

DOI: 10.11779/CJGE201505016

# 煤矿斜井井筒过流砂层施工技术研究及应用

孟庆彬<sup>1,2</sup>, 韩立军<sup>1</sup>, 石荣剑<sup>1</sup>, 柳志军<sup>1</sup>, 路拓<sup>1</sup>, 李向阳<sup>1</sup>, 石高鹏<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室(山东科技大学), 山东 青岛, 266590)

**摘要:** 流砂层是矿井建设常遇见的不良地层, 在含水或动力扰动下具有自流动性, 施工不当会引起流砂向临空面流动充填开挖空间将井筒淹没或造成地表大面积塌陷。采用工程地质钻探与地面直流电法勘探技术, 确定了流砂层的厚度与含水特征; 根据斜井井筒穿越流砂层的垂深, 将斜井井筒过流砂层技术方案进行分类研究, 提出了斜井井筒过不同厚度流砂层的合理掘进技术; 基于理论分析与数值计算, 确定了斜井井筒支护结构承受的荷载, 提出了斜井井筒过流砂层合理的井壁结构; 为评价支护效果, 对斜井井筒围岩变形、型钢支架受力、二衬接触应力、衬砌钢筋受力及渗水压力等进行了实时监测, 监测结果表明: 斜井井筒过流砂层的施工技术方案分类合理, 保证了斜井井筒的掘进进度与施工安全; 井壁结构安全可靠, 保证了斜井井筒围岩与支护结构的稳定。

**关键词:** 斜井井筒; 流砂层; 施工技术; 井壁结构; 监控量测

中图分类号: TU441; TD325.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)05-0900-11

**作者简介:** 孟庆彬(1985-), 男, 山东菏泽人, 博士, 助理研究员, 主要从事岩体加固理论与应用技术的研究。E-mail: mqb1985@126.com。

## Study and application of construction technology for inclined shafts penetrating drift sand strata in coal mine

MENG Qing-bin<sup>1,2</sup>, HAN Li-jun<sup>1</sup>, SHI Rong-jian<sup>1</sup>, LIU Zhi-jun<sup>1</sup>, LU Tuo<sup>1</sup>, LI Xiang-yang<sup>1</sup>, SHI Gao-peng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals (Shandong University of Science and Technology), Qingdao 266590, China)

**Abstract:** The drift sand stratum is a kind of common harmful stratum in mine construction. It is characterized by auto flow ability in water or under dynamic disturbance. Improper construction will cause the drift sand to flow to the free surface to fill the excavation space and get the shaft flooded or lead the ground to collapse. The water-holding condition and thickness of drift sand strata are determined by using engineering geological drilling and electrical prospecting technology. Based on the vertical depth of drift sand stratum, the constructing techniques for the inclined shaft penetrating the drift sand stratum are classified. A reasonable tunneling technology is presented for the inclined shaft penetrating the drift sand stratum with different thicknesses. Pressure ability of structure is calculated by means of both finite element method and analytical method. The reasonable structure of shaft lining is proposed. To evaluate the supporting effect, deformation, stress and permeability strength are monitored. The results show that the construction technology for the inclined shaft penetrating the drift sand stratum is reasonable, thus the tunneling progress and construction safety are ensured, and the structural safety and surrounding rock ability are guaranteed.

**Key words:** inclined shaft; drift sand stratum; construction technology; shaft lining; monitoring and measurement

## 0 引言

在煤矿斜井或立井井筒施工中常遇到流砂层地段, 流砂的最大特点是在含水与压力或动力扰动下具有自流动性, 即当流砂层受到井筒开挖扰动时, 流砂则会向临空面流动从而充填开挖空间, 将井筒淹没, 甚至会引起地表大面积塌陷。流砂层的上述特性使得流砂层

段井筒的施工与支护难度明显高于一般地层<sup>[1-2]</sup>; 若处理不当, 往往会延长井筒施工工期、增加投资, 甚至

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174196, 51204168, 51109209, 51309222); 山东省土木工程防灾减灾重点实验室开放课题(CDPM2014KF03); 中国矿业大学人才引进资助项目与青年教师“启航计划”; 江苏建筑职业技术学院重点课题(JYA14-02)

收稿日期: 2014-09-04



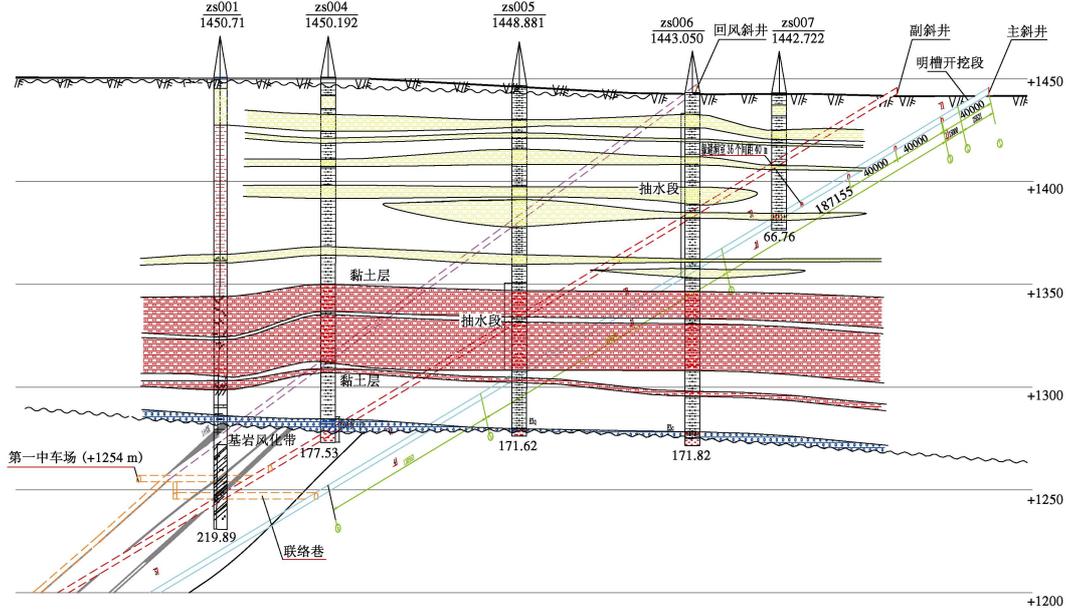


图1 李家坝煤矿斜井井筒穿越古近系段地质剖面图

Fig. 1 Geological section of inclined shaft in Lijiaba coal mine

会导致井筒报废。

目前,斜井井筒过流砂层的方法主要有板桩法、井点降水法、管棚法、高压旋喷、注浆法、冻结法等施工方法。许多学者<sup>[3-5]</sup>提出了采用井点降水法(地面降水与工作面降水)过薄流砂层,斜井井壁结构采用“槽钢支架、钢筋网、喷射混凝等组成的初次支护+C30混凝土碇永久支护”的联合支护方案;王平等<sup>[6]</sup>按照“先治水、短开挖、强支护”的思路,采用超前管棚预支护法使得斜井井筒通过流砂层;关保树<sup>[7]</sup>、尚念军<sup>[8]</sup>将高压旋喷技术引入到流砂层的加固中来,取得了良好的经济技术效益;赵老生<sup>[9]</sup>、李春常等<sup>[10]</sup>采用注浆加固技术,保证了斜井井筒顺利过流砂层;谷松山等<sup>[11]</sup>、朱宗平等<sup>[12]</sup>采用板桩法施工工艺,保证了井筒安全顺利地通过薄流砂层;陈祥恩等<sup>[13]</sup>提出了“分段打钻,异步冻结”的施工方案,满足了煤矿井巷快速掘砌的需要,缩短了建井周期;安良友等<sup>[14]</sup>针对板石矿流砂层段“涌水涌沙量大,淤积速度快”等特点,提出了“管棚、管桩法及地面打降水井抽水”等综合施工方法,保证了井筒顺利通过流砂层;刘英杰等<sup>[15]</sup>采用“堵砂导水、强支护、短进尺”等综合措施,保证了井筒的施工进度与安全;杨法军等<sup>[16]</sup>采用“截流与多级排水、壁后注浆相结合”的综合防治水方法,有效地保证了井筒施工质量与进度。总的来说,目前对井筒过流砂层技术的研究主要集中在通过薄流砂层的措施方面,对斜井过流砂层施工技术与井壁结构的系统研究很少。因此,本文以李家坝煤矿斜井井筒穿过多个流砂层为研究背景,探索斜井井筒过不同

