

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2024.01.002

# 冻结条件下井筒支护结构稳定性研究

张勇, 彭文庆\*, 邹师同, 朱豪, 汪琦

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 内蒙古自治区的查干淖尔煤矿一号井的主斜井上段采用冻结法施工时, 围岩遇到解冻水后形成高膨胀性围岩压力, 导致直墙半圆拱形支护结构变形和严重破坏。为解决原支护方案支护力不足的问题, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 对原支护方案建模, 分析原支护方案的变形机理, 基于此提出似马蹄形断面的双层井壁支护方案, 并对新方案井筒的极限承载力进行计算, 对比分析原方案与新方案的顶底板位移量、两帮移近量以及应力值。结果表明: 似马蹄形断面的双层井壁支护形式能达到抵抗高膨胀性围岩压力和抑制底鼓的效果。

**关键词:** 井筒支护; 断面形式; 数值分析

中图分类号: TD352

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)01-0006-10

## On Wellbore Support Structure Stability Under Freezing Condition

ZHANG Yong, PENG Wenqing, ZOU Shitong, ZHU Hao, WANG Qi

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** When the upper section of the main inclined shaft of No.1 well in Chagannaer Coal Mine in Inner Mongolia Autonomous Region is constructed by freezing method, the surrounding rock forms high expansive surrounding rock pressure after encountering thaw water, which leads to the deformation and serious damage of the straight wall semi-circular arch support structure. In order to solve the problem of insufficient support force in the original support scheme, FLAC<sup>3D</sup> is used to model the original support scheme, and the deformation mechanism of the original support scheme is analyzed. Based on this, a double-layer shaft wall support scheme with horseshoe-shaped section is proposed, and the ultimate bearing capacity of the new scheme is calculated. The displacement of the roof and floor, the displacement of the two sides and the stress value of the original scheme and the new scheme are compared and analyzed. Results show that the double-layer shaft lining support form of horseshoe-like section can achieve the effect of resisting high expansive surrounding rock pressure and inhibiting bottom heave.

**Keywords:** wellbore support; cross-section form; numerical analysis

我国煤炭工业在快速发展过程中, 其发展重心逐步向西北地区转移。西北地区的沙质土较多, 渗透系数大, 地层中存在较多的厚基岩。由于基岩段具有较好的富水性和较高的含水率, 而且该地区地下大部分都含有膨胀性的黏土矿物, 因此, 冻结法是这类地区开挖施工的首选方法。冻结法可以有效地抑制围岩的膨胀, 确保施工顺利和支护结构的成形, 但在解冻期间, 膨胀岩体仍会对支护结构产生直接的膨胀力影响, 而常规的支护方式由于支护力不足, 很容易造成大的变形, 甚至造成严重的破坏。针对这方面的问题, 国内学者进行了大量研究。肖民<sup>[1]</sup>基于查干淖尔煤矿一号井所处位置的地理情况及井筒所穿过的复杂地层环

收稿日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51974118)

\* 通信作者, E-mail: pengwenqing@163.com

境,提出井筒采用内外双层钢筋混凝土复合支护方式,有效遏制了井筒局部出现不同程度开裂的情况;王千星<sup>[2]</sup>对冻结法施工时井筒所受应力与变形进行数值模拟与现场观测,发现在不同因素作用下,冻结壁和井壁的变形与受力会受到不同程度的影响;韩天宇等<sup>[3]</sup>对冻结法施工过程中具有膨胀条件的围岩在不同膨胀力条件下支护结构的变形和受力的影响情况进行了分析;路建国等<sup>[4]</sup>研究温度变化对冻结土体含水率的影响,发现随温度的升高与降低,土体含水率会随之发生改变.综合已有研究<sup>[5-20]</sup>发现,冻结条件下井筒支护的研究尚有不足之处,特别是在膨胀岩地层中,采用人工冻结法施工的工程实践较少,冻融条件下围岩膨胀力对工程支护结构的作用规律还有待研究.

内蒙古自治区查干淖尔煤矿一号井主斜井采用冻结法施工,施工过程中存在支护变形等问题,本文以此为背景,采用 FLAC<sup>3D</sup>对原井筒支护方案进行建模,分析原方案支护结构的受力特征,并基于此提出似马蹄形断面(圆形+反拱底板断面)的双层井壁支护形式,该支护结构能有效遏制冻结法施工产生的冻结压力和膨胀压力,对相似条件下的井筒支护具有一定参考意义.

## 1 工程概况

查干淖尔煤矿一号井的主斜井设计倾角为 16°,在斜长 285 m 之前采用冻结法施工.主斜井井筒主要采用“钢筋网+150 mm 喷混凝土+矿用工字钢支架+单层钢筋砼”支护,如图 1 所示.

