}$ ,每帮使用 1 根预应力锚索,长  $4200\text{ mm}$ ,布置在巷道腰线位置,离底板高度为  $1300\text{ mm}$ ,顶帮锚索预紧力均为  $100\text{ kN}$ 。滞后锚杆、锚索施工  $40\sim 50\text{ m}$  进行底板注浆施工,底板每排布置 3 个注浆孔,孔径为  $\Phi 42\text{ mm}$ ,浆孔均长为  $3500\text{ mm}$ ,注浆孔间排距为  $1800\text{ mm} \times 3200\text{ mm}$ ;注浆管选用为  $\Phi 42\text{ mm}$  的无缝钢管,长度为  $2800\text{ mm}$ ;注浆液由 22.5#水泥、添加剂、水组成,其比例为  $1:0.08:2$ ;且为了应对巷道中、下部流水较大,围岩遇水弱化现象严重,每排两侧注浆孔向巷道两帮方向外摆  $15^\circ$ ,以扩大注浆液扩散范围。注浆压力控制在  $4\sim 6\text{ MPa}$  之间,施工底板注浆钻孔时钻孔倾角不大于  $5^\circ$ ,间距误差不超过  $300\text{ mm}$ 。具体布置示意图如图 5 所示。

3) 封闭式长环形支架施工进行二次支护(外部应力支护壳)。非连续“双壳”支护体系中“外壳”支护应实现“高阻让压”,外部壳体应既能够适应围岩在高地应力作用下部分变形移动又能提供高强度支护阻力。中部柔性层应使围岩及支架受载均匀,协调内、外壳体协同变形。封闭式长环形支架

作为外部“壳体”,其有效可缩量的选择应保证与柔性层有效变形量共同吸收巷道初期围岩变形速度最快阶段变形量。根据现场实测,新南总回风巷道开挖后初期围岩变形速度最快阶段变形量在180~260 mm之间,为更好适应围岩变形,充分发挥中间柔性垫层的协调作用,柔性层厚度设为60 mm,其余变形由封闭式长环形支架提供并留有富余,设计有效可缩量400 mm,选用最重U36型钢支架提供支护阻力。长环形支架采用4节U36型钢搭接而成,每节长4 400 mm,中心弯曲半径为1 200 mm,两端水平长度为3 477 mm,如图6。支架排距为800 mm,与锚杆支护排距相对应,支架之间采用扁钢作为拉杆连接,扁钢长为1 100 mm。支架搭接处采用下限位式双槽夹板。双槽夹板式连接件应采用质量较好的材质制作而成,对螺栓要进行热处理,提高其强度。巷道长环形支架支护,如图7。

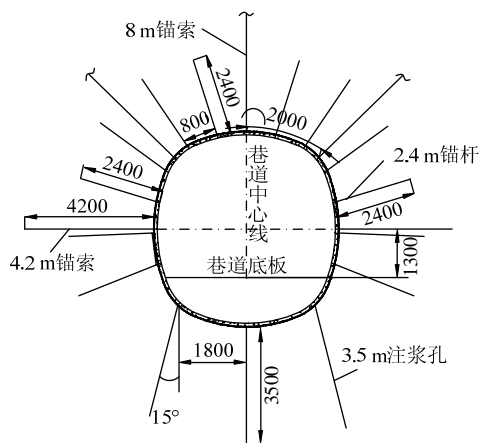


图5 内部应力加固壳加固示意图 (mm)

Fig.5 The diagram of the internal stress reinforcement shell

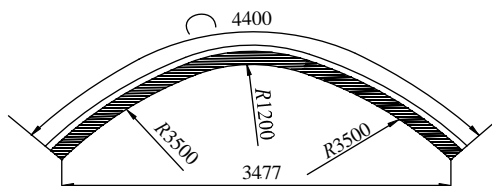


图6 长环形支架每节参数示意图 (mm)

Fig.6 The each parameter diagram of the long ring support

4) 安装柔性垫板(柔性层)。二次支护中架设长环形支架施工的同时,在长环形支架和复喷层之间从下到上依次垫设约60 mm厚的柔性垫层形成柔性层。柔性垫层采用一种超高分子量聚乙烯板,其断裂拉伸强度40 MPa,断裂伸长率350%,弯曲弹性模量600 MPa,几何尺寸长×宽×高为1 600 mm×300 mm×60 mm。

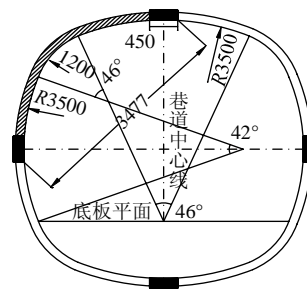


图7 巷道长环形支架支护示意图 (mm)

