



厚松散层薄基岩地层井筒偏斜综合治理技术

程桦 彭世龙 姚直书 荣传新 蔡海兵

引用本文：

程桦, 彭世龙, 姚直书, 等. 厚松散层薄基岩地层井筒偏斜综合治理技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 260–271.
CHENG Hua, PENG Shilong, YAO Zhishu. Comprehensive treatment technology for wellbore deflection in thick loose bed and thin bedrock formation[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 260–271.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

邻近厚松散层既有立井井筒地面注浆地层加固技术

Ground grouting stratum reinforcement technology for thick loose layer adjacent to existing shaft
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 127–134 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/eb8ca742-1ca3-46f9-ad54-ab618e39e7df>

厚表土薄基岩凿井突水溃砂井筒破坏治理技术研究

Study on shaft damage control technology of water inrush and sand burst in drilling process with thick topsoil and thin bedrock
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 176–185 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.04.021>

厚松散层薄基岩下开采地表变形规律—以鲁南矿区为例

Surface deformation law of mining under thick loose layer and thin bedrock: taking the southern Shandong Mining Area as an example
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 11–23 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1451>

厚松散层薄基岩坚硬顶板工作面覆岩破坏电法监测

Electrical monitoring of overburden failure in hard roof working face with thick loose layer and thin bedrock
煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c2b9a518-fdca-4f93-9f37-99e610105dc0>

基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术研究

Research on water leakage control technology of inclined shaft of coal mine based on cement soil curtain of equal thickness
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 224–233 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0313>

黔南灯影组巨厚含水层立井井筒帷幕注浆参数研究

Study on curtain grouting parameters of vertical shaft in Dengying formation of southern Guizhou with thick aquifer
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 71–77 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.03.008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

程 桦, 彭世龙, 姚直书, 等. 厚松散层薄基岩地层井筒偏斜综合治理技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 260–271.

CHENG Hua, PENG Shilong, YAO Zhishu, et al. Comprehensive treatment technology for wellbore deflection in thick loose bed and thin bedrock formation[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 260–271.

厚松散层薄基岩地层井筒偏斜综合治理技术

程 桦^{1,2}, 彭世龙^{1,2}, 姚直书¹, 荣传新¹, 蔡海兵¹

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽建筑大学 建筑结构与地下工程安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230022)

摘要: 针对厚松散层薄基岩地层井筒偏斜综合治理技术难题, 以山东巨野矿区郭屯煤矿偏斜井筒地面注浆治理工程为背景, 基于井筒松散层段偏斜与竖向压缩变形共存且向非对称开采工作面方向偏斜的全新破损特征, 揭示郭屯煤矿井筒偏斜与竖向压缩变形机理, 分析认为该2种特征分别是煤层非对称开采引发的底含非均匀疏水固结沉降叠加作用下地层水平倾覆推力和竖向附加力所致。本着确保安全、不停产治理的原则, 制定了在役偏斜井筒不停产地面注浆综合治理方案, 研发了系列井筒偏斜综合治理技术: ①保护在役井筒“泄压-预警”双控地面高压注浆技术; ②厚松散层单孔多层次注浆新型套管与施工工艺; ③厚松散层地面注浆参数工程化确定方法; ④在役井筒不停产运营下深孔高压注浆治理预警技术。综合监测结果表明: 郭屯煤矿主、副、风3个偏斜井筒治理工程注浆过程中严格按照厚松散层薄基岩条件下偏斜井筒不停产综合治理技术进行实施, 完成注浆孔钻探工程量31 026.8 m, 注浆量达到35 536.66 m³, 实现了矿井不停产注浆治理; 治理后井筒向北向西不再继续偏移, 主井井筒注浆期井口处向北和向西偏斜量分别减小12 mm和18 mm, 副井井筒井口处向北和向西分别减小13 mm和41 mm, 注浆结束1 a内井筒整体偏斜量仍继续减小并有回正趋势, 且井筒周边下沉速率减缓, 确保了井筒运营安全。研究成果在郭屯煤矿厚松散层薄基岩地层偏斜井筒地面高压注浆治理工程得到了成功应用, 为今后在类似工程中应用提供参考依据和工程经验。

关键词: 厚松散层; 井筒偏斜; 井筒支护; 不停产; 地面注浆; 泄压孔

中图分类号: TD352 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)01-0260-12

Comprehensive treatment technology for wellbore deflection in thick loose bed and thin bedrock formation

CHENG Hua^{1,2}, PENG Shilong^{1,2}, YAO Zhishu¹, RONG Chuanxin¹, CAI Haibing¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Building Structure and Underground Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China)

Abstract: Aiming at the technical problems of comprehensive treatment of shaft deflection in thick loose bed and thin bedrock strata, taking the ground grouting treatment engineering of the deflected shaft in Guotun Coal Mine in Juye Mining Area, Shandong Province as the background, new damage characteristics based on the coexistence of deviation and vertical compression deformation of the loose layer section in the shaft and the deviation to the direction of asymmetric mining face, the mechanism of shaft deflection and vertical compression deformation in Guotun Coal Mine is revealed. The analysis shows that the two characteristics are respectively caused by the horizontal overturning thrust and vertical additional force of the stratum under the superposition action of the non-uniform hydrophobic consolidation settlement of the bottom aquifer caused by the asymmetric mining of the coal seam. In line with the principle of ensuring safety and non-stop production treatment, a comprehensive treatment plan for ground grouting of in-service deflected shaft without stopping production has been formulated, and a series of comprehensive treatment technologies for deflected shaft have been developed: ① The dual control ground high-pressure grouting technology of “pressure relief and early warning” for protecting the shaft in service; ② New casing and

收稿日期: 2023-01-12 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0050

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51874005, 52004003); 矿山地下工程教育部工程研究中心开放研究资助项目(JYBGCZX2021101)

作者简介: 程 桦(1956—), 男, 安徽巢湖人, 教授, 博士生导师。E-mail: hcheng@aust.edu.cn

通讯作者: 彭世龙(1991—), 男, 安徽六安人, 讲师, 博士。E-mail: 974860806@qq.com

construction technology for single hole and multi-layer grouting in thick loose layer; ③ Engineering determination method of ground grouting parameters in thick loose layer; ④ Early warning technology of deep hole high-pressure grouting treatment under the condition of continuous production operation of the in-service shaft. The comprehensive monitoring results show that during the grouting process of the main, auxiliary and wind deflected shaft treatment projects of Guotun Coal Mine, the comprehensive treatment technology of continuous production of the deflected shaft under the condition of thick loose bed and thin bedrock was strictly followed, and the drilling quantity of the grouting hole was 31 026.8 m, the grouting quantity reached 35 536.66 m³, realizing the grouting treatment of the shaft without stopping production. After the treatment, the shaft no longer deviates from north to west, during the grouting period of the main shaft, the deviation from the wellhead to the north and the west decreased by 12 mm and 18 mm respectively, and the deviation from the wellhead of the auxiliary shaft to the north and the west decreased by 13 mm and 41 mm respectively. Within one year after the completion of the grouting, the overall deviation of the shaft continues to decrease and has a positive trend, and the sinking rate around the shaft slows down, which ensures the safety of the shaft operation. The research results have been successfully applied in the ground high-pressure grouting treatment project of the deflected shaft in thick loose bed and thin bedrock strata of Guotun Coal Mine, providing reference and engineering experience for the future application in similar projects.

