

# 大深度大直径三山岛副井支护 研究与创新探讨

Discussion and Research on Support of Auxiliary Shaft with Large  
Diameter and Depth in Sanshandao Mine

孙 扬<sup>1,2</sup>, 李金哲<sup>1,2</sup>, 李文光<sup>3</sup>, 郭 雷<sup>1,2</sup>, 安建英<sup>1,2</sup>, 王建中<sup>1,2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038;  
3. 山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿, 山东 烟台 261417)

**摘要:** 竖井作为矿山深部采矿的咽喉工程, 其建设工期制约着整个矿山建设期, 其服役期安全稳定是矿山正常安全生产的保障。本文以三山岛金矿副井工程为背景, 研究探讨直径 10.5 m、埋深 1 915 m 的大直径深埋竖井支护理念、支护方案及建设创新。通过深入研究国内外支护理论, 突破传统设计理念, 采用新型工艺卸压与充分利用围岩作用的设计理念, 提出了大埋深竖井分区分序支护方案, 探讨了深井建设的创新方向。文章研究成果能够为深地开发利用的瓶颈工程支护设计提供参考应用, 为储备 2 500 m 以浅的深井建设技术及相关深井工程提供重要借鉴。

**关键词:** 深竖井; 支护理念; 深井建设创新

**中图分类号:** TD352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0025-07

**Abstract:** As the throat project of deep mining in the mine, the construction period of the shaft controls the whole mine construction period, and the safety and stability of its service period restricts the normal safety production of the mine. Based on the auxiliary shaft project of Sanshandao gold mine, this paper studies and discusses the support concept, support scheme and construction innovation of large-diameter deep-buried shaft with diameter of 10.5 m and buried depth of 1 915 m. Through in-depth study of domestic and foreign support theory, breaking through the traditional design concept, adopting the design concept of new process pressure relief and making full use of the role of surrounding rock, this paper studies the support scheme of large buried deep shaft, and discusses the innovation direction of deep well construction. The research results of this paper can provide reference application for the support design of bottleneck engineering in deep development and utilization, and provide important reference for the construction technology of deep well and related deep well engineering below 2 500 m.

**Key words:** deep shaft; supporting theory; deep shaft executing innovation

## 1 前言

金属矿产作为工业大宗原料, 近年来随着中国经济体量的增加, 对金属矿产需求也逐年增加; 同时, 金属矿产资源储备为国家经济安全发展提供保障, 对应国际市场变化和维护综合国力保驾护航起到“压舱石”作用。随着浅部资源逐渐枯竭, 国内矿山正在逐渐向 1 000 m 至 1 200 m 的开采深度迈进<sup>[1]</sup>, 少数的金属矿井正在建设超过 1 400 m 的深井开拓系统。国内诸多在产金属矿山转入深部开采, 如金川镍矿、冬瓜

山铜矿、铜绿山铜矿、会泽铅锌矿、三山岛金矿。同时, 诸多新建或拟建矿山直接进入深部开采, 如思山岭铁矿、海域金矿、水旺庄金矿、岔路口钼矿、纱岭金矿、高地锰矿等。据不完全统计, 国外金属矿山深度超过千米的有 110 多座, 主要分布在南非、加拿大、美国、俄罗斯等国家<sup>[2-4]</sup>。竖井是深井开采通达矿体的物流通道, 也是地下矿山建设的咽喉工程。因此, 深井建设技术是保证深井矿山建设的关键技术。

近年国内建成了多条深竖井, 如思山岭铁矿主井(1 505 m)、会泽铅锌矿 3# 竖井(1 526 m)、海域金

[作者简介] 孙扬(1985—), 男, 陕西榆林人, 正高级工程师, 主要从事金属矿山井巷工程及岩石力学相关设计与研究工作。

[基金项目] “十四五”国家重点研发计划项目资助(编号:2016YFC2907205)。

[引用格式] 孙扬, 李金哲, 安建英, 等. 大深度大直径三山岛副井支护研究与创新探讨[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(1): 25-31.