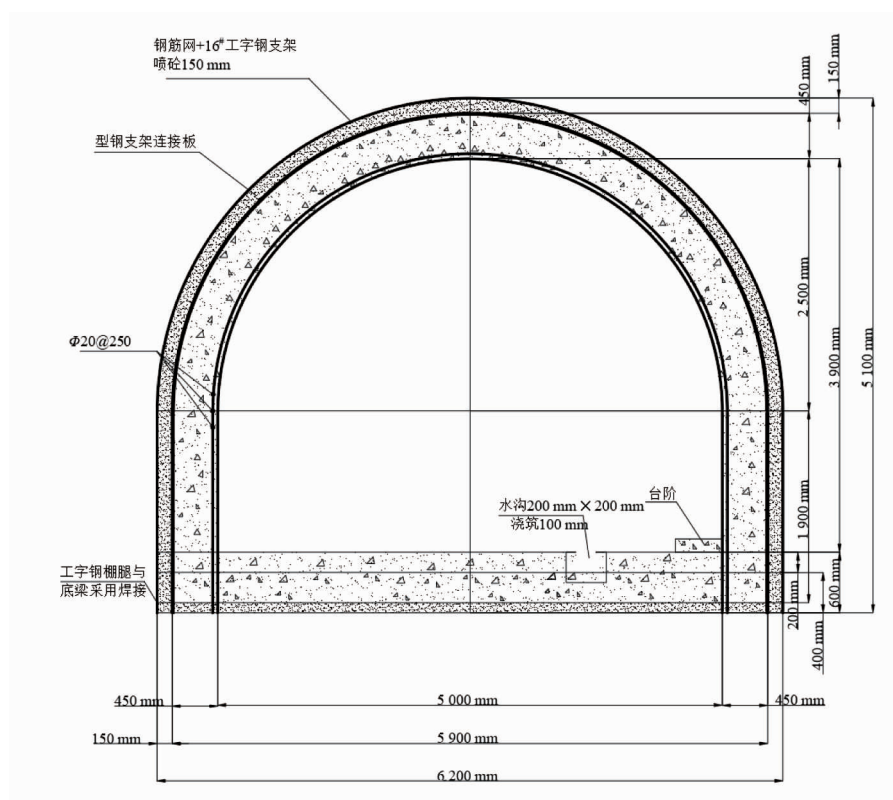


图 1 原主斜井井筒断面

自主斜井施工以来,主斜井井筒出现多处变形开裂及突水、溃沙和底鼓等问题.经调查发现井田内井筒第三系地层穿过的含水层均为弱富水性含水岩层.主斜井井筒第一次出水位于第四系岩层,平均涌水量为 31.5 m<sup>3</sup>/h,含沙量达到 50%~70%,含泥沙量大,且有一定水头.出水后,井筒埋深 40~70 m 段出现断裂现象,断裂先从底板开始,由于底板掏空,井筒下沉,使得帮顶也有断裂现象,底板裂缝以纵向裂缝为主,帮上裂缝以环向为主.据统计,受底板突水、溃砂影响,主斜井自上而下 13~40 m 处井筒出现多处环形裂纹;40 m 处明槽施工时井筒底板突水、溃砂,造成井筒下沉 1 216 mm;56 m 处井筒断裂,错茬 300 mm;68 m 处井筒顶帮开裂.

原主斜井上段(斜长 40~285 m)采用冻结法施工,由于冻结壁的保护(临时支护作用),施工速度慢,井筒变形严重,融冻后,泥岩中存在膨胀压力,使得部分钢筋砼墙体完全破坏,历经多次返修.经长期观测,已竣工的副立井、回风立井的支护效果和冻结消融后的受力状况均表现良好,两井筒均达到设计要求,能满足安全生产的要求.采用冻结法施工,副立井、回风立井在施工过程中虽然也出现了变形,但采用双层井壁支护方式,当内壁施工完成后,支护强度满足要求,可以保证井筒稳定,这对于主斜井支护具有重要借鉴价值.换言之,只要治水方式和支护形式合理,支护强度高,井筒完全可以抵抗地应力、冻结期内冻结壁变形压力、解冻期内膨胀压力以及运营期内围岩压力的作用.

## 2 原主斜井变形机理分析

### 2.1 支护受力分析

根据工程实际情况,对该段支护方案的开挖进行数值模拟分析(以斜长 204 m,埋深 55 m 为例),计算范围为沿井筒纵向( $y$ 轴)取 20 m,井筒横截面方向( $x$ 轴)、垂直方向( $z$ 轴)均取井筒宽度的 8 倍即 40 m,底部及四周固定.为模拟上层 35 m 厚的土压力,在模型上部施加 0.68 MPa 的竖向荷载.模型网格的区域细化和分割采用 Rhino<sup>3D</sup>,将模型剖分为 237 637 个单元,共 43 401 个节点,再导入 FLAC<sup>3D</sup>得到如图 2 所示的三维数值计算模型.计算中围岩均采用摩尔-库伦弹塑性本构模型,弹性模量  $E = 10$  MPa,泊松比  $\mu = 0.2$ ,重度  $\gamma = 18$  kN/m<sup>3</sup>,黏聚力  $c = 0.09$  MPa,内摩擦角  $\varphi = 4.68^\circ$ .

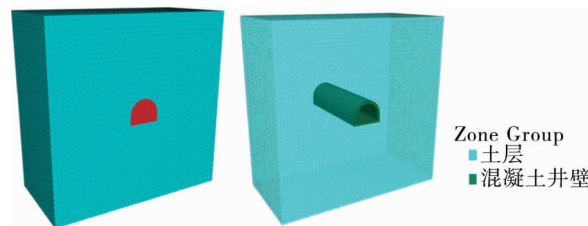


图2 原主斜井 204 m 段三维数值计算模型

数值模拟计算得出的井筒应力和位移分布如图 3 所示.在开凿之前,基岩中的孔隙水和裂隙水在凝固后发生膨胀,从而在冻结壁上积聚了大量的额外应力能.挖掘引起突发性卸荷,使聚集在地层中的能量快速释放,造成应力再分配.由图 3 可知,井筒底板受拉应力的影响较大,因此必须加强支护,并优化支护参数,以弥补因开挖产生的应力卸荷,改善围岩的应力状况.

