

厚松散层下高压注浆上覆地层变形光纤监测研究

冯明振^{1*}, 路 旭¹, 储诚想¹, 胡生强¹, 左启兴², 许时昂^{2,3}

¹中煤新集能源股份有限公司, 安徽 淮南

²安徽理工大学煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽 淮南

³矿山地质灾害防治安徽省高校重点实验室, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年6月8日; 录用日期: 2026年7月12日; 发布日期: 2026年7月30日

摘 要

为揭示厚松散层条件下高压注浆过程中地层内部变形的发育层位与变化特征, 以安徽某矿区地面定向钻孔高压注浆工程为背景, 采用分布式光纤监测技术对钻孔全剖面地层变形进行连续监测, 结合不同层位应变响应特征, 分析注浆扰动作用下地层变形发育特征。研究表明: 分布式光纤监测技术能够实现厚松散层条件下注浆过程地层内部变形的全钻孔、连续化、高精度监测, 有效识别地层变形发育位置, 为注浆影响范围评价提供了新的技术手段。监测结果显示, 高压注浆扰动引起多个层位地层发生不同程度变形, 其中关键变形区主要分布于380~480 m深度范围。地层变形总体以压缩应变为主, 局部发育拉应变, 表明注浆过程中浆液扩散主要通过充填孔隙裂隙和挤密压缩周围地层实现, 其变形传递过程具有明显的向上衰减与分段变形的特征。研究揭示了关键变形层位形变发育演化过程, 可为高压注浆参数优化、浆液扩散范围评价以及矿区水害防治工程设计提供重要技术支撑。

关键词

厚松散层, 高压注浆, 上覆地层, 变形, 光纤监测

Research on Optical Fiber Monitoring of Overlying Stratum Deformation under High-Pressure Grouting in Thick and Loose Strata

Mingzhen Feng^{1*}, Xu Lu¹, Chengxiang Chu¹, Shengqiang Hu¹, Qixing Zuo², Shi'ang Xu^{2,3}

¹China Coal Xinji Energy Co., Ltd., Huainan Anhui

*第一作者。

文章引用: 冯明振, 路旭, 储诚想, 胡生强, 左启兴, 许时昂. 厚松散层下高压注浆上覆地层变形光纤监测研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 1104-1113. DOI: 10.12677/me.2026.144109

²State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

³The Key Laboratory of Universities in Anhui Province for Prevention of Mine Geological Disasters, Huainan Anhui

Received: June 8, 2026; accepted: July 12, 2026; published: July 30, 2026

Abstract

To investigate the development horizons and variation characteristics of stratum deformation during high-pressure injection in a thick loose layer, this study focuses on a directional surface borehole grouting project in a mining area of Anhui. Distributed fiber monitoring technology was employed to continuously measure deformation across the entire borehole profile. By combining strain response features from different horizons, the development characteristics of stratum deformation under grouting disturbance were analyzed. The research shows that distributed fiber monitoring can achieve full-hole, continuous, and high-precision monitoring of internal stratum deformation during the injection process under thick loose layer conditions, effectively locating deformation zones and providing a new technical means for evaluating the injection influence range. Monitoring results indicate that high-pressure injection disturbance caused varying degrees of deformation in multiple layers, with key deformation areas mainly distributed within the depth range of 380~480 m. Overall, stratum deformation was dominated by compressive strain, with local development of tensile strain, indicating that grout diffusion primarily occurs by filling pores and fractures and compacting the surrounding strata. The deformation transmission process exhibits clear upward attenuation and segmented characteristics. This study clarifies the deformation evolution process in key horizons, which can provide important technical support and a scientific basis for optimizing high-pressure injection parameters, evaluating grout diffusion range, and designing water hazard prevention engineering in mining areas.

