

低应力软岩复合顶板大变形煤巷支护技术

秦广鹏^{1,2}, 叶平³, 文志杰², 夏均民¹

1. 山东科技大学资源与土木工程系, 山东泰安 271019
2. 山东科技大学矿山灾害预防控制重点实验室, 山东青岛 266510
3. 神华集团有限责任公司煤炭生产部, 北京 100011

摘要 低应力软岩复合顶板煤巷, 虽然埋深较浅, 围岩自重应力水平不高, 但因顶底板岩层岩性及结构的特殊性, 巷道围岩具有软岩的特性。以黑沟煤业有限公司主采 4-2 煤层回采巷道为工程背景, 对该地质条件下巷道支护技术进行研究, 结果表明, 锚杆支护产生的夹持作用可提高巷道浅部围岩完整程度及深部围岩承载能力, 缩小浅部围岩的破坏范围; 锚索支护能够提高深部围岩与浅部围岩的整体性, 减缓围岩的整体沉降运动趋势; 金属网与钢带可加强对表面围岩的约束作用, 限制破坏区向深部发展和表面围岩的冒落变形, 减小顶板岩层的变形; 底角锚杆能够促使应力峰值向深部的转移, 减轻垂直应力向水平应力的转化程度, 控制巷道底臃变形。上述支护方式的综合运用, 可实现复合软岩大变形煤巷的有效支护。

关键词 复合软岩; 煤巷; 锚杆; 锚索; 联合支护

中图分类号 TP353

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.35.005

Support Technology for the Low Stress and Soft Strata Composite Roof with High Deformation Roadway

QIN Guangpeng^{1,2}, YE Ping³, WEN Zhijie², XIA Junmin¹

1. Department of Resources and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, Shandong Province, China
2. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong Province, China
3. Coal Production Department of Shenhua Group Corporation Limited, Beijing 100011, China

Abstract The surrounding rock stress level of low-stress composite soft strata roadway is lower for the shallow depth; however it displays soft rock characteristics for its unique lithology and structure of roof and floor. The roadway support techniques for such kind of geological conditions are researched with the background of Heigou Coal Co., Ltd. four-two coal seam. Clamping action produced by bolting support is able to not only increase the completeness of shallow rock and bearing capacity of deep rock, but also reduce the failure range of shallow rock; cable support could increase the integrity of shallow and deep rock, slowing the overall sedimentation trends of surrounding rock; metal mesh and steel belt could enhance the restraint action to surface adjoining rock, limit failure zone development towards depth and deformation of surface rock and roof strata; corner bolt induce peak stress shift to the depth, reduce the conversion level of vertical stress to horizontal stress, and control the roadway floor heave deformation. The composite applications of support methods mentioned above are able to achieve the valid effect of composite soft strata with high deformation roadway.

Keywords composite soft strata; butt entry; anchor bolt; anchor cable; combined support

收稿日期: 2011-11-01; 修回日期: 2011-12-02

作者简介: 秦广鹏, 讲师, 研究方向为矿山工程力学及采矿工程, 电子信箱: friendqp@163.com

0 引言

具有软岩的矿井在中国煤矿中分布十分广泛。作为软岩工程的一个主要组成部分,煤矿软岩巷道的支护问题一直是困扰煤矿生产和建设的重大难题之一。对于软岩巷道来说,岩体内往往积聚着大量的应力势能,在巷道开挖之前,可将其视为弹性体。一旦开挖卸荷,使地下岩体某一方向的应力突然释放,而造成岩体的回弹效应,由原来的弹性状态转变为塑性状态,岩体在这一期间就破坏,失去承载能力或处于峰后承载状态,从而对巷道的支护造成严重的影响^[1-3]。孙晓明等^[4]提出深部软岩巷道耦合支护锚杆与围岩要达到刚度、强度、结构的三耦合,何满潮等^[5]对深部软岩巷道提出了锚索关键部位的二次支护技术,曾凡宇^[6]利用弹性及黏弹性理论为基础分析软岩及动压巷道局部弱支护机理,王金华、康红普等^[7]对锚索预应力场分布形态与锚索长度、间距、排距、安装角度、预应力的关系进行了分析。

