

潘浩,朱磊,张新福,等. 深部临时水仓硐室群围岩偏应力分布特征与控制技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(4): 043033.

PAN Hao, ZHU Lei, ZHANG Xinfu, et al. Distribution characteristics of deviatoric stress and control technology of surrounding rock at temporary water chamber group in deep mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(4): 043033.

深部临时水仓硐室群围岩偏应力分布特征与控制技术

潘浩, 朱磊, 张新福, 古文哲, 刘治成, 李娟, 宋天奇, 秋丰岐

(中煤能源研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要:以邢东矿二水平临时水仓硐室群为工程背景,采用FLAC^{3D}模拟研究硐室群围岩偏应力分布规律及塑性区响应特征,探寻硐室群围岩偏应力分布与硐室群围岩稳定性支护的内在联系。研究表明:临时水仓硐室群开挖卸载后,在硐室群围岩中形成环状偏应力峰值区,其环状偏应力峰值区的范围及位置与硐室群围岩塑性区的范围及位置基本一致,且各硐室围岩偏应力峰值区内的高偏应力集中区与各硐室围岩塑性区的扩展区域相同。基于数值模拟试验结果得出,强力锚网索可在各硐室围岩中形成大范围锚杆-索预应力承载结构,并据此提出了该预应力承载结构范围应大于各硐室围岩偏应力峰值区范围的硐室群围岩支护原则。现场实践表明,采用强力锚网索和厚层U型混凝土联合支护,可保障临时水仓硐室群围岩的控制效果,满足其生产服务期间的使用要求。

关键词:硐室群;偏应力峰值区;预应力承载结构;厚层U型混凝土

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:2096-7187(2020)04-3033-09

Distribution characteristics of deviatoric stress and control technology of surrounding rock at temporary water chamber group in deep mining

PAN Hao, ZHU Lei, ZHANG Xinfu, GU Wenzhe, LIU Zhicheng, LI Juan, SONG Tianqi, QIU Fengqi

(China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: A numerical study was performed to study the distribution characteristics of the deviatoric stress and the response characteristics of the plastic zone in the surrounding rock of chambers. A FLAC^{3D} was created based on the second level temporary water chamber group of Xingdong Mine to explore the internal relationship between the distribution of deviatoric stress and the stability support of surrounding rock of chamber. The numerical results suggest that after the excavation and unloading of the temporary water storage chamber group, a ring-shaped deviatoric stress peak area is formed in the surrounding rock of the cavern group. The range and location of the ring-shaped deviatoric stress peak area are the same as the plastic zone of the surrounding rock of the cavern group. The high deviator stress concentration area in the peak deviator stress region of each chamber surrounding rock is the same as the expansion area of the plastic zone of each chamber surrounding rock. It was found that the strong anchor mesh cables can form a large-scale anchor-cable prestressed bearing structure in the surrounding rock of each chamber. It is suggested that the range of the prestressed bearing structure should be larger than that of the surrounding rock of each chamber. The supporting principle of surrounding rock of chamber group in the range of

1.2 邢东矿二水平区域巷道矿压显现机理

邢东矿二水平区域各巷道在深部复杂高应力环境下发生了剧烈矿压显现,呈现出变形量大、持续时间长和破坏性强等特征,其变形破坏机理分析如下。

(1) 复杂围岩应力场

邢东矿二水平下山临时水仓埋深达1 100 m以上,仅自重应力作用下的原岩应力就达27.5 MPa左右,且深部煤系地层赋有的较高构造应力将导致原岩应力普遍高于自重应力,此外水平应力通常为1.25~2.50倍的垂直应力。在如此高的应力下开挖巷道,仅其巷道围岩表面卸压幅度就达27.5 MPa,应力峰值将达到2~3倍,使得最大剪应力急剧增大。高剪应力作用和深部弱围岩强度的突出矛盾必然导致围岩快速劣化和应力向深部转移,继而使围岩经历多次“损伤扩容—剪切滑移破坏—碎胀大变形”失稳过程^[3],导致开挖扰动引起的二次应力影响区和围岩破裂损伤区远超一般深度巷道,在此过程中极有可能出现大变形填满巷道空间的状况。邢东矿二水平胶带和轨道下山矿压显现尤为剧烈,其在掘进一段时间后,便发生了较大变形,1 100 m以下区域原3.5 m高的巷道,现只能容许一人爬行通过。

(2) 深部岩体的流变特性

在深部复杂应力场作用下,一些普通岩石往往呈现出软岩特征,即使经历了数次大变形失稳以及能量耗散,巷道深部围岩应力水平仍明显大于岩石的长期强度,深部巷道围岩变形呈现出变形量大和持续时间长等流变特性。邢东矿二水平集中运输巷围岩变形破坏严重,支护系统多处出现锚索被拉断、托盘翘曲等损毁现象,且在经历2次扩刷后,仍产生大变形。