Keywords

Thick Loose Layer, High-Pressure Injection, Overlying Strata, Stratum Deformation, Fiber Monitoring

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国东部矿区厚松散层覆盖条件下,煤层开采过程中顶板含水层发育、导水通道复杂,顶板突水灾害防控始终是制约矿井安全高效开采的关键技术难题[1]。高压注浆区域改造技术作为当前顶板水害治理的重要手段,其核心在于通过向煤层顶板岩层高压注入浆液,实现裂隙-孔隙空间充填、导水通道封堵及破碎岩体加固,进而构建具有稳定隔水性能的人造隔水层体系,为深部煤炭资源安全开采提供重要保障[2] [3]。然而,该技术本身作为一种高强度的人工干预,其产生的浆液压力会显著扰动上覆地层,可能引发地表抬升、层间离层乃至地面构筑物损坏等次生灾害[4] [5]。因此,精确掌握高压注浆过程中上覆地层的扰动变形规律,对工程设计与风险控制具有重要的指导意义。

近年来,国内外学者围绕上覆地层变形监测开展了大量研究,逐步形成了以水准测量、GNSS 监测、全站仪监测以及合成孔径雷达干涉测量(InSAR)等为代表的地表变形监测技术体系[6] [7]。其中,传统水

准测量具有精度高、数据可靠等优点,被广泛应用于采煤沉陷盆地监测;GNSS 技术能够实现连续动态观测,适用于大范围地表形变监测[8];InSAR 技术则凭借覆盖范围广、时空分辨率高等优势,在矿区区域性沉陷监测中得到广泛应用,实现了地表沉陷信息由点监测向面监测的发展[9]。然而,上述方法主要针对地表变形开展监测,难以直接获取深部地层内部变形信息,对覆岩结构演化及关键层变形过程的反映仍存在一定局限性。随着矿山智能监测技术的发展,针对覆岩内部变形的监测研究逐渐受到关注[10]。多点位移计、钻孔倾斜仪、钻孔伸缩计以及分布式光纤监测等技术被引入采动覆岩监测领域[11]。其中,分布式光纤传感技术凭借连续分布式测量、空间分辨率高、抗电磁干扰能力强以及长期稳定性好等优势,能够实现监测钻孔全深度范围内应变信息获取,为揭示覆岩移动与关键层变形规律提供了新的技术手段[12]。相关研究表明,基于 BOTDR 等技术的分布式光纤监测系统能够有效识别采动裂隙带发育过程、覆岩弯曲变形特征以及含水层扰动规律,实现了由离散点监测向连续剖面监测的转变[13]。总体来看,现有研究主要集中于煤层开采诱发地表沉陷监测或注浆效果评价等方面,对于厚松散层条件下高压注浆过程中地层内部变形的时空演化规律及其与浆液扩散过程之间的耦合关系仍缺乏系统认识。特别是受监测手段和观测尺度的限制,目前对于高压注浆作用下地层内部变形的空间分布特征及演化机制仍缺乏系统认识。

本研究以安徽某矿区工作面上覆地层高压注浆工程为背景,采用分布式光纤传感技术开展全过程原位监测,实现了注浆扰动条件下上覆地层变形特征的获取。在此基础上,系统分析了注浆过程中松散层内部应变场的时空演化过程,揭示了高压注浆扰动下地层变形的位置、空间范围及动态发展过程,为类似条件下的注浆工程优化设计与次生灾害防控提供了技术支持。

2. 工程概况

本研究工作面所在区域上覆新生界松散层,厚度为 542.20~713.50 m,平均厚度约 580 m,整体呈现典型的巨厚松散层结构[14]。主采 5 煤层厚 3.34~7.35 m,其平均厚度为 6.01 m,埋深较大。研究区注浆目的层为 9 煤顶板砂岩,注浆段深度约 645 m。工程地质与水文地质勘察结果表明,研究区上覆砂岩含水层与第四系含水层之间发育潜在导水通道,严重威胁矿井安全生产。为有效阻断含水层间水力联系、降低回采期间突水风险,工作面回采前采用地面定向钻孔高压注浆技术对顶板含水层进行区域改造。研究区域地层柱状图如图 1 所示。

3. 光纤传感技术

3.1. 测试原理

光纤传感技术是伴随光导纤维及光纤通信技术迅速发展起来的一种以光为载体、光纤为媒介,感知和传输外界信号的新型传感技术[15]。本次研究采用 BOTDR 测试技术,该技术通过检测光纤中的背向布里渊散射信号获得光纤测线沿线的应变值。BOTDR 传感原理示意图如图 2 所示。

当光纤沿线发生轴向应变时,光纤中的背向布里渊散射光的频率将发生漂移,频率的漂移量与光纤所受的轴向应变呈良好的线性关系[16]。其计算公式如下:

$$\nu_B(\varepsilon) - \frac{d\nu_B(T)}{dT}(T - T_0) = \nu_B(0) + \frac{d\nu_B(\varepsilon)}{d\varepsilon}\varepsilon \quad (1)$$