Key words: thick loose layer; shaft deflection; shaft support; non stop production; ground grouting; pressure relief hole

0 引言

自1987年以来,我国黄淮和东北地区已有200多个煤矿立井井筒相继出现竖向受压破损现象,严重威胁矿井生产安全,造成重大经济损失。国内建井界有关专家通过多年研究发现^[1-4],上述受压破损井筒穿越的松散层底部含水层(下称“底含”)多直接覆盖在煤系地层之上,煤矿开采及生产导致井筒四周底含发生疏水固结沉降,产生作用于井壁的竖向附加力,该力是导致上述井筒破损的主因。对此,根据井筒破损机理,提出了基于“竖让横抗”^[5-6]设计原则的“开切卸压槽+壁后注浆”和“地面注浆加固井筒周围地层”^[7-12]2种治理方法,取得了预期良好效果,特别是前者应用最为广泛。

近年来,鲁西矿区厚松散层薄基岩条件煤矿出现了深立井因采掘引起的井筒偏斜和破损现象^[13-19]。如2015年郭屯煤矿主、副井井筒最大偏斜量分别达284 mm和299 mm;陈庄副井厚松散层556 m,井筒最大偏斜量达30 mm,严重威胁矿井生产安全。分析表明,该类地层井筒破损时其松散层段偏斜与竖向压缩变形共存,且井筒均向非对称开采(单翼开采)工作面方向发生偏斜,属一种全新的井筒偏斜破损形态。

在煤矿立井井筒偏斜机理研究方面,袁力等^[20]就新河煤矿主井井筒偏斜及地表近井点偏移现状与原因进行了初步分析,认为该矿工业广场范围内煤柱不对称开采引起地层产生向采空区方向移动带动井筒产生变形是造成该矿井筒偏斜的原因,并制定了对应的监控对策;刘焕新^[21]根据张双楼煤矿主、副、新副井偏斜数据,从矿区地层结构、含水层水位变化及井筒周边取水情况3个方面定性分

析,表明地下水位下降及取水不均匀是井筒偏斜致因,而“上松下稳”地层结构导致井壁破裂;于保华^[22]针对大黄山矿一号副井井筒偏斜破损形态,从区域岩层性质和采矿因素2个方面对其偏斜原因进行了分析,认为该矿副井井筒所处软弱层受采矿影响产生不均匀水平移动造成了井筒发生偏斜破损。综上可见,上述研究主要针对工业广场保护煤柱非对称开采及地下水非对称取水引起的井筒偏斜机理开展过少量定性探究,但类似郭屯煤矿厚松散层薄基岩条件下井筒偏斜机理及防治技术缺乏研究和工程实践。

为此,以山东巨野矿区郭屯煤矿井筒偏斜综合治理为工程背景,简述郭屯煤矿井筒偏斜特征,分析其偏斜致因,重点介绍本着确保安全、不停产治理的原则,制定的在役偏斜井筒不停产地面注浆综合治理方案,以及相应的综合治理施工关键技术,为今后类似井筒偏斜破损治理与预防提供有益借鉴。

1 工程概况

郭屯煤矿位于巨野煤田中北部,为第四系覆盖的全隐伏式井田,基岩岩性以泥岩、粉砂岩为主,平均厚度为260 m,上覆巨厚新生界松散层厚530~580 m,设计生产能力2.4 Mt/a。郭屯煤矿工业广场内主、副、风井净直径分别为5.0、6.5、5.5 m,井深853.0、882.0、773.0 m,检查孔揭露的地层自上而下分为第四系、新近系二叠系、石炭系和奥陶系。根据工业广场内井检孔地质报告可将新生界松散层划分为3个含水层和2个隔水层,基岩段划分为2个含水层和2个隔水层,具体情况见表1。

上第三系下部含水层为新近系最下部的含水地层,常称为“底含”。经探测发现,郭屯煤矿整个矿区

表1 含、隔水层(组、段)划分
Table 1 Division of aquifer and aquifuge

| 地层 | 含隔水层 | 底板深度/m | | | 厚度/m | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 检1孔(风) | 检2孔(副) | 检3孔(主) | 检1孔(风) | 检2孔(副) | 检3孔(主) |
| 第四系 | 含水层 | 86.3 | 85.20 | 85.60 | 37.30 | 37.17 | 45.75 |
| | 隔水层 | 136.2 | 138.30 | 136.10 | 44.80 | 48.20 | 45.70 |
| 上第三系 | 上部含水层 | 332.2 | 334.30 | 333.60 | 73.00 | 78.10 | 74.70 |
| | 中部隔水层 | 544.8 | 546.60 | 542.00 | 159.70 | 144.00 | 149.86 |
| 上石盒子组 | 下部含水层 | 583.1 | 586.22 | 587.40 | 25.50 | 29.92 | 37.00 |
| | 风氧化带上隔 | 591.8 | 613.10 | 609.80 | 8.57 | 26.46 | 22.06 |
| 风氧化带中含 | 风氧化带下隔 | 660.3 | 666.20 | 660.20 | 50.73 | 37.22 | 36.35 |
| | 风氧化带下含 | 668.9 | 680.39 | 674.00 | 8.46 | 13.88 | 13.60 |
| | 上 | 688.1 | 698.10 | 697.40 | 18.56 | 17.53 | 18.12 |
| | 下 | 854.0 | 883.48 | 874.77 | 57.18 | 68.14 | 49.12 |

内底含发育均较厚,东南与西北两侧相对较薄,厚度为35~120 m,且底含下部无隔水层,直接覆盖在上石盒子组的基岩面上。由于基岩风氧化带构造与风化裂隙发育,导致底含与基岩下部的含水层间存在水力联系,极易受煤层开采形成的导水裂隙带疏水影响而发生疏水固结。分析该矿矿井涌水疏放量统计资料发现,郭屯煤矿建井初期矿井涌水量在50 m³/h左右,受煤层开采影响后增至500~600 m³/h,矿井涌水疏放量增加了10倍(图1)。

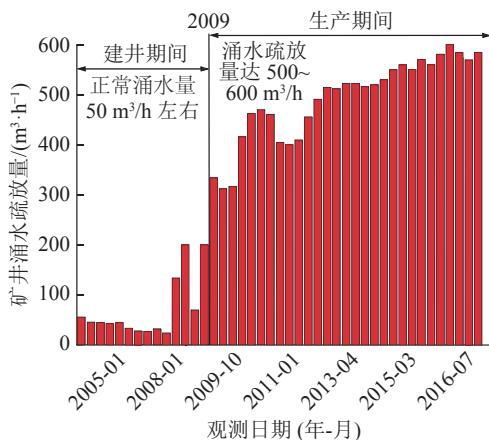


图1 矿井涌水疏放量随时间的关系

Fig.1 Relationship between mine water inflow and drainage volume with time

郭屯煤矿地质条件属典型的厚松散层薄基岩地层,其水文地质条件复杂。虽然该矿主采煤层为3号煤层,煤矿生产疏放水主体为二叠系山西组3号煤顶、底板砂岩裂隙含水层,但由于新生界松散层深厚且底含直接覆盖于煤系地层之上,加之风化基岩地层裂隙发育,松散层底部含水层水体与煤矿生产疏放水主体具有一定水力联系(图2)。监测表明:截

至2017年底,该矿底含水位由建井前的-6.35 m下降至-203.45 m。

2 井筒偏斜特征与机理分析

2.1 井筒偏斜特征分析

郭屯煤矿自2009年正式投产以来,工业广场地表近井点出现较大沉降和水平位移,于2015年左右发现,该矿主、副、风3个立井井筒均在厚松散层段向首采工作区方向(西北方向)产生不同程度的偏斜,

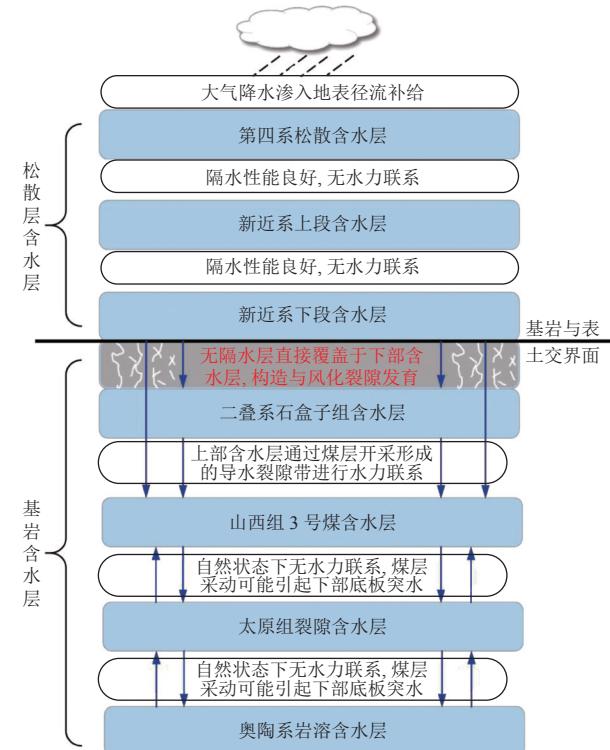


图2 郭屯煤矿各含水层水力联系
Fig.2 Hydraulic connection of each aquifer in Guotun Coal Mine

且井筒预留可缩性接头压缩变形闭合,罐道梁发生竖向弯曲;主、副井罐道不垂直,罐笼与井壁安全距离小于100 mm,已不满足《煤矿安全规程》^[23]安全间隙150 mm的要求;风井井筒出现梯子间多处损坏、井筒内壁混凝土脱落和钢筋外露等现象。