黑沟煤业有限公司主采 4-2 煤层顶板及底板岩性松软、强度低,且裂隙较为发育,在巷道掘进初期就出现了较严重的顶板下沉及底臃,原有支护已无法满足巷道的正常使用,迫切需要进行新的支护方案设计。本文在前人研究成果^[7-8]的基础上,通过现场工程地质调查、数值模拟等研究手段,对原巷道失稳破坏机理进行了研究,并针对性地提出了类似条件下巷道耦合支护设计方案,取得了良好的效果。

1 工程条件

1.1 矿井概况

黑沟煤业有限公司位于陕西省咸阳市旬邑县东南 13km 的清塬乡苍耳沟内,地处陕北高原南部,地势东高西低。井田东西长 5.1km,南北宽 2.8km,面积 11.1903km²。矿区内最高点高程+1855m,最低点高程约+1310m。塬区高程+1500m,相对高差约 245m。

1.2 矿井地质情况

矿井主采煤层为 4-2 煤层,本层煤厚 0.20—6.28m,平均厚 4.63m。4-2 煤层结构复杂,含夹矸 4-5 层,其中第三、四层夹矸最稳定,并将煤层分为上、中、下 3 个自然分层。矿井开采以中层煤为主,次为上、下层,开采厚度一般为 2—3m。

矿井 4-2 煤层顶板岩性以薄层状的粉砂岩为主,顶板岩性松软,机械强度小,分层厚度多小于 30cm,常与砂质泥岩形成互层,且节理裂隙发育,属不稳定顶板。

4-2 煤层底板则以灰色粉砂岩及砂质泥岩为主,局部为炭质泥岩,富含植物根须化石,呈团块状,较松软,遇水易膨胀底鼓,抗压强度为 223—359kg/cm²,一般 270kg/cm²,为不稳定岩层,厚度 1—3.15m,一般厚度 2m。

1.3 煤层巷道围岩结构分析

樊克恭^[9]将工程围岩复合结构中存在的弱结构分为岩性弱结构型(即顶板、两帮或底板某一部位含有软弱岩层的单一岩性弱结构型和两个部位含有软弱岩层的混合岩性弱结

构型)、侧帮为矿岩柱的几何弱结构型以及工程应力弱结构型 3 大类型。根据黑沟煤业有限公司煤巷围岩岩性特征,其巷道围岩结构示意图见图 1。

按照前述弱结构分类方法,该煤层巷道属于混合岩性弱结构类型。由于顶板及底板岩层中各有一层 4-2 煤夹层,顶板中该夹层虽厚度不大,但促使了该层上覆岩层压力向下位岩层以及经煤体向底板岩层的传递。而底板 4-2 煤夹层则会引起上位岩层传递压力的反弹,促使垂直方向压力向水平方向演化。因此,由于矿井主采 4-2 煤层煤巷软顶软底及复合夹层的特点,当巷道支护强度不够时,巷道顶板岩层将会呈现出较强烈的下沉变形趋势;若顶板及两帮支护强度过大,煤层相对顶底板来说又较硬,上覆岩层垂直压力则会通过巷道两帮煤体传递到底板岩层中,引起较强烈的底臃。因此,对于黑沟煤业有限公司复合软岩煤巷必须要选用科学支护方式、确定合理的支护参数,以达到同时控制顶板下沉及底臃、减轻巷道变形破坏的目的。