式中, $\frac{d\nu_B(T)}{dT}$ 为温度影响系数,约为 1 MHz/K; $T - T_0$ 为温度变化; $\nu_B(\varepsilon)$ 是应变为 ε 时的布里渊频率的偏移量; $\nu_B(0)$ 是应变为 0 时的布里渊频率的偏移量。若温度变化不超过 2℃,温度的影响可以忽略不计[17]。



Figure 1. Regional stratigraphic histogram
图 1. 区域地层柱状图

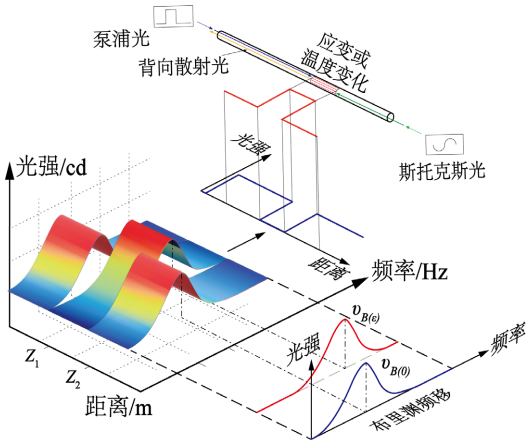


Figure 2. The schematic diagram of BOTDR principle
图 2. BOTDR 原理示意图

3.2. 监测设备

本课题所采用的监测设备是由中电科四十一所研制的 AV6419 单端分布式光纤应变解调仪。该设备空间采样间隔最小可达 5 cm，采样空间分辨率为 1 m，最大动态范围 20 dB，采样空间重复性 $\leq 20 \mu\epsilon$ ，最大测试长度 100 km [18]。现场监测所用传感光纤为了适应岩土体变形，设计为金属铠传基索光缆，内部植入加强件，应变传递系数为 0.0478，最大拉断力可达 20,000 N。其光纤解调仪及监测所用光缆如图 3 所示。