矿措施井(1 530 m)和新城金矿主井(1 527 m)。这些深竖井建设积累了诸多技术经验,当前国内的竖井建设技术能够满足 1 500 m 左右的深竖井工程。然而,随着深度继续增加,钢丝绳自重的不断增加导致提升效率下降、提升机载重增大、提升稳车能力增加;同时,导致通风降温困难、排水扬程增大,凿井、安装精度保证困难,以及安全风险增加等诸多问题<sup>[5-7]</sup>。同时,受深部地层“高应力、高水压、高岩温、高温水”带来的不利影响加剧,对于更大深度的竖井建设关键技术仍需继续研究。

国内三山岛金矿在建副井深度近 2 000 m,直径达 10.5 m;正在建设的云南会泽 6#盲竖井其井口埋深达 1 300 m,井筒深度 980 m,最终井底埋深达到 2 280 m;计划开采的水旺庄金矿,其竖井深度也超过了 1 800 m。“十三五”开局之年<sup>[8]</sup>,国家面向 2030 年“深度”布局,提出了“深空、深海、深地、深蓝”系列重大专项;2020 年 10 月,国家“十四五”发展规划再次明确深地深海领域,继续实施国家重大科技支持项目。2023 年国务院、国资委再次布局未来产业,深部资源开发与深部地下空间利用成为重要方向。竖井是连接地表和地下空间的通道,开展深竖井建设相关研究是保证其服役期安全稳定的重要关键技术,对保障深地资源开发与地下空间利用具有重要意义。

## 2 竖井支护理念

地下工程支护结构理论的发展至今已有百余年的历史,支护结构理论的一个核心问题是如何确定作用于地下结构上的荷载,以往对于竖井支护的核心是如何合理确定井壁侧压力问题。近年来随着深竖井工程的增多,深部“三高”问题凸显,对于深井支护的认识和设计理念也发生了明显变化。

### 2.1 传统支护理念

地下工程所处的地质环境条件与地表工程是全然不同的,但长期以来受地面工程理论和方法解决地下工程中所遇到问题的思想影响。长期以来,竖井支护结构形式以构筑混凝土井壁为主,其支护计算的核心仍然是荷载结构法。这一传统设计理念导致的结果是,随着井筒深度增加,竖井井壁厚度越来越大。

根据圆形井壁弹性应力分析结果,其内边缘的切向应力最大。因此,在井壁研究中,将内缘切向应力作为井壁安全性的控制因素。某深竖井直径 6.5 m,计算不同厚度下 1 000 m 深处的井壁内缘切

向应力解。假设井壁受的围岩压力最大和最小值分别为  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$ ,井壁外半径和内半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ ,则井壁内缘最大切向应力值计算如式(1)所示。

$$\sigma_{\max} = \frac{2 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2}{\left( \frac{R_1}{R_2} \right)^2 - 1} (p_1 - 2p_2) < [\sigma] \quad (1)$$

式中,  $[\sigma]$  为井壁混凝土衬砌的单轴抗压设计强度值,令  $p_1 = (p_{\max} + p_{\min})/2$ ,  $p_2 = (p_{\max} - p_{\min})/2$ 。

分别假定  $p_{\max} = 1.5 \text{ MPa}$  和  $p_{\min} = 1.0 \text{ MPa}$ ,利用式(1)计算的曲线如图 1 所示。

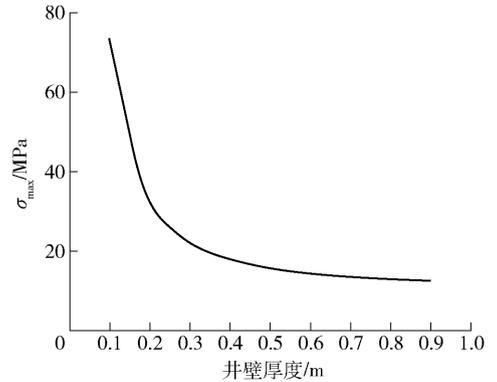


图 1 井壁切向应力最大值与井壁厚度关系曲线

井壁切向应力最大值与井壁厚度关系曲线表明:在工程条件与对应的地应力条件耦合作用下,井壁厚度的增加使得内缘应力成负指数关系衰减;当井壁厚度达到一定值后,其切向应力减小缓慢。因此,通过增加井壁厚度来获得井壁安全储备是不合理的。其随着井筒深度增加,围岩的强度越来越高,很多竖井其围岩的岩石单轴抗压强度达到 100 MPa 以上。在金属矿山,即使采用 C60 的混凝土,其深部围岩强度普遍高于混凝土。对于高应力区域,工程实践表明仅采用高强钢筋混凝土,在深井工程中仍然不能保证高应力区域的井筒稳定。