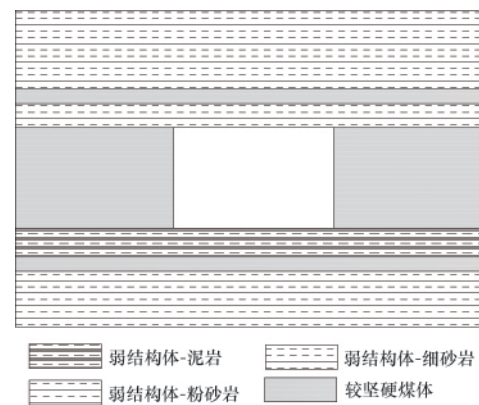


图 1 巷道围岩结构示意图

Fig. 1 Scheme of surrounding rock structure

2 复合软岩巷道锚固支护机理

2.1 数值模拟模型建立

为分析巷道围岩受力及变形过程,采用有限差分法软件 FLAC 3D 对巷道无支护及锚固支护下变形破坏进行数值模拟。模型忽略倾角对巷道稳定性的影响,岩层及巷道取为水平状态;取巷道轴线方向为模型的 y 方向,长度取 20m;垂直于巷道轴线的水平方向为 x 轴方向,向轴线两侧各取 20m; z 轴垂直向上,所研究巷道断面取为宽 \times 高=3.4m \times 3.1m,模型共有 26400 个节点,23030 个单元。采用 Mohr-Coulomb 弹塑性材料模型;在模型顶部施加垂直应力;模型边界限制水平方向位移,底部采用简支固定;模型中考虑初始地应力影响。各岩层所取力学参数如表 1 所示。

所选择的模拟模型如下。

模型 1:巷道无支护;

模型 2:顶板+两帮锚杆支护;

模型 3:锚索+顶帮锚杆+底角锚杆。

表 1 数值模拟模型岩层力学参数

Table 1 Strata mechanical parameters of numerical simulation model

岩层	弹模/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	黏结力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(10 ³ kg/m ³)
老顶	23	0.25	6.9	12	30.03	2.63
直接顶	8	0.28	3.4	9.6	33.6	2.6
伪顶	0.32	0.35	1.6	6.8	32	2.5
煤层	1.6	0.31	3.2	5.2	28	1.41
直接底	0.45	0.32	4.6	6	30.03	2.65
老底	23	0.26	14.2	7.1	29	2.7

2.2 围岩变形特征

三模型模拟结果的围岩变形如图 2 所示。

由图 2 可以看出,锚杆支护时,锚杆与围岩耦合较好的部位下沉位移量很小,在受锚杆影响较小的区域,则逐渐恢复为顶板无支护时的沉降值。

采用锚索+金属网对顶板进行支护后,不仅可以降低锚

杆周围岩体的下沉量,还可以控制顶板整体下沉量,说明如果锚杆和围岩能很好的耦合,锚杆与锚索对下位岩层不仅有悬吊作用,还有与相邻锚杆作用相互叠加,自我成拱的效果。该作用如果能得以合理利用,可充分发挥围岩自承能力。巷道两底角施加与水平面成 30°的底角锚杆后,垂直应力向煤体深部转移,两帮传递下来的顶板压力减小了对有自由面部