(3) 高渗透压作用

在高应力和高渗透压耦合作用下,巷道开挖后,近表围岩的孔隙水压力由开挖前的几兆帕降为与大气压力相等,骨架的有效应力大大增加,超过岩体的强度,导致围岩表面的裂隙向深处扩展^[3],加剧岩体裂隙的启裂、扩展、贯通以及分支裂纹的产生等劣化行为。邢东矿二水平胶带下山和轨道下山的顶板都有不同程度的淋水现象,因此,该区域巷道围岩在高渗透压作用下,软弱结构面的强度特性和变形特性将进一步降低。

2 深部临时水仓硐室群围岩变形破坏模拟分析

根据经典弹塑性理论及岩土弹塑性理论,单元体在外力作用下的变形结果是体积和形态的改变,球应力产生弹性体应变,偏应力产生弹性剪切应变,即球应力只引起单元体体积的改变,偏应力只引起单元体形状的变化。围岩应力是球应力和偏应力的叠加,球应力能控制单元体积压缩,偏应力能控制岩体的破坏,塑性变形的发生发展,主要由偏应力决定^[11-12]。因此,研究偏应力对塑性变形的影响有助于从应力角度了解巷道围岩卸荷破坏。设主应力 $\sigma_i(i=1,2,3)$,且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$,则围岩中一点的应力状态表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - p & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - p & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - p \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,球应力为等式右边第1项,表示为 $p=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3$;偏应力为等式右边第2项; σ_1-p 为最大主偏应力,表示为 s_1 ,在应力张量中起主导作用,本文将最大主偏应力作为衡量巷道围岩破坏的指标,则最大主偏应力的表达式为

$$s_1 = \sigma_1 - \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

2.1 深部临时水仓硐室群数值模型的建立

依据临时水仓的生产地质条件,建立如图2所示的数值计算模型。选取下山方向为 y 轴,垂直下山方向为 x 轴,煤岩体层状排列方向为 z 轴,其胶带下山和轨道下山宽度均为4.5 m,两者间的中心距为45.0 m,一边留设25.0 m的边界煤柱,另一边留设25.5 m的边界煤柱;联络巷宽度为4.0 m,水仓宽度为3.8 m,两者间的中心距为6.9 m,两边各留设19.6 m的边界煤柱,煤层顶板取25.5 m,底板取20.0 m;由此,形成一个100 m×60 m×50 m的数值计算模型。该模型划分为1 680 240个单元,1 727 410个节点,本构关系采用Mohr-Coulomb模型,位移边界约束,四周设置为铰支,底部设置为固支,上部为自由边界,并施加覆盖岩层自重载荷27.5 MPa,侧压系数取1.2,其煤岩层力学参数见表

1. 本模型的建立主要是为了研究深部临时水仓硐室群围岩偏应力分布规律及塑性区响应特征,探索

偏应力与塑性区的内在联系,为深部临时水仓硐室群的支护提供理论依据。

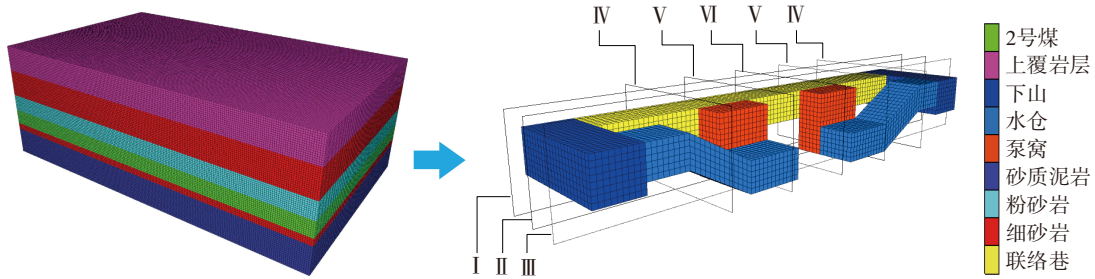


图2 数值模型及临时水仓结构

Fig. 2 Numerical model and structure diagram of temporary water chamber

表 1 煤岩层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of strata

岩层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	抗拉强 度/MPa
粉砂岩	2 750	8.82	4.84	3.00	31	2.57
细砂岩	2 700	7.87	3.38	2.65	30	2.40
2号煤层	1 350	2.35	1.47	1.50	20	1.40
砂质泥岩	2 350	3.68	2.10	2.10	25	1.50
上覆岩层	2 800	10.25	5.03	2.90	31	2.50

