



移动扫码阅读

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.

邻近厚松散层既有立井井筒地面注浆地层加固技术

刘孝孔¹, 绪瑞华², 赵艳鹏¹, 程桦^{3,4,5}, 彭世龙^{3,4,5}, 周均民^{1,2}

(1. 山东能源临沂矿业集团有限责任公司, 山东 菏泽 274000; 2. 临沂矿业集团菏泽煤电有限公司 郭屯煤矿, 山东 菏泽 274000;
3. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 4. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;
5. 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 230601)

摘要:为解决厚松散层既有立井井筒地面注浆加固技术难题,以山东巨野矿区郭屯煤矿厚松散层偏斜井筒地面注浆治理为工程背景,针对井筒偏斜特征,采用现场钻孔压水试验与地面高压注浆试验方法,分析不同注浆深度与注浆层段受注点试压水与注浆表头最大压力比值,获得了受注点注浆压力与该点静水压力比值,并得到了厚松散层主含水层的可注性及其注浆技术参数,最终确定了厚松散层偏斜井筒地面注浆治理方案设计原则与施工方案;研发了单井多层段注浆新型套管,形成了“注-泄”联合间歇注浆加固技术。研究表明:①当注浆压力达到静水压力的 2.0~2.5 倍时,水泥浆可顺利注入;②松散层深度越深,地层的单位吸浆量越小,同一注浆段,在相同压力情况下,压水流量是注浆量的 2 倍;③按注浆试验确定的设计注浆量与实际注浆量误差在 27% 以内,随着注浆孔的注浆,其邻近泄压孔出现孔管口出水、孔管内返浆和串浆等现象,实现了泄压目的,且对邻近既有井筒受力变形影响较小;④注浆后,主、副、风井井筒表土段井壁淋水明显减小,且有回正的趋势。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。

关键词:厚松散层;既有井筒;泄压孔;地面注浆;地层加固

中图分类号:TD262 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)07-0127-08

Ground grouting stratum reinforcement technology for thick loose layer adjacent to existing shaft

LIU Xiaokong¹, XU Ruihua², ZHAO Yanpeng¹, CHENG Hua^{3,4,5}, PENG Shilong^{3,4,5}, ZHOU Junmin^{1,2}

(1. Shandong Energy Linyi Mining Group Co., Ltd., Heze 274000, China; 2. Guotun Coal Mine of Heze Coal Power Co., Ltd. of Linyi Mining Group, Heze 274000, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 4. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 5. Anhui Province Key Laboratory of Building Structure and Underground Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to solve the technical problem of ground grouting reinforcement of existing vertical shaft in thick loose layer, taking the ground grouting treatment of deflected shaft in thick loose layer of Guotun Coal Mine in Juye Mining Area of Shandong Province as the engineering background, and according to the shaft deflection characteristics of Guotun Coal Mine, a field borehole water pressure test and ground high-pressure grouting test were used to analyze the ratio of test pressure water at the injection point of different grouting depths and grouting intervals to maximum pressure of grouting head in different grouting depth and grouting layer section, and obtained the ratio of grouting pressure at injection point to hydrostatic pressure at this point, and the injectability and grouting technical parameters of the main aquifer in the thick loose layer are obtained. Finally, the design principle and construction scheme of the ground grouting treatment scheme for the deviated shaft in the thick loose layer were determined. Moreover, a new type of single well multi-layer grouting casing was developed, and the “injection discharge” joint intermittent grouting reinforcement technology was formed. The results show that: ① when the grouting pressure reaches about 2.0–2.5 times of the hydrostatic pressure, the cement slurry can be injected smoothly; ② the deeper the

收稿日期:2021-10-02 **责任编辑:**朱恩光 **DOI:**10.13199/j.cnki.cst.2020-1081

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874005, 52004003)

作者简介:刘孝孔(1964—),男,山东莱芜人,教授级高级政工师,工程师,硕士, E-mail: 001sjw@163.com

loose layer is, the smaller the unit slurry suction volume of the stratum is; in the same grouting section, under the same pressure, the water pressure flow is twice of the grouting amount; ③the error between the designed grouting amount and the actual grouting amount determined by grouting test is within 27%. With the grouting of the grouting hole, the phenomenon of water coming out of the hole orifice, slurry returning and slurry flowing in the hole pipe orifice appeared in the adjacent pressure relief hole, which realized the purpose of pressure relief, and had little influence on the stress deformation of the adjacent existing shaft; ④after grouting, the water inrush on the surface soil section of the main shaft, auxiliary shaft and air shaft decreases obviously, and there is a tendency to return to normal. The research results have been successfully applied in the surface high-pressure grouting treatment project of the deflected shaft in the thick loose layer of Guotun Coal Mine.