厚度流砂层合理的施工技术及井壁结构。

## 1 李家坝煤矿流砂层分布概况

李家坝煤矿位于宁夏银川市盐池县境内,设计生产能力为90万吨/年,矿井采用斜井开拓方式,布置主、副、风三条斜井。斜井井筒主要穿越第四系表土层、古近系地层和侏罗系延安组地层等<sup>[17]</sup>。①第四系表土层主要以中、细砂为主,成份主要石英、长石,含少量暗色矿物;风积砂各颗粒组成所占的重量百分比:黏类土( $d_{\text{粒径}} \leq 0.005 \text{ mm}$ )为3.0%~19.9%平均值为8.63%;黏类土(粒径 $0.005 \text{ mm} < d_{\text{粒径}} \leq 0.075 \text{ mm}$ )为20.0%~44.7%,平均值为29.93%;砂类土(粒径 $0.075 \text{ mm} < d_{\text{粒径}} \leq 0.25 \text{ mm}$ )为52.3%~77.0%,平均值为61.43%;含水率为4.2%,渗透系数为 $5.70 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,渗透性较强。在风力作用下易形成砂层流动现象,在有水环境下,易产生悬浮和流动;属不良配级的均粒砂,强度较弱,稳定性差。②古近系地层主要由浅红色呈半固结状态细砂、粉砂、黏土等组成,且砂层含水,形成了流砂层;粉砂各颗粒组成所占的重量百分比:黏类土( $d_{\text{粒径}} \leq 0.005 \text{ mm}$ )为3.0%~27.9%,平均值为11.5%;黏类土(粒径 $0.005 \text{ mm} < d_{\text{粒径}} \leq 0.075 \text{ mm}$ )为17.1%~36.6%,平均值为23.89%;砂类土(粒径 $0.075 \text{ mm} < d_{\text{粒径}} \leq 0.25 \text{ mm}$ )为50.7%~76.7%,平均值为64.6%;含水率为2.5%,渗透系数为 $5.77 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,渗透性较强。细砂(细粒砂岩)颗粒密度为 $2.61 \sim 2.72 \text{ g/cm}^3$ ,平均值为 $2.66 \text{ g/cm}^3$ ;孔隙率为15.0%~28.0%,平均值为21.27%;含水率为3.9%~25.1%,

平均值为 8.3%; 天然抗拉强度为 0.05~0.34 MPa, 平均值为 0.19 MPa; 天然抗压强度为 1.1~3.1 MPa, 平均值为 1.89 MPa; 天然抗剪强度为 0.2~0.6 MPa, 平均值为 0.34 MPa。从现场取样情况看, 古近系细砂呈半成岩状态, 胶结不好, 天然抗压强度较低, 遇水后其强度更低, 属不良工程地质体。③侏罗系延安组地层主要由各粒级砂岩、粉砂岩、泥岩及煤层组成, 煤岩层的力学性能较低, 为极软弱岩层。图 1 所示的工程地质钻探资料表明, 斜井井筒所穿过的流砂层, 按照厚度可分为  $h \leq 3$  m,  $3 \text{ m} < h \leq 6$  m,  $6 \text{ m} < h \leq 20$  m,  $h > 20$  m 等 4 大类。

将斜井井筒所穿越的含水层由上而下划分为 3 个主要含水层组: ①第四系、古近系及基岩风化带孔隙~裂隙含水层组: 第四系松散层孔隙潜水, 全区分布, 含水层厚度为 0.4~10.83 m, 平均值为 3.91 m; 古近系及基岩风化层含水段, 全区均有分布, 其中古近系含砾砂岩与基岩顶部风化带裂隙含水层为复合含水层组, 富水性变化较大, 含水层厚度为 51.35~169.65 m, 平均值为 116.77 m; 直罗组、延安组基岩风化层, 含水层厚度为 4.95~79.6 m, 平均值为 25.17 m, 风化带岩石疏松、破碎, 孔隙较发育, 含水率增高, 是地下水的导水、储水空间, 为井巷施工过程中影响较大的直接充水含水层。②侏罗系中统延安组 12 煤以上砂岩裂隙~孔隙承压含水层组: 含水层厚度为 2.64~133.01 m, 平均值为 77.38 m, 为层间孔隙裂隙承压含水层, 是煤层顶板直接充水含水层。③侏罗系中统延安组 12~18 煤砂岩裂隙~孔隙承压含水层组: 含水层厚度为 2.4~83.58 m, 平均值为 48.66 m, 本区广泛分布, 渗透性中等, 局部地段裂隙发育。

为确定斜井井筒穿过流砂层的厚度及含水情况, 进行了地面直流电法勘探, 图 2 所示的探测结果表明: ①主斜井井筒在垂深-40 m 处穿过的砂层处于中等含水状态; 垂深-50 m 以下的砂层处于强含水状态, 垂深-60 m 以下的区域含水性更强。②副斜井井筒在垂深-50 m 处穿过的砂层为中等含水状态, 垂深-90 m 以下为强含水状态。③回风斜井井筒在垂深-70 m 穿过的砂层属于一般含水状态, 垂深-70~-90 m 区域穿过的砂层处于中等含水状态, 垂深-90 m 以下属于强含水状态。

## 2 煤矿斜井井筒过流砂层合理掘进技术

根据斜井井筒穿越流砂层的垂直厚度与施工技术水平, 将斜井井筒过流砂层技术方案进行分类研究。第一类, 斜井井筒过薄层流砂层 (垂直厚度  $h \leq 3$  m), 采用超前小导管注浆技术方案; 第二类, 斜井井筒过

中厚流砂层 (垂直厚度  $3 \text{ m} < h \leq 6$  m), 采用超前管棚注浆技术方案; 第三类, 斜井井筒过厚无水流砂层 (垂直厚度  $6 \text{ m} < h \leq 20$  m), 采用超前管棚注浆加固技术方案; 第四类, 斜井井筒过厚含水流砂层 (垂直厚度  $6 \text{ m} < h \leq 20$  m), 采用高喷与管棚注浆加固及地表降水技术方案; 第五类, 斜井井筒过巨厚流砂层 (垂直厚度  $h > 20$  m), 采用地面冻结技术方案。

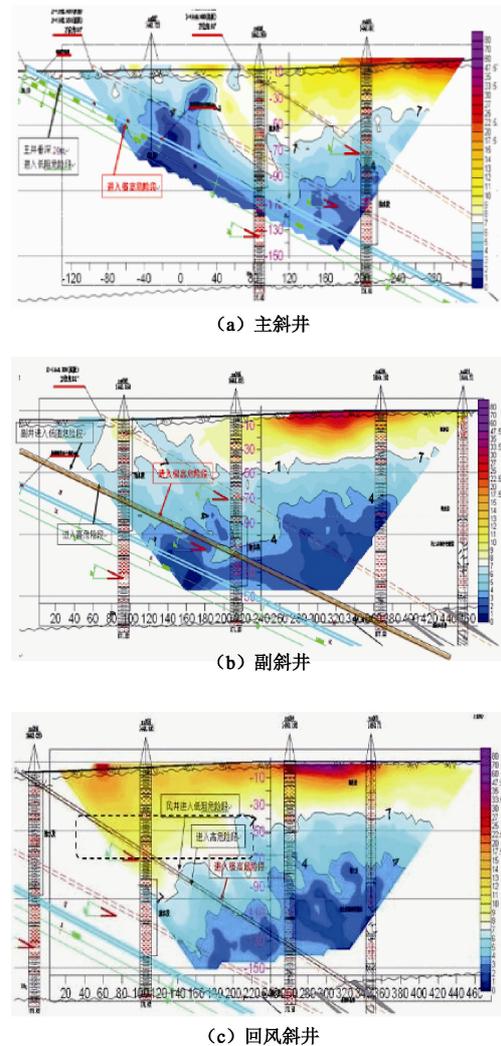


图 2 回风斜井测线二极法视电阻率联合剖面图

Fig. 2 Prospecting line profile of inclined shaft

### 2.1 斜井井筒过薄层流砂层超前小导管注浆加固技术方案 (以回风斜井为例)

斜井井筒过薄层流砂层 (垂直厚度  $h \leq 3$  m), 采用超前小导管注浆技术方案, 即在斜井井筒开挖前, 先喷射混凝土将斜井井筒开挖面与一定范围内的井筒周边围岩封闭, 然后沿斜井井筒轮廓线向前方流砂层内打入带孔小导管, 并通过小导管向流砂层内注入脲醛树脂化学浆液, 待浆液扩散、凝结、硬化后, 在斜井井筒周边形成一定厚度的注浆加固帷幕, 达到流砂层加固和堵水的目的。