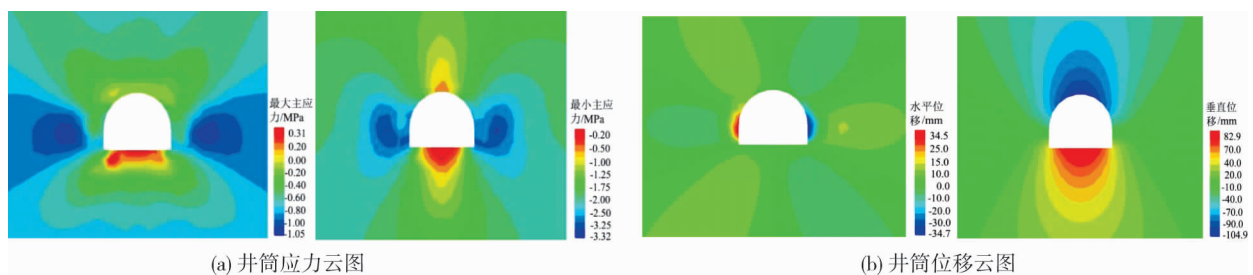


图3 井筒应力和位移分布

主斜井 40~204 m 段第一次支护为“锚网喷+工字钢棚+钢筋混凝土二衬”,井壁结构上的膨胀压力简化为作用于结构外表面节点上的集中荷载,取 3 MPa,双层钢筋混凝土井壁采用弹性模型,弹性模量取  $4 \times 10^4$  MPa,泊松比取 0.25,密度取  $2\ 500$  kg/m<sup>3</sup>.初期支护采用 Shell 单元进行模拟,弹性模量取  $1.05 \times 10^4$  MPa,泊松比取 0.25,密度取  $2\ 000$  kg/m<sup>3</sup>.为了分析结构所受的应力状况,消除边界条件对模型计算的影响,在模型中心(即  $y = 10$  m 处)设置数值模拟分析剖面.数值模拟计算得出的井壁位移分布如图 4 所示,由图 4 可以看出,支护方案数值模拟变形的结果与现场破坏形式基本一致,都出现了顶板下沉、两帮收敛变形和底鼓的破坏情况.

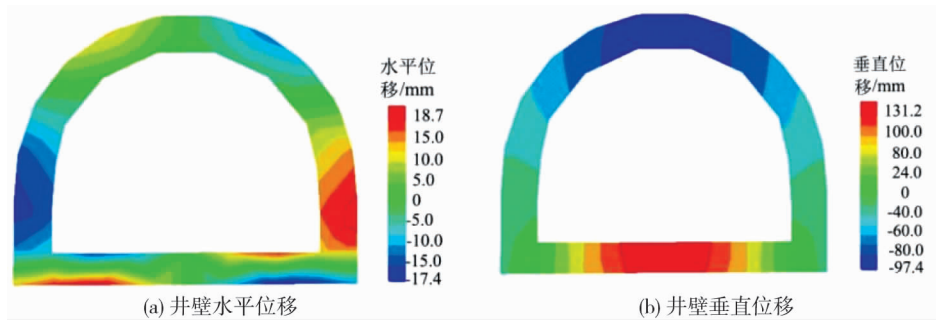


图 4 井壁位移分布云图

支护结构最大应力云图如图 5 所示.由最大主应力图(图 5a)可以看出,直墙半圆拱形断面两帮和拱顶整体受压,两侧基角外侧产生压应力集中现象,两侧压应力和底部向上的应力使底板发生压曲,底板内部应力以拉应力为主,这是产生底鼓的主要原因.由最大剪应力图(图 5b)可以看出,直墙半圆拱形断面的直墙段和内侧基脚是剪应力集中的区域,也因此容易受到破坏,而拱顶和拱底剪应力较低.

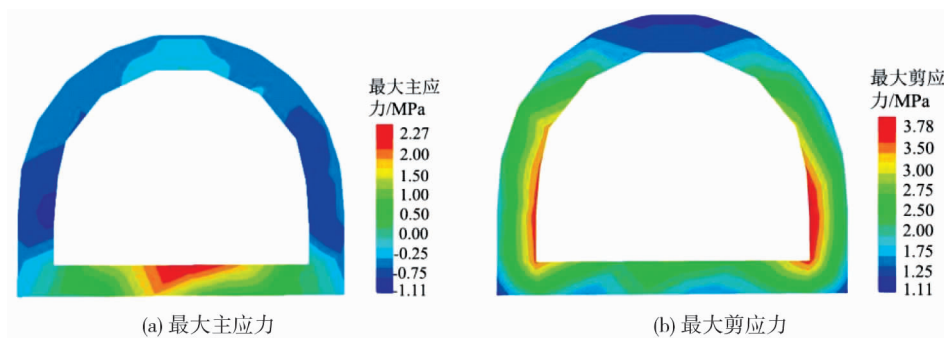


图 5 支护结构最大应力云图

由数值模拟结果可知,底板承受竖向分布的压力,两端均有水平力作用,底板的两个固定端受到的压力最大.巷道两帮相对移近时,必会在底板上施加一个水平力,当该水平力超过临界荷载时,底板就会发生弯曲,从而失去稳定(如图 6 所示).

然而,在大多数情况下,一般不讨论超临界载荷时的位移和应力,因为当水平荷载达到临界值时,载荷稍微增加都会引起位移和内力的巨大变化.原有的断面形状设计在巷道的转角上会出现急剧的应力集中现象,而底板下的接触岩层最容易出现破坏,在底板的两端受力破坏后,可以认为底板在竖向上已经丧失承载力,因此,在水平方向的压力作用下,岩体将产生向上的压缩变形.底板下沉后受到下覆岩体向上的挤压,同时当两帮收敛变形时,底板两端也受到水平力作用,当荷载超过底板混凝土的承载力极限时,底板即发生向上的压曲变形.