### 2.2 深竖井支护设计理念

国外南非、加拿大等矿业发达国家的深井矿山竖井,其井壁厚度多 300 ~ 500 mm。南非的 SouthDeep 金矿竖井,井筒净直径 9.0 m,深度达 2 990.5 m,支护厚度仅为 300 mm<sup>[9]</sup>。近年来中国深竖井的工程越来越多,遇到深井高应力的问题越来越突出,如岩爆和高应力大变形。工程实践中,突破了传统竖井支护设计理念,形成了围岩井壁共同承载的新的井壁支护理念,井筒围岩即是荷载也是承载结构<sup>[10-11]</sup>。针对深竖井特征,新的竖井支护设计理念是基于掘进释能、

充分发挥围岩作用、竖井分区型支护、实施复合分序支护、弱化混凝土井壁作用。

深部高应力倾向型地层中,开挖卸荷扰动易诱发局部岩爆;相应的支护结构要适配融合建井工艺,基于掘进释能释放部分围岩压力。利用掘进凿岩爆破、一次支护、分次出渣、滞后出渣、二次支护实现分序分次的支护,保护工作人员在一次支护下安全工

作;利用主动支护充分强化利用井筒深部围岩强度。深井开挖扰动原岩应力场,掘砌凿岩爆破、出渣工艺充分卸压释放强调整期应力;以主动柔性支护为主调动深部围岩作用,发挥围岩承载能力,使得围岩与支护结构适度协同变形。协调掘砌施工工艺,实施分次联合支护,使围岩应力分布逐渐调整稳定。支护理念工艺如图2所示。