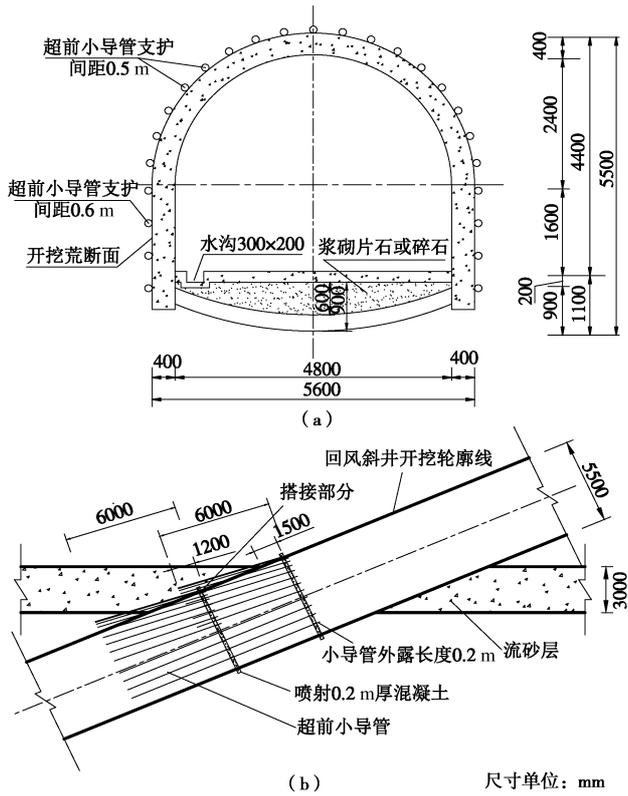


图 3 回风斜井超前小导管布置断面与剖面图

Fig. 3 Section of advanced small pipe in inclined shaft

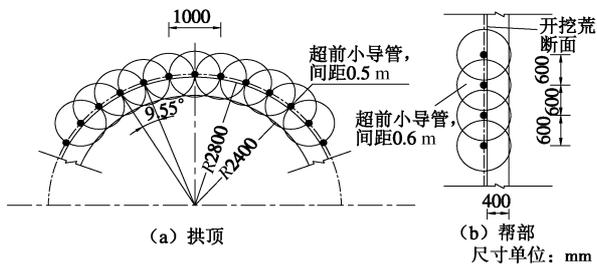


图 4 回风斜井超前小导管布置详图

Fig. 4 Details of advanced small pipes in inclined shaft

回风斜井井筒设计开挖荒断面为 5600 mm (宽) × 5500 mm (高), 流砂层段分两段施工, 每段布置 1 排超前小导管共 25 个, 两段共布置 50 个; 小导管拱顶间距为 0.5 m, 帮部间距为 0.6 m; 导管长度为 6 m, 搭接长度为 1.2 m, 直径为  $\phi 32$  mm, 外插角为  $6^\circ$ , 钻孔直径为  $\phi 45$  mm, 小导管布置断面图及布置详图如图 3, 4 所示。脲醛树脂类浆液中加入浓度为 2% 的草酸溶液作为固化剂, 脲醛树脂溶液和草酸溶液配比为 10 : 2~10 : 3 (体积比)。注浆压力为 2.0~2.5 MPa, 注浆终压为 4.0~5.0 MPa; 并根据注浆施工情况进行适当调整, 以保证注浆效果。

小导管管身设若干溢浆孔, 孔径为  $\phi 8$  mm; 孔距为 0.5 m, 按梅花形排列; 前端 0.2 m 与后端 1 m 范围不设溢浆孔。超前小导管施工工艺: 施工准备→钻机就位并由上至下钻孔→安装导管→孔口密封处理→注浆管路安装→注浆→检验注浆效果→开挖及支护。

## 2.2 斜井井筒过中厚流砂层超前管棚注浆加固技术方案

斜井井筒过中厚流砂层 (垂直厚度  $3\text{ m} < h \leq 6\text{ m}$ ), 采用超前管棚注浆加固技术方案, 即在斜井井筒开挖前, 先在斜井井筒开挖面与一定范围内的井筒周边围岩做混凝土止浆墙, 然后沿斜井井筒轮廓线向前方流砂层内打入带孔管棚, 并通过管棚向流砂层内注入脲醛树脂化学浆液, 减小流砂层的渗透性, 提高了流砂层的强度与承载性能, 达到流砂层加固和堵水的目的, 起着止水防砂及承受地层荷载的作用。

在回风斜井井筒过流砂层段超前管棚分为两段施工, 每段布置 1 排超前管棚共 25 个, 两段共布置 50 个; 管棚拱顶间距为 0.5 m, 帮部间距为 0.6 m; 管棚长度为 15 m, 搭接长度为 6.9 m, 直径为  $\phi 45$  mm, 外插角为  $2^\circ$ , 钻孔直径为  $\phi 60$  mm, 注浆材料与注浆参数同上, 管棚布置断面图及布置详图如图 5, 6 所示。超前管棚的加工制作、钻孔顺序及施工工艺基本同超前小导管。流砂段井筒掘进荒断面向四周扩挖 0.3 m, 采用 C30 混凝土浇筑厚度为 1500 mm 的止浆墙。

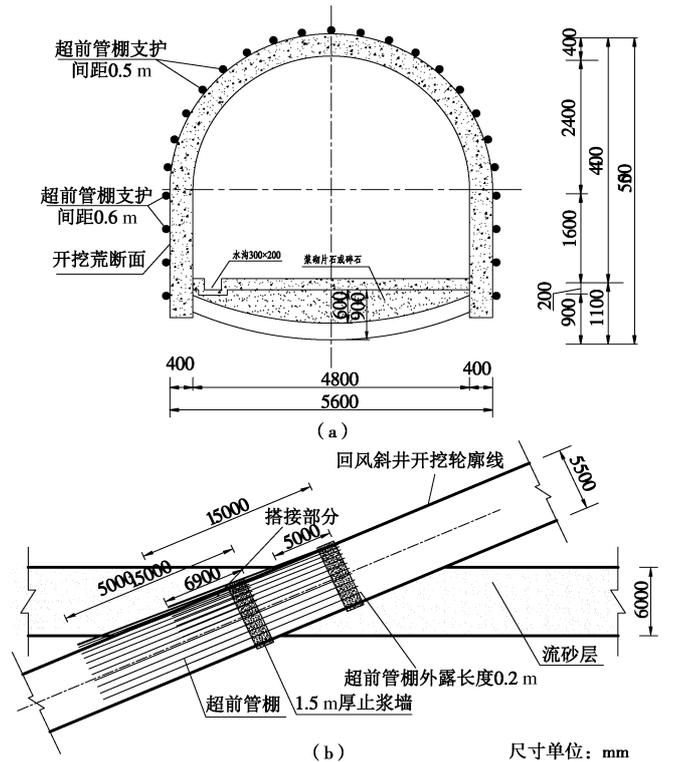


图 5 回风斜井超前管棚布置断面与剖面图

Fig. 5 Section of lead pipe shed in inclined shaft

## 2.3 斜井井筒过厚无水流砂层超前管棚注浆加固技术方案

斜井井筒过厚无水流砂层 (垂直厚度  $6\text{ m} < h \leq 20\text{ m}$ ), 采用超前管棚注浆加固技术方案。在回风斜井井筒过流砂层段超前管棚分为 3 段施工, 每段布置 1 排超前管棚共 25 个, 3 段共布置 75 个; 管棚拱顶间距为 0.5 m, 帮部间距为 0.6 m; 管棚长度为 24 m, 搭接

长度为 6.33 m，直径为  $\phi 45$  mm，外插角为  $2^\circ$ ，钻孔直径为  $\phi 60$  mm，注浆材料与注浆参数同上，管棚布置断面图及布置详图如图 6, 7 所示。