2.2 深部临时水仓硐室群围岩偏应力分布规律

根据数值模型计算,并对其进行后处理得到如图3所示的深部临时水仓硐室群围岩偏应力空间分布图。由图3可以看出,各硐室围岩偏应力由浅至深呈先增大后减小的趋势,并在硐室围岩周围形成偏应力峰值区,且该偏应力峰值区以环状分布在各硐室围岩周围。为进一步了解各硐室围岩偏应力的分布规律,对三维空间图进行切片处理,得到如

图4所示的深部临时水仓硐室群围岩偏应力分布云图,其中图4中左边I(联络巷和下山)、II(泵窝和下山)、III(水仓和下山)为临时水仓硐室群横向剖面图,右边IV(联络巷和水仓)、V(联络巷、泵窝和水仓)、VI(联络巷)为临时水仓硐室群纵向剖面图。

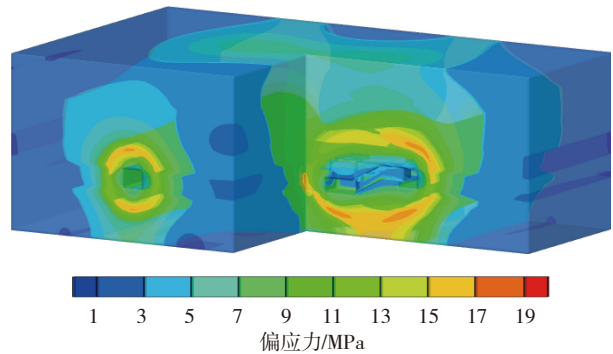


图3 深部临时水仓硐室群围岩偏应力空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of deviatoric stress in surrounding rock of deep temporary water chamber group

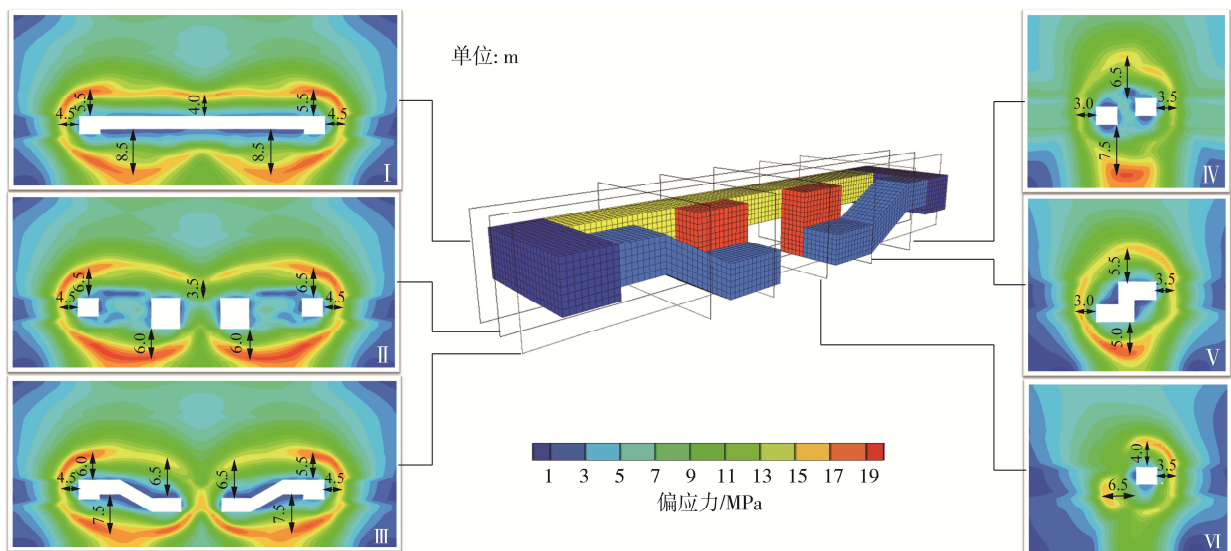


图4 深部临时水仓各硐室围岩偏应力分布云图

Fig. 4 Cloud chart of deviatoric stress distribution in surrounding rock of each chamber of deep temporary water chamber

由图4可知:① 硐室群或硐室围岩周围存在环状偏应力峰值区,其横向剖面的偏应力峰值区呈“眼镜型”,纵向剖面的偏应力呈“圆环状”;② 横向剖面中硐室群围岩偏应力峰值区内四角(即图中的左上、左下、右上及右下)的偏应力值最大,基本达19.0 MPa左右,其硐室群围岩左上和右上偏应力峰值区距硐室围岩表面最大距离约6.5 m,硐室群围岩左下和右下偏应力峰值区距硐室围岩表面最大距离约8.5 m;③ 横向剖面中硐室群两帮偏应力峰值和中部顶板偏应力峰值最小,且距离硐室围岩表面最近,其偏应力峰值基本在16.0 MPa左右,距离硐室围岩表面距离3.5 ~ 4.5 m;④ 纵向剖面中硐室群围岩偏应力峰值区呈“圆环状”分布,其最大偏应力位于硐室群围岩偏应力峰值区的左下区域(IV为下偏左、V为下偏左、VI为左偏下),最大偏应力达19.0 MPa,距离硐室表面距离5.0 ~ 7.5 m(IV为7.5 m、V为5.0 m、VI为6.5 m)。