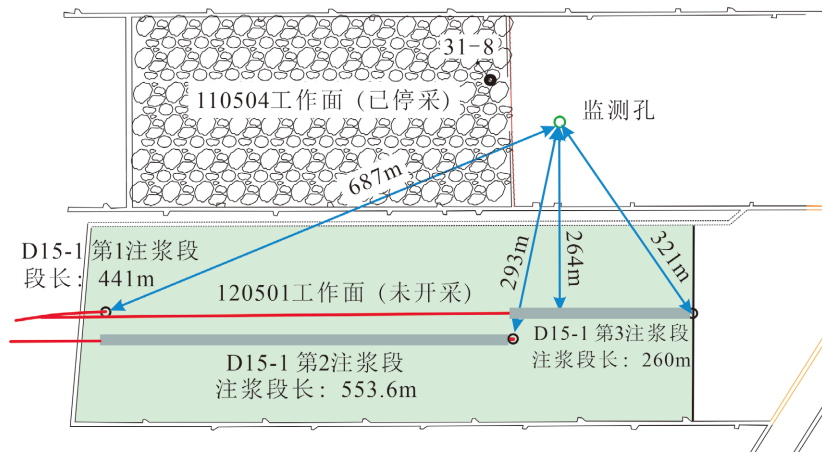


Figure 3. Optical fiber demodulator and monitoring cable
图 3. 光纤解调仪及监测所用光缆

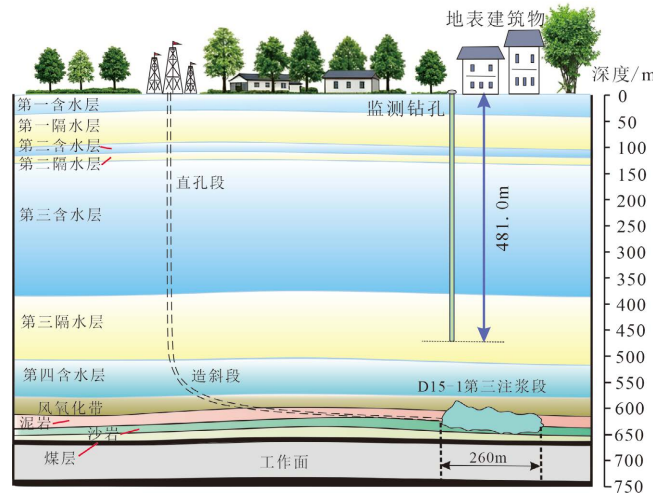
4. 监测系统

4.1. 监测系统布置

为实现监测钻孔地层断面的移动变形监测，本次工程现场采用基于地面垂直布设钻孔和孔内植入分布式传感光缆的方式构建地层变形监测系统。监测钻孔施工的位置距离注浆段垂直水平约 264 m，监测钻孔位置平面位置示意图如图 4(a)所示。该系统由监测钻孔、传感光缆和光纤解调仪三个主要部分组成，钻孔的安装深度为 481 m，位于第三隔水层下部，其监测钻孔走向剖面图如图 4(b)所示。在布设过程中，为保障光缆与周边地层的有效耦合，采用黏土球、石英砂等材料分层回填，并确保固结耦合时长，定期监测分布式光纤应变变化数据。钻孔监测系统安装时间已经超过 3 个月，至注浆监测前，传感光缆与对应地层耦合稳定性满足测试要求。



(a) 监测钻孔平面位置



(b) 监测钻孔走向剖面图

Figure 4. Monitoring the plane position and profile of the borehole
图 4. 监测钻孔平面位置及剖面图

4.2. 注浆参数

D15-1 分支孔沿工作面走向布置，分为三个注浆段顺序施工。各段注浆参数差异显著：前两段钻遇断层，采用水泥 - 黏土混合浆；第三段未遇断层，注浆量大幅增加，采用水泥单浆。D15-1 注浆位置与监测钻孔的倾向剖面示意图如图 5 所示。D15-1 距监测孔约 256 m，其间相对距离较近，故重点分析其影响。D15-1 注浆不同段注浆参数如表 1 所示。以注浆关键节点(4 月 15 日)前后数据为分析时段，选用 3 月 24 日监测数据作为背景值。

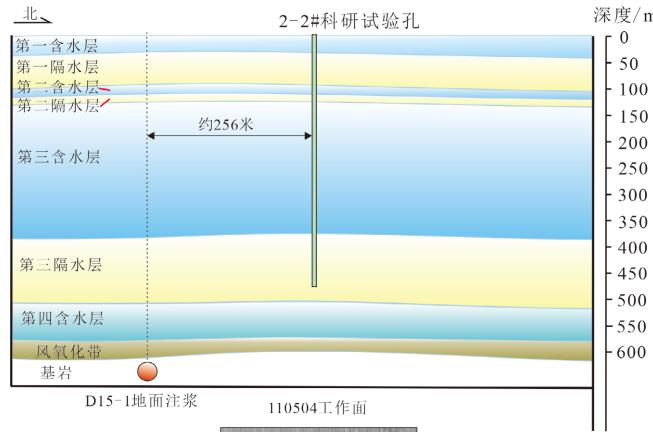


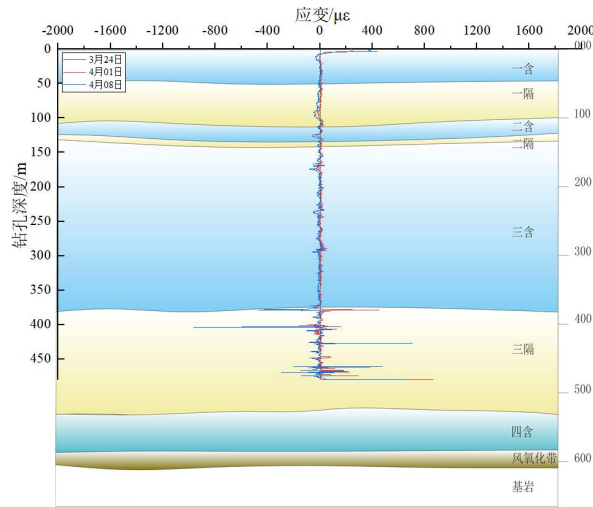
Figure 5. D15-1 grouting position and monitoring borehole dip profile diagram
图 5. D15-1 号注浆位置与监测钻孔倾向剖面示意图