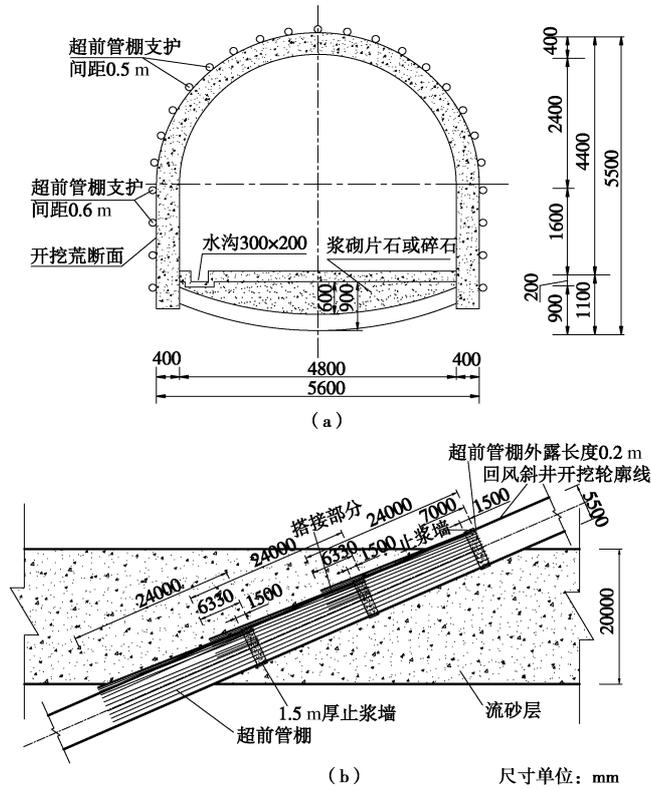


图 6 回风斜井超前管棚布置断面与剖面图

Fig. 6 Section of lead pipe shed in inclined shaft

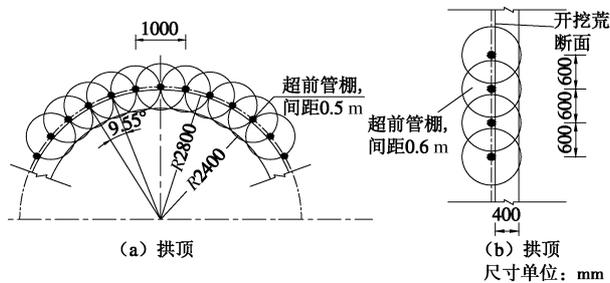


图 7 回风斜井超前管棚布置详图

Fig. 7 Details of lead pipe shed in inclined shaft

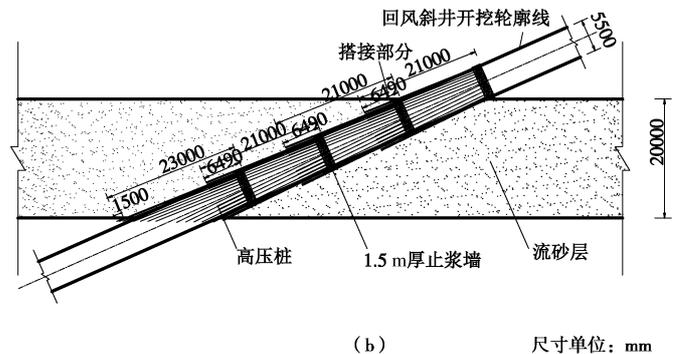
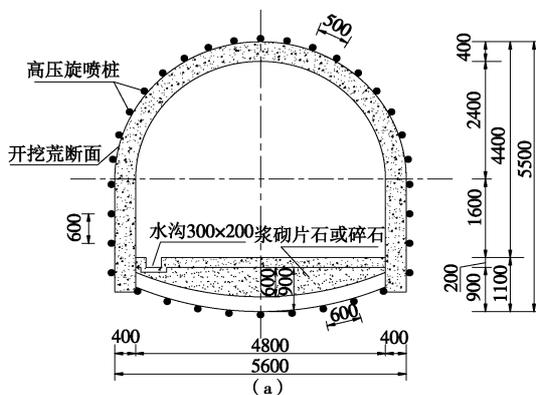


图 8 回风斜井高压旋喷桩布置断面与剖面图

Fig. 8 Section of high-pressure jet grouting pile in inclined shaft

## 2.4 斜井井筒过厚含水流砂层高喷与管棚注浆加固及地表降水技术方案

斜井井筒过厚含水流砂层(垂直厚度  $6\text{ m} < h \leq 20\text{ m}$ )，采用高喷与管棚注浆加固及地表降水技术方案。首先沿斜井井筒中轴线布置 2 排降水井，钻孔中使用管状过滤器，然后抽水，形成水位降落漏斗，使斜井井筒工作面流砂层水位降低，达到疏水、降压、固定砂层的目的。然后采用高喷与管棚静压注浆技术对斜井井筒一定范围和深度内的流砂层进行加固，形成注浆加固帷幕；为了防止钻孔时流砂及静压注浆时浆液向斜井井筒内回灌，在高压喷射注浆与管棚静压注浆前做止浆垫(止浆墙)；为保证注浆帷幕止水防砂效果，要求形成的高压旋喷帷幕底部进入下部地层厚度不小于 1.5 m，在井筒周边形成全封闭的高压旋喷帷幕。在高压旋喷桩交圈处打钻孔进行管棚静压注浆，消除高压旋喷注浆死角，保证形成可靠有效的注浆加固帷幕。管棚静压注浆“结石体”与旋喷桩体相互作用，环绕井筒轮廓形成筒状“承载壳”；通过地表降水，可以保证斜井井筒注浆帷幕的质量，同时避免事故的发生。

### (1) 高喷与管棚注浆加固技术设计方案

在回风斜井井筒流砂层段按高喷桩分为 4 段施工，每段布置 1 排高喷桩共 34 个，4 段共布置 136 个；高喷桩拱顶间距为 0.5 m，帮部及底板间距为 0.6 m；高喷桩钻孔上倾或下俯角度为  $2^\circ$ ，桩径 0.8 m，钻孔直径为  $\phi 60$  mm。流砂层段超前管棚分为 4 段施工，每段布置 1 排超前管棚共 32 个，4 段共布置 128 个；管棚拱顶间距为 0.5 m，帮部及底板间距为 0.6 m；管棚直径为  $\phi 45$  mm，外插角为  $2^\circ$ ，钻孔直径为  $\phi 60$  mm，高喷桩与管棚布置断面图和布置详图如图 8~10 所示。