Key words: thick loose layer; existing shaft; pressure relief hole; ground grouting; stratum reinforcement

0 引言

自 20 世纪 80 年代以来,我国黄淮地区深厚松散层中相继有 100 多个立井井筒发生了井壁破裂灾害,严重威胁矿井安全生产。研究表明,导致井筒破损的原因大致可分为以下 4 种:①因松散层底部含水层疏水固结沉降导致的井壁受竖向附加力作用发生近水平受压破坏^[1-4];②冻结法凿井过程中因冻结压力致使井壁出现压剪破裂^[5-6];③施工井筒连接硐室群引起围岩多次扰动波及马头门上下段井壁破损^[7-8];④非对称开采导致井筒偏斜等。其中,以第一种井筒破坏最为常见。井筒破坏修复方案取决于井筒破坏机理。对此,国内有关学者和工程技术人员在深入研究不同井筒破坏机理与大量工程实践基础上,提出了多种井壁破裂修复技术和方法^[9-13],如开切井筒卸压槽法、地面注浆加固井筒周围松散层法等。工程实践表明,开切井筒卸压槽法可有效释放、衰减井壁承受的竖向附加力,是目前修复因底部含水层疏水固结沉降引发井壁破裂的最常用的方法。地面注浆加固井筒周围松散层法,旨在通过注浆封堵井筒周边含水地层的水力通道、加固地层,实现对井筒的修复与保护。由于井筒穿越松散层各土层的可注性多变,且邻近既有井筒,因此采用该法最大的困难是在确保邻近既有井筒安全的前提下,科学制定注浆方案和确定注浆参数。在地面注浆修复立井井筒研究方面,文献^[14-15]阐述了地面注浆法治理井壁破裂的机制,地面注浆加固井筒后,作用在井壁上的垂直荷载减少,井壁的竖直附加力得到了有效的缓释和抑制,并结合工程监测应变数据对治理效果进行了分析;付厚利^[16]结合工程实际对厚表土层地面注浆加固过程中井壁的受力特点进行分析,提出了深厚表土层井壁外注浆加固工程的井壁安全保证核心技术;杨秀竹等^[17]基于广义达西定律及球形扩散理论模型,推导出幂律型浆液在砂土中进行渗透注浆时有效扩散半径计算公式;李哲等^[18]依据活塞式驱替注浆渗流的数学模型,推导出高压

注浆过程中浆体区和原水体区的压力分布,以及停止注浆后井底压力消退情况,并通过现场试验建立了注浆井底压力和水灰比的经验关系;葛晓光等^[19]通过对孔隙含水层中的稀水泥浆液运动条件作简化处理,得到考虑含水层纵向扩展的浆液孔隙压强基本方程;刘全林等^[9]和程桦等^[10]借助于弹塑性理论对立井井筒壁后土层注浆加固机制及注浆参数进行了研究,推导了注浆压力、注浆量和注浆孔距的计算公式。现有资料表明,虽然采用地面注浆修复井筒已有山东兴隆庄矿^[20-21]、中煤新集板集矿^[7-8]等成功工程案例,但均因邻近既有井筒,其注浆参数和施工工艺的确定还有待进一步研究解决。笔者以地面注浆地层治理巨野矿区郭屯煤矿井筒偏斜工程为背景,在深入分析井筒穿越地层水文与工程地质条件的基础上,针对井筒偏斜变形及邻近既有偏斜井筒时地面高压注浆治理方案特点,通过前期钻孔注浆试验得到了厚松散层高压注浆技术参数,研发了“注-泄”联合间歇注浆加固技术,确保了郭屯煤矿厚松散层偏斜井筒地面高压注浆治理工程安全高效完成。