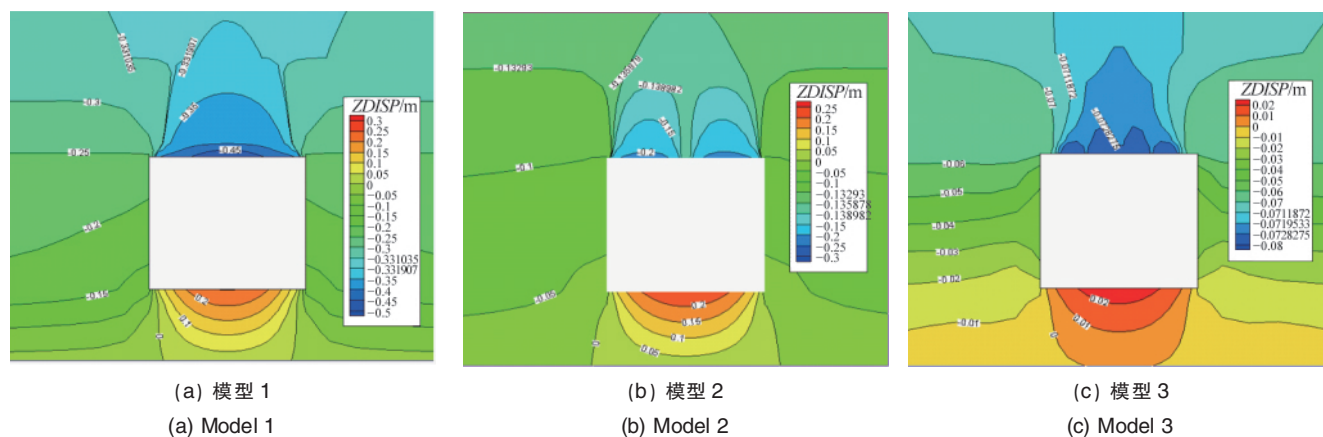


图 2 垂直位移云图

Fig. 2 Contours of vertical displacement

分底板的水平挤压作用,因此巷道底鼓量明显减小。

2.3 围岩主应力分布特征

三模型模拟结果围岩最大、最小主应力分布如图 3、图 4 所示。

巷道开挖后,围岩的受力状态发生改变,巷道周围岩体由三向应力状态转化为两向应力状态,围岩的稳定性发生变化。顶板在自重作用下弯曲下沉,巷道顶板处于受拉状态;而直接顶岩层硬度低,分层厚度小,整体性差,因而顶板各分层下沉运动速度不一致,其运动对底板岩层的作用也不一致,导致巷道底板受顶板岩层多次运动影响,在顶板运动引发的交变荷载作用下易产生拉应力。由于岩体的抗拉强度通常远小于抗压强度,因此,巷道的顶板中部位置,易因岩层的下沉运动发生弯拉破坏,加剧顶板的下沉速度;而底板岩层由于较为松软,在拉应力作用下很容易破坏,另外由于岩层本身的物理力学性质及水的影响,因而底板出现较为强烈的

底鼓。

采用锚杆对顶板加强支护后,利用锚杆的悬吊作用,改变顶板受力状态,提高顶板锚杆支护范围内浅部围岩的承载能力,防止由于支护强度不足导致顶板岩层变形过大而引起的顶板冒落。锚杆支护提高了巷道顶板岩层整体性,顶板直接顶岩层作为整体一次性运动,减小了对两帮及底板的交变荷载作用,且相对于顶板来说煤体硬度较高,煤帮承载能力得到较大限度保持,可较好地降低巷道的变形。

顶板下沉导致巷道两帮受压加剧,相对于 4-2 煤层的软顶和软底,两帮煤体相对硬度较高,造成了巷道顶角及底角应力集中,随着应力集中程度的加剧,该区域将发生压剪破坏;锚杆支护后,巷道顶角及底角的应力集中程度大幅降低,两帮应力峰值向煤体深部转移,可有效减小两帮变形量、降低煤壁发生片帮的风险。