采用单重管进行高压旋喷，桩径为 0.8 m，第 1 段~第 3 段高喷桩桩长为 19.5 m，钻孔长为 21 m，各

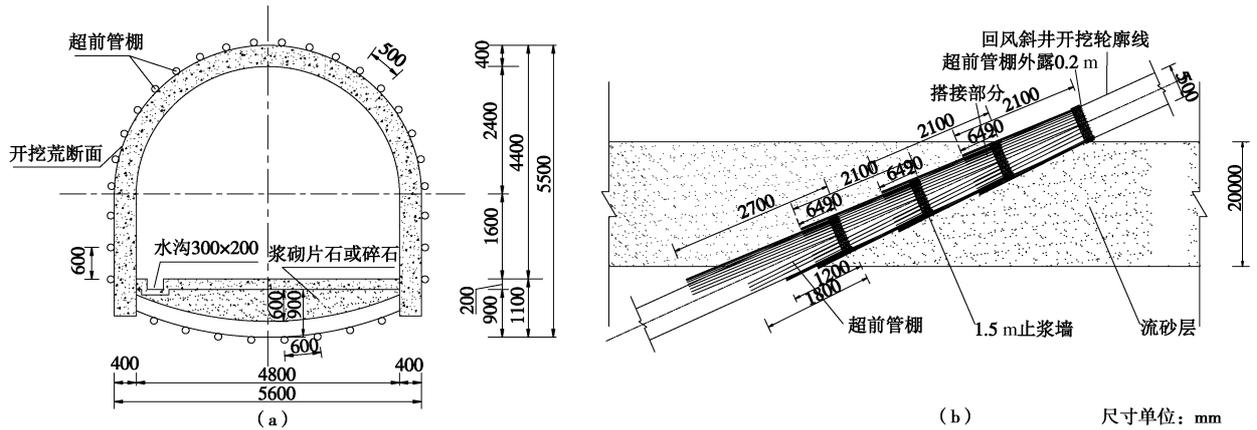


图 9 回风斜井超前管棚布置断面与剖面图

Fig. 9 Section of lead pipe shed in inclined shaft

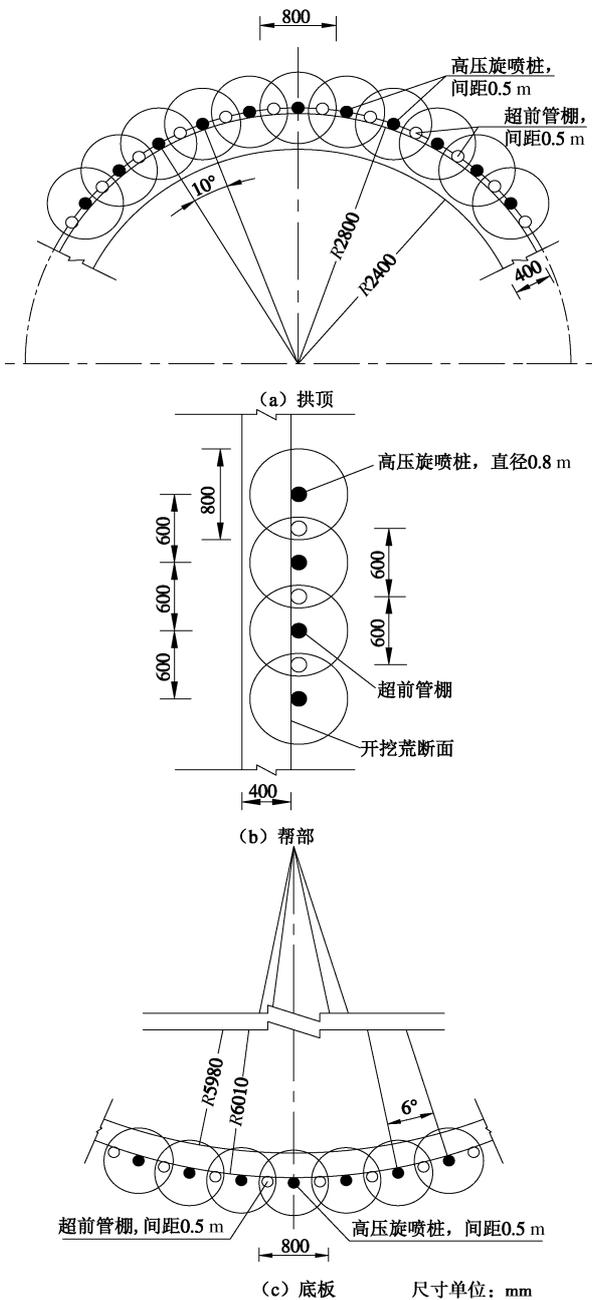


图 10 回风斜井高喷与管棚布置详图

Fig. 10 Details of high-pressure jet grouting pile and pipe shed in inclined shaft

段桩数均为 18, 第 4 段高喷桩参数详见表 1。注浆材料选用 42.5 普通硅酸盐水泥, 进浆密度为 1300~1490 kg/m<sup>3</sup>, 回浆密度 ≥ 1300 kg/m<sup>3</sup>; 水泥浆中加入氯化钙作为速凝早强剂, 其用量为水泥用量的 2%~4%; 在满足喷射工艺及喷射直径要求的前提下, 水灰比选用 1:1。根据国内外施工经验和现有设备的情况, 选用泵压为 20~30 MPa; 提升速度为 15~30 cm/min, 旋转速度为 20 r/min, 选用 2.5~3.0 mm 直径喷嘴。第 1 段~第 3 段管棚长为 21 m, 钻孔长为 20.8 m, 各段管棚数均为 16, 第四段管棚参数详见表 2, 注浆材料与注浆参数同上。

(2) 地表降水设计方案

斜井井筒穿过厚含水流砂层时, 由于流砂层厚度较大, 为保证高喷与管棚注浆加固帷幕止水防砂效果, 确保斜井井筒施工顺利通过该流砂层, 可采用在地表布置管井降水疏干的方法进行处理, 使斜井井筒工作面流砂层水位降低, 达到疏水、降压、固定砂层的目的。为保持斜井施工的干燥性和考虑到斜井进出流砂层两端的施工安全, 沿回风斜井井筒两侧对称布置 2 排共 14 个降水井, 其中 #1 抽水井点 8 个, #2 抽水井点 6 个, 地表降水井分布图如图 11 所示。

管井布置: 降水井直径为 φ 750 mm, 深度约为 60 m, 下入内径为 φ 600 mm 的预应力水泥焊接井管。井管实管部分长为 40 m, 花管部分长为 20 m, 花管外包一层 60 目尼纶网, 采用钢丝帮扎; 为防止细砂涌入, 在滤管外面再包裹一层无纺土工布, 井管与井壁间填入适量滤料(可用砂砾)。观测井的布置: 在斜井井筒影响范围外设置 4 个观测井兼降水井, 井径为 φ 750 mm, 井管内径为 φ 600 mm, 井管用材料及填入的滤料同降水井。抽水泵: 1 号井选用潜水泵的参数, 抽水量大于 30 m<sup>3</sup>/h, 扬程高度大于 60 m, 潜水泵入口直径为 100~200 mm; 2 号井选用 W 型真空泵。排水沟设计: 采用边沟排水, 边沟的尺寸为底边宽度为 0.5

表 1 各段超前管棚与钻孔长度

Table 1 Lengths of drilling and lead pipe shed

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
管棚长/m	27	27	27	27	27	27	27	27	27	18	18	18	12	12	12	12
钻孔长/m	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	17.8	17.8	17.8	11.8	11.8	11.8	11.8

表 2 各段超前管棚与钻孔长度

Table 2 Lengths of drilling and lead pipe shed

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
管棚长/m	27	27	27	27	27	27	27	27	27	18	18	18	12	12	12	12
钻孔长/m	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	26.8	17.8	17.8	17.8	11.8	11.8	11.8	11.8

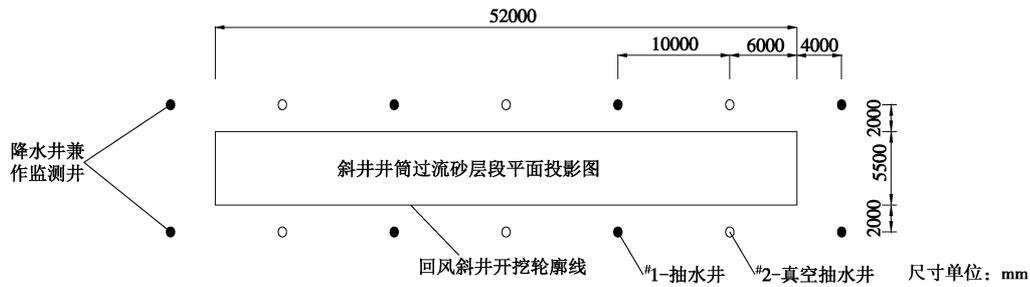


图 11 回风斜井地表降水井布置平面图

Fig. 11 Layout of dewatering wells in inclined shaft

m, 高度为 0.5 m, 坡比为 1 : 1, 沟底纵向坡度为 1%~3%。

(3) 施工工艺

在流砂层地段打高喷桩钻孔前首先做止浆墙, 防止流砂及浆液返流到斜井井筒内。施工时先打拱顶高喷桩孔, 然后打两帮高喷桩孔 (按左右对称施工), 最后打底板高喷桩孔, 且自上往下, 先中间后两边对称施工。高压喷射工艺流程: 定位放线→钻机就位→钻孔→测孔斜→高喷机械试喷→下喷管至设计深度→旋喷提升→喷至设计高程→孔口补浆→旋喷成桩。地表降水技术施工工艺: 平整场地→钻位放样→埋设护管→钻机就位→钻孔→终孔及清孔→下管→抽水→验收。

施工难、风险高的特点, 高压喷射注浆与管棚注浆技术难以实施, 且也很难保证注浆帷幕止水防砂效果, 可采用地面冻结技术对斜井井筒相应巨厚流砂层部位进行冻结加固, 在斜井井筒轮廓外形成全封闭冻结帷幕, 保证斜井井筒掘进施工安全。

回风斜井冻结段斜长为 130.5 m, 冻结段水平长度为 119.1 m。采用分段冻结, 上部冻结段 I 斜长为 70 m, 下部冻结段 II 斜长为 60.5 m。积极冻结期盐水温度为 -26℃~-30℃, 维护冻结期盐水温度为 -25℃~-28℃, 冻结壁平均温度设计为 -10℃。顶板冻结壁承受的压力为 1.7 MPa, 两侧冻结壁上下端承受的压力为 1.86, 1.93 MPa。上部及下部冻结壁厚度为 5 m, 两侧冻结壁厚度为 3.2 m。沿斜井长度方向布置 5 排冻结孔, A、E 冻结管向外发展冻土 1.05 m, A、B 和 E、D 的排距为 2.4 m, B、C、D 之间的排距为 2.7 m; 考虑到群孔冻结的影响, 确定 A、E 冻结孔间距为 1.5 m, B、C、D 三排冻结孔的间距为 2 m, 具体布置如图 12 所示。