2.3 深部临时水仓硐室群围岩塑性区分布规律

深部临时水仓硐室群围岩塑性区分布如图5所示。由图5可知:① 硐室群或硐室围岩塑性区完全包围各硐室,其横向剖面的塑性区形态呈“眼镜型”分布,纵向剖面的塑性区形态呈“似圆型”分布,这亦与图3的偏应力分布云图基本一致;② 横向剖面中硐室群围岩四角(即图中的左上、左下、右上及右下)的塑性区范围最大,其硐室群围岩左上和右上的塑性区最大深度达6.5 m,硐室群围岩左下和右下的塑性区最大深度达8.5 m;③ 横向剖面中硐室群两帮和中部顶板的塑性区范围最小,其塑性区最大深度4.5 m;④ 纵向剖面中硐室群围岩的塑性区最大深度位于硐室群围岩的左下区域(IV为下偏左、V为下偏左、VI为左偏下),其IV的最大深度为7.5 m、V的最大深度为5.0 m、VI的最大深度为6.5 m,这表明硐室群围岩塑性区的扩展与硐室群围岩峰值区内最大偏应力分布密切相关。

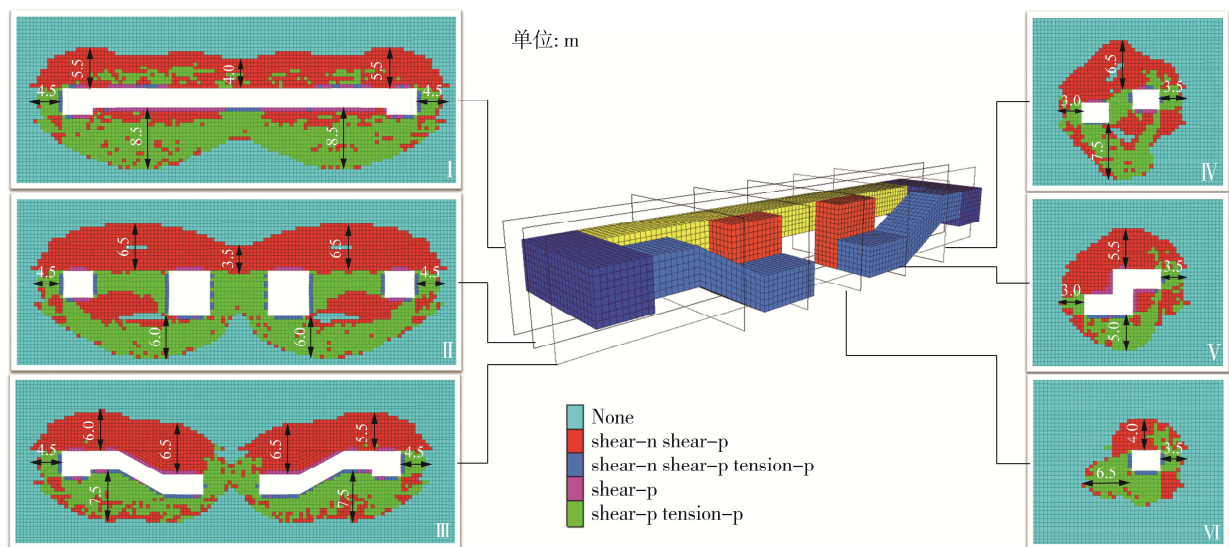


图5 深部临时水仓各硐室围岩塑性区分布

Fig. 5 Distribution diagram of plastic zone of surrounding rock of each chamber of deep temporary water chamber

结合上述分析可知,邢东矿二水平临时水仓硐室群开挖卸载后,在硐室群围岩中形成环状偏应力峰值区,且环状偏应力峰值区的范围及位置与硐室群围岩塑性区的范围及位置基本一致。同时,高偏应力集中区亦是硐室群围岩塑性区的扩展区域,即偏应力控制硐室群围岩的破坏,主导塑性变形的发生与发展。