采用锚网索支护时,围岩集中应力区向低应力区转移。

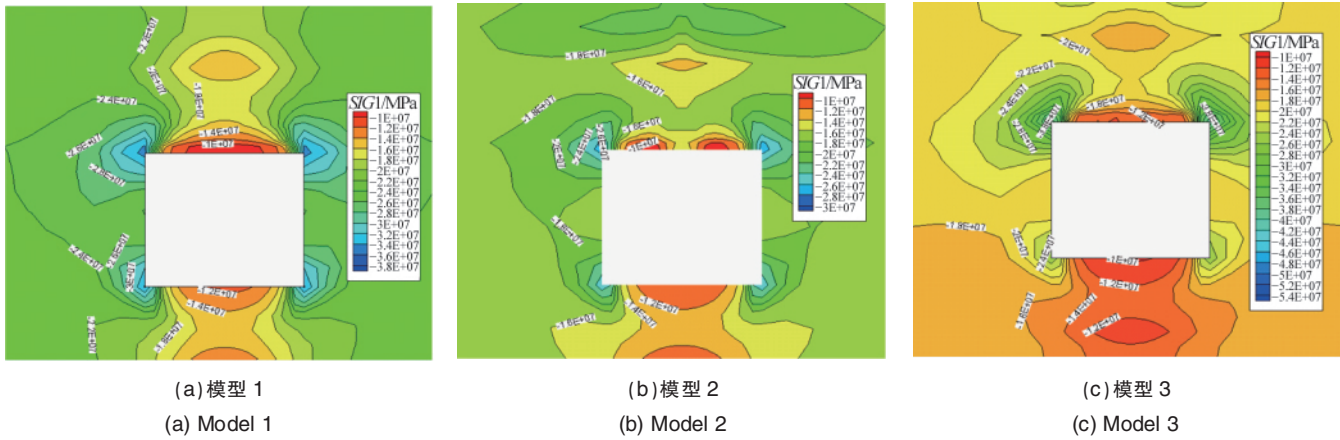


图3 最大主应力分布云图
Fig. 3 Contours of major principal stress

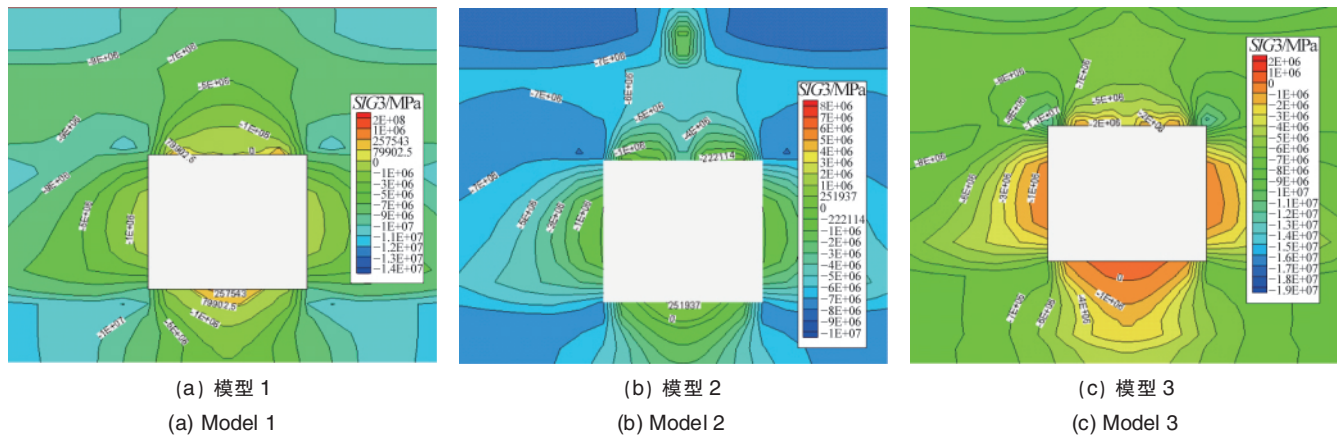


图4 最小主应力分布云图
Fig. 4 Contours of minor principal stress

巷道开掘初期,巷道围岩顶部应力迅速集中,是巷道垮落的危险区域。在实施锚网联合支护后,顶部应力集中区范围迅速减小,而帮部低应力区范围扩大,整个围岩不同部位应力状态趋于均匀化。锚网联合支护技术,改善了围岩应力状态,实现了围岩应力扩散均匀化的过程。随着围岩受力由集中应力区向低应力区转化,锚杆受力趋于均匀化,围岩应力场也趋向于均匀化。

通过上述分析可以看出,施加锚杆(索)支护后与施加前巷道围岩应力分布具有明显的不同,主要表现在施加锚杆(索)支护后,锚杆(索)所夹持区域的应力集中程度明显增大,该夹持作用会使得可能产生离层的各个顶板分层形成一个整体,如果各个锚杆周围的夹持体连为一个整体,则相当于增加了顶板的分层厚度,从而顶板弯曲变形量减小,避免了使顶板发生弯拉破坏。另外,由于锚索的作用,调动了巷道深部围岩强度,从而达到对巷道浅部围岩的支护效果。