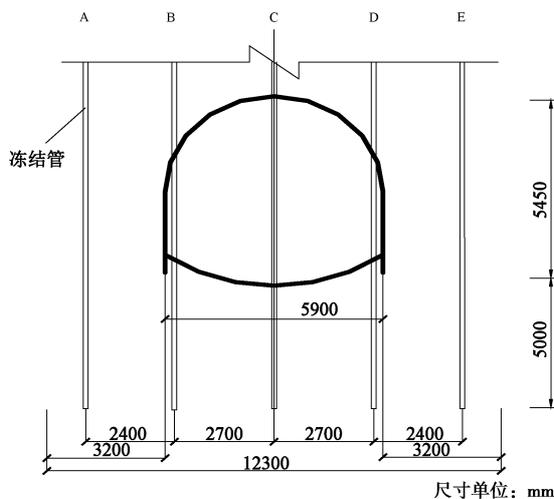


图 12 回风斜井冻结孔布置断面图

Fig. 12 Layout of freezing hole in inclined shaft

2.5 斜井井筒过巨厚流砂层冻结法加固技术方案

针对巨厚流砂层 (垂直厚度  $h > 20$  m) 厚度大、

(1) 回风斜井上部冻结段 I 的冻结管设计

回风斜井上部冻结段 I 水平长度为 64 m, A、E 排各布置冻结孔 43 个, B、C、D 三排各布置冻结孔 33 个。同时在 2 个躲避硐室外各布置 1 个加强孔, 共 2 个; 在冻结区域的两端各补充封闭孔 5 个, 共补充冻结孔 10 个。冻结管采用无缝钢管, 规格为  $\phi 127 \times 5$  mm。

(2) 回风斜井下部冻结段 II 的冻结管设计

回风斜井下部冻结段 II 水平长度为 55.1 m, A、E 排各布置冻结孔 37 个, B、C、D 排各布置冻结孔 28 个。同时在 2 个躲避硐室外各布置 1 个加强孔, 共 2

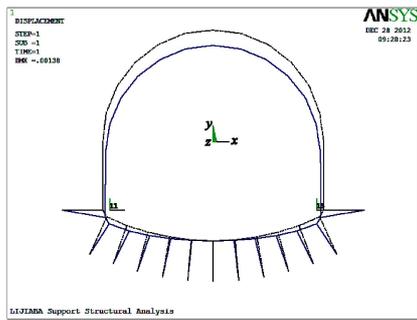
个, 在冻结区域的底端补充封闭孔 5 个。

### 3 井壁结构设计

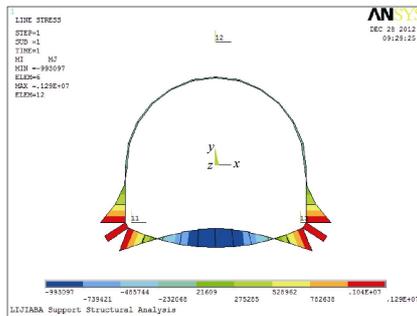
通过理论分析与数值计算, 确定回风斜井过 36 m 流砂层井壁结构为“型钢支架与喷网初次支护+钢筋混凝土二次衬砌”的复合结构, 并成功应用于工程实践, 较好地解决了过流砂层段斜井井壁结构的稳定与止水固砂等难题, 保证了斜井井筒的施工进度及安全。

#### (1) 井壁结构承受的荷载计算

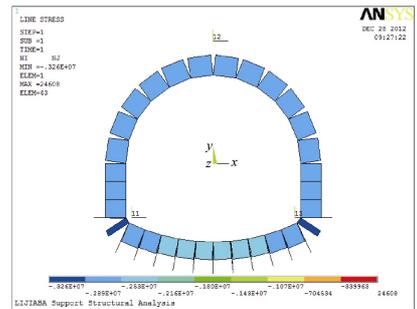
首先采用 ANSYS 数值计算软件, 基于牛顿-拉普森法的原理进行求解, 计算出斜井井筒拱顶、两帮及底板处的最大弯矩与轴力, 然后再进行型钢支架承载能力验算及二衬配筋计算, 数值计算结果如图 13 所示。分析可知, 拱顶与两帮处弯矩最大值为 509.7 kN·m, 最大轴力为 2810 kN; 帮角处弯矩最大值为 1290 kN·m, 最大轴力为 3254 kN; 底板弯矩最大值为 993.1 kN·m, 最大轴力为 2419 kN。



(a) 结构变形图



(b) 弯矩图



(c) 轴力图

图 13 斜井井筒变形、弯矩及轴力

Fig. 13 Deformation, bending moment and axial force of shaft lining

#### (2) 型钢支架承载能力验算及二衬配筋计算

U29 型钢支架截面面积  $S$  为  $37 \text{ cm}^2$ , 惯性矩  $I_x$  为  $612 \text{ cm}^4$ , 抗弯截面系数  $W_x$  为  $106 \text{ cm}^3$ , 混凝土采用 C40, 钢筋采用 HRB335。因篇幅限制, 计算过程省略, 计算结果如图 14, 15 所示, 回风斜井过 36 m 巨厚流砂段支护结构参数详见表 3。

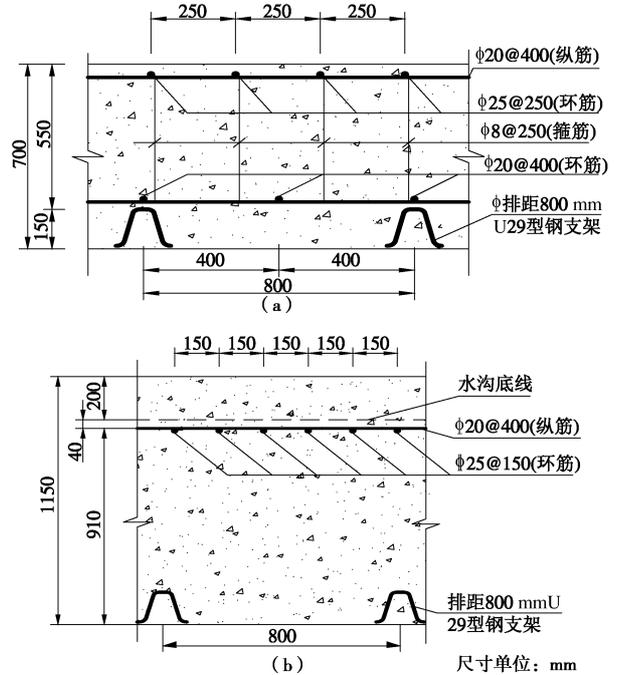


图 14 回风斜井井筒单跨长度范围内衬砌结构配筋

Fig. 14 Lining structure reinforcement of shaft lining in inclined shaft

### 4 斜井井壁结构稳定性监测结果分析

通过在斜井施工过程中安设位移、应力及渗流等传感器, 监测斜井井筒围岩收敛变形、支护结构受力及壁后渗水压力等; 通过对监测结果的分析, 优化斜井井筒施工技术与管理方案, 保证斜井过流砂层时的施工安全。

#### (1) 斜井井筒收敛变形监测结果分析

斜井井筒围岩收敛变形监测采用收敛计, 为了反映围岩位移的变形规律, 选用监测时间较长的监测断面进行分析, 部分斜井井筒围岩位移随时间变形关系曲线如图 16 所示。

由图 16 分析可知, 斜井井筒围岩位移随时间变化关系曲线为衰减稳定型, 即随着时间的延续, 围岩变形趋于稳定。主斜井井筒围岩变形, 经过 583 d 的监测, 顶底板移近量为 20.17 mm, 两帮移近量为 5 mm; 副斜井井筒围岩变形, 经过 604 d 的监测, 顶底板移近量为 4.57 mm, 两帮移近量为 3 mm; 回风斜井井筒围岩变形, 经过 644 d 的监测, 顶底板移近量为 12 mm, 两帮移近量为 4.5 mm。总的来说, 经过 1 a 以上的监