1 工程概况

1.1 水文与工程地质条件

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,上覆 530~580 m 巨厚新生界松散层,煤矿设计生产能力 2.4 Mt/a,工厂内主、副风井直径分别为 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下而上分为奥陶系、石炭系、二叠系、新近系和第四系,区域内含煤地层主要赋存于二叠系山西组和石炭-二叠系太原组。矿区东起田桥断层,西界为煤系地层隐伏露头,总体为向东倾斜的单斜构造,地层倾角 5°~10°,平均 6°。区域内新生界含水层自上而下可分为 3 个含水层(组)和 2 个隔水层(组),其主井井筒穿过表土地层主要含、隔水层见表 1。

39 Lu,松散层下部层段压水吕荣值 1.36 Lu。

表 2 风检 3 孔各层段压水试验结果

Table 2 Test results of water pressure in each layer of No.3 check hole in ventilation shaft				
层段	起止深度/m	受注点压力/MPa	压入流量/(L·min ⁻¹)	透水率/Lu
1	540.46~574.90	11.75	281.67	1.36
2	430.33~462.43	10.62	296.00	1.53
3	332.27~364.27	8.64	310.67	1.94
4	247.34~282.00	6.82	406.00	2.93
5	175.05~196.11	4.76	306.33	5.39

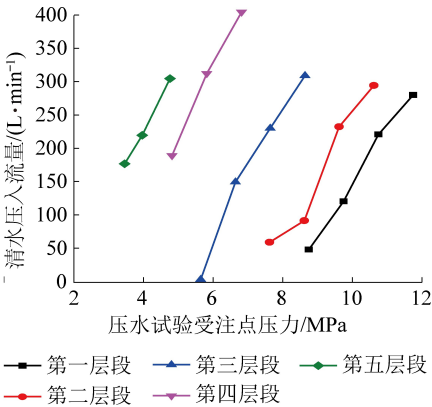


图 3 风检 3 孔受注点压力与压入水量关系

Fig.3 Relation between pressure and amount of water at injected point of No. 3 check hole in ventilation shaft

由国内相关注浆工程实践可知,透水率在 3 或 5 Lu 以上的地层,可注性较好;透水率 1~3(或 5) Lu 之间的地层,可注性一般;透水率小于 1 Lu 的地层,可注性较差。郭屯煤矿井筒深部地层的透水率(吕荣值)小于 2 Lu,可知地层的可注性一般。

风检 3 孔注浆试验结果见表 3 和表 4,经过分析可知:

1)当注浆压力达到静水压力的 2.0~2.5 倍时,水泥浆可顺利注入。

表 3 风检 3 孔各层段注浆试验结果

Table 3 Grouting test results in each layer of No. 3 check hole in ventilation shaft			
层段	受注点压力/MPa	注入流量/(L·min ⁻¹)	受注点压力和静水压力比
1	11.82~13.92	125.0	2.1~2.4
2	8.73~13.40	145.8	1.9~2.9
3	7.18~9.99	159.7	2.0~2.7
4	4.89~6.69	157.0	1.7~2.4
5	4.24~4.80	161.5	2.2~2.4

表 4 相同压力下压水流量与注浆流量对比

Table 4 Comparison of pressure water flow and grouting flow under same pressure				
层段	试验类型	受注点压力/MPa	压入量/(L·min ⁻¹)	压水流量与注浆流量比
1	压水试验	11.74	281.7	2.2
	注浆试验	11.82	126.7	
2	压水试验	10.62	296.0	2.0
	注浆试验	10.75	149.7	
3	压水试验	8.64	310.7	1.8
	注浆试验	8.68	173.3	
4	压水试验	6.82	406.0	2.0
	注浆试验	6.69	200.5	
5	压水试验	4.66	306.3	1.8
	注浆试验	4.64	169.2	

2)松散层深度越深,地层的单位吸浆量越小,单位吸浆量由上部的 161.5 L/min 下降至底部的 125.0 L/min。

3)各注浆段同一受注点近似相同压力下,压水试验流量与注浆流量最小为 1.8,最大为 2.2,平均 2.0。

结合试验孔取得成果,注浆压力设计为:受注点压力控制在静水压力的 2.0~2.5 倍(按地面 0 为静水位计算),上部第 7 段取低值,同时注浆压力根据监测情况可适时调整。

3 厚松散层偏斜井筒地面注浆治理方案

郭屯煤矿井筒地面注浆是基于井筒修复的特殊注浆,不同于一般的立井井筒地面预注浆,不能简单套用规范标准和采用传统地面预注浆经验,更多地需要在确定注浆原则的基础上,进行动态注浆过程监测,分析水文地质及地层变化情况。