由以上分析知,复合软岩情况下,锚固支护应该适应软岩巷道围岩非线性大变形的特点,充分发挥锚杆、锚索的支护能力,通过锚杆、锚索与围岩的相互作用而使围岩变形协

调,限制围岩产生有害的变形损伤,实现支护一体化、载荷均匀化,达到巷道稳定的目的。

3 巷道支护对策及方案设计

现有对于工程软岩进行的分类,通常将软岩划分为物化膨胀型软岩、应力扩容型软岩和结构变形型软岩。

3.1 巷道围岩力学状态

按照软化临界荷载经验公式计算法^[10]:

$$\sigma_{cs} = K \cdot R_c$$

其中, K 为经验系数,膨胀型软岩 0.3—0.5,节理化软岩 0.4—0.8; R_c 为岩石单轴抗压强度。

4-2煤层两类岩性顶板岩层虽然膨胀性矿物的含量不尽相同,但是两类顶板均含有丰富的节理和裂隙,具有节理化特征。4-2煤层底板则以灰色粉砂岩及砂质泥岩为主,局部为炭质泥岩,富含植物根须化石,呈团块状,较松软,遇水易膨胀底鼓,属于膨胀型软岩。顶板岩层经验系数取 0.4—0.6,底板岩层经验系数取 0.3—0.4,顶底板岩层平均单轴抗压强度为 30.5MPa 和 27MPa。由此计算出黑沟煤矿顶板岩层软化荷

载在 12.2—18.3MPa 之间, 底板岩层软化荷载在 8.1—10.8MPa 之间。

上覆岩层所产生地应力埋深按 340m、平均容重 27kN/m³ 计算, 覆岩所产生的原始地应力为 9.18MPa。

由此可见, 虽然煤层埋藏深度不大, 但由于煤层顶底板岩性的特殊性, 当采深达到 340m 时, 顶底板岩层已接近软化临界荷载。此时, 由于巷道开挖所引起的围岩应力重新分布导致的区域应力集中或已掘出巷道围岩受到采动支承应力峰值的影响, 顶底板岩层就会进入软岩塑性变形状态。

3.2 原支护巷道变形特征

4-2 煤层回采巷道原采用的支护形式为锚网梁支护, 巷道断面为矩形, 荒高 2.4m, 荒宽 2.6m, 顶板采用“左旋全螺纹钢等强树脂锚杆+金属菱形网+锚梁”支护, 锚杆规格 $\phi 18\text{mm} \times 2000\text{mm}$, 锚杆间排距 1000mm \times 1000mm。由于支护参数设置不合理, 工作面回采过程中巷道受支承压力影响, 矿山压力显现剧烈, 巷道表现出下述变形破坏特征。

(1) 顶板下沉量大, 冒落性强, 常以网兜形式显现下沉变形; 锚梁受顶板下沉作用产生压弯变形、部分锚杆脱帽。

(2) 巷道变形严重, 帮部收缩量大, 肩窝和帮底有明显的收敛。

(3) 底脚破坏范围大, 破坏形式单一, 卧底工作量大, 不对称性明显。

3.3 巷道支护对策

根据前述研究巷道失稳机理和工程地质条件, 可知巷道工程岩体为应力型-节理化-膨胀型(HJS)的复合型软岩。巷道产生变形的主要因素是围岩中膨胀性岩分和大量弱面的存在, 诱导因素是上覆岩层自重以及采掘所引起的应力扰动。各型软岩的常用支护对策有: 物化膨胀型软岩-柔性喷层技术, 采用柔性锚杆、布置底锚杆等; 应力扩容型软岩-巷道位置的优化、锚索耦合支护等; 结构变形型软岩-锚网耦合支护、锚杆布置空间位置优化等^[9]。通过对 4-2 煤层具体工程地质条件分析、现场破坏状况调查及破坏原因分析、地质力学评估和耦合支护设计理论分析, 结合现场施工的可行性和经济的合理性, 确定巷道围岩的支护对策如下:

(1) 控制顶帮的支护强度, 在安全许可的范围内允许顶板特别是两帮产生一定程度的变形, 使煤体内储存的形变势能通过围岩变形、运动的方式进行释放, 降低支护难度。

(2) 加强网的强度和刚度, 增强围岩表面约束能力, 限制破碎区向纵深发展。

(3) 支护中增加托梁、钢带等, 以保证初期支护具有一定的柔性, 在巷道不失稳的前提下, 允许围岩有一定的变形, 让其充分地释放能量。同时, 支护体后期要有足够的强度和刚度来有效控制围岩与支护的过量变形。