## 2.2 温度变化影响

在冻结和解冻过程中,围岩含水量是影响膨胀力的主要因素,温度则是判定围岩冻融状况的一个重要参数.主斜井穿越的地层大多为弱胶结极软岩,其主要成分为泥岩和泥质砂岩,其中含有大量的黏土矿物<sup>[21]</sup>.经实地取样和化验,其黏土矿物成分达 60.6%,而其中蒙脱石所占比率高达 82%.根据强膨胀性软岩的划分及划分准则<sup>[22]</sup>,认为该部分地层中的泥岩属超强膨胀软岩.采用 FLAC<sup>3D</sup> 中热力耦合模块对膨胀泥岩段施工进行模拟.采用摩尔-库伦弹塑性本构模型,模型上表面边界条件设置为恒温条件,四周及底面边界条件设置为绝热条件.为了研究冻结壁温度场的变化规律,在井筒中心、井壁以及冻结壁边缘分别设置监测点,用于记录温度的变化情况.通过现场勘察和热力学试验得到泥岩各项参数,如表 1 所示.

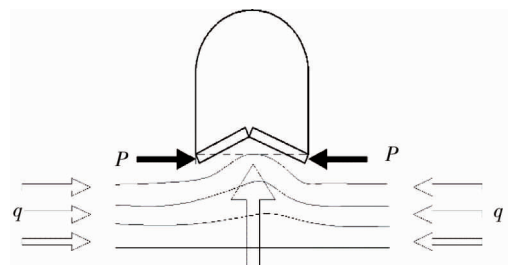


图 6 巷道底鼓机理分析

表1 泥岩各项参数

泥岩温度	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
自然温度(22℃)	12.50	13.60	25	40	0.20	1 910	1.335	1 548
冻结温度(-10℃)	39.50	43.00	4	1030	0.15	1 960	1.816	1 103

计算方案<sup>[3]</sup>:初始温度取22℃,采取吸热体积热源等效代替冻结法施工过程,当土体温度处于0℃以下时,采用冻结岩体参数.土体解冻过程的模拟采用移除热源体的方式进行.当冻结壁温度达到0℃以上时,视为完成解冻.冻结过程中,温度在-10~0℃内,土体中大部分水分都会结冰;解冻过程中,温度在0~10℃内,原来没有冻结的土体则会慢慢恢复初始状态.为了使计算更加简单,同时兼顾冻融膨胀的影响,取土体发生体积变化的温度区间为-10~0℃,在其他区间土体体积不变.模拟计算过程中监测温度变化,如图7所示.

由图7可知,冻结30d后,冻结壁中央温度下降到0℃之下,冻结60d后平均温度低至-10℃之下.在冻结期内,土体中的含水量会因土体冻结随温度的降低而迅速减少,在随后的持续低温下,其含水量的减少速率会随温度的下降逐渐减缓.当土体温度处于相对稳定时,其含水量基本不变,膨胀力的变化也趋于稳定.

在自然解冻过程中,冻结壁内外温差导致冻结区域外部与冻结壁产生能量传递,冻结区由外向内逐渐融化,融化产生的解冻水和地下水沿着裂隙流向深部,这为深部围岩的吸水膨胀提供了条件.膨胀岩吸水后产生体积膨胀,水分会在岩体内不断扩散,导致岩体含水率变化,当围岩的含水率发生变化时,围岩的膨胀率也随之变化,从而引起巷道围岩的应力场和应变场发生变化,导致围岩产生变形.

### 2.3 埋深变化影响

查干淖尔煤矿一号井井筒斜长770m,最大埋深230m,不属于深部巷道,因此该巷道理深对围岩的破坏影响不大,数值模拟难以分析其受力变化.为了方便模拟分析井筒围岩随着深度变化的受力变形,在数值模拟过程中放大理深因素的影响,分别对200m埋深、400m埋深和800m埋深进行数值模拟,并以此为基础类比分析查干淖尔煤矿一号井冻结段井筒随深度变化的受力变形及破坏变化规律.不同埋深条件下的数值模拟结果如图8所示.

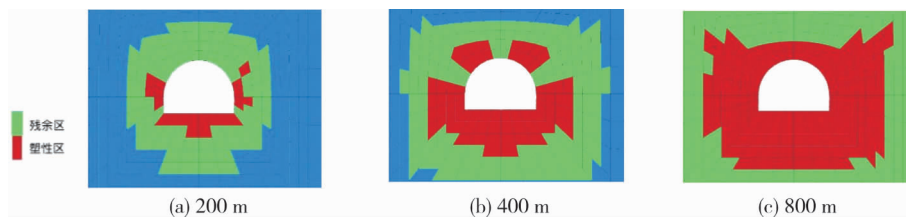


图8 不同埋深条件下深部巷道塑性区和残余区变化规律

由图8可知:巷道的塑性区随深度的增加而增大,残余区的扩展部位以底板及两帮为主,但顶板残余区的扩展幅度相对于底板而言比较缓慢.在埋深较浅的情况下,软化区主要集中在顶底板,随着深度的增加,软化区的分布更加均匀,而且软化区也随深度的增加而增大.由此可以大致推断出查干淖尔煤矿一号井井筒围岩的受力及变形随深度变化的规律.

另外,巷道围岩的温度会随着埋深的增加而发生变化,现有的资料表明,埋深每增加100m温度升高1.5~4.5℃,在一些深井巷道中,温度变化引起岩石力学性质的改变较为明显.在查干淖尔煤矿一号井中,采用冻结法施工,井壁内外会产生一定程度的热交换,而且随着埋深的增加,热交换幅度会有一定程度的增加,进而加速冻结壁的自然解冻,从而间接影响围岩的膨胀变形.