3.1 方案设计原则

基于对郭屯煤矿主、副、风井井筒竖向变形与偏斜致因分析,经多次专家论证,决定采用地面地层注浆方法治理该矿井筒偏斜,并提出以下方案设计原则:①井筒周边同时布置注浆孔和泄压孔,以确保邻近既有井筒安全,不影响矿井安全正常生产;②重点注浆加固松散层含水层,以抑制井筒偏斜,衰减底部含水层疏水固结速率及固结变形量;③将主井井筒与风井井筒作为一个整体单元,副井井筒作为一个独立单元来考虑,兼顾 2 个单元之间的相互影响;④松散层注浆段采用高压渗透压密注浆。

3.2 注浆孔布设

1) 注浆钻孔圈径的确定。根据检查孔水压水试验、注浆试验、试验孔取样室内试验及取得的各项成果资料分析,松散层不均匀系数最小为 2.80,最大为 20,影响半径最大为 20 m,基于以上考虑,同时确保井筒安全,故本次注浆孔(外圈孔)布孔圈径以井筒中心为圆心,半径为 30 m 的圆周上(视现场井筒周围建筑物情况进行合理调整),泄压孔(内圈孔)布孔圈径以井筒中心为圆心,半径 16 m 的圆周上(在冻结孔布孔圈径外 3 m 左右)。注浆孔与泄压孔插花布置。

2) 注浆钻孔间距及数量。根据注浆试验取得的参数,在一定压力和注浆量情况下,受注地层注浆扩散半径为 8 m 左右;本次注浆工程注浆扩散半径按 8 m 进行设计,为保证注浆效果,钻孔注浆时要重叠一部分,故本次钻孔设计孔间距为 14 m 左右。主井井筒地面注浆钻孔布置:注浆孔(外圈孔)11 个,孔间距 13.84 m;泄压孔(内圈孔)7 个(包括主 1、主检孔),孔间距 9.81~15.00 m(图 4)。风井井筒地面注浆钻孔布置:注浆孔(外圈孔)11 个,孔间距 13.84 m;泄压孔(内圈孔)7 个(包括风检 2 孔),孔间距 10.534~15.00 m(图 4)。副井井筒地面注浆钻孔布置:注浆孔(外圈孔)14 个,孔间距 13.35 m;泄压孔(内圈孔)8 个(包括副检孔、副 1 孔),孔间距 10.00~13.02 m(图 5)。

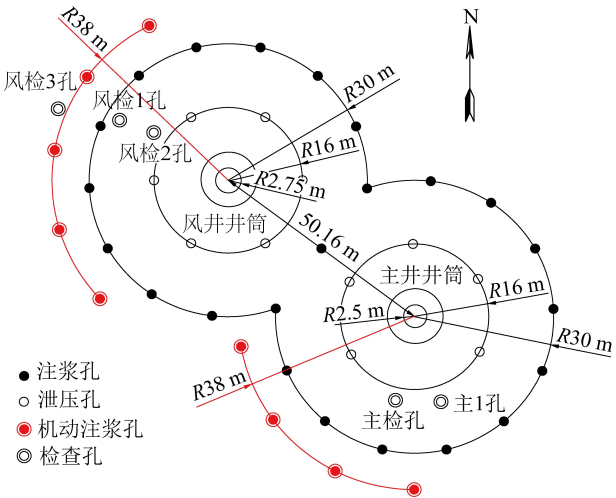


图 4 主-风井注浆钻孔布置

Fig.4 Layout for grouting holes in main shaft and wind shaft

3.3 注浆段划分与孔深

注浆段划分以隔水层(黏土层)为控制层位,以砂层为主,砂层和黏土层互层较多的层段作为注浆段,一次注浆段高控制在 25~50 m。

为保证底含注浆时浆液不窜入基岩风化带,预

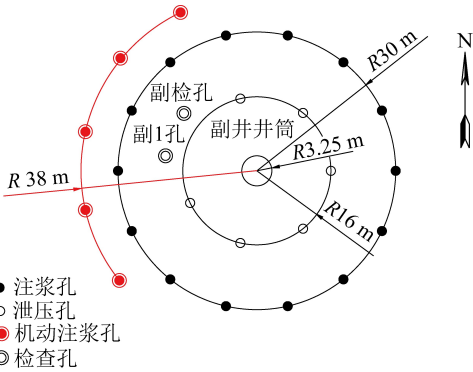


图 5 副井注浆钻孔布置

Fig.5 Layout of grouting hole in auxiliary shaft

留 4 m 左右的保护层,故本次注浆孔(外圈孔)注浆深度为基岩界面深度之上 4 m 左右,泄压孔(内圈孔)深度位为揭露基岩界面停钻,各井筒周边注浆钻孔深度见表 5。