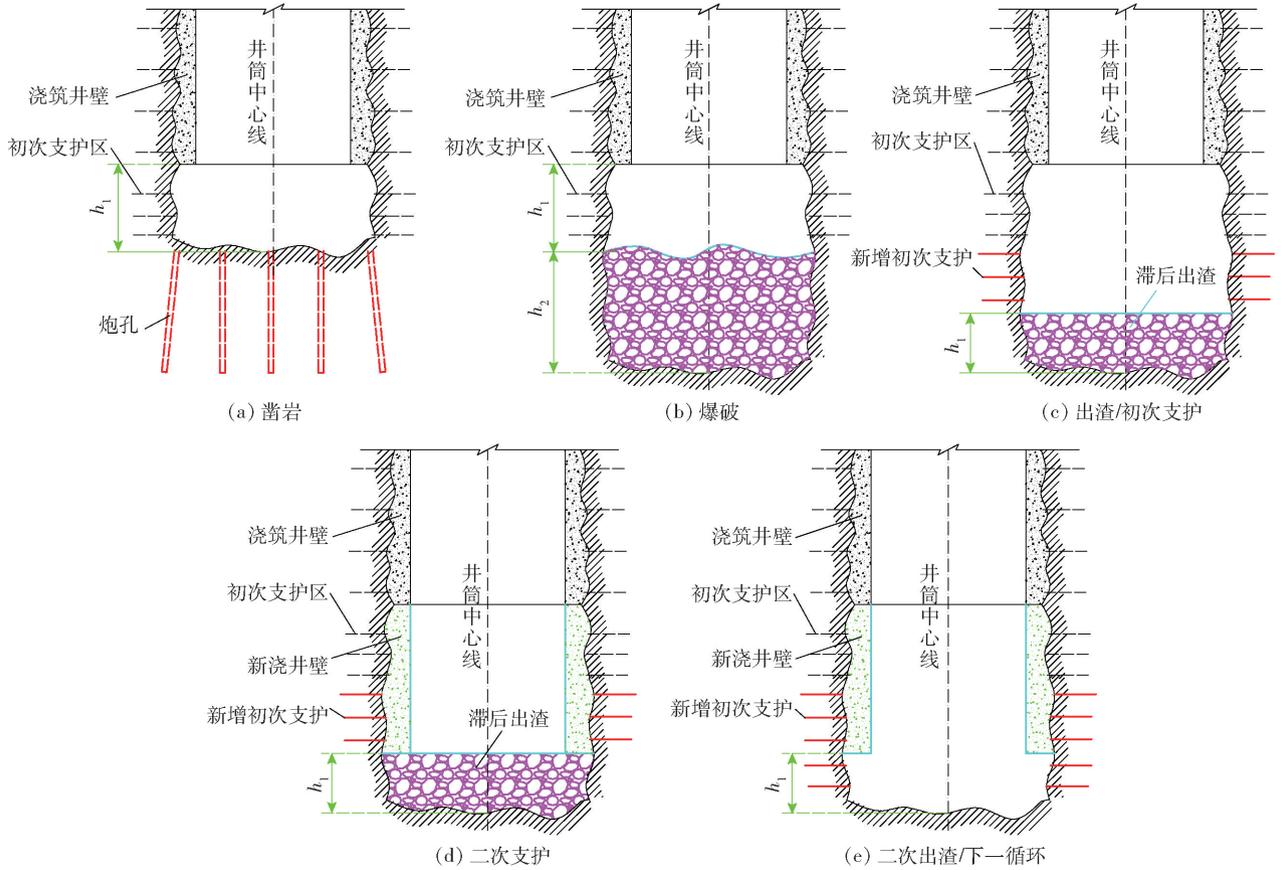


图2 基于掘进工艺势能的支护理念

深竖井工程深度大、穿越的地层多、应力场随深度而发生转换,传统一壁到底的支护结构形式难以满足深井设计理念需求。推行深井分区分段支护设计理念,按照第四系地层、浅部基岩层、深部基岩层、高应力倾向性基岩层划分开展分区阶段设计。本理念充分结合中国凿井建井工艺与国外凿井工艺,井筒浅部采用传统单层井壁设计,满足中国传统工艺快速建井。深部地层及高应力倾向性基岩层,汲取国外深竖井成功经验,利用分序分次的多种支护结构,充分发挥围岩作用。

### 3 三山岛副井工程概况

三山岛金矿<sup>[12]</sup>为国内大型黄金地下矿山,位于山东省莱州,地处渤海南岸的滨海平原。三山岛副

井是矿区开发深部资源的主要咽喉通道,担负深部人员及材料下方及通风功能。井筒设计净直径10.5 m,设计深度1 915 m,井筒断面如图3所示。

#### 3.1 工程地质

三山岛金矿区位于胶东半岛,著名的招掖金矿成矿带的西端。区内构造主要为断裂构造,分为控矿断裂及矿后断裂,前者为新立-三山岛断裂带,后者为北西向断裂。新立-三山岛断裂带(F1)是矿区控矿断裂构造,位于三山岛-仓上断裂带的北东段,为三山岛-仓上断裂带一部分,由主干断裂及上下盘伴生的羽支断裂和下盘派生平行断裂组成。断裂带长约5 100 m,按走向的不同以11线为界分为新立段和三山岛段。断裂带总体走向北东,以11线为

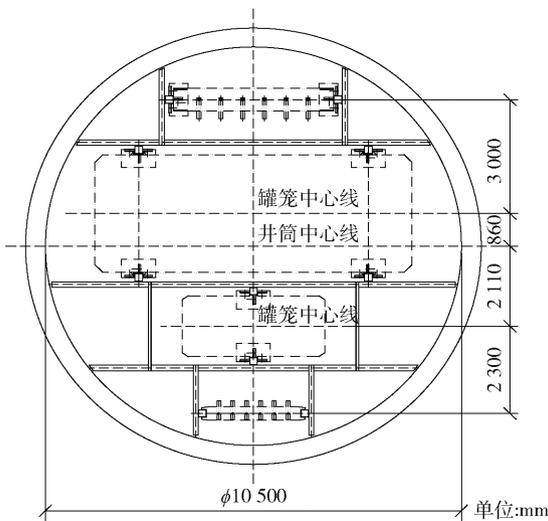


图3 副井断面布置图

界,以东平均走向 $38^\circ$ ,以西平均走向 $58^\circ$ ,主断裂浅部倾向北西,倾角在 $70^\circ \sim 80^\circ$ ,深部产状趋于正常,倾向南东。断裂带总体倾向南东,倾角 $33^\circ \sim 67^\circ$ ,多在 $40^\circ \sim 50^\circ$ ,平均倾角 $46^\circ$ 。由北东向南西倾角有逐渐变陡趋势。沿走向、倾向特别是走向呈舒缓波状延展,走向上的变化明显大于倾向。