3.4 支护参数设计

3.4.1 巷道围岩结构优化设计

原设计巷道断面尺寸 2600mm(荒高) \times 2400mm(荒宽),

为降低由于围岩大变形所引起的不利影响, 新设计巷道断面为 3200mm \times 3000mm, 预留出一定变形量, 满足工作面的生产需要。

3.4.2 锚网带索耦合支护参数确定

顶板采用“全螺纹钢等强树脂锚杆+钢筋网+M 锚带+锚索”联合支护, 锚杆规格为 $\phi 20\text{mm} \times 2400\text{mm}$, 顶锚杆间排距为 700mm \times 800mm; 锚固端长度应大于 700mm, 设计锚固力不低于 100kN、预紧力扭矩不低于 400N \cdot m; 锚索采用 $\phi 15.24\text{mm} \times 6000\text{mm}$ 钢绞线, 最低破断负荷 260kN。锚索按间距距中线 0.5m 分两侧布置、排距按 2.4m 一组。随迎头前移支打锚索, 安装后锚索外露长度不得大于 200mm, 锚索锚固力应大于 200kN, 张拉预紧力控制在 80—100kN。

两帮采用“全螺纹钢等强树脂锚杆+钢筋网+托盘”联合支护煤帮, 锚杆规格为 $\phi 20\text{mm} \times 2200\text{mm}$, 锚杆间排距为 800mm \times 800mm, 设计锚固力不低于 50kN、预紧力扭矩不低于 400N \cdot m; 靠近巷道两肩窝的锚杆, 向两帮倾斜, 锚固端距各自邻近帮距离不少于 0.5m, 并与钢带相连接, 巷道两帮肩角锚杆距顶板不大于 400mm, 距巷道底板不大于 300mm, 并向下倾斜, 与水平呈 10°—30°夹角。

为在锚杆与围岩之间留出围岩的适当变形空间, 采用钢托盘与木托板组成的复合托盘作为锚杆托盘。方形钢托盘采用 Q235A 以上的钢材制作, 规格为: 116mm \times 116mm \times 8mm, 两肩窝采用异形托盘; 木托板规格为 350mm \times 260mm \times 50mm。锚索盘采用 100mm \times 48mm \times 5.3mm 标准槽钢, 同时在槽钢内中间焊接一个锰钢板(长度 $>$ 200mm、宽度 $>$ 6mm、厚度 $>$ 7mm)进行加固。钢筋网采用 $\phi 6\text{mm}$ 钢筋网自制加工而成, 规格为长 \times 宽=1600mm \times 900mm, 网格为 100mm \times 100mm。支护设计参数和现场支护见图 5。

3.5 支护效果

新支护方案在黑沟煤业有限公司 4406E 运输巷、回风巷, 4406W 运输巷、回风巷得到应用。上述巷道采用新的支护方案后, 杜绝了冒顶现象的发生, 减少了折帮、底脚量, 基本不再需要进行扩帮、卧底等工作, 降低了巷道维护工作量, 在不需要返修的前提下基本能够保证巷道断面的使用要求, 保证了工作面生产期间行人及物料的畅通, 有利于安全、快速、高效的组织生产。

4 结论

(1) 复合软岩煤层巷道, 由于顶板岩层的不稳定性和煤体相对硬度较高, 顶板岩层形成类拱形变形破坏区域, 采用锚杆、锚索主动支护手段, 可以促使应力峰值向岩体深部转移, 促使拱形破坏区域减小, 缩小不稳定围岩范围。

(2) 底板岩层与煤层硬度相差不大, 巷道开掘后, 覆岩重力通过煤层向底板岩层传递, 造成底板岩层拉应力的升高, 这是造成巷道底脚的主要原因。支护中施加底角锚杆、选择合理支护参数、降低底板受水影响, 促使应力高峰区由浅部