表 5 郭屯矿主副风井注浆钻孔深度

Table 5 Depth of grouting drilling in auxiliary air shaft of the Guotun Coal Mine

井筒	钻孔类型	深度/m
主井	注浆孔	576.00
	泄压孔	580.00
副井	注浆孔	577.00
	泄压孔	583.00
风井	注浆孔	567.00
	泄压孔	571.00

4 “注-泄”联合间歇注浆施工技术

4.1 注浆孔施工

对于新生界松散地层注浆时常需要分段分层进行,单个钻孔进行多层段注浆时,目前常规有 2 种方式:①多层套管分段注浆方式。第 1 层套管下到注浆段上部,用纯水泥浆固管,紧接着钻穿目的层段进行注浆,然后再继续向下钻进,再下小套管,对下一目的层段进行注浆。②射孔或割管注浆方式。全孔下置套管(实管),用纯水泥浆固管(把套管与井壁之间环状间隙进行全封闭),然后在套管内对注浆目的层段分别进行爆破射孔或割管形成注浆通道再进行注浆。以上 2 种情况操作时间长,所产生的费用巨大,技术难度也大,安全性也相应降低。因此,为提高巨厚冲积层单井多层段注浆的效率和安全性,研制了巨厚冲积层单井多层段注浆新型套管,钻孔结构如下:

由于施工场地的限制,本次钻探施工采用直孔钻进和定向斜孔钻进施工,钻孔偏斜率不大于

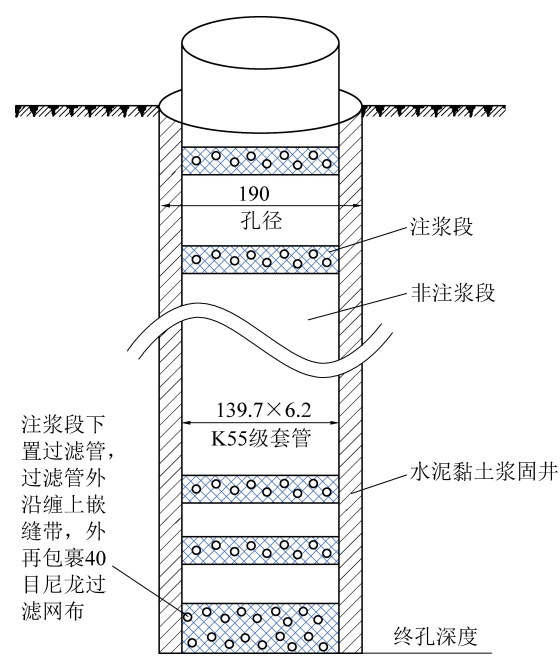


图 6 钻孔结构示意图
Fig.6 Schematic of drilling structure

0.5%,且各段钻孔在相同的注浆深度内呈相对均匀分布。根据郭屯煤矿地层分布特征,厚松散层注浆钻孔全孔孔径 190 mm,下 $\phi 139.7\times 6.2$ mm 无缝钢管,注浆段为花管,非注浆段为实管。

4.2 注浆工艺

根据郭屯煤矿工业广场主、副、风 3 个井筒空间分布特征及其生产功能,为服从于综合治理的整体方案,经讨论,将主井井筒与风井井筒作为一个单元来考虑,副井单独作为一个单元进行科学布孔,设计外圈孔、内圈孔 2 类钻孔,外圈孔进行注浆,内圈孔进行泄压,一个注浆孔在注浆期间,至少有 2 个泄压孔进行注浆压力控制。

采用上行式分段对松散层主要含水层进行注浆,注浆方式采用上行式注浆:即将注浆孔钻至基岩界面以上 4 m 左右停钻,并对松散层底部含水层进行注浆,依次从下至上分段对松散层含水层进行注浆。