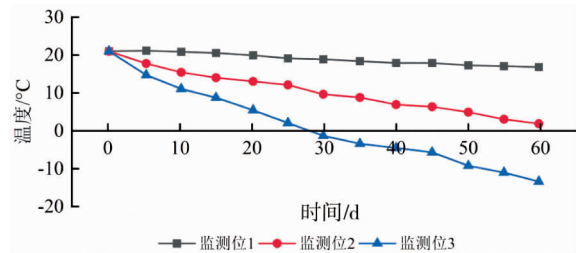


图7 温度变化曲线

### 3 井筒支护形式研究

#### 3.1 支护方案

通过对国内外冻结井筒井壁结构的调研以及对本方案副立井和回风井成功案例的研究,设计查干淖尔主斜井井壁结构形式采用双层井壁结构.在冻结法凿井中,理论上外层井壁主要承受的是冻结压力,内层井壁则是静水压力.因为查干淖尔主斜井穿过的地层绝大部分属于膨胀性软弱岩体,所以支护结构还受到膨胀性极软岩融冻后的膨胀压力的作用.实践证明,井壁达到设计强度前必须保持冻结壁稳定,然而原主斜井上段冻结法施工效果表明,由于对岩层岩性认识不足,冻结参数设计不合理,井壁施工虽然有冻结壁的保护,但施工速度慢,冻结壁发生局部变形,使井筒受损严重;融冻后泥岩中仍存在膨胀压力,使部分钢筋砼井壁外鼓,历经多次返修,且返修段钢管砼支架发生局部断裂.

原方案采用直墙半圆拱形断面,在冻结段变形最为严重的位置,该支护形式在两帮和底板支护强度不足,经多次返修仍无法从根本上解决问题,若不采取合理的新支护方案,井筒形变将会愈演愈烈,严重影响煤矿的施工安全和经济效益,甚至引发恶性灾害事件.因此,设计合理、有效且经济的支护方案显得尤为重要.

若选择全圆形支护思路,采用“钢管+钢筋混凝土”双层井壁结构对井筒进行支护,各层均厚,受力效果良好.但是全圆形支护时底板支护强度相对较差,施工难度较大,如遇底板突然来压,圆形受力结构底部产生集中荷载,井壁结构底部容易发生应力集中而破裂,一旦发生底鼓,难以治理.而且圆形断面每米浇筑的混凝土体积较大,也存在大体积混凝土浇筑等一系列问题.比较全圆形支护,采取小角度拱形底板的似马蹄形支护,能在保证井筒长期稳定的前提下,增强支护结构的可靠性和可施工性.似马蹄形支护可在全圆形支护的基础上,通过提高混凝土强度和降低井壁厚度来保证井筒支护力达到或者高于立井.

似马蹄形断面支护方案的斜井支护从外到内分别为喷射混凝土、矿用工字钢支架、双层钢筋混凝土井壁,具体支护如图9所示.其中,“喷射混凝土+钢筋网+矿用工字钢支架”作为临时支护.首先采用混凝土喷层进行支护,主斜井开挖后采用潮喷工艺布置混凝土喷层,喷层厚度50 mm,混凝土标号C30;然后布设厚20 mm的保温卷材,并采用10#工字钢支架进行二次支护,相邻两榀钢支架间距0.8 m;随后复喷100 mm厚混凝土.铺设钢筋网的同时加铺一层保温棉,在外层井壁与临时支护结构之间、外层井壁与内层井壁之间以及反拱底板与内层井壁之间布置防水层.另外,在外层井壁施工完成后,通过预埋管道向外层井壁和临时支护间的空隙充填树脂材料,填充围岩裂隙和工字钢架间的空隙,提高围岩强度,并可作为解冻后释放围岩有害变形的让压缓冲层,使结构的受力集中程度减小,有利于安全性的提升.

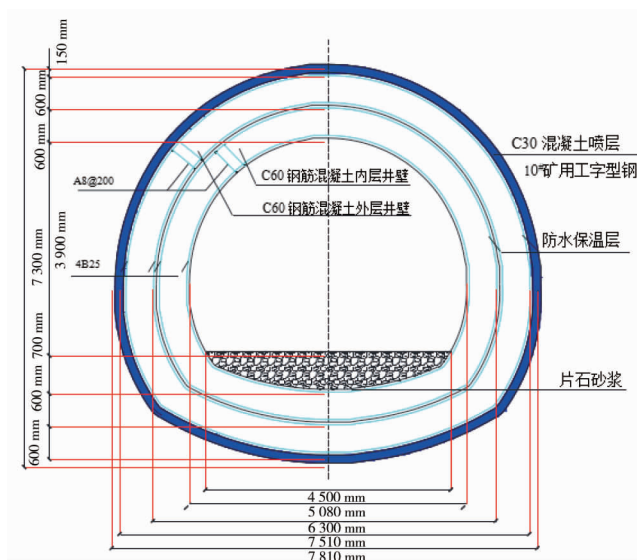


图9 似马蹄形支护断面

### 3.2 井筒支护参数计算

#### 3.2.1 井壁厚度计算

虽然《煤矿立井井筒及硐室设计规范》中存在冻结、钻井、注浆、帷幕等多种凿井工法,但井壁设计的基本理论公式都是弹性力学中基于平面应变问题的厚壁圆筒理论公式,即拉麦公式:

$$t = r_n \left( \sqrt{\frac{f_s}{f_s - 2\gamma_0 p}} - 1 \right). \quad (1)$$

式中:  $t$  为井壁厚度, m;  $r_n$  为井筒净半径, m;  $f_s$  为混凝土与钢筋的综合强度,  $\text{MN}/\text{m}^2$ ;  $\gamma_0$  为结构重要性系数;  $p$  井壁上的设计荷载计算值, MPa.