经测量,主井井筒向西最大偏斜量为284 mm,向北最大偏斜量为30 mm;副井井筒向西最大偏斜量为299 mm,向北最大偏斜量为83 mm。主、副井筒沿深度方向偏斜趋势如图3所示,由图3分析可知,郭屯煤矿主、副井筒沿深度方向偏斜量变化趋势基本一致,且主要向西偏斜,向北偏斜量很小;位于基岩层的井筒偏斜量较小,进入松散层后,井筒逐渐向西偏斜,且越接近地表,井筒偏斜量越大,最大偏斜量均发生在井口附近。

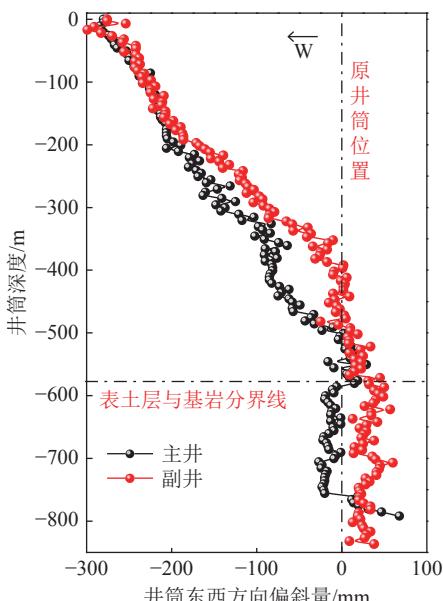


图3 不同地层深度井筒偏斜量

Fig.3 Shaft deflection at different depths

2.2 井筒偏斜机理分析

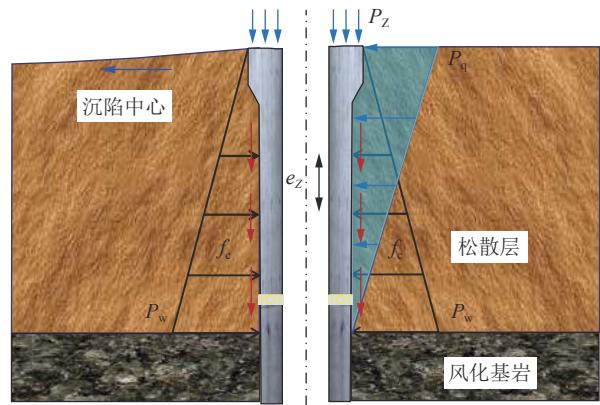
郭屯煤矿地层属于典型的厚松散层薄基岩地层,考虑到该矿松散层段井筒偏斜与竖向压缩变形2种破損形态共存,分析其受力状态如图4所示。

运用煤层开采沉陷学和土体疏水固结沉降理论,根据叠加原理建立了厚松散层薄基岩煤层开采与底含疏降水共同作用下地层移动变形预计模型^[13,15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} W(x,y,z) = W^I(x,y,z) + W^{II}(x,y,z) \\ U_\phi(x,y,z,\varphi) = \left[b_1 r_1 \frac{\partial W^I(x,y,z)}{\partial x} + b_2 r_2 \frac{\partial W^{II}(x,y,z)}{\partial x} \right] \cos \varphi + \\ \quad \left[b_1 r_1 \frac{\partial W^I(x,y,z)}{\partial y} + b_2 r_2 \frac{\partial W^{II}(x,y,z)}{\partial y} \right] \sin \varphi \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: $W(x,y,z)$ 为地层总沉降值; $U_\phi(x,y,z,\varphi)$ 为地层任

意 φ 方向上的水平位移; $W^I(x,y,z)$ 和 $W^{II}(x,y,z)$ 分别为煤层开采和底含疏水引起的地层沉降变形; b_1 为煤层开采引起的地层水平移动系数; b_2 为底含疏水引起的地层水平移动系数; r_1 为煤层开采引起的地层主要影响半径; r_2 为底含疏水引起的地层主要影响半径。



P_w —地压; P_z —井塔及井筒自重; P_q —井筒水平倾覆力;
 f_c —竖向负摩擦力; e_z —温度应力

图4 偏斜井筒受力状态

Fig.4 The force state of deflection shaft lining

由式(1)计算表明,郭屯煤矿底含直接覆盖于上石盒子组风化基岩面上,煤层开采导致厚松散层底含疏水固结沉降,采煤与底含疏水的共同作用,减缓了地层沉降边缘收敛速度,大幅增加了地层下沉和水平移动影响范围。根据该矿井筒偏斜实测数据,通过厚松散层薄基岩煤层开采与底含疏降水共同作用下地层移动变形预计模型可反演计算得到松散层主要影响角正切值 $\tan \beta=0.6$,远小于《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》^[24](2017版)(以下简称《规范》)规定的2.41~3.54,如图5所示。

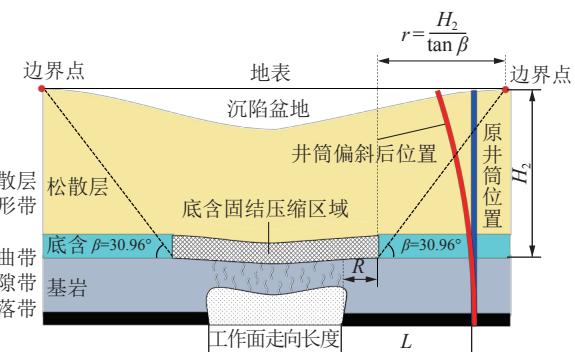


图5 井筒偏斜示意

Fig.5 Schematic of shaft deflection

由此可见,导致该矿井筒偏斜的机理为:按现行《规范》设计工业广场保护煤柱时,未考虑采煤作用

下底含非对称疏水固结对沉降边界角(移动角)的影响,导致工业广场井筒保护煤柱范围留设不足,在首采区非对称回采(西北方向)条件下,厚松散层受采煤与底含非对称疏水固结共同作用向煤层开采方向发生水平移动,致使井筒偏斜,如图6所示。

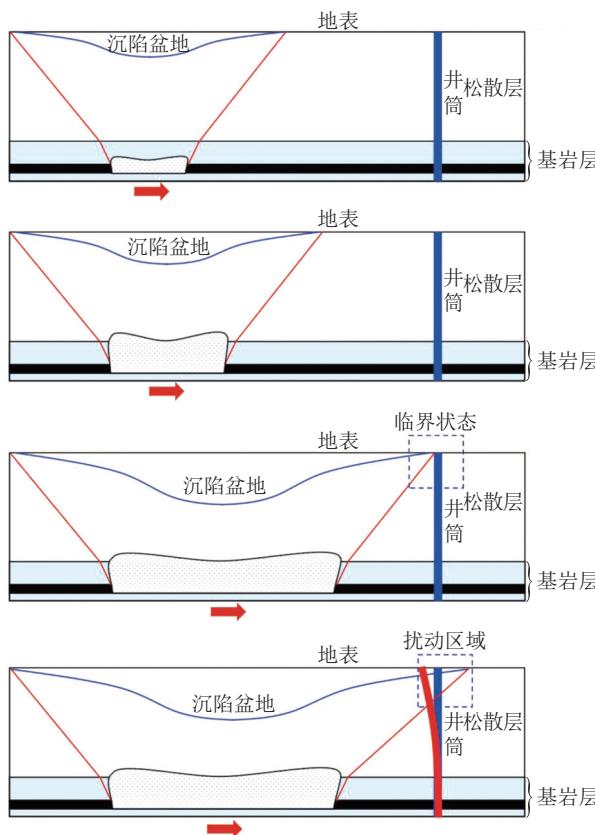


图6 煤层开采与底含疏水作用下井筒受地层扰动过程示意
Fig.6 Schematic of shaft disturbed by stratum under the action of coal seam mining and bottom aquifer drainage