4.3 注浆压力与注浆量控制

与建井期立井地面预注浆不同,邻近既有井筒周围注浆,其注浆压力的取值和控制是确保井筒安全的关键。根据厚松散层地面注浆现场试验及注浆治理原则,确定了每段注浆以多次定量注浆与控制压力注浆为主,各注浆段受注点压力为静水压力的 2.0~2.5 倍的注浆压力与注浆量控制方法。

郭屯煤矿主、副、风井井筒周围地面注浆前,已按照设计要求在井壁内布设光纤传感器,实时监测

注浆期间井筒变形,进而确定井筒所受注浆压力。注浆孔注浆压力采用泄压孔和井壁光纤传感器进行双重控制,其各注浆段受注点初始压力为静水压力的 2.0~2.5 倍,当井壁井壁附加注浆受力达到井壁变形预警值或泄压孔孔口压力出水时,均停止注浆;根据现场试验资料,距离注浆孔 21.26 m 时,注浆压力基本完全损耗,充分考虑冻结钻孔及冻结对地层结构的破坏,冻结范围内地层对注浆压力损耗有可能不一样,注浆时泄压孔表头压力小于 1 MPa。

注浆孔各注浆段以实验室和现场压水试验确定的有效孔隙率,按扩散半径 8 m 计算注浆量;各注浆孔 400 m 以下底部注浆段足量注浆,其他注浆段(特别是上部以及矿井生活用水取水层段)适量减小。因第 1 层、第 2 层、第 3 层为主要注浆段,故其设计注浆量取计算量的 100%;400 m 以上每层注浆量按计算量递减。

5 注浆效果分析

郭屯煤矿正式注浆工程自 2017 年 8 月 14 日开始施工,2019 年 6 月 20 日完工,共完成 54 个钻孔的钻探施工,注浆孔 37 个,泄压孔 22 个(包括部分前期试验孔),其中主井井筒周边注浆孔 12 个,泄压孔 7 个;副井井筒周边注浆孔 14 个,泄压孔 8 个;风井井筒周边注浆孔 11 个,泄压孔 7 个,各钻孔平面位置如图 4 和图 5 所示。

设计钻探工程量 30 971 m,实际钻探工程量 31 026.8 m,完成钻探工程量 100.2%。注浆孔严格按照“注-泄”联合间歇注浆加固技术进行注浆,整个注浆过程持续 19 个月,最终注浆工程量见表 6。

表 6 主、副、风井井筒注浆工程量
Table 6 Grouting quantities for main, auxiliary and air shafts

井筒	注浆总量/ m^3	设计注浆量/ 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

由表 6 实际注浆工程量可知,主、副、风井井筒各注浆层段总设计注浆量为 48 417 m^3 ,实际注浆量为 35 536.66 m^3 ,实际注浆量与设计注浆量误差控制在 26.6%以内,与设计注浆量基本吻合。

3 个井筒周边各注浆孔注浆过程中,邻近主、副、风 3 个井筒变形与应力监测系统监测数据低于黄色预警值,井筒均处于安全运行状态;井壁内未发现示踪剂、出浆等现象,说明通过注浆孔和泄压孔

“注-泄”联合间歇注浆技术发挥了衰减注浆压力向井壁的传递作用,大幅降低了施工风险;通过井筒偏斜测量观测结果分析发现,2017年10月至2018年6月期间,主井井筒井口处的偏斜量北方向减小了12 mm,西方向减小了18 mm;副井井筒井口处北方向减小了13 mm,西方向减小了41 mm,井筒偏斜量减小,有回正的趋势;注浆后,主、副、风井井筒表土段井壁淋水明显减小,达到了预期效果。

6 结 论

1)与常规工程类比法相比,通过现场试验孔注水与注浆试验获取的注浆参数,可大幅提高注浆参数选取的科学性,确保注浆效果达到预期目标。

2)松散层同类地层透水率随深度的增加而减小。郭屯矿松散层上部层段压水吕荣值5.39 Lu,下部层段压水吕荣值1.36 Lu,属于可注性一般地层,当厚松散层地面高压注浆压力达到2.0~2.5倍的静水压力时,水泥浆可顺利注入拟加固地层;各注浆层位压水试验和注浆试验受注点压力相同的情况下,注浆流量是压水流量的二分之一。

3)研发的“注-泄”联合间歇注浆加固技术可大幅衰减高压地层注浆对邻近既有井筒传递的压力,确保井筒安全运行。郭屯煤矿3个井筒各注浆层段总设计注浆量为48 417 m³,实际注浆量为35 536.66 m³,实际注浆量与设计注浆量误差控制在26.6%以内,注浆后,主、副、风井井筒表土段井壁淋水明显减小,且有回正的趋势,可为今后类似条件工程应用了提供成功工程经验。

参考文献(References):

[1] 苏 俊,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):310-310.
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):310-310.