因此,依据临时水仓硐室群围岩偏应力分布特征指导硐室群围岩支护将是控制硐室群围岩变形破坏的重要方法。

3 深部临时水仓硐室群围岩控制机理与技术

3.1 强力锚网索支护系统

研究与实践表明,锚网索联合支护已逐渐成为我国煤矿巷道(硐室)围岩控制的主要支护手段之一,其支护的实用性与高效性,使其经常被作为深部高应力、软弱破碎围岩以及大断面硐室群等多种复杂地质条件下的首选支护方式^[13]。锚杆索可通过强大的轴向抗力和横向抗力限制巷道围岩原生

裂隙和次生扩张裂隙的张裂变形和剪切变形,极大地提升了巷道围岩的完整性及承载性能,并在巷道围岩中构建一个锚杆索与裂隙围岩相互作用的高预应力大范围的强承载结构(预应力承载结构)^[14-16],进而改善巷道围岩应力状态,减弱高偏应力的进一步破坏。

众所周知,巷道围岩破坏程度由浅至深呈下降的趋势,即巷道围岩浅部破坏严重,整体性和承载性较差。因此,结合深部临时水仓硐室群围岩偏应力分布特征和预应力锚杆支护理论可知,先采用 $\phi 22\text{ mm} \times 3\ 000\text{ mm}$ 的强力螺纹钢锚杆在各硐室围岩浅部形成锚杆预应力承载结构,确保各硐室浅部破碎岩体的整体性及承载性,而后采用 $\phi 21.8\text{ mm} \times 8\ 500\text{ mm}$ 的高强高延伸率预应力钢绞线锚索在各硐室围岩中形成大范围锚杆-索预应力承载结构,保障硐室群围岩整体结构的稳定,其预应力承载结构如图6所示。

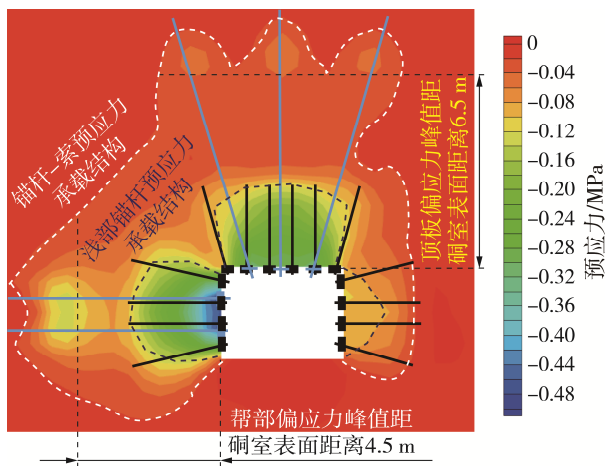


图6 预应力承载结构

Fig.6 Prestressed bearing structure

浅部锚杆预应力承载结构能使硐室浅部岩体呈现较高的受压状态,保持浅部围岩的完整性,增强其自身承载性能,有效抑制围岩的进一步拉剪破坏^[17-20]。锚杆-索预应力承载结构将硐室浅部破碎岩体和深部稳定岩体连接成一个大的整体,且该整体的范围大于各硐室围岩偏应力峰值区范围(塑性区范围),即预应力承载结构的顶板高度大于6.5 m,两帮长度大于4.5 m。锚杆-索预应力承载结构能进一步提高浅部破碎围岩的完整性,加强浅部锚杆预应力承载结构的稳定性,并调动深部稳定岩体共同承载,增强整个硐室围岩预应力承载结构的稳定性,降低高偏应力对硐室围岩更深层次的

破坏。

此外,在锚网索联合支护后及时对硐室群各硐室围岩进行喷浆处理,一方面可充填硐室围岩表面较大裂隙,增加裂隙间黏结力与摩擦力,防止裂隙扩展形成较大自由面,降低围岩自承能力;另一方面可封闭硐室围岩表面,限制空气和水与围岩接触,避免围岩风化、潮解的发生。

3.2 厚层U型混凝土支护系统

厚层U型混凝土支护系统是指在强力锚网索支护后,依临时水仓形状在硐室底部和两帮的围岩表面浇筑一定厚度的U型混凝土层,使得混凝土层与围岩、锚杆索构件及外漏部分紧密连接,并在临时水仓表面的混凝土层内侧保持形状光滑。该厚层U型混凝土层具有以下特点:①从支护本质上是将硐室浅表面一定厚度软弱破碎围岩置换成高压抗混凝土,使硐室围岩呈三向受压状态,改善围岩固有属性,提升硐室围岩结构承载性能^[3];②厚层U型混凝土与硐室围岩密实接触,可与强力锚网索的预应力承载结构形成具有强承载性能和高可靠性的大范围承载结构,增强硐室围岩整体承载性能,减弱硐室围岩不同方向上偏应力峰值的影响,避免因局部破坏产生自由面进而诱发更大范围的破坏;③厚层U型混凝土支护可隔离长期水流对硐室围岩的冲刷作用,避免因临时水仓渗水导致围岩强度弱化,进而降低硐室围岩锚固体的支护效能。