3 偏斜井筒不停产地面注浆综合治理方案

基于对井筒竖向变形与偏斜机理分析结果,本着确保安全、不停产治理的原则,采用井筒周边地面钻孔注浆方式,制定了在役偏斜井筒不停产地面注浆综合治理方案。

3.1 方案设计原则

3.1.1 布孔原则

主-风井井筒视为整体单元考虑,副井井筒视为独立单元,兼顾两单元间布孔注浆影响。

注浆孔(外圈孔)距离井筒外壁大于浆液扩散半径2倍以上,相邻注浆孔之间的距离小于1.8倍浆液扩散半径,泄压孔布孔圈径大于原冻结孔布孔圈径(图7)。

井筒周边布设2~3圈孔,内圈作泄压孔,中圈作注浆孔,外圈作机动孔;一个注浆孔注浆期间,确

保至少有2个泄压孔(或相邻注浆孔)进行高压注浆压力控制。

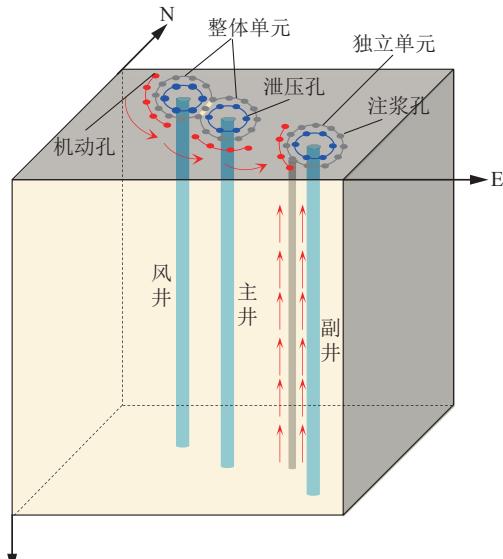


图7 工业广场井筒群注浆钻孔布设
Fig.7 Layout of grouting boreholes in shaft group of industrial square

3.1.2 注浆段确定原则

3个井筒注浆层段统一划分,以砂层为主要注浆段,砂层和黏土层互层较多层段为次要注浆段,一次注浆段高控制在25~50 m。

由于底含与新近系上段含水层及第四系松散含水层无水力联系,故以400 m以下注浆层段为主要注浆层位,加密布置注浆段。

相邻注浆段与注浆段之间 $\varnothing 139.7\text{ mm} \times 6.2\text{ mm}$ 的实管段长度不得小于20 m,以防窜浆。

3.1.3 注浆量确定原则

根据注浆层段地层有效孔隙率,将受注地层视为均质地层,通过计算获得不同注浆压力下考虑黏度时变性的浆液扩散半径^[25],经计算按扩散半径8 m确定注浆量;400 m以下注浆层段足量注浆,其余注浆层段适量减小。

3.1.4 注浆压力确定原则

注浆时,井壁附加注浆受力为0;各注浆段受注点压力为静水压力的2.0~2.5倍^[14,25-26]。

3.1.5 注浆孔施工原则

先施工泄压孔,再施工注浆孔;先西北方向注浆,后东南方向注浆;先风井井筒注浆,后主井井筒注浆,再副井井筒注浆。

3.2 注浆钻孔深度

为防止底含注浆期间浆液窜入基岩风化带,注浆钻孔预留厚4 m左右的保护层,即注浆深度为基岩界面深度之上4 m左右。泄压孔钻至基岩与松散

层交界面,各井筒周边注浆钻孔深度见表2。

3.3 注浆钻孔注浆层位划分

根据郭屯煤矿偏斜井筒不停产地面注浆综合治理方案设计原则,确定各井筒注浆层段划分见表3。

3.4 注浆钻孔平面布置

根据郭屯煤矿地面注浆现场试验成果分析,确定注浆孔布设圈径为30 m,泄压孔布设圈径为16 m,机动注浆孔布设圈径为38 m,注浆孔与泄压孔插花

布置;注浆扩散半径按8 m进行设计,钻孔设计孔间距为14 m左右。

表2 井筒注浆孔与泄压孔钻孔深度统计

Table 2 Statistics of borehole depth of shaft grouting hole and pressure relief hole

| 注浆孔深度/m | | | 泄压孔深度/m | | |
|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| 主井井筒 | 副井井筒 | 风井井筒 | 主井井筒 | 副井井筒 | 风井井筒 |
| 576.00 | 577.00 | 567.00 | 580.00 | 581.00 | 571.00 |

表3 井筒注浆层段划分

Table 3 Statistics of division of shaft grouting sections

| 时段 | 起止深度/m | | | 段长/m | | |
|-----|---------|---------|---------|------|------|------|
| | 主井井筒 | 副井井筒 | 风井井筒 | 主井井筒 | 副井井筒 | 风井井筒 |
| 第七段 | 150~192 | 150~192 | 150~192 | 42 | 42 | 42 |
| 第六段 | 219~265 | 219~265 | 219~265 | 46 | 46 | 46 |
| 第五段 | 292~319 | 292~319 | 292~319 | 27 | 27 | 27 |
| 第四段 | 348~375 | 348~375 | 348~375 | 27 | 27 | 27 |
| 第三段 | 405~450 | 405~450 | 405~450 | 45 | 45 | 45 |
| 第二段 | 477~510 | 477~510 | 477~510 | 33 | 33 | 33 |
| 第一段 | 541~576 | 541~577 | 541~567 | 35 | 36 | 26 |
| 合计 | | | | 255 | 256 | 246 |

1)主-风井井筒整体单元布孔方式如图8所示,其中,主井井筒注浆孔11个,孔间距13.84 m,泄压孔7个(包括主1、主检孔),孔间距9.81~15.00 m;风井井筒注浆孔11个,孔间距13.84 m,泄压孔7个(包括风检2孔),孔间距10.534~15.00 m。

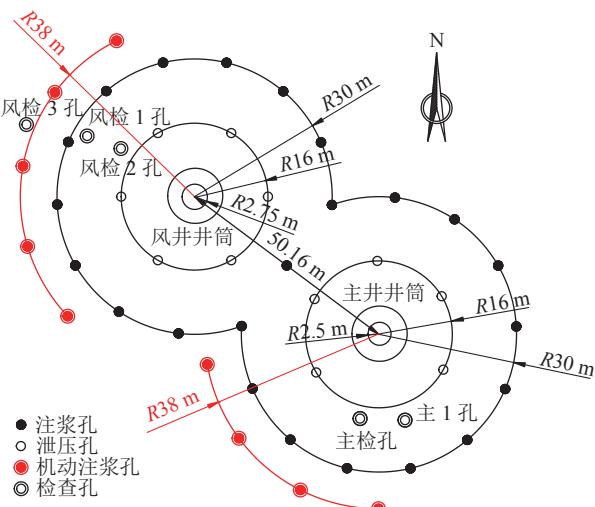


图8 主-风井整体单元布孔方式

Fig.8 Hole arrangement mode of integral unit of main-air shaft

2)副井井筒独立单元布孔方式如图9所示,布设注浆孔14个,孔间距13.35 m,泄压孔8个(包括副检孔、副1孔),孔间距10.00~13.02 m。

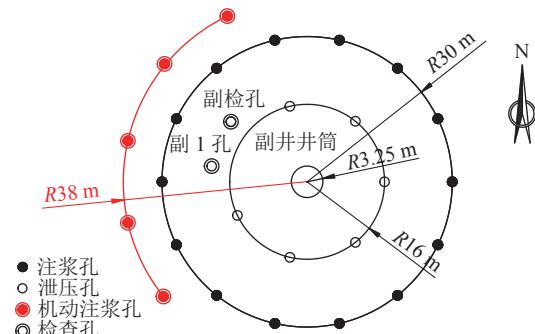


图9 副井独立单元布孔方式
Fig.9 Hole arrangement mode of independent unit of auxiliary shaft

4 综合治理关键技术

4.1 厚松散层地面注浆参数工程化确定方法

为确定郭屯煤矿厚松散层地面高压注浆参数,通过井筒周边钻试验孔开展现场压水试验和高压注浆试验^[26],根据试验孔各层段压水试验测得受注点静水压力和清水压入量(图10),采用承压稳定流井法计算获得受注点压煤与透水率和单位吸水量之间的关系,分析发现郭屯煤矿井筒周边地层透水率随松散层厚度的增加而减小,松散层上部的透水率为5.39 Lu,下部为1.36 Lu,进而得到注浆层段可注性特征。