根据原主斜井内外层井壁厚度,利用拉麦公式反算出设计作用在井壁上的荷载为 4.375 MPa.

采用冻结法施工时,外层井壁会受冻结压力作用,井筒掘砌过程中,冻结壁内、外部冻胀力将发生不同程度的释放,但掘砌完成后,外层井壁受到的冻结压力又会有不同程度的增加.大量工程实践表明,冻结压力在数值上可以用式(2)进行计算.

$$P = 1 + 0.005H. \quad (2)$$

式中:  $P$  为冻结压力, MPa;  $H$  为地层深度, m.

埋深为 40~70 m 的地层,按照式(2)计算得最大冻结压力为 1.35 MPa,由于该地层存在膨胀性黏土岩,属于特殊地层,冻结压力值应该大于 1.35 MPa,本方案取 2.00 MPa,利用式(1)可以推算出外井壁厚度至少为 370 mm,本方案外层井壁厚度大于 370 mm,完全可以抵挡冻结压力的作用,保证井筒安全.

#### 3.2.2 井壁极限承载力计算<sup>[5]</sup>

假设井壁是均匀连续的各向同性线弹性体,则可将井壁受力问题视作平面应变问题.为方便计算,忽略配筋和底板强化的影响,采用弹性厚壁管理论,得出在外侧力作用下井壁内缘的应力解:

$$\begin{cases} \sigma_r = 0; \\ \sigma_\theta = \frac{2p_0}{1 - \frac{r_1}{r_0}}; \\ \sigma_z = \mu(\sigma_\theta - \sigma_r). \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  分别为井壁法向应力、切向应力和竖向应力;  $r_1$  为井壁内半径;  $r_0$  为井壁外半径;  $p_0$  为井壁外侧所受围压;  $\mu$  为泊松比.

则井壁厚径比  $\lambda$  可以定义为

$$\lambda = \frac{r_0 - r_1}{r_0}. \quad (4)$$

定义法向、切向和竖向的应力集中系数分别表示为

$$i_r = \left| \frac{\sigma_r}{p_0} \right|, i_\theta = \left| \frac{\sigma_\theta}{p_0} \right|, i_z = \left| \frac{\sigma_z}{p_0} \right|. \quad (5)$$

根据平面应变模型,对于仅受外压作用的圆筒形井壁,则应力集中系数分别为

$$i_r = 0, i_\theta = \frac{2}{\lambda(2 - \lambda)}, i_z = \nu i_\theta. \quad (6)$$

在仅受外压作用的情况下,当混凝土井壁内侧达到破坏状态时,井壁内侧应力可以表示为

$$\sigma_r = \sigma_1 = 0; \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_3 = -K_b f_c; \quad (8)$$

$$\sigma_z = \sigma_2 = -\nu K_b f_c. \quad (9)$$

式中:  $K_b$  为混凝土强度提高系数;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度.

混凝土井壁的极限承载力  $p_c$  为

$$p_c = \frac{K_b f_c}{i_\theta}. \quad (10)$$

新支护方案井壁外半径为 3.41 m,井壁内半径为 2.51 m,采用混凝土强度等级为 C50,取轴心抗压强度  $f_c$  为 23.1 MPa,双层井壁总厚度为 0.9 m,根据式(5)和式(6)可求得井壁切向应力集中系数  $i_0$  为 4.35.假设混凝土强度提高系数为 1,根据式(10)可得混凝土井壁的极限承载力为 5.31 MPa,远大于原支护方案的支护力.该段支护结构在达到加强底板支护效果的同时,还增加了井壁支护强度,抑制了两帮纵向开裂和底鼓的发生.

#### 4 工程实践

研究发现温度的变化会引起土层含水率的变化,而含水率的变化会造成膨胀力的变化,从而导致支护结构的变形破坏,为此在内外层井壁之间铺设保温层和树脂填充层,一方面可以减小温度变化的影响,另一方面可以起到让压缓冲作用.在实际施工过程中,似马蹄形断面形式结构的外层井壁采用钢筋混凝土支护结构,在外层井壁两帮和顶部每 4 m 各预留 1 个注浆孔,用于向外层井壁和临时支护结构之间及解冻后的松散围岩内注浆;外层井壁施工完成后,通过预埋管道,向外层井壁和临时支护之间的空隙充填树脂材料;外层井壁与临时支护结构之间、外层井壁与内层井壁之间布置防水层.具体支护结构如图 10 所示.

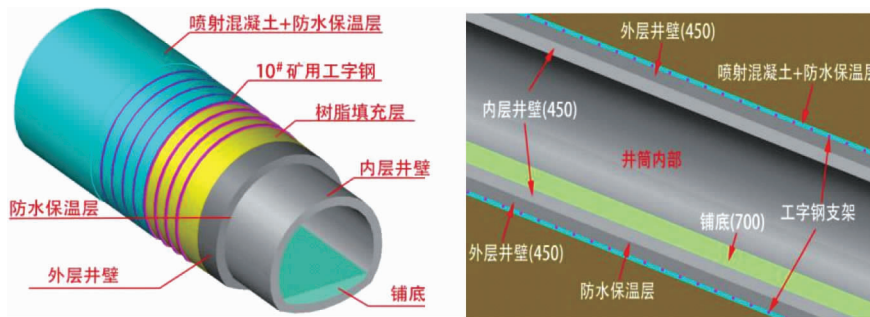


图 10 支护结构示意图

为了分析似马蹄形断面的双层井壁支护方案的可行性,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件对查干淖尔煤矿一号井冻结段变形最为严重的 204~281 m 段分别进行原支护方案与新支护方案的数值模拟,对比新旧方案围岩的位移变化情况.数值模拟计算得出的原支护方案和新支护方案的  $x$  方向位移云图、 $z$  方向位移云图和应力云图如图 11~图 13 所示(其中新支护方案为似马蹄形断面,原支护方案为直墙半圆拱断面).