3.3 深部临时水仓硐室群围岩支护参数

根据临时水仓硐室群各硐室的作用,其联络巷采用强力锚网索支护,水仓和泵窝采用强力锚网索和厚层U型混凝土联合支护。

联络巷的支护参数:顶板和左帮采用 $\phi 22\text{ mm} \times 3\ 000\text{ mm}$ 的螺纹钢超强锚杆,右帮(靠近水仓侧)采用 $\phi 22\text{ mm} \times 2\ 400\text{ mm}$ 的螺纹钢超强锚杆,间排距 $700\text{ mm} \times 800\text{ mm}$,顶板每孔使用Z2360树脂锚固剂2卷,两帮每孔使用Z2360和Z2330树脂锚固剂各1卷,并配合弯形托盘、 $\phi 14\text{ mm}$ 钢筋梁及金属网(其顶板采用 $\phi 5\text{ mm}-70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 金属网片,网规格 $2\ 300\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$,两帮采用 $3\ 500\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$ 金属菱形网)。顶板采用 $\phi 22\text{ mm} \times 8\ 500\text{ mm}$ 的19股钢绞线锚索加强支护,每孔使用Z2360树脂锚固剂4卷,按五花眼布置;左帮采用 $\phi 18\text{ mm} \times 6\ 500\text{ mm}$ 的19股钢绞线锚索加强支护,在距顶板 $1\ 000\text{ mm}$ 和 $2\ 000\text{ mm}$ 处分别打设2根锚索,排距 $1\ 600\text{ mm}$,配合

钢托盘及木垫板,并用 $\phi 14$ mm的梯子梁连锁。基本支护完成后,在硐室围岩表面喷射厚100 mm的C20混凝土,其初喷与复喷厚度均为50 mm,初喷紧跟迎头,复喷滞后20 m,联络巷围岩支护如图7所示,对应的支护断面为图5纵向剖面IV(联络巷和水仓)中的联络巷剖面。

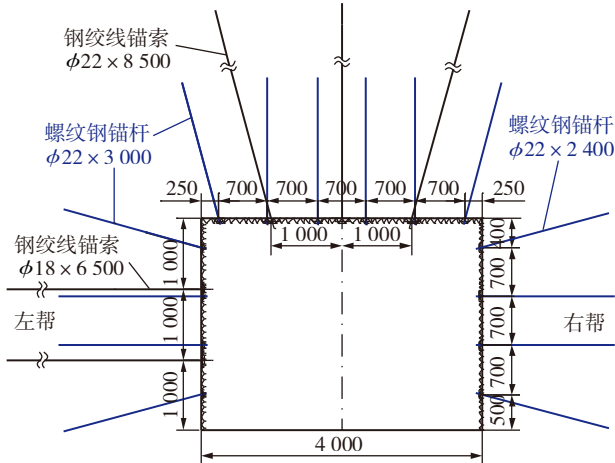


图7 联络巷围岩支护

Fig. 7 Surrounding rock support drawing of connecting roadway

水仓和泵窝的支护参数:水仓和泵窝的基础锚

网索支护与联络巷的锚网索支护一致,当锚网索支护完毕后,在水仓及泵窝的帮部及底部浇筑厚300 mm的U型混凝土进行加固,其水仓和泵窝围岩支护如图8,9所示,图8对应的支护断面为图5纵向剖面IV(联络巷和水仓)中的水仓剖面,图9对应的支护断面为图5横向剖面II(泵窝和下山)中的泵窝剖面。