[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] 程 桦,周瑞鹤,姚直书,等.厚表土薄基岩凿井突水溃砂井筒破坏治理技术研究[J].煤炭科学技术,2020,49(4):176-185.

CHENG Hua, ZHOU Ruihe, YAO Zhishu, *et al.* Study on shaft damage control technology of water inrush and sand burst in drilling process with thick topsoil and thin bedrock [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 176-185.

[5] 程 桦,蔡海兵.我国深立井冻结法凿井安全现状与思考[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2013,33(2):1-6.
CHENG Hua, CAI Haibing. Safety situation and thinking about deep shaft construction with freezing method in China[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 33(2): 1-6.

[6] 荣传新,尹建辉,王 彬,等.深厚冲积层破损井筒修复过程中的控制冻结技术[J].煤炭科学技术,2020,48(1):157-166.
RONG Chuanxin, Yin Jianhui, WANG Bin, *et al.* Controlled freezing technology for repairing damaged shaft in deep alluvium [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 157-166.

[7] 张基伟,李方政,喻新皓,等.深部冻结井筒内壁早期温度-应力场演化特征研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):69-76.
ZHANG Jiwei, LI Fangzheng, YU Xinhao, *et al.* Research on evolution characteristics of early-age temperature-stress field of inner lining at deep frozen shaft [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 69-76.

[8] 程 桦,张亮亮,姚直书,等.厚表土薄基岩凿井井筒突水溃砂次生竖向受压破坏机理研究[J].煤炭工程,2020,52(1):1-7.
CHENG Hua, ZHANG Liangliang, YAO Zhishu, *et al.* Study on the mechanism of secondary vertical compression failure caused by water and sand inrush during shaft boring through thick alluvium and thin bedrock [J]. Coal Engineering, 2020, 52(1): 1-7.

[9] 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.

[10] 程 桦,杨俊杰,姚直书,等.凿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.

[11] 荣传新,程 桦,姚直书.凿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.

[12] 郭轲轶,王建敏.受采动影响立井井筒破坏机理及抗变形设计[J].煤炭科学技术,2020,48(10):179-184.
GUO Keyi, WANG Jian'e. Failure mechanism and anti-deformation design of vertical shaft affected by coal mining [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 179-184.

[13] 陈 轲,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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 杨秀竹,雷金山,夏力农,等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学,2005,26(11):1803-1806.
YANG Xiuzhu,LEI Jinshan,XIA Linong, *et al.* Study of grouting diffusion radius of exponential fluids [J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(11):1803-1806.

[18] 李 哲,仵彦卿,张建山. 高压注浆渗流数学模型与工程应用[J]. 岩土力学,2005,26(12):1972-1976.
LI Zhe,WU Yanqing,ZHANG Jianshan. Mathematical model of high pressure injection cement liquid and its application[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(12):1972-1976.

[19] 葛晓光,钱家忠,汪家权,等. 井壁破坏注浆治理中的浆液孔隙压强模型[J]. 煤田地质与勘探,2003,31(6):37-39.
GE Xiaoguang,Qian Jiazhong,WANG Jiaquan, *et al.* Porous grout pressure modeling in mending shaft lining ruptures[J]. Coal Geology & Exploration,2003,31(6):37-39.

[20] 席京德,许延春,官云章. 兴隆庄矿主副井筒破坏预防性治理的研究与经验[J]. 建井技术,1999(1):3-5.
XI Jingde,XU Yanchun,GUAN Yunzhang. Research and experience on preventive treatment of main and auxiliary shaft failure in Xinglongzhuang mine [J]. Mine Construction Technology, 1999(1):3-5.

[21] 马江淮,严家平,张海涛,等. 板集煤矿副井井筒地面注浆堵水技术与效果评价[J]. 煤矿安全,2011,42(4):45-47.
MA Jianghuai,YAN Jiaping,ZHANG Haitao, *et al.* Surface grouting water plugging technology and effect evaluation of auxiliary shaft in Banji coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2011,42(4):45-47.