北西向断裂(F3)对矿床而言是矿后断裂,矿区较大规模的仅有F3,是一区域性构造,切割含矿蚀变带,并向北西延伸入海。推测走向 $300^\circ \sim 310^\circ$ ,倾向北东或南西,倾角 $80^\circ \sim 90^\circ$ ,破碎带由角砾岩、碎裂岩组成,其内见煌斑岩脉充填并已被破碎。断裂具多期活动特点,右行平移运动,将含矿蚀变带错移20 m左右。

### 3.2 区域水文地质

三山岛矿区已经开采多年,目前矿坑各中段总涌水量较大,坑涌水主要来自下盘含水带中的裂隙发育带。该带位于主断裂的下盘在主断面及与其走向北西的F3断裂之间,走向北北西,倾角较陡,伸入海中。裂隙带的走向与区域应力方向相一致,张性特点突出,导水性良好,其涌水量占矿坑总涌水量的82%。矿后断裂F3发育宽度15~36 m,具有多期活动的特征。由于F3规模大,后期活动所形成的破碎带未胶结好,其贮存有较为丰富的地下水,且具有较强的导水能力。地下水对断层泥和破碎带的长期浸泡又使其力学性质变差,浅部-600 m中段每个中段穿过F3断层时几乎都发生了突大水、泥石流、塌方等事故,至-645 m中段F3断层破碎带缩小至1 m,有尖灭趋势。

此外,因F3的切割错动,使F1的隔水性能在局部遭到破坏,所以成为沟通南东区域地下水的导水构造,虽西北端入海,由于封闭条件较好,并未大量导入海水。F3断裂带内的水位随井巷向深部开拓的过程中不断突水而下降。地下水的水质较复杂,揭露初期矿化度高达 $50 \sim 60 \text{ g/L}$ ,经过数年的排泄后,矿化度大多逐渐接近于海水,个别流量较小的水点矿化度可低于海水。水温随深度增大而增大。这些导水裂隙带、晚期断裂构造又与浅层第四系地下水、海水发生明显的水力联系,矿坑水58%是海水。因此,造成三山岛金矿涌水量大的主要原因是,控矿主断裂呈北北东向,与区域应力的交角较小,并造成下盘次级裂隙的走向与区域应力相近,发育程度增强,张性特点突出,导水性良好,形成与浅层第四系地下水及海水间导水通道,将海水大量引入矿坑。成矿期之后的晚期断裂构造也是造成矿坑涌水量大的重要原因。

### 3.3 矿岩物理力学性质

矿床岩性及工程地质条件划分为软弱松散岩组、软弱风化岩组、软弱~半坚硬构造蚀变岩组和坚硬块状岩组。矿床上盘绢英岩化花岗质碎裂岩(SyJ),矿体赋存于黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩(SyJH),矿体下盘为花岗岩( $\eta\text{r}$ ),竖井不同深度岩石物理力学参数见表1。

## 4 三山岛副井支护研究

西岭矿区资源是矿山深部接替资源,具有埋藏深、开采难度大、建设周期长的特点<sup>[13]</sup>,开采主要范围为-960 m以下的矿体;矿体倾向构造与副井的关系如图4所示,矿体上部距三山岛副井距离600 m以上。结合矿山实际中段开采高度,开展回采矿体岩移计算验证,模型显示三山岛副井附近的应力场基本没有变化;模型计算其水平位移场如图5显示,剖面井筒附件上矿体上盘的理论计算水平位移仅约为2.5 mm。副井选址合理,矿体开采对竖井无影响。

### 4.1 高应力地层支护结构分析

深部地层其地应力高,钻孔揭露岩芯饼化现象明显,具体如图6所示。在竖井勘察施工钻孔岩芯编录过程中发现,标高位于1 051.66~1 056.40 m、1 088.96~1 089.46 m、1 094.06~1 097.06 m、1 467.76~1 472.36 m、1 630.56~1 632.36 m、1 761.36~1 765.76 m、1 765.76~1 766.96 m等区段岩芯出现不同程度饼化现象。