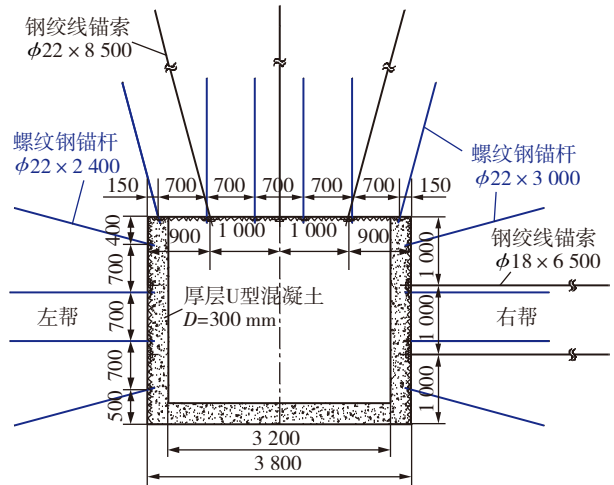


图8 水仓围岩支护

Fig. 8 Support drawing of surrounding rock of water tank

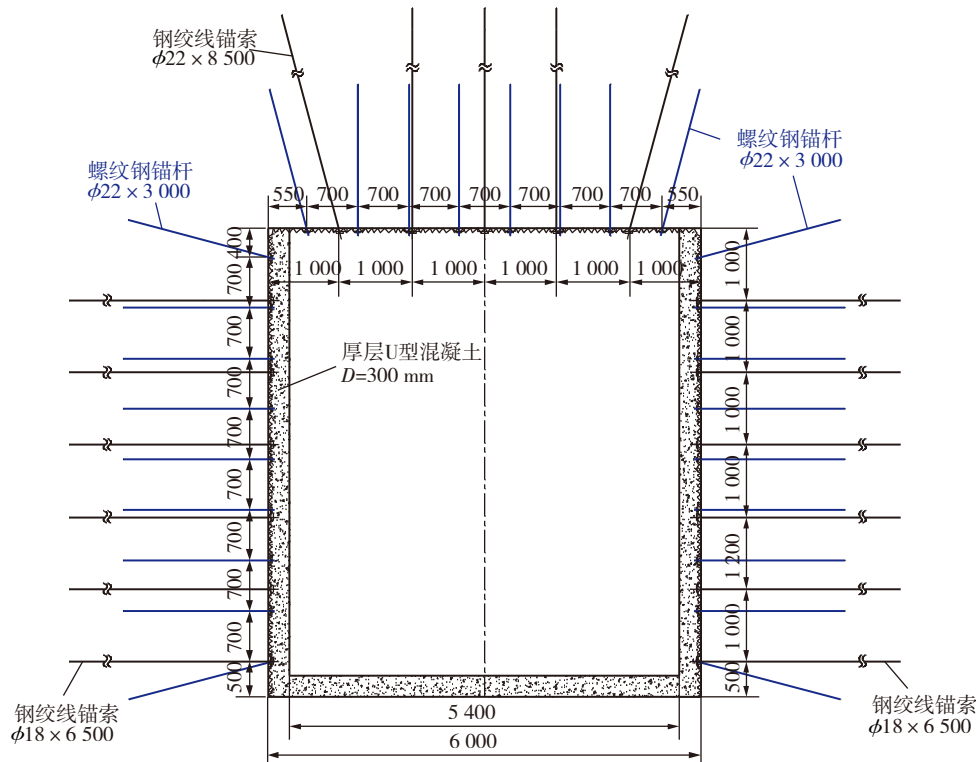


图9 泵窝围岩支护

Fig. 9 Support drawing of surrounding rock of pump house

3.4 深部临时水仓硐室群围岩支护效果分析

矿压监测结果表明,在临时水仓硐室群生产服

务期间,联络巷两帮最大移近量约150 mm,顶底板移近量约230 mm;水仓(距离下山约3.0 m)底板混凝

土出现开裂底臃现象,其底板中部裂缝长约630 mm,臃起量约530 mm,两帮约1 150 mm处出现竖向裂缝,顶板下沉量约460 mm;泵窝两帮1 420 mm处混凝土开裂,顶板下沉量约530 mm。现场实践表明,采用强力锚网索和厚层U型混凝土联合支护,临时水仓硐室群围岩控制效果良好,满足了其生产服务期间的使用要求。

4 结 论

(1) 深部临时水仓硐室群各硐室围岩偏应力峰值区和塑性区的位置、范围及形态分布基本一致,其横向剖面分布形态呈“眼镜型”,纵向剖面分布形态呈“圆环状”。

(2) 深部临时水仓硐室群开挖卸载后,各硐室围岩偏应力峰值区内的高偏应力集中区与各硐室围岩塑性区的扩展区域相同,即高偏应力主导塑性变形的发生与发展,可依据硐室群围岩偏应力分布特征指导硐室群围岩支护。

(3) 数值模拟结果表明,采用 $\phi 21.8 \text{ mm} \times 8\,500 \text{ mm}$ 的高强高延伸率预应力钢绞线锚索和 $\phi 22 \text{ mm} \times 3\,000 \text{ mm}$ 的强力螺纹钢锚杆联合支护,在硐室围岩中形成的预应力承载结构范围大于各硐室围岩偏应力峰值区范围(塑性区范围)。