然后,由高压注浆试验获得试验孔同层段注浆

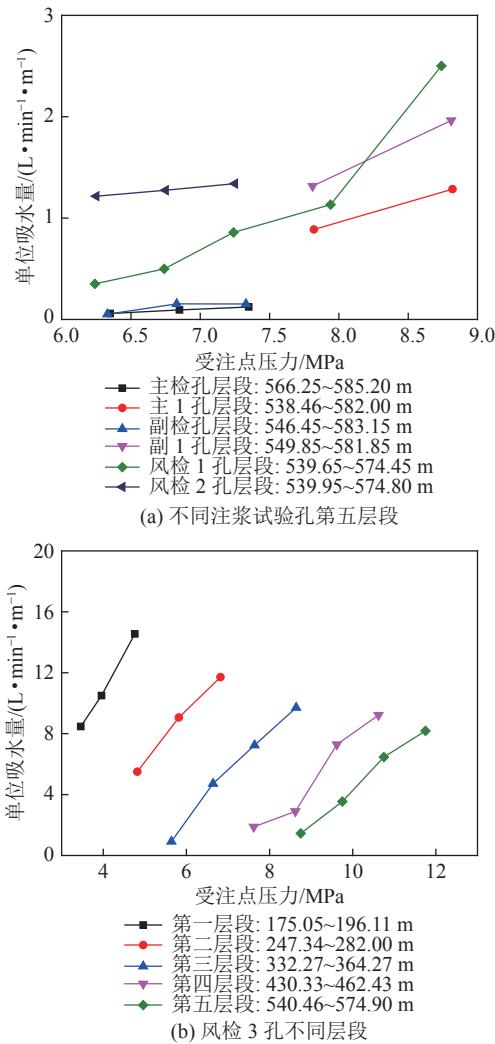


图 10 受注点压入水量与压力关系

Fig.10 Relation between water inflow at injection point and pressure
压力与静水压力间定量比(表4),确定注浆压力的范围;最后通过注浆量与压水量关系获得高压注浆量范围(图11),经分析计算得郭屯煤矿主、副、风3个井筒周边单孔注浆量分别1415、1305、1197 m³(水灰比按1.25:1)。

通过2种测试技术协同分析,确定了高压注浆设计参数,形成了厚松散层地面注浆参数工程化确定方法,如图12所示。

通过钻孔压水试验与地面高压注浆试验结果分析发现,郭屯煤矿厚松散层含水层具有可注性,工业广场试验孔单位吸水量随受注点压力近似呈线性增长关系;当注浆压力为对应注浆层段静水压力2.0~2.5倍时,水泥浆可顺利注入;当注浆层段受注点压水水压力与注浆压力相同时,注浆流量约为压流水量的50%。采用该工程化方法,解决了厚松散层注浆参数确定难题,实现了特厚松散层地面高压安全注浆。

表4 风检3孔注浆压力与静水压力的关系

Table 4 The relationship between the grouting pressure and the hydrostatic pressure of 3 holes in the wind test

| 孔号 | 注浆层位/m | 受注点压力/MPa | 注入流量/(m ³ ·h ⁻¹) | 受注点压力/静水压力 |
|-----|---------------|-------------|---|------------|
| | 540.46~574.90 | 11.82~13.92 | 7.50 | 2.1~2.4 |
| | 430.33~462.43 | 8.73~13.40 | 8.75 | 1.9~2.9 |
| 风检3 | 332.27~364.27 | 7.18~9.99 | 9.58 | 2.0~2.7 |
| | 247.34~282.00 | 4.89~6.69 | 9.42 | 1.7~2.4 |
| | 175.05~196.11 | 4.24~4.80 | 9.69 | 2.2~2.4 |
| 平均 | — | — | — | 2.0~2.5 |

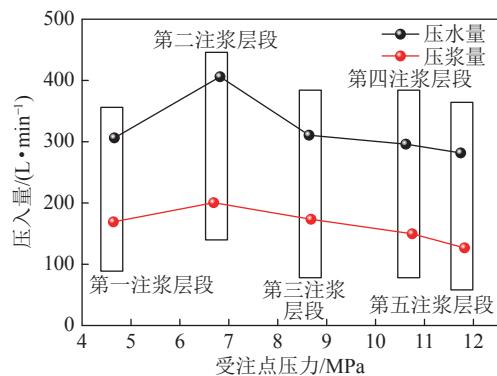


图11 风检3孔同一受注点压力下压水量与压浆液量关系
Fig.11 Relationship between water pressure and grout pressure under pressure of same injection point of 3 holes of wind inspection

4.2 保护在役井筒“泄压-预警”双控地面高压注浆技术

厚松散层固结程度高、可注性差,注浆压力大,存在因高压注浆引发邻近在役井筒次生破坏的重大安全风险。

为此,提出了泄压孔主动泄压^[14]和在役井筒受力变形实时预警(图13)的双重控制方法:

1)在立井井筒外围地层依次布置外圈孔和内圈孔,分别作为注浆孔和泄压孔,泄压孔和注浆孔的钻孔平面布置可根据工程地质条件视情选择径向直线型、梅花型或混合型(图14),通过在役井筒四周布置的高压注浆泄压孔实现主动控压。