地应力测量试验结果深度1 500 m时,最大主

表 1 竖井工程勘察孔岩石物理力学参数统计表

序号	岩性	采样深度/m	抗拉强度/MPa	饱和单轴抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比
1	风化二长花岗岩	5 ~ 17	2.71	34.43	4.14	43.60	24.87	0.24
2	二长花岗岩	38 ~ 700	4.74	99.26	12.05	54.62	37.41	0.12
3	钾化花岗岩	935 ~ 1 000	5.35	28.99	4.39	53.11	5.50	0.05
4	二长花岗岩	1 000 ~ 1 050	5.46	73.00	7.82	44.21	4.76	0.21
5	绢英岩化花岗岩	1 050 ~ 1 064	6.15	28.27	7.89	55.86	3.96	0.24
6	二长花岗岩	1 140 ~ 1 400	10.85	114.76	16.07	103.90	25.82	0.31
7	绢英岩化花岗岩	1 650 ~ 1 670	3.25	35.09	6.00	36.43	5.17	0.27
8	绢英岩化花岗质碎裂岩	1 722 ~ 1 756	5.34	70.54	7.69	53.70	36.98	0.11
9	二长花岗岩	1 800 ~ 1 980	7.91	121.50	11.84	53.90	49.97	0.08
10	煌斑岩	1 974 ~ 1 983	9.67	140.00	14.70	58.30	91.03	0.07
11	二长花岗岩	1 990 ~ 2 000	6.48	104.93	9.54	53.60	56.73	0.12
12	云英岩	2 000 ~ 2 015	2.55	25.10	2.70	45.20	9.42	0.34

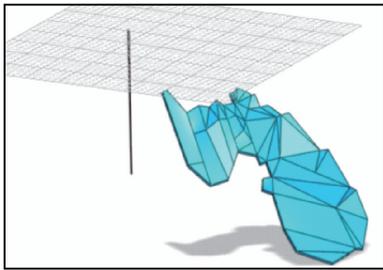


图 4 三山岛副井与西岭矿区矿体的关系图

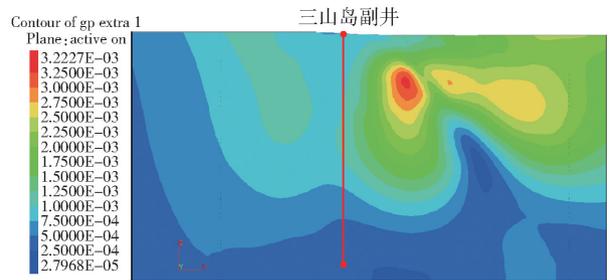


图 5 开采对三山岛副井影响的水平位移场



(a) 第一组



(b) 第二组

图 6 竖井深部典型饼化岩芯岩样

应力和最大主应力分别为 52 MPa 和 35 MPa; 深度 1 900 m 时, 最大主应力达到 70 MPa, 最小主应力 47 MPa。依据初始地应力对地应力强度进行分级结果表明, 1 000 m 以深均为极高应力倾向型地层, 开挖过程中洞壁岩体发生剥离或岩爆风险高, 地应力分级见表 2。

针对深部地层高强度应力比建立数值分析模型, 取深部 1 200 m 以下地层建立模型, 采用联合支护结构。模型如图 7 所示, 模型单元共计 204 676 个。

表 2 地应力试验数据分级表

序号	深度/m	饱和单轴抗压强度 UCS <sub>饱和</sub>	最大应力值 $\sigma$	强度应力比	地应力强度分级
1	1 000	73	40	1.8	<4, 极高应力
2	1 500	46.7	52	0.9	<4, 极高应力
3	1 900	144	70	3.6	<4, 极高应力