(4) 现场实践表明,采用强力锚网索和厚层U型混凝土联合支护,能够有效控制临时水仓硐室群各硐室围岩的变形破坏,满足生产服务期间的使用要求。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,彭苏萍,何满潮. 深部开采基础理论与工程实践[M]. 北京:科学出版社,2005:3-32.
- [2] 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):2851-2854.
HE Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(16):2851-2854.
- [3] 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.
- [4] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的有效途径[J]. 中国矿业大学学报,2017,46(3):577-583.
HOU Chaojiong. Effective approach for surrounding rock control in deep roadway[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017,46(3):577-583.
- [5] 康红普,林建,杨景贺,等. 松软破碎硐室群围岩应力分布及综合加固技术[J]. 岩土工程学报,2011,33(5):808-814.
KANG Hongpu, LIN Jian, YANG Jinghe, et al. Stress distribution and synthetic reinforcing technology for chamber group with soft and fractured surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011,33(5):808-814.
- [6] 杨仁树,薛俊华,郭东明,等. 复杂岩层大断面硐室群围岩破坏机理及控制[J]. 煤炭学报,2015,40(10):2234-2242.
YANG Renshu, XUE Junhua, GUO Dongming, et al. Failure mechanism of surrounding rock of large section chambers in complex rock formations and its control[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(10):2234-2242.
- [7] 谢生荣,岳帅帅,陈冬冬,等. 深部充填开采采巷围岩偏应力演化规律与控制[J]. 煤炭学报,2018,43(7):1837-1846.
XIE Shengrong, YUE Shuaishuai, CHEN Dongdong, et al. Deviatoric stress evolution laws and control of surrounding rock at gob-side entry retaining in deep backfilling mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(7):1837-1846.
- [8] 王卫军,郭罡业,朱永建,等. 高应力软岩巷道围岩塑性区恶性扩展过程及其控制[J]. 煤炭学报,2015,40(12):2747-2754.
WANG Weijun, GUO Gangye, ZHU Yongjian, et al. Malignant development process of plastic zone and control technology of high stress and soft rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(12):2747-2754.
- [9] 马念杰,李季,赵志强. 圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
MA Nianjie, LI Ji, ZHAO Zhiqiang. Distribution of the deviatoric stress field and plastic zone in circular roadway surrounding rock[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015,44(2):206-213.
- [10] 潘岳,李爱武,戚云松. 圆巷开挖围岩偏应力应变能生成的分析解与图解[J]. 岩土工程学报,2007,29(12):1780-1786.
PAN Yue, LI Aiwu, QI Yunsong. Analysis and illustration on deviatoric stress strain energy generation of surrounding rock in circular tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007,29(12):1780-1786.
- [11] 邓国华,邵生俊,陈昌禄,等. 一个可考虑球应力和剪应力共同作用的结构性参数[J]. 岩土力学,2012,33(8):2310-2314.
DENG Guohua, SHAO Shengjun, CHEN Changlu, et al. A structural parameter reflecting coupling action between shear stress and spherical stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(8):2310-2314.
- [12] 温日琨,王常晶,陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软粘土变形影响[J]. 岩土力学,2009,30(S2):119-122.
WEN Rikun, WANG Changjing, CHEN Yunmin. Effect of traffic loading induced static deviator stress on deformation of saturated soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(S2):119-122.
- [13] 康红普,徐刚,王彪谋,等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展40 a及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2019,1(1):013501.

- KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1): 013501.
- [14] 谢生荣, 谢国强, 何尚森, 等. 深部软岩巷道锚喷注强化承压拱支护机理及其应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 404–409.
XIE Shengrong, XIE Guoqiang, HE Shangsen, et al. Anchor-spray-injection strengthened bearing arch supporting mechanism of deep soft rock roadway and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 404–409.
- [15] 康红普. 深部煤巷锚杆支护技术的研究与实践[J]. 煤矿开采, 2008, 13(1): 1–5.
KANG Hongpu. Research and practice of bolting support technology in deep coal roadways[J]. Coal Mining Technology, 2008, 13(1): 1–5.
- [16] 谢生荣, 鄯明明, 陈冬冬, 等. 单轨吊巷道顶板深梁支护结构的构建及应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1420–1428.
XIE Shengrong, GAO Mingming, CHEN Dongdong, et al. Deep beam support structure construction of roadway roof with monorail crane and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1420–1428.
- [17] 张镇, 康红普, 王金华. 煤巷锚杆–锚索支护的预应力协调作用分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 881–886.
ZHANG Zhen, KANG Hongpu, WANG Jinhua. Pretension stress coordination function analysis of bolt-cable anchor support in coal roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 881–886.
- [18] 邓宗伟, 冷伍明, 邹金峰, 等. 预应力锚索载荷传递与锚固效应计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(2): 501–507.
DENG Zongwei, LENG Wuming, ZOU Jinfeng, et al. Calculation of prestress cable transference of load and effect of anchor[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2011, 42(2): 501–507.
- [19] 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. Numerical simulation on load-transfer mechanisms and stress distribution characteristics of cable bolts[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 1–6.
- [20] 丁秀丽, 盛谦, 韩军, 等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980–988.
DING Xiuli, SHENG Qian, HAN Jun, et al. Numerical simulation testing study on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 980–988.