Table 1. Grouting parameter table of D15-1 grouting section
表 1. D15-1 注浆段注浆参数表

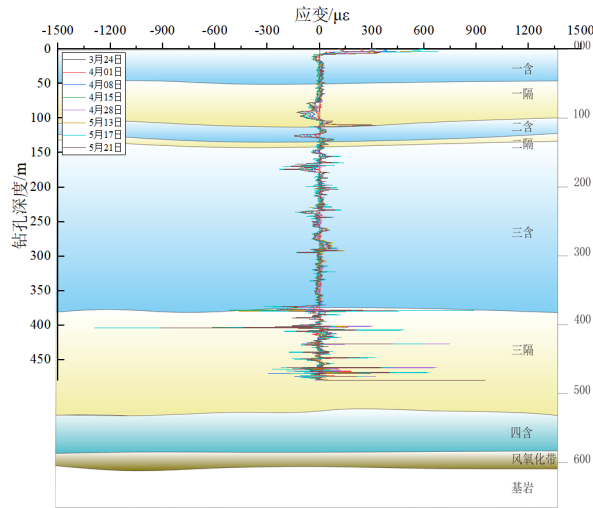
分段	注浆量/m ³	注入水泥/t	注入黏土/t	孔口压力/MPa
1	527.0	78.7	125	8.90
2	3887.0	1034	415.7	8.80
3	44935.0	30,298	/	10.05

5. 监测结果分析

根据 2-2#监测孔 3 月 24 日至 5 月 21 日期间分布式光纤监测获得的地层应变结果可知(图 6)，高压注浆前后研究区不同深度地层发生了较为明显的变形响应，且不同层段变形特征存在差异性。总体来看，在 0~380 m 深度范围内，各监测层段应变变化幅度较小，地层整体处于相对稳定状态，注浆活动对该区段的影响有限。相比之下，380~480 m 深度区间地层变形最为显著，该层段对应“三含”与“三隔”交界面下部区域，是注浆作用影响较为集中的关键层位。监测结果表明，该区间应变响应呈现明显的空间非均匀性特征，主要表现为“三隔”地层局部压缩变形与拉伸变形交替发育。其中，“三含”范围内监测到的应变幅值最高，主要分布于 400~800 $\mu\epsilon$ 之间，局部区域出现较强的应变集中现象；而其余层段应变变化相对较弱，应变幅值大多维持在 100~200 $\mu\epsilon$ 范围内。上述监测结果表明，注浆过程中浆液主要沿“三含”与“三隔”交界附近的土体产生明显扰动，使局部地层发生压密、抬升及差异变形等响应。尤其是在“三含”底部及“三隔”顶部接触区域，应变集中现象较为突出，是注浆改造作用最为强烈的区域。



(a) 注浆前地层变形情况



(b) 注浆后地层变形情况

Figure 6. Data results of 2-2# sensing optical cable before and after grouting
图 6. 2-2#传感光缆注浆前后数据结果

基于钻孔测线范围监测结果,分别选取不同层位应变监测特征点进行分析。根据应变分布,选择 91 m、125 m、169 m、295 m、373 m、379 m、401 m 及 446 m 共 8 个典型深度测点开展应变分析。所选特征点分别对应一隔、二含、三含上部、三含中部、三含下部、三隔上部、三隔中部、三隔下部。上述测点组合兼顾了关键变形层位、应变峰值及主要地层单元,能够较为全面地反映注浆扰动下地层的时空变形演化规律。图 7 系统展示了注浆过程中注浆压力、注浆量与不同深度地层形变特征点的时序演化关系。由图可见,各层位对注浆动态的应变响应存在显著差异。其中,401 m 和 446 m 深度处的拉应变响应与注浆压力及注浆量变化表现出高度一致的协同性,反映该层段对注浆激励具有即时且敏感的变形响应;而其余层位的应变响应则呈现明显的滞后特征,表明其形变响应受地层物性、渗透路径或应力传递时效等因素的调控,机制相对复杂。上述时序特征为深入理解注浆诱发地层变形传播规律及层间耦合效应提供了重要依据。