图 8 与图 9 模型分析结果表明: 深部高应力区域掘进卸压调整后, 实施支护结构加固后其位移

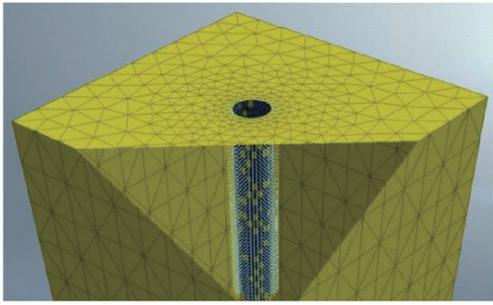


图7 数值分析模型

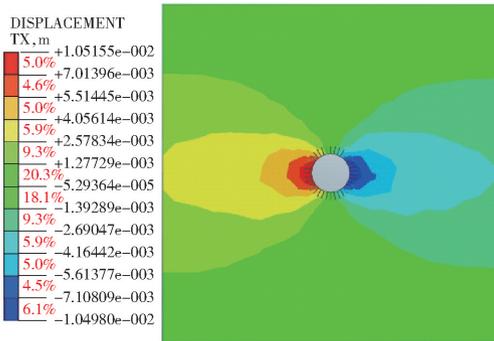


图8 1900 m 深处主应力方向位移

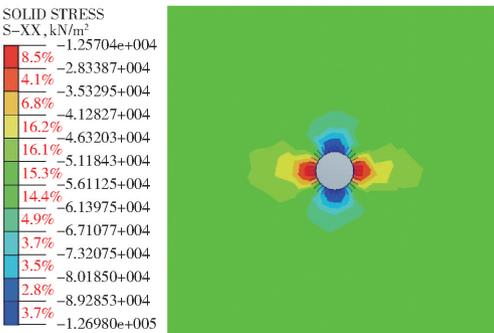


图9 1900 m 深处主应力方向应力云图

1.5 cm,井筒周边 30 m 范围位移影响范围明显;开挖后,应力积聚现象明显,但其主要集中于 20 m 以内范围。分析表明井筒空间影响围岩范围有限,高应力倾向岩爆能量聚集有限,其岩爆发生以应力控制型岩爆为主。采用主动锚固支护结构能够调动井壁围岩平衡协调应力分布,形成围岩承载体抵御围岩调整变形。

### 4.2 井壁支护结构

三山岛副井是亚洲第一单段竖井,具有深度大、断面直径大、深部地应力高、区域构造影响大等特征。依托深竖井特征,按照基于掘进释能、充分发挥围岩作用、竖井分区分区型支护、实施复合分序支护、弱化混凝土井壁作用的全新深竖井设计理念开展设计。

竖井由地表至井底划分为井颈段、浅部基岩段、深部基岩段、高应力倾向型地层、不良岩层段等实行分区设计。弱化混凝土井壁的支撑作用,通过增加主动锚网(索)支护,充分调动发挥深部围岩承载能力;适配掘进势能滞后出渣工艺,实时分序分次主动锚网支护避免空帮,保护人员作用安全;高应力倾向型地层利用窗口时间快速调整释放围岩应力后,实时多次刚柔并济支护,最终实现应力平衡。各分区的井壁支护方案见表 3,实际施工中各方案实施深度及具体支护参数坚持动态调整。

针对各分区中出现的不良岩层段,如软弱破碎带等需针对实际情况,局部段实施混凝土+锚网支护、锚网+钢纤维混凝土、锚网+锚索+钢筋混凝土井壁、锚注浆加固、型钢骨架锚网喷等各支护方式,组合应对处理局部不良岩层段。

表3 各分区分序正常支护结构表

分区	井颈段	浅部基岩段	深部基岩段	高应力倾向型地层
建议深度划分/m	0~20	20~1 200	1 200~1 500	1 500~2 000
支护方案	双层钢筋混凝土井壁,厚度 900 mm	素混凝土井壁,厚度 500 mm	初次锚网+素混凝土,厚度 500 mm	分次锚网(单次或多次)喷+钢纤维混凝土,厚度 500 mm

## 5 深井建设创新

伴随着国内深井资源开发、浅部转深部矿井增多、深地空间方法开发利用,各行业深竖井工程逐年增多,1 200 m 以内深地竖井工程已屡见不鲜。金属矿山行业竖井埋深突破 2 200 m,国防行业竖井深度超过了 1 800 m,煤炭行业竖井深度超过 1 400 m,水电与交通行业竖井深度超过 700 m,深地储能行业

拟应用 1 500 m 以深竖井工程开发储能。深井工程已被矿山以外行业深地空间广泛应用,深井建设须同步不断创新满足深部环境与多功能工程性。宜开展的建设创新方面探讨如下。