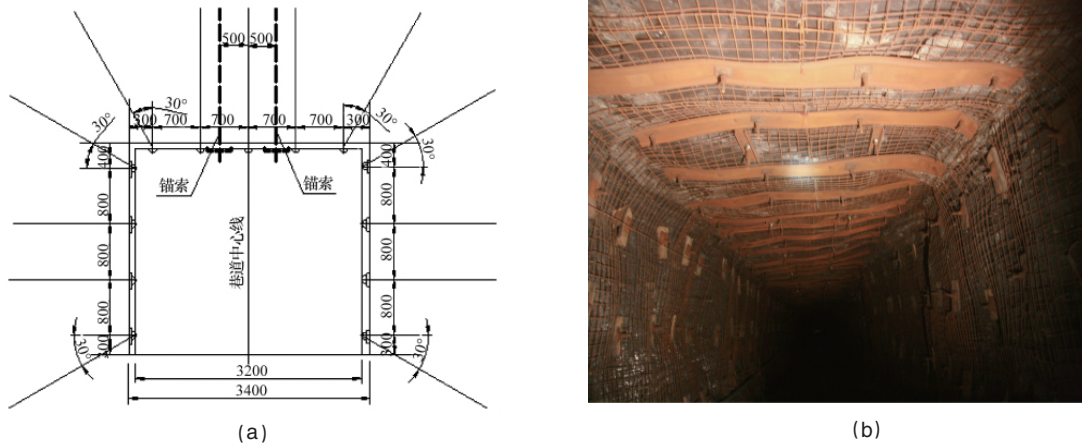


图5 支护参数(a)和现场支护图(b) (单位:mm)
Fig.5 Support parameters (a) and their applications in field (b) (unit: mm)

向深部转移,减轻底板岩层受水影响的膨胀变形,可有效降低巷道底臃。

(3) 低应力复合软岩巷道,单一支护方式很难达到理想的支护效果,需要采用多方法联合支护、科学选择支护参数,通过提高深部围岩承载能力、缩小浅部围岩破坏范围、控制表面围岩变形量,可使该条件下巷道支护达到较理想效果。

参考文献 (References)

[1] 邓坤. 高应力软岩巷道围岩稳定性研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2008: 7-10.
Deng Kun. Study on surrounding soft rock stability of tunnel in high stress [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008: 7-10.

[2] Wang C, Wang Y, Liu S. Deformation behavior of roadways in soft rocks in underground coal mines and principles for stability control [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37 (6): 937-946.

[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, 2005, 34(2): 166-169.
Sun Xiaoming, He Manchao. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2005, 34(2): 166-169.

[4] 何满潮, 李春华. 锚索关键部位二次支护技术研究及其应用 [J]. 建井技术, 2002, 23(1): 21-24.
He Manchao, Li Chunhua. *Mine Construction Technology*, 2002, 23(1): 21-24.

[5] 曾凡宇. 软岩及动压巷道失稳机理与支护方法[J]. 煤炭学报, 2007, 32 (6): 573-576.
Zeng Fanyu. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(6): 573-576.

[6] 王金华, 康红普, 高富强. 锚索支护传力机制与应力分布的数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 1-6.
Wang Jinhua, Kang Hongpu, Gao Fuqiang. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(1): 1-6.

[7] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
Kang Hongpu, Wang Jinhua. *Rock bolting theory and complete technology for coal roadways* [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007.

[8] 殷聪, 杨德传. 高应力条件下煤巷变形失稳分析及防治对策 [J]. 江西煤炭科技, 2009(1): 41-42.
Yin Cong, Yang Dechuan. *Jiangxi Coal Science and Technology*, 2009(1): 41-42.

[9] 樊克恭. 巷道围岩弱结构损伤破坏效应与非均称控制机理研究[D]. 泰安: 山东科技大学, 2003: 7-9.
Fan Kegong. Study on damage-failure effect and non-harmonious control mechanism of weak structure of surrounding rocks and roadways [D]. Tai'an: Shandong University of Science and Technology, 2003: 7-9.

[10] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学 [M]. 北京: 科学技术出版社, 2002: 101-107.
He Manchao, Jing Haihe, Sun Xiaoming. *Engineering mechanics of soft strata* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 101-107.

(责任编辑 代丽)



《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: www.kjdb.org。