注浆孔注浆时,通过泄压孔释放高压注浆产生的超静孔隙水压力,大幅衰减注浆压力对井壁的作用荷载,在有效保护在役井筒安全的同时,按设计要求实施高压注浆。

2)在注浆孔正式注浆前,分别在主、副、风3个井筒内壁布设光纤传感器(图15),实时监测注浆孔地面高压注浆期间井筒内壁变形规律,从而实现注浆期间井筒安全预警。

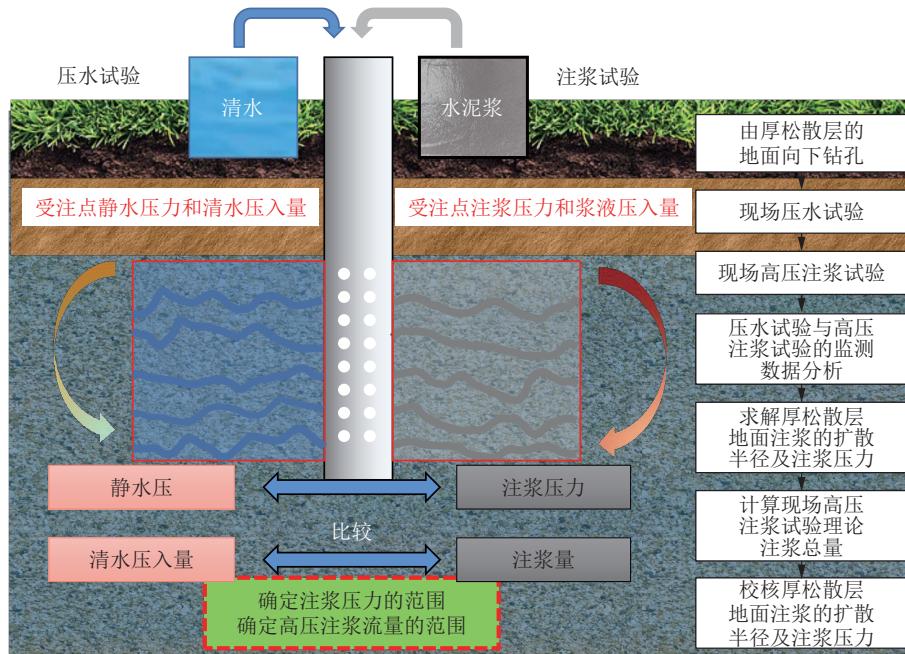


图 12 注浆参数工程化确定方法

Fig.12 Engineering determination method of grouting parameters

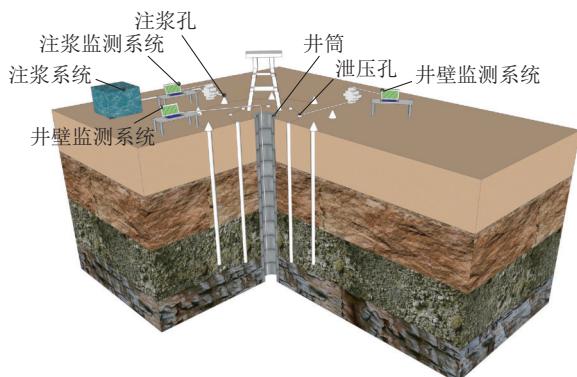


图 13 注浆孔、泄压孔布置

Fig.13 Layout of grouting hole and pressure relief hole

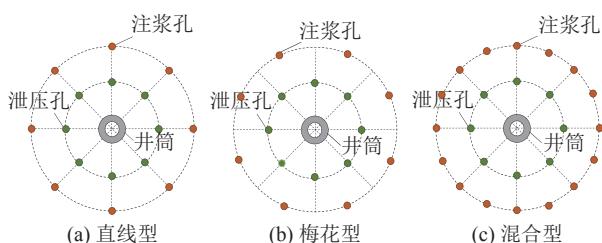


图 14 “注-泄”联合间歇注浆加固技术布孔方式

Fig.14 Borehole layout method of “Grouting-Relief” combined with intermittent grouting reinforcement technology

当井壁受高压注浆影响达到井壁变形预警值或泄压孔孔口出水时,即停止注浆,形成了保护在役井筒“泄压-预警”双控地面高压注浆技术。

4.3 厚松散层单孔多层次注浆新型套管与施工工艺

通常对于松散地层注浆时需要分段分层位进行,

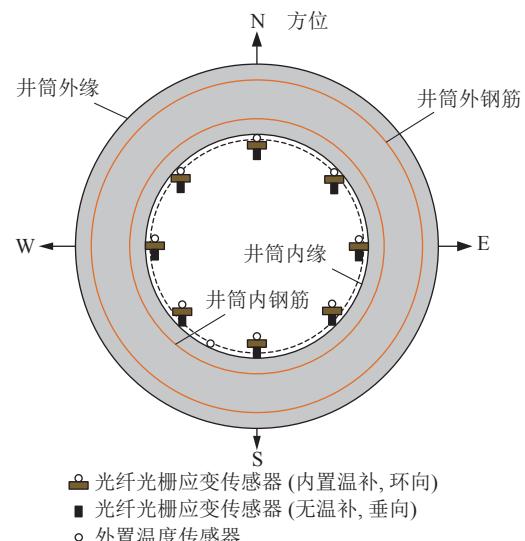


图 15 井壁光纤传感器

Fig.15 Optical fiber sensor for shaft wall

传统单孔多层次注浆时,常采用多层套管分段注浆、射孔注浆和割管注浆等方式,存在施工工序复杂、技术难度大、注浆效果差、成本高等问题,为有效提高厚松散层单孔多层次注浆的效率和安全性,发明了一种厚松散层单孔多层次注浆新型套管,如图 16,图 17 所示。

该套管由内层注浆管和外管组成,外管包括多段交替设置的过滤管和实管,内外管之间设有止浆塞;过滤管外部依次缠绕嵌缝带、尼龙纱网和扎丝以封堵过滤孔防止注浆层段的砂子进入过滤管内,注浆前利用特制的高压射流洗孔器,破坏过滤管外固

化的黏土水泥浆和嵌缝带;并针对该新型套管研发了调浆、过滤管制作、循环泥浆、固井、洗井和注浆等工艺和方法。

根据郭屯煤矿厚松散层地层分布特征,确定注浆孔孔径为190 mm,注浆管为 $\phi 139.7\text{ mm} \times 6.2\text{ mm}$ 钢管,注浆层段为过滤管,其余层段为无孔实管,且各段钻孔在相同的注浆深度内呈相对均匀分布,如图16所示。注浆范围内,注浆孔和泄压孔内均下该新型套管,且注浆层位两孔内过滤管和实管对应布置,在高压注浆向井筒扩散路径上,泄压孔可有效释放高压注浆产生的超静孔隙水压力,极大地提高了深立井地层加固注浆的安全性和注浆效率、降低了施工风险。

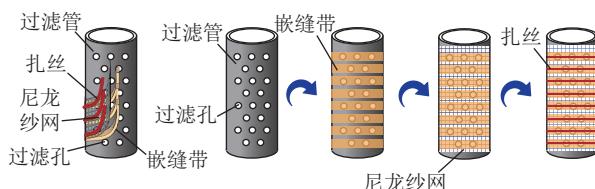


图16 厚松散层单孔多层次注浆新型套管过滤管段

Fig.16 New casing for single hole multi layer grouting in thick loose layer

4.4 在役井筒不停产运营下深孔高压注浆治理预警值确定方法

根据混凝土井壁原始受力状态,以混凝土抗压强度和抗拉强度为承载基础,确定混凝土井壁允许压应变 $[\varepsilon]_c$ 和允许拉应变 $[\varepsilon]_t$,设定立井井筒注浆破坏

预警值,对深立井井壁变形进行三级压应变预警和三级拉应变预警^[27]。

以三级压应变预警值设定为例,第一级压应变预警为黄色预警,该级预警假定井壁混凝土具有35%的安全富余度,其荷载分项系数取1.35,压应变预警范围为 $[\varepsilon]_c - 1.35\varepsilon_t \leq \Delta\varepsilon < [\varepsilon]_c - 1.2\varepsilon_t$;第二级压应变预警为橙色预警,该级预警假定井壁混凝土具有20%的安全富余度,其荷载分项系数取1.20,压应变预警范围为 $[\varepsilon]_c - 1.2\varepsilon_t \leq \Delta\varepsilon < [\varepsilon]_c - \varepsilon_t$;第三级压应变预警为红色预警,该级预警假定井壁混凝土安全富余度为0,其荷载分项系数取1,压应变预警范围为 $\Delta\varepsilon \geq [\varepsilon]_c - \varepsilon_t$ 。同理可设定三级拉应变预警值,见表5。

通过上述方法设定三级压应变预警和三级拉应变预警,形成在役井筒不停产运营下深孔高压注浆治理预警值确定方法,为厚松散层深孔高压注浆由被动控制向主动预警防控转变提供了保障。

5 井筒偏斜治理效果评价

5.1 注浆量

郭屯煤矿正式注浆工程自2017年8月14日开始,2019年6月20日完工,共完成钻探注浆孔37个,泄压孔22个,钻探工程量31 026.8 m³,为设计钻探工程量的100.2%,最终注浆工程量见表6。