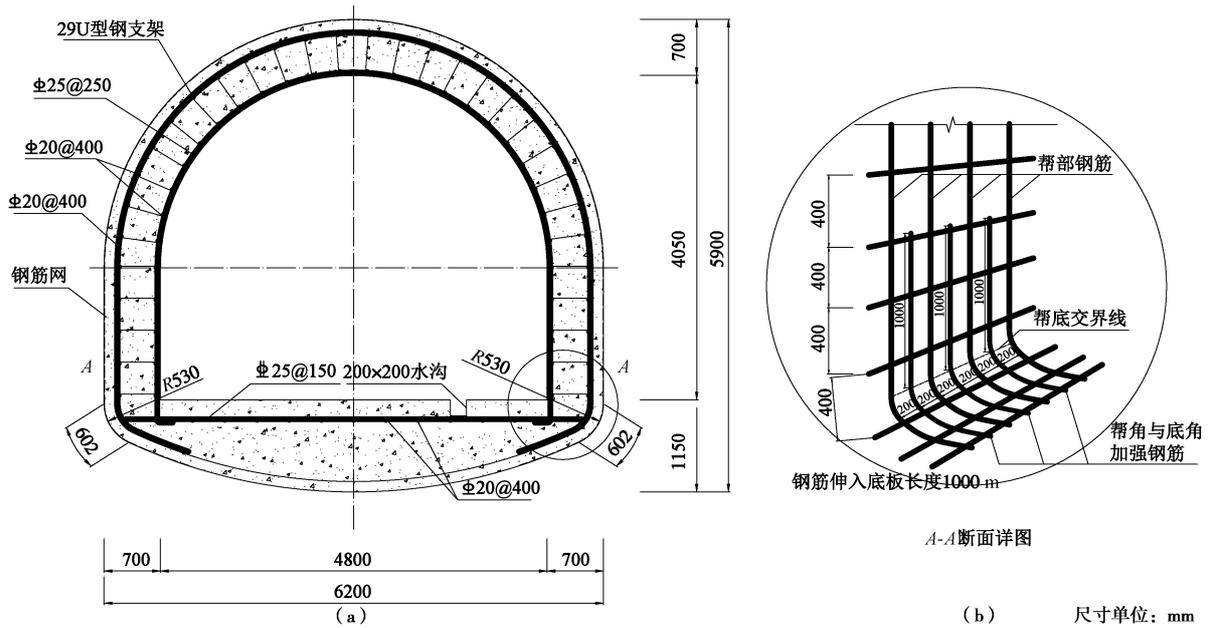


图 15 回风斜井井筒过 36 m 流砂层支护结构及衬砌结构配筋

Fig. 15 Lining structure reinforcement of shaft lining penetrating 36 m-drift sand stratum

表 3 回风斜井过 36 m 巨厚流砂段支护结构参数

Table 3 Supporting parameters of shaft lining penetrating 36 m-drift sand stratum

初次支护结构		混凝土		二衬钢筋混凝土结构									
型钢支架	钢筋网	喷层	强度	厚度	强度	厚度	顶帮内/外环向钢筋	径向钢筋	底板环向钢筋				
型号	排距	直径	网格	强度	厚度	等级	直径	间距	直径	间距			
	/m	/mm	/mm	等级	/mm		/mm	/mm	/mm	/mm			
U29	0.8	6.5	100×100	C25	150	C40	550	25/ 20	250/400	20	400	25	150

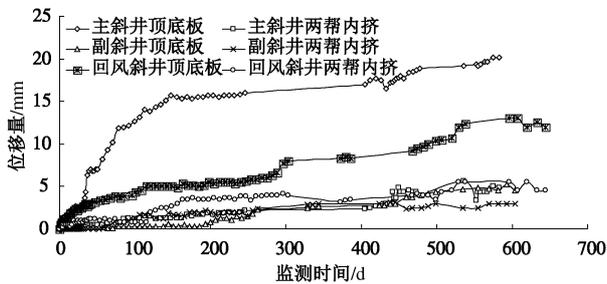


图 16 斜井井筒围岩位移随时间变化关系曲线

Fig. 16 Variation of displacement of surrounding rock with time  
测, 斜井井筒围岩变形量较小, 即表明支护结构有效地控制了井筒围岩的变形。

(2) 型钢支架受力监测结果分析

型钢支架受力监测采用压力计, 每个监测断面布置 3 个测点, 部分型钢支架受力随时间变化关系曲线如图 17 所示。

由图 17 分析可知, 主斜井顶部压力计数值为 0.2098 MPa, 拱腰部压力计数值为 0.1748 MPa, 帮部压力计数值为 0.0086 MPa, 底部压力数值为 0.1562 MPa; 回风斜井顶部压力计数值为 0.2682 MPa, 拱腰部压力计数值为 -0.0565 MPa, 帮部压力计数值为 0.3311 MPa, 底部压力计数值为 0.0493 MPa。压力计在安装初期由于井筒因开挖引起围岩应力重分布未达

到稳定, 造成各测点在监测初期波动较大, 顶、腰和帮部的压力都经过不同程度的增加达到峰值后又逐渐的降低, 随后趋于稳定; 底板的压力还在缓慢增加, 但基本达到稳定状态。

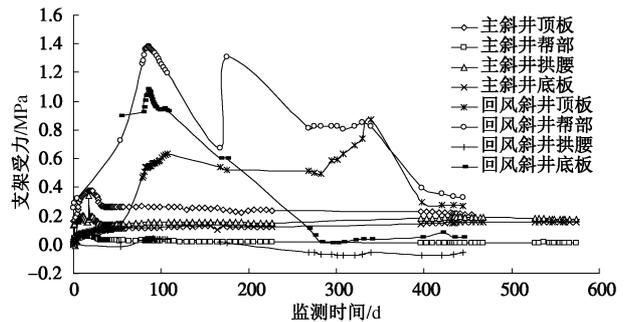


图 17 型钢支架受力随时间变化关系曲线

Fig. 17 Variation of stress of T steel bracket with time

(3) 钢筋混凝土二衬受力监测结果分析

在初次支护结构与钢筋混凝土衬砌之间布设压力计监测二衬受力情况, 每个监测断面布置 3 个测点, 部分二衬受力随时间变化关系曲线如图 18 所示。

由图 18 分析可知, 主斜井顶部压力计数值为 0.0534 MPa, 拱腰部压力计数值为 0.0922 MPa, 帮部压力计数值为 0.1247 MPa; 回风斜井顶部压力计数值为 0.1312 MPa, 拱腰部压力计数值为 0.1154 MPa, 帮

部压力计数值为 0.2232 MPa。总的来说, 斜井井筒钢筋混凝土衬砌受力较小, 基本经过不同程度的增加达到峰值后逐渐趋于稳定, 未出现因局部应力集中造成二衬开裂的现象。

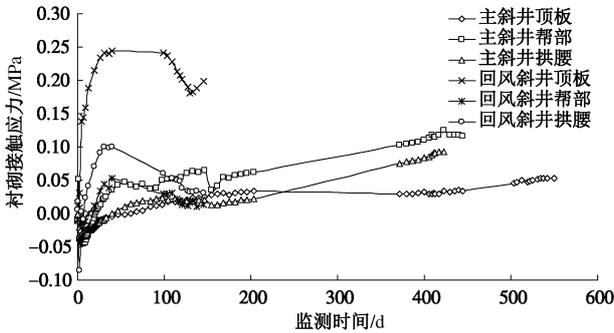


图 18 二衬受力随时间变化关系曲线

Fig. 18 Variation of stress of second liner with time

(4) 衬砌钢筋受力监测结果分析

为反映衬砌钢筋受力状态, 优化二衬配筋设计, 采用钢筋计进行了钢筋受力监测, 每个监测断面布置 3 个测点, 部分钢筋受力随时间变化关系曲线如图 19 所示。

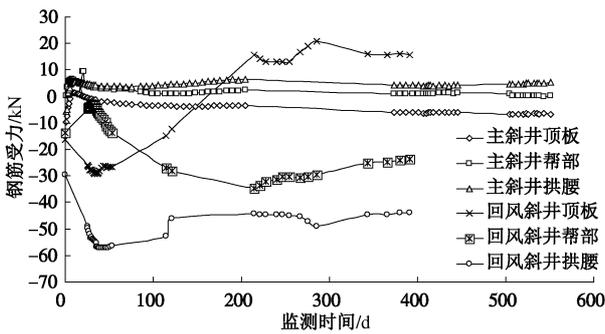


图 19 钢筋受力随时间变化关系曲线

Fig. 19 Variation of stress of reinforcing steel with time

由图 19 分析可知, 主斜井顶部钢筋计数值为 -6.5964 kN(受压), 拱腰部钢筋计数值为 5.359 kN(受拉), 帮部钢筋计数值为 0.0731 kN; 回风斜井顶部钢筋计数值为 15.517 kN, 拱腰部钢筋计数值为 -43.8287 kN, 帮部钢筋计数值为 -23.5742 kN。衬砌钢筋受力数值在监测初期波动均较大, 随着时间的延续, 钢筋受力基本趋于稳定状态; 钢筋受力合理, 未出现因钢筋受力超过其承载极限而被拉断的现象。

(5) 衬砌后渗水压力监测结果分析

为反映二衬结构防渗性能, 布设监测断面采用渗压计监测衬砌壁后渗水压力, 部分渗水压力随时间变化关系曲线如图 20 所示。

由图 20 分析可知, 主斜井顶部孔隙水压力计数值为 0.0065 MPa, 拱腰部孔隙水压力计数值为 0.0256 MPa, 帮部孔隙水压力计数值为 0.0402 MPa; 回风斜