Fig.7 The diagram of the roadway long ring support

5) 巷道二次支护时机的选择、柔性层的垫设、底板注浆压力与注浆量、帮顶锚杆预紧力大小是保证非连续“双壳”围岩控制体系有效性的关键因素。

① 根据现场监测,新南总回风巷道在内部应力支护壳体支护完成后1~2 d内变形速度较快,因此外部应力支护壳体的安装应滞后5~6 d进行,以保证围岩释放一定高地应力能量,真正实现“先让后抗,柔让适度,稳定支护”。安装每2架支架之后,在每节支架的中心部位用2道扁钢作为拉杆固紧,保证外部应力支护壳体整体性和稳定性。

② 柔性垫板充填长环形支架背后空间,布设均匀,连续搭接,确保岩体受力均匀。柔性垫板能够适应一定的挤压变形,在释放岩体变形能的同时传递环形支架支护阻力,控制围岩移动变形量。每2个柔性垫板之间最大间距不能超过15 mm,特别在巷道四角部位一定要保证中部柔性垫层的连续布置,柔性垫层两端尽量保证在同一高度,避免柔性垫层两端由于受力不均衡而发生扭断,充分发挥中部柔性垫层的变形协调作用。

③ 底板注浆压力应达到4~6 MPa,单孔注浆量应在16~21 m<sup>3</sup>间,以底板溢浆为参照,确保浆液充填胶结围岩裂隙,使底板破裂块体成为整体。帮顶锚杆预紧力应分别达到35, 75 kN,确保帮顶形成具有一定厚度的、结构完整的压缩结构,底板注浆体与帮顶锚杆、锚索加固结构共同形成闭合环形承载结构,利用壳体整体变形特性,承载围岩高应力。

#### 4.2 现场监测结果

在新南总回风巷道采用非连续“双壳”围岩控制技术后,对试验段巷道设置了4个观测断面观测围岩变形。通过近80 d的观测,得到监测数据如图8所示。由图可看出4个监测站断面两帮变形量、顶板下沉量、底板鼓起量随时间变化规律为:

1) 巷道两帮最终平均移近量为75 mm,最大移近量为96 mm;顶板平均下沉量为63 mm,最大下

沉量为 74 mm; 底板平均鼓起量为 55 mm, 最大鼓起量为 71 mm。

2) 巷道全断面围岩变形移动总体可以分为 3 个阶段:

① 剧烈变形阶段。巷道修复 15 d 之内, 巷道两帮平均移近量达到 39 mm, 占总两帮平均移近量的 52% 左右; 顶板平均下沉量达到 36.75 mm, 占总顶板平均下沉量的 58.4% 左右; 底板平均鼓起量达到 35 mm, 占总底鼓平均量的 63.7% 左右。说明外部应力支护壳很好地控制了巷道初期的全断面大变形。

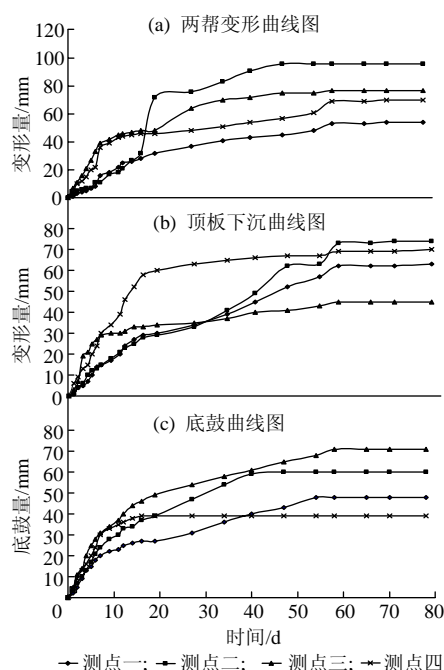


图 8 巷道围岩变形量与时间关系曲线图

Fig.8 Curve about deformation of surrounding rocks and time

② 缓慢变形阶段。巷道修复后 15~50 d 内, 巷道两帮平均移近量达到 30.75 mm, 占巷道两帮平均变形量的 41% 左右; 顶板平均下沉量达到 19.25 mm, 占总顶板平均下沉量的 30.6% 左右; 底板平均鼓起量达到 18 mm, 占总底鼓平均量的 32.7% 左右。说明外部应力支护壳利用自身具有的可缩性与柔性层一起很好协调了围岩变形, 并吸收了一定围岩变形过程中释放的能量。

③ 趋于稳定阶段。巷道修复后 50~80 d 内, 围岩变形速度明显降低, 逐步达到稳定状态。巷道两帮平均移近量为 5.25 mm, 仅占两帮总移近量的 7%; 顶板平均下沉量为 7 mm, 仅占总顶板平均下沉量的 11%; 底板平均鼓起量仅为 2 mm, 占总底鼓平均量的 3.6%。说明内部应力加固壳很好阻隔了