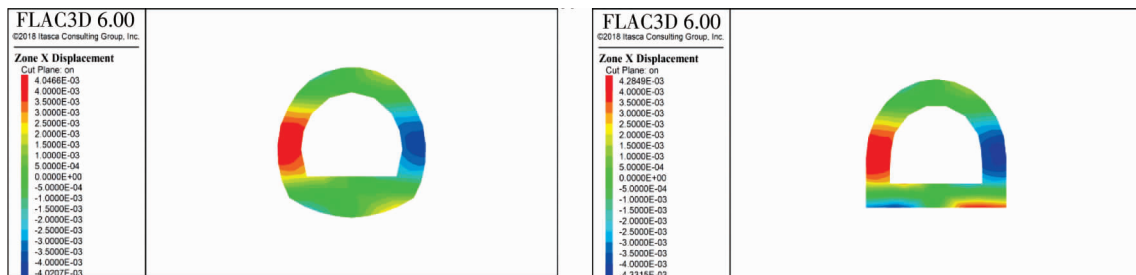


图 11  $x$  方向位移云图

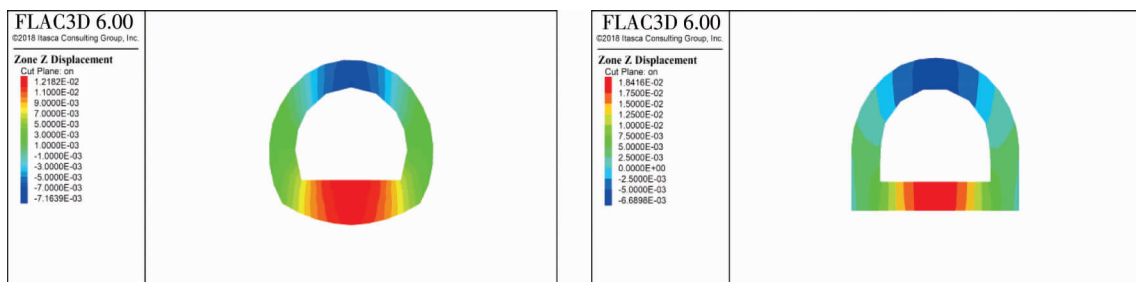


图 12  $z$  方向位移云图



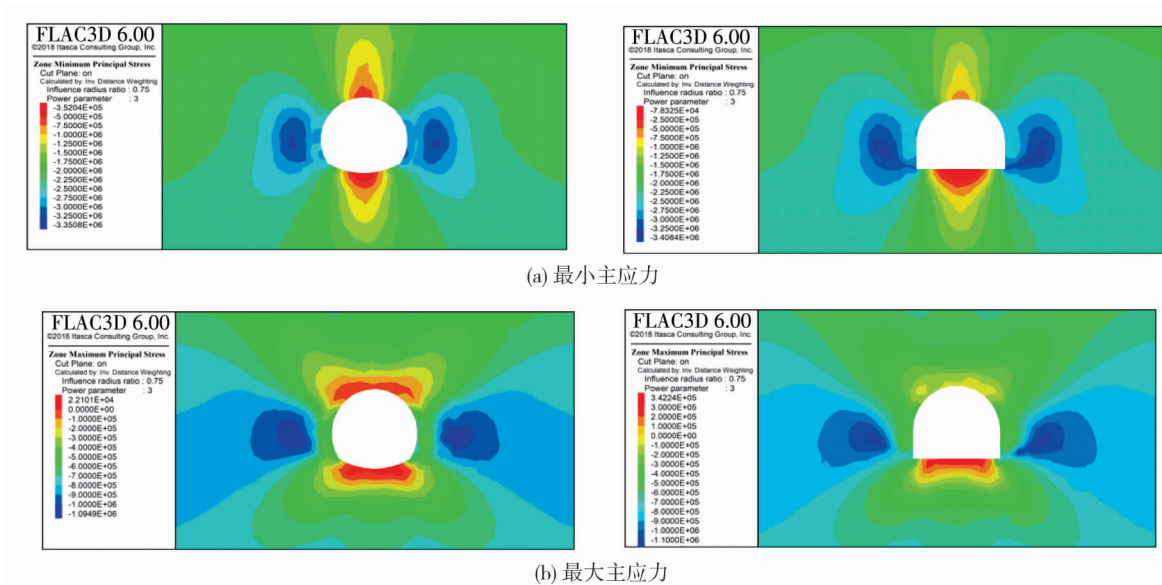


图 13 围岩应力分布云图

从  $x$  方向位移云图和  $z$  方向位移云图可以发现,似马蹄形断面的两帮最大收敛变形为 0.808 cm,直墙半圆拱形断面的两帮最大收敛变形为 0.861 cm;似马蹄形断面的顶板下沉量为 0.71 cm,直墙半圆拱形断面的顶板下沉量为 0.69 cm;似马蹄形断面的底板上鼓最大位移为 1.225 cm,直墙半圆拱形断面的底板上鼓最大位移为 1.890 cm.在巷道开挖后,由于应力二次分布的影响,围岩产生变形,相同条件下,直墙半圆拱形断面的收敛变形量明显大于似马蹄形断面.从最小主应力云图可以看出,直墙半圆拱形断面在拱脚处容易产生应力集中.由最大主应力云图可知,两种断面形式顶底板均容易产生拉应力,直墙半圆拱形断面产生的拉应力及其分布范围均较大,似马蹄形断面底板拉应力分布范围较小;最大主应力方向为切向;似马蹄形断面主要以受压为主,能够充分发挥钢筋混凝土的性能,达到抵抗水平地应力和抑制底鼓的目的.