(1)深竖井建设投资大、周期长、物流能力限制,深竖井宜配置两套及以上提升系统,除满足深地安全与基本提升需求外,这有利于差异化满足多功能经济运行与便捷性。满足规程最大安全保证条件

下,改变传统梯子间设置观念。

(2) 水害是工程各行业建设中遇到的主要问题,深地防治水也是各行业共识的技术难题。深井建设中宜在井筒空间结构、疏、排、堵、综合利用、分段控制、超前布局等各方面开展创新,突破传统治水即注浆堵水的理念。

(3) 国内深井建设期长期以临时凿井设备、设施应用,深井建设要在加大利用永久结构、设备、设施上创新布局。例如,通过改造传统吊盘结构,提前设置永久排水管路;这既解决了建设期排水,减少了重复投资、重复拆装工期,也更有利于保障深井水害防治。规划利用深井降温制冷设施,有利于保障建设环境与减少工程投资。

(4) 深地空间的支护结构,须转变传统结构荷载设计理念,充分发挥应用深地围岩作用。深部地层的岩石物理力学强度,除特色地层外,其强度多数高于 C60 混凝土强度。深地空间的支护技术宜充分吸收转化南非、加拿大等深井矿山经验,加大卸荷、分序多次支护、利用围岩承载等方面技术应用。

## 6 结论

深地资源开发与空间利用受社会发展需求驱动,近十年来已成为当前社会阶段发展的重要方向之一,深地空间发展已成为国家重要发展战略布局之一。本文依托三山岛深地资源开发工程背景,重大论述研究了深井支护理念,探讨了深井建设创新方向,主要取得的结论如下。

(1) 深地井巷支护要转变传导荷载结构法理念,应用围岩井壁共同承载的新井壁支护理念,井筒围岩即是荷载来源也是承载结构。新的竖井支护设计理念是基于掘进释能、充分发挥围岩作用、竖井分区分型支护、实施复合分序支护、弱化混凝土井壁作用。

(2) 深竖井开挖扰动围岩的空间范围有限,其引发的岩爆以应力控制型为主;通过实施掘砌卸压工艺与主动支护结构能够有效适配强扰动围岩应力调整及变形。

(3) 深井建设需同步不断创新满足深部环境与多功能工程性,在井筒提升系统配置、永久结构及设备设施利用、防治水综合提前布局等方面开展创新突破。

### [参考文献]

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
- [2] 王勇,吴爱祥,杨军等. 深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J]. 工程科学学报,2023,45(8):1281-1292.
- [3] 郭相参. 超深废石堆积层竖井井颈结构型式探讨[J]. 中国矿山工程,2022,51(5):67-70.
- [4] 古德生,周科平. 现代金属矿业的发展主题[J]. 金属矿山,2012,433(7):1-8.
- [5] 孔繁军. 大直径 1 500 m 深竖井施工技术难点与对策分析[J]. 中国矿山工程,2015,44(1):35-37.
- [6] 赵兴东,刘岩岩,徐继涛,等. 深竖井开凿提升悬吊系统设计与工程应用[J]. 采矿技术,2015,15(4):84-86.
- [7] 曾宪涛,杨永军,夏洋,等. 会泽 3# 竖井岩爆危险性评价及控制研究[J]. 中国矿山工程,2016,45(4):1-8.
- [8] 孙闯,张向东,张建俊. 深部断层破碎带竖井围岩与支护系统稳定性分析[J]. 煤炭学报,2013,38(4):587-594.
- [9] 权道路. 金属矿深竖井破碎围岩变形机理及其控制技术及应用[D]. 北京:北京科技大学,2023.
- [10] 朱明德,王照亚,张月征,等. 基于水压致裂法的三山岛深竖井工程区地应力测量与反演分析[J]. 地质力学学报,2023,29(3):430-441.
- [11] 刘文敬,程守业,荆国业. 反井钻机定向钻进过程中的井帮围岩稳定技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2023,5(02):75-83.
- [12] 周晓敏,胡启胜,马成炫,等. 围岩对竖井井壁承载能力影响的对比研究[J]. 煤炭学报,2012,37(S1):26-32.
- [13] 刘雨杭. 高应力软岩巷道膨胀混凝土充填接顶支护技术[J]. 有色设备,2020,34(06):36-40.