由表6可知,郭屯煤矿3个立井井筒累计注浆量达35 536.66 m³,与设计误差控制在26.6%以内,基本实现了注浆量设计要求。

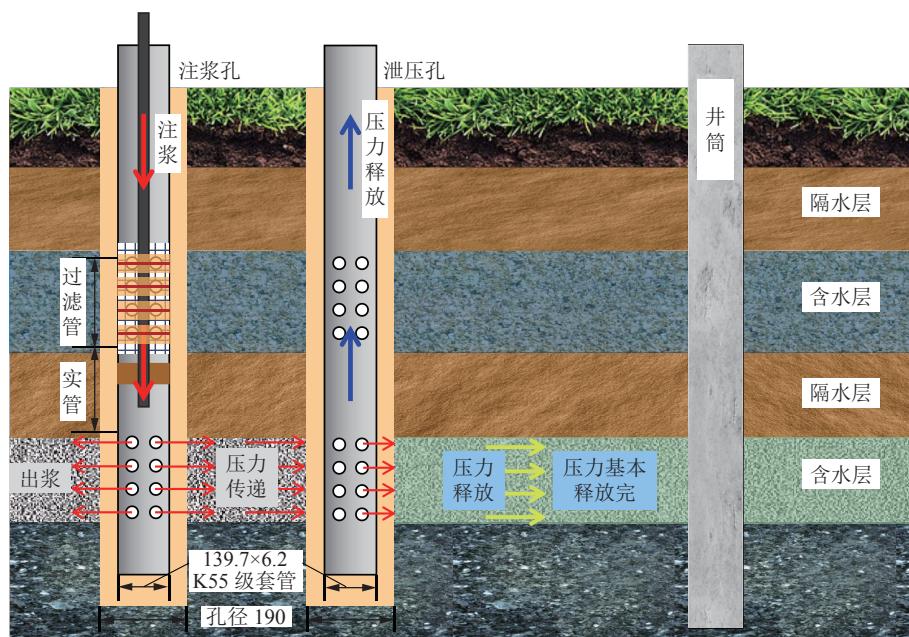


图17 单孔多层次注浆新型套管工艺

Fig.17 New casing technology for single hole and multi-layer grouting

表 5 井筒预警范围
Table 5 Scope of wellbore warning

| 破坏方式 | 预警 | 预警方式 | 预警范围 |
|------|----|-------------------------|---|
| 压 | 黄 | 考虑荷载分项系数1.35 | $[\varepsilon]_c - 1.35\varepsilon_t \leq \Delta\varepsilon < [\varepsilon]_c - 1.2\varepsilon_t$ |
| | 橙 | 考虑荷载分项系数1.20 | $[\varepsilon]_c - 1.2\varepsilon_t \leq \Delta\varepsilon < [\varepsilon]_c - \varepsilon_t$ |
| | 红 | 不考虑荷载分项系数 | $\Delta\varepsilon \geq [\varepsilon]_c - \varepsilon_t$ |
| 拉 | 黄 | 考虑初始压应变折减1/3 | $-2\varepsilon_t/3 < \Delta\varepsilon \leq -\varepsilon_t/3$ |
| | 橙 | 考虑初始压应变折减2/3 | $-2\varepsilon_t/3 - [\varepsilon]_t < \Delta\varepsilon \leq -2\varepsilon_t/3$ |
| | 红 | 考虑初始压应变折减2/3且达到混凝土允许拉应变 | $\Delta\varepsilon \leq -2\varepsilon_t/3 - [\varepsilon]_t$ |

注: ε_t 为注浆前井壁内壁环向应变; $\Delta\varepsilon$ 为注浆过程应变变化值, 压为正, 拉为负。

表 6 注浆工程量统计
Table 6 Statistical of grouting quantities

| 井筒 | 设计注浆总量/m ³ | 实际注浆量/m ³ | 误差/% |
|----|-----------------------|----------------------|------|
| 主井 | 16 980 | 10 960.03 | 35.5 |
| 副井 | 18 270 | 12 563.17 | 31.2 |
| 风井 | 13 167 | 12 013.46 | 8.7 |
| 合计 | 48 417 | 35 536.66 | 26.6 |

5.2 偏斜纠正量

注浆期间至注浆结束后1 a 内, 对郭屯煤矿主、副井井筒进行井口水平变形监测, 根据监测数据分析发现:

注浆期间, 主井井筒井口处向北和向西偏斜量分别减小12 mm 和18 mm; 副井井筒井口处向北和向西分别减小13 mm 和41 mm, 井筒整体偏斜量有减小的趋势。

注浆结束1 a 内, 主井井筒沿南北方向的最大偏斜量由向北52 mm 减少为42 mm, 累计减少10 mm; 沿东西方向的最大偏斜量由向西336 mm 减少为311 mm, 累计减少25 mm; 副井井筒沿南北方向的最大偏斜量由向北62 mm 减少为45 mm, 累计减少17 mm; 沿东西方向的最大偏斜量由向西262 mm 减少为260 mm, 累计减少2 mm。主、副井井筒向北向西不再继续偏移, 同时有回正的趋势, 经分析表明, 工业广场注浆工程在一定程度上抑止了井筒持续的西偏和北偏, 目前偏移运动趋向于稳定。

5.3 地表沉降量

根据郭屯煤矿井筒注浆治理前后工业广场沉降监测数据分析发现: 注浆前, 在主、副、风井井筒周围沉降值较大, 累计沉降值在127~133 mm; 其余工业广场监测点沉降值较井筒附近偏小, 累计沉降值在60~114 mm, 井筒附近的沉降量大于工业广场的沉降量; 注浆期间, 主、副、风井井筒周围沉降值较小, 累计沉降值在10~15 mm; 其余监测点沉降值较井筒附近反

而偏大, 累计沉降值在18~64 mm, 井筒附近的沉降量小于工业广场的沉降量。说明注浆期间注浆区域内的地表沉降明显减小, 且主井、副井、风井附近区域内的监测点下沉量较工业广场监测点的下沉量要小; 注浆结束后1 a 内, 该矿井筒注浆范围内的累计沉降量(3.3 mm) 小于工业广场的累计沉降量(6.5 mm)。

5.4 井筒沉降量

通过井筒井架及绞车基础沉降监测结果分析发现: 注浆结束后1 a 内, 该矿主井井筒井架基础平均累计下沉量为2.4 mm, 主井绞车基础平均累计下沉量为0.7 mm; 副井井架基础平均累计下沉量为4.4 mm, 副井绞车基础平均累计下沉量为4.9 mm; 风井口平均累计下沉量为4.2 mm。观测期间未发现点位下沉量突然变化和不均匀沉降; 下沉速度在变动中有减小的趋势, 符合设计要求, 质量合格。

5.5 光纤监测数据

3个井筒在依次注浆过程中, 井筒变形低于黄色预警值, 井筒均处于安全运行状态, 此外, 郭屯煤矿主、副、风3个井筒注浆治理期间, 井壁内均未发现示踪剂、出浆等现象, 说明通过厚松散层薄基岩井筒偏斜不停产综合治理技术起到了有效衰减高压注浆压力向井壁传递的作用, 大幅降低了施工风险。

综上可见, 郭屯煤矿3个偏斜井筒注浆全周期均处于安全运行状态, 注浆后井筒中心出现回正趋势, 井筒周边下沉速率减缓, 井筒偏斜综合治理取得了预期效果。

6 结 论

1) 郭屯煤矿地层属于典型的厚松散层薄基岩地层, 该矿井筒偏斜与竖向压缩变形分别是煤层非对称开采引发的底含非均匀疏水固结沉降叠加作用下地层水平倾覆推力和竖向附加力所致。

2)本着确保安全、不停产治理的原则, 研究提出的在役偏斜井筒不停产地面注浆综合治理方案, 旨

在通过偏斜井筒周边地层地面高压注浆,加固扰动地层,为实现偏斜井筒不停产治理目标提供了保障。

3)形成的保护在役井筒“泄压-预警”双控地面高压注浆技术、厚松散层地面注浆参数工程化确定方法、在役井筒不停产运营下深孔高压注浆治理预警技术、厚松散层单孔多层次注浆新型套管与施工工艺等系列施工技术,解决了厚松散层薄基岩条件下煤矿偏斜井筒地层加固高压注浆参数确定、井筒泄压-预警保护和单孔多层次安全高效注浆等施工技术与工艺难题。

4)综合监测表明,高压注浆治理过程中,郭屯煤矿主、副、风3个偏斜井筒均处于安全运行状态,治理后井筒向北向西不再继续偏移,同时有回正趋势。研究成果在郭屯煤矿厚松散层偏斜井筒地面高压注浆治理工程得到了成功应用,为今后在类似工程中应用提供参考依据和工程经验。

参考文献(References):