为了验证似马蹄形支护方案的实际效果,在斜巷设置地表位移观测点,对巷道位移进行监测,以检验其可行性.图 14 为巷道位移监测结果,从两帮和顶板的位移变化来看,两帮变形最显著的加速期是在掘进 3~10 d 内,而底鼓的加速期则在开挖 1~6 d 内,整个巷道在开挖 28 d 以后趋于稳定.经过 2 个多月的实测和观察,巷道变形基本稳定,目前仍能正常使用,这表明采取似马蹄形断面(圆形+反拱底板断面)的双层井壁支护方案,可以有效控制两帮收敛、顶板下沉和底鼓现象,有利于巷道围岩的稳定.

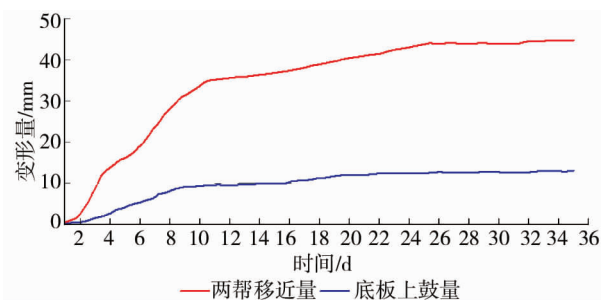


图 14 巷道位移监测

## 5 结论

1) 冻结膨胀岩融化过程中产生的膨胀力对井筒支护结构的影响较大,较高的膨胀力将导致支护结构发生破坏,在冻结膨胀岩地层施工时支护结构的底板变形较为突出,需要着重加强.

2) 支护结构的拱脚处容易出现应力集中现象,直角形式的支护尤为明显,应尽量避免该类形式的支护结构,建议采用反拱等类似形式的支护以抵消土层或岩层对底板的挤压.

3) 基于数值模拟分析的支护变形机理,提出似马蹄形断面支护形式,并通过工程实践验证该支护方

式的可行性,为现场及类似项目施工提供了直观的定量依据,有一定的参考意义。

#### 参考文献:

- [1] 肖民.白垩系软岩地层井筒掘进方法与支护方式研究[J].内蒙古煤炭经济,2013(8):147-149.
- [2] 王千星.斜井冻结法凿井过程中冻结壁与井壁的受力与变形规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [3] 韩天宇,单仁亮,白瑶,等.冻融条件下围岩膨胀力对斜井支护的影响研究[J].矿业研究与开发,2021,41(1):28-33.
- [4] 路建国,张明义,张熙胤,等.冻融过程中未冻水含量及冻结温度的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7):1803-1812.
- [5] 任彦龙,杨维好,韩涛.基于不同强度准则的井壁极限承载力研究[J].中国矿业大学学报,2011,40(4):540-543.
- [6] 杨俊青.不同埋深条件下深部巷道变形特征分析[J].能源与环保,2019,41(11):123-126.
- [7] 王卫军,袁超,余伟健,等.深部大变形巷道围岩稳定性控制方法研究[J].煤炭学报,2016,41(12):2921-2931.
- [8] 彭文庆,彭刚.浅埋煤层预留煤柱支承压力分布规律研究[J].矿业工程研究,2009,24(2):1-4.
- [9] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].2版.北京:科学出版社,2013.
- [10] 汪琦,彭文庆,朱豪,等.深井破碎围岩大断面巷道支护技术[J].矿业工程研究,2021,36(3):1-7.
- [11] 朱豪,彭文庆,邹师同,等.深井破碎围岩硐室底鼓治理研究[J].煤炭技术,2021,40(5):4-8.
- [12] 毛永江,李少华,王海彬.查干淖尔一号井主斜井支护技术研究[J].中国矿业,2012,21(11):110-112.
- [13] 陈骏,张祥,王千星,等.两种斜井冻结方式的温度场模型实验研究[J].煤炭工程,2022,54(4):105-110.
- [14] 谷拴成,王兴明,薛蛟,等.深井回采巷道底鼓变形与支承压力关系分析[J].矿业安全与环保,2021,48(1):44-49.
- [15] GUO Z P, DU Z W, HU S C, et al. Comprehensive treatment methods of floor heave disasters in mining areas of China[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(5): 2485-2495.
- [16] LIN W G, CHENG J L, LI D L, et al. Deformation characteristics and control technology of roadway in water-rich soft rock[J]. Geofluids, 2022, 2022: 2234334.
- [17] WANG Y S, YANG R. Monitoring and analysis of the stress and deformation of shaft lining and the influence of freezing tube fracture in deep topsoil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 193: 103420.
- [18] ZHELININ M, KOSTINA A, ESINA E, et al. Calculation of the stress-strain state in a shaft lining during thawing of the frozen wall[J]. Procedia Structural Integrity, 2021, 32: 71-78.
- [19] 杨更社,屈永龙,奚家米.白垩系地层煤矿立井冻结壁的力学特性及温度场研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(9):1873-1879.
- [20] 孙杰龙,任建喜,陈兴周,等.富水砂层斜井冻结壁温度场分布规律研究[J].煤炭工程,2020,52(11):126-131.
- [21] 魏峰.查干淖尔矿区水文地质特征研究[J].世界有色金属,2018(13):165.
- [22] 孙小明,武雄,何满潮,等.强膨胀性软岩的判别与分级标准[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):128-132.