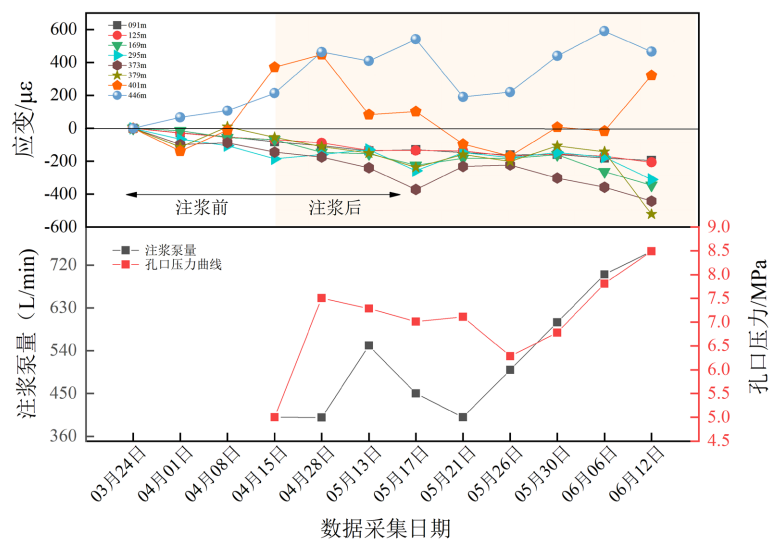


Figure 7. Comparison of dynamic changes of grouting parameters and feature point deformation

图 7. 注浆参数与特征点变形动态变化对比

此外,进一步分析,373 m 测点压应变持续增大,由注浆前约 $-50\ \mu\epsilon$ 发展至注浆后约 $-440\ \mu\epsilon$;379 m 测点后期压应变增长最为显著,最终达到约 $-520\ \mu\epsilon$,表明该区域受到较强的注浆挤压作用,浆液扩散及孔隙压密效应较为明显。整体上未出现连续、大范围拉应变区,说明注浆引起的地层变形以压密压缩为主,而非整体张裂抬升。结合钻孔深度分布推测,在浆液扩散过程中,会通过层间应力传递影响邻近隔水层,从而形成不同层位间的差异化应变响应。

为分析注浆作用对测线范围内地层变形的影响特征,对监测数据开展了时空演化分析,研究注浆前后不同层位地层形变的时程响应及空间展布规律。由图 7 可见,注浆活动对研究区二含、二隔、三含及三隔等四套地层均产生了不同程度的影响,但各层位响应特征存在明显差异。其中,三隔地层应变响应最为显著,表现出较大的应变幅值和持续增长趋势;而二含、二隔及三含地层应变变化相对较弱,整体处于较低水平。

其试验孔地层形变时程关系展布结果如图 8 所示,从时间演化特征来看,监测钻孔各层位应变数据在 4 月 15 日前整体较为平稳,未出现明显异常变化,表明该阶段地层结构处于相对稳定状态。随着注浆工程的持续实施,各层位应变逐渐增大,并呈现出由深部向浅部逐步传递的发展特征。尤其是在注浆影响范围内,地层变形首先出现在钻孔深部层位传递,随后向上覆地层扩展,反映出浆液扩散及压力传递

过程具有明显的垂向递进特征。这种由下而上的变形响应规律从侧面验证了浆液扩散范围及注浆改造效果。

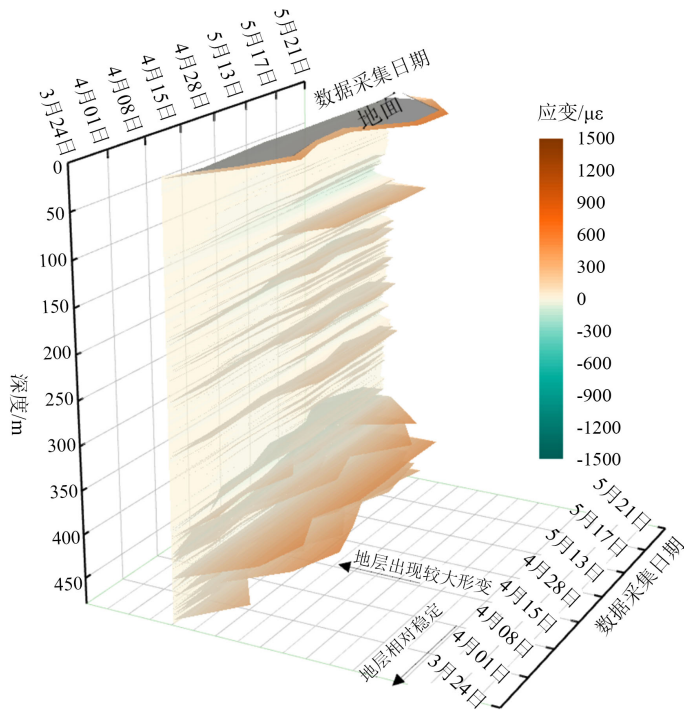


Figure 8. The distribution results of formation deformation time history relationship in 2-2# scientific research test hole
图 8. 2-2#科研试验孔地层形变时程关系展布结果