井顶部孔隙水压力计数值为 0.0302 MPa, 拱腰部孔隙水压力计数值为 0.0319 MPa, 帮部孔隙水压力计数值为 0.03 MPa。因孔隙水压力在安装初期冻结温度场重新调整, 引起地下水流路径变化, 造成衬砌壁后渗水压力值从监测初期一直波动变化, 渗水压力出现负值可能是因冻结温度场对孔隙水压力计影响造成的, 未出现井壁结构渗水现象。

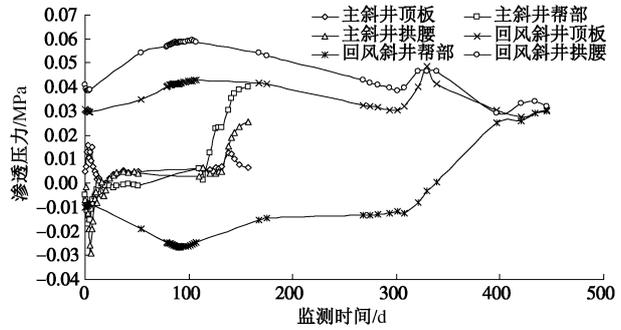


图 20 渗水压力随时间变化关系曲线

Fig. 20 Variation of stress water seepage pressure with time

## 5 结 论

(1) 采用工程地质钻探与地面直流电法勘探技术, 确定了流砂层的厚度与含水特征; 根据斜井井筒穿越流砂层的垂直厚度与施工技术水平, 将斜井井筒过流砂层技术方案进行分类研究, 形成了斜井井筒过流砂层成套施工技术。

(2) 基于理论分析与数值计算, 确定了斜井井筒支护结构承受的荷载, 提出了斜井井筒过流砂层时合理的井壁结构, 较好地解决了过流砂层段斜井井壁结构的稳定与止水固砂等难题, 保证了斜井井筒的施工进度及安全。

(3) 实时监测了斜井井筒围岩收敛变形、支护结构受力与壁后渗水压力等, 动态掌握了井壁结构变形与受力状态, 验证了斜井井筒过流砂层分类技术方案的合理性与可行性。

### 参考文献:

[1] 管彦刚. 斜井流砂层段的支护设计与施工[J]. 山西煤炭, 2004, 24(1): 41 - 43. (GUAN Yan-gang. The supporting design and construction of inclined shaft through drift sand[J]. Shanxi Coal, 2004, 24(1): 41 - 43. (in Chinese))

[2] 刘玉瑞, 史胜利, 焦清典. 小型矿井流砂问题处理的简易对策[J]. 中州煤炭, 2004(6): 38 - 39. (LIU Yu-rui, SHI Sheng-li, JIAO Qing-dian. Simple countermeasures of drift sand strata in small mines[J]. Zhongzhou Coal, 2004(6): 38 - 39. (in Chinese))

- [3] 阎波, 郑富德, 张广毅. 采用群孔疏干降水法穿越流砂层的施工技术[J]. 煤, 2002, **11**(3): 24 - 25. (YAN Bo, ZHENG Fu-de, ZHANG Guang-yi. Working technique about adopting group hole falling water method passing through quicksand level[J]. Coal, 2002, **11**(3): 24 - 25. (in Chinese))
- [4] 陆志东, 黄国柱, 易香保, 等. 井点降水法在斜井通过流砂层施工中的应用[J]. 建井技术, 2010, **31**(1): 10 - 12. (LU Zhi-dong, HUANG Guo-zhu, YI Xiang-bao, et al. Constructing technique of inclined shaft through drift sand strata via wellpoint dewatering[J]. Mine Construction Technology, 2010, **31**(1): 10 - 12. (in Chinese))
- [5] 韩温池, 闫华峰. 新元矿主斜井过流砂层施工[J]. 建井技术, 2005, **26**(3): 17 - 18. (HAN Wen-chi, YAN Hua-feng. Constructing technique of inclined shaft through drift sand strata[J]. Mine Construction Technology, 2005, **26**(3): 17 - 18. (in Chinese))
- [6] 王平. 超前管棚预支护法在通过流砂层中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2008, **18**(14): 221 - 222. (WANG Ping. The application of the lead pipe-shield pre-supportin passing through the quicksand bed[J]. Tech Information Development & Economy, 2008, **18**(14): 221 - 222. (in Chinese))
- [7] 关保树. 旋喷桩法在建井过流砂层的应用[J]. 中州煤炭, 1988(5): 27 - 29. (GUAN Bao-shu. Constructing technique of inclined shaft through drift sand strata via jet grouting pile construction[J]. Zhongzhou Coal, 1988(5): 27 - 29. (in Chinese))
- [8] 尚念军. 高压旋喷在斜井井筒过流砂层施工中的技术研究[J]. 煤炭技术, 2006, **25**(10): 92 - 94. (SHANG Nian-jun. Study of high-pressure rotary jet grouting in inclined shaft construction crossing through drift sand ground[J]. Coal Technology, 2006, **25**(10): 92 - 94. (in Chinese))
- [9] 赵老生. 注浆固化在斜井井筒过流砂层施工中的应用[J]. 技术与经济, 2011(2): 97 - 99. (ZHAO Lao-sheng. Constructing technique of inclined shaft through drift sand strata via clay-solidified grouting curtain[J]. Technology and the New Economy, 2011(2): 97 - 99. (in Chinese))
- [10] 李春常, 张建利, 常晓东, 等. 鹤煤三矿新副井含水砂层段施工方案[J]. 煤矿安全, 2011(3): 53 - 54. (LI Chun-chang, ZHANG Jian-li, CHANG Xiao-dong, et al. Constructing technique of inclined shaft through drift sand strata in He coal mine[J]. Coal Mine Safety, 2011(3): 53 - 54. (in Chinese))
- [11] 谷松山, 孙清华. 东峰煤矿良户立风井井筒过流砂层施工[J]. 建井技术, 2009, **30**(2): 10 - 11. (GU Song-shan, SUN Qing-hua. Construction of Lianghu vertical shaft in Dongfeng coal mine through flow sand layer[J]. Mine Construction Technology, 2009, **30**(2): 10 - 11. (in Chinese))
- [12] 朱宗平, 黄鹏. 丰龙主立井过流砂层的施工技术[J]. 江西煤炭科技, 2009, **30**(2): 10 - 11. (ZHU Zong-ping, HUANG Peng. Constructing technique of inclined shaft through drift sand strata in Fenglong coal mine[J]. Coal science and technology in Jiangxi, 2009, **30**(2): 10 - 11. (in Chinese))
- [13] 陈祥恩, 杜长龙. 马泰壕煤矿斜井冻结施工技术[J]. 煤炭科学技术, 2009, **37**(11): 21 - 23. (CHEN Xiang-en, DU Chang-long. Freezing construction technology of mine inclined shaft in Mataihao mine[J]. Coal Science and Technology, 2009, **37**(11): 21 - 23. (in Chinese))
- [14] 安良友. 板石煤矿斜井井筒过流砂层方案及施工方法总结[J]. 山东煤炭科技, 2010(5): 12 - 13. (AN Liang-you. Constructing technique of inclined shaft through drift sand strata in Banshi coal mine[J]. Coal science and technology in Shandong, 2010(5): 12 - 13. (in Chinese))
- [15] 刘英杰, 李成涛. 斜井穿越流砂层施工[J]. 建井技术, 2006, **27**(4): 2 - 4. (LIU Yin-jie, LI Cheng-tao. Constructing technique of inclined shaft through drift sand strata[J]. Mine Construction Technology, 2006, **27**(4): 2 - 4. (in Chinese))
- [16] 杨法军, 田锡平, 陈三伟. 斜井穿过四层流砂施工的安全技术措施[J]. 煤矿开采, 2007, **12**(5): 44 - 45. (YANG Fa-jun, TIAN Xi-ping, CHEN San-wei. Safety technology measure during constructing slope shaft through 4 quicksand seams[J]. Coal Mining Technology, 2007, **12**(5): 44 - 45. (in Chinese))
- [17] 宁夏煤炭勘察工程公司. 宁夏鲁能能源开发有限公司积家井矿区李家坝煤矿主斜井、副斜井及回风斜井井筒检查孔地质报告[R]. 银川: 宁夏煤炭勘察工程公司, 2010. (Ningxia Coal Exploration and Engineering Company. Check hole geological report of Lijiaba main shaft, vice inclined shaft and air return inclined shaft in Jijiajing mine area of Ningxia luneng energy development co.[R]. Yinchuan: Ningxia Coal Exploration and Engineering Company, 2010. (in Chinese))