- [1] 苏骏,程桦.疏水沉降地层中井筒附加力理论分析[J].*岩石力学与工程学报*,2000,19(3):310-313.
SU Jun, CHENG Hua. Analysis on additional forces of shaft with drainage of stratum[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(3): 310-313.
- [2] 程桦,苏俊,姚直书.疏水沉降地层竖向可缩性井壁附加力分布规律研究[J].*岩土力学*,2007,28(3):471-475.
CHENG Hua, SU Jun, YAO Zhishu. Study on distributing rule of additional force of compressible shaft wall in hydrophobic settlement stratum[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 471-475.
- [3] 何朋立,王在泉.考虑温度效应的井壁竖向附加力反演分析[J].*岩土力学*,2013(12):3425-3430.
HE Pengli, WANG Zaiquan. Inverse analysis for vertical additional force of shaft wall considering temperature effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013(12): 3425-3430.
- [4] 荣传新,史忠引,程桦,等.沉降地层破裂井壁修复治理工程设计原理[J].*煤炭科学技术*,2004,33(7):4-8.
RONG Chuanxin, SHI Zhongyin, CHENG Hua, et al. Design principles of mine shaft failed liner repair and treatment in sedimentation strata[J]. *Coal science and Technology*, 2004, 33(7): 4-8.
- [5] 程桦,杨俊杰,姚直书,等.钻井井壁可缩性接头模型试验研究[J].*煤炭学报*,2001,26(6):584-589.
CHENG Hua, YANG Junjie, YAO Zhishu, et al. Modeling experiments and studies on retractable flanging device for shaft walls[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(6): 584-589.
- [6] 荣传新,程桦,姚直书.钻井井壁可缩性接头力学特性研究[J].*煤炭学报*,2003,28(3):270-274.
RONG Chuanxin, CHENG Hua, YAO Zhishu. Study on compressive joint mechanics characteristic of shaft-boring lining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(3): 270-274.
- [7] 夏红春,周国庆.地面注浆加固地层法在治理井壁破裂中的应用[J].*矿业安全与环保*,2008,35(4):25-27.
XIA Hongchun, ZHOU Guoqing. Application of ground grouting for stratum reinforcement in preventing shaft-wall disruption[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2008, 35(4): 25-27.
- [8] 周国庆,刘雨忠,冯学武,等.围土注浆缓释和抑制井壁附加力效应及应用[J].*岩土工程学报*,2005,27(7):742-745.
ZHOU Guoqing, LIU Yuzhong, FENG Xuewu, et al. Application and effect of grouting in surrounding soil on releasing and restraining additional stress of shaft lining[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(7): 742-745.
- [9] 付厚利.深厚表土层地面注浆加固过程中井壁应变变化规律[J].*岩土力学*,2003,24(S1):21-23.
FU Houli. Strain variation regularity of shaft lining during grouting reinforcement process for deep topsoil ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(S1): 21-23.
- [10] 刘全林,程桦.立井壁后土层注浆加固机理及注浆参数研究[J].*煤炭学报*,2000,25(5):486-490.
LIU Quanlin, CHENG Hua. Study on grouting mechanism and parameters in the depths of thick topsoil[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(5): 486-490.
- [11] 姚直书,程桦,秦勇,等.厚表土薄基岩复杂地质条件下马头门修复技术[J].*煤炭科学技术*,2016,45(S2):6-9.
YAO Zhishu, CHENG Hua, QIN Yong, et al. Ingate repair technology under complicated geological conditions in thick alluvium and thin bedrock[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 45(S2): 6-9.
- [12] 陈舸,王增光.地面注浆堵水技术在矿山建设中的应用[J].*中国矿山工程*,2009,38(1):36-40.
CHEN Ke, WANG Zengguang. Application of pre-grouting on the ground technology in mine construction[J]. *China Mine Engineering*, 2009, 38(1): 36-40.
- [13] 程桦,张亮亮,姚直书,等.厚松散层薄基岩非对称开采井筒偏斜机理[J].*煤炭学报*,2022,47(1):102-114.
CHEN Hua, ZHANG Liangliang, YAO Zhishu, et al. Mechanism of shaft deflection caused by asymmetric mining in thin bedrock and deep loose strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 102-114.
- [14] 刘孝孔,绪瑞华,赵艳鹏,等.邻近厚松散层既有立井井筒地面注浆地层加固技术[J].*煤炭科学技术*,2022,50(7):127-134.
LIU Xiaokong, XU Ruihua, ZHAO Yanpeng, et al. Ground grouting stratum reinforcement technology for thick loose layer adjacent to existing shaft[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 127-134.
- [15] 彭世龙,程桦,姚直书,等.厚松散层底含直覆薄基岩开采地表沉陷预计及特征研究[J/OL].*煤炭学报*: 1-13 [2022-10-30].
Doi: 10.13225/j.cnki.jccs.w022.067.
PENG Shilong, CHENG Hua, YAO Zhishu, et al. Study on prediction and characteristics of surface subsidence in mining when the bottom aquifer of thick loose layer directly covers thin bedrock[J/OL]. *Journal of China Coal Society*: 1-13 [2022-10-30].
Doi: 10.13225/j.cnki.jccs.w022.067.
- [16] 彭世龙.厚表土薄基岩开采地层沉陷规律及其井筒偏斜致因研

- 究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- PENG Shilong. Study on stratigraphic subsidence law and cause of shaft deflection in thick topsoil and thin bedrock[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [17] HAN J, ZOU J, HU C, et al. Deflection mechanism and safety analysis of coal mine shaft in deep soil strata[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019(4): 1–11.
- [18] HAN J, ZOU J, HU C, et al. Study on size design of shaft protection rock/coal pillars in thick soil and thin rock strata[J]. Energies, 2019, 12(13): 1–17.
- [19] 韩继欢, 杨权威, 杨维好. 深厚松散层薄基岩采动沉陷致裂井壁机理[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(4): 784–790.
- HAN Jihuan, YANG Quanwei, YANG Weihao. Mechanism of fracturing in shaft lining caused by mining subsidence in thin bedrock and deep loose strata[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(4): 784–790.
- [20] 袁 力, 张荣亮, 左红飞, 等. 新河煤矿井筒偏斜的原因及监测对策[J]. *煤炭科技*, 2000, 3(3): 5–7.
- YUAN Li, ZHANG Rongliang, ZUO Hongfei, et al. Causes and monitoring countermeasures of shaft deflection in Xinhe Coal Mine[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2000, 3(3): 5–7.
- [21] 刘焕新. 张双楼煤矿井筒变形原因分析[J]. *煤炭科技*, 2017(1): 46–48.
- LIU Huanxin. Cause analysis of shaft deformation in coal mine of Zhangshuanglou Coal Mine[J]. *Coal Science & Technology*, 2017(1): 46–48.
- 2017(1): 46–48.
- [22] 于保华. 大黄山矿井筒偏斜原因分析与治理措施[J]. *矿山测量*, 1997(1): 17–19.
- YU Baohua. Inclination of the shaft of Dahuangshan Coal Mine cause and countermeasures[J]. *Mine Surveying*, 1997(1): 17–19.
- [23] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- [24] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [25] 李存禄, 余大有, 翁洪周, 等. 厚松散层地面高压注浆参数现场试验确定方法[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(1): 65–70.
- LI Cunlu, YU Dayou, WENG Hongzhou, et al. Parameters determination for ground high pressure grouting in thick alluvium through field test[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(1): 65–70.
- [26] 范吉宏, 戴德胜, 周均民, 等. 深厚松散层地面注浆压力与扩散半径确定方法[J]. *建井技术*, 2020, 41(6): 18–23.
- FAN Jihong, DAI Desheng, ZHOU Junmin, et al. Method to define pressure and diffusion radius of grouting at surface[J]. *Mine Construction Technology*, 2020, 41(6): 18–23.
- [27] 周松柏. 厚表土薄基岩在役冻结井筒偏斜受力状态与注浆治理预警研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.
- ZHOU Songbai. Study on the stress state of slant and grouting treatment of thick overburden thin bedrock in service frozen wellbore[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2018.