深部高应力的传播, 提高了巷道围岩自身的承载能力, 减轻了外部应力支护壳支护的负担, 达到了有效控制围岩的目的。

3) 巷道围岩变形持续时间长, 从巷道修复后围岩剧烈变形阶段到趋于稳定阶段持续将近 80 d, 巷道围岩表现出较强的流变性, 验证了高应力工程软岩巷道围岩变形特点。

## 5 结 论

1) 分析认为陶二煤矿新南总回风巷变形破坏的主要因素为: 高地应力; 围岩较软且含有膨胀性软岩; 巷道中下部水量较大, 巷道两帮、底板遇水软化现象严重; 巷道底板无支护, 承载能力差; 2<sup>#</sup>煤层内部存在高瓦斯应力。

2) 针对深部工程软岩巷道围岩难控制的难题, 应用非连续“双壳”支护原理控制围岩变形破坏, 构建了非连续“双壳”围岩控制技术体系, 分析了非连续“双壳”围岩控制机理。

3) 非连续“双壳”巷道围岩控制技术在现场工业性实验获得成功。实施“U 型钢(外部应力支护壳体)+柔性垫板(柔性层)+锚杆锚索注浆(内部应力加固壳体)”的非连续“双壳”围岩控制关键技术。现场观测结果表明, 非连续“双壳”巷道围岩控制技术有效地控制了大埋深巷道的变形和稳定。

## 参考文献:

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813. HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 191-199. ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 191-199.
- [3] 李学华, 姚强岭, 张农, 等. 高水平应力跨采巷道围岩稳定性模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 420-425. LI Xuehua, YAO Qiangling, ZHANG Nong, et al. Numerical simulation of stability of surrounding rock in high horizontal stress roadway under overhead mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25 (4): 420-425.



- [4] 宋志敏,程增庆,张生华.构造应力区软岩巷道围岩变形与控制[J].矿山压力与顶板管理,2005,22(4): 48-50.  
SONG Zhimin, CHENG Zengqing, ZHANG Shenghua. Deformation and its controlling of soft rock tunnel in the tectonic stress area[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005, 22(4): 48-50.
- [5] 黄兴,刘泉声,乔正.朱集矿深井软岩巷道大变形机制及其控制研究[J].岩土力学,2012,33(3): 827-834.  
HUANG Xing, LIU Quansheng, QIAO Zheng. Research on large deformation mechanism and control method of deep soft roadway in Zhuji coal mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 827-834.
- [6] 何满潮,高尔新.软岩巷道耦合支护力学:21世纪学科生长点[C]//世纪之交的煤炭科学技术学术年会论文集,1997.
- [7] 董方庭,宋宏伟,郭志宏,等.巷道围岩松动圈支护理论[J].煤炭学报,1994,19(1): 21-32.  
DONG Fangting, SONG Hongwei, GUO Zhihong, et al. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 21-32.
- [8] 何满潮,王俊臣.软岩巷道关键部位二次耦合支护技术[C]//世纪之交软岩工程技术现状与展望,1999.
- [9] 牛双建,靖洪文,张忠宇,等.深部软岩巷道围岩稳定控制技术研究及应用[J].煤炭学报,2011,36(6): 914-919.  
NIU Shuangjian, JING Hongwen, ZHANG Zhongyu, et al. Study on control technology of surrounding rocks in deep soft roadway and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 914-919.
- [10] 刘泉声,张华,林涛.煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21): 3732-3737.  
LIU Quansheng, ZHANG Hua, LIN Tao. Study on stability of deep rock roadways in coal mines and their support measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3732-3737.
- [11] 柏建彪,王襄禹,姚喆.高应力软岩巷道耦合支护研究[J].中国矿业大学学报,2007,36(4): 421-425.  
BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, YAO Zhe. Study of coupling support in soft rock roadway under high stress [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(4): 421-425.
- [12] 方新秋,赵俊杰,洪木银.深井破碎围岩巷道变形机理及控制研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(1): 1-7.  
FANG Xinqiu, ZHAO Junjie, HONG Muyin. Failure mechanism and control measure of roadway deformation with fractured surrounding rock in deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 1-7.
- [13] 张农,王保贵,郑西贵,等.千米深井软岩巷道二次支护中的注浆加固效果分析[J].煤炭科学技术,2010,38(5): 34-38.  
ZHANG Nong, WANG Baogui, ZHENG Xigui, et al. Analysis on grouting reinforcement results in secondary support of soft rock roadway in kilometre deep mine[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(5): 34-38.
- [14] 孙玉福.水平应力对巷道围岩稳定性的影响[J].煤炭学报,2010,35(6): 891-895.  
SUN Yufu. Effects of in-situ horizontal stress on stability of surrounding rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 891-895.
- [15] 王卫军,彭刚,黄俊.高应力极软破碎岩层巷道高强度耦合支护技术研究[J].煤炭学报,2011,36(2): 223-228.  
WANG Weijun, PENG Gang, HUANG Jun. Research on high-strength coupling support technology of high stress extremely soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 223-228.