6. 结论

- 1) 分布式光纤监测技术实现了注浆全过程上覆地层的连续、高精度变形监测，能有效识别深部变形位置与应变分布，为评价注浆扰动提供了新手段，解决了松散层内部变形场时空演化的监测难题。
- 2) 监测表明高压注浆下地层变形呈非均匀性和层位差异性，380~480 m 深度(三隔与四含交界)为应变集中区，幅值远高于其他层段，显示注浆压力场受岩性组合与界面效应控制。
- 3) 高压注浆诱发松散层变形具有分层传递、时间滞后和空间分异特征，总体以压缩应变为主，局部发育拉应变，反映浆液扩散以充填孔隙裂隙和挤密压缩为主，研究可为类似工程优化设计与灾害防控提供技术支撑。

基金项目

- 1) 企业重大科技项目：ZMXJ-LXKY-JS-2024-23；
- 2) 省级重点实验室项目——矿山地质灾害防治安徽省高校重点实验室开放基金资助(2024-MGDP-04)。

参考文献

- [1] 吕玉广, 乔伟, 胡发仑, 等. 煤层顶板水害风险保护系数法评价技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 180-188.
- [2] 韩风军, 柯贤敏, 蒲治国, 等. 高承压煤矿首采工作面防治水技术[J]. 煤炭技术, 2020, 39(5): 105-107.
- [3] 靳德武, 李超峰, 刘英锋, 等. 黄陇煤田煤层顶板水害特征及其防控技术[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 205-

- 213.
- [4] 孙文超, 王兆会, 等. 深部坚硬顶板工作面冲击地压多元协同防控技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1736-1750.
 - [5] 高超, 岳春辉, 徐乃忠, 等. 多煤层重复采动地表全周期沉陷规律及稳定性分区研究[J]. 煤炭工程, 2026, 58(3): 206-214.
 - [6] 许时昂, 吴海波, 欧元超, 等. 采煤沉陷松散层变形研究现状与分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(17): 6999-7013.
 - [7] 杨嘉威, 谭志祥, 邓喀中. 基于 DS-InSAR 的矿区铁路线沉陷监测与规律分析[J]. 煤炭工程, 2021, 53(9): 143-148.
 - [8] 张平松, 许时昂, 傅先杰, 等. 煤层采动巨厚松散层全断面监测及内部变形特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 628-644.
 - [9] 靳雨田, 蔡音飞, 等. SBAS-InSAR 矿区沉陷监测与动态预计模型参数研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(11): 30-34.
 - [10] 朱磊, 古文哲, 柴敬, 等. 采动覆岩全场变形演化过程分布式光纤监测研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 43-50.
 - [11] 张平松, 程晋全, 许时昂, 等. 厚松散层下区域注浆改造地层扰动变形特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 246-258.
 - [12] 丁甲, 董东林, 胡志强, 等. 巨厚松散层下煤层开采的抗渗透性破坏和煤柱安全性研究——以口孜东矿为例[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 1071-1083.
 - [13] 许时昂, 张平松, 程刚, 等. 砂土压缩变形传感光缆耦合试验分析与预测模型研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(5): 1570-1582.
 - [14] 张平松, 许时昂, 吴海波, 等. 厚松散层下煤层开采全地层移动变形时空演化特征[J]. 煤炭学报, 2026, 51(1): 239-254.
 - [15] 高磊, 李红生, 吴铁卫. 基于分布式光纤传感技术的导水裂隙带高度探查方法及其应用[J]. 中国煤炭地质, 2025, 37(9): 73-80, 36.
 - [16] 刘少林, 张丹, 张平松, 等. 基于分布式光纤传感技术的采动覆岩变形监测[J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1118-1125.
 - [17] 侯公羽, 胡志宇, 李子祥, 等. 分布式光纤及光纤光栅传感技术在煤矿安全监测中的应用现状及展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S1): 96-110.
 - [18] 张丹, 张平松, 施斌, 等. 采场覆岩变形与破坏的分布式光纤监测与分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 952-957.